

Doctoral Thesis

**DEVELOPMENT OF A NEW, MONITORING BASED
DYNAMIC TRUCK WEIGHT REGISTRATION SYSTEM
TO ANALYSE REAL OPERATIONAL IMPACT CONDITIONS
AND THE CONSEQUENCE FOR SUCCESSIVE LOADING MODELING
ON STEEL BRIDGES – EXEMPLIFIED AT THE EUROPABRÜCKE**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science in Civil Engineering
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

Dissertation

**ENTWICKLUNG EINES NEUEN, MONITORING BASIERTEN
DYNAMISCHEN GEWICHTSERFASSUNGSSYSTEMS
ZUR BESCHREIBUNG DES REALEN EINWIRKUNGSKOLLEKTIVS
VON SCHWERVERKEHRS-EINHEITEN UND ANALYSE DER KONSEQUENZ FÜR DIE
RESULTIERENDE LASTMODELLIERUNG VON STAHLBRÜCKEN - AM BEISPIEL DER
EUROPABRÜCKE**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaft
eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Dipl.-Ing. Robert Veit-Egerer
Matrikelnummer 9725114
Einwanggasse 17/2/3; A-1140 Wien

Gutachter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink
Technische Universität Wien - Institut für Tragkonstruktionen Forschungsbereich für
Stahlbau

Gutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Heuer
Technische Universität Wien - Institut für Hochbau & Technologie
Forschungsbereich für Baumechanik & Baudynamik

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG & PROBLEMSTELLUNG	15
1.1	Zum Bauwerk Europabrücke	15
1.2	Motivation - Historische Verkehrsentwicklung	19
1.3	Fokus	21
1.4	Zum zeitlichen Bezug der modellierten, realen Betriebsbeanspruchung gegenüber dem fortwährend dokumentierten Schwerverkehrsaufkommen	23
2	DAS PERMANENTE MONITORINGSYSTEM EUROPABRÜCKE.....	25
2.1	Aufbau der instrumentierten Mess-Querschnitte	27
3	MONITORING-BASIERTES DYNAMISCHES GEWICHTSERFASSUNGSSYSTEM (DYGES) - ERWEITERUNG DER BISHER VORLIEGENDEN SCHWERVERKEHRSSCHARAKTERISTIK DER ASFINAG MAUT SERVICE GMBH	31
3.1	Zum herangezogenen Prinzip der experimentellen Fahrzeugerkennung	33
3.2	Notwendigkeit zur Inanspruchnahme der Mustererkennung (Pattern Recognition)	36
3.3	Kalibrierungsmessung	41
3.3.1	Numerische Referenzwerte	42
3.3.2	Ergebnisse der Eichfahrten als Verschiebungs-Geschwindigkeits-Charakteristik	44
3.4	Implementierte, methodische Komponenten hinsichtlich LKW Klassifizierung	48
3.4.1	Grundzüge (Gesamtheit) des DYGES-Algorithmus	48
3.4.2	DYGES Prozessblock I: DYGES Verlaufsfunktion & Ergebnisse der Eichfahrten als Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Charakteristik	52
3.4.3	DYGES Prozessblock II: Ereignis-Erfassung und -Charakterisierung	59
3.4.4	DYGES Prozessblock III: Automatisierte Entnahme der Charakteristik des Schwerverkehrs & Erstellung des LKW-Lastkollektivs	65
3.5	Erörterung notwendiger algorithmischer Spezifika	67
3.5.1	Zur Charakterisierung eines LKW-Überfahrts-Ereignisses	67
3.5.2	Ausgewählte Mechanismen zur Stabilisierung des Algorithmus	68
3.5.3	Präzisierungen zur konsistenten Ereignis-Skalierung (Kalibrierung)	71
3.5.4	Konsistenz des DYGES-Algorithmus mit der ermüdungsrelevanten Zyklenzählung (Rainflow-Methode)	72
3.6	Handhabung der Fälle entlang der Grenzen des definierten Prozess-Bereiches und darüber hinaus	74
3.6.1	Zur Prozess-Größe Geschwindigkeit	74
3.6.2	Zur Prozess-Größe Lastintensität (Tonnen)	77
3.7	Finale Diskussion zur vorgelegten, experimentellen Dynamischen Gewichtserfassung	78
3.7.1	Zwischenstand	83
4	EVALUIERUNG DER DYGES-ERGEBNISSE ANHAND VORLIEGENDER, EXTERNER UNTERSUCHUNGEN VON REALEM SCHWERVERKEHR.....	85
4.1	Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand offizieller Zählraten der ASFINAG Mautservice GmbH.....	86
4.1.1	Wesentlichste Ergebnisse	89
4.1.2	Bewertung.....	93
4.2	Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand der im Eurocode festgelegten „Standard“-Lastkraftwagen.....	94
4.2.1	Vergleichsparameter Achszahl infolge Fahrzeugtyp	94
4.2.2	Vergleichsparameter zugewiesenes Fahrzeuggewicht infolge Verkehrstyp	95
4.2.3	Vergleichsparameter durchschnittliches Fahrzeuggewicht des einzelnen Schwerfahrzeuges	96
4.3	Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand externer Untersuchungen an der gleichen bzw. sehr ähnlicher Schwerverkehrs-Einwirkung	98
4.3.1	A13 Brenner-Autobahn: Wiegeeinrichtung der Polizei am Standort Brennersee 1998.....	100
4.3.2	A12-Inntalautobahn: Bridge-Weigh-in-Motion Untersuchungen Dr. Petschacher 2008	102
4.3.3	BAB A61 Deutschland – Dynamische Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) 2004/2005	105
4.3.4	Gesamtbetrachtung	108
4.4	Resümee	109

5	MECHANISCHE MODELLIERUNG & ANALYTISCHE PLAUSIBILISIERUNG DES DYNAMISCHEN GEWICHTSERFASSUNGSSYSTEMS DYGES	111
5.1	Ziele	111
5.2	Theorie	111
5.3	Spektralanalyse & Systemidentifikation	119
5.4	Model-Updating	122
5.4.1	Vorgehen	122
5.5	Ergebnisse	125
5.5.1	Schwerfahrzeug-Modell fahrende Einzellast: Überfahrtsgeschwindigkeit vs. Kragarm-Vertikalverformung	125
5.5.2	Schwerfahrzeug-Modell fahrende Einzellast: Überfahrtsgeschwindigkeit vs. Kragarm-Beschleunigungen	133
5.5.3	Ad 2-achsige bzw. 5-achsige Schwerfahrzeuge	138
5.5.4	Fazit	139
5.6	Diskussion der implizierten Modellierungs-Genauigkeit	140
5.6.1	Vergleich der Absolutwerte: Überfahrtsgeschwindigkeit vs. Kragarm-Vertikalverformung	140
5.6.2	Vergleich der Absolutwerte: Überfahrtsgeschwindigkeit vs. Kragarm-Beschleunigung	142
5.6.3	Abweichungen in der Verschiebungs-/Geschwindigkeitscharakteristik für einen hypothetischen 25t LKW – hergeleitet anhand der durch die beiden Eichfahrzeuge gegebenen Grenzkurven	144
5.6.4	Abweichungen in der Beschleunigungs-/Geschwindigkeitscharakteristik für einen hypothetischen 25t LKW – hergeleitet anhand der durch die beiden Eichfahrzeuge gegebenen Grenzkurven	147
5.6.5	Einfluss der Spurtreue des Schwerverkehrs am 1.Fahstreifen (LKW-Spur)	151
5.6.6	Einfluss der Nebenspur (2.Fahstreifen) auf den DYGES-Messquerschnitt	154
5.6.7	Einfluss des Belastungsgeschehens der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn	155
5.7	Zusammenfassung	157
5.7.1	Ausblick und Überleitung zu weiterführenden Kapiteln	160
6	ANWENDUNG	161
6.1	Sondermessung 2007 – Ganzheitliche Erfassung der Betriebsbeanspruchung	162
6.2	Integrale Auswertungen und Analysen zur Sondermessung 2007 im Hinblick auf rechnerische Fragestellungen zur Nutzungsdauer maßgeblicher Bauteile	164
6.3	Ganzheitliche Evaluierung der gemessenen Belastung an analytischen Rechenmodellen der Brückenstruktur	166
6.4	Entwicklung eines in-situ basierten Lastmodells als Eingangsgröße baustatischer Nachrechnungen	168
6.5	Gegenüberstellung DYGES Lastmodell & Eurocode	174
6.5.1	Vergleich hinsichtlich Ermüdung (Alterung als Voranschreiten der Ermüdungsschädigung)	175
6.5.2	Vergleich hinsichtlich Tragfähigkeit (α – Wert äquivalente Gesamtbetrachtung)	178
7	ZUSAMMENFASSUNG	183
7.1	Das Monitoring-basierte Dynamische Gewichtserfassungssystem DYGES	183
7.2	Ergebnisse zum realen LKW-Lastkollektiv	184
7.3	Evaluierung der DYGES-Zählung & -klassifizierung anhand externer Untersuchungen	185
7.4	Mechanische Modellierung des Dynamischen Gewichtserfassungssystems DYGES	186
7.5	Lastmodell für den auf der Europabrücke vorherrschenden Schwerverkehr anhand der realen Betriebsbeanspruchung	187
7.6	Schlussbemerkungen	188
8	LITERATURVERZEICHNIS	191
9	ANHANG 1: VERKEHRENTWICKLUNG A13 EUROPABRÜCKE 1964 – 2015	195
10	ANHANG 2: SCHWACHSTELLENANALYSE 2006	209
10.1	Problematik (visueller Eindruck)	211
10.2	Dynamische Basisuntersuchung der Bauteilreihe Diagonalstreben	217
10.2.1	Messung	218
10.2.2	Methodik - Referenzwerte für den Verlauf der Eigenfrequenzen	220
10.2.3	Ergebnisse der Auswertung	226
10.3	Bewertung	229
10.3.1	Gemessene, wirksame Integrität der Diagonalstreben-Anschlussknoten	229
10.3.2	Weiterführende Interpretation – Befundung aus Sicht des Stahlbaus	237
10.3.3	Begleitende Inspektion & Sanierung der ASFINAG	239
10.4	Auswirkungen auf den weiteren Verlauf der Brückenuntersuchungen hinsichtlich Bauteil-Ermüdung	242

11	ANHANG 3: PROGRAMMIERTE DYGES-BASISSEQUENZ & VISUALISIERUNG DER WESENTLICHSTEN ELEMENTE IM ZUGE DES GENERIERENS DER DYGES-FUNKTION	245
12	ANHANG 4: AUSWERTUNG DER DYGES LANGZEITREIHE – PERMANENTES MONITORING 07 / 2004 – 12 / 2007	267
13	ANHANG 5: SONDERMESSUNG 2007 – GANZHEITLICHE ERFASSUNG DER BETRIEBSBEANSPRUCHUNG	273
13.1	Messprogramm	276
13.2	Video-basierte Erfassung des tatsächlichen Belastungsgeschehens	277
13.2.1	Erste Auswertungen und Analysen	278
13.3	Laser-basierte Erfassung der globalen Brückenverformung	283
13.3.1	Erste Auswertungen und Analysen	286
13.4	Beschleunigungs-basierte Erfassung der Kragarmverformungen (aus der Dynamischen Gewichterfassung – DYGES über dem Pfeiler II)	287
13.4.1	Erste Auswertungen und Analysen	287
13.5	Dehnmessstreifen-basierte Erfassung des Kraftflusses in einem repräsentativen Querverband	288
13.5.1	Erste Auswertungen und Analysen	291
13.6	Erfassung der Temperatureinwirkung in Form eines Sensor-Profiles über einem ausgewählten Querschnitt	292
13.6.1	Erste Auswertungen und Analysen	293
13.7	Meteorologische Einwirkungsgrößen	295
13.7.1	Erste Auswertungen und Analysen	295
14	ANHANG 6: INTEGRALE AUSWERTUNGEN UND ANALYSEN ZUR SONDERMESSUNG 2007 IM HINBLICK AUF RECHNERISCHE FRAGESTELLUNGEN ZUR NUTZUNGSDAUER MASSGEBLICHER BAUTEILE	297
14.1	Einfluss der nichtlinearen Temperatureinwirkung auf den Brückenquerschnitt	299
14.2	Temperatur-Kompensation	301
14.2.1	Globale Tragwerksverformung	302
14.2.2	Durchbiegung am Kragarm (über dem Pfeiler II)	305
14.2.3	Örtliche Beanspruchung der Querverbände	305
14.3	Zustandsgröße-übergreifende Verifizierung der Betriebsbeanspruchung	307
14.3.1	Festgelegte Konvention hinsichtlich der DMS-basierten Auswertung der Querverbände	308
14.3.2	Auswertung der häufigsten Belastungsszenarien	311
14.3.3	Diskussion zum beobachteten Kraftfluss in den Diagonalen	328
14.3.4	Diskussion zur Größenordnung der wirksamen Normalkräfte in den Querverbänden	330
14.3.5	Abschließende Schlüssel-Erkenntnisse & Ausblick auf die weiterführenden Themen Lastmodellierung und Bauteil-Schädigungsanalyse	332
15	ANHANG 7: GANZHEITLICHE EVALUIERUNG DER GEMESSENEN BELASTUNG AN ANALYTISCHEN RECHENMODELLEN DER BRÜCKENSTRUKTUR	337
15.1	Rechnerische FE-Analyse an globalen Brückenmodellen	339
15.1.1	Modellierung & Plausibilität	339
15.1.2	Der Lastfall 490 kN gemäß EN 1991-2	344
15.2	Rechnerische FE-Analyse an einem ausgewählten Querverband	348
15.2.1	Verformungen & Normalkräfte	348
15.2.2	Spannungs-Konzentrationsfaktor an den Kerben	349
16	ANHANG 8: ENTWICKLUNG EINES IN-SITU BASIERTEN LASTMODELLS ALS EINGANGSGRÖSSE BAUSTATISCHER NACHRECHNUNGEN	355
16.1	Grundlage - Ausgewählte Aspekte der Betriebsfestigkeit (Ermüdung)	357
16.1.1	Das Prinzip der Schadensakkumulation	358
16.1.2	Überführung der Beanspruchungs-Zeit-Funktion in Zählungsmatrizen	359
16.1.3	Überführung der Palmgren-Miner Schadensakkumulation in schädigungsäquivalente Betriebsbeanspruchung infolge Schwerverkehr	361
16.2	Zusammenfassung zum Vorgehen	364
16.3	Extrapolation der Daten auf eine „Regel-Woche“	365
16.4	Reale Lastszenarien - Zuweisung von Belastungseigenschaften aus DYGES (Monitoring)	370
16.5	Integrales Lastmodell	371
17	ANHANG 9: GEGENÜBERSTELLUNG DYGES LASTMODELL & EUROCODE	377

17.1	Die Ermüdungslastmodelle (LM E) der ÖNORM B 1991-2.....	379
17.1.1	Lastmodell 1 (Tragfähigkeit) bzw. Ermüdungslastmodell (ELM 1)	381
17.1.2	Ermüdungslastmodell 2	383
17.1.3	Ermüdungslastmodell 3	384
17.1.4	Ermüdungslastmodell 4	385
17.1.5	Ermüdungslastmodell 5	387
17.1.6	Erörterung zu den Unterschieden zwischen den fünf Lastmodellen-Ermüdung des EC	387
17.2	Unterschiede zwischen dem EC-basierten und dem Monitoring-basierten Lastmodell	388
17.2.1	Vergleich hinsichtlich Ermüdung (Alterung als Voranschreiten der Ermüdungsschädigung)	389
17.2.2	Vergleich hinsichtlich Tragfähigkeit (α – Wert äquivalente Gesamtbetrachtung).....	394
17.3	Abschließende, zusammenfassende Gedanken zur vorliegenden Gegenüberstellung	402
17.3.1	Zum α – Wert als herangezogene Vergleichsgröße	403
17.3.2	Zur isolierten Betrachtung des Randfeldes Schönberg	405
17.3.3	Zur rechnerischen Auswirkung auf die Nutzungsdauer ausgewählter Bauteile	407
17.3.4	Fazit	407
18	ANHANG 10: ZÄHLUNG UND KATEGORISIERUNG DER AUTRETENDEN LASTBILDER (BELASTUNGSSZENARIEN)	409
19	ANHANG 11: TABELLIERTE KOMBINATORIK DER SCHÄDIGUNGSÄQUIVALENTE ALS NEU FORMULIRTER ANSATZ ZUR BAUWERKSALTERUNG	427

VORWORT

Die vorliegende Doktorarbeit ist das Ergebnis von langjähriger, berufsbegleitender Forschung. Dabei steht die Erfassung und Modellierung der realen Schwerverkehrsbelastung an hochrangiger Straßeninfrastruktur als Grundlage für weiterführende Analysen zum Trag- und Alterungsverhalten von maßgeblichen Brückenbauteilen im Vordergrund. Dahinter steht die Intention, dem normativen Vorgehen ein alternatives Lastmodell aus messungs- bzw. zählungsbasierten, aktuellen Verkehrsdaten gegenüberzustellen.

Dem Verfasser – einem leitenden Angestellten bei VCE (Vienna Consulting Engineers) – wurde im Zuge dieser Studien die Möglichkeit gegeben, die Thematik mit seinem Eintritt in die Firma 2003 aufzugreifen und einen Forschungsschwerpunkt auf diesem Gebiet zu setzen. Daher ist an dieser Stelle in großer Dankbarkeit zunächst der für Forschung und Entwicklung hauptverantwortliche Geschäftsführer Prof. Dr. Helmut Wenzel zu nennen. Weiters sei in diesem Zusammenhang die maßgebliche Unterstützung der Nationalen Forschungsprojekte DYGES und HOT SPOT bzw. der Europäischen Forschungsprojekte SAMCO, LESSLOSS, DETAILS und FADLESS hervorgehoben.

Herrn Professor Dr. Josef Fink, Vorstand des Forschungsbereiches für Stahlbau am Institut für Tragkonstruktionen an der Technischen Universität Wien gilt mein besonderer Dank für das Zustandekommen dieser Arbeit im Rahmen des ersten Gutachtens. Seine Anregungen, Korrekturen sowie die zahlreichen gemeinsamen Diskussionen zur Detaillierung der vorliegenden Materie waren mir eine wertvolle Hilfe bei der Erstellung dieser Dissertation.

In gleicher Weise danke ich Herrn Professor Dr. Rudolf Heuer, Leiter des Laboratoriums für Modelldynamik am Institut für Hochbau & Technologie der Technischen Universität Wien (Forschungsbereich für Baumechanik & Baudynamik) für die Übernahme des zweiten Gutachtens. Für seinen begleitenden Einsatz bei der gemeinsamen Erörterung der einzelnen Aspekte dieser Arbeit sowie für die angenehme Zusammenarbeit in all den Jahren möchte ich mich sehr herzlich bedanken.

Während meiner bisherigen beruflichen Laufbahn bei VCE gibt es spannender Weise weit reichende Möglichkeiten des interdisziplinären Austausches mit den Bereichen Messtechnik und Software-Programmierung. Für die tolle Unterstützung bei der Bearbeitung gemeinsamer Projekte sei an dieser Stelle den Herren Martin Stöger und Ing. Eduard Krenn mein herzlichster Dank ausgesprochen.

Eine in enger thematischer Verknüpfung zur Dissertation entstandene und von mir betreute Diplomarbeit enthält wesentliche Auswertungen und Ergebnisse, welche als maßgebliche Aspekte Eingang in diese Doktorarbeit gefunden haben. Mein kollegialer Dank gilt daher auch Frau Dipl.-Ing. Verena Dreitler für die wertvolle und gewissenhafte Bearbeitung der gemeinsamen Analysen.

Dass diese - sich in erster Linie auf Feldversuche stützende - Dissertation in dieser Form überhaupt entstehen konnte, geht auf die langjährige Zusammenarbeit mit der ASFINAG Alpenstraßen GmbH zurück. Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Generaldirektor Dipl.-Ing. Klaus Fink sowie Herrn Ing. Wolfgang Wietek für deren Wohlwollen und die aktive Unterstützung beim Zustandekommen von allen durchgeführten Studien.

Abschließend möchte ich aber in übergeordneter Weise meiner Familie, d.h. meiner Lebensgefährtin Monika, meinem Sohn Ruben und meinen Eltern Karla und Alfons danken. Sie alle haben mir durch die betreffenden Jahre hindurch auf ihre jeweils besondere Weise großen Rückhalt und Kraft gegeben. Daher widme ich ihnen allen diese Arbeit und muss in großer Trauer und Betroffenheit zur Kenntnis nehmen, dass mein Vater deren Abschluss nicht mehr miterleben konnte.

KURZFASSUNG

Die Europabrücke gehört einer Tragwerksgeneration an, die Anfang der 1960er Jahre errichtet wurde. Die Brücke stammt damit aus einer Ära, in der Masseneinsparung die Maxime des Bauens war. Die kontinuierlich steigende wirtschaftliche Bedeutung der hochrangigen Straßen-Infrastruktur, der ersatzlose Wegfall des Transitvertrages zwischen Österreich und der Europäischen Union (2003) sowie die EU-Osterweiterung führten zu einer aktuellen, nicht vorhersehbar gewesenen Beanspruchungssituation im Vergleich zur a priori angenommenen „natürlichen“ Bauwerksalterung während der Planung.

In langjähriger Zusammenarbeit mit der ASFINAG Alpenstraßen GmbH wurden zahlreiche Messungen und Sonderuntersuchungen durchgeführt, welche in der Realisierung einer Dauerüberwachungsanlage im Jahre 2003 mündeten. Dabei wurde den veränderten, realen Verkehrsverhältnissen heute im Vergleich zur Projektierung in den späten 1950er Jahren Rechnung getragen, da nicht nur ein rund fünfmal so hohes Schwerverkehrsaufkommen wie seinerzeit vorliegt, sondern dabei gleichzeitig auch durchschnittlich mehr als fünfmal so viel Fracht mitgeführt wird. Gleichzeitig sollte aber ein Gegengewicht zur konservativen Diktion des Eurocode hinsichtlich einer gegebenenfalls notwendigen Nachrechnung bestehender Tragwerke entstehen.

Ein erstes, übergeordnetes Ziel der vorliegenden Forschungstätigkeit bestand darin, die durch Zählstellen (Mautportal) vorliegende Charakteristik des Schwerverkehrs am Brenner um die Eigenschaft der Tonnagen je LKW-Einheit zu erweitern. Diese Bemühungen mündeten in der Entwicklung eines neuen, messungsbasierten Algorithmus zur Dynamischen Gewichtserfassung von Schwerfahrzeugen (= DYGES).

Dabei kommt ein permanentes Monitoring-System aus Beschleunigungssensoren zum Einsatz, welches seit dem Sommer 2004 am Brückenkrugarm LKW-Einheiten zählt und „wiegt“. Aufgrund der eingesetzten Sensorik wurden im Rahmen der DYGES-Entwicklung ganze Schwerverkehrs-Einheiten statt Achslasten erfasst. Da aber von Anfang an der Anspruch bestand, den gängigen Methoden (wie zum Beispiel „Weigh-In-Motion“-Systemen) ein neuartiges Verfahren zur Erfassung und Charakterisierung des Schwerverkehrs gegenüberzustellen, bedeutet dies keinen Widerspruch für die unmittelbare Einsatzfähigkeit. Bei den vorliegenden Entwicklungen wurde - insbesondere in Hinblick auf rechnerische Bedarfsfälle - entsprechender Wert auf eine praxisrelevante und gleichwertige Form gelegt. Neben den LKW-Gewichten wird dem Statiker gleichzeitig ein Werkzeug bereitgestellt, welches auch tatsächlich auftretende Belastungskonfigurationen infolge Langzeitbeobachtungen berücksichtigt.

Aus dieser – dem realen Geschehen entnommenen - Charakteristik bezüglich der tatsächlichen LKW-Tonnagen und der zugehörigen Belastungsanordnungen konnte in weiterer Folge ein neues, vollkommen Monitoring-basiertes Lastmodell erstellt werden. Für den Fall des Abgehens vom normativen Verfahren des Eurocode bei der Bewertung der bestehenden Tragstruktur steht durch das - mit Feldversuchen hinterlegte und umfassend analytisch plausibilisierte - reale Lastkollektiv und dessen Analysen eine α -Wert äquivalente Darstellung (Anpassungsfaktoren für die Verkehrslast) zur Verfügung, welche als Eingangsgröße für etwaige, durchzuführende Nachrechnungen im Rahmen von Tragfähigkeitsnachweisen bzw. von Ermüdungsnachweisen herangezogen werden kann.

Die entwickelte Methodik strebt im Hinblick auf die rechnerische Analyse der maßgeblichen Teile der Tragstruktur eine starke Einschränkung bisheriger Defizite bei der Parameterabschätzung an. Der Einsatz der Messtechnik und deren Kopplung mit analytischen Vergleichsrechnungen liefern wesentliche, vertiefende Erkenntnisse über das tatsächliche Tragwerksverhalten, wodurch weitgehend auf verfahrenstechnische Annahmen verzichtet werden kann. Die Einwirkungsseite kann dadurch letztlich vollständig durch Messwerte ersetzt werden.

Da alle großen Brücken auf dem betreffenden Autobahnabschnitt derselben Bauwerksgeneration angehören, ähnliche geometrische Verhältnisse (Feldlängen & Bauhöhen), eine gleichartige Bemessung sowie insbesondere auch dieselbe Belastungsgeschichte aufweisen, haben die im Rahmen der Dissertation entstandenen Kernaussagen und Erkenntnisse hinsichtlich Tragwerks-Belastung grundsätzlich nicht nur für das Tragwerk Europabrücke, sondern im Wesentlichen für die gesamte A13 Brennerautobahn Gültigkeit.

ABSTRACT

The Europabrücke, a well-known Austrian steel bridge near Innsbruck, is part of one of the main alpine north-south routes for urban and freight traffic. As the bridge was opened in 1963 it represents a generation of structures, where bridge designers acted on a maxim of building material economisation. The successively grown economic relevance of high-level road network in general, the expiry of the transit agreement between Austria and the European Union (2003) and the eastward expansion of EU – all these components contributed to a remarkable level of intensity of the loading impact nowadays, which could not be foreseen in the design phase and which has led to strong deviations from the expected ageing process of the structure.

In the course of a long-term preoccupation with the bridge owner ASFINAG Alpenstraßen GmbH on the Europabrücke a lot of investigations and special measurements were devoted to mainly monitoring-based structural assessment, which led to the installation of a permanent monitoring system in 2003. This initiative was the answer to a dramatic change in freight traffic-dominated operational loading conditions in terms of traffic volume and loading intensity (truck weight) as both components simultaneously increased to an amount of almost 500 % in comparison to the design and construction stage. At the same time a counterbalance to the conservative diction of the Eurocode should be provided with regard to possible static recalculations of existing structures.

The first superior goal of the present research work was to broaden the explanatory power of the official tollbooth data for freight traffic – that have consisted of counted truck units and their number of axes so far – in terms of the occurring truck weight to provide an enhanced freight traffic classification.

For that reason the so-called DYGES algorithm (the German acronym for Dynamic Weight Registration System) was developed starting in 2004. This major feature of the bridge structure's permanent monitoring system utilises data from cantilever-accelerometers for a pattern recognition procedure by means of digital signal processing in order to count and weight the passing trucks. The chosen cantilever instrumentation with accelerometers limits the registration of events to terms of truck loads instead of axle loads. As it was aspired to develop a new method for freight traffic characterisation in addition to common technologies (e.g. "Weigh-in-Motion" systems) this fact is no contradiction to be utilised for structural analysis. Further development steps were guided by attaching great importance to a direct applicability. Besides the truck loads the occurring loading szenarios (also extracted from long term observations) are provided.

On this basis a new loading model was developed composed of real loading configurations and the real level of loading intensity (taken from the developed dynamic weight registration system) - both linked to their individual frequency of occurrence. To evaluate the consequence for structural analysis of existing structures detailed studies on the - field test based and extensively analytically verified - loading impact data were conducted with regard to ultimate limit state relevant loading (adjustment factor α) on the one hand and the on-going ageing process (fatigue loading) on the other hand.

With regard to probable structural analysis of the decisive (critical) parts of the primary, secondary and tertiary load bearing structure the developed methodology emphasises an alternative in terms of real loading input data – largely without the premises from current standards and codes.

As all bridge structures on this highway belong to the same bridge generation, they have a similar underlying design concept. They were subjected to the same loading history leading to the fact that many of them are facing evident fatigue problems these days. For that reason the present doctoral thesis represents a contribution referring to the entire A13 highway network, even if the investigations' key statements, findings and results were extracted from one certain bridge object only.

1 EINLEITUNG & PROBLEMSTELLUNG

1.1 Zum Bauwerk Europabrücke

Die A13 Brennerautobahn ist ein maßgeblicher Abschnitt der Nord-Süd Transitroute über die Alpen und damit eine von Österreichs bedeutendsten Straßenverbindungen für den Personen- bzw. den Güterverkehr. Die Europabrücke als Teil dieses Autobahnabschnittes befindet sich in Tirol südlich von Innsbruck und überquert zwischen Patsch und Schönberg das Silltal (siehe **Bild 1**).



Bild 1: Lageplan Europabrücke

Der Baubeginn erfolgte 1959, am 17. November 1963 wurde das Bauwerk für den Verkehr freigegeben. Wie auch aus **Bild 2** ersichtlich wird, ist das Tragwerk als sechs-feldrige Balkenbrücke ausgeführt (81m - 108m - 198m - 108m - 81m - 81m) und ist insgesamt 657m lang. Über den beiden Pfeilern des 198m langen Hauptfeldes beträgt die maximale Brückenhöhe 190m [24], wodurch die Europabrücke lt. Graf [25] immer noch die höchste Balkenbrücke Europas ist. Während die fünf Pfeiler aus Stahlbeton ausgeführt wurden, wird das Brückendeck durch einen einzelligen, stählernen Hohlkasten mit orthotroper Fahrbahn- und Bodenplatte gebildet.

Der Hohlkasten ist 10m breit, die Kragarme je 7,3m lang. Die Höhe des Hohlkastens wird im längsten Brückenfeld (Feld II) mit 7,7m konstant geführt und verringert sich von diesem Maximum aus zu den Widerlagern auf 5,6m (Patsch) beziehungsweise 4,7m (Schönberg). Der Grundriss des Tragwerkes verläuft zu beiden Brücken-Enden gekrümmt. Die dadurch notwendige Querneigung der Fahrbahn erzeugt eine zusätzliche Variation der Hohlkastengeometrie im Sinne sich unterschiedlich verändernder Höhen der Hauptträger - siehe **Bild 4**.

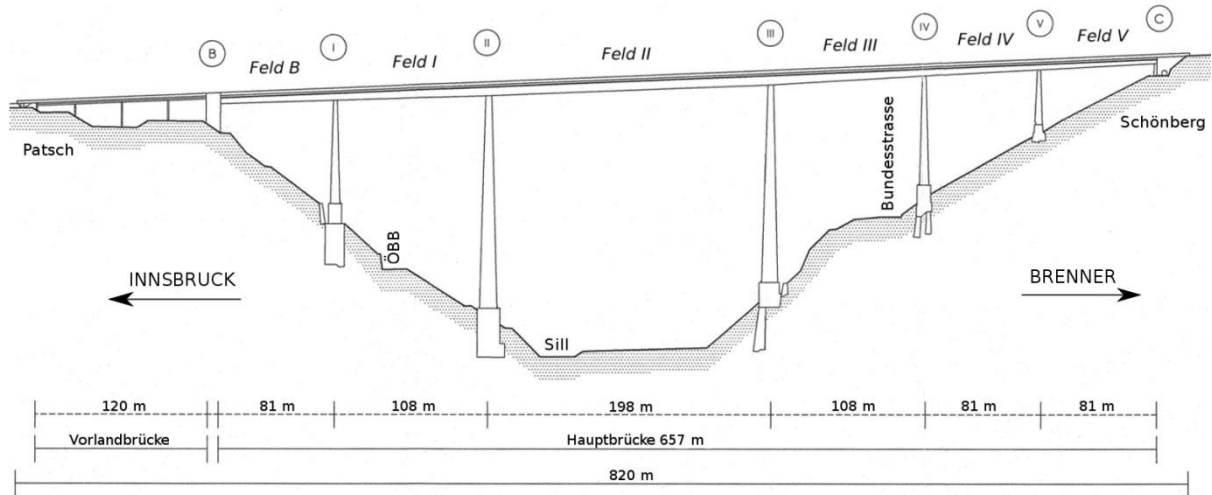


Bild 2: Längsansicht - Europabrücke

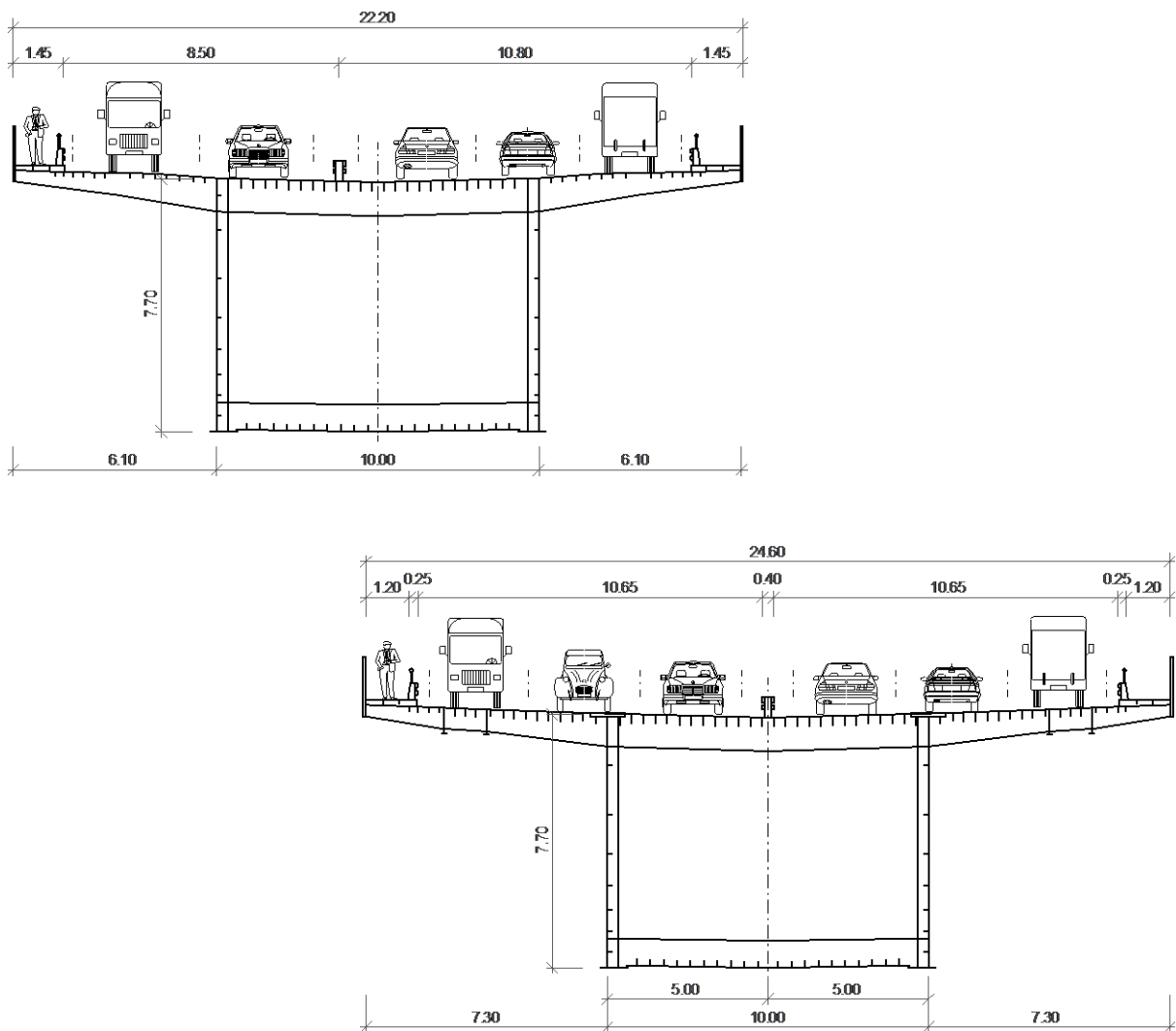


Bild 3: Europabrücke – Regelquerschnitt vor (oben) & nach der Verbreiterung (unten)

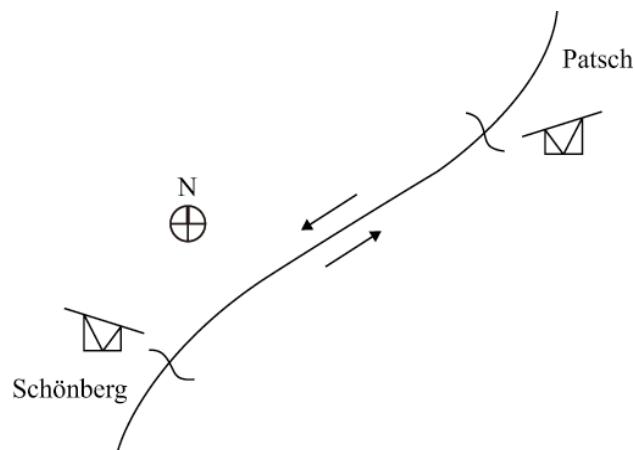


Bild 4: Schema zur Grundrisskrümmung der Brücke und der dadurch auszuführenden, quer-geneigten Hohlkastengeometrie

Ursprünglich war die Fahrbahn 22,2m breit und bot Platz für zwei Fahrstreifen in Fahrtrichtung Innsbruck (bergab) und drei Fahrstreifen in Richtung Brenner (bergauf), wobei die äußerste der drei Fahrspuren jeweils in erster Linie dem LKW-Verkehr zugedacht war. Der Brückenquerschnitt wurde somit tendenziell asymmetrisch im Sinne des zugehörigen Hebelarmes beansprucht (weil unterschiedlich für die fahrtrichtungsweise auftretenden Verkehrslasten). Im Zuge der Fahrbahnverbreiterung 1984/85 wurden die beiden Kragarme der Konstruktion um jeweils 1,2 m verlängert und der Querschnitt insofern umgestaltet, als er seither auf insgesamt 24,6m Überbaubreite in beiden Richtungen zu je drei Fahrspuren befahren werden kann. Fahrzeuge mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von mehr als 7,5 t dürfen ausschließlich die jeweils äußerste Fahrspur befahren. Insbesondere die Schwerverkehrsbelastung bringt in diesen neuen Querschnitt nun unabhängig von der Fahrtrichtung den gleichen Hebelarm und damit eine automatisch günstigere - weil symmetrischere - Verteilung der Beanspruchung ein (Details jeweils in **Bild 3**).

Die nachfolgende Photo-Dokumentation gibt einen guten Überblick über das Brückentragwerk und dessen Umgebung.

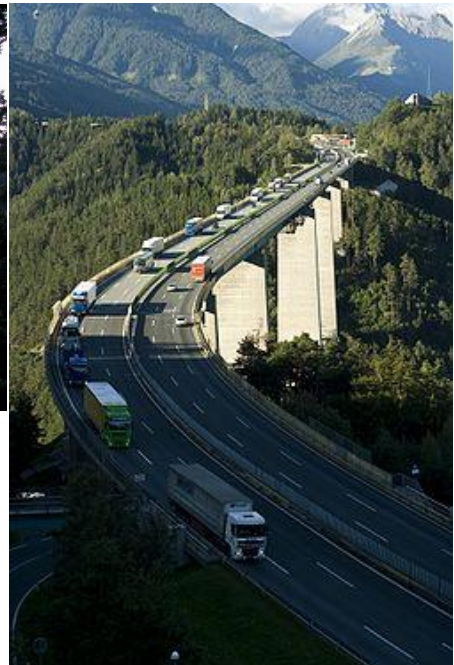


Bild 5: Verschiedene Ansichten der Europabrücke

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass sich vor dem Widerlager B (Patsch) noch eine Vorlandbrücke befindet. Sie hat einen Überbau aus Spannbeton und eine Länge von 120m. Da sie allerdings nicht zum Haupttragwerk gezählt wird, wird sie in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt (**Bild 2**).

1.2 Motivation - Historische Verkehrsentwicklung

Die derzeitige Verkehrsbelastung liegt bei deutlich mehr als 30.000 Kfz/Tag, wobei der Schwerververkehrsanteil dabei mittlerweile oberhalb von 20 % liegt (**Kapitel 9**). Infolge einer stetig wachsenden Entwicklung liegt heute insofern ein deutlich nichtlinearer Trend auf der Einwirkungsseite vor, als die mittlerweile auftretenden Verkehrsvolumina (im Peak-Jahr 2007) auf einen Wert von 496 % im Vergleich zum Ausgangsniveau seit der Brückenfertigstellung 1963 zugenommen haben. Gleichzeitig liegt für denselben Beobachtungszeitraum infolge der stetig größer gewordenen Transport-Kapazitäten und Auslastungsgrade von Schwerfahrzeugen auch für die zugehörige, durchschnittliche Netto-Tonnage je LKW eine Steigerung auf einen Wert von rund 504 % vor (siehe **Bild 6 & Bild 7** gemäß der Daten aus [13], [14] und [15]). Für den Zeitbereich vor dem Jahr 1980, für den keine gesonderten LKW-Zähldaten vorliegen, wurde eine Schätzung mit Hilfe des Anteils der gezählten Schwerverkehrseinheiten am Gesamtverkehr vorgenommen. Da dieser Anteil ab diesem Zeitpunkt (1980) nachweislich und lange Jahre bei rund 20% lag, wurde diese Größenordnung auch als Annahme für die Beobachtungsperiode davor übernommen (**Bild 6**).

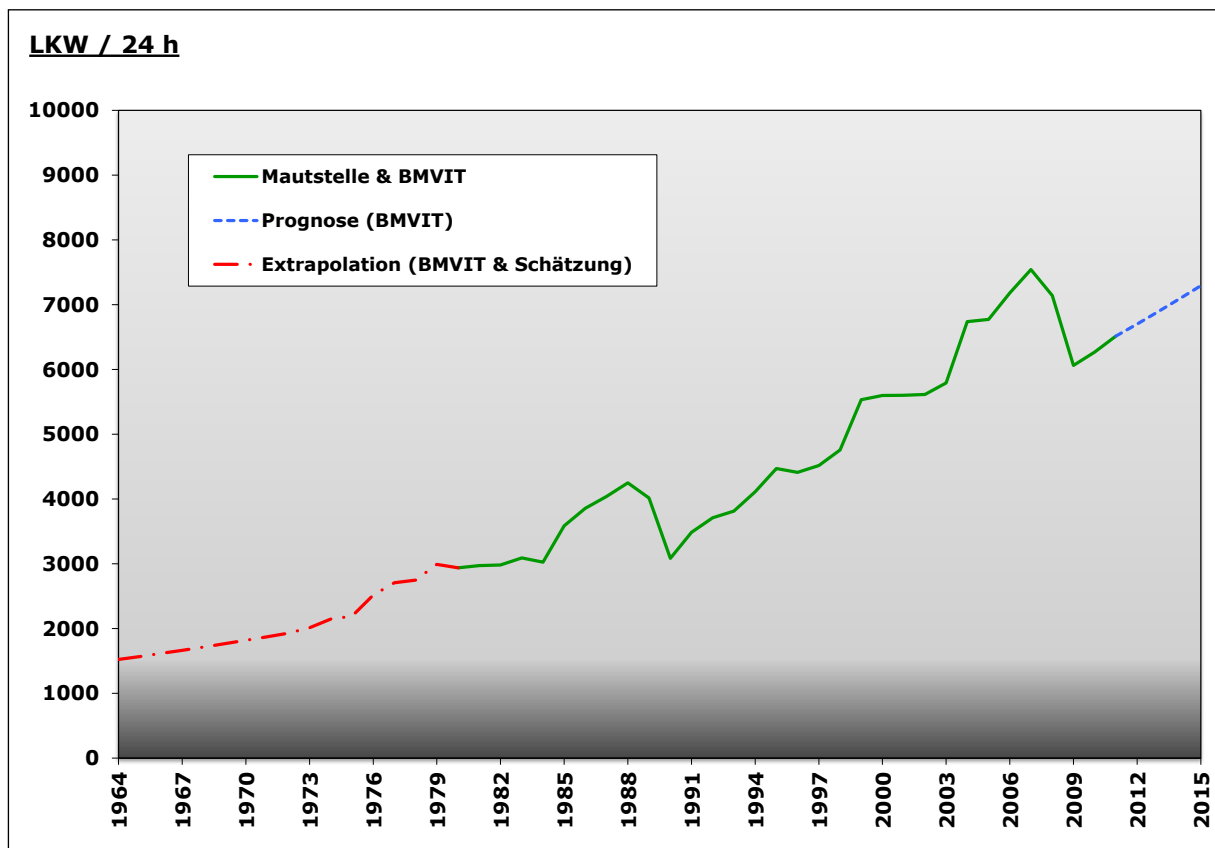


Bild 6: Entwicklung des Schwerverkehrs-Aufkommens (Verkehrsvolumen) an der Europabrücke zwischen 1964 und 2015 (Datengrundlage aus [13], [14], [15])

Im Hinblick auf die thematische Schwerpunktsetzung dieser Dissertation wird zum Aspekt des Verfünffachens der transportierten Netto-Tonnagen durch die nachfolgende Grafik bereits ein vertiefter Einblick gegeben (**Bild 7**). In Blau wird die Entwicklung der transportierten Gütermengen als Summenwert pro Jahr dargestellt, in Rot ist die mitgeführte Fracht pro LKW in Tonnen dargestellt. Dieser fiktive – weil rechnerische - Wert ergibt sich aus der Umrechnung der Gesamtmenge an transportierten Gütern pro Jahr auf die im selben Jahr auftretenden LKW-Fahrten und liefert so eine mittlere Ladung pro LKW. Im Übrigen ist für den vorliegenden Beobachtungszeitraum 1963-2011 durch das Anheben des maximal zulässigen Gesamtgewichts auf mittlerweile 44t im kombinierten Verkehr auch formal annähernd eine Verdopplung dieses Grenzwertes vollzogen worden.

Bis 2015 geht man für die auftretenden Schwerverkehrsvolumina von einer durchschnittlichen jährlichen Steigerung von 2,9% aus. Gleichzeitig erwartet man für die rechnerischen Netto-Frachten pro LKW keine weiteren Steigerungen mehr [13]. Dies wird dadurch begründet, dass ein weiterer Anstieg in den transportierten Gütermengen ausschließlich eine Funktion des Verkehrsvolumens ist, während die mitgeführte Menge an Beladung bereits weitgehend ausgereizt ist [13]. Diese Tatsache wird durch den dokumentierten Verlauf in **Bild 7** seit den späten 1990er Jahren unmittelbar bestätigt.

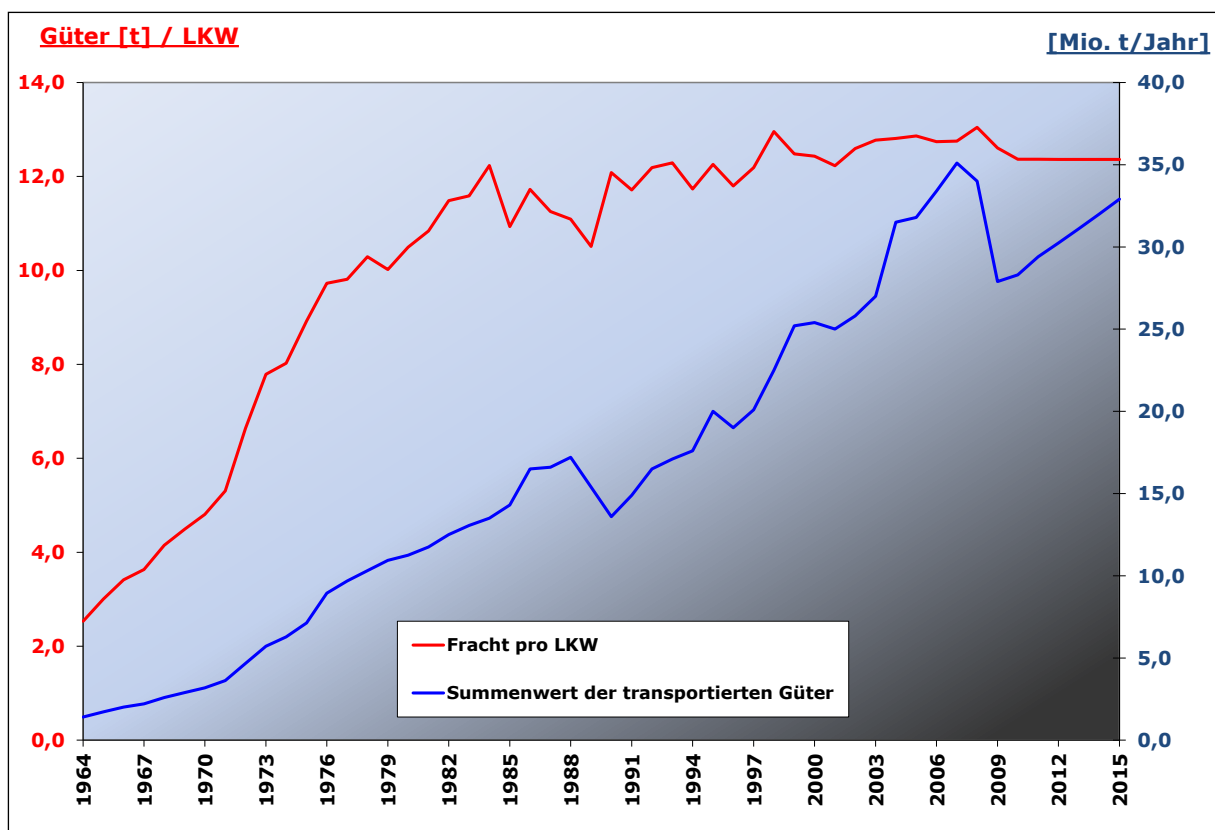


Bild 7: Entwicklung der Schwerverkehrs-Tonnagen (aus den beförderten Frachten) an der Europabrücke zwischen 1964 und 2015 (Datengrundlage aus [13], [14], [15])

1.3 Fokus

Die A13 Brenner-Autobahn besteht aus untereinander sehr gut vergleichbaren Brückenbauwerken. Der Großteil der Infrastruktur wurde Anfang der 1960er Jahre errichtet. Die Brücken weisen durchwegs ähnliche geometrische Verhältnisse, Bauart und vor allem die gleiche Belastungsgeschichte auf. Der sich mengenmäßig fortwährend steigende Schwerverkehr hat seit jeher Fragen nach der potentiellen Ermüdungsgefährdung aufgeworfen, die sich auf anderen Tragwerken der A13 in Form entsprechender Schadensfälle bestätigt hat (z.B. Gschnitztalbrücke). Aufgrund des ersatzlosen Auslaufens des sog. Transitvertrages zwischen Österreich und der EU mit dem Jahresende 2003 entfiel nicht nur die bis dahin tendenziell begrenzende Wirkung auf das Schwerverkehrsaufkommen. Im Lichte der unter diesen Gesichtspunkten zu bewertenden, bestehenden Brücken-Infrastruktur der Brennerautobahn bekam auf Erhalterseite auch die Frage nach der tatsächlichen Einwirkung bzw. nach dem daraus resultierenden, realen Alterungsprozess eine neue Priorität. Der Europabrücke bei Innsbruck kommt aufgrund ihrer Bekanntheit eine stellvertretende Bedeutung für die gesamte Brenner-Autobahn zu, weshalb auf diesem Tragwerk im Juni 2003 ein permanentes Monitoringsystem in einer ersten, prinzipiellen Form installiert wurde.

Für den Autor dieser Dissertation stehen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

PRIMÄR-Aspekt (ENTWICKLUNG) – KAPITEL 3, 4 und 5 und die entspr. Anhänge (KAPITEL 9, 11 - 12)

- **Ermittlung der realen Tonnagen** als Komplementär-Information zum seitens der Mautstellen bekannten LKW-Beanspruchungskollektiv (bisher waren die Verkehrsvolumina und deren Kategorisierung je nach Anzahl der Achsen/LKW bekannt).
=> Dynamisches Gewichtserfassungssystem **DYGES**
(messungsbasierte Wiege- und Zähleinrichtung mittels Beschleunigungssensoren)

SEKUNDÄR-Aspekt (ENTWICKLUNG) – ausgewählte Anhänge (KAPITEL 13 - 19); zusammengefasst in KAPITEL 6

- **Monitoring-basiertes Lastmodell** für den auf der Europabrücke vorherrschenden **Schwerverkehr** und ein **Vergleich mit dem Eurocode** für den Fall einer notwendigen Aufhebung des Konsensschutzes (α -Werte)
=> Verwerten der **tatsächlich auftretenden Lastbilder**,
d.h. der Belastungskonfigurationen und deren **Auftretens-Häufigkeiten** unter Verknüpfung mit der realen Charakteristik der Schwerfahrzeuge (Fahrzeugtonnagen und Häufigkeit - keine Achslasten)

TERTIÄR-Aspekte (STUDIEN):

- **Identifikation** der für dieses Bauwerk **kritischen Bauteile** (Ermüdungsgefährdung);
siehe Kapitel 10
- **rechnerische Auswirkung** des auftretenden, realen Schwerverkehrs auf die **Lebensdauer der maßgeblichen Bauteile**;
(nicht Gegenstand dieser Arbeit – für entsprechende Details dazu siehe [58])

Herzstück dieser Dissertation ist die Entwicklung eines Monitoring-basierten, Dynamischen Gewichtserfassungssystems DYGES (**Kapitel 3**), welches als maßgebliche Erweiterung zur offiziell vorliegenden Schwerverkehrscharakteristik der ASFINAG zu verstehen ist. Von Seiten der ASFINAG Maut Service GmbH liegt prinzipiell eine Zählung der Langzeitreihe der Verkehrseinheiten samt Unterscheidung hinsichtlich der zugehörigen Achsanzahl vor.

Als wesentliche Ergänzung dazu werden nun vom Autor die realen Tonnagen der Lastkraftfahrzeuge mittels eines neuartigen Verfahrens bereitgestellt. Dabei werden die Lasten nicht im Sinne heutzutage gängig eingesetzter, spezieller Wiegeeinrichtungen erfasst (Weigh-in-Motion Systeme), sondern indirekt aus der dynamischen Reaktion des Brücken-Bauwerkes ermittelt (Verfahren der Mustererkennung an gezielt eingesetzten Beschleunigungssensoren am Brückenkragarm über den Pfeilern).

Für diesen Zweck wurde vom Autor (im Zeitraum Mitte 2003-Mitte 2004) ein bestehendes, permanentes Monitoringsystem in seiner Instrumentierung adaptiert (**Kapitel 2**), wodurch die Grundvoraussetzung für die Entwicklung dieses neuartigen Zähl- und Wiegeverfahrens von LKW-Einheiten geschaffen wurde.

Die in weiterer Folge wesentlichste Herausforderung für den Autor war die Entwicklung, Programmierung und Evaluierung der benötigten Algorithmen im Sinne eines baumechanisch konsistenten Gesamtkonzeptes (**Kapitel 3, 4 & Kapitel 5**), da das Dynamische Gewichtserfassungssystem die wesentlichste Grundlage für ein unmittelbar daraus entwickeltes, vollwertiges, reales Lastmodell darstellen sollte (**Kapitel 6** sowie insbesondere **Kapitel 16 & 17**). Das vorgestellte DYGES-Verfahren könnte prinzipiell auch auf anderen Brückentragwerken eingesetzt werden. Eine sorgfältige Kalibrierung infolge individueller geometrischer Verhältnisse sowie insbesondere im Falle eines von Baustahl abweichenden Werkstoffes der Tragstruktur wäre aber im Zuge dieser Übertragung erforderlich.

Die Lastmodelle der heutigen Normen, deren maßgeblichsten Anteil in erster Linie der Schwerverkehr darstellt, basieren auf vereinfachenden bzw. standardisierten Modellbildungen und sind daher durch Ihre auch nur bedingte Realitätsnähe mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Die vom Autor entwickelte Methodik versucht, bisherige Defizite bei der Parameterabschätzung zu beseitigen, da weitgehend auf Annahmen verzichtet werden kann. Der Einsatz der Messtechnik durch die Berücksichtigung permanenter (**Kapitel 3**) und temporärer Messungen (**Kapitel 3, 13 & 14**) sowie deren umfassende analytische Plausibilisierung (**Kapitel 5 & 15**) erweitert die Kenntnis des tatsächlichen Tragwerksverhaltens maßgeblich. Die Einwirkungsseite kann letztlich vollständig durch ein reales, messungs-basiertes Lastmodell ersetzt werden, welches als Eingangsgröße für etwaige, durchzuführende statische Nachrechnungen dient. Die Implementierung dieser neuartig abgebildeten, realen Einwirkung in analytische Berechnungen kann für Tragsicherheitsnachweise

bzw. für rechnerische Restlebensdauerprognosen von kritischen Bauteilen infolge vorherrschender Betriebsbeanspruchung herangezogen werden.

Alternativ zur seit 01.01.2009 verbindlichen ÖNORM B 1991-2 [40] wird vom Autor ein Instrument zur Verfügung gestellt, welches im Rahmen einer realitätsnäheren rechnerischen Bewertung von bestehenden Straßenbrücken als Gegengewicht zur konservativen Diktion des Eurocode herangezogen werden kann.

1.4 Zum zeitlichen Bezug der modellierten, realen Betriebsbeanspruchung gegenüber dem fortwährend dokumentierten Schwerverkehrsaufkommen

Bei intensiverer Sichtung der vorliegenden Dissertation bezüglich der Datierung der im Detail analysierten Langzeitreihe des durch Messungen erfassten Schwerverkehrs wird auffallen, dass die vorgenommene Bezugnahme zu offiziellen Zählstellendaten der Mautstellen in vollständiger und detaillierter Art und Weise lediglich für die Vergleichsperiode 2004-2007 erfolgte. Dies hat zunächst damit zu tun, dass das Jahr 2004 das erste, vollständig verfügbare Jahr der permanenten Brückenmessung war, während das Jahr 2007 bis heute nachweislich das bisher aufkommensstärkste Jahr hinsichtlich der Schwerverkehrsvolumina war. Insofern werden durch diesen Zeitraum unmittelbar die hohen Steigerungsraten nach dem ersatzlosen Auslaufen des Transitvertrags (Ende 2003) bis zum Höhepunkt der Wirtschaftsentwicklung 2007 reflektiert, wobei sich insbesondere das Jahr 2007 aufgrund der darin enthaltenen, bisher maximalen LKW-Belastungsintensität (siehe **Kapitel 9**) ohnehin am besten für einen Vergleich mit der in dieser Dissertation modellierten, realen Schwerverkehrs-Belastung eignet.

Der nach dem Jahr 2007 erfolgte und bis in die Gegenwart nachwirkenden Einbruch im Schwerverkehrsaufkommen ist daher nicht mehr am DYGES-Messquerschnitt ausgewertet worden. Der weitere Verlauf kann aber anhand des **Kapitels 9** verifiziert werden, in welchem die entsprechenden Komplementärinformationen der Mautstellen zur Verkehrsentwicklung auf der Brennerautobahn von 1964 bis 2011 enthalten sind.

Zum Umstand, dass gegebenenfalls der Eindruck entstehen könnte, den in der vorliegenden Dissertation dargelegten Entwicklungen, Neuerungen und Ergebnissen würde zunehmend der Bezug zur Aktualität fehlen, sei daher vordergründig angemerkt, dass

- der vom Autor hergestellte, unmittelbare Bezug der ausgearbeiteten Zeitfenster zum realen Verkehrsaufkommen sich bis heute nachweislich auf den Zeitraum mit der ungünstigsten Schwerverkehrs-Lasteinwirkung bezieht

- die wissenschaftliche Ausarbeitung als solche natürlich deutlich gegenüber einem fortwährend aktualisierten Zeitbezug im Vordergrund steht.

Dennoch werden in diesem Zusammenhang nachfolgend die zeitlich zu beachtenden, wesentlichen Etappen während der Ausarbeitung dieser Dissertation angeführt:

- Sommer 2004 - Sommer 2009: Im Wesentlichen gesamte methodische Ausarbeitung
- Letzte Überarbeitungen/Stabilisierungen der Software-Algorithmen bis Ende 2009
- Nochmalige Auswertung der Langzeitreihe Schwerverkehr bis Mitte 2010
- Parallel dazu erfolgte von 08/2009 bis 11/2010 die Ausarbeitung eines ersten, vollständigen Dissertations-Entwurfes unter Zusammenführen und Präzisieren der maßgeblichen, über die Jahre entstandenen Fragmente
- 04/2011 - 04/2012 gemeinsame Erörterung/Diskussion des Manuskriptes bzw. seiner einzelnen Kapitel mit den Professoren Fink und Heuer (bei gleichzeitiger Ausarbeitung/Überarbeitung notwendigen Ergänzungen und Erweiterungen)
- 04/2012-09/2012: Finale Erweiterung der Dissertation durch eine analytische Aufarbeitung des bis dahin vorwiegend experimentell basierten Kerns der Arbeit
- Ab 10/2012 - 09/2013: Überarbeitung/Erweiterung/Ergänzung der Hauptkapitel infolge der protokollierten gemeinsamen Erörterungen/Diskussionen mit den Professoren Fink und Heuer sowie umfangreiche redaktionelle Änderungen innerhalb der gesamten Dissertation bzw. der Anhänge

2 DAS PERMANENTE MONITORINGSYSTEM EUROPABRÜCKE

In langjähriger Zusammenarbeit des Büros VCE & der ASFINAG Alpenstraßen GmbH wurden bereits seit 1997 zahlreiche Messungen und Sonderuntersuchungen durchgeführt. Zunächst führten zwei Basismessungen zu einer genauen globalen (Haupttragwerk) und lokalen (Kragarme) dynamischen Systemidentifikation. Die angewandte Baudynamik sieht für diesen Begriff die Erfassung und Beschreibung des charakteristischen, realen Tragverhaltens vor, was für den vorliegenden Fall die Ermittlung und Analyse der maßgeblichen Eigenfrequenzen, der zugehörigen Eigenformen, des Dämpfungsverhaltens und der auftretenden Schwingungsintensitäten entlang der Tragstruktur bedeutete.

Bei der Systemidentifikation bzw. der begleitenden Bewertung des Tragwerksverhaltens zeigten sich einerseits eine sehr gute Übereinstimmung mit analytischen Vergleichsrechnungen (siehe [7] & [8]), andererseits aber auch ungewöhnlich hohe dynamische Belastungen (gemäß der Klassifizierung der Schwingungsintensität nach Beards [21]). Aus dieser Tatsache heraus ergab sich die Notwendigkeit einer verstärkten Bauwerksüberwachung hinsichtlich potentieller Ermüdungsschäden.

Weiterführende Detailmessungen und –inspektionen waren von maßgeblichem Einfluss bei der stufenweisen Konzipierung einer Dauermessanlage (DMA), welche 2003 in einer ersten, grundsätzlichen Instrumentierung ihren Betrieb aufnahm und in weiterer Folge bis zum Sommer 2004 mit Hauptaugenmerk auf die Entwicklung des Dynamischen Gewichtserfassungssystems DYGES vom Autor adaptiert wurde.

Das permanente Monitoringsystem Europabrücke besteht grundsätzlich aus fünf über die gesamte Tragwerkslänge verteilten Mess-Querschnitten, deren Informationen in einer zentralen Datenerfassungsanlage gesammelt werden (**Bild 8**). Deren Messgrößen und die daraus abgeleiteten Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst, weitere Details sind dann dem unmittelbar nachfolgenden **Kapitel 2.1** zu entnehmen:

- Zeitreihe der auftretenden Beschleunigungen an ausgewählten Referenzpunkten (Brückenhauptfeld beziehungsweise am Pfeilerkopf)
 - ⇒ Globale und lokale Bauwerkssteifigkeiten aus den ausgewerteten Frequenzverläufen
- Beschleunigungsdaten an ausgewählten Stellen der Brückenkragarme
 - ⇒ LKW-Beanspruchungskollektiv in Form von Tonnagen der überfahrenden Schwerfahrzeuge & die zugehörigen Kragarm-Verformungen (beide generiert aus einem neu entwickelten Mustererkennungs-Algorithmus **Kapitel 3**)

- Windgeschwindigkeiten in 3 Richtungen
- Lufttemperaturen an ausgewählten Stellen innerhalb und außerhalb des Brücken-Hohlkastens
- Dilatationsmessung - Aufzeichnung der Verschiebungen zwischen Brückendeck und den Widerlagerwänden

Die grundsätzliche Konfiguration des permanenten Monitoring-Systems aus seinen einzelnen Messquerschnitten kann dem **Bild 8** entnommen werden. Die Messquerschnitte selbst werden in weiterer Folge einzeln dargelegt und erörtert (**Abschnitt 2.1**).

Für die vorliegende Dissertation wird durch die Fokussierung auf ein auszuarbeitendes Beanspruchungskollektiv in Form von LKW-Tonnagen bzw. auf ein Lastmodell vor allem auf die **Messquerschnitte 2 & 3** zurückgegriffen.

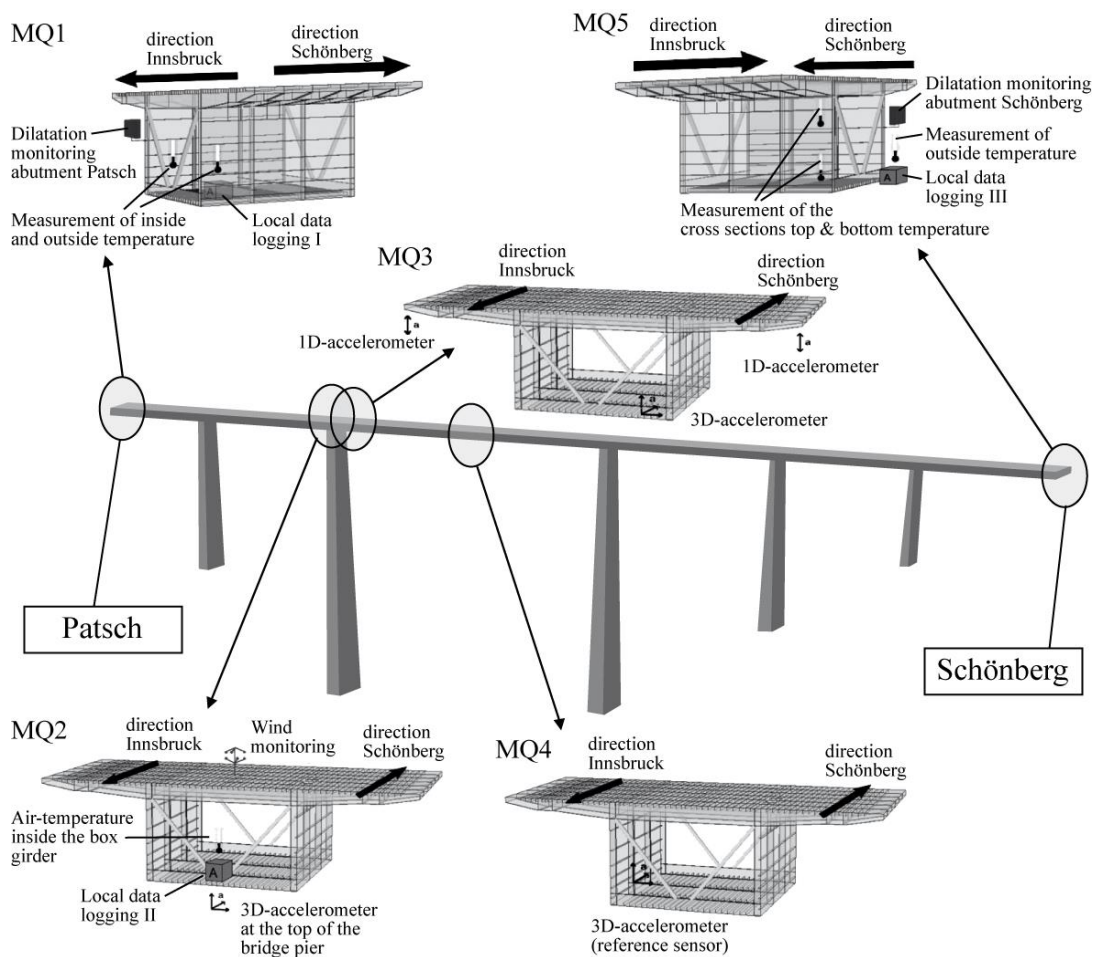


Bild 8: Das permanente Monitoring-System Europabrücke – Übersicht zur Lage und zum Inhalt der einzelnen Messquerschnitte

2.1 Aufbau der instrumentierten Mess-Querschnitte

(Zusammengefasst aus [26])

Messquerschnitt 1 (Laufkoordinate in Längsrichtung = 0 von 657m)

Ein erster Bestandteil des instrumentierten Querschnitts ist zunächst eine lokale Datenerfassungsanlage (Messanlage I), welche in einem Schaltschrank an der Widerlagerwand untergebracht ist. Dort werden folgende Zustandsgrößen im Halbstundentakt, das heißt einmal pro 1800s (= 0,00056Hz) aufgezeichnet:

- Widerlagerverschiebungen (Dilatationen) in Brückenlängsrichtung auf der Höhe der Brückenschwerachse des Endquerschnittes, aufgezeichnet mit einem Seilzug-Wegaufnehmer WDS-300-P60 (Fa. µEpsilon Messtechnik). Dabei wird gemäß dem Seilzugprinzip eine Linearbewegung in eine Rotationsbewegung transformiert. Diese wird dann in eine Widerstandsänderung beziehungsweise in zählbare Inkremente gewandelt.
- Temperatur außerhalb und innerhalb des Hohlkastens, aufgezeichnet mit Pt100 Temperaturelementen (Fa. Temperaturmesstechnik Geraberg). Es werden jeweils die Lufttemperaturen gemessen, wobei sich der Temperatursensor außerhalb des Hohlkastens beim Widerlager im Schatten befindet. Die sich ändernde Temperatur verursacht unterschiedliche elektrische Widerstände, welche gemessen und in Spannungssignale transformiert werden.

Der Verschiebungssensor ist gleichzeitig auch mit der zentralen Datenerfassungsanlage von Querschnitt 2 (Messanlage II) gekoppelt, wo der entsprechende Messkanal nochmals, und zwar mit 100 Hz (100-mal pro Sekunde) abgetastet wird.

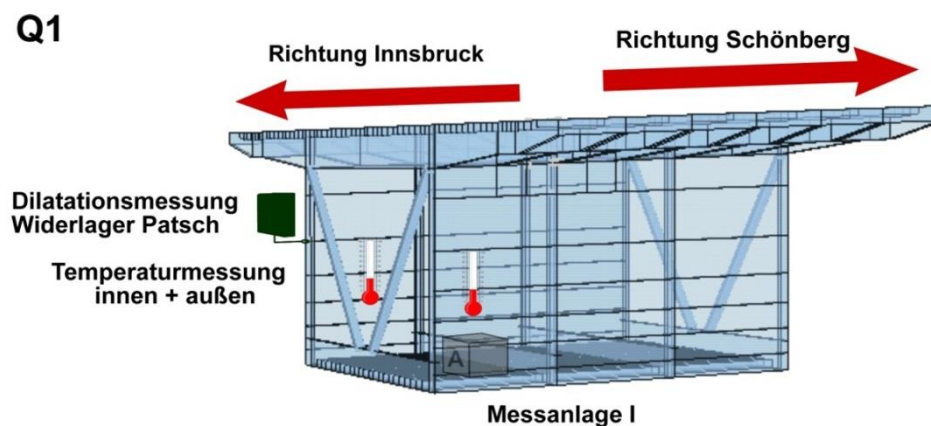


Bild 9: Der instrumentierte Messquerschnitt **Q1** am Widerlager Patsch

Messquerschnitt 2 (Laufkoordinate in Längsrichtung = 189 von 657m)

Der instrumentierte Querschnitt besteht zunächst aus der zentralen Datenerfassungsanlage (Messanlage II), welche in einem Schaltschrank auf der orthotropen Bodenplatte unmittelbar über dem Pfeiler II untergebracht ist. Hier werden nahezu alle gemessenen Zustandsgrößen der Brücke zusammengeführt. In insgesamt 14 Messkanälen werden sämtliche Beschleunigungen, die Widerlagerdilatation Patsch sowie die Hohlkasteninnentemperatur mit einer Abtastrate von 100Hz jeweils zusammen in 330 sec langen Dateien gespeichert. Zusätzlich wird am vorliegenden Querschnitt insbesondere die Windstärke in drei Richtungen und die zugehörige Temperatur 5m über Deck beim Pfeiler II gemessen, und zwar mit einer Abtastrate von 5Hz. Weiters wurde ein 3D-Beschleunigungssensor am Pfeilerkopf der Stütze II installiert, der als „Erdbebensensor“ fungiert.

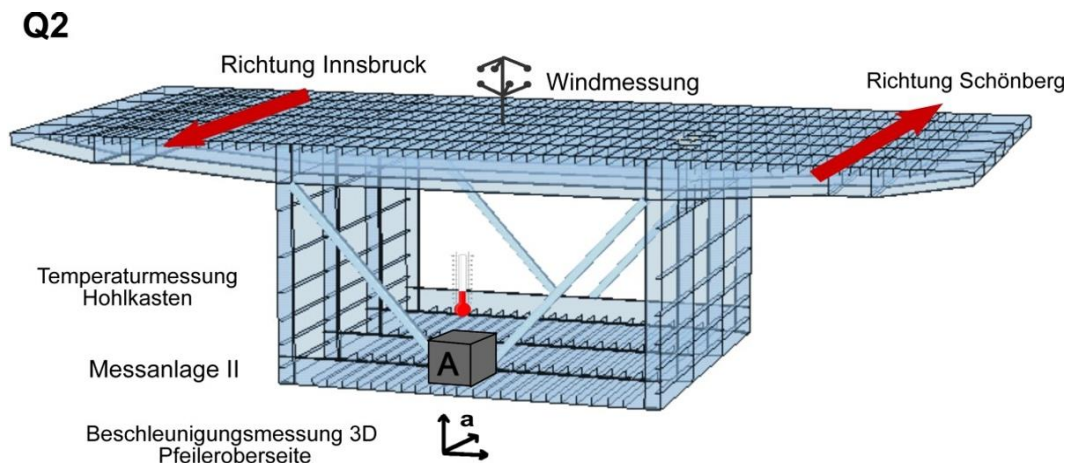


Bild 10: Der instrumentierte Messquerschnitt **Q2** über dem Pfeiler II

Die Zustandsgrößen werden wie folgt ermittelt:

- Schwingbeschleunigung mittels Forced Balance Accelerometer FBA23 (FBA23 – dreidimensional) der Fa. Kinematics. Bei diesen Aufnehmern wird die elektrische Kapazitätsänderung gemessen, die durch die Lageänderung infolge einwirkender Beschleunigung auf eine federnd angebrachte Masse entsteht. Entsprechend der Einbaulage des Sensors ist auch die Erdbeschleunigung zu berücksichtigen. Die Kapazitätsänderung wird in Form von elektrischen Spannungen ausgewiesen.
- Windgeschwindigkeit beziehungsweise windbeeinflusste Lufttemperatur mittels Ultraschall Anemometer USA-1 (Fa. Metek): Ultraschallimpulse werden an drei separat angeordneten Sende-Empfängerpaaren emittiert und ihre Laufzeit gemessen.

Messquerschnitt 3 (Laufkoordinate in Längsrichtung = 195 von 657m)

An dieser Stelle wurde der Querschnitt mit drei eindimensionalen Beschleunigungssensoren instrumentiert (Abtastrate = 100Hz), um die Quertragwirkung zu erfassen. Zunächst sind zwei Beschleunigungsaufnehmer - annähernd über dem Pfeiler II und einander gegenüberliegend - an den Kragarmen angebracht, während der dritte Beschleunigungsaufnehmer in einem Abstand von 15m vom Pfeiler II in Fahrtrichtung Innsbruck angebracht ist. Diese Kragarm-Sensorik wird zur Bestimmung von Geschwindigkeit und Gewicht der überfahrenden Schwerverkehrs-Einheiten in Fahrtrichtung Innsbruck verwendet (Dynamisches Gewichtserfassungs-System DYGES – siehe **Kapitel 3**). Zusätzlich ist auf der orthotropen Bodenplatte noch ein dreidimensionaler Beschleunigungssensor angebracht.

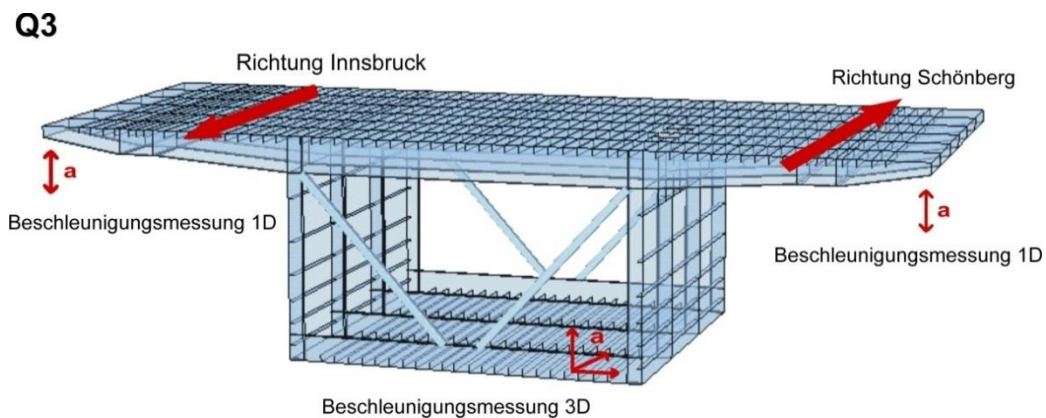


Bild 11: Der instrumentierte Messquerschnitt **Q3** in unmittelbarer Nähe des Pfeilers II

Die Ermittlung der Zustandsgrößen erfolgt durch:

- Schwingbeschleunigung mittels Forced Balance Accelerometer FBA11 und FBA23 (FBA11 - eindimensional, FBA23 – dreidimensional) der Fa. Kinematics. Das Messprinzip entspricht jenem des FBA-Sensors am Messquerschnitt 2.

Messquerschnitt 4 (Laufkoordinate in Längsrichtung = 273 von 657m)

Im Brückenhauptfeld befindet sich der sogenannte Referenzsensor. Dieser 3D-Beschleunigungsaufnehmer (Abtastrate = 100Hz) ist 0,4-mal der Hauptfeldlänge vom Pfeiler II entfernt. Er dient in erster Linie der Zustandsüberwachung auf Grundlage ausgewählter, realer Bauwerkseigenfrequenzen (Evaluierung der Steifigkeit des Tragsystems, siehe z.B. [6], [56] und [57]). Das Messprinzip des Referenzsensors entspricht dem des dreidimensionalen Beschleunigungssensors am Messquerschnitt 2.

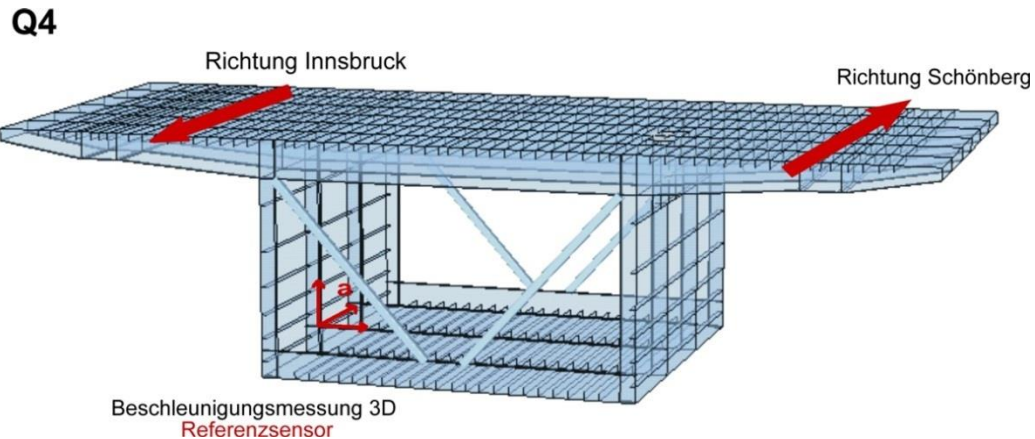


Bild 12: Der instrumentierte Messquerschnitt **Q4** im Brückenmittelfeld (Hauptfeld)

Messquerschnitt 5 (Laufkoordinate in Längsrichtung = 657 von 657m)

Ähnlich dem Messquerschnitt 1 gibt es auch hier eine lokale Datenerfassungsanlage (Messanlage III), welche in einem Schaltschrank an der Widerlagerwand untergebracht ist. Dort werden wiederum die Verschiebungen (Dilatationen) zwischen Widerlager und Brückendeck in Tragwerkslängsrichtung aufgezeichnet sowie die Lufttemperaturen außerhalb und innerhalb des Hohlkastens (beides im Halbstundentakt = mit 0,00056Hz). Die Instrumentierung mit Einzelsensoren in Hohlkasteninneren in unmittelbarer Nähe der Fahrbahnplatte und der Bodenplatte ermöglicht prinzipiell die Erstellung eines Temperatur-Höhenprofils für diesen Brückenquerschnitt.

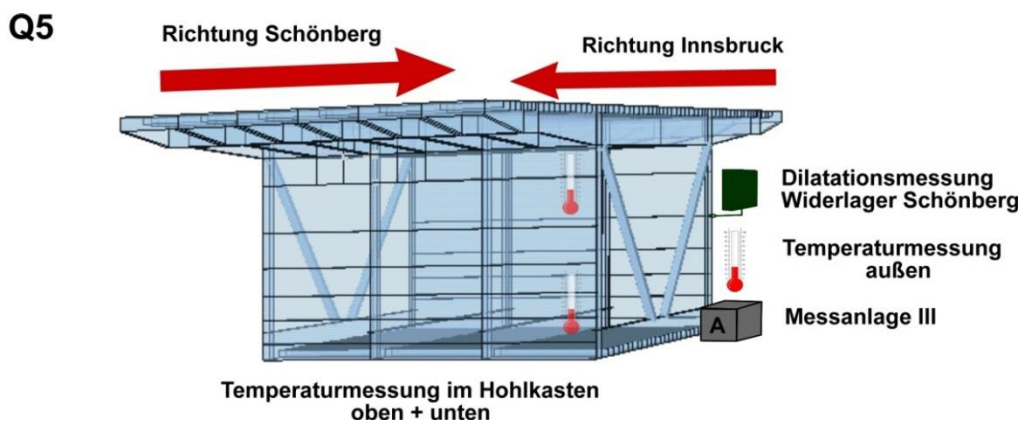


Bild 13: Der instrumentierte Messquerschnitt 5 (**Q5**) am Widerlager Schönberg

3 MONITORING-BASIERTES DYNAMISCHES GEWICHTSERFASSUNGSSYSTEM (DYGES) - ERWEITERUNG DER BISHER VORLIEGENDEN SCHWERVERKEHRSSCHARAKTERISTIK DER ASFINAG MAUT SERVICE GMBH

Brücken, wie auch andere Bauwerke besitzen ein individuelles, ausgeprägtes Schwingungsverhalten, das als „Schwingungssignatur“ oder „Vibrational Signature“ bezeichnet werden kann. Dieses - für ein Bauwerk typische dynamische Verhalten - kann durch geeignete Messungen erfasst und nach entsprechender Auswertung für verschiedene Zwecke verwendet werden. Ein Anwendungsbereich ist die Beurteilung des Zustandes der Tragwerksstruktur und die Feststellung von Schäden. Das dynamische Verhalten einer Struktur wird zur Beurteilung der globalen und lokalen Steifigkeit sowie der entsprechenden Belastbarkeit und Funktionsfähigkeit herangezogen (siehe beispielsweise in [1], [56] und [57]).

Dieser Ansatz kann z.B. aber auch zur Ermittlung von Beanspruchungen am Tragwerk, d.h. - wie im vorliegenden, speziellen Fall – zur Ermittlung von Fahrzeuggewichten genutzt werden. Die nachfolgend verfassten Absätze dienen in diesem Zusammenhang lediglich zur Einstimmung bzw. als zusammenfassender Ausblick auf die in den **Kapiteln 3, 4 und 5** umfassend ausgearbeiteten Ausführungen zu einem der Kernthemen dieser Dissertation – der Dynamischen Gewichtserfassung von Schwerfahrzeugen.

Jede relevante Beanspruchung eines Tragwerkes lässt sich bei geeigneter Instrumentierung mit Hilfe der dynamischen Antwort dokumentieren. Zur Erfassung und Kategorisierung des Schwerverkehrs wurde – wie bereits erwähnt – ein bestehendes, permanentes Monitoring-System entsprechend adaptiert (**Kapitel 2**). Aus den dynamischen Messungen sollten sämtliche Einzelereignisse infolge überfahrenden Verkehrs herausgefiltert werden, die in der Brücke eine maßgebliche Reaktion (Beanspruchung) verursachen.

Das Fahrzeuggewicht wird aus der dynamischen Charakteristik des Tragwerkes ermittelt. Wichtigster Indikator für das Fahrzeuggewicht ist dabei die Schwingungsintensität. Da diese nicht nur vom Fahrzeuggewicht selbst, sondern auch von dessen Geschwindigkeit abhängig ist, musste auf eine ausreichend genaue Geschwindigkeitsbestimmung großer Wert gelegt werden. Die Bestimmung der zur gemessenen Bauteil-Beschleunigung gehörenden LKW-Überfahrtsgeschwindigkeit stellt einen zentralen Parameter bei der Herleitung des Fahrzeuggewichtes dar, da zwischen der Überfahrtsgeschwindigkeit und der ins Bauwerk eingetragenen Beschleunigung ein wesentlicher Zusammenhang besteht. Die Geschwindigkeit

kann durch eine Art dynamische „Section-Control“ bestimmt werden. Dazu werden über die Brückenlänge mehrere Sensoren angebracht und mittels gemessener Zeitdifferenz und bekanntem Abstand die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet (siehe **Bild 15 & Bild 17**).

Um die Ergebnisse abzusichern, war eine Kalibrierung mittels Schwerfahrzeugen mit bekanntem Gewicht erforderlich. Im Zuge von Eichungs-Überfahrten wurde deren Charakteristik bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfasst, um in weiterer Folge für eine automatisierte LKW-Gewichtsbestimmung verwertet werden zu können (**Kapitel 3.3 & 3.4**).

Die Erstellung einer lückenlosen Verkehrsstatistik im Sinne einer Langzeitreihe wurde angestrebt, wobei die Fahrzeuge in Gewichts- und Geschwindigkeitsklassen einzuordnen waren. In weiterer Folge sollte die Entwicklung von Verkehrsströmen bzw. der langfristige Trend der Verkehrslasten über die Jahre beobachtet werden. Eine Veränderung des Durchschnittsgewichtes und damit der Auslastung von Lastkraftfahrzeugen sollte dadurch unmittelbar nachgewiesen werden. Dabei galt den Klassen der voll ausgelasteten LKWs bzw. den bereits überladenen Schwerfahrzeugen besonderes Augenmerk (siehe jeweils **Kapitel 4 & Kapitel 12**).

Flexible Betrachtungen über beliebige, interessierende Zeiträume sind stets von Interesse und werden im Zuge dieser Doktorarbeit immer wieder für unterschiedliche Bedarfsfälle bereitgestellt. Im Bedarfsfall sollten Tages-, Wochen-, Monats- und Jahresganglinien abgefragt werden können. Für Langfristbetrachtungen sei dabei auf **Kapitel 4** sowie auf **Kapitel 12** verwiesen. Kürzere Zeiträume (Sondermessungen), welche detaillierten Aufschluss über die Charakteristik an Werktagen, an werkfreien Tagen aber auch im Nachtbetrieb und an Wochenenden geben, wurden im Zuge der **Kapitel 13, 14, 16** und **17** abgefragt. Detailbetrachtungen bzw. spezifische Plausibilitätsüberprüfungen machten immer wieder Abfragen bis hin zu einzelnen Überfahrten notwendig (**Kapitel 3, 13, 14 & 15**).

Einen konkreten Aufschluss über die schrittweise Entwicklung des DYGES-Algorithmus geben die nachfolgenden Abschnitte des **Kapitels 3**. Zur Steigerung des Verständnisses für den entwickelten Prozess wurden Ablauf-Diagramme mit unterschiedlichen Schwerpunkten erstellt (**Bild 25, Bild 26, Bild 28, Bild 33** und **Bild 37**), welche neben einer entsprechenden Detaillierung insbesondere auch Aufschluss über die betroffenen Mess-Kanäle, die Funktionsbezeichnungen und die Einheiten der physikalischen Größen geben.

3.1 Zum herangezogenen Prinzip der experimentellen Fahrzeugerkennung

Das permanente Monitoringsystem Europabrücke ist **seit Juni 2003 in Betrieb**. Die rund 7,3 m langen Kragarme der Europabrücke sind im Wesentlichen einer dominanten Belastung durch den Schwerverkehr ausgesetzt, da LKWs mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von mehr als 7,5 t ausschließlich die erste Fahrspur befahren dürfen. Diese Tatsache unterstreicht die Wichtigkeit des lokalen Monitoring und begründet, warum die Kragarme als fixer Bestandteil in das permanente Überwachungssystem eingegliedert wurden. Der entsprechende Messquerschnitt MQ3 ist im **Abschnitt 2.1** dokumentiert – es kommen dabei sog. Forced Balance Accelerometer (FBA, Abtastrate 100 Hz) zum Einsatz.



Bild 14: Kragarmuntersicht mit Beschleunigungs-Aufnehmer im Bereich des Gehsteigs (rechts & Mitte) bzw. Brückenuntersicht-Standort WL Nord (links)

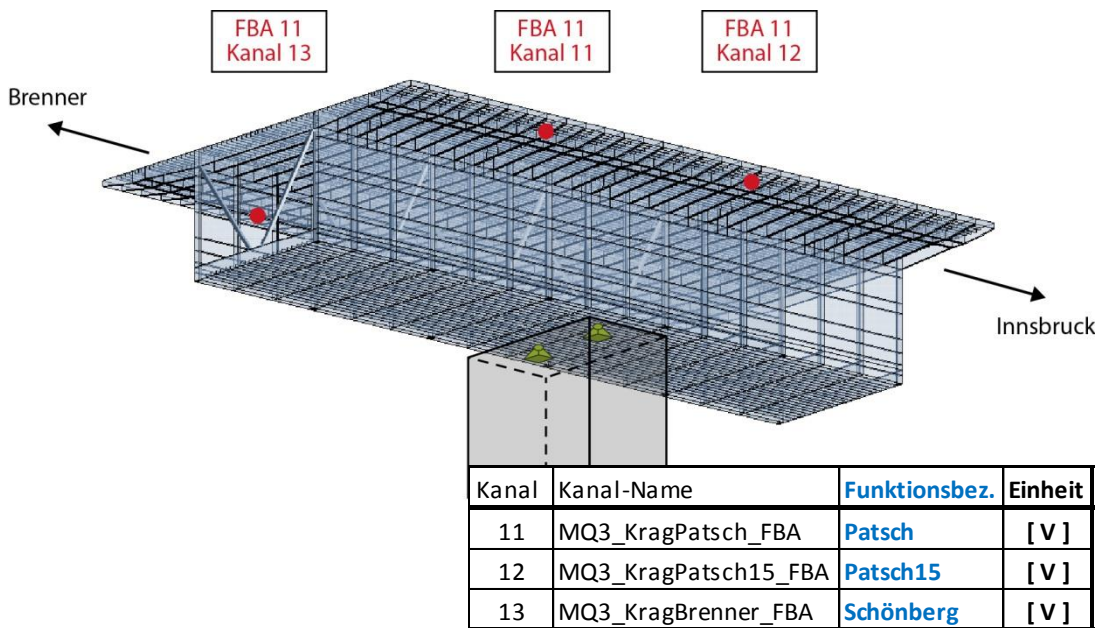


Bild 15: DYGES Messquerschnitt zur Schwerfahrzeugerkennung mit Hilfe von unmittelbar hintereinander angeordneten 1D-Beschleunigungssensoren (FBA11) über dem Pfeiler II (=Q3)

Hinsichtlich einer störungsfreien Fahrzeugerkennung wurden an der Kragarmunterseite in unmittelbarer Umgebung des Pfeilers II drei 1-dimensionale Beschleunigungssensoren

installiert (**Bild 14 & Bild 15**), um das Tragverhalten der sekundären, lastabtragenden Struktur unabhängig von den Einflüssen der globalen Antwortschwingung zu erfassen. Zwei der drei FBA11 Sensoren sind in definiertem Abstand von 15 m sowie in derselben Fahrtrichtung angebracht, um wiederkehrende Schwerverkehrs-Überfahrten und deren Geschwindigkeiten zu erkennen und zu klassifizieren. Diese um die Kragarm-Instrumentierung vervollständigte Sensor-Konfiguration am permanenten Monitoring-System Europabrücke liefert **seit Juli 2004** beständig Beschleunigungsdaten. Die ergänzend zum DYGES-Messquerschnitt in **Bild 15** angeführte Tabelle gibt Aufschluss über die seitens des permanenten Monitoringsystems für die Dynamische Gewichtserfassung herangezogenen Messkanäle, deren Bezeichnungen und die physikalische Ausgangseinheit. In der Tabelle wird aber auch bereits auf die auf Grundlage der maßgeblichen Messkanäle entstandenen Funktionsnamen verwiesen, da diese den Ausgangspunkt für sämtliche Flowcharts darstellen, anhand derer das methodische Vorgehen zur neuartigen Abbildung des realen Schwerverkehrs-Kollektivs erörtert wird (**Bild 25, Bild 26, Bild 28, Bild 32, Bild 33 & Bild 37**).

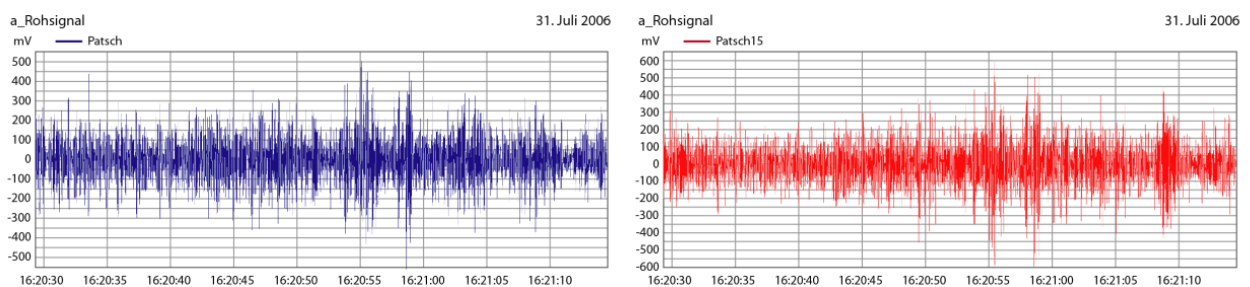


Bild 16: Ausgewähltes Zeitfenster zur Einwirkung am DYGES-Messquerschnitt anhand der beiden (der gleichen Fahrtrichtung zugehörigen) Beschleunigungssensoren – Rohsignal für die Kanäle (Patsch & Patsch 15) am Brückenkragarm in Fahrtrichtung Innsbruck

In Bezug auf die Tabelle in **Bild 15** wird anhand von **Bild 16** ein typisches Messfile der zentralen Datenerfassungsanlage (MQ2) gezeigt, wobei zwecks besserer Übersichtlichkeit nur noch die Zeitverläufe der beiden für den DYGES-Algorithmus maßgeblichen Kragarm-Beschleunigungssensoren dargestellt wurden.

Wie bereits in [26] formuliert, kann die Erkennung von Schwerfahrzeugen auf der Grundlage der Methode der Glättung der Beschleunigungssignale mit einer vorgebbaren Mittelungszeit durchgeführt werden. Der übergebene Datensatz wird geglättet, indem über ein definiertes, gleitendes Zeitintervall gemittelt wird. Der Glättungsvorgang entspricht somit der Verwendung eines digitalen Filters, dessen Zeitkonstante in der Größenordnung der Intervallbreite liegt. Die gewählte Breite dieses Intervalls bestimmt, wie deutlich der Glättungseffekt werden soll [30]. Als interpretierbares Ergebnis erhält man dabei die Lage der Nulllinie des Beschleunigungssignals während der Überfahrt. Durch das Ablesen des Zeitpunktes mit der

maximalen Amplitude für beide Sensoren ist die genaue Zeitdifferenz der Überfahrt bestimmbar. Wird die so errechnete Zeitspanne dem Abstand der Sensoren gegenübergestellt, so erhält man die Überfahrtgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde (siehe **Bild 17**).

Zur Veranschaulichung zeigt **Bild 17** einen exemplarischen Datensatz (Abtastzeit von 100 Hz = 0,01 sec) mit einer Intervall-Breite von 1 Sekunde geglättet, wodurch eine eindeutige Antwortfunktion mit weitgehend unterdrückten, höherfrequenten Anteilen (z.B. Messstörungen, Anteile außerhalb des relevanten Messbereiches) gewährleistet wird. Bei einem derartigen Vorgehen hat sich stets gezeigt, dass durch das Glätten (im Gegensatz zum klassischen Filtern im Sinne der Nachbearbeitung gemessener Signale) der gesamte Energie-Eintrag der LKW-Überfahrt erhalten bleibt, insbesondere bei unmittelbar - in knappem Abstand - aufeinander folgenden Überfahrten. Durch so genanntes „**peak-picking**“ (Identifizierung lokaler Extremwerte) kann dann durch den bekannten Abstand der zwei Sensoren auf die Geschwindigkeit der Überfahrt geschlossen werden [26].

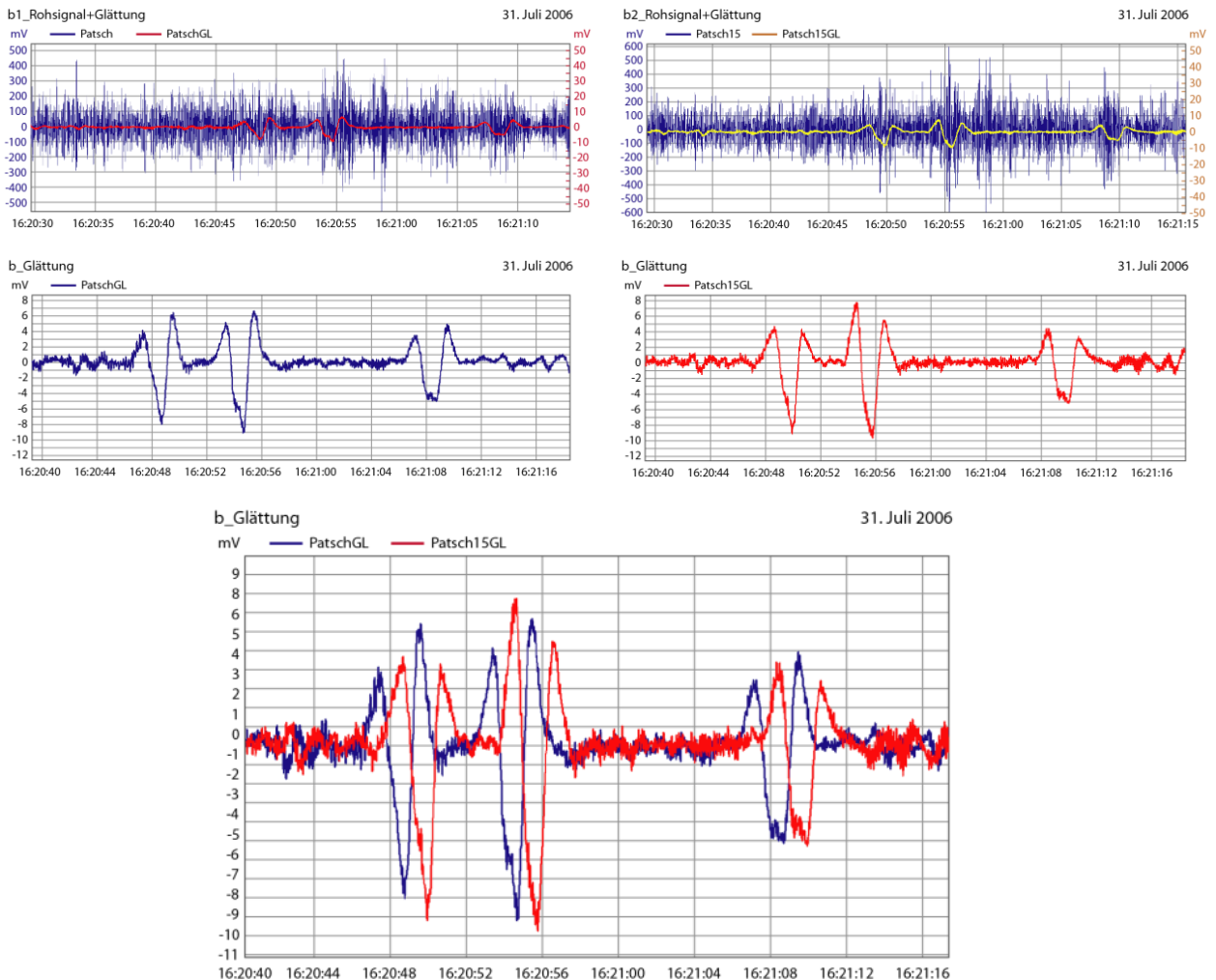


Bild 17: Glättung des Beschleunigungssignals aus **Bild 16** zur gezielten Erkennung von LKW-Überfahrten für den Beschleunigungs-Sensor Patsch (links) bzw. den längsversetzten Beschleunigungssensor Patsch 15 (rechts) sowie Überlagerung der beiden (darunter)

3.2 Notwendigkeit zur Inanspruchnahme der Mustererkennung (Pattern Recognition)

Während das Problem der qualitativen Identifikation (Erkennung) von LKW-Überfahrten samt entsprechender Ereignisverifizierung aus dem Beschleunigungssignal durch die beschriebene Glättungsprozedur gelöst ist, blieb die explizite Frage nach der quantitativen Erfassung des realen Belastungskollektivs (LKW-Gewichte, Tonnagen) bis zu dieser Stelle unbeantwortet. Aufgrund der übergeordneten Bedeutung der Auswirkungen des Schwerverkehrs auf etwaige Ermüdungsschäden stellt sich natürlich auch die Frage nach den Absolut-Beträgen von weiteren, maßgeblichen Zustandsgrößen. Dazu gehört insbesondere die tatsächliche Durchbiegung am Kragarm infolge der ursächlichen Verkehrsbelastung.

Die Idee des angestrebten Mustererkennungs-Prozesses („pattern recognition“) bestand darin, ein Verfahren zur Nachbildung von Kragarm-Vertikalverformungen zu entwickeln, wobei die ermittelten Deformationsgrößen ein notwendiger Zwischenschritt auf dem Weg zur vordergründig relevanten Erfassung der Schwerverzeug-Gewichte sein sollten (siehe **Kapitel 3.3** und **3.4**). Ziel war es, auf der Basis von Beschleunigungsdaten und mit Hilfe digitaler Messsignalverarbeitung Kragarm-Absolutverschiebungen sowohl in ihrem Verlauf (qualitativ) wie auch in ihrem jeweiligen Ausmaß (quantitativ) hinreichend genau zu reproduzieren.

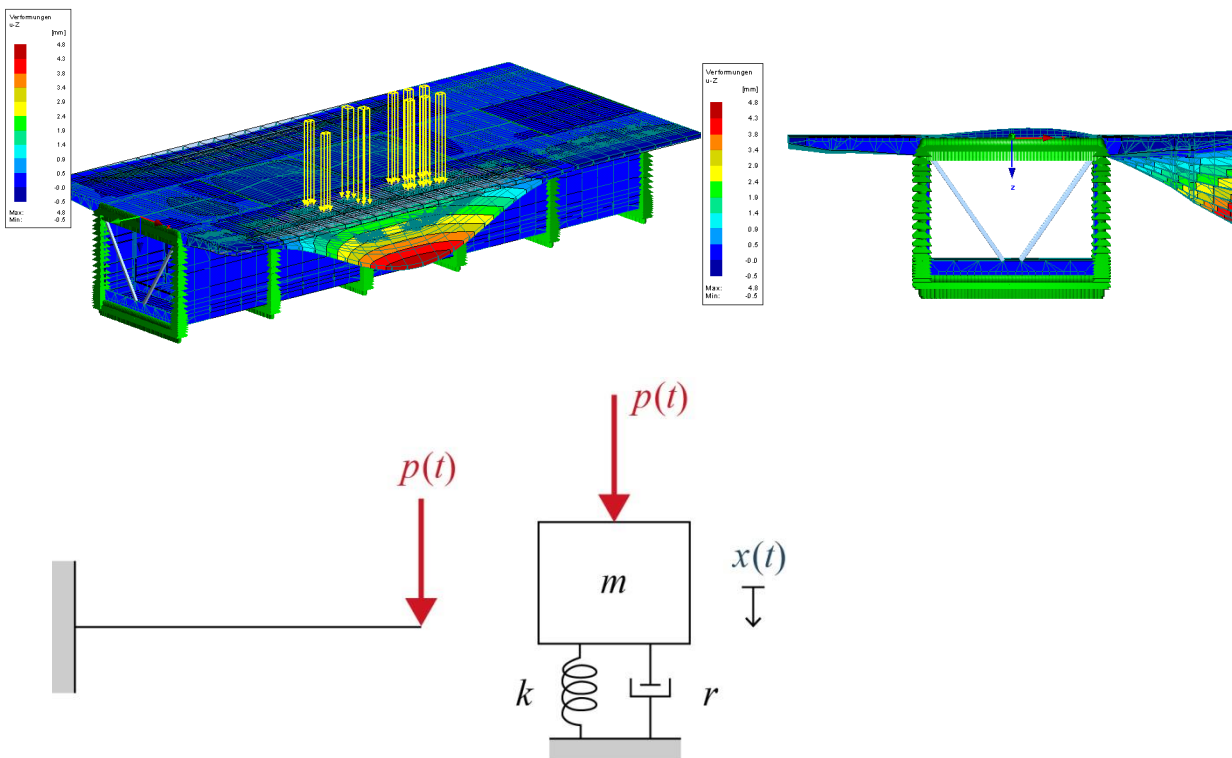


Bild 18: Diskretisierung des sekundären Tragsystems Kragarm auf einen Einmassenschwinger

Die Kragarm-Absolutverformungen lassen sich aber aus den gemessenen Beschleunigungen nicht unmittelbar mathematisch ableiten. Nach einer vorab durchzuführenden Offsetbereinigung liefert eine erste Integration die Schwinggeschwindigkeiten. Die zweite Integration errechnet aus den Geschwindigkeiten die zugehörigen Schwingwege, wobei hervorgehoben werden muss, dass unter derart berechneten Deformationen der Verschiebungsverlauf um die Kragarm-Schwerachse zu verstehen ist. Auf diesem Weg würden also nur die dynamischen Relativ-Verformungen verfügbar gemacht werden [2]. Anhand des Impulssatzes der allgemeinen Mechanik (1) wird die beschriebene Situation nun analytisch dargelegt. Dazu wird der Kragarm zunächst gedanklich als 1-Massenschwinger diskretisiert (Bild 18). Da dem Inertialsystem die statische Gleichgewichtslage infolge ständiger Lasten zugrunde liegt, erzeugt die Belastungsfunktion $p(t)$ eine Antwortfunktion $x(t)$, welche den Verlauf der entsprechenden Relativverschiebungen im Sinne der Ausgangslage beschreibt [47]. Zur vollständigen Lösung der vorliegenden Differentialgleichung (1) wäre eine entsprechende Anpassung an die Randbedingungen notwendig, eine Konsequenz der zusätzlich zur Relativverschiebung auftretenden statischen Antwort infolge unbekannter Last $p(t)$.

$$\begin{aligned}
 m \cdot \bar{a} &= \bar{R} \\
 m \cdot \ddot{x} &= p(t) - k \cdot x - r \cdot \dot{x} \\
 m \cdot \ddot{x} + r \cdot \dot{x} + k \cdot x &= p(t) \\
 \ddot{x} + 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x &= p(t) / m
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Vorab werden im Folgenden ausgewählte Parameter innerhalb des Impulssatzes kommentiert:

- ad maßgebliche äußere Belastung $p(t)$:

Wie aus dem Gleichungssystem (1) hervorgeht, wird die Bewegungsgleichung für Kraftanregung angeschrieben, wobei diese dynamische Belastung – konsistent zur vorherrschenden Einwirkung - entweder in Form von

- einer Halb-Sinus-Funktion
- Zeitfenstern von periodischer Einwirkung in Folge von LKW-Kolonnen
- allgemeiner, transientser Anregung

darstellbar wäre [48].

Für die auf dem Brückentragwerk Europabrücke vorherrschenden Betriebsbedingungen könnte der seitens des DYGES Prozesses vordergründig gesuchte Parameter $p(t)$

weitestgehend durch die ersten beiden, gelisteten Varianten beschrieben werden (je nachdem, ob nachweislich eine Einzelüberfahrt oder eine Fahrzeugkolonne den Messquerschnitt passiert).

- ad aktivierte Masse m / aktivierte Steifigkeit k und Dämpfung ξ :

Anhand eines Finite Elemente Rechenmodells unter Verwendung unterschiedlicher Schwerfahrzeuge (siehe **Bild 18**, **Bild 21** und **Bild 20**) kann sehr anschaulich gezeigt werden, dass am belasteten Kragarm bei jeder Überfahrt infolge der Variabilität von Fahrzeuggewicht, -geschwindigkeit und -länge jeweils völlig unterschiedliche Anteile des nachgiebig eingespannten Flächentragwerks betroffen sind. Dadurch ergäbe sich für ein rein analytisch basiertes Vorgehen die Notwendigkeit, die maßgeblichen reale Systemeigenschaften (Massenbelegung, Schwinglänge,...) des zugrundeliegenden Referenz-Tragsystems zweifelsfrei vorab zu bestimmen (z.B. über ein Rechenmodell) und in den Lösungsansatz zu integrieren.

Würde man das Dämpfungsverhalten mitberücksichtigen wollen, so müsste man zwingenderweise dessen Abhängigkeit von den auftretenden Amplituden mit ins Kalkül ziehen, d.h. von einer vordergründig unbekanntem, vom DYGES-Prozess gesuchten Größe. Zur Vereinfachung wird das Phänomen der Amplituden-abhängigen Dämpfungscharakteristik (welches in der Regel an Tragsystemen aller Art auftritt und insbesondere auch am vorliegenden, nachgiebig eingespannten, flächigen Brücken-Kragarm) aber im Rahmen analytischer Vergleichsrechnungen oftmals auch außer Acht gelassen.

Im Folgenden soll nun dargelegt werden, mit welchen Unsicherheiten ein rein analytisch basierter Prozess zur Erfassung der realen Einwirkungen bzw. zur Bestimmung der Verformungsfunktion $x(t)$ behaftet wäre, wodurch ein solches Vorgehen nicht forciert wurde. Vielmehr wurde stattdessen ein Weg – gestützt auf eine starke experimentelle Auseinandersetzung mit dem Tragverhalten - verfolgt:

- Die analytische Betrachtung eines kontinuierlichen Tragsystems unter fahrender Last, ausgedrückt durch die Zustandsgrößen Verschiebungen bzw. Beschleunigungen (siehe z.B. in [48]) zeigt, dass eine solche Lösung der dynamische Systemantwort als Überlagerung der einzelnen modalen Beiträge (Reihenansatz) zu entwickeln ist.
- Wie sich allerdings zeigen lässt (**Abschnitt 5.3**), ist eine solche modale Partizipation an der dynamischen Systemantwort Geschwindigkeits-abhängig.

- Zur Berücksichtigung dieser Tatsache müssten umfassende numerische Simulationsberechnungen von überfahrenden Schwerfahrzeugen am vorab zu identifizierenden Tragsystem (siehe vorher) durchgeführt werden, die sowohl das zu erwartende Tonnagen-Spektrum als auch das zugehörige Geschwindigkeits-Spektrum in einer sehr detaillierten Aufgliederung berücksichtigen müssten. Um eine Lösung für den automatisierten Dauerbetrieb bereitzustellen, wäre dann eigentlich eine Kalibrierung anhand von Feldversuchen notwendig, welche sicherstellt – dass tatsächlich die Realität abgebildet wurde. Mit anderen Worten würden vorab entsprechend verlässliche Referenzwerte benötigt, was aber dann wiederum einem Abgehen vom Anspruch an eine in sich geschlossene, analytische Lösung entspräche und gleichzeitig das prinzipielle Vorziehen einer vordergründig experimentell basierten Lösung nahelegt (**Kapitel 3.3-3.6**).
- Würde man die gemessenen Beschleunigungen des permanenten Monitoring-Systems direkt in eine auf streng analytischem Wege vorbereitete Lösung einsetzen wollen, so müsste das Beschleunigungssignal als Folge der modalen Komposition der Lösung Bandpass-gefiltert werden. Die modale Partizipation ist ihrerseits aber auch von der Verkehrsart abhängig, was eine automatisierte Erkennung und Anwendung auf das Messsignal vor dem Einsetzen in die Lösungsgleichung insbesondere im Fall von Kolonnenverkehr sehr schwierig macht. Dabei ist zu bedenken, dass unter solchen Einwirkungsbedingungen ein freies Ausschwingen kaum möglich ist. Die spektrale Verteilung und Ausprägung fällt dadurch keineswegs eindeutig für eine generalisierte Programmierung aus (siehe wiederum **Abschnitt 5.3**).
- Des Weiteren wäre die Verwendung von gemessenen Beschleunigungs-Beträgen (also gewissermaßen des Rohsignals) als Grundlage für die weiterführende, rechnerische Verwendung sehr fehleranfällig und würde zu einer instabilen Lösungsfindung führen (Messfehler, Ausreißer in den Zeitreihen).
- Beiden gerade angeführten Problemen wird im Verlauf dieser Dissertation durch die bereits in **Bild 17** dargelegte Signalglättung als Teil der Ereignisidentifikation begegnet werden. Auch eine solche Signalglättung ist zwar geschwindigkeitsabhängig, allerdings bleibt bei einem solchen Vorgehen die gesamte maßgebliche Information eines Überfahrtsereignisses erhalten, wie sich im Rahmen umfassender Beobachtungen des auftretenden Schwerverkehrs gezeigt hat.

Der Autor hat daher ein experimentell basiertes Vorgehen (Mustererkennung in Messdaten eines permanenten Feldversuches) für den vielversprechenderen Weg zur Abbildung von

realem Schwerverkehr erachtet, anstatt den streng analytischen Weg einzuschlagen (siehe umfassende Entwicklung und Validierung eines neu entwickelten Dynamischen Gewichtserfassungssystems in den **Kapiteln 3** und **4**).

Gleichzeitig wird aber bereits an dieser Stelle betont, dass im Rahmen des **Kapitels 5** eine umfangreiche mechanische Modellierung und analytische Plausibilisierung des vorwiegend experimentellen Dynamischen Gewichtserfassungssystems DYGES erfolgte. Da vorneweg - mit Ausnahme der Beschleunigungen - jegliche maßgebliche Komponente der Bewegungsgleichung im Zuge einer beliebigen Belastungssituation gleichermaßen eine Unbekannte darstellt, wurden an einem statischen Ersatzsystem entsprechende Studien der Systemantwort bzw. der Parameteridentifikation vorgenommen. Dabei sei vorausgeschickt, dass erst durch die starke Berücksichtigung realer Systemgrößen der notwendige Konnex zu den aus Feldversuchen stammenden Referenzgrößen hergestellt bzw. deren hinreichend gute Nachbildung vorgenommen werden konnte.

3.3 Kalibrierungsmessung

Wie im bisherigen Verlauf der Erörterungen (insbesondere im **Kapitel 3.1**) ersichtlich, hat sich das Messprinzip an den Kragarmen hinsichtlich einer Identifikation der den Bauteil belastenden Ereignisse als geeignet und zuverlässig herausgestellt. Ergänzend zum qualitativ bereits richtigen Verlauf der dynamischen Antwortfunktion PatschGL (**Bild 17**) sollte nun auch der quantitative Zusammenhang zwischen den Kragarm-Absolutverformungen und den auslösenden LKW-Überfahrten hergestellt werden. Um diesen Vorgang insbesondere auch für die automatisierte Auswertung der Daten aus der permanenten Messung aufzubereiten bzw. die Entwicklung einer „Reproduktion“ der Verformungen aus Beschleunigungsdaten zu ermöglichen (d.h. der sog. DYGES-Verlaufsfunction - siehe **Kapitel 3.4**), musste eine notwendige Prozess-Kalibrierung mittels Laser-Verformungsmessungen in die Wege geleitet werden. Dabei war es erforderlich, ausgehend von einem Festpunkt außerhalb der Brücke, die zum damaligen Zeitpunkt noch unbekanntes Kragarm-Absolutverschiebungen zeitsynchron mit den Beschleunigungen am Kragarm zu erfassen (**Bild 19**). Zu diesem Zweck wurden in der Nacht von 18.05 auf 19.05.2005 Kalibrierungsfahrten an der Europabrücke durchgeführt.

Im Rahmen dieser Kalibrierungs-Fahrten kam zusätzlich zur permanenten Instrumentierung folgende, mobile Mess-Sensorik zum Einsatz:

- Ein PSM-200 Displacement Sensor (Fa. Noptel-Finnland)

Dabei wird ein Laserstrahl auf einen optoelektronischen Empfänger gerichtet. Eine sich verändernde Position des Empfängers verursacht eine zugehörige, sich verändernde Ausmittigkeit, wodurch ein elektrisches Antwortsignal generiert wird. Aus der Sicht des Empfängerschirmes wird im Zuge der Messung die vertikale Veränderung seiner Position erfasst und als Vertikal-Verformungen im entsprechenden Messkanal abgelegt.

Als Kalibrierungs-Schwerfahrzeuge kamen zwei Erhaltungsfahrzeuge der ASFINAG Alpenstraßen GmbH zum Einsatz, deren statische Gesamtbelastung vorab genau bekannt war (ein leerer, unbeladener 2-achsiger LKW mit 8,7t sowie ein Brückeninspektionsgerät mit 5 Achsen und 42,8t). Diese sind in gesichertem Abstand hintereinander und mit festgelegten Geschwindigkeiten in mehreren Durchläufen auf der RFB Innsbruck über den Brücken-Messquerschnitt III (im Bereich des Pfeilers II - siehe **Abschnitt 2.1** bzw. **Bild 15**) gefahren. Dabei wurden die registrierten Werte gemessen und verglichen. Diese Fahrten wurden außerhalb des normalen Tagesverkehrs durchgeführt, d.h. der restliche Verkehr wurde dadurch nicht beeinträchtigt (Zeitaufwand ca. von 22.00 Uhr bis 1.00 Uhr Früh). Die Überfahrtsgeschwindigkeiten sollten je Durchlauf konstant gehalten werden und mit jedem

neuen Durchlauf stufenweise gesteigert werden (in 10 km/h Steigerungs-Schritten von 20 – 60 km/h), wobei jeweils drei Überfahrten pro Geschwindigkeitsstufe vorgesehen waren. Tatsächlich wurden seitens der ASFINAG aber nur zwei Durchgänge gefahren.



Bild 19: Instrumentierung des Messquerschnittes II (Laser-Sender beim Widerlager Patsch; Empfängerschirm kraftschlüssig am Gelände befestigt (oben) sowie das Brückeninspektionsgerät mit 5 Achsen und 42,8t Gesamttonnage (unten)

3.3.1 Numerische Referenzwerte

Vorbereitend zu den Kalibrierungs-Messungen beziehungsweise zu deren Auswertung wurden Finite-Elemente Vergleichsrechnungen durchgeführt. Sie dienten zur Verifizierung der Größenordnung der zu erwartenden Kragarm-Verformungen. Diese analytischen Berechnungen wurden an - mit Schalenelementen modellierten - Brückensegmenten durchgeführt. Bei der Berechnung wurden dieselben Belastungen verwendet, wie sie bei den Kalibrierungs-Fahrten zum Einsatz kamen, wobei diese vereinfachender Weise als ruhende Belastungen im Sinne eines rechnerischen Ausgangslastfalles (statische Referenzlage) aufgebracht wurden.

Da sich der instrumentierte DYGES Querschnitt direkt über dem Pfeiler II befand, wurden sinngemäß zur konzipierten Messaufgabe auch die rechnerischen Simulationen im Pfeilerbereich angesiedelt. Dabei sollten die globalen Verformungen unterdrückt werden und als Einflussgröße ausscheiden. Die globalen Vertikalverformungen am Brückensegment wurden daher unterbunden, indem abschnittsweise Festhaltungen entlang der Hohlkastenwand angebracht wurden (siehe **Bild 21** und **Bild 20**). Wie sich in weiterer Folge zeigen wird, weisen die mit Hilfe dieser Modelle simulierte, vertikalen Durchbiegungen in ihrer Größenordnung eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten während der Kalibrierungsfahrten auf. Gleichzeitig stellen sie eine konsistente, quasi-statische Bezugsbasis zu den Mess-Ergebnissen in **Bild 22** dar.

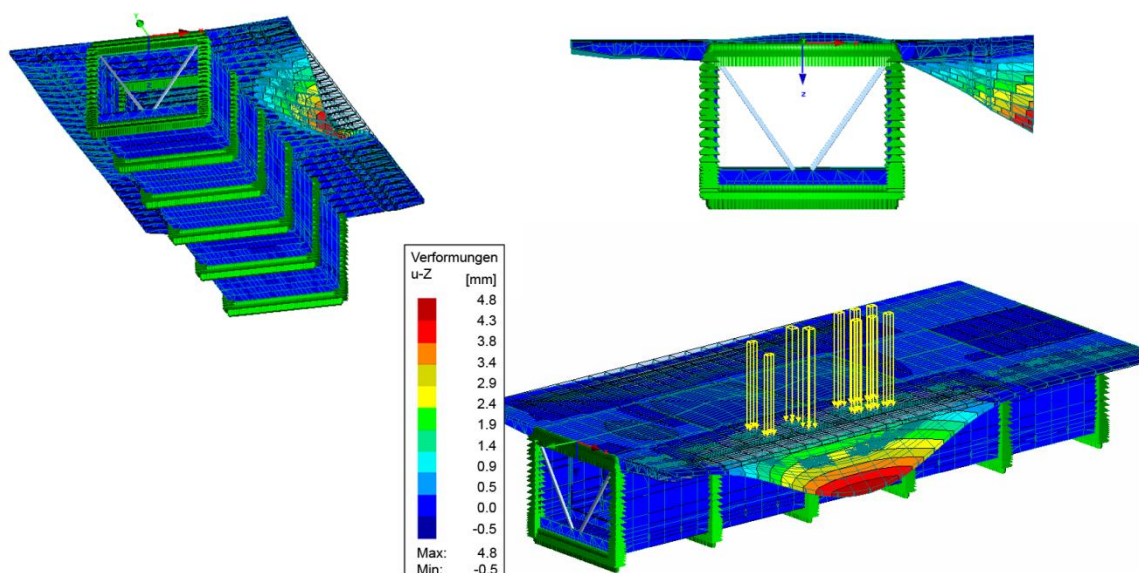


Bild 20: Finite Elemente Vergleichsrechnung an einem Brückensegment – Lastfall Schwer-LKW mit 5 Achsen und 42,8t statischer Last am Sekundärbauteil Kragarm

Eine der wesentlichsten, notwendigen Grundvoraussetzungen des DYGES-Algorithmus, welche aus umfangreichen, vorausgehenden Beobachtungen in Messfiles bereits hervorging, wurde nun auch im Rahmen der vorliegenden rechnerischen Simulationen nochmals bestätigt:

Es zeigte sich, dass vom direkt befahrenen Kragarm keinerlei nennenswerten Auswirkungen im Sinne von Beschleunigungen oder Verformungsreaktionen auf den gegenüberliegenden Kragarm übertragen werden. Die durchgeführte Vorgehensweise einer isolierten Kalibrierung des Kragarm-Verhaltens für die Richtungsfahrbahn Innsbruck unabhängig von der Fahrtrichtung Brenner kann daher als legitim angesehen werden [27]. An dieser Stelle sei dennoch darauf hingewiesen, dass im Rahmen einer zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführten, umfassenden rechnerischen Betrachtung der im DYGES-Verfahren implizierten Modellierungsgenauigkeit

(Abschnitt 5.6) insbesondere auch der Einfluss des Belastungsgeschehens der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn behandelt wird (Abschnitt 5.6.7).

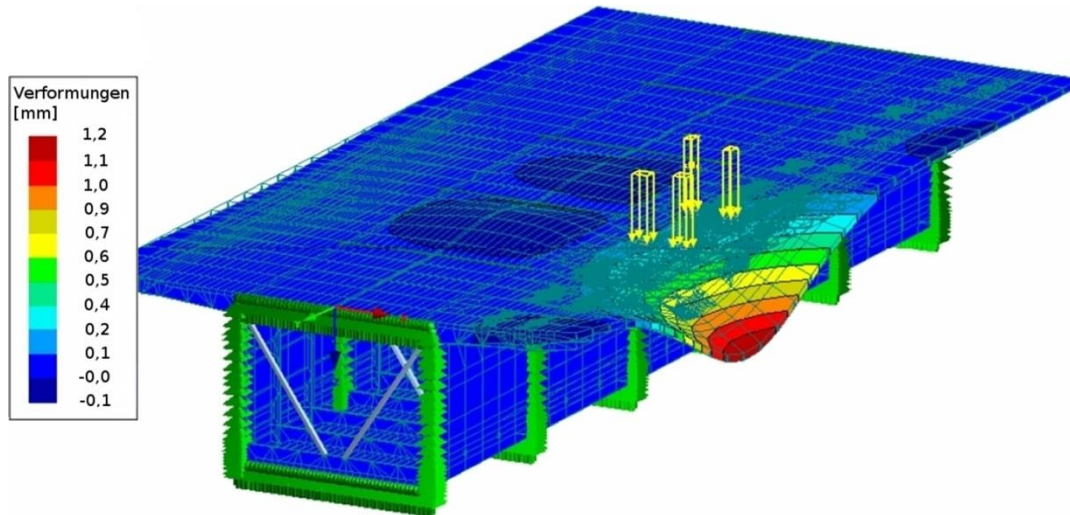


Bild 21: Finite Elemente Vergleichsrechnung an einem Brückensegment – Lastfall Leer-LKW mit 8,7t statischer Last am Sekundärbauteil Kragarm

3.3.2 Ergebnisse der Eichfahrten als Verschiebungs-Geschwindigkeits-Charakteristik

Als Basis für den einleitend zum **Abschnitt 3.3** beschriebenen, angestrebten Reproduktionsprozess von Kragarmverformungen werden zunächst die direkt erfassten Messwerte der Kalibrierungs-Fahrten im nachfolgenden **Bild 22** als Verschiebungs-Geschwindigkeits-Funktionen für beide Belastungsfahrzeuge dargestellt. Die Werte wurden durch eine Mittelung der Ergebnisse aus den zwei durchgeführten Überfahrten pro Geschwindigkeitsstufe über den Messquerschnitt gewonnen. Da aber trotz allem nur fünf Werte pro Kurve zur Verfügung standen (fünf Geschwindigkeitsstufen mit je einem Mittelwert), wurde der übergebene Datensatz durch einen kubischen Spline approximiert, um eine durchgängige Funktion zu erhalten. Die Funktionen beider Eichfahrzeuge (**Bild 22**) - d.h. des 42,8 t LKW ebenso wie des 8,7 t LKW - zeigen prinzipiell einen ähnlichen Verlauf, wobei die geschwindigkeits-abhängige Charakteristik für den Fall des unbeladenen Schwerfahrzeuges deutlich stärker ausgeprägt ist.

Wie aus der Kenntnis der allgemeinen Baumechanik zu erwarten war, besteht ein wesentlicher Einfluss der Überfahrtsgeschwindigkeit auf die Durchbiegung von Bauteilen (Rolling Stock Analysis). Dabei wird insbesondere ersichtlich, dass der im Messpunkt zur maximalen Kragarm-Durchbiegung zugehörige, auftretende Schwingbeiwert keinesfalls einseitig im Sinne einer dynamischen Vergrößerung aufgefasst werden darf.

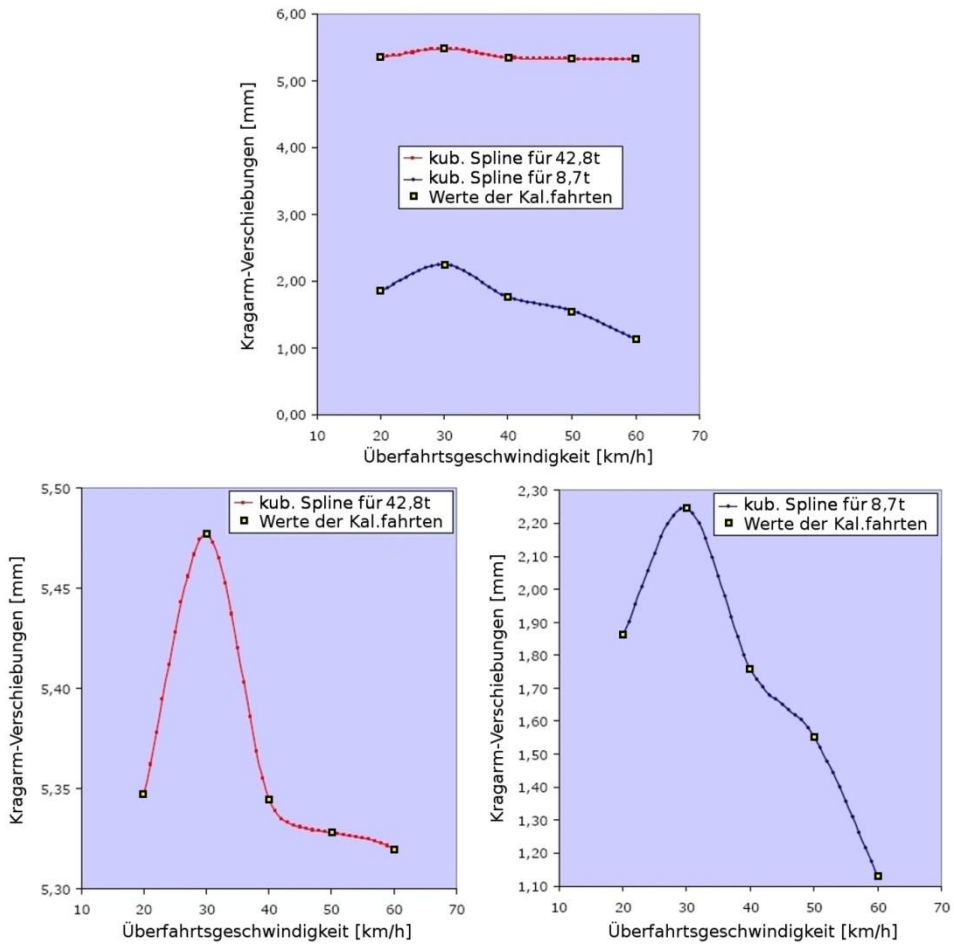


Bild 22: Antwort-Funktionen des von ausgewählten Schwerfahrzeugen befahrenen Kragarmes (Laser-basierte Absolutverschiebungen vs. Geschwindigkeit)

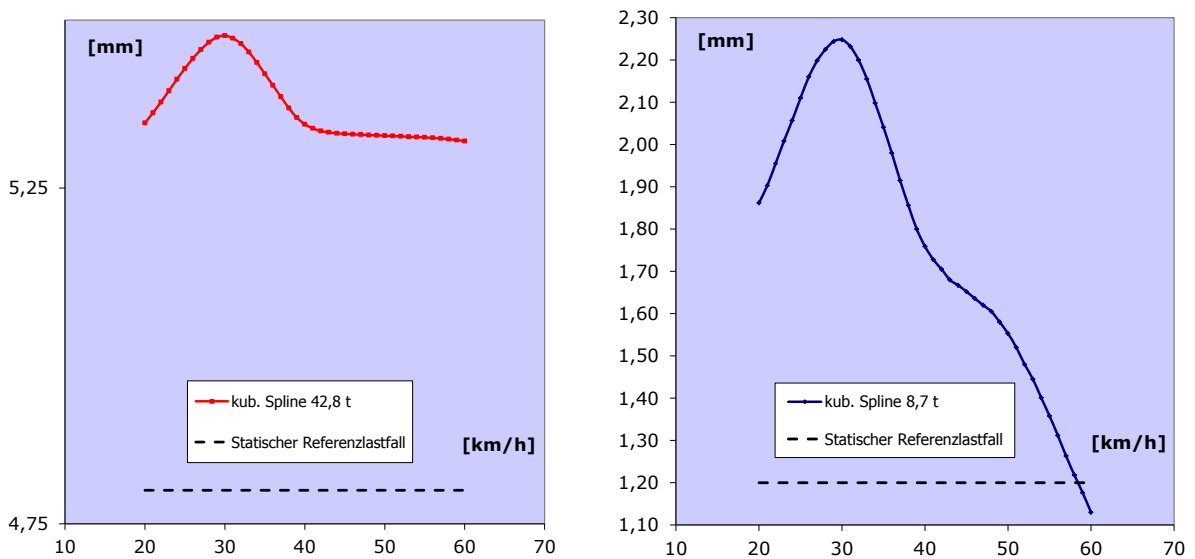


Bild 23: Antwort-Funktionen aus Bild 22 incl. statischer Ausgangslage aus Abschnitt 3.3.1

Für beide Verläufe in **Bild 22** (8,7 t LKW bzw. 42,8 t LKW) geht eine anfängliche Steigerung der Überfahrtsgeschwindigkeit auch mit einer deutlichen Steigerung der Durchbiegung einher, d.h. mit einer dynamischen Vergrößerung, bezogen auf die gedankliche, quasi-statische Ausgangslage bei ≤ 20 km/h. Das erzielte Durchbiegungs-Maximum liegt jeweils bei 30 km/h, danach hat eine weiter gesteigerte Überfahrts-Geschwindigkeit eine Reduktion der auftretenden Durchbiegung zur Folge. Das heißt, dass sich ab dieser Geschwindigkeit eine weitere Verkürzung der Belastungsdauer augenscheinlich entlastend für den Sekundärbauteil Brückenkrugarm auswirkt. Die Reduktion der auftretenden Durchbiegung geht soweit, dass bei Geschwindigkeiten zwischen 40 und 60 km/h die zugehörigen Durchbiegungen bereits die Werte der anfänglichen Durchbiegung bei 20km/h unterschreiten.

Mit anderen Worten weist das betrachtete Tragverhalten in Brückenquerrichtung eine ausgeprägte, geschwindigkeitsabhängige Antwort-Charakteristik für die einwirkende Überfahrts-Belastung auf. Der Einfluss der Verweildauer infolge Überfahrts-Geschwindigkeit scheint für den Leer-LKW (8,7t) von wesentlich größerer Bedeutung als für voll ausgelastete Schwerfahrzeuge (42,8t) zu sein. Dies kann zusammenfassend insbesondere anhand von **Bild 23** nachvollzogen werden, welchem für die Überfahrten des 8,7t LKW Schwingbeiwerte ϕ zwischen 0,94 und 1,87 entnommen werden können, während für die Überfahrten des 42,8 t LKW Schwingbeiwerte ϕ zwischen 1,11 und 1,14 registriert wurden.

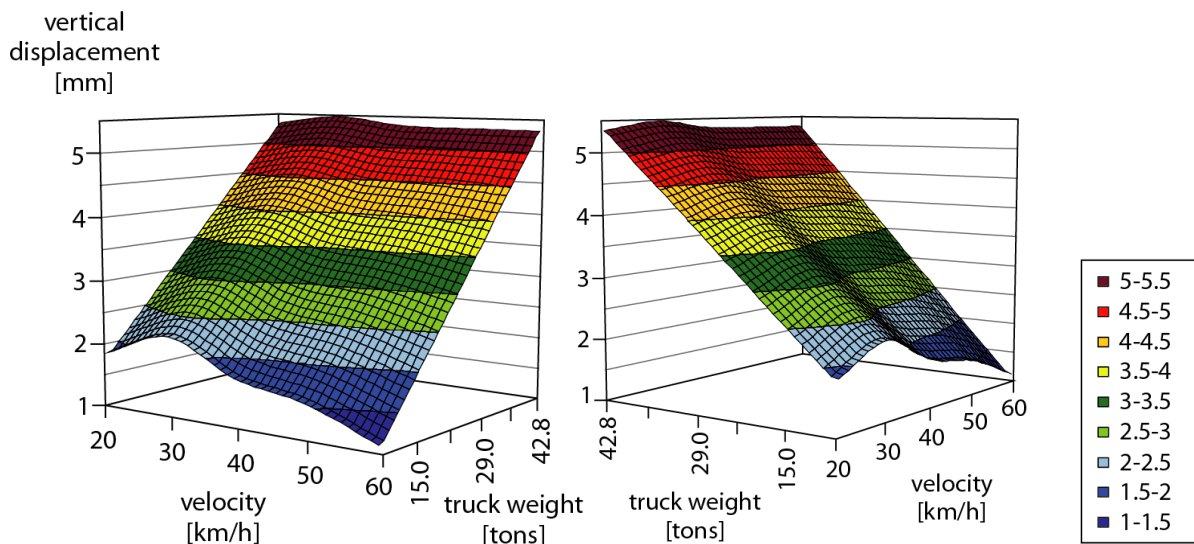


Bild 24: Räumliche Darstellung der laser-basierten Vertikalverformungen am Brückenkrugarm als Funktion der auftretenden Tonnagen und Geschwindigkeiten

Die Unterschiedlichkeit der Verlaufsfunktionen zwischen Leer-LKW und voll ausgelastetem Schwerfahrzeug infolge Feldversuch (**Bild 22**) legt einen allmählichen Übergang für die Raumfunktion zwischen den beiden Grenzfällen nahe, um das LKW-Belastungskollektiv

dazwischen abzubilden. Es wird angenommen, dass dieser Bereich durch das gewählte Vorgehen und ohne Detailkenntnis durch weitere Eichfahrzeuge (mit gestaffelt veränderten Tonnagen) hinreichend genau abgebildet wurde. Um aus den beiden bisherigen, als Grenzfall erzeugten Verformungs-Geschwindigkeits-Funktionen daher eine Raumkurve zu erzeugen, welche den gesamten, durch den Überfahrtsversuch vorgegebenen Geschwindigkeitsbereich und Tonnagen-Bereich abdeckt (**Bild 24**), wurden durch lineare Interpolation punktweise Erzeugende zwischen den beiden Verformungsfunktionen aus **Bild 22** generiert.

Neuerlich wird an dieser Stelle auf die im **Kapitel 5.6** durchgeführten, umfassenden rechnerischen Parameterstudien des DYGES-Verfahrens hingewiesen – und zwar auf die **Abschnitte 5.6.3 & 5.6.4**, welche der Modellierungsgenauigkeit im Zuge der Erstellung einer Raumfunktion für den vorgegebenen Geschwindigkeits- und Tonnagen-Bereich aus den durch die beiden Eichfahrzeuge gegebenen Grenzkurven nachgeht.

3.4 Implementierte, methodische Komponenten hinsichtlich LKW Klassifizierung

3.4.1 Grundzüge (Gesamtheit) des DYGES-Algorithmus

Das nachfolgende Flussdiagramm in **Bild 25** gibt eine grundsätzliche, zusammenfassende Übersicht aller maßgeblichen Teile der entwickelten Methodik – während **Bild 26** den gesamten DYGES-Prozessablauf nochmals in bereits detaillierterer Form zur besseren Nachvollziehbarkeit dargestellt. **Bild 25** zeigt, dass der DYGES-Algorithmus aus drei Prozessblöcken besteht, wobei die Blöcke I & II den eigentlichen, methodischen Kern bilden (Reproduktionsprozess von Kragarmverformungen aus den Beschleunigungs-Rohsignalen) und Prozessblock III im Wesentlichen als Nachlaufprozess zur Verwertung der entstandenen Ergebnisse (Erstellung eines LKW-Einwirkungskollektivs) zu verstehen ist.

Ausgangslage für den DYGES-Algorithmus sind die Messkanäle

- Nr. 11 (MQ3_KragPatsch_FBA) &
- Nr. 12 (MQ3_KragPatsch15_FBA)

des permanenten Monitoringsystems im Sinne von **Bild 15**. Die daraus entwickelten Funktionsbezeichnungen werden im Rahmen der ausgearbeiteten Methodik spezifiziert.

Ein Ausblick auf die einzelnen Prozessblöcke wird im Folgenden gegeben:

PROZESSBLOCK I: „Qualitatives Nachbilden von Kragarm-Absolutverformungen“

siehe Abschnitt 3.4.2 sowie Ablaufdiagramm in **Bild 28**

PROZESSBLOCK II: „Ereignis-Erfassung und -Charakterisierung“

siehe **Abschnitt 3.4.3** sowie Ablaufdiagramm in **Bild 33**

PROZESSBLOCK III: „Erstellung des LKW-Lastkollektivs“

siehe **Abschnitt 3.4.4** sowie Ablaufdiagramm in **Bild 37**

Ein wesentlicher Umstand der gesamten entwickelten Prozedur besteht darin, dass jeglicher algorithmischer Input letztlich nur den Sensor kanal „MQ3_KragPatsch_FBA“ betrifft – zugehörig zum in Fahrtrichtung Innsbruck unmittelbar über dem Pfeiler II angebrachten 1D-Beschleunigungsaufnehmer. Die mit den anderen beiden Kragarmsensoren verknüpften Messkanäle bleiben unverändert (insbesondere unkalibriert). Dabei dient der Kanal „MQ3_KragPatschP15_FBA“ vordergründig dazu, im Kanal „MQ3_KragPatsch_FBA“ vermeintlich identifizierte Ereignisse zu bestätigen sowie deren Geschwindigkeit zu erfassen. Der „MQ3_KragBrenner_FBA“ diene lediglich zum Zwecke der methodischen Validierung sowie der manuellen Analyse einzelner Sonder-Fälle. Er wird daher für die hier beschriebene Kalibrierungs-Implementierung außer Acht gelassen.

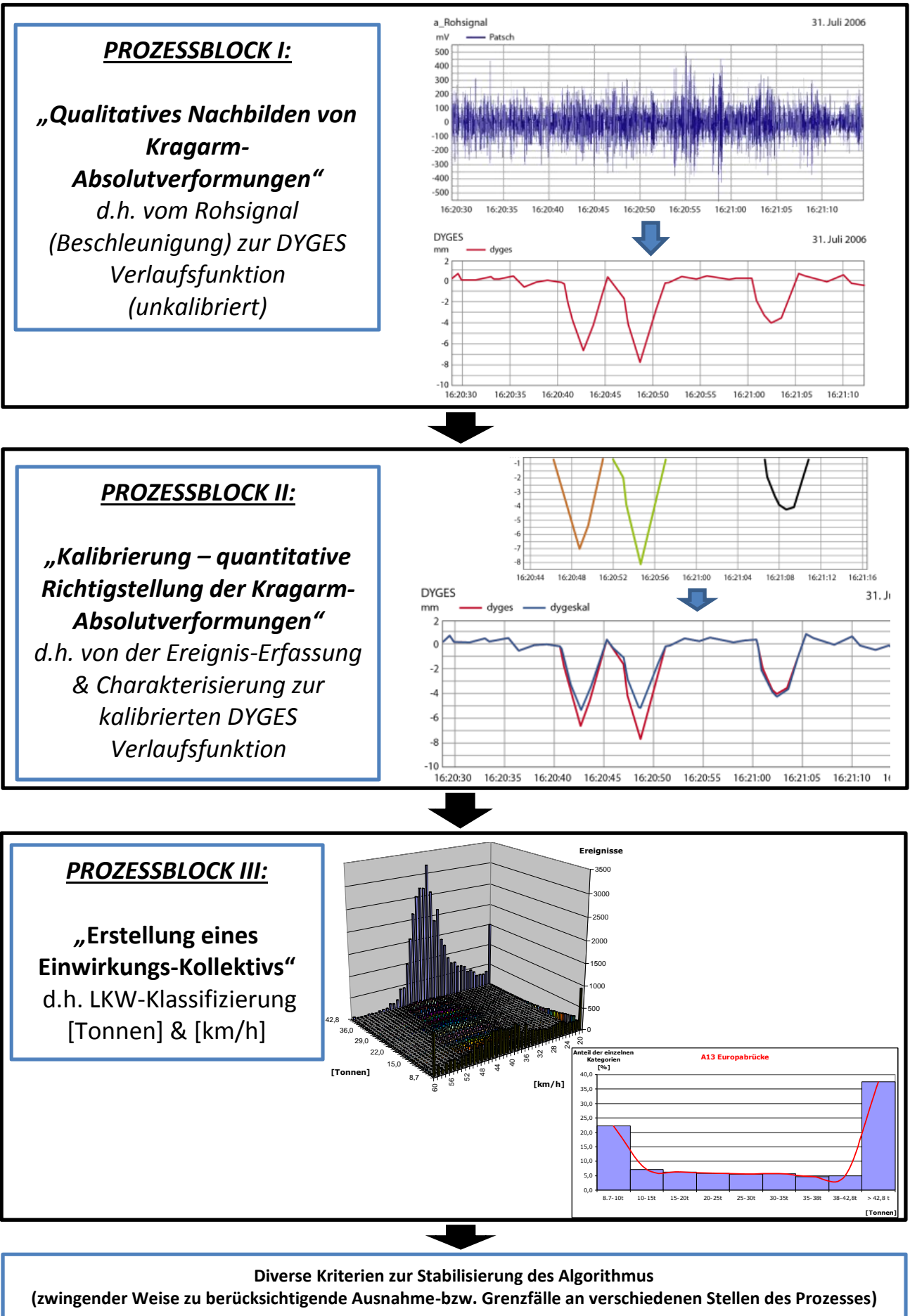


Bild 25: Übersichts-Ablauf-Diagramm; Zusammenfassung der maßgeblichen, methodischen Elemente

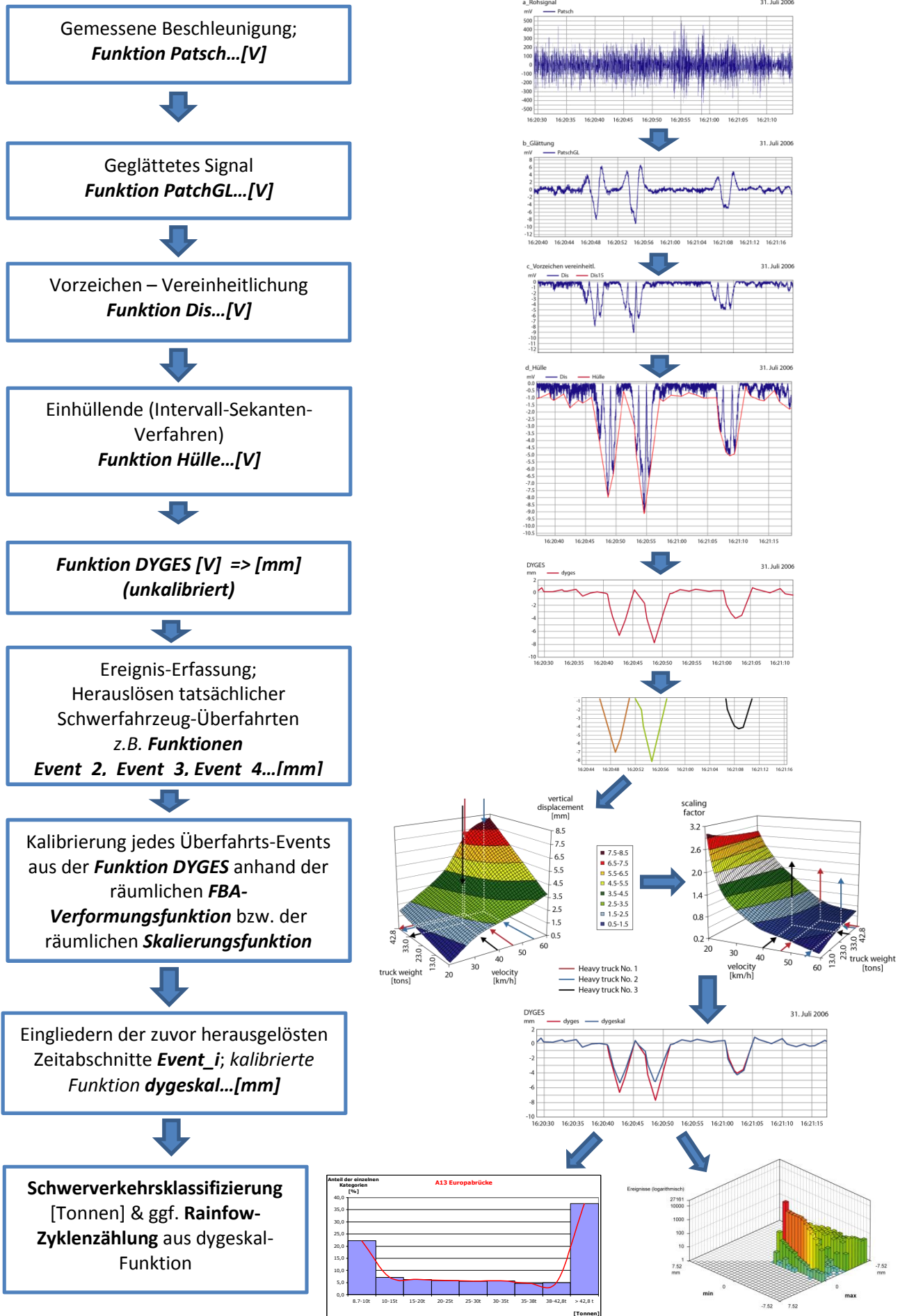


Bild 26: Ablauf-Diagramm – Detaillierung mit Bezug auf (Bild 25)

Zum ergänzenden Verständnis hinsichtlich des Einflusses der auftretenden Überfahrtsgeschwindigkeit auf die gemessenen Beschleunigungen sei an dieser Stelle auf die Auswirkung der geschwindigkeitsabhängigen Massenträgheit der Beschleunigungssensoren hingewiesen (eine Eigenschaft der eingesetzten und im Zuge des **Kapitels 2.1** beschriebenen Forced Balance Accelerometers). Anders formuliert muss man sich unter veränderlichen Geschwindigkeitsbedingungen darüber im Klaren sein, dass die eingesetzten FBA-Aufnehmer (FBA) über die Bandbreite des auftretenden Frequenzbereiches eine nichtlineare Charakteristik aufweisen, was insbesondere im Fall von sehr langsamen bzw. sehr schnellen Überfahrtsereignissen – d.h. außerhalb des kalibrierten Messbereiches - von Bedeutung ist. Bei der weiteren Handhabung der Daten (algorithmische Umsetzung) wurde dieser Aspekt konsequenter Weise in die entwickelten Lösungsansätze implementiert (siehe **Kapitel 3.6**).

Die Entwicklung und Evaluierung der DYGES-Verlaufsfunction selbst und darauf aufbauende Elemente wurden in FAMOS [30] – einer Software zur individuellen Messsignalverarbeitung - vorgenommen. Dem **Kapitel 11** kann der Quellcode zu diesem Teil des Algorithmus entnommen werden, der detailliert auskommentiert und mit ergänzenden Visualisierungen anhand ausgewählter Messfiles versehen wurde.

Notwendigerweise waren des weiteren zahlreiche Stabilisierungsmechanismen bzw. Ausnahmekriterien in den Algorithmus zu implementieren, welche detailliert im **Kapitel 3.5** einerseits sowie im **Kapitel 11** andererseits beschrieben und visualisiert werden.

Die programmiertechnische Umsetzung zur automatisierten Verarbeitung großer Datenmengen des permanenten Monitoringsystems (incl. Ereigniserfassung und –charakterisierung) erfolgte dann in einer eigens geschaffenen Software, welche in C++ programmiert wurde. Von einer Publikation dieses erweiterten, C++ basierten Quellcodes zusätzlich zu den in **Kapitel 11** aufbereiteten FAMOS-Sequenzen wird aus Gründen der einzuhaltenden Übersichtlichkeit abgesehen.

3.4.2 DYGES Prozessblock I: DYGES Verlaufsfunktion & Ergebnisse der Eichfahrten als Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Charakteristik

Vorbereitend zur eindeutigen und lückenlosen Erfassung der auftretenden LKW-Überfahrten besteht dieser Prozessblock aus den im Ablaufdiagramm (**Bild 28**) dargelegten Schritten

- Glättung (siehe **Abschnitt 3.1**),
- anschließender Vorzeichen-Vereinheitlichung
- gefolgt von einer Nachbildung der bis dahin gewonnenen Zeitverlaufsfunktion mittels Hüllkurven (Intervall-Sekanten Verfahren) inklusive abschließender Nachabtastung.
- Danach wird in das Signal ein Histogramm-basierter, neuer Offset eingezogen.

Dadurch liegen für die beiden in Fahrtrichtung Innsbruck hintereinander und permanent instrumentierten Beschleunigungssensoren die Verlaufsfunktionen **DYGES** bzw. **DYGES15** vor (siehe **Bild 28** bzw. **Bild 33**). Die oben aufgelisteten Schritte werden nachfolgend weiter präzisiert. Dazu wird nochmals auf die Funktionsverläufe in **Bild 17** Bezug genommen, wobei nun die Betrachtung auf einen einzelnen Messkanal der Beschleunigungsmessung reduziert wird. Wie die Anwendung der Glättung auf das Beschleunigungssignal zeigt, besteht ein Überfahrtsereignis typischer Weise stets aus einer vorauseilenden Halbwellen (entgegengesetzt zur Belastungsrichtung), der Überfahrt selbst (Halbwelle in Belastungsrichtung) sowie einer nachlaufenden Halbwellen – wiederum entgegengesetzt zur Belastungsrichtung (**Bild 27**).



Bild 27: Geglättetes Beschleunigungssignal am BrückeKragarm zur gezielten Erkennung von LKW-Überfahrten für den Beschleunigungs-Sensor Patsch

Die infolge dieses Überfahrtsimpulses interessierende Kragarm-Reaktion über die Zeit lässt sich anhand der Gleichungen (2), (3) und (4) analytisch in generalisierter Form anschreiben. Bezugnehmend auf die Ausführungen in **Abschnitt 3.2** zur quantitativen Erfassung des

auslösenden LKW-Gewichtes bzw. der dabei ebenfalls zu generierenden Kragarmverformung kommt natürlich dem Kalibrierungsfaktor besondere Bedeutung zu.

$$\ddot{u}(x, t) = \phi(x)\ddot{q}(t) \quad (2)$$

$$\phi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Beschleunigung } \ddot{u}(x, t) \\ = \text{Kalibrierungsfaktor} * \text{Amplitude } \ddot{q}(t) * \text{Einheitsmode } \phi(x) \end{aligned} \quad (4)$$

An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass eine vollständige analytische Nachbildung des Messungs-basierten Dynamischen Gewichtserfassungsverfahrens in **Kapitel 5** nachgereicht wird.

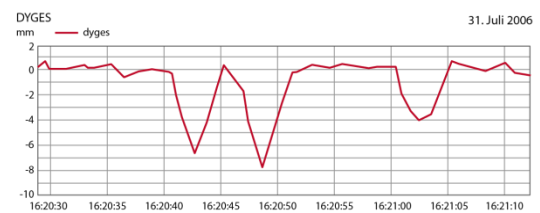
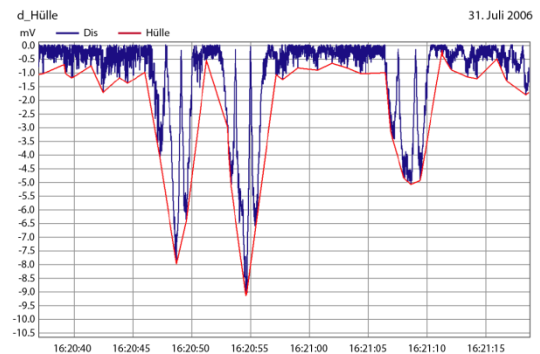
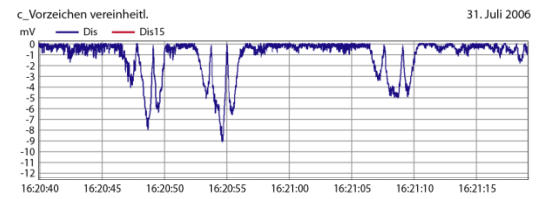
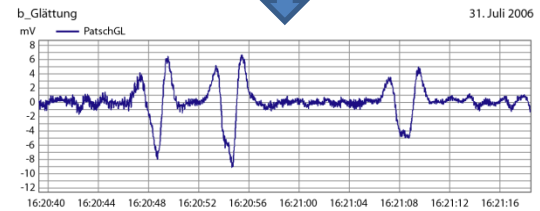
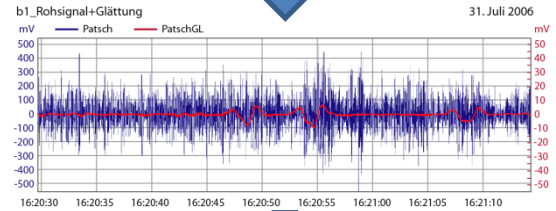
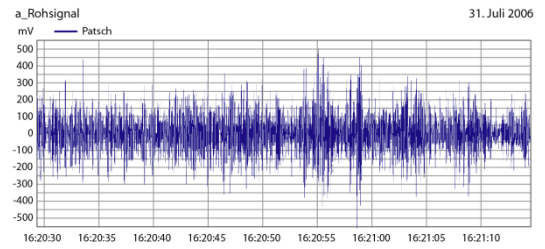
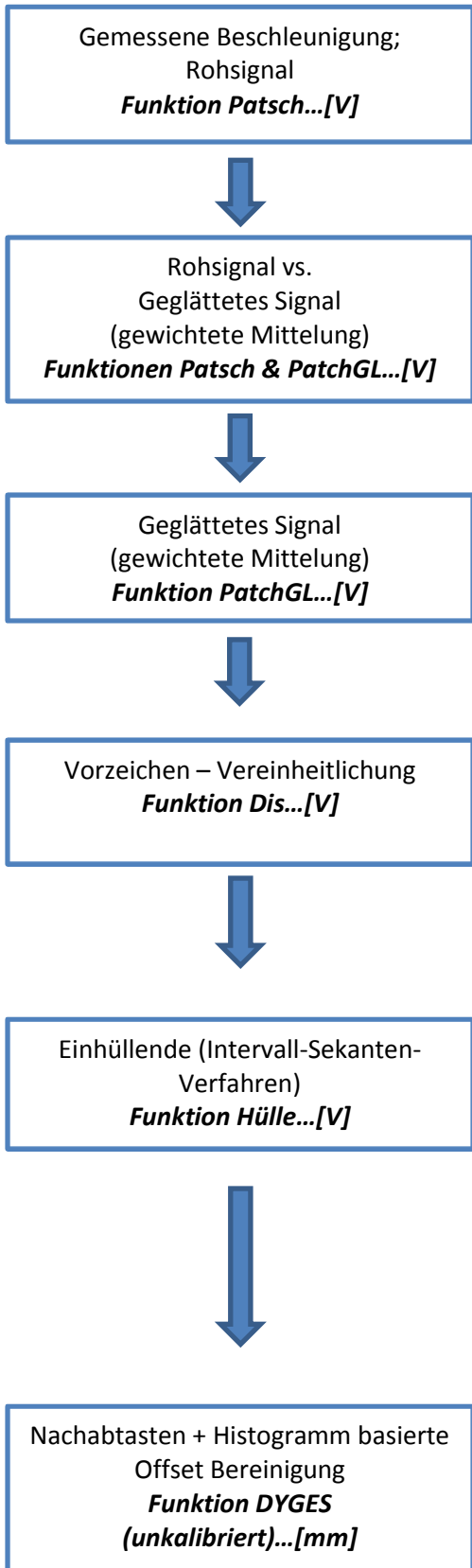


Bild 28: Ablauf-Diagramm – Detaillierung des **Prozess-Blocks I** in Bild 25

Da die Erfassung der LKW-Gewichte (bzw. die zugehörige Geschwindigkeitsbestimmung) stets auf der Basis der maximalen Kragarm-Reaktion infolge Überfahrt erfolgt, sind eigentlich nur die Amplituden in Belastungsrichtung maßgebend. Gleichzeitig wurde im **Abschnitt 3.3.1** gezeigt, dass die Kragarmverformungen nach oben (entgegen der Belastungsrichtung) weitgehend vernachlässigbar sind.

Die aus diesem Grund vorgenommene Vorzeichenvereinheitlichung (entspricht einem „Umklappen“ der negativen Beiträge der geglätteten Beschleunigungsfunktion nach unten) resultiert aber in einer Vervielfachung der Stützstellen, die danach dem applizierten Intervall-Sekanten Verfahren zur Generierung einer Einhüllenden des Überfahrts-Ereignisses zu Gute kommen. Die aus der Vorzeichen-Vereinheitlichung resultierende Maximierung an Stützstellen bringt gleichzeitig eine entsprechende Stabilisierung für diesen Teil des DYGES-Algorithmus (Ereignisnachbildung) mit sich (siehe **Bild 29**).

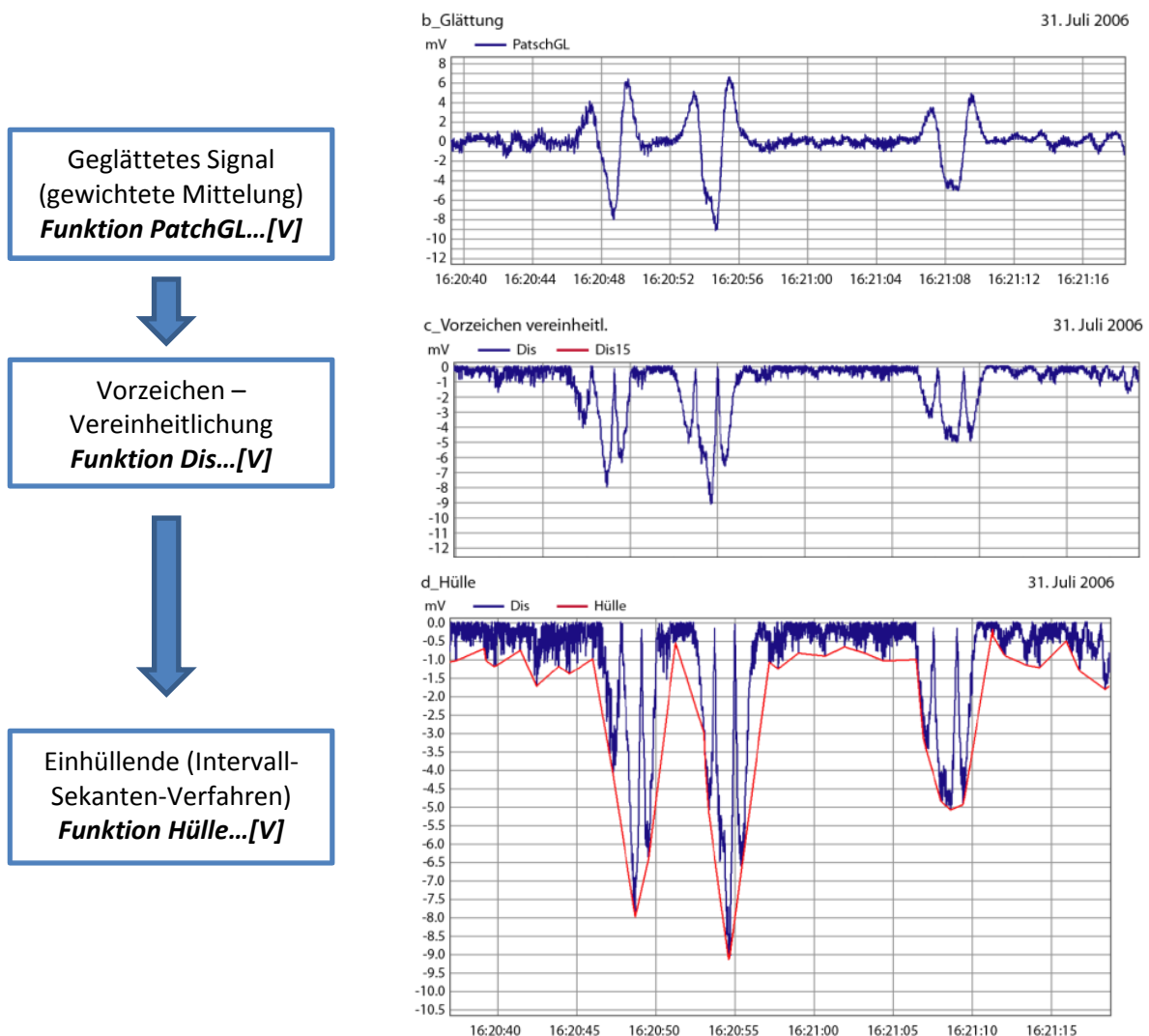


Bild 29: Detaillierung des Ablauf-Diagramms aus **Bild 26** zu den Aspekten Glättung / Vorzeichen-Vereinheitlichung und Einhüllen

Wie dem **Bild 28** entnommen werden kann, wird das Rohsignal des Beschleunigung-Sensors infolge des Messprinzips der eingesetzten FBA (Forced Balance Accelerometer) in elektrischer Spannung und daher in V ausgewiesen (siehe **Abschnitt 2.1**), wobei zwischen V und der Erdbeschleunigung g für die im Bauwesen gängigen Frequenzbereiche ein linearer Zusammenhang besteht ($1V$ entspricht $2,5g$). Die in weiterer Folge vorgenommene Einheitenüberführung der Ausgangseinheit **Volt** in die Zieleinheit **m** erfolgte vorerst ohne physikalischen Hintergrund sowie ohne eine mathematische Umrechnung, d.h. ohne rechnerische Anpassung der Amplituden der Antwortfunktion DYGES. Die betragsmäßige Richtigkeit ist durch die in weiterer Folge vorgenommene Kalibrierung (**Kapitel 3.4.3 & 3.4.4**) gewährleistet. Bei genauerem Studium der Ablaufdiagramme in **Bild 28, Bild 33, Bild 37** wird auffallen, dass die generierten Durchbiegungsamplituden mitunter variabel (in **mV** bzw. **mm**) ausgewiesen werden – wobei diese Schreibweise äquivalent ist. Eine endgültige Einheitenfestlegung erfolgte erst nach der besagten Kalibrierung der DYGES-Verlaufsfunktion. Mit anderen Worten hat die DYGES Verlaufsfunktion ursprünglich eigentlich die Einheit einer geglätteten Beschleunigung, welche in Hinblick auf die weitere Verwertung der Mess-Signale unmittelbar in Verformungen übergeführt wurde. In diesem Zusammenhang sei an dieser Stelle neuerlich auf die im **Kapitel 5.6** durchgeführten, umfassenden rechnerischen Parameterstudien zur Modellierungsgenauigkeit des DYGES-Verfahrens hingewiesen – diesmal auf die **Abschnitte 5.6.1 & 5.6.2**, bei welchen durchgängig die eigentlichen physikalischen Einheiten zur rechnerischen Analyse der resultierenden Absolutwerte (Überfahrtschwindigkeit vs. Kragarm-Vertikalverformung bzw. Überfahrtschwindigkeit vs. Kragarm-Beschleunigung) herangezogen werden.

Die Anwendung des methodischen Prozessblocks I des DYGES-Algorithmus (**Bild 28**) auf die Beschleunigungsdaten der Eichfahrten (**Kapitel 3.3**) liefert als Ergebnis eine entsprechende Verschiebungs-/Geschwindigkeits-Charakteristik. In **Bild 30** wurden daher die aus den gemessenen Beschleunigungsdaten der Kalibrierungs-Überfahrten reproduzierten, vertikalen Kragarm-Verschiebungen in äquivalenter Weise zu **Bild 22** aufbereitet.

Die Verschiebungs-Geschwindigkeits-Funktionen in **Bild 30** für die beiden definierten Belastungsfahrzeuge wurden sinngemäß zu **Bild 22** erneut durch Mittelung der Ergebnisse aus den zwei durchgeführten Überfahrten pro Geschwindigkeitsstufe über den Messquerschnitt und abschließender Approximation mittels kubischem Spline gewonnen. Beide Funktionen (Überfahrten des 42,8t LKWs - ebenso wie die Überfahrten des 8,7t LKWs) zeigen einen charakteristischen Trend, im Detail sind die Krümmungsverhältnisse der beiden Kurven hier aber stärker voneinander abweichend als dies bei den beiden direkt gemessenen Verformungs-Geschwindigkeits-Funktionen (**Bild 22**) der Fall ist. Weiters zeigt sich im Gegensatz zu den Beobachtungen aus den direkt gemessenen Vertikalverschiebungen hier aber vor allem, dass im untersuchten Geschwindigkeitsbereich eine höhere Geschwindigkeit zu einer stetig höheren, reproduzierten Verformungs-Antwort führt.

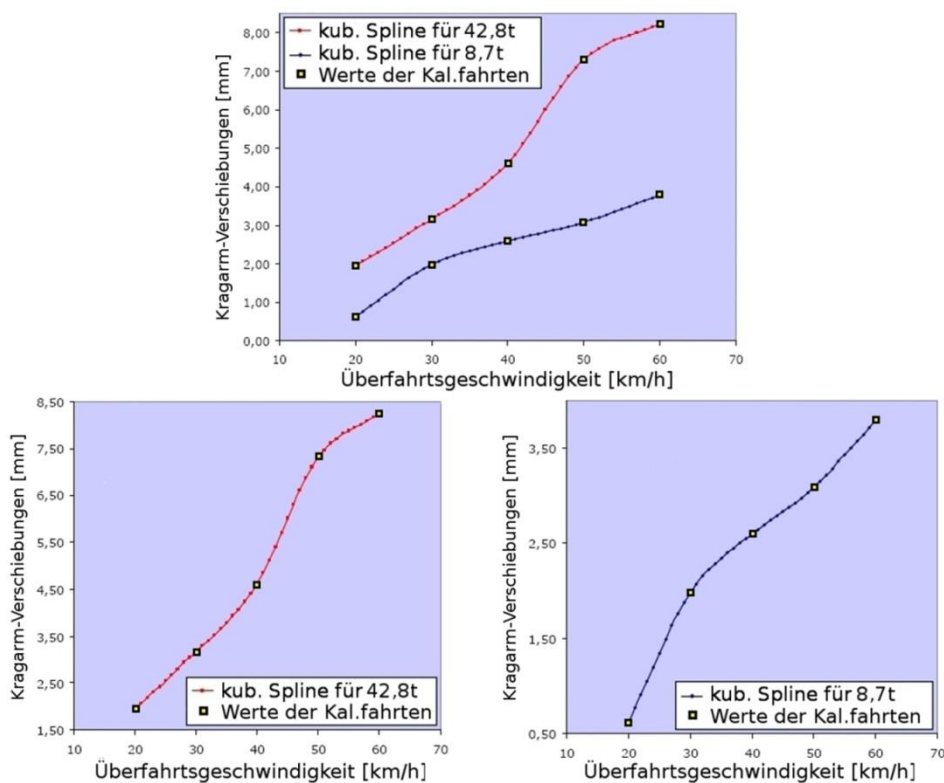


Bild 30: Antwort-Funktionen des von ausgewählten Schwerfahrzeugen befahrenen Kragarmes; reproduzierte, vertikale Absolutverschiebungen (unkalibriert) vs. Geschwindigkeit

In gleichartiger Weise zu **Bild 24** wurden anhand von linearer Interpolation zwischen den Stützstellen der beiden als Grenzfall anzusehenden Verformungsfunktionen aus **Bild 30** neuerlich punktweise Erzeugende für den vorgegebenen Geschwindigkeits- und Tonnagen-Bereich generiert, deren Gesamtheit die benötigte Raumkurve bildet (**Bild 31**).

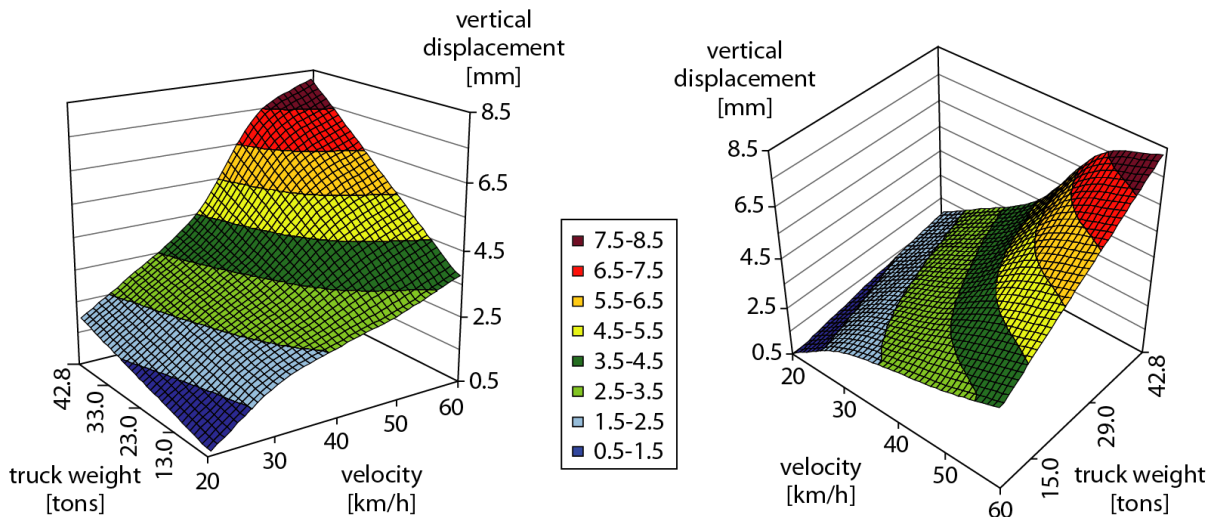


Bild 31: Räumliche Darstellung der reproduzierten Kragarm-Absolutverschiebungen auf Basis der Beschleunigungssensoren – als Funktion der auftretenden Tonnagen & Geschwindigkeiten (noch unkalibriert) – DYGES Matrix

Wie sich durch die nachfolgenden **Kapitel 3.4.3 & 3.4.4** zeigen wird, wird durch diese Raumfunktion eine automatisierte Registrierung von LKW-Tonnagen unter Betriebsbedingungen überhaupt erst möglich.

Ein Vergleich der beiden Raumkurven (**Bild 24 & Bild 31**) verdeutlicht aber insbesondere die Notwendigkeit, eine Kalibrierungs-Sequenz in den bestehenden DYGES-Algorithmus zu implementieren. Die positionsweise Bildung eines Quotienten - für jeden Funktionspunkt innerhalb des durch den Überfahrtsversuch vorgegebenen Geschwindigkeits- und Tonnagen-Bereiches - aus den beiden bisherigen Raumkurven **Bild 24 & Bild 31** (gleichbedeutend mit einer affinen Verzerrung) führt zum methodisch notwendigen Lückenschluss, der sogenannten Skalierungsmatrix. Die zugehörige, räumliche Darstellung ist **Bild 32** zu entnehmen. Sie spielt bei der Kalibrierung der beschleunigungs-basierten, reproduzierten Verschiebungswerte eine sehr wichtige Rolle, da eine Lasermessungs-basierte Verschiebungs-Tonnagen-Geschwindigkeitscharakteristik im Sinne von **Bild 24** aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht dauerhafter Bestandteil der Dauermessanlage sein kann. Aus diesem Grund wurde bekanntlich die Instrumentierung mittels Beschleunigungssensoren konzipiert (siehe **Kapitel 2 & Kapitel 3.1**).

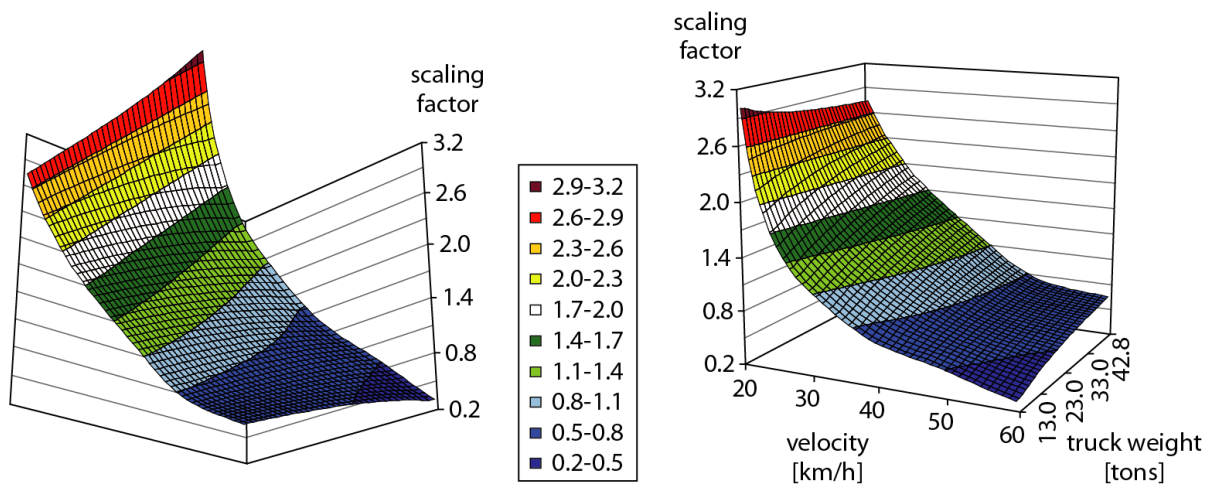


Bild 32: Skalierungsmatrix zur Kalibrierung reproduzierter Kragarm-Absolutverformungen in Abhängigkeit von den auftretenden Tonnagen und Geschwindigkeiten

3.4.3 DYGES Prozessblock II: Ereignis-Erfassung und -Charakterisierung

Wie stellvertretend für diesen Prozessblock dem Ablaufdiagramm in **(Bild 33)** entnommen kann,

- wird zunächst jedes Überfahrts-Ereignis in Fahrtrichtung Innsbruck erfasst, ggf. bestätigt und daraufhin aus der bisherigen **DYGES-Verlaufsfunktion** herausgelöst,
- danach isoliert analysiert und in Hinblick auf eine hinreichend genaue Charakterisierung des Schwerverkehrs kalibriert.
- Die Rückführung in die ursprüngliche Zeitreihe liefert eine neue, maßgebliche Verlaufsfunktion **DYGESkal**.

Mit Kalibrierung ist im Wesentlichen eine Skalierung der auftretenden DYGES-Verformungen zufolge der zwei entscheidenden Einflussquellen, nämlich der auftretenden Geschwindigkeiten sowie der zugehörigen Tonnagen gemeint, welche zwingender Weise in den Algorithmus einzufließen haben. In Abhängigkeit von der jeweiligen Intensität der ermittelten Antwortfunktion DYGES (Tonnagen- und Geschwindigkeits-abhängig) werden neue, affin verzerrte (d.h. kalibrierte) Verformungs-Verläufe des Brückenkragarms infolge der auftretenden Überfahrtsereignisse erzeugt.

**Funktion DYGES
(unkalibriert)...[mm]**



Ereignis-Erfassung an der **Event S2 Verlaufsfunktion**, welche nach dem Abgleich mit Messungs-basierten Schwellenwert im Prozess verbleibt; Herauslösen tatsächlicher Schwerfahrzeug-Überfahrten z.B. **Funktionen Event_2, Event_3, Event_4...[V]**



Bestimmung der Geschwindigkeit und Intensität pro Überfahrts-Event für den Kragarm-Beschleunigungssensor Patsch in Abhängigkeit des Kragarm-Beschleunigungssensors Patsch 15; d.h. anhand der **Funktionen DYGES und DYGES15 [V]**



Kalibrierung jedes Überfahrts-Events aus der **Funktion DYGES** anhand eindeutiger Erkennungs- und Zuordnungskriterien innerhalb der räumlichen **FBA-Verformungsfunktion** bzw. der räumlichen **Skalierungsfunktion** (gleichzeitige Ermittlung des zur Überfahrtgeschwindigkeit zugehörigen LKW-Gewichtes)



Abschließendes Eingliedern der zuvor anhand der **Event S2 Verlaufsfunktion** aus der **DYGES Funktion** herausgelösten Zeitabschnitte **Event_i** mit Schwerfahrzeug-Anteil; **kalibrierte Funktion dygeskal...[mm]**

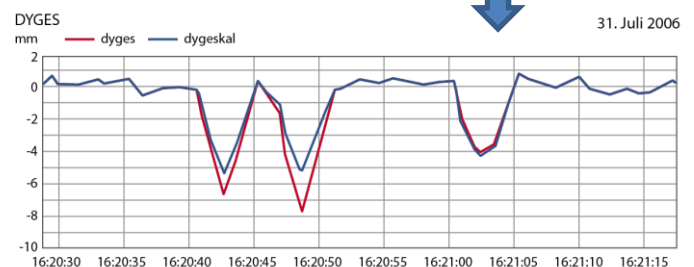
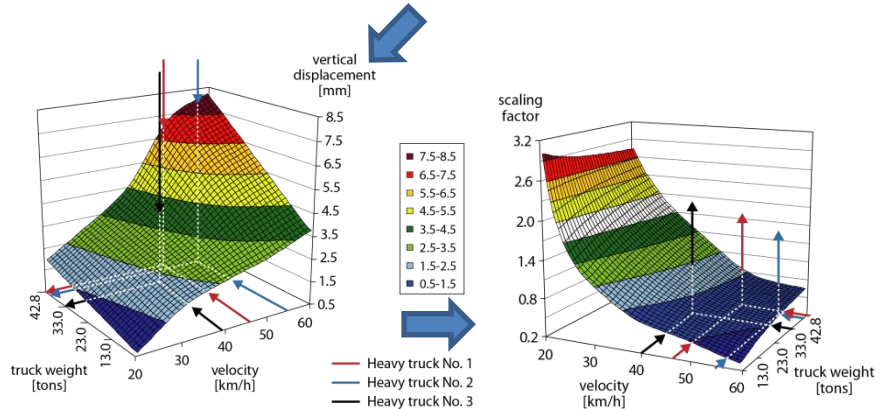
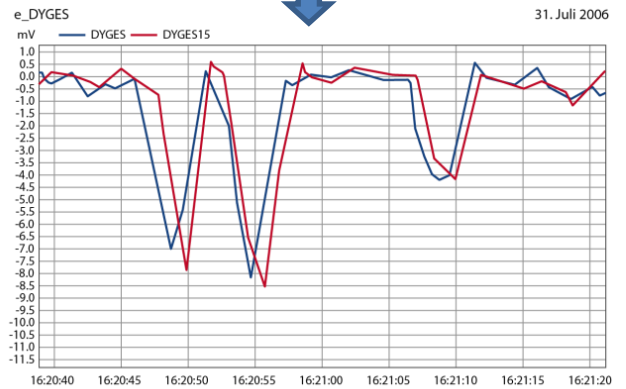
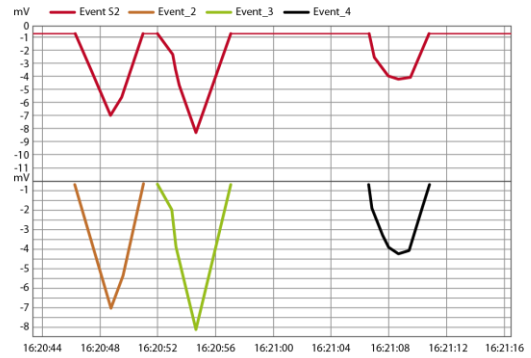
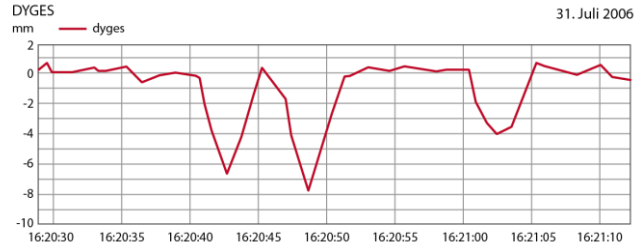


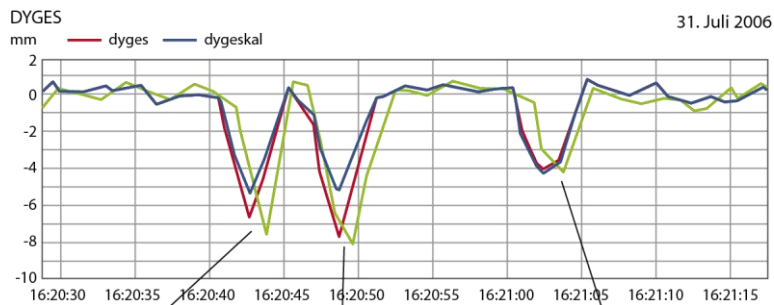
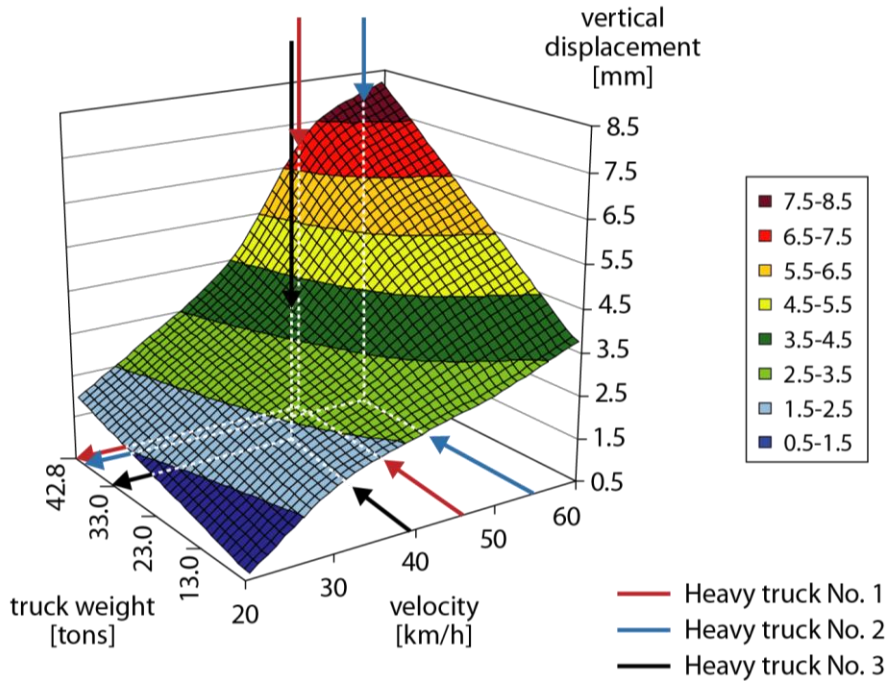
Bild 33: Ablauf-Diagramm – Detaillierung des **Prozess-Blocks II** in Bild 25

Der nachfolgend beschriebene und bereits in **Bild 33** visualisierte Ablauf detailliert den eigentlichen Kalibrierungsmechanismus anhand zweier generierter Raumfunktionen, die rechnerisch als Matrizen aufgefasst werden können (DYGES Matrix - **Bild 31** & Skalierungsmatrix - **Bild 32**).

Dazu wird anhand einer exemplarischen Überfahrt der zweistufige Prozess zur Ereigniserkennung und -charakterisierung (**Bild 34**) bzw. der Ereigniskalibrierung (**Bild 35**) beschrieben. Dies erfolgt am Beispiel des in den angeführten Bildquellen definierten, exemplarischen Überfahrts-Ereignisses „Heavy truck No. 2“.

1. Einzelüberfahrt identifizieren & bestätigen (Dyges-Verformung 7,815 mm)
2. Geschwindigkeit feststellen (v=54,77 km/h)
3. Anwendung des für den DYGES-Algorithmus festgelegten Kriteriums zur Zuweisung des richtigen (ganzzahligen) Geschwindigkeitsfeldes innerhalb der DYGES-Matrix (so entsprechen der zugewiesenen Geschwindigkeit von 55 km/h all jene Überfahrten, die größer/gleich 54,5 km/h und kleiner 55,5 km/h sind).
4. Das lokale Maximum der DYGES-Kragarmverformung (7,815 mm) infolge LKW-Überfahrt indiziert innerhalb der für 55km/h anzuwendenden Matrizen-Spalte, dass das betreffende LKW-Gewicht zwischen 42t und 42,8t liegen muss.
Die endgültige Gewichts-Festlegung erfolgt in Abhängigkeit davon, auf welcher Seite des interpolierten Mittelwertes zwischen den betreffenden Spaltenbeträgen der vorgegebenen DYGES-Matrix der registrierte, unkalibrierte Verformungswert zu liegen kommt. Im Falle des hervorgehobenen Ereignisses „Heavy truck No. 2“ liegt der Kragarm-Verformungsspeak unterhalb dieser Schwelle, sodass ihm eine verursachende Belastung von 42 t zugeschrieben werden kann.
5. Dem in der DYGES-Matrix (**Bild 31**) festgelegten Feld (2.Zeile x 36.Spalte) wird in der Kalibrierungsmatrix (**Bild 32**) der entsprechende Skalierungswert von 0,673 entnommen.
6. Dieser Skalierungswert multipliziert mit dem Ausgangs-Ereignis (DYGES-Verformungen) ergibt den kalibrierten Kragarm-Verformungsaussschlag von 5,26 mm, welcher somit betragsmäßig im Sinne der mittels Laser direkt gemessenen Tonnagen-Geschwindigkeits-Ausgangsbeziehung der Eichfahrten (**Bild 24**) reproduziert wurde.

Unter Skalierung wird also verstanden, dass das gesamte identifizierte und isoliert betrachtete Ereignis (der Event E_j) - d.h. alle Datenpunkte oberhalb des Schwellenwertes - mit demselben, zugehörigen Faktor multipliziert wird. Danach wird dieses skalierte Ereignis (Bereich zwischen dem Startwert und dem Endwert für den jeweiligen Überfahrts-Event E_j) wieder zeitrichtig in die unterhalb des Schwellenwertes liegende, unskaliert verbleibende Verschiebungs-Zeit-Funktion eingebunden (=> kalibrierte DYGES-Verlaufsfunktion).



Heavy truck No. 1
 Dyges-time 16:20:47
 Video-time 00:06:38
 $v = 46.9 \text{ km/h}$
 Dyges = 6.707 mm
 →
 Scaling factor = 0.807
 Dygeskal = 5.412 mm
 tonnage >42.8 t
 velocity 45–50 km/h



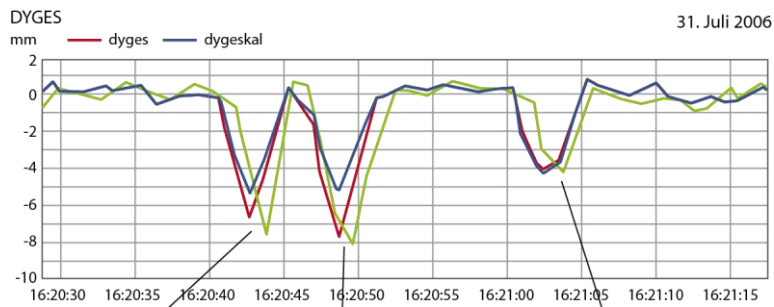
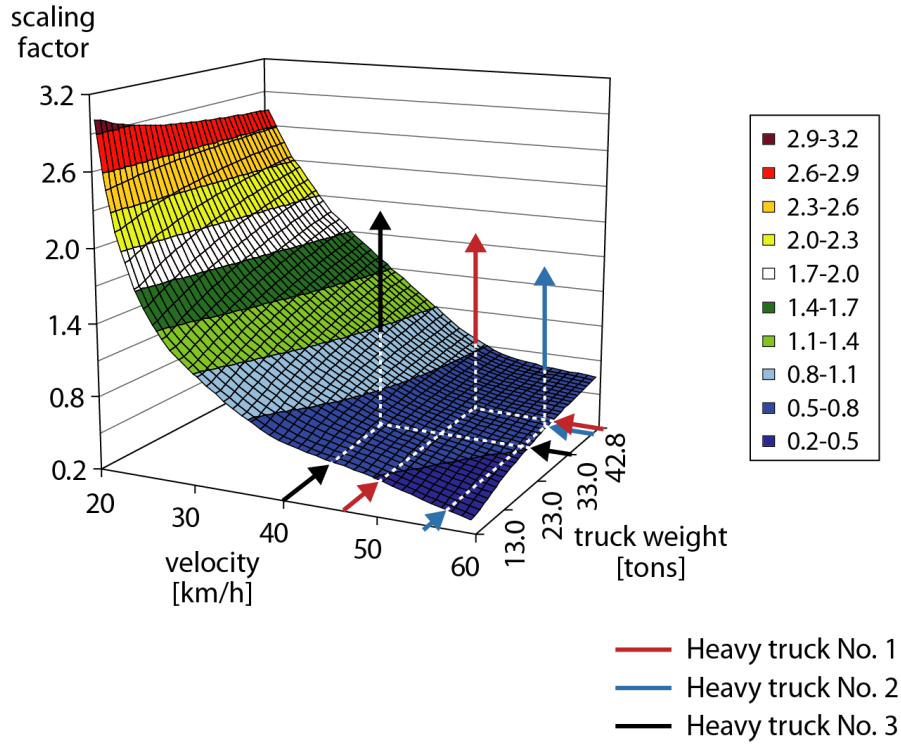
Heavy truck No. 2
 Dyges-time 16:20:52
 Video-time 00:06:43
 $v = 54.77 \text{ km/h}$
 Dyges = 7.815 mm
 →
 Scaling factor = 0.673
 Dygeskal = 5.260 mm
 tonnage 42.0 t
 velocity 50–55 km/h



Heavy truck No. 3
 Dyges-time 16:21:08
 Video-time 00:06:59
 $v = 39.41 \text{ km/h}$
 Dyges = 4.060 mm
 →
 Scaling factor = 1.07
 Dygeskal = 4.344 mm
 tonnage 33.0 t
 velocity 35–40 km/h



Bild 34: Schritt 1/2 (OBEN) - Ermittlung des einwirkenden LKW-Gewichtes anhand der registrierten Überfahrtsgeschwindigkeit sowie der korrespondierenden, generierten Kragarmverformung



Heavy truck No. 1	Heavy truck No. 2	Heavy truck No. 3
Dyges-time 16:20:47 Video-time 00:06:38 v = 46.9 km/h Dyges = 6.707 mm → Scaling factor = 0.807 Dygeskal = 5.412 mm tonnage >42.8 t velocity 45–50 km/h	Dyges-time 16:20:52 Video-time 00:06:43 v = 54.77 km/h Dyges = 7.815 mm → Scaling factor = 0.673 Dygeskal = 5.260 mm tonnage 42.0 t velocity 50–55 km/h	Dyges-time 16:21:08 Video-time 00:06:59 v = 39.41 km/h Dyges = 4.060 mm → Scaling factor = 1.07 Dygeskal = 4.344 mm tonnage 33.0 t velocity 35–40 km/h

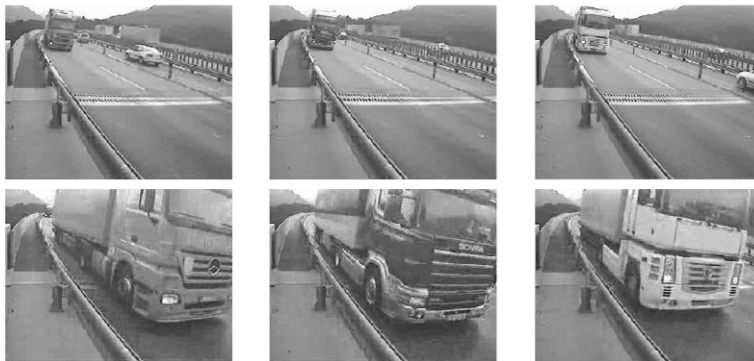


Bild 35: Schritt 2/2 (OBEN) – Ermittlung des zu den identifizierten Parametern Überfahrtgeschwindigkeit & Belastungsintensität (Tonnage) zugehörigen Skalierungsfaktors für die zu kalibrierende Kragarmverformung

Wie gezeigt wurde, können die dem Muster-Erkennungsprozess entstammenden, beschleunigungs-basierten Kragarm-Verschiebungswerte im permanenten Betrieb via Skalierungsmatrix im Sinne der zu erwartenden Gesetzmäßigkeit aus der direkten Lasermessung (**Bild 24**) automatisch rückgerechnet werden. Exemplarisch werden in **Bild 36** entsprechende Ergebnisse anhand eines ausgewählten Zeitfensters (während der Eichfahrten – **Kapitel 3.3**) verglichen.

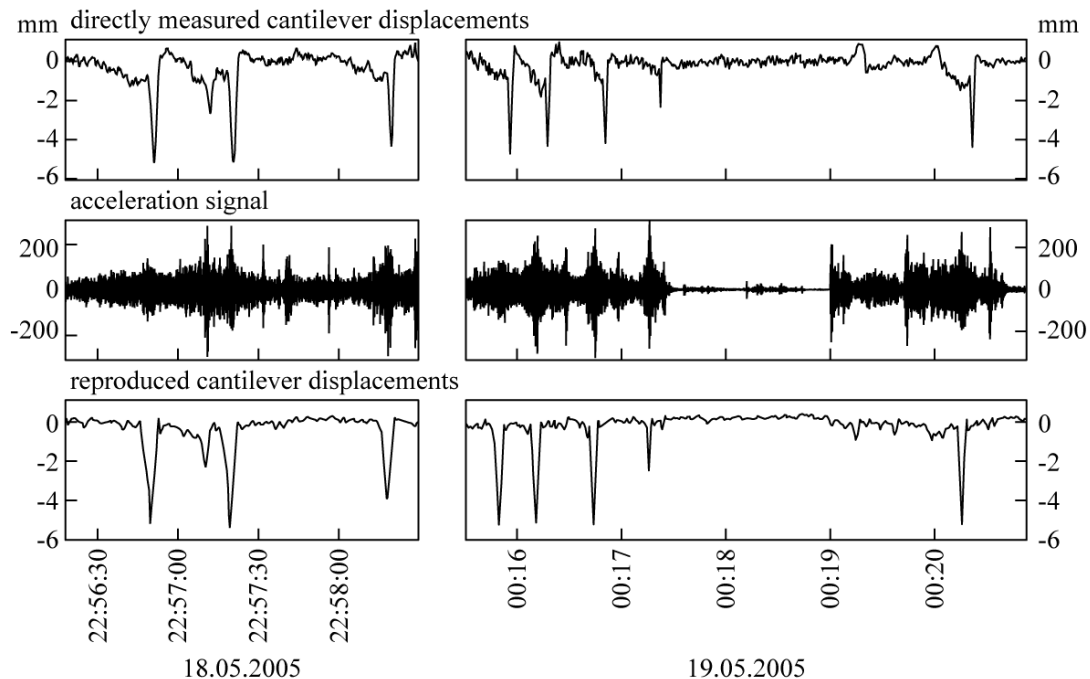


Bild 36: Direkt gemessene Kragarm-Verformungen mittels Laser (**Referenzsignal**); Beschleunigungsrohsignal am Kragarm (**algorithmischer Input**) sowie der reproduzierte Verlauf der Kragarmverformungen aus dem DYGES Algorithmus (**algorithmischer Output**)

Wie gezeigt werden konnte, werden auf Grundlage der beschriebenen Methodik die vertikalen Kragarm-Absolutverschiebungen **qualitativ (Verlauf)** wie **quantitativ (Ausschlagsintensität)** hinreichend genau reproduziert. Wie bereits eingangs des **Kapitels 3.2** festgehalten, sind die ermittelten Deformationsgrößen ein notwendiger Zwischenschritt auf dem Weg zur vordergründig relevanten Erfassung der Schwerfahrzeug-Gewichte bzw. deren Kategorisierung in LKW-Gewichtsklassen. Des Weiteren können die dabei generierten Verformungsfunktionen in Rainflow-Zyklenzählungen als Grundlage für Ermüdungsberechnungen eingehen (siehe [58]).

3.4.4 DYGES Prozessblock III: Automatisierte Entnahme der Charakteristik des Schwerververkehrs & Erstellung des LKW-Lastkollektivs

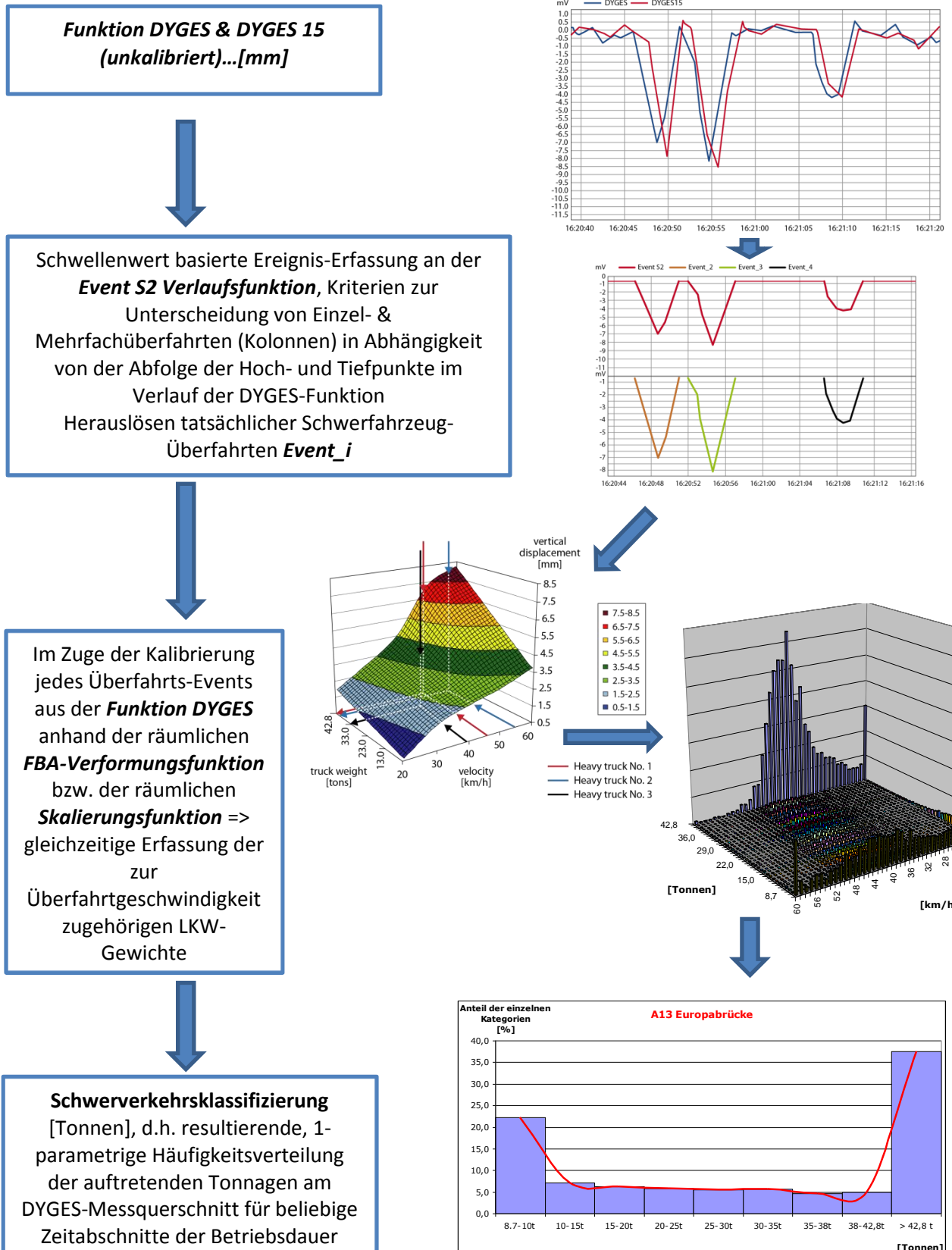


Bild 37: Ablauf-Diagramm – Detaillierung der Prozess-Blöcke II & III in Bild 25

Beim vorliegenden Prozessblock III handelt es sich um einen vervollständigenden, methodischen Nachlauf zur Aufbereitung der bis dahin geschaffenen Ergebnisse. Der in **Bild 37** visualisierte Ablauf fasst zunächst nochmals den DYGES-Prozessblock II zusammen bzw. präzisiert diesen. Gleichzeitig zeigt er aber im unteren Bereich auch, dass im Rahmen der Kalibrierung jedes LKW-Überfahrtsereignisses notwendiger Weise die zugehörige Überfahrtsgeschwindigkeit bzw. das auslösende LKW-Gewicht erfasst werden. Diese können daher begleitend zur Generierung der kalibrierten DYGES-Verlaufsfunktion in entsprechenden, 2-parametrischen Häufigkeitsverteilungen (Tonnagen/Geschwindigkeiten) bzw. in 1-parametrischen Häufigkeitsverteilungen (Tonnagen) aufbereitet werden, wodurch die in Hinblick auf die Abbildung des realen Lastmodells vordergründig interessierende Beziehung des LKW-Einwirkungskollektivs entsteht. Mit Bezug auf eine Diskussion der Merkmale der 2-parametrischen Häufigkeitsverteilungen (Tonnagen/Geschwindigkeiten) sei auf **Kapitel 3.7** verwiesen. Aspekte der angeführten 1-parametrischen Häufigkeitsverteilungen (Tonnagen) werden ausführlich in den **Kapitel 4** bzw. **Kapitel 12** betrachtet.

3.5 Erörterung notwendiger algorithmischer Spezifika

3.5.1 Zur Charakterisierung eines LKW-Überfahrts-Ereignisses

- Wie **Bild 33** entnommen werden konnte, erfolgt die Charakterisierung der überfahrenden Schwerfahrzeuge auf Grundlage der DYGES-Verlaufsfunction (die Visualisierung zur schrittweisen Generierung des DYGES-Datensatzes selbst ist **Bild 28** zu entnehmen).
- Eine ausführliche, experimentelle Verifizierung des potentiellen, Schwellenwert-bereinigten Datensatzes hinsichtlich des Herauslösen tatsächlicher Schwerverkehrs-Überfahrten aus der DYGES-Verlaufsfunction hat gezeigt, dass dieser Schwellenwert bei 0,5 mm anzusetzen ist, um Unschärfen bei einer konsistenten Schwerverkehrs-Klassifizierung zu vermeiden.
- Wie in **Bild 33** zu sehen ist, wird der Schwellenwert-bereinigte Datensatz durch die Verlaufsfunction **EventsS2** geschaffen.
- Gleichzeitig wurde eine ebenso empirisch basierte Beschränkung hinsichtlich der zugelassenen Ereignis-Intensität bei -0.0100 m verhängt.
- Die Identifikation von einzelnen Überfahrts-Ereignissen sowie deren Herauslösen aus der DYGES-Verlaufsfunction (in Hinblick auf die affine Verzerrung der auftretenden Amplituden) erfolgt auf Grundlage einer Abfrage der Zusammensetzung der relativen Maxima, d.h. der Anzahl und Lage der Hoch- und Tiefpunkte.
- So hat beispielsweise ein Überfahrts-Einzelereignis keinen Tiefpunkt innerhalb des herausgelösten Datensatzes oberhalb der Schwelle, sondern besteht lediglich aus Start- und Endwert (**Bild 38 links**), während die sog. Zweifach-Überfahrt – d.h. die kleinste Form einer Schwerfahrzeug-Kolonne – zwei Hochpunkte und einen dazwischenliegenden Tiefpunkt oberhalb der Ereignis-Schwelle aufweist (**Bild 38 rechts**).



Bild 38: Identifikation & Herauslösen einzelner Überfahrtsereignisse anhand der Charakteristik der lokalen, relativen Maxima

- Aus der ursprünglichen Verlaufsfunction DYGES wird mit Hilfe der Schwellenwert-bereinigten Hilfsfunctionen EventS und EventS_15 die letztlich maßgebliche Verlaufsfunction DYGES_kal erzeugt.

3.5.2 Ausgewählte Mechanismen zur Stabilisierung des Algorithmus

An dieser Stelle werden aufgrund zwingender Weise zu berücksichtigender Ausnahme- bzw. Grenzfälle die entwickelten Stabilisierungs-Kriterien angeführt und hinsichtlich ihrer Implementierung an ausgewählten Stellen des DYGES-Prozesses dargelegt. Gleichzeitig werden diese Erörterungen auch begleitend visualisiert (eine umfassendere grafische Darstellung ist auch dem **Kapitel 11** zu entnehmen).

Kriterium I):

Ein Überfahrereignis in EventS2 wird in EventS2_15 nicht bestätigt (siehe Bild 39 & Bild 40)

=> Ereignis im EventS2-Signal unskaliert belassen

Für die Schwerfahrzeug-Klassifizierung ist dies ohne Bedeutung, da ein solches Ereignis dann nicht erfasst wird.

In Hinblick auf eine etwaige Zyklenzählung im reproduzierten Kragarm-Verschiebungsverlauf über die Zeit bleibt ein solches Ereignis aber erhalten (auf der sicheren Seite).

Ein Nicht-Bestätigen eines von EventS2 registrierten Ereignisses in EventS2_15 äußert sich bei sog. Mehrfachüberfahrten (Fahrzeug-Kolonnen) insbesondere dadurch, dass das nächste Ereignis in EventS2 zeitlich schon früher da ist, als eine Bestätigung in EventS2_15.

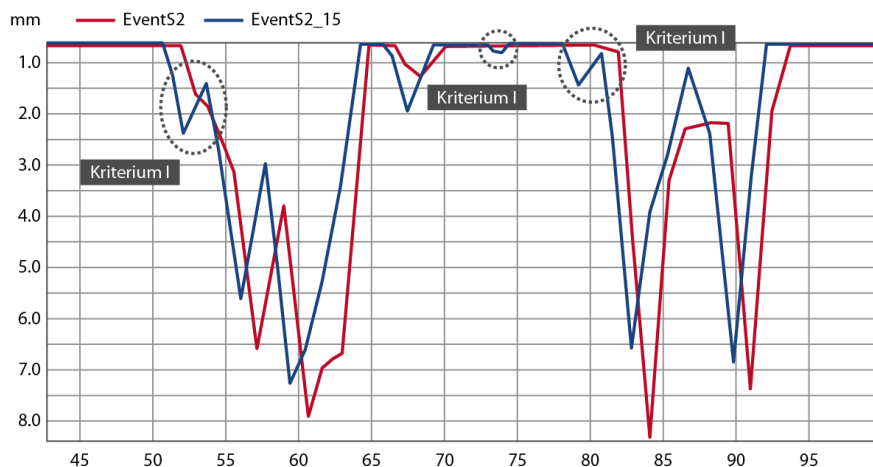


Bild 39: Exemplarische Darstellung der zu berücksichtigenden Stabilisierungskriterien für den DYGES Algorithmus (beschriebenes Stabilisierungskriterium I)

Kriterium II):

Falls Reihenfolge verletzt (Ereignis in EventS2_15 vor EventS2; siehe Bild 40)

=> Ereignis im EventS2-Signal unskaliert belassen => programmiertechnisch eigentlich gleich wie Kriterium I behandelt, da man die Event-Erkennung & die Event-Skalierung ja vordergründig auf Merkmale im Signal-EventS2 stützt.

Da die Prozedur also konsequent am Kanal „MQ3_KragPatsch_FBA“ angelehnt wird (siehe **Bild 15**), führt dies zwangsläufig dazu, dass alle Ereignisse, die „vorauslaufen“ in EventS2_15 unbestätigt bleiben.

In beiden Fällen war noch ein sog. „Einfangkriterium“ zu definieren, bis wann ein wieder erkanntes Ereignis von EventS2_15 noch jenem in EventS2 zugeordnet werden kann:

- Zeitspanne: $(\text{Abstand})/(\underline{10\text{km/h}}) = 15\text{m} / 2,778\text{m/s} = 5,4 \text{ sec}$

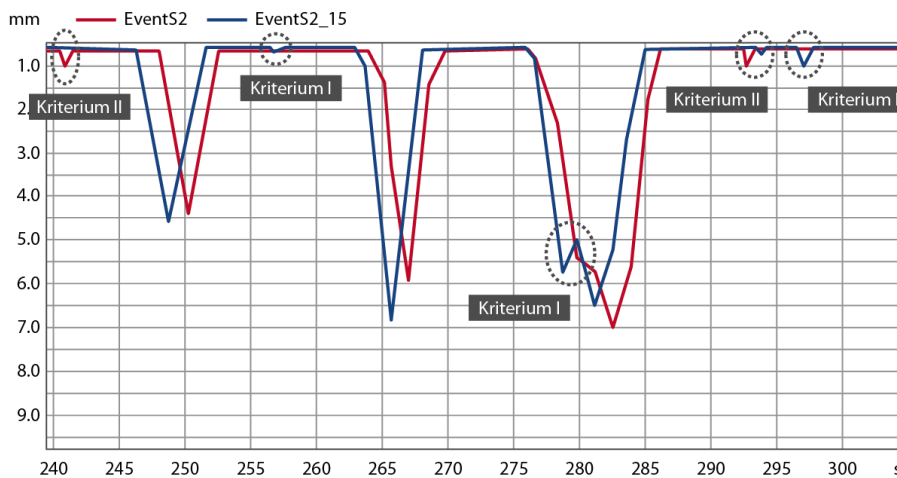


Bild 40: Exemplarische Darstellung der zu berücksichtigenden Stabilisierungskriterien für den DYGES Algorithmus (beschriebene Stabilisierungskriterien I & II)

Kriterium III):

a) Die Differenz im Amplitudenbetrag zwischen einzelnen Hoch und Tiefpunkten ($H_i - T_i$) **muss zumindest dem Betrag von Δu_{\min} ausmachen.**

Eine ausführliche, experimentelle Verifizierung der vorgestellten Prozedur hat gezeigt, dass erst eine Begrenzung des Amplitudenbetrages mit 0,25 mm zu einer stabilen und korrekten Geschwindigkeitserfassung und –klassifizierung führt, d.h.

$$\Delta u_{\min} = 0,00025 \text{ bei EventS2 und bei Events_15}$$

b) Ein weiteres sog. „Einfangkriterium“, ab wann ein wieder erkanntes Ereignis von EventS2_15 bereits jenem in EventS2 zugeordnet werden kann:
Lokale Hochpunkte dürfen nicht näher als

$$(\text{Abstand})/(\underline{90 \text{ km/h}}) = 15\text{m} / 25 \text{ m/s} = 0,600 \text{ sec} \text{ beisammen liegen.}$$

Obwohl auf der Europabrücke selbst ein allgemeines Tempolimit für den Schwerverkehr von 40 km/h gilt, hat eine ausführliche, experimentelle Verifizierung der vorgestellten Prozedur verdeutlicht, dass die Charakteristik der Schwerverkehrs insbesondere während der Nachtstunden die Notwendigkeit eines derartig deutlichen Heraufsetzens dieser Temposchwelle erfordert, um die Überfahrtsereignisse zunächst mitzuerfassen.

c) Eine ausführliche, experimentelle Verifizierung der vorgestellten Prozedur hat gezeigt, dass Amplituden in den Verlaufsfunktionen EventS2 und EventS2_15 infolge Schwerverkehrs-Überfahrten einander zugeordnet werden können, solange der Faktor 2 zwischen EventS2 und EventS2_15 nicht überschritten wird. Die Unterschiedlichkeit ist eine Folge der sich im Laufe der Betriebsdauer bei den beiden 1D-Kragarmbeschleunigungssensoren vor Einbau in das permanente Monitoringsystem eingestellten, unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich der Beträge der Amplituden-Ausschläge.

Kriterium IV):

siehe **Bild 41**

Einzelne „Singularitäten“ (Kriterium $H_j - T_i < \Delta u_{min}$), die mitten im Ereignis auftauchen, sind zu ignorieren und mit dem Gesamt ereignis mitzukalieren !! (**Konsequenz aus Kriterium III**)

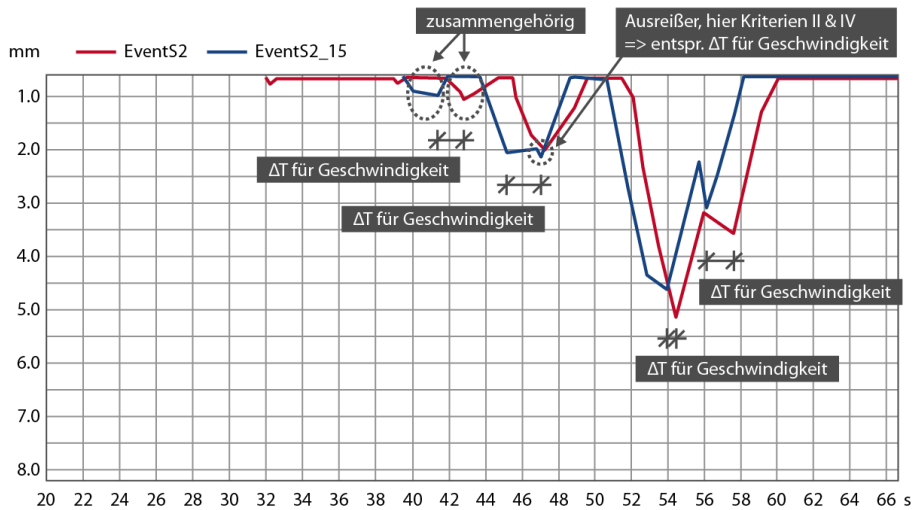


Bild 41: Exemplarische Darstellung der zu berücksichtigenden Stabilisierungskriterien für den DYGES Algorithmus (beschriebene Stabilisierungskriterien II & IV)

Für alle 4 bisher formulierten Kriterien ist festzuhalten, dass sich die Notwendigkeit zu deren Anwendung nur vereinzelt, d.h. bei einem vergleichsweise geringen Anteil an potentiellen Szenarien ergibt. Mit anderen Worten wird hervorgehoben, dass die automatisierte Erfassung und Charakterisierung der Schwerverkehrsüberfahrten im Rahmen der vorliegenden Mustererkennungs- und Kalibrierungsprozedur in der überwiegenden Zahl der Fälle von vornherein eindeutig im Sinne der zuzuweisenden Eigenschaften des Einwirkungskollektivs erfolgt.

3.5.3 Präzisierungen zur konsistenten Ereignis-Skalierung (Kalibrierung)

- Eine konsequente Anwendung der in **Abschnitt 3.5.2** formulierten Stabilisierungsmechanismen des DYGES-Algorithmus würde insbesondere bei Auftreten von Skalierungsfaktoren < 1 zur Generierung von künstlichen, zusätzlichen lokalen Extremwerten führen. Diese hätten nicht nur keinen physikalischen Hintergrund, sie würden in Hinblick auf eine etwaige Rainflow-Zyklenzählung auch noch verfälschende Ergebnisse liefern. **Bild 42** zeigt daher, wie dieses Problem umgangen wird. All jene Abtastwerte der noch unkalibrierten DYGES-Funktion, die im Zuge eines Herauslösens von Schwerverkehrereignissen und nachfolgenden Skalierens um einen Faktor < 1 unter die anzuwendende Schwellenlinie fallen würden, werden in ihrem Ordinatenbetrag mit dieser Schwellenlinie gleichgesetzt. Dadurch wird der Verlauf der Verformungs-Amplituden weder im Sinne der auftretenden, lokalen Extremwerte verfälscht noch im Hinblick auf eine korrekte Rainflow-Zyklenerfassung.

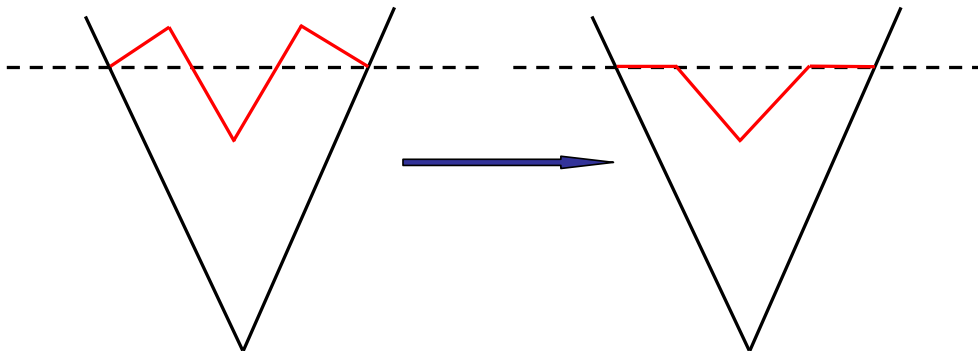


Bild 42: Notwendiges Adaptierungskriterium im Zuge des Ereignis-weisen Skalierens der DYGES-Funktion hinsichtlich eine korrekten Handhabung von ermüdungsrelevanten Belastungszyklen

- Bei zwei oder mehr unmittelbar hintereinander folgenden Überfahrten oberhalb der Schwelle werden die Ordinaten-Werte der Tiefpunkte selbst - die ja zwei Ereignissen gleichzeitig angehören - und daher beide Male zu kalibrieren sind, gemittelt.

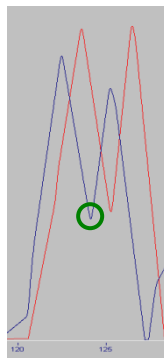


Bild 43: Detail zur Ereignis-Skalierung infolge Geschwindigkeit und Tonnage im Rahmen einer so genannten Mehrfachüberfahrt

3.5.4 Konsistenz des DYGES-Algorithmus mit der ermüdungsrelevanten Zyklenzählung (Rainflow-Methode)

Die Entwicklung der Rainflow-Methode hat ihren Ursprung im zunehmend digitalisierten Zeitalter. Der Antrieb ergab sich aus der Notwendigkeit zur Auswertung von Beanspruchungsfunktionen, welche vorwiegend hochfrequent abgetastet vorliegen und sich insbesondere über große Zeiträume erstrecken. Es handelt sich hierbei um ein zweiparametrisches Zählverfahren, dessen Auswertung im Amplitudenbereich erfolgt [35]. Mit Hilfe der Rainflow-Zählung wird die gemessene "Belastungsgeschichte" - bestehend aus einer zufälligen Abfolge-Sequenz von Hoch- und Tiefpunkten - in Form **wiederkehrender, ermüdungsrelevanter Antwortzyklen unterschiedlicher Intensität und Häufigkeit** klassiert.

Die eigens vom Autor entwickelte Rainflow-Counting Software wurde ursprünglich als ein der DYGES-Schwerverkehrszählung nachgeschalteter Prozess entwickelt, um die reproduzierten Kragarm-Durchbiegungen ermüdungs-orientiert aufzubereiten. Der dabei verwendete Rainflow-Zählalgorithmus wurde auf Basis der Grundzüge von [35] aufgebaut, enthält aber einige wesentliche, vom Autor vorgenommenen Modifikationen bzw. Spezifikationen. Details zu den grundsätzlichen Merkmalen des Algorithmus sowie dessen Weiterentwicklung und Adaptierung durch den Autor werden detailliert in [58] beschrieben und erörtert.

Die Programm-Umsetzung erfolgte neuerlich in der Programmiersprache C++ und wurde insbesondere für eine automatisierte Verarbeitung großer Datenmengen des permanenten Monitoringsystems geschaffen. Natürlich sieht die Software auch eine allgemeingültige Anwendbarkeit für beliebige Beanspruchungs-Zeitfunktionen vor. Von einer Publikation dieses erweiterten C++ basierten Quellcodes wird wiederum aus Gründen der einzuhaltenden Übersichtlichkeit abgesehen.

Die Kompatibilität des entwickelten DYGES-Algorithmus mit den in die Rainflow-Zählung implementierten Spezifika war gesondert zu evaluieren. Zu begründen ist dies mit der Tatsache, dass die Entwicklung des DYGES-Algorithmus stets auch unter dem Aspekt erfolgte, allen wesentlichen Voraussetzungen einer nachgeschalteten Ermüdungsanalyse unter standardisierten Gesichtspunkten zu genügen.

Diese Evaluierung erfolgt an dieser Stelle anhand einer wesentlichen, bereits im Zuge des **Kapitels 3.4** verwendete Ergebnisdarstellung (**Bild 36**).

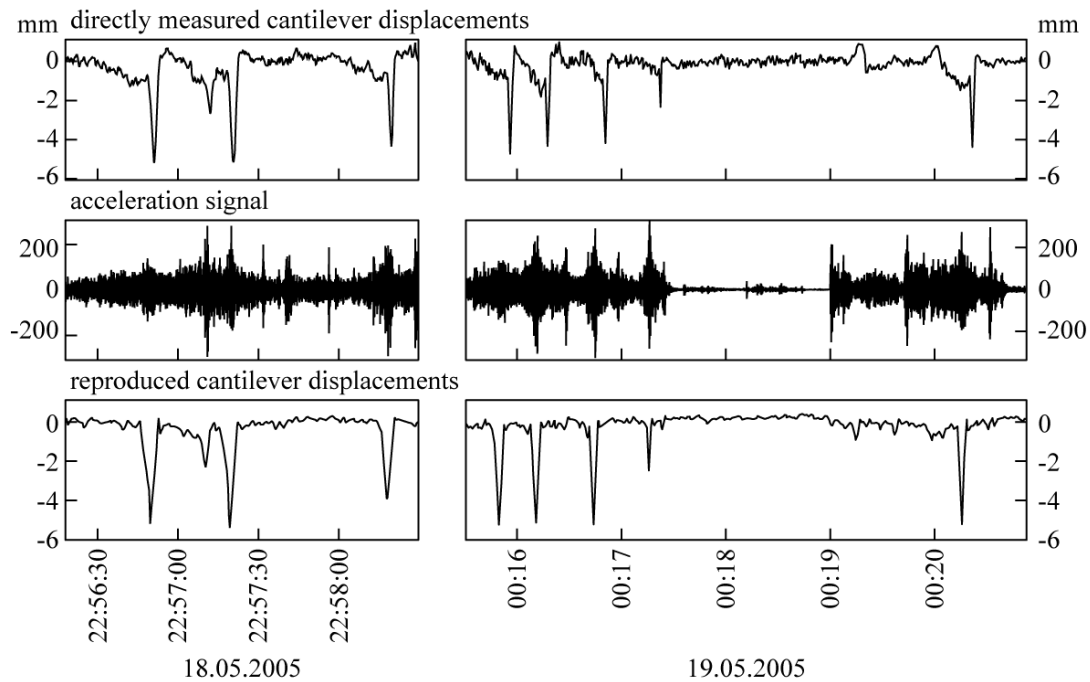


Bild 44: Reproduzierte und kalibrierte Kragarm-Absolutverformungen (**unten**) vs. direkt mit Laser gemessener Verlauf (**oben**) & das Beschleunigungs-Ausgangssignal (**Mitte**)

Bei genauer Betrachtung von **Bild 44** fallen zwei wesentliche Abweichungen zwischen der direkt gemessenen Kragarm-Verschiebungsfunktion und der reproduzierten (und kalibrierten) Funktion auf. In Hinblick auf weiterführende Ermüdungsanalysen kann deren Einfluss auf die Auswertungen aber als vernachlässigbar betrachtet werden, wie im Folgenden erklärt wird:

- Vollschiwingspiele (Zyklen der Rainflow-Matrix), deren Amplitude eine einzelne Klassenbreite nicht überschreitet und die hier während des Ausschwing-Vorganges um die Schwerachse auftreten, werden als nicht ermüdungsrelevant angesehen, und daher ignoriert.
- Dem Verlauf eines ausgewählten, imaginären Regenflusses - der im Zuge der Rainflow-Zählung bei jeder Spitze und in jedem Tal initiiert wird - wird bekanntlich solange gefolgt, bis er das betragsmäßige Maximum erreicht und vom Graphen abfällt => Gemäß den Grundsätzen der Rainflow-Zählung und konsistent mit dem vorangehenden Punkt entsteht kein Widerspruch, wenn kurze Funktionsabschnitte im reproduzierten Kragarm-Verlauf nicht mehr aufscheinen, solange alle auftretenden, lokalen Extremwerte (relative Maxima) für weitere Berechnungen erhalten werden.

Weitere Details zur ermüdungs-bezogenen Auswertung von nichtperiodischen Beanspruchungsfunktionen anhand von 2-parametrischer Zyklenzählung (Rainflow-Matrizen) und deren Anwendung im Rahmen von Bauteil-Schädigungsrechnungen sind [58] zu entnehmen.

3.6 Handhabung der Fälle entlang der Grenzen des definierten Prozess-Bereiches und darüber hinaus

Die entwickelten und für die Auswertung geschaffenen Raumkurven (**Bild 31 & Bild 32**) decken grundsätzlich einen Lastintensitätsbereich für Tonnagen zwischen 8,7 und 42,8t und einen Geschwindigkeitsbereich zwischen 20 und 60 km/h ab.

Dieser der Monitoring-Aufgabe zugrunde liegende Messbereich, d.h. die Rahmenbedingungen hinsichtlich Geschwindigkeiten und Tonnagen, stellen für die vorgestellte Prozedur gewisse Limits dar, deren Bedeutung es für eine hinreichend genaue, algorithmische Lösung abzuwägen und zu berücksichtigen gilt. Hinsichtlich der Schaffung einer realitätsnahen Datengrundlage waren anhand der Betrachtung der auftretenden Grenzfälle (bzw. deren Überschreitung) eindeutige Stabilisierungsmechanismen innerhalb des entwickelten Algorithmus zur LKW-Charakterisierung festzulegen, die nachfolgend dargelegt und gelöst werden:

3.6.1 Zur Prozess-Größe Geschwindigkeit

- Am untersuchten Autobahnabschnitt ist ein für den Schwerverkehr gültiges Tempolimit von 40km/h aufrecht. Beobachtungen vor Ort bestätigen die überwiegende Einhaltung dieser Vorgabe, was am vorherrschenden LKW-Kolonnenverkehr einerseits und an der gekrümmten Streckenführung bergab (unmittelbar nach dem Widerlager Patsch) andererseits liegt.
- Langsamer fahrende Fahrzeuge werden laut [27] bis 15km/h trotzdem registriert und der Kategorie 20km/h zugewiesen. Zwecks notwendiger Skalierung werden solchen Szenarien Skalierungsfaktoren gleichbedeutend mit Ereignissen der Grenzgeschwindigkeit von 20km/h zugewiesen. Unter 15km/h würden sich zu große Unschärfen ergeben, wodurch diese Ereignisse außer Acht gelassen werden.
- Vergleichsweise zu schnelle Ereignisse, welche 65 km/h nicht überschreiten, werden der Kategorie 60km/h zugewiesen, d.h. solchen Szenarien werden Skalierungsfaktoren gleichbedeutend mit Ereignissen entlang der Grenzgeschwindigkeit von 60 km/h zugewiesen und im Prozedere fortgefahren. Alle anderen Ereignisse werden nicht gezählt. Der Grund für diese Restriktion ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass im Zuge der algorithmischen Entwicklung beim ursprünglichen Vergleich zwischen des Monitoring-basierten Schwerverkehrsdaten (DYGES-Algorithmus) und jenem der ASFINAG Maut Service GmbH (GO-Box basierte Mautportaldata direkt im Bereich des Brückentragwerks) mitunter erhebliche Unterschiede auftraten. Frühere Auswertungs-Durchläufe der DYGES-

Zählung für beliebige Zeitfenster haben stets deutlich mehr Schwerverkehrereignisse ausgewiesen, als am Mautbalken registriert wurden.

- Ursache ist ein beträchtlicher Anteil an Fahrzeugen auf der ersten Fahrspur mit Geschwindigkeiten über 60km/h. Da das Monitoring-System bekanntlich nur für einen Geschwindigkeitsbereich zwischen 20 und 60 km/h durch Eichfahrten kalibriert werden konnte, mussten - für eine Lösung auf der sicheren Seite liegend - zunächst all diese Ereignisse so behandelt werden, als ob es leere LKWs wären (ist bei diesen Geschwindigkeiten auch nicht von vornherein unplausibel). Dennoch ergaben sich dann für die Summe der Schwerfahrzeuge mitunter erhebliche Unterschiede zwischen den offiziellen Daten des Mautportales und der Kragarm-Messung.
- Da aber für den Zeitraum einer Sondermessung (**Kapitel 13**) parallel zu den Messdaten auch eine Video-Aufzeichnung für die Fahrtrichtung Innsbruck vorliegt, konnte diese Fragestellung nachhaltig gelöst werden. Bei den besagten schnellen Fahrzeugen handelt es sich fast ausschließlich um Wohnmobile, PKWs mit Wohnwägen beziehungsweise Lieferwägen.
- Die dynamische Vergrößerung am FBA 11-Beschleunigungssensor wird für Ereignisse oberhalb des kalibrierten Geschwindigkeitsbereiches (> 60 km/h) nachweislich unverhältnismäßig groß (Sensorcharakteristik als konsequente Fortführung des Trends aus **Bild 30**), sodass diese trotz untergeordneter Tonnagen vom Monitoring-System als Ereignisse erfasst und samt zugehöriger Geschwindigkeit aufgezeichnet werden. Diese Fahrzeuge haben allerdings keine Ermüdungsrelevanz, da aufgrund der hohen Geschwindigkeit und des geringen Gewichtes keine relevanten Kragarm-Durchbiegungen auftreten, wodurch sie bei der Fahrzeugerkennung automatisch unberücksichtigt bleiben.
- Zwecks weiterer Präzisierung seien zum Umstand der verbleibenden, auftretenden Unschärfen bei der Erfassung der Verkehrsvolumina durch die große Anzahl an Ereignissen > 60km/h noch zwei wesentliche Punkte angemerkt:
 - Laut Auskunft der ASFINAG Maut Service GmbH sind „LKW-ähnliche“ Fahrzeuge (Busse, Lieferwagen, Wohnwagen) ebenfalls mit einer GO-Mautbox ausgestattet und werden daher beim maßgeblichen Mautportal als KAT 2 bzw. KAT 3-Ereignisse mitgezählt. Die besagten Fahrzeuge fahren dann zwar zumeist, aber nicht zwingender Weise auf der äußersten Fahrspur, wo sie teilweise von DYGES erfasst würden. Unter diesem Aspekt ist die Gesamtsumme aller KAT2 bis KAT 4+ Fahrzeuge als Zielwert für die DYGES-Zählung entsprechend zu relativieren.

- Laut offizieller Auskunft besteht noch eine weitere, zusätzliche Ursache für verbleibende Unsicherheiten (Schwankung) innerhalb der Daten der ASFINAG Maut Service GmbH: Die registrierten Mauttransaktionen beinhalten nur den Hinweis, wie die Go-Box bei der Abbuchung eingestellt ist und nicht ob das Fahrzeug diesen Einstellungen tatsächlich entspricht. So kann es vorkommen, dass eine Mauttransaktion mit der Kat2 tatsächlich von einem Fahrzeug der Kat4+ stammt. Dies gilt aber auch umgekehrt.

- Die nach konsequentem Ausklammern der Überfahrtsszenarien > 65 km/h im DYGES-Prozess verbleibenden LKW-Zählraten passen dann im Regelfall bereits sehr gut mit den offiziellen Daten am Mautportal überein.

3.6.2 Zur Prozess-Größe Lastintensität (Tonnen)

- Ereignisse, welche die 8,7 t Grenze unterschreiten, können erfasst werden, solange der im **Kapitel 3.5.1** (bzw. **Kapitel 11**) definierte Schwellenwert für die DYGES Verlaufsfunktion zum Herauslösen potentieller LKW-Überfahrtsereignisse (0,5 mm) an sich nicht unterschritten wird.
- Sollte es andererseits passieren dass FBA-Verformungswerte auftreten, die Überschreitungen der 42,8t Grenze entsprechen, so werden auch diese registriert. Als Skalierungswert für das Ereignis wird der zur ermittelten Geschwindigkeit zugehörige Grenzwert bei 42,8 t herangezogen.
- Im Zuge ausgedehnter Auswertungen und zugehöriger Parameterstudien hat sich gezeigt, dass von weiteren, algorithmischen Grenzfall-Regelungen für Tonnagen abgesehen werden kann, durch die weitere, vermeintlich unzuverlässige (unplausible) Überfahrtsereignisse im Prozess eliminiert würden.
 - Aufgrund der großen Unsicherheiten außerhalb des durch die Kalibrierungs-Messkampagne vorgegebenen Beobachtungsbereiches könnten keine weiteren, methodisch sinnvollen Grenzfallregelungen definiert werden.
 - Zusätzlich würde man durch Einziehen neuer Toleranzkriterien im Algorithmus bezüglich zu leichter bzw. zu schwerer Ereignisse nachweislich reale Information verlieren. Durch solche neuen Toleranzen würde nämlich die fundamentale Ungleichung, die mit dem DYGES-Algorithmus in seiner finalen Version an sich in den überwiegenden Fällen erfüllt wurde,

ASFINAG Mautbalkenzählung Gesamt > DYGES-Zählung > ASFINAG Ereignisse KAT IV

nun niemals erfüllt, da von vornherein zu viele Ereignisse bei der neuen Zählung künstlich verloren gehen (**Kapitel 12**).

3.7 Finale Diskussion zur vorgelegten, experimentellen Dynamischen Gewichtserfassung

Nachfolgend soll anhand eines ausgewählten, typischen Monats an Betriebsbeanspruchung am DYGES-Messquerschnitt (**November 2006**) ein vertiefter Einblick in die erhaltenen Output-Daten des Algorithmus gegeben werden. Zielsetzung dieser Erörterung ist es, vorneweg anhand der Ergebnisse wesentliche Fragen der Plausibilität zu beantworten bzw. stufenweise detailliertere Aspekte der Verifizierung zu behandeln. Es soll daher eine möglichst lückenlose, unmittelbare Bewertung der hier generierten Ergebnisse und ein vorbereitendes Bewusstsein für diese Ergebnisse geschaffen werden, bevor mit Untersuchungen und Vergleichen anhand externer Daten am gleichen bzw. an ähnlich zusammengesetztem Schwerverkehr fortgefahren wird (siehe **Kapitel 4**).

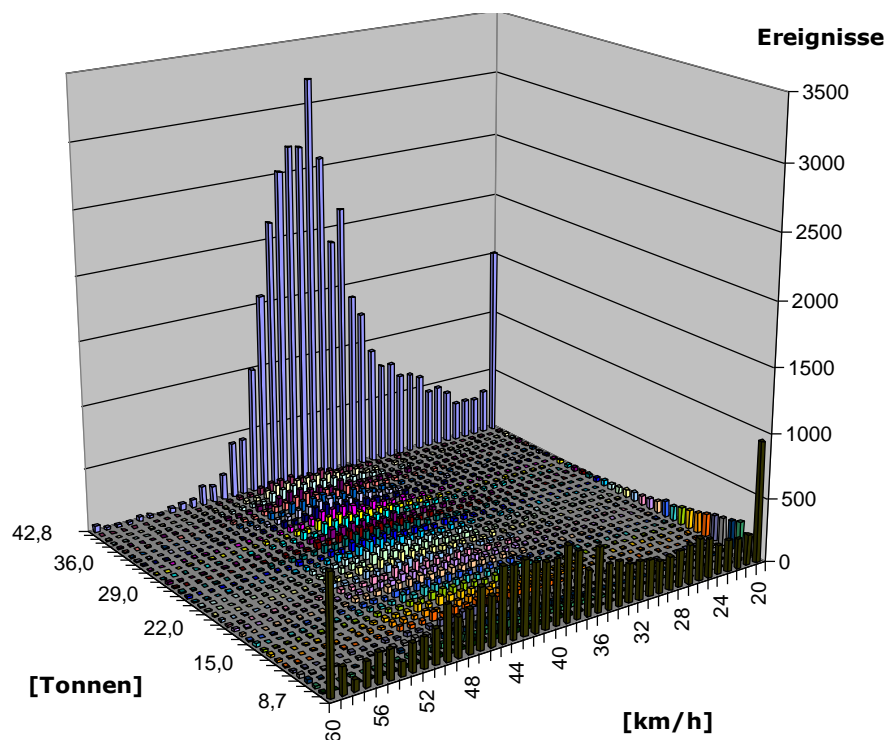


Bild 45: Zwei-parametrische Häufigkeitsverteilung der auftretenden LKWs für einen repräsentativen Beispielmonat (November 2006)

Mit Hilfe der bereitgestellten, räumlichen Häufigkeitsverteilung (**Bild 45**) soll nun ein ganzheitlicher Aufschluss über die tatsächlich auftretenden Ereignisse und deren Verteilung innerhalb des kalibrierten Messbereiches gegeben werden. Gleichzeitig soll auch verstärkt Verständnis für die bereits in **Abschnitt 3.6.1 & 3.6.2** beschriebene Zuweisung jener Fälle geschaffen werden, welche hinreichend nahe entlang des kalibrierten Messbereiches auftreten (Überschreitungen des vorgegebenen Geschwindigkeits- bzw. Tonnagen-Bereiches):

- Zunächst fällt dominanter Weise einerseits die starke Anhäufung an Ereignissen für voll ausgelastete Schwerfahrzeuge ($\geq 42,8$ t) auf, andererseits eine etwas weniger deutliche aber dennoch ausgeprägte Anhäufung an Ereignissen für Leer-Fahrzeuge ($\leq 8,7$ t).
- Weiters ist gleichzeitig eine Ausprägung der registrierten Ereignisse ähnlich einer „Glockenkurve“ mit einem eindeutigen Maximum im Bereich der festgelegten Geschwindigkeitsbeschränkung zu bemerken. Während die Geschwindigkeiten für sehr schwere Ereignisse sehr stark an diese Ausprägung angelehnt auftreten, stellt sich die Geschwindigkeitsverteilung für die sehr leichten Ereignisse deutlich „flacher“ ein. Beide Tatsachen machen durchaus Sinn, wenn man weiß, dass die LKW-Überfahrten für die Fahrtrichtung Innsbruck - d.h. bergab und unmittelbar vor einer deutlichen Krümmung im Straßenverlauf registriert werden. Leichte Schwerfahrzeuge gehen offenkundig vermehrt das Risiko ein, mit über dem Tempolimit liegenden Geschwindigkeiten die Kurve zu durchfahren als stark beladene LKWs.
- Beide Verläufe entlang der Grenzen des klassifizierbaren Tonnagen-Bereiches haben weiters ein lokales Maximum im Bereich sehr niedriger Geschwindigkeiten (20km/h), was mit fallweisem, zähflüssigem Kolonnenverkehr zu erklären ist.
- Zusätzlich ergibt sich ein weiteres plausibles, lokales Maximum im Bereich sehr leichter und gleichzeitig zu schnell fahrender Schwerfahrzeuge.

Werden alle Ereignisse entlang der Außengrenzen des kalibrierten Mess-Bereiches ausgeblendet, so können die verbleibenden Ereignisse infolge der automatisierten Diagramm-Normierung deutlich besser visualisiert und daher auch bewertet werden (**Bild 46** & **Bild 47**):

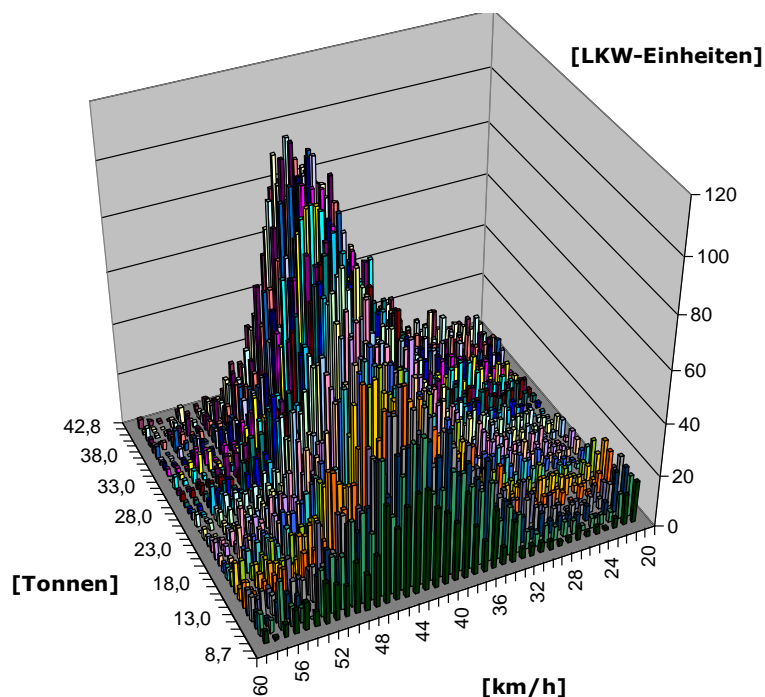


Bild 46: Detaillierung von **Bild 45** durch Ausblenden der Ereignisse entlang der Außengrenzen des kalibrierten Bereiches der Betriebs-Beanspruchung (November 2006)

- Wiederum fällt die ausgeprägte Anhäufung der Überfahrts-Ereignisse über alle Tonnagen-Klassen hinweg am Bereich zwischen 40-45 km/h auf.
- Dazu ist ein klarer Trend in der Verteilung der Tonnagen – ansteigend von den niedrigen Beträgen zu den häufigeren und höheren Beträgen – zu erkennen (Verweis auf die Erzeugende entlang des „Kamms der Glockenkurve“).

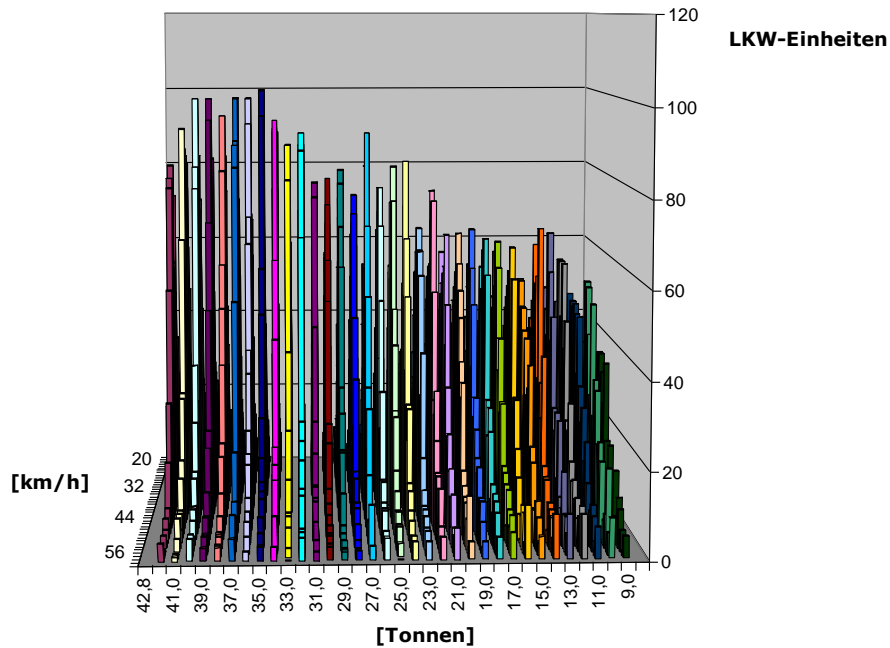


Bild 47: Weitgehend gleichmäßige Ausrichtung der auftretenden Ereignisse an der charakteristischen Glockenkurve vom niedrigen in den hohen Tonnagen-Bereich

Hinsichtlich der Kalibrierung der Kragarm-Durchbiegungen (d.h. dem automatisierten Einsatz der Skalierungsmatrix - **Bild 32**) und den getroffenen Vorkehrungen zur Handhabung von Ereignissen, welche hinreichend nahe entlang des kalibrierten Messbereiches auftreten (Überschreitungen des vorgegebenen Geschwindigkeits- bzw. Tonnagen-Bereiches) sind folgende Überlegungen anzuführen:

- **Ereignisse mit Geschwindigkeiten kleiner als 20 km/h** werden mit dem in **Abschnitt 3.6.1 vorgestellten Ansatz der Randfunktion** sowie unter Betrachtung von **Bild 48 unterschätzt**.

Diese Ereignisse treten zwar auf, aber mit verstärkter Tendenz zum Niedrig-Tonnagen-Bereich hin, wodurch deren Auswirkung auf Bauteilalterung stark relativiert wird.

- **Ereignisse mit Geschwindigkeiten größer als 60 km/h** werden mit dem in **Abschnitt 3.6.1 vorgestellten Ansatz der Randfunktion** sowie unter Betrachtung von **Bild 48 überschätzt**.

Infolge der im **Abschnitt 3.6.1** festgelegten Grenzfallregelungen treten solche Ereignisse in deutlich geringerem Ausmaß auf, wobei dies dann überwiegend mit Szenarien infolge Leerfahrten verknüpft ist.

- **Ereignisse mit Tonnagen kleiner als 8,7 t** werden mit dem in **Abschnitt 3.6.2 vorgestellten Ansatz der Randfunktion** sowie unter Betrachtung von **Bild 48 überschätzt**.

Da solche Überfahrten aber nur etwa 1,5 mm Kragarm-Durchbiegung entsprechen, sind diese real im Bereich des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit anzusiedeln und daher für Ermüdungsüberlegungen von untergeordneter Bedeutung (siehe [58]).

- **Ereignisse mit Tonnagen größer als 42,8 t** werden mit dem in **Abschnitt 3.6.2 vorgestellten Ansatz der Randfunktion** sowie unter Betrachtung von **Bild 48 unterschätzt**.

An dieser Stelle sei festgehalten, dass aufgrund des durch die Eichfahrzeuge vorgegebenen Messbereiches keine klare Trennung zwischen voll beladenen Schwerfahrzeugen (im Sinne des allgemein gültigen Tonnagen-Limits von 44 t) und den überladenen Schwerfahrzeugen möglich ist. Diese Tatsache ist als Prozessbestandteil gegeben, deren Auswirkungen werden durchgehend im Zuge dieser Dissertation an allen maßgeblichen Stellen diskutiert. Letztlich wird dieser Tatsache aber tendenziell immer durch Verwendung konservativer Ansätze entgegengetreten.

Die vorangehenden Anmerkungen gelten ausschließlich für die notwendiger Weise zu definierenden Grenzfallbetrachtungen. Sie sind keinesfalls im Zusammenhang mit der korrekten algorithmischen Zuweisung der Belastungseigenschaften an sich - d.h. innerhalb des kalibrierten Messbereiches - zu sehen. Gerade für Letzteres ist die Richtigkeit der vorliegenden Ansätze gewährleistet, wie durch eine noch ausstehende, ausführliche Beweisführung gezeigt wird (siehe **Kapitel 4**).

Eine wünschenswerte Verbesserung des Verfahrens – verbunden mit einem Aufschluss zu derzeit verbleibenden Unsicherheiten – hätte mit Sicherheit ein zumindest drittes Eichfahrzeug im „mittleren Tonnagen-Bereich“ (25-30t) gebracht. Die letztlich notwendiger Weise erzeugte Raumkurve innerhalb des kalibrierten Messbereiches, indem anhand von linearer Interpolation zwischen den Stützstellen der beiden als Grenzfall anzusehenden Verformungsfunktionen punktweise Erzeugende für den vorgegebenen Geschwindigkeits- und Tonnagen-Bereich generiert wurden (**Bild 24** bzw. **Bild 31**) hätte dadurch entfallen können und hätte zu einem möglicherweise weiter an die Realität angepassten Verlauf führen können.

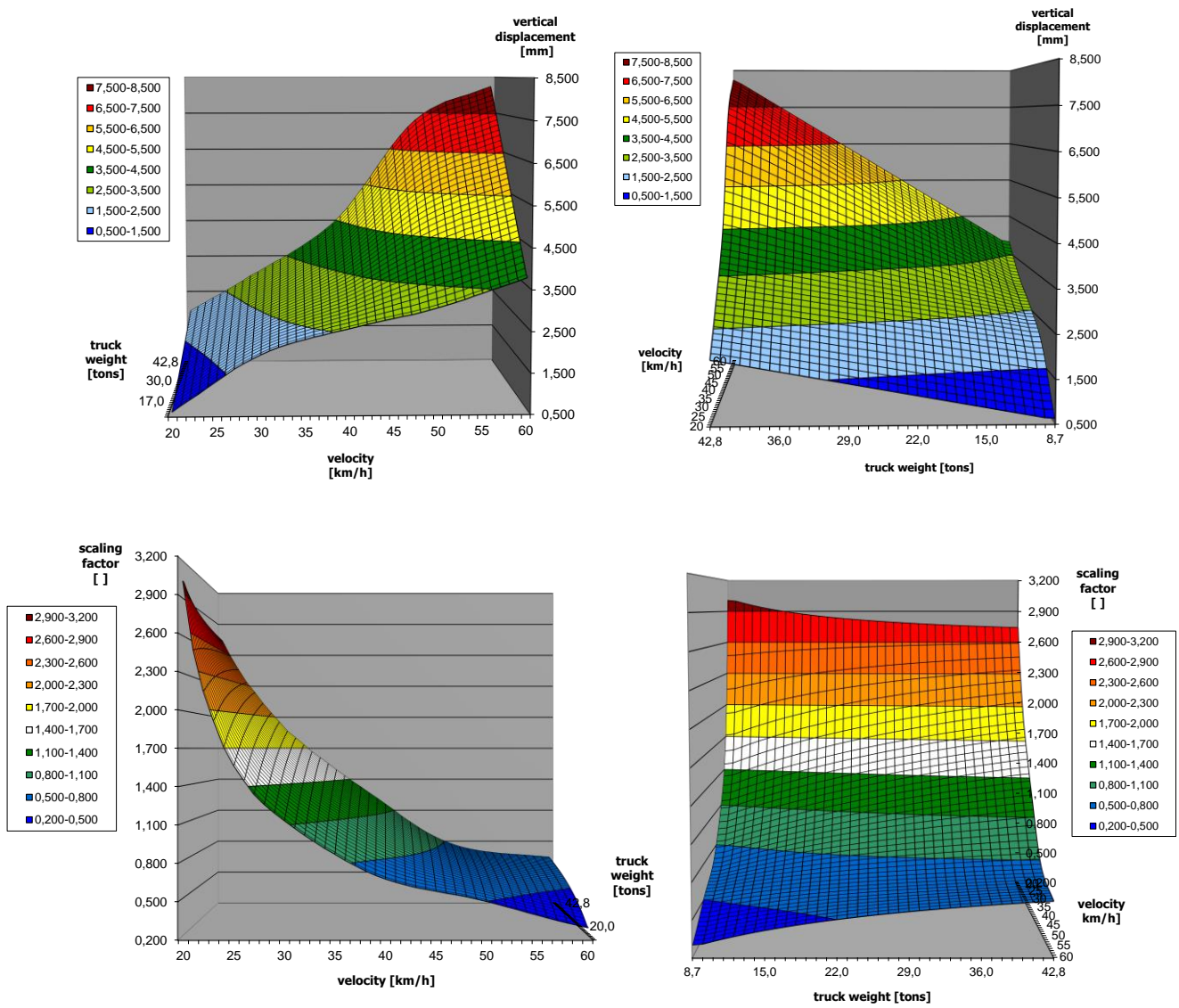


Bild 48: Gesonderte Darstellung: Reproduzierte Kragarm-Absolut-Verschiebungen auf Basis der Beschleunigungssensoren (oben) & Skalierungsmatrix zur Kalibrierung reproduzierter Kragarm-Absolut-Verformungen (unten) - beides in Abhängigkeit von den auftretenden Tonnagen und Geschwindigkeiten

3.7.1 Zwischenstand

Eine ausführliche Auseinandersetzung mit analytischen Vergleichsrechnungen (**Kapitel 3.3.1**), mit begleitenden Video-Messungen (**Bild 49**) sowie den Zählraten vom Messportal der ASFINAG Maut Service GmbH (siehe **KAPITEL 9** sowie **Kapitel 4.1 & 4.3.4**) hat zum schrittweisen Ausmerzen der auftretenden Instabilitäten und Unsicherheiten innerhalb des DYGES-Algorithmus geführt (siehe **Kapitel 3.5 & 3.6**). Hinsichtlich der Video-gestützten Validierung des vorliegenden methodischen Vorgehens bzw. der zugehörigen Ergebnisse sei an dieser Stelle neuerlich auf den Endbericht zum Nationalen Forschungsprojekt HOT SPOT [27] verwiesen. Neben der Überprüfung von beliebig gewählten, einzelnen LKW-Überfahrten liegt dort für den Zeitraum einer halben Stunde parallel zu entsprechendem Video-Material eine lückenlose, Fahrzeug-weise Evaluierung der vom DYGES-Algorithmus generierten Ergebnisse vor. Dadurch wurde schließlich auch die nötige Gewissheit erlangt, mit dem entwickelten Instrument eine gewissermaßen anonymisierte Auswertung der Schwerververkehrscharakteristik anhand großer Datenmengen durchführen zu können. Entsprechende Ergebnisse der automatisierten Dynamischen Gewichtserfassung werden im **Kapitel 4** umfassend dargelegt und ausführlich diskutiert.

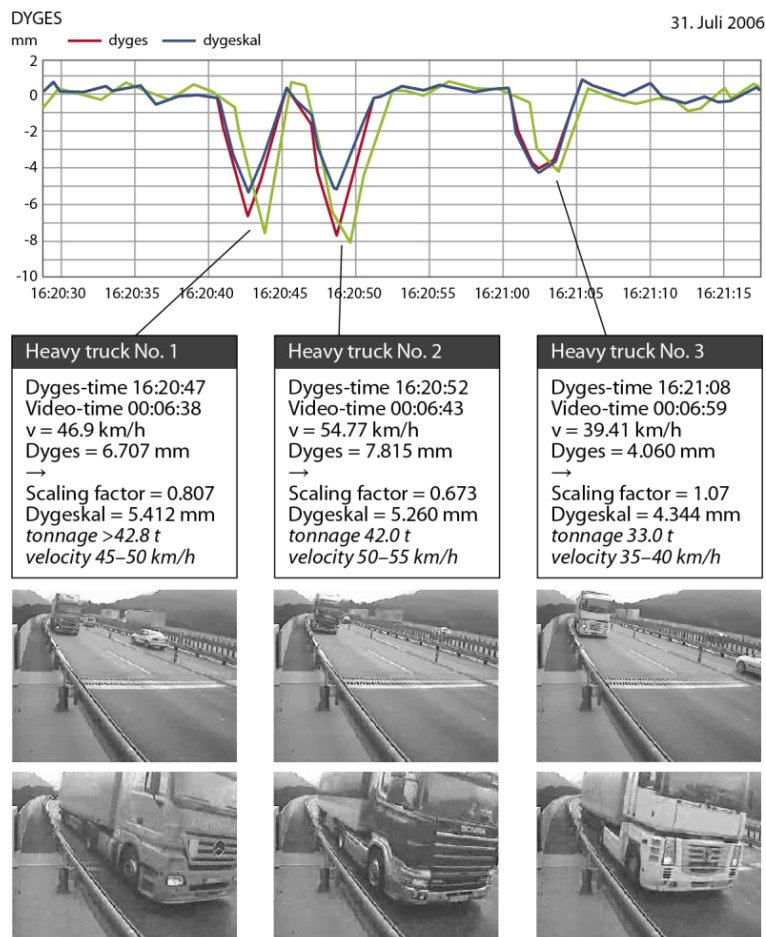


Bild 49: Video-basierte Verifizierung der Schwerverkehrs-Klassifizierung infolge DYGES Algorithmus [27]

4 EVALUIERUNG DER DYGES-ERGEBNISSE ANHAND VORLIEGENDER, EXTERNER UNTERSUCHUNGEN VON REALEM SCHWERVERKEHR

Die im Rahmen des **Kapitels 3** offen angesprochenen, etwaigen Unschärfen im entwickelten Lösungsverfahren zur dynamischen Erfassung der Gewichte von überfahrenden Schwerverfahrzeugen wurden ausführlich diskutiert.

Gerade deswegen soll aber das vorliegende **Kapitel 4** demonstrieren, dass die erzielten Ergebnisse des DYGES-Verfahrens einer vielschichtigen Evaluierung anhand des Vergleiches mit externen Untersuchungen standgehalten haben, welche ebenfalls jeweils die Charakterisierung von realem Schwerverkehr zum Gegenstand hatten. Die Bestandteile dieser Erörterung werden nun vorausgeschickt und in weiterer Folge erörtert (**Kapitel 4.1 bis 4.4**).

A) Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand offizieller Zähldaten der ASFINAG Mautservice GmbH (Kapitel 4.1), da dort dieselbe Verkehrseinwirkung vorliegt

B) Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand der im Eurocode festgelegten, so genannten „Standard“-Lastkraftwagen (Kapitel 4.2)

- Vergleichsparameter Achszahl infolge Fahrzeugtyp
- Vergleichsparameter zugewiesenes Fahrzeuggewicht infolge Verkehrstyp
- Vergleichsparameter durchschnittliches Fahrzeuggewicht des einzelnen Schwerverzeuges

C) Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand externer Untersuchungen an der gleichen bzw. sehr ähnlicher Schwerverkehrs-Einwirkung (Kapitel 4.3)

- **A13 Brenner-Autobahn (1998)**: Wiegeeinrichtung der Polizei am Standort Brennersee ... **streckengebundener, historischer Schwerverkehr**
- **A12-Inntalautobahn (2008)**: Bridge-Weigh-In-Motion Untersuchungen Dr. Petschacher ... **weitgehend gleicher Schwerverkehr**
- **BAB A61 Deutschland (2004/2005)** – Dynamische Untersuchungen der BAST ... **gleichartiger Schwerverkehr**

Diese mehrstufige Beweisführung erfolgte nicht zuletzt aufgrund der zunächst für den Autor wie für die Bauwerkseigentümerseite überraschenden und daher umso kritischer hinterfragten Ergebnisse (deutlich höhere Belastungen der Einzelfahrzeuge als erwartet).

Aus demselben Grund erfolgte in weiterer Folge auch eine Analyse zu den daraus ableitbaren Auswirkungen in Form eines in-situ basierten Lastmodells als vollwertige Eingangsgröße für baustatische Nachrechnungen (**Kapitel 16**) sowie dessen detaillierte Gegenüberstellung zum Eurocode (**Kapitel 17**).

4.1 Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand offizieller Zähldaten der ASFINAG Mautservice GmbH

Wie im **Kapitel 3** gezeigt wurde, werden durch den DYGES-Algorithmus mit Hilfe der aus der Messung ermittelten Geschwindigkeit und der zugehörigen Kragarm-Reaktion die überfahrenden Tonnagen bereitgestellt. Dies geschieht über eine Kopplung der Raumkurven aus **Bild 31** und **Bild 32**. Als Ergebnis wird für beliebige Betrachtungs-Zeiträume eine Zählung und Kategorisierung der überfahrenden Schwerfahrzeuge in einzelne Tonnagen- und Geschwindigkeits-Klassen in Tabellenform bereitgestellt, wodurch die vorliegende Entwicklung der Dynamischen Gewichtserfassung als maßgebliche Erweiterung der bisherigen, konventionellen Schwerverkehrs-Charakteristik der ASFINAG Maut Service GmbH herangezogen werden kann.

Im vorliegenden Abschnitt werden die mittels DYGES-Algorithmus gewonnenen LKW-Klassierungsdaten nun mit den offiziellen Zählungs-Daten der ASFINAG Maut Service GmbH verglichen, welche von einem Mautportal in unmittelbarer Nähe der Europabrücke stammen. Die vom Mautportal für den Vergleich herangezogenen Daten für die Fahrtrichtung Innsbruck weisen sowohl die Gesamtanzahl der fahrenden Schwerfahrzeuge über 3,5 Tonnen als auch die zugehörige Anzahl der Achsen aus. Es wird unterschieden zwischen KAT II für Fahrzeuge mit zwei Achsen, KAT III für Fahrzeuge mit drei Achsen und KAT IV, wenn vier oder mehr Achsen vorliegen. Anhand des Beispielmonates November 2006 soll nun der weitere Vorgang der Gegenüberstellung beschrieben werden. Verglichen werden dabei die Daten der DYGES-Zählung und die Daten der ASFINAG Maut Service GmbH.

Tabelle 1 zeigt das entsprechende Formular, welches für eine automatisierte, vergleichende Auswertung langer Untersuchungszeiträume von LKW-Kollektiven vorbereitet wurde. Die ASFINAG-Zähldaten (Mautportal) liegen in den bereits angesprochenen Achsen-Kategorien II-IV vor, die DYGES-Zählung hingegen in Geschwindigkeits- und Tonnagenkategorien. Zusätzlich wird für die Tonnagen-Klassen eine prozentuelle Auftretens-Häufigkeit in Bezug auf die Gesamtsumme ausgewiesen.

Zählung zum gleichen Zeitabschnitt von der ASFINAG Maut Service GmbH (RFB Innsbruck) Zeitraum 01.11.2006 08:43:02 - 30.11.2006 23:00:00 bei Schönberg Stubaital - Igls Patsch										
KAT II	8805	8								
KAT III	3911	4								
KAT IV	93486	88	[%] innerhalb der 3 Zählkategorien							
Summe	106202									
Traffic Count Velocity 01.11.2006 08:43:02 - 30.11.2006 23:00:00										
	<20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	>60
Summe	9210	3868	5737	8929	21133	24879	9926	3357	1856	29242
Summe aller Überfahrten aus der Dyges Zählung:							118137			
Summe der Überfahrten Dyges Zählung abzügl Ereignisse >60							88895			
Traffic Count Mass 01.11.2006 08:43:02 - 30.11.2006 23:00:00										
	8.7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-42.8t	>42.8t		
Summe	45123	6651	5819	5483	5391	5274	8985	35411		
Summe Gesamt	38 [%]	6 [%]	5 [%]	5 [%]	5 [%]	4 [%]	8 [%]	30 [%]		
Der hohe Anteil an Ereignissen > 60km/h öffnet in diesem Fall eine beträchtliche Lücke zwischender DYGES-Zählung am Kragarm und der zwingend am Kragarm auftretenden KAT 4 (registriert) => eine Gewichtungs-basierte Hochrechnung für diese Differenz muss daher anteilig für alle Gewichtskategorien vorgenommen werden!										
	8.7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-42.8t	>42.8t		
Summe abzügl. >60	15881	6651	5819	5483	5391	5274	8985	35411		
	18 [%]	7 [%]	7 [%]	6 [%]	6 [%]	6 [%]	10 [%]	40 [%]		
Summe der Verkehrs-Einheiten aus der Dyges Zählung:							118137			
Summe der Verkehrs-Einheiten aus der Dyges Zählung abzügl. Ereignisse > 60							88895			
Kurz-Analyse aus dem permanenten Monitoring:										
Anteil des Schwerverkehrs > 35 t zufolge Dyges-Zählung auf der gesamten RFB Innsbruck (Mautbalken)								41,8	[%]	
Anteil des Schwerverkehrs > 35 t zufolge Dyges-Zählung auf dem äußersten Fahrstreifen(Dyges Monitoring)								49,9	[%]	
Anteil des Schwerverkehrs > 35 t zufolge Dyges-Zählung innerhalb der KAT 4 (Mautbalken)								47,5	[%]	
Die vorliegenden Ergebnissen führen dazu, dass die der Dyges-Zählung am Kragarm zugrunde liegende Ungleichung (106202>88895>93486) am Kragarm zunächst nicht erfüllt wird.										
neue Schwerverkehrstabelle										
Differenz Dyges-Zählung Gesamt und Mautzählung Gesamt						17307				
	8.7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-42.8t	>42.8t		
Summe neu	18973	7946	6952	6550	6441	6301	10734	42305		
	18 [%]	7 [%]	7 [%]	6 [%]	6 [%]	6 [%]	10 [%]	40 [%]		
Kontrolle										
Summe neu Gesamt		106202								
Summe Mautzählung		106202								

Tabelle 1: DYGES-Detailanalyse für den Beispielmonat November 2006

Das Hauptaugenmerk richtet sich aber tatsächlich auf die registrierten Fahrzeuge der Kategorie IV, die aufgrund der vor Ort geltenden Vorschriften (ab 7,5t) ausnahmslos auf der äußersten (ersten) Fahrspur zu fahren haben und somit auf jeden Fall vom Kragarm-Messsystem erfasst werden müssten. Es wird diesbezüglich eine Ungleichung aufgestellt, anhand der die Plausibilität der DYGES-Zählung beim Auswerten überprüft wird.

So soll

- die Summe der am Mautbalken erfassten LKWs größer sein als die Gesamtsumme des DYGES-Zählung ohne die Kategorie >60km/h (infolge des eigentlich geltenden

Tempolimits von 40 km/h werden diese vorausseilend abgezogen, da angenommen wird, dass es sich um keine „echten“ Schwerfahrzeuge handelt).

- Diese wiederum sollte größer als die Summe der KAT IV-LKWs sein.
- Bei Erfüllung dieser Ungleichung sind keine weiteren Maßnahmen mehr erforderlich.

Von der beschriebenen Bereinigung um die Beiträge der Kategorie > 60km/h kann unter Umständen auch die Erfassung „echter“ LKWs in diesem Geschwindigkeitsbereich betroffen sein. In solchen Fällen, wo es nachweislich zu einer Elimination relevanter LKW-Überfahrten kommt, kann natürlich keine genaue Aussage zur tatsächlichen, jeweiligen Tonnage mehr getroffen werden. Wird nun die beschriebene Ungleichung nicht erfüllt, so wird die Ereignis-Differenz aus dem DYGES-Monitoring und den vom Mautbalken erfassten Daten gleichartig im Sinne des langfristig ausgewerteten Gewichts-Kollektivs kategorisiert und zur tatsächlich gezählten Menge der Schwerfahrzeuge bis zum Wert der Gesamtsumme aus der Mautzählung hinzugefügt. Gerade der ermittelten Auftretens-Häufigkeit der einzelnen Tonnagen-Klassen der DYGES-Zählung liegt jeweils ein deutlich längerer Beobachtungs-Zeitraum zugrunde als der Charakteristik der auftretenden Fälle außerhalb der Kalibrierungsgrenzen des DYGES-Algorithmus (Ereignisse > 60 km/h), so dass dieses Vorgehen als das einzig mögliche gerechtfertigt werden kann.

Im Falle des Beispielmonats in **Tabelle 1** liegt die DYGES-Gesamtsumme durch den Abzug der über 60km/h fahrenden Fahrzeuge deutlich unterhalb der Anzahl der erfassten KAT IV-Fahrzeuge. Die Ungleichung wird daher nicht erfüllt und die Differenz aus Mautportal- und DYGES-Gesamtsumme wird gewichtet (entsprechend den zuvor in der “Summe abzüglich > 60 km/h” ermittelten Prozentsätzen) auf die gegebenen Gewichts-Klassen additiv aufgeteilt. Das führt zu der neuen Schwerverkehrstabelle, wie sie abschließend am unteren Ende in **Tabelle 1** zu sehen ist.

Es gibt jedoch auch Monate, in denen kein vollständiger Datensatz gewonnen werden konnte (temporärer Ausfall der Anlage). In solchen Fällen wurden die durch die ASFINAG Mautzählung vorliegenden Monats-Daten der LKW-Überfahrten - entsprechend der durchschnittlichen Häufigkeitsverteilung der ausgewerteten DYGES Langzeitreihe (**Kapitel 12**) – auf die neun festgelegten Gewichts-Klassen aufgeteilt.

4.1.1 Wesentlichste Ergebnisse

Analog zum eben betrachteten Beispielmonat (November 2006) wurde im Zuge der Aufarbeitung der Langzeitreihe des permanenten Monitoring-Systems Europabrücke der Messzeitraum **Juli 2004 bis Dezember 2007** ausgewertet. Die tabelliert aufbereiteten Ergebnisse zu den Summenwerten der einzelnen Monate, aber auch zum gemittelten Schwerverkehrsaufkommen (pro Jahr bzw. stufenweise für die gesamte Langzeitreihe) sind im **Kapitel 12** zu finden.

Der DYGES-Algorithmus zeigt dabei eine Monat für Monat weitgehend konstante Verteilung innerhalb der Tonnagen-Klassen, d.h. **rund 25 % Leer-LKWs, etwas weniger als 40% voll beladene LKWs** und eine gleichmäßige Verteilung der verbleibenden LKWs auf die übrigen Tonnagen-Klassen (**Tabelle 2 - Tabelle 4** sowie **Bild 51 - Bild 52**). Änderungen in der Schwerverkehrscharakteristik ergeben sich daher nachweislich nur in den auftretenden Verkehrsvolumina (Auftretens-Häufigkeit), aber nicht in der Verteilung der Fahrzeug-Gewichte. Zum besseren Verständnis ist zu erwähnen, dass der Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr auf der A13 Brenner-Autobahn im Bereich von 20% liegt.

In Bezug auf die beiden markanten Kennwerte, d.h. die Größenordnung der so genannten LKW-Leerfahrten einerseits bzw. der hoch ausgelasteten Schwerfahrzeuge andererseits seien folgende übergeordnete Erklärungen abgegeben:

- Eine von EUROSTAT für das Jahr 2007 vorliegende Studie zum Anteil der LKW-Leerfahrten in der EU [54] führt an, dass der Schwerverkehr in Österreich 27% der zurückgelegten Kilometer leer zurücklegt (EU Schnitt 25%). Im grenzüberschreitenden Verkehr sind es dabei 16%, innerhalb Österreichs sogar 38%. Die in der vorliegenden Dissertation für den LKW Verkehr auf der A13 Brenner-Autobahn ermittelten Anteile für Leerfahrten bzw. beladene Fahrten kleiner Schwerfahrzeuge (bis 15t Gesamt-Tonnage) von insgesamt 29,3% (**Tabelle 4**) erscheinen im Lichte dieser offiziellen Zahlen mehr als plausibel.
- Komplementär dazu wird insbesondere der Aspekt des großen Anteils an hoch ausgelasteten LKWs (**Tabelle 4**) in den nachfolgenden **Kapiteln 4.2** und **4.3** aufgegriffen und dort in Form einer umfassenden Stellungnahme analysiert.

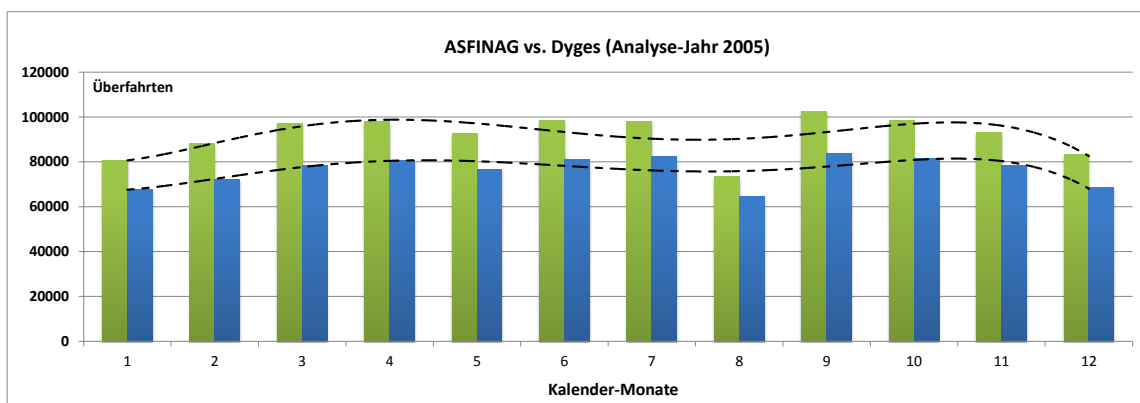


Bild 50: Gegenüberstellung der offiziellen Schwerverkehrsdaten (ASFINAG-Mautportal) mit dem DYGES Messquerschnitt RFB Innsbruck – Vergleich der Absolutwerte für ein ganzes Jahr (2005)

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2004									
2004	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
		21,4	7,3	6,4	5,8	5,6	5,8	4,8	5,2

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 01/2005 - 12/2005									
2005	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
		21,3	7,2	6,5	5,9	5,8	6,0	4,9	5,3

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 01/2006 - 12/2006									
2006	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
		24,5	6,8	6,0	5,3	5,2	5,2	4,1	4,5

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 01/2007 - 12/2007									
2007	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
		20,9	7,2	6,5	6,0	5,8	5,9	4,8	5,1

Tabelle 2 : DYGES Langfrist-Analyse - Detailliert und nach Jahren einzeln aufgliedert (Zeitraum 2004/2005/2006/2007)

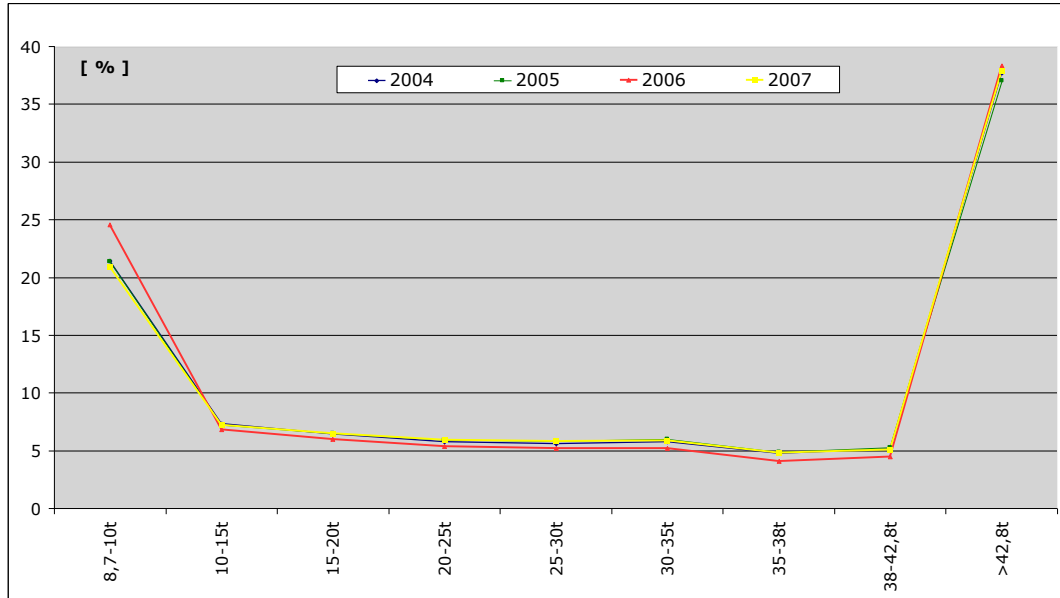


Bild 51: Jahresweise DYGES Langfrist-Analyse (grafische Darstellung zu Tabelle 2)

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2005									
2004-2005	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	21,3	7,2	6,5	5,9	5,8	6,0	4,9	5,3	37,0

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2006									
2004-2006	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	22,9	7,0	6,2	5,6	5,5	5,6	4,5	4,9	37,7

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2007									
2004-2007	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	22,2	7,1	6,3	5,8	5,6	5,7	4,6	5,0	37,6

Tabelle 3 : DYGES Langfrist-Analyse: Akkumulierte Betrachtung der Tabelle 2
(Zeitraum 07/2004 – 12/2007)

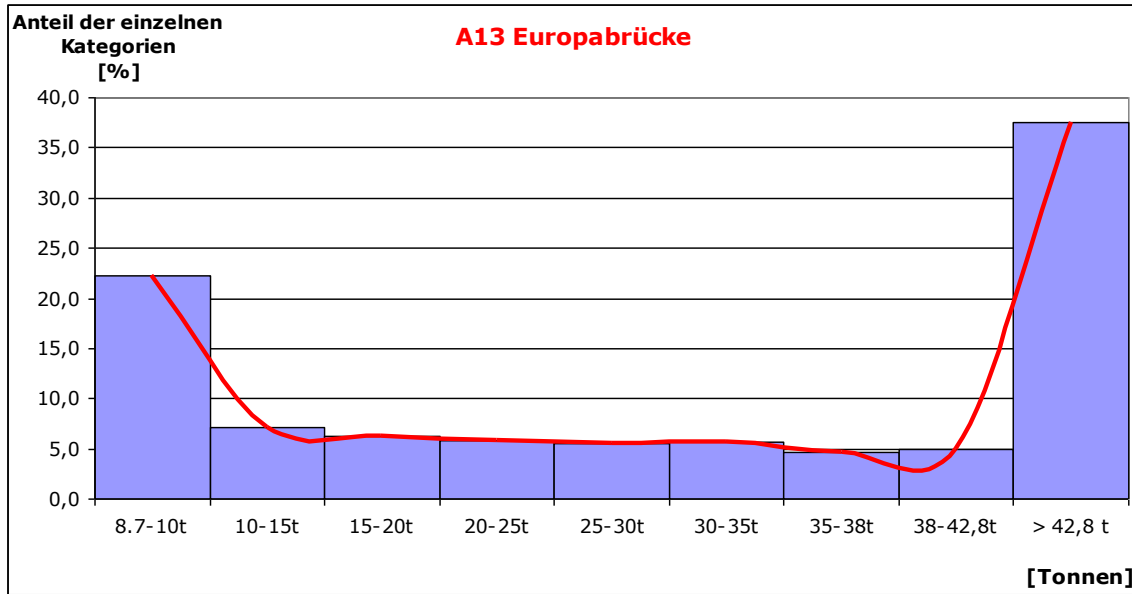


Bild 52: Resultierende, 1-parametrische Häufigkeitsverteilung der auftretenden Schwerfahrzeuge am DYGES-Messquerschnitt Europabrücke (Zeitraum 07/2004 – 12/2007)

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2007									
2004-2007	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	22,2	7,1	6,3	5,8	5,6	5,7	4,6	5,0	37,6

Tabelle 4 : Resultierende DYGES Langfrist-Analyse (Zeitraum 07/2004 – 12/2007) – ZUSAMMENFASSUNG

4.1.2 Bewertung

Abschließend wird vom Autor nach all den Detailbetrachtungen zur abrundenden, verallgemeinernden Plausibilitäts-Analyse anhand von **Tabelle 2** bis **Tabelle 4**, **Bild 50** sowie den detaillierten Aufbereitungen im **Kapitel 12** noch auf folgende Argumentationskette Wert gelegt:

- Für den gesamten, langjährigen Beobachtungszeitraum ergibt sich ein weitgehend konstanter Anteil von den am Messquerschnitt gezählten LKWs zu den seitens des Mautportals ausgewiesenen Schwerverkehrseinheiten, welcher sich im Bereich von 80% einfindet (**Bild 50**).
- Diese Größenordnung korrespondiert sehr gut mit jenem Anteil, den die offiziell veröffentlichten KAT 4+ Fahrzeuge am gesamten Schwerverkehrsaufkommen ausmachen. Da diese gemäß der vorliegenden Bestimmungen ohnehin nur auf der äußersten Spur fahren dürfen, sollten sie dadurch unmittelbar von DYGES erfasst werden.
- Dass die Monitoring-basierten Zählwerte gegenüber jenen des Mautportals tendenziell etwas geringer ausfallen muss schon allein deswegen der Fall sein, da nicht alle LKWs zwingender Weise die äußerste Fahrspur benutzen (siehe **Kapitel 18**).
- Die verbleibenden, minimalen Unschärfen rühren von daher, dass sich natürlich mitunter auch immer wieder LKWs nicht an das vorgeschriebene Tempolimit von 40km/h halten (und daher unter Umständen zunächst aus der Zählung eliminiert werden – siehe Erklärung im **Abschnitt 4.1**).
- Der entwickelte Algorithmus zielte nie vordergründig auf eine möglichst lückenlose Zählung der Schwerverkehrseinheiten ab, sondern auf eine hinreichend exakte Erfassung der auftretenden Tonnagen. Mit anderen Worten sollten den von der ASFINAG Maut Service GmbH automatisch gezählten Einheiten konkrete Belastungseigenschaften zugeordnet werden. Wie dem **Kapitel 12** zu entnehmen ist, treten im Zuge der Dynamischen Messungen Monat für Monat kaum voneinander abweichende Verteilungen der erfassten Schwerfahrzeuge auf die einzelnen Gewichtsklassen auf. Der Unterschied im Schwerverkehrsaufkommen ist lediglich im variierenden Verkehrsvolumen zu sehen. Etwaige Bedenken bezüglich des vorher beschriebenen "Auffüllens" von Datenlücken werden dadurch nochmals entkräftet.

4.2 Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand der im Eurocode festgelegten „Standard“-Lastkraftwagen

Auch im nächsten Schritt sollen die neuartig generierten Schwerverkehrsdaten zu einer weiteren, möglichen Vergleichsquelle in Bezug gesetzt werden. Dabei handelt es sich um die Gruppe der in [40] festgelegten so genannten „Standard“-Lastkraftwagen, wobei zur vollständigen Bewertung drei wesentliche Aspekte herausgelöst wurden:

- Vergleichsparameter Achszahl infolge Fahrzeugtyp
- Vergleichsparameter zugewiesenes Fahrzeuggewicht infolge Verkehrstyp
- Vergleichsparameter durchschnittliches Fahrzeuggewicht des einzelnen Schwerverzeuges

4.2.1 Vergleichsparameter Achszahl infolge Fahrzeugtyp

Ermüdungs-Lastmodell 4		Gruppe von „Standard“-Lastkraftwagen Auswirkungen äquivalent dem typischen Verkehr auf europäischen Straßen					
Fahrzeugtyp			Verkehrstyp			Achs-(Rad-) Type <small>(wie bei Erm. Lastmodell 2)</small>	Gewicht
Fahrzeug	Achsenabstand	Häufige Achslast	Weitstrecken > 100 km LKW-Prozent-anteil	Mittelstrecken 50-100 km LKW-Prozent-anteil	Lokaler Verkehr < 50 km LKW-Prozent-anteil		
	4,5 m	70 kN 130 kN	20 %	40 %	80 %	A B	20 t
	4,20 m 1,30 m	70 kN 120 kN 120 kN	5 %	10 %	5 %	A B B	31 t
	3,20 m 5,20 m 1,30 m 1,30 m	70 kN 150 kN 90 kN 90 kN 90 kN	50 %	30 %	5 %	A B C C C	49 t
	3,40 m 6,00 m 1,80 m	70 kN 140 kN 90 kN 90 kN	15 %	15 %	5 %	A B B B	39 t
	4,80 m 3,50 m 4,40 m 1,30 m	70 kN 130 kN 90 kN 80 kN 80 kN	10 %	5 %	5 %	A B C C C	45 t






	Weitstrecken LKW-Anteil [%]	Mittelstrecken LKW-Anteil [%]	Mautstelle LKW-Anteil [%]
KAT 2	20	40	11,5
KAT 3	5	10	4,2
KAT4+	75	50	84,3

Tabelle 5: Vergleichbar machen der Anteile der EC-basierten „Standard-LKWs“ [40] mit nachweislich am Mautbalken registrierten Schwerverfahrzeugen **aufgrund des Fahrzeugtyps**

Aus der vorangehenden Tabelle wird zunächst in Abhängigkeit vom Verkehrstyp für zwei Grenzfälle (Langstrecken & Mittelstrecken) die im Eurocode vorgesehene Aufteilung der Schwerverzeuge auf den Fahrzeugtyp und damit auf die Anzahl der Achsen vorgenommen. Diese wird mit der gezählten, durchschnittlichen Verteilung der Achslasten verglichen, welche durch Daten der ASFINAG Mautservice GmbH dokumentiert ist (Beobachtungszeitraum 2004-2007, siehe Kapitel 9). Dabei zeigt sich bereits eine deutlich ungünstigere Zusammensetzung hin zu den KAT 4+ Schwerverfahrzeugen, die nachweislich fast 85 % des gesamten, registrierten Schwerverkehrsaufkommens ausmachen. Führt man nun aufgrund der realen Zusammensetzung der Achszahl (Tabelle 5 rechts) die registrierten Schwerverzeuge

gedanklich in Fahrzeuggewichte über, so wäre dies gleichbedeutend mit einer Aufteilung auf LKW-Tonnagen in der Relation von 12% mit 20t, 4% mit rund 31t sowie 84% mit 39-49 t. Durch diesen Aspekt will der Autor eine weitere, wesentliche Bestätigung der Plausibilität von **Tabelle 4** vorlegen.

4.2.2 Vergleichsparameter zugewiesenes Fahrzeuggewicht infolge Verkehrstyp

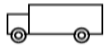




Ermüdungs-Lastmodell 4		Gruppe von „Standard“-Lastkraftwagen Auswirkungen äquivalent dem typischen Verkehr auf europäischen Straßen						
Fahrzeugtyp			Verkehrstyp					
Fahrzeug	Achsen- abstand	Häufige Achslast	Weitstrecken	Mittelstrecken	Lokaler Verkehr	Achs-(Rad-) Type (wie bei Erm. Lastmodell 2)		
			> 100 km	50-100 km	< 50 km			
			LKW-Prozent- anteil	LKW-Prozent- anteil	LKW-Prozent- anteil			
	4,5 m	70 kN 130 kN	20 %	40 %	80 %	A B	20 t	
	4,20 m 1,30 m	70 kN 120 kN 120 kN	5 %	10 %	5 %	A B B	31 t	
	3,20 m 5,20 m 1,30 m 1,30 m	70 kN 150 kN 90 kN 90 kN 90 kN	50 %	30 %	5 %	A B C C C	49 t	
	3,40 m 6,00 m 1,80 m	70 kN 140 kN 90 kN 90 kN	15 %	15 %	5 %	A B B B	39 t	
	4,80 m 3,60 m 4,40 m 1,30 m	70 kN 130 kN 90 kN 80 kN 80 kN	10 %	5 %	5 %	A B C C C	45 t	

DYGES		
Tons	Ratio	
≤ 20 t	35,6 %	
≤ 30 t	11,4 %	
≤ 50t	37,6 %	
≤ 38 t	10,3 %	
≤ 42,8 t	5,0 %	

Tabelle 6: Vergleichbar machen der Anteile der EC-basierten „Standard-LKWs“ mit am DYGES-Messquerschnitt registrierten Schwerfahrzeugen **anhand des Gesamtgewichtes**

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse der **Tabelle 4** im Sinne der **Tabelle 6** neu zusammengestellt. Das heißt es wird eine Vergleichbarkeit zwischen den durch DYGES generierten Schwerverkehrsdaten (im Beobachtungszeitraum 2004-2007) mit den beiden im Eurocode in Abhängigkeit vom Verkehrstyp festgelegten Grenzfällen (Langstrecken & Mittelstrecken) hergestellt. Es zeigt sich, dass sich die Messungs-basierte Schwerfahrzeugs-Charakteristik für die einzelnen Gewichtsklassen entweder zwischen diesen beiden Grenzfällen einordnet oder sich sogar am - gerade im höheren Tonnagenbereich - weniger belastungsintensiven Grenzfall „Mittelstrecke“ orientiert. Auch das Hinzuziehen dieses Aspektes bestätigt daher die prinzipielle Plausibilität von **Tabelle 4** bzw. entkräftet das etwaige Argument einer tendenziell zu hoch erscheinenden Zusammensetzung der realen Fahrzeuggewichte infolge Messung.

4.2.3 Vergleichsparameter durchschnittliches Fahrzeuggewicht des einzelnen Schwerfahrzeuges

Ermüdungs-Lastmodell 4	Gruppe von „Standard“-Lastkraftwagen Auswirkungen äquivalent dem typischen Verkehr auf europäischen Straßen						
	Fahrzeugtyp			Verkehrstyp			
	Fahrzeug	Achsen- abstand	Häufige Achslast	Weitstrecken > 100 km LKW-Prozent- anteil	Mittelstrecken 50-100 km LKW-Prozent- anteil	Lokaler Verkehr < 50 km LKW-Prozent- anteil	Achs-(Rad-) Type (wie bei Erm. Lastmodell 2)
	4,5 m	70 kN 130 kN	20 %	40 %	80 %	A B	20 t
	4,20 m 1,30 m	70 kN 120 kN 120 kN	5 %	10 %	5 %	A B B	31 t
	3,20 m 5,20 m 1,30 m 1,30 m	70 kN 150 kN 90 kN 90 kN 90 kN	50 %	30 %	5 %	A B C C C	49 t
	3,40 m 6,00 m 1,80 m	70 kN 140 kN 90 kN 90 kN	15 %	15 %	5 %	A B B B	39 t
	4,80 m 3,60 m 4,40 m 1,30 m	70 kN 130 kN 90 kN 80 kN 80 kN	10 %	5 %	5 %	A B C C C	45 t

**Eurocode 1-2
=> Rechnerischer Durchschnitts-LKW**

Weitstrecken 40,4 t

Mittelstrecken 33,9 t

	8.7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	> 42,8 t
Ratio %	22,2	7,1	6,3	5,8	5,6	5,7	4,6	5,0	37,6

=> gemessene, durchschnittliche LKW Einheit 29,9 t

Durchschnittsbeladung (Verkehrsbericht Tirol 2008) 12,8 t
angestrebte, gängige Zuladung 25-28 t
anzusetzendes Leergewicht (12) 15-18 t

Tabelle 7: Vergleichbar machen der Anteile der EC-basierten „Standard-LKWs“ mit am DYGES-Messquerschnitt registrierten Schwerfahrzeugen anhand des **durchschnittlichen Gesamtgewichtes des Einzel-LKW**

Abschließend zu diesem Unterkapitel sei nun der Bezug zu einem einzelnen Schwerfahrzeug hergestellt, indem anhand von relevanten, bekannten Eckdaten auf ein voraussichtliches, „durchschnittliches“ Fahrzeuggewicht geschlossen wird.

Als Referenz dient wiederum der Eurocode (ÖNORM B 1991-2 [40]), bei welchem sich für die Weitstrecken ein Durchschnittsgewicht von 40,4t sowie 33,9t für die Mittelstrecken errechnet (Tabelle 7). Ein Leer-LKW mit einem mittleren Gewicht von 15-18t samt der angestrebten, gängigen Zuladung von 25-28t orientiert sich dann bereits stark an der für die Weitstrecke resultierenden LKW-Belastungseinheit (40,4t) des EC bzw. am für den Autobahnverkehr zulässigen Gesamtgewicht von 44t.

Berücksichtigt man gängige Leergewichte von LKWs samt der seitens des Landes Tirol für diesen Streckenabschnitt gemäß [14] offiziell ausgewiesenen durchschnittlichen Beladung von 12,8t,

so ergibt sich je nach Leergewicht eine Spanne von 24,8–30,8t an durchschnittlich zu erwartenden Schwerfahrzeug-Belastungseinheiten.

Dem gegenüberzustellen ist das aus der vorliegenden Dynamischen Gewichtserfassung ermittelte, aus der Verteilung auf die einzelnen Tonnagen-Klassen zusammengesetzte Gewicht einer für den Beobachtungszeitraum 2004-2007 ermittelten, durchschnittlichen LKW-Einheit mit 29,9 t (**Tabelle 7** sowie **Kapitel 12**).

Die in diesem dritten Schritt eingebrachten Aspekte bestätigen die bisher in **4.2.1** & **4.2.2** getätigten Aussagen und liefern eine abrundende Plausibilitätsbetrachtung des Monitoring-basierten Dynamischen Gewichtserfassungssystems (**Tabelle 4**) mit Hilfe der im Eurocode enthaltenen „Standard“-Lastkraftwagen bzw. anhand der seitens des Landes Tirol publizierten Daten zur Beladung der Schwerfahrzeuge.

4.3 Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand externer Untersuchungen an der gleichen bzw. sehr ähnlicher Schwerverkehrs-Einwirkung

Auch in diesem Abschnitt werden die neuartig generierten Schwerverkehrsdaten zu in diesem Zusammenhang relevanten, thematisch ähnlichen Studien referenziert:

- A13 Brenner-Autobahn: Wiegeeinrichtung der Polizei am Standort Brennersee 1998 [52]
- A12-Inntalautobahn: Bridge-Weigh-In-Motion Untersuchungen Dr. Petschacher 2008 [49]
- BAB A61 Deutschland – Dynamische Untersuchungen der BAST 2004/2005 [50]

Hinsichtlich jeweiliger Detailbetrachtungen wird auf die angeführten Quellen verwiesen. An dieser Stelle wird lediglich auf die im Dissertations-Kontext relevanten Erkenntnisse der jeweiligen Untersuchungen Bezug genommen. Aufgrund individueller Besonderheiten und Herangehensweisen (auch von messtechnischer Seite) bzw. aufgrund des unterschiedlich verfügbaren Detaillierungsgrades der Ergebnisse bei diesen Parallelstudien sei allerdings darauf hingewiesen, dass nicht immer unmittelbar vollkommen äquivalente Parameter miteinander verglichen werden können. In diesem Zusammenhang wird vorneweg auf folgende, mitunter unterschiedlich gegebene Rahmenbedingungen hingewiesen:

- Schwerverkehr verteilt über die gesamte Fahrbahnbreite (**Kap. 4.3.1**)
- Beschränkung auf eine dem Schwerverkehr zugewiesene, einzelne Fahrspur (**Kap. 4.1**).
- eine Schwerfahrzeug-Kategorie (z.B. der „Sattelschlepper“) als dominanter Repräsentant des gesamten, auftretenden LKW-Aufkommens (siehe **Kap. 4.3.2** bzw. **Kap. 4.3.3**).

Der Autor hat sich bei der nachfolgenden Gegenüberstellung um größtmögliche Konsistenz bemüht sowie um eine entsprechende Erörterung der wesentlichen, gegebenenfalls zu beachtenden Unterschiede.

Ausgangspunkt sind die bereits bekannten Ergebnisse aus **Bild 51** und **Tabelle 4**.

Fokussiert wird dabei jeweils auf:

- die prinzipielle Verteilung auf die einzelnen Gewichtskategorien
- das durchschnittliche LKW-Gewicht
- den Anteil der hoch ausgelasteten Schwerfahrzeuge (> 38t)
- gegebenenfalls den Anteil der überladenen LKWs

Durch dieses Vorgehen wird hinsichtlich einer gesicherten Betrachtung der tatsächlich überladenen Fahrzeuge (>44t) auch der Tatsache entgegengewirkt, dass das obere Limit der Gewichtsbetrachtungen infolge DYGES-Eichfahrzeug schon bei 42,8 t liegt.

4.3.1 A13 Brenner-Autobahn: Wiegeeinrichtung der Polizei am Standort Brennersee 1998

Im Rahmen der Evaluierung der eigenen Schwerverkehrsdaten ist der Autor auf einen Bericht vom Büro Baumann & Obholzer [52] gestoßen, der sich im Rahmen externer, statischer Nachrechnungen an der Gschnitztalbrücke (ein südlich der Europabrücke gelegenes Tragwerk der A13 Brenner-Autobahn) ebenfalls auf reale Schwerverkehrsdaten bezieht – nämlich auf die Wiegeeinrichtung Brennersee.

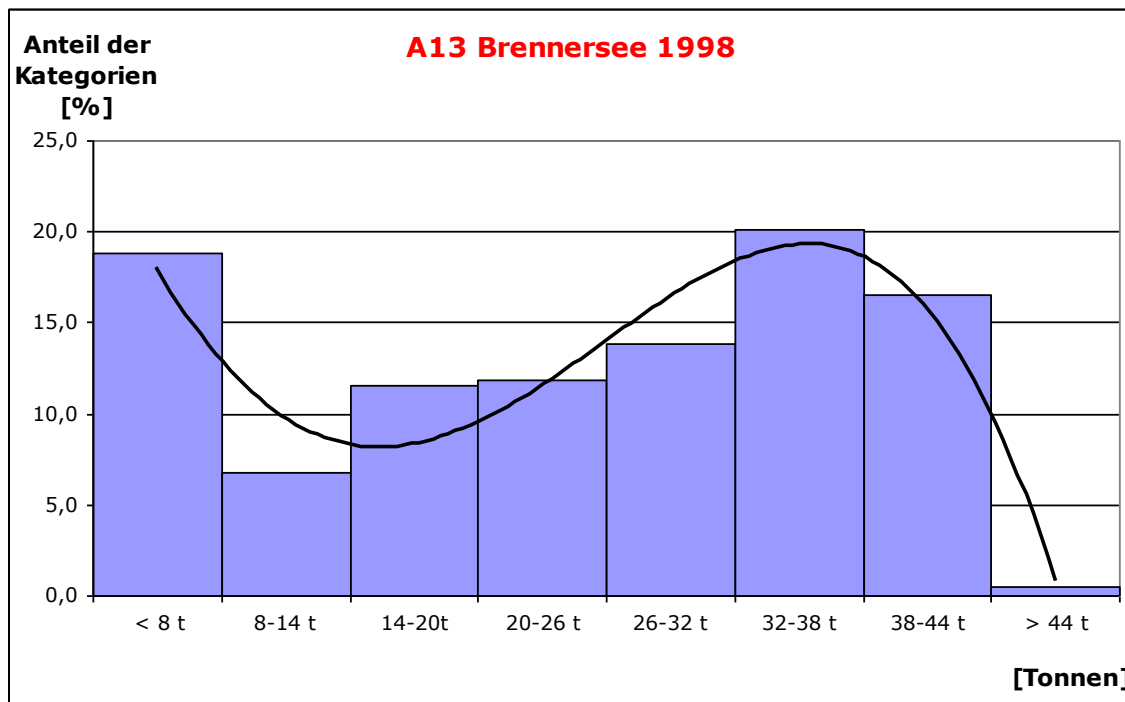


Bild 53: Dokumentierte, 1-parametrische Häufigkeitsverteilung der auftretenden Schwerverfahrzeug-Gewichte (im Jahr 1998) an der Wiegeeinrichtung Brennersee

	< 8 t	8-14 t	14-20t	20-26 t	26-32 t	32-38 t	38-44 t	> 42,8 t
Ratio %	18,8	6,8	11,6	11,9	13,8	20,1	16,5	0,5
=> gemessene, durchschnittliche LKW Einheit					24,9			

Tabelle 8: Dokumentierte, 1-parametrische Häufigkeitsverteilung der auftretenden Schwerverfahrzeug-Gewichte (im Jahr 1998) an der Wiegeeinrichtung A13 Brennersee

Eine konkrete Anfrage bei der ASFINAG Maut Service GmbH zur Wiegeeinrichtung Brennersee (Standort, Funktionsweise, Datengrundlage, wie verbindlich diese benutzt wird) im Hinblick auf die vorhandenen Unterschiede zur DYGES-Swerververkehrscharakteristik hat folgende Erkenntnisse gebracht:

Die Wiegeeinrichtung am Brennersee wird von der Polizei betrieben. Diese wird benutzt, um überladene LKW zu erkennen, wobei die entstehenden Daten nicht konsequent - d.h. im Sinne einer Langzeitreihe – gespeichert werden. Im Einsatzfall wird der Verkehr solange auf diese

Waage umgeleitet, solange es keinen Rückstau gibt. Bei Rückstau fahren dann natürlich nicht mehr alle LKW über diese Waage. Eine erste mögliche Ursache für Abweichungen kann daher schon allein dadurch bedingt sein, dass diese Waage tendenziell von den „größeren“ LKWs zu befahren ist und daher in den Daten nicht zwingender Weise alle Schwerfahrzeuge erfasst sein müssen.

Auch wenn die Angaben in diesem aus dem Jahr 2006 stammenden Bericht [52] sich auf das Auswertungsjahr 1998 beziehen, so stellt die seinerzeitige, dadurch repräsentierte Schwerverkehrs-Charakteristik des Durchzugs-Transitverkehrs auf der A13 prinzipiell eine aufschlussreiche Vergleichsgrundlage dar.

- Die Wiegeeinrichtung Brennersee zeigt für das Jahr 1998 innerhalb der Tonnagen-Klassen einen Anteil von etwas mehr als **25 % an Leer-LKWs** sowie **17% an Schwerfahrzeugen >38t**. Dazwischen gibt es für die übrigen Tonnagen-Klassen eine gleichmäßig ansteigende Verteilung von den teilbeladenen bis zu den voll ausgelasteten LKWs.
- Es wird lediglich ein Anteil von **0,5 % als überladen** ausgewiesen.
- Der durchschnittliche LKW wiegt infolge dieser Charakteristik zum damaligen Zeitpunkt 24,9 t.

Ein unmittelbarer Vergleich der maßgeblichen Quellen (**Bild 51** mit **Bild 53** bzw. **Tabelle 4** mit **Tabelle 8**), die letztlich in **Bild 58** zusammengeführt werden, führt daher zu folgenden Kommentaren:

- Betrachtet man die Verteilung der Fahrzeuggesamtgewichte auf der A13 im Zeitraum 1998-2007, so ist ein eindeutiger Trend zu höheren Gewichten sichtbar. Während der Anteil der LEER-LKWs in etwa gleich bleibt, zeigt die Analyse der Fahrzeugkollektive an sich eine starke Konzentration von Sattelzügen und damit eine Bestätigung der Tendenz zu größeren Transporteinheiten und einer besseren Transportlogistik. Diese Tatsache wird insbesondere auch durch aktuelle Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) bestätigt [50]. In weiterer Folge wird auch auf diese Studie der BAST in gleichem Maße eingegangen werden (**Abschnitt 4.3.3**).
- Der Anteil der Schwerfahrzeuge > 38t gegenüber 1998 hat sich bis 2007 mehr als verdoppelt (von 17% auf 42,6%).
- Die durchschnittliche Lkw-Belastung ist im gleichen Zeitraum um 20% angestiegen (von 24,9t auf 29,9 t).

4.3.2 A12-Inntalautobahn: Bridge-Weigh-in-Motion Untersuchungen Dr. Petschacher 2008

Der nachfolgende Vergleich bezieht sich auf eine von mehreren - vom Büro PEC (Petschacher Consulting ZT-GmbH) im hochrangigen Österreichischen Straßennetz durchgeführten - so genannten Bridge-Weigh-In-Motion Messungen, nämlich auf der A12 Inntalautobahn. Bei dieser Art der Messungen werden Geschwindigkeit, Gesamtgewicht, Achslast, -abstand oder -anzahl der die Instrumentierung überfahrenden Schwerfahrzeuge erfasst. Ergänzend zu herkömmlichen Weigh-in-Motion (WIM) Messungen wird eine Brücke von notwendiger Weise kurzer Spannweite als Wiegeplattform benutzt, wodurch Belastungen während der gesamten Überfahrt gemessen werden, während bei WIM-Systemen die Messung einer Achse nur einige Millisekunden dauert. Näheres zum Messprinzip siehe [49].

Diese Referenz erschien insofern von großer Bedeutung, als davon auszugehen ist, dass der Verkehr der A12 Inntalautobahn sehr gut mit jenem der A13 Brennerautobahn verglichen werden kann. Beide Autobahnen knüpfen unmittelbar aneinander an und sind Teil der Nord-Süd Transitroute für den LKW-Verkehr über die Alpen. Insbesondere für die sog. Weistrecken kann von weitgehend unveränderlichem Transitverkehr ohne wesentliche Zu- oder Abflüsse entlang des gemeinsamen Autobahnkorridors A12-A13 ausgegangen werden.

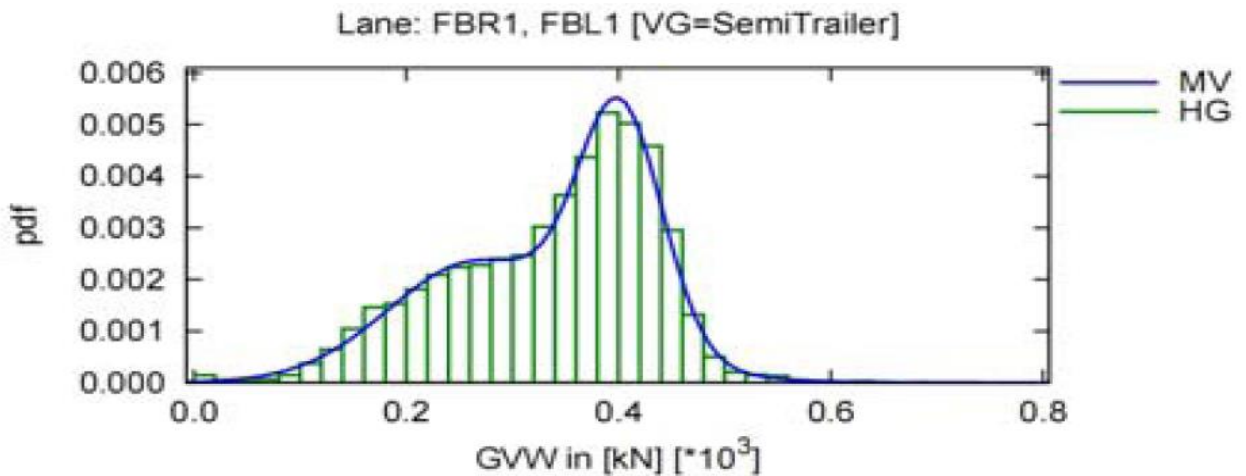


Bild 54: Für das Jahr 2008 vorliegende, 1-parametrische Häufigkeitsverteilung der auftretenden Schwerfahrzeug-Gewichte am BWIM Messquerschnitt der A12 Inntalautobahn für die Fahrzeuggruppe VG 4 (sog. Auflieger) [49]

	< 20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-44 t	> 44 t
	20	23	28	33	37	40	44
Ratio %	11,0	10,0	12,0	15,0	13,0	30,0	11,0
=> gemessene, durchschnittliche LKW Einheit	34,8						

Tabelle 9: Für das Jahr 2008 vorliegende, 1-parametrische Häufigkeitsverteilung der auftretenden Schwerfahrzeug-Gewichte am BWIM Messquerschnitt der A12 Inntalautobahn für die Fahrzeuggruppe VG 4 (sog. Auflieger) [49]

Zur Vergleichs-Datenbasis gegenüber der DYGES-Zeitreihe ist zu sagen, dass auf einen gemessenen Zeitabschnitt 03. – 14.11.2008 zurückgegriffen wird. Der Messzeitraum selbst ist also durch eine relative Kürze und die damit unter Umständen einhergehende, sehr spezifische Verkehrseinwirkung gekennzeichnet.

Nach eingehendem Studium der vorliegenden Informationen [49] und reiflicher Überlegung hat sich der Autor entschlossen, die Fahrzeuggruppe VG 4 (d.h. die Summe über alle Sattelaufleger) als Vergleichsbasis heranzuziehen. Dadurch werden unmittelbar 48,1 % aller im Rahmen dieser Untersuchung erfassten Schwerfahrzeuge abgedeckt. Weitere 32,7 % kämen von der Fahrzeuggruppe VG 3 - LKW mit Anhänger, d.h. ebenso KAT 4+ LKWs mit tendenziell ähnlicher Charakteristik bezüglich Gesamt-Gewichtsaufkommen. Danach folgen 8,55% KAT3 LKWs und 10,7% KAT 2 LKWs (siehe auch **Bild 55**).

Es wird also bewusst nicht mit einer resultierenden Gewichtsverteilung aller an der A12 erfassten Schwerfahrzeuge verglichen, da diese im Gegensatz zum DYGES-Messquerschnitts (unter der äußersten Fahrspur RFB Innsbruck) den gesamten Schwerverkehr von 4 Fahrspuren repräsentieren würde, während für die Fahrzeuggruppe VG 4 ein Auftreten auf der äußersten Fahrspur weitgehend gesichert erscheint und zusätzlich auch noch Schlüsse auf die Fahrzeuggruppe VG 3 gezogen werden können.










VG	2Achser	3Achser	Anhänger	Auflieger
P_{VG}	0.107	0.0855	0.327	0.481
		  	   	

Bild 55: Klassierung der während der BWIM-Messung (November 2008) auf der A12 Inntalautobahn auftretenden Schwerfahrzeug-Klassen und –Gruppen [49]

Auch wenn die Angaben in diesem aus dem Jahr 2010 stammenden Bericht [49] sich auf einen Messzeitraum von zwei ausgewählten Wochen im November 2008 beziehen, so stellt die dadurch repräsentierte Schwerverkehrs-Charakteristik des Durchzugs-Transitverkehrs auf der A12 prinzipiell eine aufschlussreiche Vergleichsgrundlage dar:

- Das Bridge-Weigh-in-Motion Messsystem zeigt - für die herausgelöste Fahrzeuggruppe der Sattelaufleger (VG 4) - innerhalb der Tonnagenklassen einen Anteil von weniger als **11 % an Leer-LKWs** sowie **41% an Schwerfahrzeugen > 38t (Tabelle 9)**. Neuerlich gibt es für die übrigen Tonnagen-Klassen eine ansteigende Verteilung von den teilbeladenen zu den voll ausgelasteten bzw. überladenen LKWs (**Bild 54**).
- Eine gesicherte Angabe zum **Anteil der überladenen Schwerfahrzeuge** ließ sich lediglich für die Gesamtfahrbahn herausfinden und zeigt eine Größenordnung von **15,0 % [49]**. Diese Größenordnung wird neuerlich durch die bereits erwähnten, aktuellen Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast) bestätigt (siehe [50] bzw. **4.3.3**).
- Das durchschnittliche LKW-Gewicht liegt für die herangezogene Fahrzeuggruppe VG 4 infolge der vorherrschenden Charakteristik bei 34,8 t (**Tabelle 9**).

Ein unmittelbarer Vergleich der maßgeblichen Quellen (**Bild 51** mit **Bild 54** bzw. **Tabelle 4** mit **Tabelle 9**), die letztlich in **Bild 58** zusammengeführt werden, führt daher zu folgenden Kommentaren:

- Der Anteil der Schwerfahrzeuge > 38t von 41% für die Fahrzeuggruppe VG4 auf der A12 gegenüber 42,6 % am DYGES-Messquerschnitt zeigt eine hohe Übereinstimmung.
- Im vorliegenden – sich ausschließlich auf die Tonnagen-intensive Fahrzeuggruppe VG 4 stützenden - Vergleich ist der Anteil der leichten Fahrzeuge natürlich deutlich geringer (Fehlen der übrigen Fahrzeuggruppen bzw. tendenziell geringerer Anteil an Leerfahrten bei dieser Fahrzeuggruppe). Aufgrund der Tatsache, dass dennoch 80,8 % des Schwerverkehrs direkt oder indirekt berücksichtigt wurden, werden die verbleibenden Unterschiede im zu vergleichenden Datenmaterial zumindest hinreichend relativiert.
- Beim Vergleich der durchschnittlichen Lkw-Belastung ist zu beachten, dass der DYGES-Messquerschnitt auf der äußersten Fahrspur natürlich alle Fahrzeuggruppen reflektiert (29,9 t), im Gegensatz zum BWIM-basierten Durchschnittsgewicht von 34,8t, das nicht nur beide Fahrtrichtungen aber vor allem ausschließlich die Fahrzeuggruppe VG4 widerspiegelt.

4.3.3 BAB A61 Deutschland – Dynamische Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) 2004/2005

Der abschließende Vergleich greift auf Analysen von Einzelfahrzeugdaten zurück, welche von der Deutschen Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) in den Jahren 2004/05 anhand einer permanenten Messstelle auf der BAB A61 durchgeführt wurden. Der Messungs-Standort wurde aufgrund eines als – in Häufigkeit und Intensität – extrem bezeichneten LKW-Verkehrs ausgewählt. Auf dem Spannbeton-Durchlaufträger-Tragsystem wurde in der Mitte eines ausgewählten Brückenfeldes ein Messquerschnitt mit drei induktiven Wegaufnehmern im Inneren des Hohlkastens und zwei Dehnmessstreifen am Spannstahl in der Bodenplatte instrumentiert. Anhand der gemessenen globalen und lokalen Verformungen und Dehnungen wurden mit Hilfe eines genetischen Optimierungsalgorithmus ausgewählte Kennwerte des LKW-Lastkollektives (Gesamtgewicht, Achslasten, Fahrzeugsilhouette) aus dem fließenden Verkehr extrahiert (weitere methodische Details siehe [50]).

Da für den betrachteten Autobahnabschnitt Referenzwerte für die Jahre 1984 bzw. 1998 vorliegen, galt es bei einem aktuell vorherrschenden Schwerverkehrsanteil von 20% die im historischen Vergleich zunehmend stärkere LKW-Auslastung bzw. die in nicht unerheblichem Maß überladenen Fahrzeuge durch Messungen zu charakterisieren. Im Rahmen dieser Gegenüberstellung steht ein fast 1-jähriger Beobachtungszeitraum an kontinuierlicher Bauwerksreaktion (2004/2005) zur Verfügung.

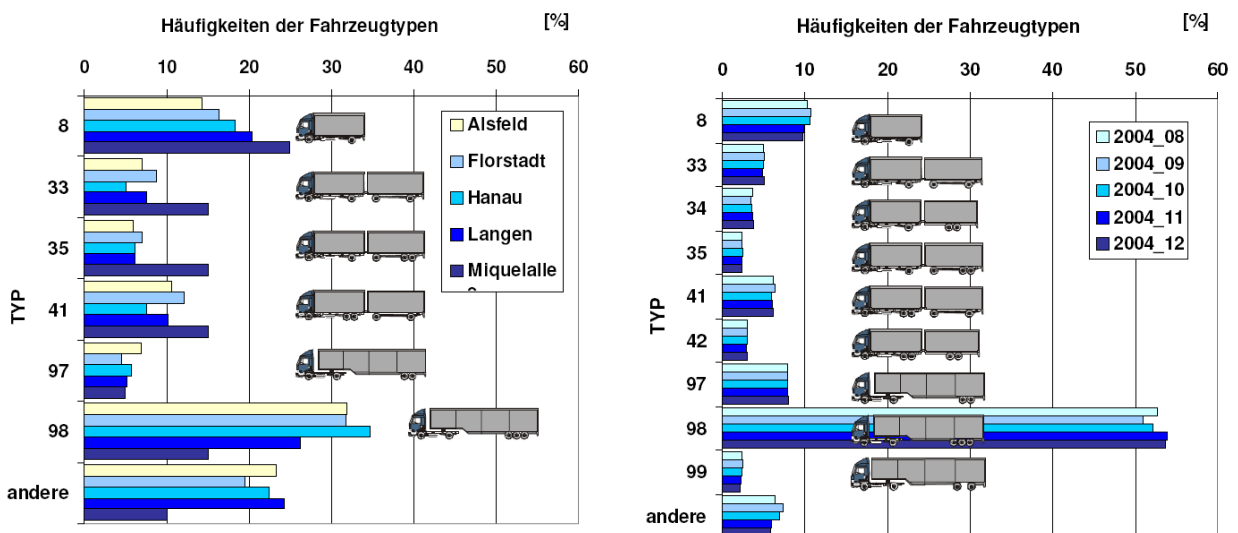


Bild 56: Fahrzeughäufigkeiten verschiedener Messstellen in Hessen **1998 (links)** vs. Fahrzeughäufigkeiten BAB A61, **2004 (rechts)** [50]

Eine Gegenüberstellung der Zusammensetzung des Schwerververkehrs zwischen 1998 und 2004 (**Bild 56**) zeigt neuerlich eine deutliche Abnahme der zweiachsigen LKWs bei gleichzeitig starker

Konzentration hin zu Sattelzügen bzw. zu größeren Transporteinheiten. Ein Trend, der die Schlüsse der Betrachtungen auf der A13 Brennerautobahn (**Kapitel 4.3.1**) vollständig bestätigt. Die Brothtalbrücke bildet typischen LKW-Fernverkehr ab, was durch die hohen Anteile des LKW-Typ 8 und insbesondere des Sattelzuges (Typ 98) deutlich wird (**Bild 56**). Dabei zeigt sich eine starke Konzentration zum 5-achsigen Sattelzug, dessen Anteil bereits deutlich über 50% beträgt. Im Rahmen des Messstellen- und Messverfahrenübergreifenden Vergleichs (mit DYGES) wird wegen der dominierenden Rolle des Typs 98 für die Gruppe der genehmigungsfreien LKW von einer weiteren Differenzierung des Fahrzeugkollektivs abgesehen. Damit wird neuerlich und konsistent zum vorhergehenden Abschnitt (**4.3.2 – A12 Inntalautobahn**) vorgegangen, wobei dem Autor auch nur für diesen Fahrzeugtyp gesicherte und detailliert aufgegliederte Daten zu den zugehörigen, gemessenen Gesamtgewichten vorliegen (**Bild 57**).

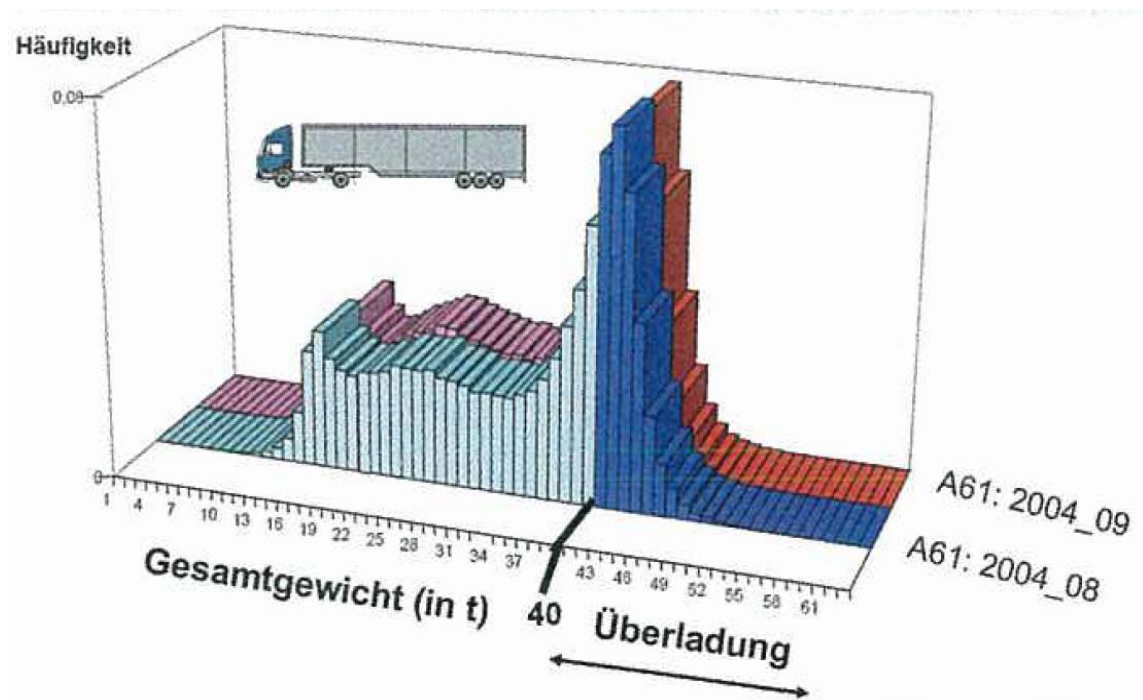


Bild 57: Häufigkeitsverteilung des Gesamtgewichts des Sattelzuges Typ 98 am Messquerschnitt der BAB A 61 (2004/2005) [51]

	10-15t	16-20t	21-25t	26-30t	31-35t	36-38t	39-44 t	45 - 49	50 t plus
	13	18	23	28	33	37	42	47	50
Ratio %	7,1	10,6	11,7	10,9	11,0	11,4	34,8	2,4	0,2
=> gemessene, durchschnittliche LKW Einheit	32,3								

Tabelle 10: Häufigkeitsverteilung des Gesamtgewichts des Sattelzuges Typ 98 am Messquerschnitt der BAB A 61 (2004/2005)

- Im Rahmen der Tonnagen-Klassifizierung zeigt sich am dynamischen Brückenmesssystem Brothtalbrücke - für die herausgelöste Fahrzeuggruppe des 5-achsigen Sattelzuges (Typ 98) - ein Anteil von **ca. 7 % an Leer-LKWs** (bzw. rund 20% an gering ausgelasteten LKWs) sowie von **37,4 % an Schwerfahrzeugen > 38t**. Die Charakteristik zur Verteilung auf die Gewichtsklassen erinnert sehr an die vorliegende Vergleichsgrundlage des DYGES Messquerschnittes (**Bild 57** vs. **Bild 52**). Es zeigt sich eine lokale Konzentration im niederen Tonnagen-Bereich, danach eine gleichmäßige Verteilung der verbleibenden LKWs auf die weiteren, ansteigenden Tonnagen-Klassen mit einem scharfen Anstieg zu den voll ausgelasteten bzw. überladenen Schwerfahrzeugen.
- Der **Anteil der überladenen Schwerfahrzeuge** wird in der zugrunde liegenden Publikation [**50**] für die Gesamtfahrbahn mit ca. **20,0 % angegeben**. Diese Größenordnung deckt sich wiederum mit den bereits bisher angeführten, Parallel-Untersuchungen (siehe **4.3.2**).
- Der durchschnittliche LKW wiegt infolge der vorherrschenden bzw. verwendeten Charakteristik 32,3 t (**Tabelle 10**).

Ein unmittelbarer Vergleich der maßgeblichen Quellen (**Bild 52** mit **Bild 57** bzw. **Tabelle 4** mit **Tabelle 10**), die letztlich in **Bild 58** zusammengeführt werden, führt daher zu folgenden Kommentaren:

- Im vorliegenden – sich auf die Fahrzeuggruppe Typ 98 stützenden - Vergleich fehlen natürlich die übrigen Fahrzeuggruppen und dadurch ein noch stärkerer Anteil an Leerfahrten in den Messereignissen. Die verbleibenden Unterschiede im zu vergleichenden Datenmaterial wurden bereits im Zuge eines gleichartigen Vergleiches (Beschränkung auf eine dem Schwerverkehr zugewiesene, einzelne Fahrspur vs. eine dominante Schwerfahrzeug-Gruppe über die gesamte Fahrbahnbreite) im **Abschnitt 4.3.2** plausibel erörtert.
- Der Anteil der Schwerfahrzeuge > 38t von 37,4 % für die Fahrzeuggruppe TYP 98 auf der BAB A 61 gegenüber 42,6 % für den DYGES-Messquerschnitt zeigt eine gute Übereinstimmung.
- Beim Vergleich der durchschnittlichen Lkw-Belastung ist zu beachten, dass der DYGES-Messquerschnitt alle Fahrzeuggruppen – jedoch auf der äußersten Fahrspur - reflektiert (29,9 t), im Gegensatz zum BAST-basierten Durchschnittsgewicht von 32,3 t, das nicht nur die gesamte Fahrbahn aber vor allem ausschließlich die Fahrzeuggruppe der 5-achsigen Sattelzüge widerspiegelt.

4.3.4 Gesamtbetrachtung

In **Bild 58** erfolgt nun eine Zusammenführung der dem Kapitel zugrunde liegenden Charakteristika von jeweils vor Ort entnommenem und analysiertem, realem Schwerverkehr. Auf die zu berücksichtigenden Unterschiede bei der Evaluierung der verglichenen, individuellen Datengrundlagen wurde bereits einführend zum **Abschnitt 4.3** eingegangen.

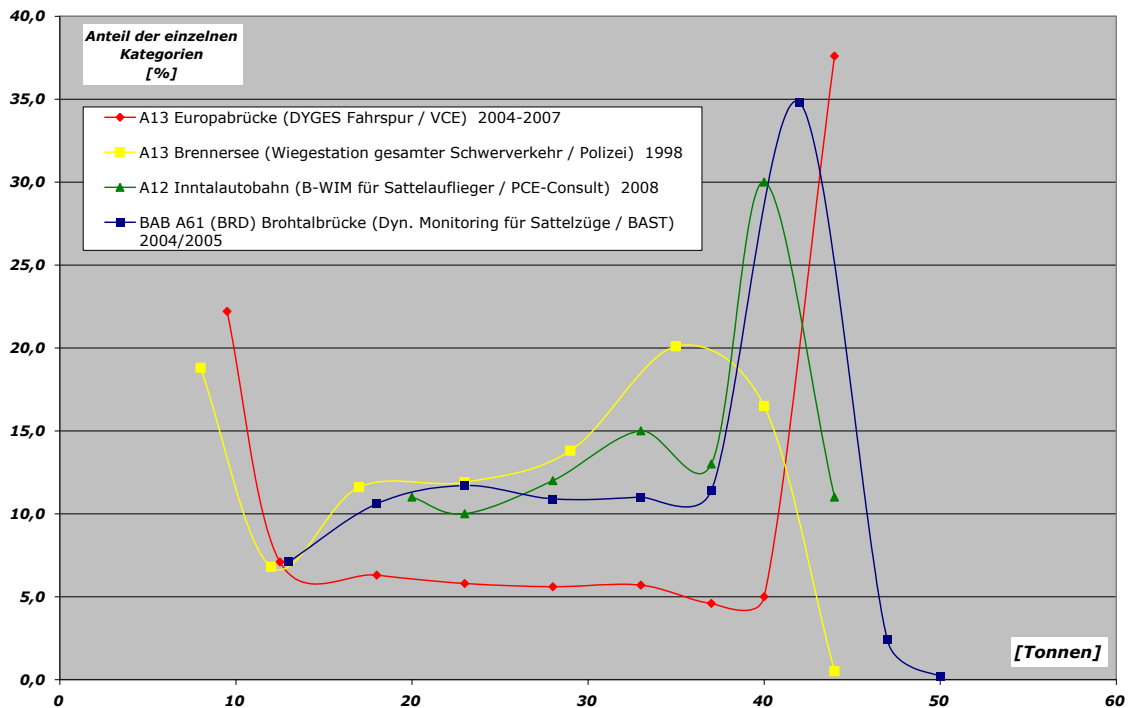


Bild 58: Überlagerung aller diskutierten, 1-parametrischen Häufigkeitsverteilungen der auftretenden Schwerverfahrzeug-Gewichte

Abschließend sei hervorgehoben, dass es sich im vorliegenden Fall um keinerlei Abwägen der Vorzüge einer dieser Methoden gegenüber der jeweils anderen handelt. Vordergründig geht es vielmehr um eine Untermauerung der prinzipiellen Richtigkeit der qualitativen und quantitativen Ergebnisse, welche sich nach konsequenter Ausarbeitung des vom Autor entwickelten DYGES-Verfahrens zur neuartigen Abbildung des realen Schwerverkehrs ergeben. Dies erscheint umso bemerkenswerter, als vier vollkommen unterschiedliche, messtechnisch basierte Ansätze (gängige Lösungen einerseits und maßgeschneiderte Lösungen andererseits) zur Analyse von Schwerverkehr von gleicher/ähnlicher Charakteristik bewertet werden. Auf die Gemeinsamkeit bei den Anteilen der hoch ausgelasteten Schwerverfahrzeuge sowie auf den Trend zur Verlagerung der Anteile in höhere Gewichtsklassen im historischen Vergleich wird abschließend nochmals im Besonderen hingewiesen.

4.4 Resümee

- Der DYGES-Algorithmus liefert zunächst eine lückenlose Klassifizierung des Schwerverkehrs hinsichtlich der auftretenden Tonnagen und Geschwindigkeiten, so dass beliebige, interessierende Zeiträume am permanenten Monitoring-System Europabrücke abgefragt und ausgewertet werden können. Gleichzeitig gelingt es mit dem entwickelten DYGES-Verfahren erstmals, auf der Basis von Beschleunigungsdaten und mit Hilfe digitaler Messsignalverarbeitung Kragarm-Absolutverschiebungen sowohl qualitativ in ihrem Verlauf wie auch quantitativ in ihrem jeweiligen Ausmaß hinreichend genau zu reproduzieren.
- Durch den Standort der Beschleunigungs-Sensoren an den 7,3m langen Brücken-Kragarmen sind dem vorliegenden “pattern recognition” (Muster-Erkennung) basierten Prozess insofern Grenzen gesetzt, als die installierten Beschleunigungssensoren eine gewisse Mindest-Anregungs-Intensität benötigen, bevor sie innerhalb ihres charakteristischen Messbereiches die Überfahrts-Ereignisse eindeutig und verlässlich erfassen können. Darin ist letztlich auch die Tatsache begründet, dass im Zuge von DYGES lediglich ganze Schwerverkehrs-Einheiten registriert werden und keine Achslasten. Da aber von Anfang an der Anspruch bestand, den gängigen Methoden - wie zum Beispiel “Weigh-in-Motion”- Systemen [49] – ein neuartiges Verfahren zur Erfassung und Charakterisierung des Schwerverkehrs gegenüberzustellen, bedeutet dies keinen Widerspruch zur unmittelbaren Anwendbarkeit der Ergebnisse im Rahmen von statisch-konstruktiven Brückennachrechnungen. Bei der weiterführenden Erstellung eines Lastmodells aus der vorliegenden Belastungscharakteristik (siehe **Kapitel 16** & **Kapitel 17**) wurde insbesondere auf eine für rechnerische Bedarfsfälle gleichwertige und daher praxisrelevante Einsatzfähigkeit Wert gelegt.
- Die hervorragende Übereinstimmung zwischen den Mautportal-basierten Daten der ASFINAG und jenen des permanenten Monitoring-Systems (DYGES) bei gleichzeitiger, maßgeblicher Erweiterung der bisher vorliegenden Schwerverkehrs-Charakteristik der ASFINAG Maut Service GmbH wurde im Jahre 2006 vom BMVIT mit einer Nominierung für den Österreichischen Staatspreis für Verkehrstelematik ausgezeichnet.
- Nach einer umfassenden baumechanischen Analyse der Dynamischen Gewichtserfassung DYGES (**Kapitel 5**) und in Hinblick auf die Erstellung des angestrebten, neuartigen Lastmodells für den vorliegenden Autobahnabschnitt (**Kapitel 16** & **17**) wurden die vorliegenden Ergebnisse des permanenten Monitoring-Systems mit umfassenden, ergänzenden Messprogrammen bzw. mit Finite Elemente Vergleichsrechnungen gekoppelt (siehe **Kapitel 6** bzw. **Kapitel 13, 14** & **15**).

5 MECHANISCHE MODELLIERUNG & ANALYTISCHE PLAUSIBILISIERUNG DES DYNAMISCHEN GEWICHTSERFASSUNGSSYSTEMS DYGES

Das vorliegende Kapitel dient dazu, die im **Kapitel 3** auf weitgehend experimenteller Basis ausgearbeitete Dynamische Gewichtserfassung nun streng analytisch nachzubilden. Anhand einer mechanischen Modellierung der bisher faktisch ausschließlich aus Feldversuchen abgeleiteten Zusammenhänge sollen zunächst die Eichkurven des DYGES-Prozesses (**Bild 24 & Bild 31**) plausibilisiert werden. In weiterer Folge gilt es insbesondere auch komplementäre Information in Form von analytischen Erklärungen für die bisher im **Kapitel 3** geschaffenen Tatsachen bzw. die entsprechenden Interpretationen für ausgewählte, dort aufgetretene Phänomene nachzureichen.

5.1 Ziele

Vordergründig gliedern sich die nachfolgenden Ausführungen in folgende Etappen:

- Rechnerische Nachbildung der bisher direkt gemessenen Beziehung zwischen LKW-Überfahrtsgeschwindigkeit und Kragarm-Vertikalverformung (vgl. **Bild 22**).
- Rechnerische Nachbildung der bisher aus Messungen bzw. aus dem DYGES-Mustererkennungsalgorithmus stammenden Beziehung zwischen LKW-Überfahrtsgeschwindigkeit und Kragarm-Beschleunigung (vgl. **Bild 30**).
- Bestimmen/Ableiten der möglichen Modell-Unsicherheiten, die mit dem aus der permanenten Messung ausgewerteten LKW-Belastungskollektiv einhergehen könnten.

5.2 Theorie

Die vertiefende analytische Betrachtung der Schwingungsantwort eines kontinuierlichen Tragsystems infolge fahrender Last erfolgt am Beispiel des Bernoulli-Euler Balkens unter Kraftanregung. In Hinblick auf die weiteren Studien der Systemantwort bzw. der Parameteridentifikation erfolgt zur Vereinfachung ein Wechsel von einem dreiseitig nachgiebig eingespannten und einseitig freien, orthotropen Plattensegment (Brückenkrugarm) zu einem 1-feldrigen Biegebalken-Ersatzsystem (**Bild 59**).

Die dafür nachfolgend aufbereiteten, theoretischen Grundlagen sind im Wesentlichen aus [48] sowie [47] entnommen und für den vorliegenden Zweck zusammengefasst bzw. aufbereitet worden:

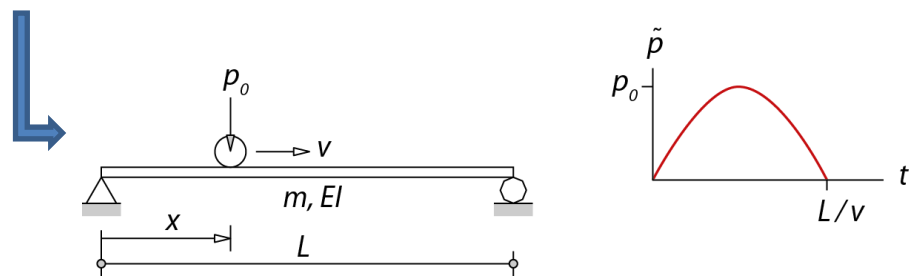
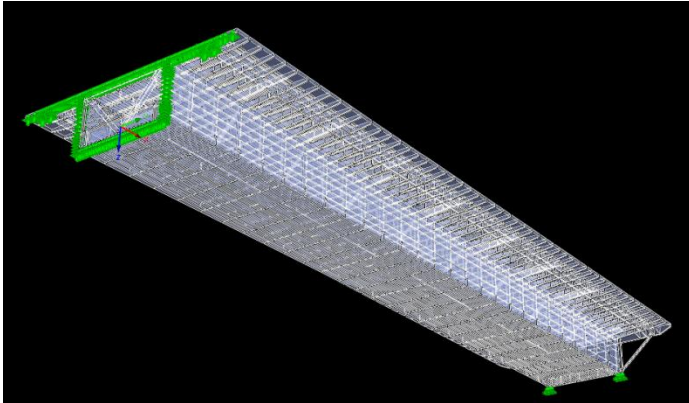


Bild 59: Überführung des instrumentierten, realen Tragsystems (oben) in das modellierte, analysierte Tragsystem (unten)

Ausgangslage zur Ermittlung der **vertikalen Verformung $u(x,t)$ ist ein schubstarrer Balken** mit Biegesteifigkeit $EI(x)$ und Massenbelegung $m(x)$ pro Längeneinheit. Die **erzwungene Schwingung** infolge externen Kraft $p(x,t)$ an einem ungedämpften System wird durch folgende partielle Differentialgleichung (5) beschrieben:

$$m(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] = p(x, t) \quad (5)$$

Zur eindeutigen Lösung dieser Differentialgleichung sind mehrere Schritte erforderlich:

Unter Verwendung des so genannten Produktansatzes für die Verformung im linken Teil der Gleichung (5), d.h. für die freie Schwingung,

$$u(x, t) = \phi(x)q(t) \quad (6)$$

ergeben sich für die obigen Terme

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \phi(x)\ddot{q}(t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \varphi''(x)q(t) \quad (8)$$

und in weiterer Folge

$$m(x)\varphi(x)\ddot{q}(t) + q(t)[EI(x)\varphi''(x)]'' = 0 \quad (9)$$

Nach entsprechender Umformung der Gleichung (9) kann eine Überführung der ursprünglich partiellen Differentialgleichung (5) in zwei einfache Differentialgleichungen vorgenommen werden, die nun einerseits dem zeitlichen Verlauf $q(t)$ und andererseits dem räumlichen Verlauf $\varphi(x)$ Rechnung tragen (Details siehe [47]).

$$\ddot{q} + \omega^2 q = 0 \quad (10)$$

$$[EI(x)\varphi''(x)]'' - \omega^2 m(x)\varphi(x) = 0 \quad (11)$$

Die erste der beiden gemeinsam angeführten Gleichungen (10) & (11) hat die gleiche Form wie die Gleichung der freien Schwingung des Ein-Massenschwingers mit der Eigenfrequenz ω . Deren Lösung erfolgt unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen $u(x, 0)$ und $\dot{u}(x, 0)$ zum Zeitpunkt $t = 0$. Die zweite der beiden gemeinsam angeführten Gleichungen (10) & (11) definiert gemeinsam mit den Randbedingungen des Biegebalkens das sog. Eigenwertproblem. Dieses wird von einer unendlichen Anzahl an Frequenzen ω und deren Eigenformen $\varphi(x)$ erfüllt.

Unter Vorwegnahme des Lösungsweges für dieses Randwertproblem gemäß [48] – d.h. im Wesentlichen unter Anpassung an die Randbedingungen der beiden Balkenenden - ergeben sich für den beidseitig gelenkig gelagerten, einfeldrigen Biegebalken mit konstanter Massen- und Steifigkeitsbelegung die Eigenfrequenzen bekanntlich mit

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (12)$$

sowie die zugehörigen Eigenmodes mit $\varphi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L}$ (13)

In weiterer Folge wird zur Gleichung (5) zurückgekehrt, welche für eine gegebene, äußere Kraft $p(x, t)$ zu lösen ist. Auf Grundlage der Orthogonalität der Eigenmodes bei Systemen mit verteilter Massen- und Steifigkeitsbelegung (für den Mode r)

$$[EI(x)\phi_r''(x)]'' = \omega_r^2 m(x)\phi_r(x) \quad (14)$$

sowie unter der Annahme, dass das Eigenwertproblem aus Gleichung (11) entsprechend gelöst wurde, lässt sich die Verformung $u(x, t)$ als Linearkombination (Superposition) von individuell beitragenden Modes r in Form einer unendlichen Reihe anschreiben:

$$u(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x)q_r(t) \quad (15)$$

Dadurch lässt sich die eingangs angeführte, partielle Differentialgleichung (5) in eine unendliche Anzahl an entkoppelten, einfachen Differentialgleichungen (eine pro Mode) mit der Unbekannten $q_n(t)$ (= der sog. modalen Koordinate) überführen.

Unter Berücksichtigung der orthogonalen Eigenschaften der Modes kann die Bewegungsgleichung mit Hilfe der generalisierten Masse M_n , der generalisierten Steifigkeit K_n sowie der generalisierten Einwirkung P_n bekanntlich in der folgenden Art und Weise umgeschrieben werden:

$$M_n \ddot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P_n(t) \quad (16)$$

$$M_n = \int_0^L m(x)[\phi_n(x)]^2 dx \quad (17)$$

$$K_n = \int_0^L \phi_n(x)[EI(x)\phi_n''(x)]'' dx \quad (18)$$

$$P_n(t) = \int_0^L p(x, t)\phi_n(x) dx \quad (19)$$

In weiterer Folge lässt sich die Verformung $u(x, t)$ bei gegebener äußerer Einwirkung $p(x, t)$ bestimmen, indem die modalen Gleichungen eines jeden Modes für $q_n(t)$ unabhängig von allen anderen Modes gelöst werden. Des Weiteren ist ersichtlich, dass jede modale Gleichung von der gleicher Form ist, wie die konventionelle Bewegungsgleichung des Einmassen-Schwingers. Somit sind die bekannten Lösungen für die Systemantwort des Einmassen-Schwingers infolge diverser dynamischer Lasten (harmonische Last, Impulseintrag,..) unmittelbar auf das

vorliegende Problem übertragbar. Sobald die Lösung für $q_n(t)$ ermittelt wurde, lässt sich der Beitrag des n-ten Modes zur Verformung $u(x, t)$ entsprechend anschreiben:

$$u_n(x, t) = \phi_n(x) q_n(t) \quad (20)$$

Die Gesamtverformung als Überlagerung der einzelnen modalen Beiträge ergibt sich zu

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) q_n(t) \quad (21)$$

Betrachtet wird nun der beidseitig gelenkig gelagerte Biegebalken mit der Länge L sowie einem einheitlichen Querschnitt und somit mit konstanter Massenbelegung m bzw. konstanter Biegesteifigkeit EI .

Dieser Biegeträger wird von einer Einzellast p_0 mit konstanter Geschwindigkeit v befahren. Unter Vernachlässigung der Dämpfung wird in weiterer Folge die Lösung zur Beschreibung der Durchbiegung über die Zeit hergeleitet:

Unter der Annahme, dass die Masse des Fahrzeugs klein gegenüber der Brückenfeldmasse ist, wird erstere in den weiteren Ausführungen vernachlässigt.

Um ω_n zu beziffern, wird in weiterer Folge unmittelbar auf die realen Größen des Feldversuches zurückgegriffen (siehe **Tabelle 12**). $\phi_n(x)$ wäre lt. zugrundeliegenden Modell zwar durch $\sin \frac{n\pi x}{L}$ vorgegeben, wird aber wiederum mit den numerischen Größen des Feldversuchs angesetzt (**Tabelle 12**) und wird in weiterer Folge iterativ präzisiert (siehe **Kapitel 5.4**).

Für die Lasteinwirkung p_0 gilt, dass sich bei konstanter Geschwindigkeit v eine Überfahrtdauer $t_d = L/v$ ergibt. Mathematisch wird die fahrende, konzentrierte Einzellast durch folgenden Ansatz ausgedrückt,

$$p(x, t) = \begin{cases} p_0 \delta(x - vt) & 0 \leq t \leq t_d \\ 0 & t \geq t_d \end{cases} \quad (22)$$

wobei $\delta(x - vt)$ die Dirac'sche Delta-Funktion bei $x = vt$ repräsentiert. Dadurch lässt sich die generalisierte Einwirkung P_n wie folgt anschreiben:

$$P_n(t) = \begin{cases} \int_0^L p_0 \delta(x - vt) \phi_n(x) dx & 0 \leq t \leq t_d \\ 0 & t \geq t_d \end{cases} \quad (23)$$

$$P_n(t) = \begin{cases} p_0 \phi_n(vt) dx & 0 \leq t \leq t_d \\ 0 & t \geq t_d \end{cases} \quad (24)$$

$$P_n(t) = \begin{cases} p_0 \sin(n\pi t/t_d) & 0 \leq t \leq t_d \\ 0 & t \geq t_d \end{cases} \quad (25)$$

Die generalisierte Einwirkung P_n wird für den n -ten Mode durch n Halb-Zyklen einer Sinus Funktion repräsentiert:

$$M_n \ddot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P_n(t) \quad (26)$$

Um die modalen Bewegungsgleichungen ((16) bzw. (26)) zu lösen, wird zunächst die Bewegungsgleichung für den Einmassen-Schwinger mit der gegebenen Anregung angeschrieben. Diese lautet

$$m\ddot{u} + k\dot{u} = \begin{cases} p_0 \sin(n\pi t/t_d) & t \leq t_d \\ 0 & t \geq t_d \end{cases} \quad (27)$$

Solange $t \leq t_d$, entspricht die äußere Kraft der bereits zuvor angeführten harmonischen Einwirkung $p(t) = p_0 \sin \omega t$ mit der Frequenz

$$\omega = \frac{n\pi}{t_d} = \frac{n\pi v}{L} \quad (28)$$

Die Lösung zur Beschreibung der Schwingungsantwort des harmonisch angeregten, ungedämpften Einmassenschwingers wird an dieser Stelle vorweggenommen und im Folgenden in der vollständigen Form angeschrieben (nähere Details siehe [48]):

$$u(t) = u(0)\cos\omega_n t + \left[\frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} - \frac{p_0}{k} \frac{\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right] \sin \omega_n t + \frac{p_0}{k} \frac{1}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \sin \omega t \quad (29)$$

Zu unterscheiden sind dabei im Wesentlichen 2 Komponenten. Die erste Komponente – durch die $\cos \omega_n t$ bzw. $\sin \omega_n t$ Terme gekennzeichnet - repräsentiert den Anteil der transienten Schwingung infolge Eigenschwingverhalten des betrachteten Systems und hängt von der Ausgangsverformung und von der Ausgangsgeschwindigkeit ab.

Die zweite Komponente – durch den $\sin \omega t$ Term gekennzeichnet - repräsentiert den Anteil der erzwungenen Schwingung infolge Anregungsfrequenz und ist unabhängig von den Ausgangsbedingungen.

Da mit den hier vorgenommenen Betrachtungen lediglich die analytische Vergleichsbasis für die maximale Auslenkung des Trägers unter fahrender Last geschaffen werden soll, die nachweislich auftritt, solange das Fahrzeug noch am Tragsystem verweilt, wird nachfolgend eine entsprechende Spezifizierung für $t \leq t_d$ vorgenommen. Dadurch kann die obige Gleichung nun unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen für Verformung $u(x,0) = 0$ und Geschwindigkeit $\dot{u}(x,0) = 0$ sowie infolge der quasistatischen Lösung $(u_{st})_0 \equiv p_0/k$ in einer entsprechend übersichtlicheren Form angeschrieben werden:

$$\frac{u_t}{(u_{st})_0} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \quad \text{für } t \leq t_d \quad (30)$$

Die Lösung der Bewegungsgleichung aus Gleichung (29) wird nun in weiterer Folge im Sinne der modalen Gleichungen adaptiert, indem die Notation von $u(t)$ in $q_n(t)$ geändert wird sowie mit t_d eine weitere Kenngrößen präzisiert wird:

$$t_d = \frac{L}{v} \quad (31)$$

Nachdem ω_n und ω bereits zuvor in den Gleichungen (12) und (28) festgelegt wurden, ergibt sich die interessierende Verschiebungsantwort zu

$$q_n(t) = (u_{st})_0 \frac{1}{\omega_n^2 - \left(\frac{n\pi v}{L}\right)^2} \left(\sin \frac{n\pi v t}{L} - \frac{n\pi v}{\omega_n L} \sin \omega_n t \right) \quad (32)$$

bzw.

$$q_n(t) = (u_{st})_0 \frac{1}{1 - \left(\frac{n\pi v}{L}/\omega_n\right)^2} \left(\sin \frac{n\pi v}{L} t - \frac{n\pi v}{\omega_n L} \sin \omega_n t \right) \quad t \leq L/v \quad (33)$$

Diese Lösung ist gültig, solange $\omega_n \neq n\pi v/L$ oder $T_n \neq 2L/nv$.

Die Gesamtantwort (Verformung) am untersuchten Balken ergibt sich durch ein Rückeinsetzen der modalen Beiträge in die Gleichung (21), wobei die unendliche Reihe durch n Reihenglieder - entsprechend dem Frequenzinhalt der Anregung - angenähert wird.

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) q_n(t) \quad (34)$$

Die Vertikalverschiebung in Feldmitte ($x = L/2$) liefert

$$u(L/2, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(L/2) q_n(t) \quad (35)$$

wobei

$$\phi_n\left(\frac{L}{2}\right) = \begin{cases} 0 & n = 2, 4, 6, \dots \\ 1 & n = 1, 5, 9, \dots \\ -1 & n = 3, 7, 11, \dots \end{cases} \quad (36)$$

Somit liefern jene Eigenmodes mit geradem Laufindex – für das vorliegende Tragsystem sind dies die antimetrischen – keinerlei Beiträge zur Durchbiegung des Trägers.

Doppeltes Differenzieren der hergeleiteten modalen Verschiebungs-Lösung (Gleichung (33)) in Hinblick auf eine zu den Verschiebungs-/Geschwindigkeitskurven äquivalente Analyse der Beschleunigungs-/Geschwindigkeitskurven liefert

$$\ddot{q}_n(t) = (u_{st})_0 \frac{1}{1 - \left(\frac{n\pi v}{L}/\omega_n\right)^2} \frac{n\pi v}{L} \left(\omega_n \sin \omega_n t - \frac{n\pi v}{L} \sin \frac{n\pi v}{L} t \right) \quad (37)$$

Eine alternative Schreibweise hinsichtlich der Eingangsgröße $(u_{st})_0$ mit

$$(u_{st})_0 \equiv \frac{p_0}{k} = \frac{P_{n0}}{K_n} = \frac{2p_0}{mL\omega_n^2} \quad (38)$$

führt zur letztlich verwendeten Gleichung für $\ddot{q}_n(t)$

$$\ddot{q}_n(t) = \frac{2p_0}{mL\omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{n\pi v}{L}/\omega_n\right)^2} \frac{n\pi v}{L} \left(\omega_n \sin \omega_n t - \frac{n\pi v}{L} \sin \frac{n\pi v}{L} t \right) \quad (39)$$

sowie von $\ddot{u}_n(x, t)$

$$\ddot{u}_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) \ddot{q}_n(t) \quad (40)$$

5.3 Spektralanalyse & Systemidentifikation

Auf Basis der bis zu dieser Stelle geschaffenen theoretischen Grundlagen wird nun ein sog. Parameteridentifikationsverfahren beschrieben. Dies geschieht am bereits eingeführten, einfeldrigen Ersatzsystem, dem Bernoulli-Euler Biegebalken.

Um einen maximalen Einblick in das tatsächliche, reale Systemverhalten unter LKW-Überfahrten zu erlangen und dieses entsprechend vollständig beschreiben zu können, werden schrittweise die für die Analyse notwendigen Parameter-Festlegungen möglichst anhand des realen, bekannten Tragsystems Brückenkragarm vorgenommen und in das 1-feldrige Brücken-Ersatzsystem (**Bild 59 - rechts**) implementiert.

Ziel ist letztlich eine äquivalente Darstellung des geschwindigkeitsabhängigen Verformungs- bzw. Beschleunigungsverhaltens (**Bild 24 & Bild 31**) und die detaillierte Analyse etwaiger Unterschiede zwischen den experimentellen und den analytischen Ergebnissen.

Ausgangspunkt für das Identifikationsverfahren ist eine Modale Analyse am realen Tragsystem Brückenkragarm während der Kalibrierungsfahrten zur Bestimmung der maßgeblichen Eigenfrequenzen ω_n sowie der jeweiligen Ordinate des zugehörigen Eigenmodes ϕ_n .

In Hinblick auf eine Analyse der maximalen Verschiebungen in Brückenfeld-Mitte bzw. der zugehörigen maximalen Beschleunigungen erfolgte grundsätzlich eine modale Berücksichtigung der ersten 8 Eigenfrequenzen n_{1-8} . Aufgrund des statischen Randbedingungen am 1-feldrigen Ersatzsystem tragen allerdings nur die ersten vier ungeraden Eigenmodes $n_{1,3,5,7}$ zur Durchbiegung bei, die geraden Eigenmodes $n_{2,4,6,8}$ liefern laut Gleichung (36) den Beitrag Null. Wie aus **Bild 60** hervorgeht, sind die höherfrequenten Eigenmodes außerhalb der festgelegten Betrachtung (d.h. $n > 8$) vernachlässigbar.

In jeder Geschwindigkeitsstufe der durchgeführten Eichfahrten für das Dynamische Gewichtserfassungssystem (20/30/40/50/60 km/h) wurden bekanntlich jeweils zwei Überfahrts-Durchläufe über den Messquerschnitt durchgeführt und durch dynamische Messungen begleitet. Für jeden dieser Durchläufe wurden nun die Eigenfrequenzen ω_n sowie die jeweiligen Ordinaten der zugehörigen Eigenmodes ϕ_n ermittelt und anschließend pro Geschwindigkeitsstufe gemittelt (siehe **Bild 60** und **Tabelle 11**).

Konsequenter Weise wurden in weiterer Folge die Eigenfrequenzen ω_n sowie die jeweiligen Ordinaten der zugehörigen Eigenmodes ϕ_n nochmals Geschwindigkeitsstufen-übergreifend für den gesamten Feldversuch gemittelt (siehe **Bild 61** und **Tabelle 12**).

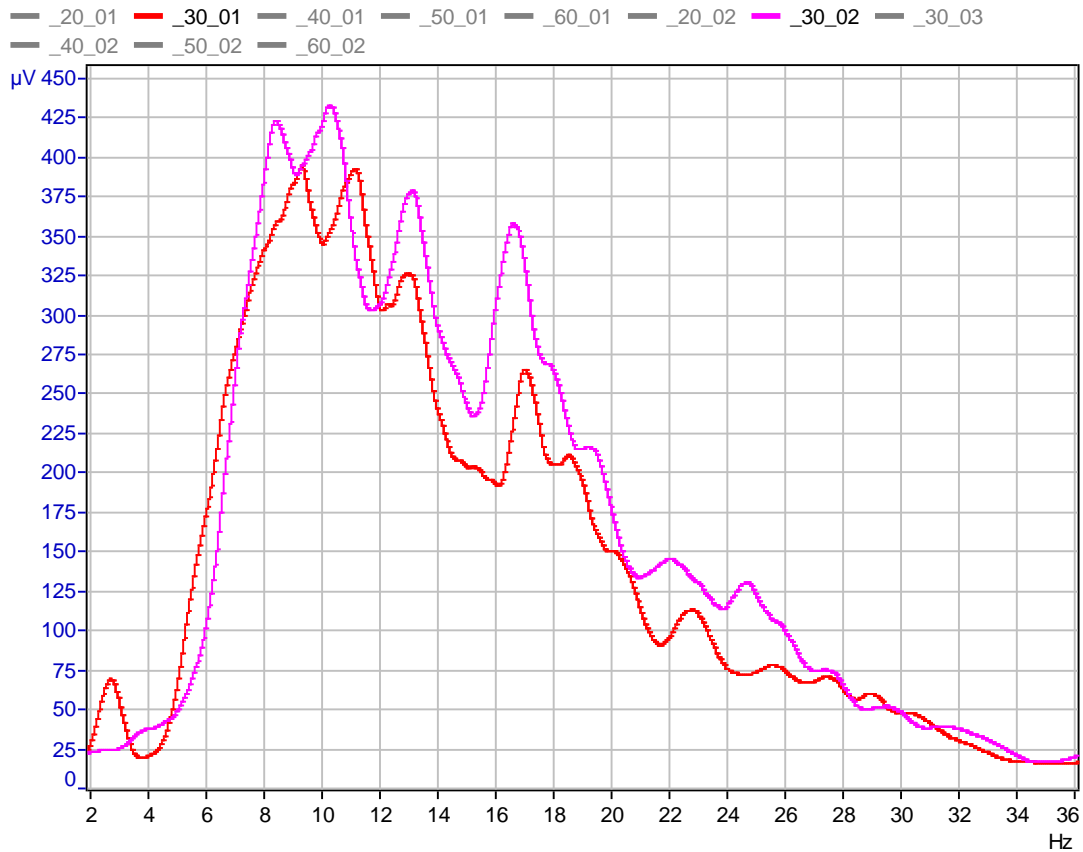


Bild 60: Frequenzanalyse für einen ausgewählten Zeitabschnitt während der Kalibrierungsfahrten (exemplarisch für die Geschwindigkeitsstufe 30 km/h)

	30 km/h					
	[Hz] ₁	[Hz] ₂	[mg] ₁	[mg] ₂	ϕ_1	ϕ_2
f ₁	8,857	8,422	642,73	423,0	1,000	1,000
f ₂	10,901	10,292	311,09	431,9	0,484	1,021
f ₃	12,857	13,118	234,46	379,1	0,365	0,896
f ₄	15,901	16,596	229,55	357,3	0,357	0,845
f ₅	18,857	-	235,13	-	0,366	-
f ₆	21,292	-	92,65	-	0,144	-
f ₇	22,466	-	91,89	-	0,143	-
f ₁	8,640				1,000	
f ₂	10,597				0,753	
f ₃	12,988				0,630	
f ₄	16,249				0,601	
f ₅	18,857				0,366	
f ₆	21,292				0,144	
f ₇	22,466				0,143	

Tabelle 11: Analyse der auftretenden Eigenfrequenzen und deren jeweiliger, modaler Partizipation für einen ausgewählten Zeitabschnitt während der Kalibrierungsfahrten (exemplarische Geschwindigkeitsstufe 30 km/h)

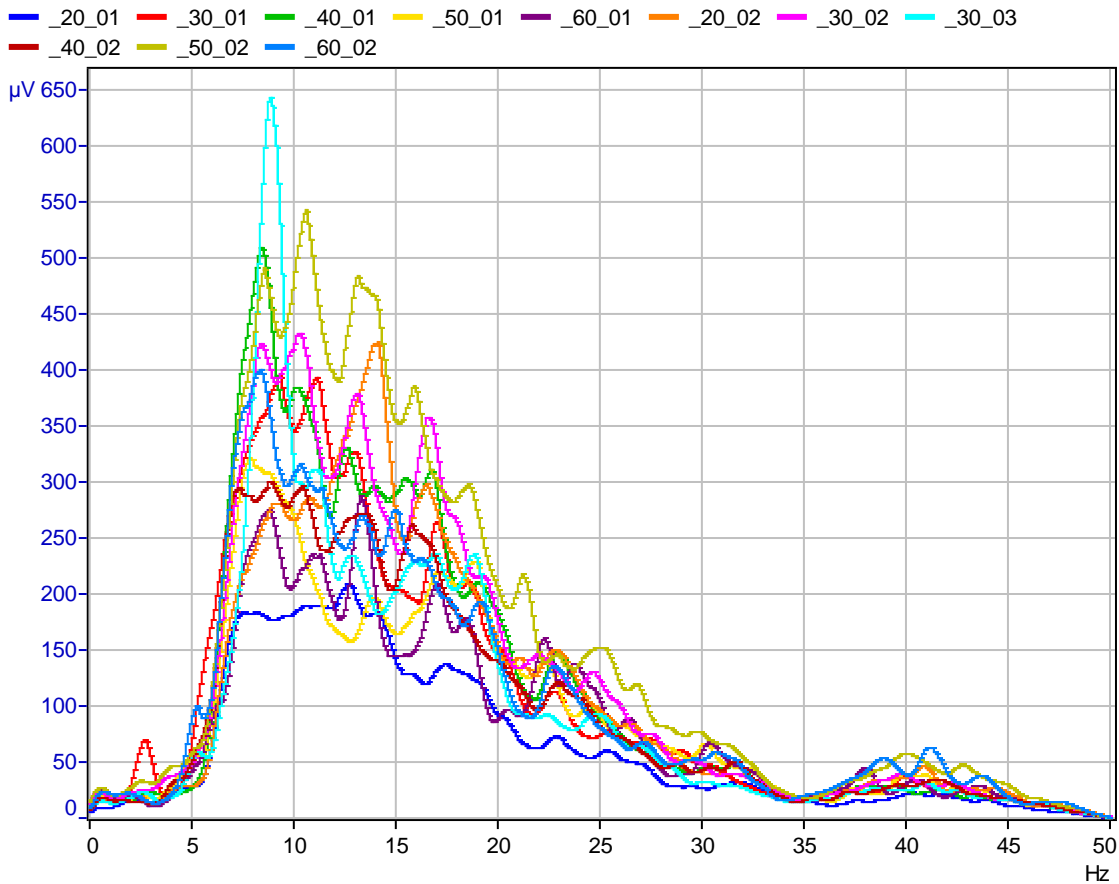


Bild 61: Frequenzanalyse für den gesamten Zeitabschnitt während der Kalibrierungsfahrten (sämtliche Geschwindigkeitsstufen, jeweils 2-Mal durchfahren)

GESAMT			
	[Hz]		ϕ
f_1	8,624		1,000
f_2	10,573		0,888
f_3	13,368		0,762
f_4	16,056		0,685
f_5	18,839		0,506
f_6	20,982		0,313
f_7	22,666		0,332

Tabelle 12: Die resultierenden, auftretenden Eigenfrequenzen und deren jeweilige, modale Partizipation für den gesamten Zeitabschnitt während der Kalibrierungsfahrten (sämtliche Geschwindigkeitsstufen 20-60 km/h)

Mit Hinweis auf **Tabelle 11** & **Tabelle 12** bzw. auf das weitere Vorgehen sei angemerkt, dass die Ergebnisse für jeden der angeführten Überfahrts-Durchläufe pro Geschwindigkeitsstufe stets beide Eichfahrzeuge beinhalten. Dies liegt daran, dass das 5-achsige 42,8 t Eichfahrzeug ($p_0 = 419,9 \text{ kN}$) bekanntlich jeweils in kurzem Abstand (einige Sekunden) hinter dem 2-achsigen 8,7 t Eichfahrzeug ($p_0 = 85,4 \text{ kN}$) fuhr. Eine isolierte modale Unterscheidung für die einzelnen

Fahrzeuge war daher nicht möglich. Die verfügbaren Zeitabschnitte wären dann für eine FFT-Frequenzanalyse (Fast Fourier Transformation) prinzipiell unzureichend kurz.

5.4 Model-Updating

Die im **Abschnitt 5.1** definierten Ziele sollen im Folgenden anhand einer rechnerischen Modellierung der Überfahrt der beiden Eichfahrzeuge Vorgabe - Leer LKW (8,7t) bzw. für den voll ausgelasteten LKW (42,8t) über das festgelegte statische Ersatzsystem erfolgen.

Auf Basis der aufgearbeiteten mechanischen Grundlagen (**Kapitel 5.2**) werden die Lastfälle

- Fahrende Einzellast
- 2-achsige fahrende Last (entspricht dem 8,7t Eichfahrzeug)
- 5-achsige fahrende Last (entspricht dem 42,8t Eichfahrzeug)

herangezogen und in Hinblick auf die aus dem Feldversuch stammenden Referenzkurven Geschwindigkeit vs. Verschiebung (**Bild 22 & Bild 24**) und Geschwindigkeit vs. Beschleunigung (**Bild 30 & Bild 31**) nachgebildet.

5.4.1 Vorgehen

Gemeinsame Referenz für alle drei Lastfälle ist das in **Bild 62** festgelegte statische Ersatzsystem. Um die maßgeblichen Laststellungen für alle drei Lastfälle zu ermitteln, für welche sich jeweils die maximale Durchbiegung bzw. Beschleunigung in Feldmitte (entspricht dem instrumentierten DYGES Messquerschnitt) ergibt, wird das Prinzip der virtuellen Arbeit herangezogen und für jeden der drei angeführten Lastfälle auf der mechanischen Grundlage der fahrenden Einzellast abgehandelt. Das heißt, dass das jeweils betrachtete Schwerfahrzeug in Einzelachsen zerlegt wird, deren Durchbiegungs- bzw. Beschleunigungsbeiträge ermittelt und anschließend wieder entsprechend superponiert werden. Dies erfolgt innerhalb eines jeden der oben angeführten Lastfälle entsprechend der in **Tabelle 12** festgelegten modalen Zusammensetzung (Eigenfrequenzen ω_n für $n = 1 - 8$).

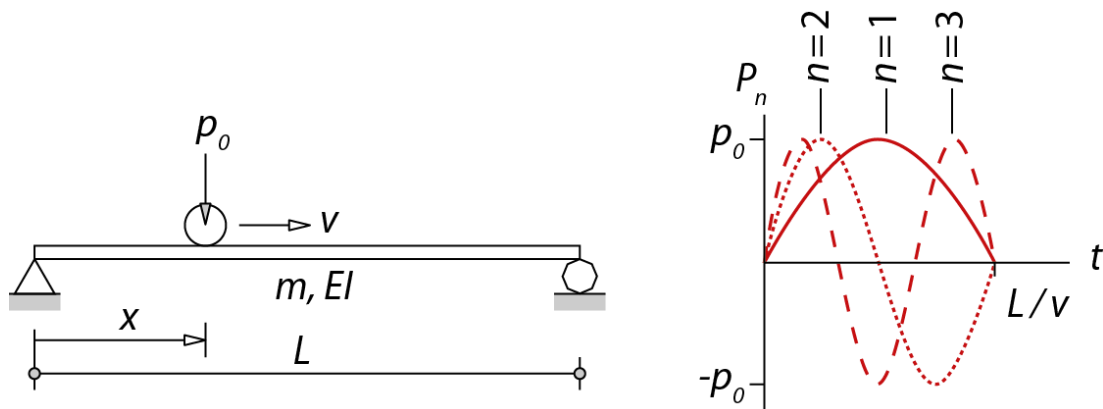


Bild 62: Der beidseitig gelenkig gelagerte, einfeldrige Brückenträger – befahren von einer Einzellast p_0 (konstante Geschwindigkeit)

Während aufgrund des festgelegten Gedankenmodells eine Übereinstimmung bezüglich der Eigenfrequenzen ω_n zwischen realem Tragsystem und dem Ersatzsystem vorliegen muss, stehen die Ordinaten der jeweils zugehörigen Eigenmodes ϕ_n für eine iterative Angleichung von experimentellen und analytischen Kurven zur Verfügung. Die in der **Tabelle 12** ermittelten Ergebnisse stellen daher lediglich Startwerte für das in weiterer Folge vorgenommene sog. „curve-fitting“ am Rechenmodell vor. Der Parameter ϕ_n wird dabei konstant und unabhängig von der Geschwindigkeit angesetzt und nur von einem Eigenmode zum nächsten variiert (und natürlich für den Leer-LKW einerseits und den voll beladenen LKW unabhängig davon andererseits). Schließlich erhält man für die vier herangezogenen Systemfrequenzen $\omega_{1,3,5,7}$ eine jeweils unterschiedliche, iterativ ermittelte Zusammensetzung für ϕ_n - für die Eichfahrzeuge mit 8,7 t einerseits und 42,8 t andererseits.

Im Folgenden wird aufgelistet, welche Kenngrößen für die konkreten, analytischen Berechnungen gewählt wurden. Auch weiterhin erfolgen die dabei notwendigen Parameterfestlegungen weitgehend anhand des realen, bekannten Tragsystems Brückenkragarm, um die dynamische Gewichtserfassung anhand möglichst realer Randbedingung analysieren und vervollständigend zu den bisherigen Feldversuchen beschreiben zu können:

- Der in **Bild 62** dargestellte Brückenträger wird – gemäß der in **Abschnitt 3.3** beschriebenen Kalibrierungsmessung – von zwei unterschiedlichen Einzellasten ($p_0 = 85,4 \text{ kN}$ und $419,9 \text{ kN}$) befahren, wobei die Überfahrts-Geschwindigkeiten pro Durchlauf jeweils konstant gehaltenen wird (20 bis 60 km/h; schrittweise gesteigert).
- Die Länge des statischen Ersatzsystems zur Parameteridentifikation wurde mit $L = 27 \text{ m}$ festgelegt. Mit anderen Worten entspricht dies 3 Segmenten des durchlaufenden Brückenhohlkastens, welcher durch die im **Kapitel 10** ausführlich analysierten

Querverbände bekanntlich in jeweils 9 m lange Abschnitte unterteilt wird (**Bild 63**). Die vorgenommene Festlegung für L resultiert aus eingehenden, vergleichenden FE-Berechnungen zur Analyse der Längsverteilung überfahrender Schwerfahrzeuge (**Tabelle 5**). Die 27m Kragarmlänge dürfte dabei jenem Einflussbereich entsprechen, welcher in generalisierter Form für die Betrachtung der Auswirkungen des vorherrschenden LKW-Lastkollektivs am definierten statischen Ersatzsystem (**Bild 59**) anzusetzen ist.

- Die Massenbelegung m pro Längeneinheit wurde nach rechnerischer Erfassung sämtlicher, auftretender Stahlbleche am orthotropen Brückenkrugarm sowie unter Berücksichtigung der Ausbaulasten (ca. 11%) mit 1,5 t/m angesetzt.
- Der Überfahrtszeitpunkt ergibt sich durch Festlegung des Beobachtungspunktes in Biegebalken-Mitte mit $t = (L/2)/v$. Dies entspricht gedanklich dem instrumentierten Punkt am DYGES-Messquerschnitt.

Abschließend werden tabellarisch die Eckdaten des beschriebenen Iterationsprozesses zusammengefasst.

		curve-fitting		
	Systemfrequenzen	Startwert	Endwert	
	[Hz]	ϕ_i	$\phi_{_8,7}$	$\phi_{_42,8}$
f_1	8,624	1,000	2,150	0,946
f_3	13,368	-0,762	-1,147	-1,052
f_5	18,839	0,506	1,433	0,736
f_7	22,666	-0,332	-0,430	-0,105

Tabelle 13: Modale Zusammensetzung (Systemfrequenzen und Ordinaten der jeweils zugehörigen Eigenmodes) der DYGES-Kalibrierungsfahrten nach erfolgreich abgeschlossener, iterativer Angleichung (curve fitting) der messungs-basierten und analytischen Verläufe der maßgeblichen Zustandsgrößen

5.5 Ergebnisse

5.5.1 Schwerfahrzeug-Modell fahrende Einzellast: Überfahrtsgeschwindigkeit vs. Kragarm-Vertikalverformung

Auf Grundlage der ermittelten Werte für ϕ_n aus

Tabelle 13 werden schließlich die endgültigen Verformungen (Gleichungen (33) & (34)) infolge fahrender LKW-Lasten unter variabler Geschwindigkeit am gewählten statischen Ersatzsystem bestimmt.

Die dafür notwendigen statischen Referenz-Durchbiegungen liegen durch Finite Elemente Analysen mit $(u_{st})_{8,7} = 1,3$ mm bzw. mit $(u_{st})_{42,8} = 5,1$ mm vor (siehe **Bild 63** bzw. **Kapitel 3**).

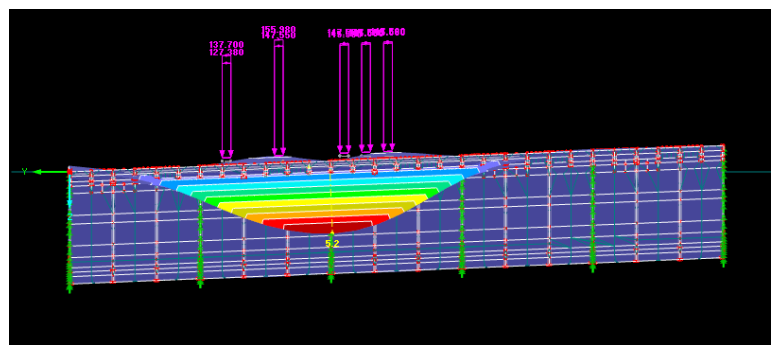
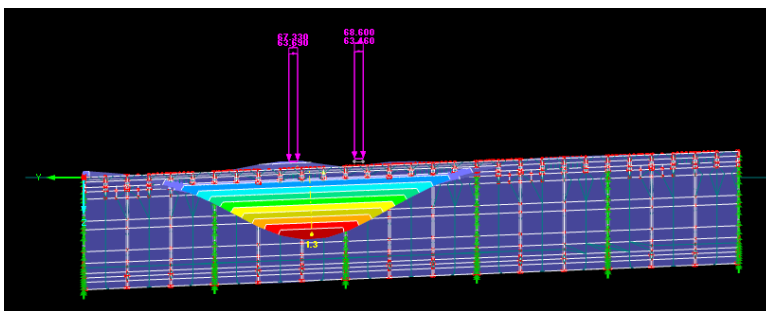


Bild 63: Der reale Brückenkragarm – befahren von den beiden Eichfahrzeugen mit 8,7t (links) bzw. 42,8t (rechts)

Nachfolgend sind die jeweiligen modalen Verschiebungsbeiträge nach Abschluss des Iterationsprozesses (**Bild 64** bis **Bild 71**) sowie die modal superponierte Lösung für das Eichfahrzeug mit 8,7 t einerseits (**Bild 72**), für das Eichfahrzeug mit 42,8 t andererseits (**Bild 73**) sowie deren gemeinsame Darstellung (**Bild 74**) visualisiert.

L =	27 m	$u_{Sto_8,7}$ [mm] =	1,3	$u_{Sto_42,8}$ [mm] =	5,1
$\omega_n = \omega_1 =$	8,624 Hz	$\Phi_{8,7} =$	2,14995	$\Phi_{42,8} =$	0,94635
$\omega_1 =$	54,18619 1/s	n =	1	$\pi =$	3,1415927

Tabelle 14: Eingangsgrößen für den Verschiebungsbeitrag von ω_1 nach abgeschlossener Iteration

Leer-LKW (8,7 t):

		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	2,819
30	8,3	2,819
40	11,1	2,822
50	13,9	2,877
60	16,7	2,705

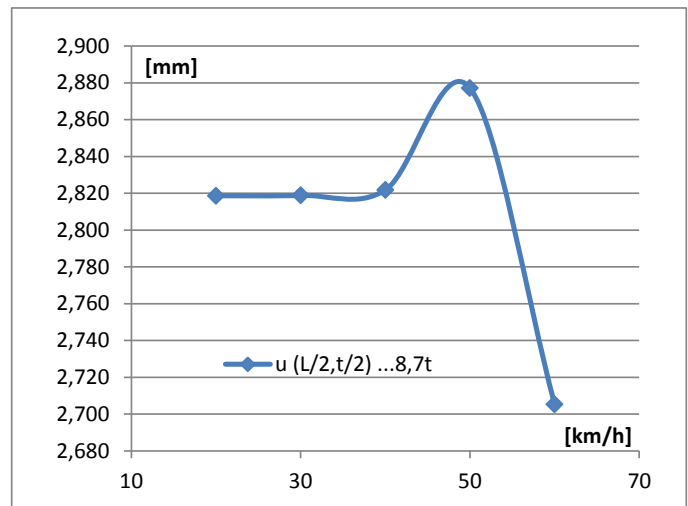


Bild 64: Analytischer Verschiebungsbeitrag infolge ω_1 für das 8,7t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Voll ausgelasteter LKW (42,8 t):

		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	4,867
30	8,3	4,868
40	11,1	4,873
50	13,9	4,968
60	16,7	4,672

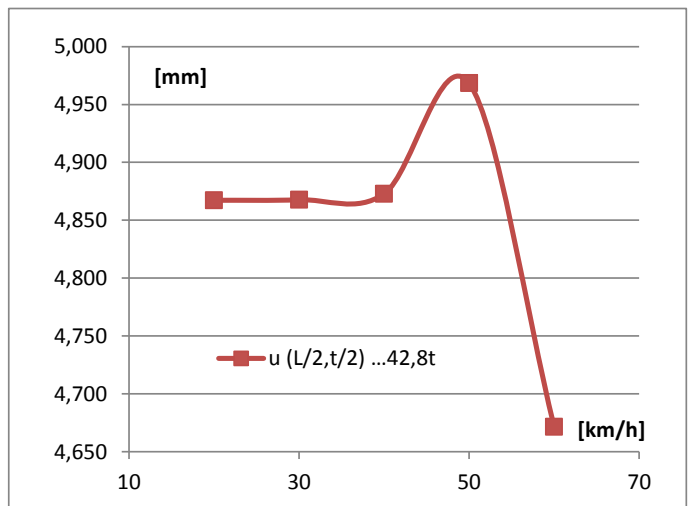


Bild 65: Analytischer Verschiebungsbeitrag infolge ω_1 für das 42,8t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

$L =$	27 m	$u_{STO_8,7}$ [mm] =	1,3	$u_{STO_42,8}$ [mm] =	5,1
$\omega_n = \omega_3 =$	13,368 Hz	$\Phi_{8,7} =$	-1,14664	$\Phi_{42,8} =$	-1,0515
$\omega_3 =$	83,993621 1/s	$n =$	3	$\pi =$	3,1415927

Tabelle 15: Eingangsgrößen für den Verschiebungsbeitrag von ω_3 nach abgeschlossener Iteration

Leer-LKW (8,7 t):

		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	1,472
30	8,3	1,512
40	11,1	1,426
50	13,9	1,429
60	16,7	1,478

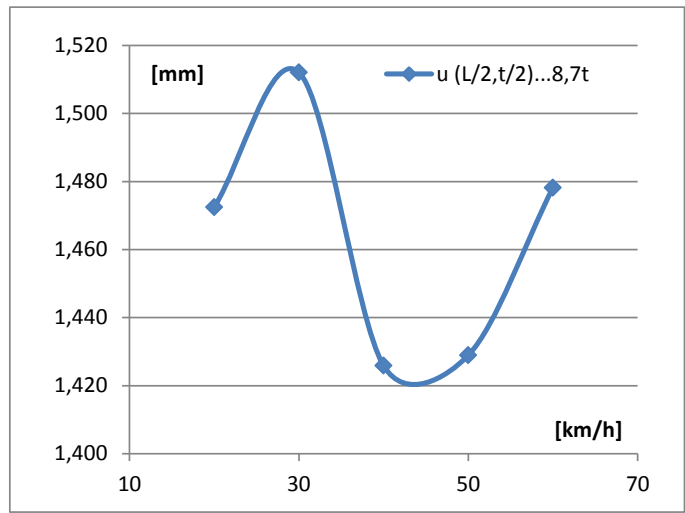


Bild 66: Analytischer Verschiebungsbeitrag infolge ω_3 für das 8,7t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Voll ausgelasteter LKW (42,8 t):

		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	5,297
30	8,3	5,440
40	11,1	5,130
50	13,9	5,141
60	16,7	5,318

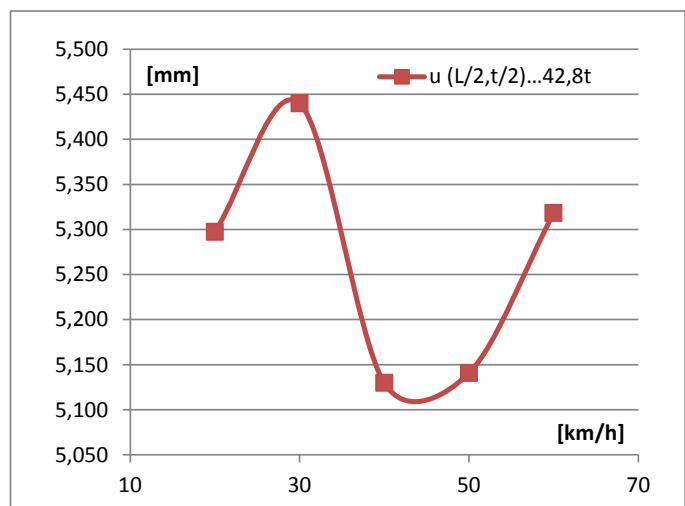


Bild 67: Analytischer Verschiebungsbeitrag infolge ω_3 für das 42,8t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

$L =$	27 m	$u_{Sto_8,7}$ [mm] =	1,3	$u_{Sto_42,8}$ [mm] =	5,1
$\omega_n = \omega_5 =$	18,839 Hz	$\Phi_{-8,7} =$	1,4333	$\Phi_{-42,8} =$	0,73605
$\omega_5 =$	118,36893 1/s	$n =$	5	$\pi =$	3,1415927

Tabelle 16: Eingangsgrößen für den Verschiebungsbeitrag von ω_5 nach abgeschlossener Iteration

Leer-LKW (8,7 t):

v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t) [mm]
20	5,6	1,856
30	8,3	1,857
40	11,1	1,876
50	13,9	1,810
60	16,7	1,865

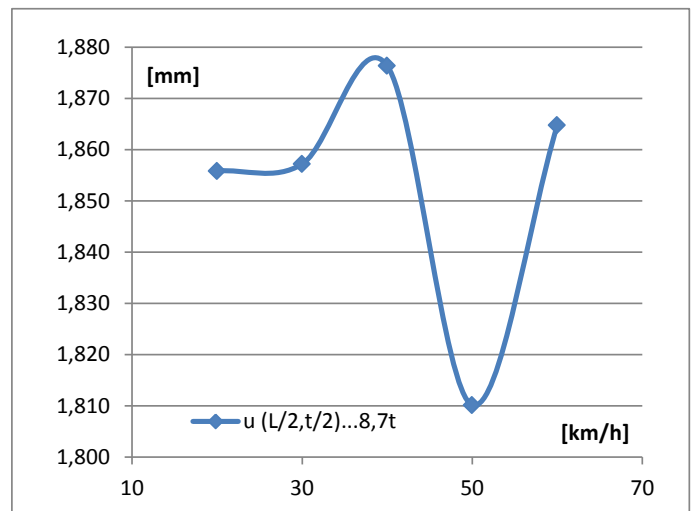


Bild 68: Analytischer Verschiebungsbeitrag infolge ω_5 für das 8,7t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Voll ausgelasteter LKW (42,8 t):

v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t) [mm]
20	5,6	3,739
30	8,3	3,742
40	11,1	3,780
50	13,9	3,647
60	16,7	3,757

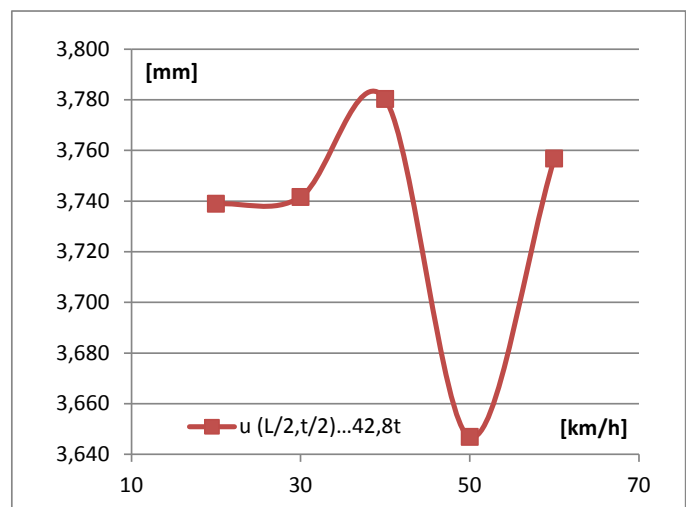


Bild 69: Analytischer Verschiebungsbeitrag infolge ω_5 für das 42,8t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

L=	27	m	$u_{ST0_8,7}$ [mm]=	1,3	$u_{ST0_42,8}$ [mm]=	5,1
$\omega_n = \omega_7 =$	22,666	Hz	$\Phi_{8,7} =$	-0,42999	$\Phi_{42,8} =$	-0,10515
$\omega_7 =$	142,41468	1/s	$n =$	7	$\pi =$	3,1415927

Tabelle 17: Eingangsgrößen für den Verschiebungsbeitrag von ω_7 nach abgeschlossener Iteration

Leer-LKW (8,7 t):		
		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	0,556
30	8,3	0,537
40	11,1	0,528
50	13,9	0,524
60	16,7	0,522

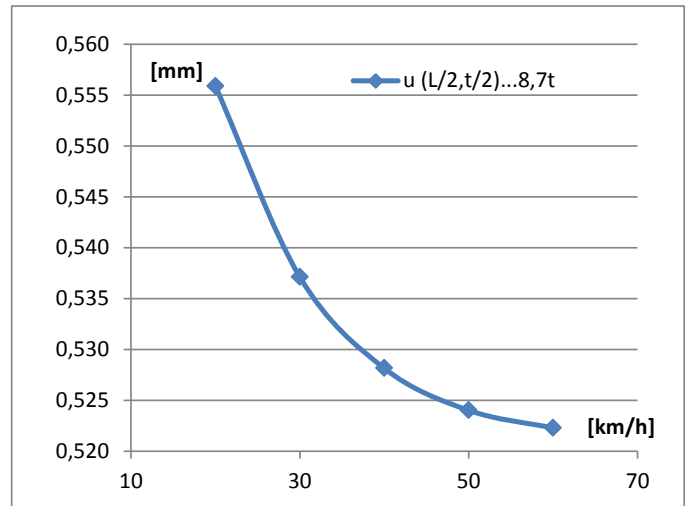


Bild 70: Analytischer Verschiebungsbeitrag infolge ω_7 für das 8,7t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Voll ausgelasteter LKW (42,8 t):		
		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	0,533
30	8,3	0,515
40	11,1	0,507
50	13,9	0,503
60	16,7	0,501

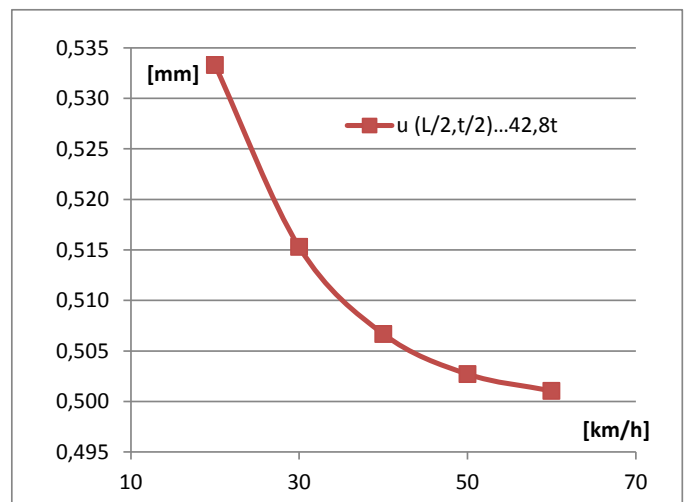


Bild 71: Analytischer Verschiebungsbeitrag infolge ω_7 für das 42,8t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Leer-LKW (8,7 t):		
		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	1,862
30	8,3	1,868
40	11,1	1,848
50	13,9	1,845
60	16,7	1,825

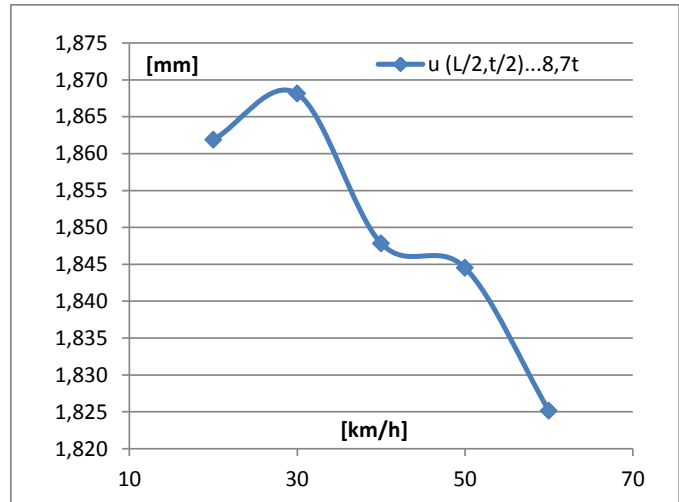


Bild 72: Modal superponierte Verschiebungsbeiträge infolge ω_{1-7} für das 8,7t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Voll ausgelasteter LKW (42,8 t):		
		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	5,347
30	8,3	5,394
40	11,1	5,292
50	13,9	5,281
60	16,7	5,277

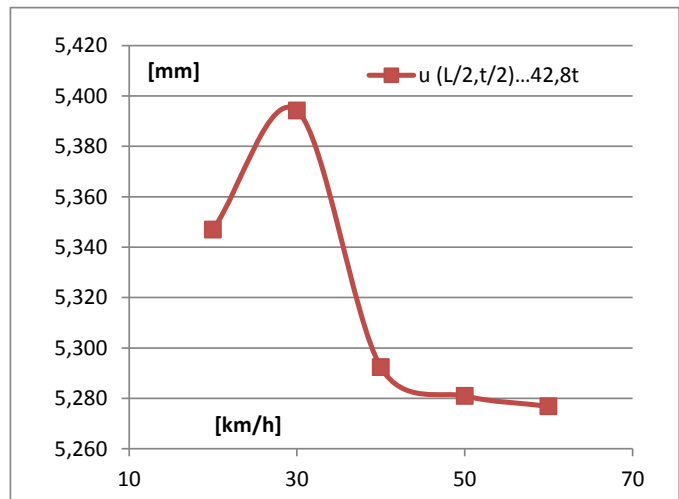


Bild 73: Modal superponierte Verschiebungsbeiträge infolge ω_{1-7} für das 42,8t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

An dieser Stelle sei auf die hohe Übereinstimmung zwischen den Referenzkurven der DYGES-Eichfahrten aus dem Feldversuch (**Bild 22**) und den mechanisch modellierten Alternativ-Versionen (**Bild 72** & **Bild 73**) hingewiesen. Aufgrund der Betrachtung zweier unterschiedlicher stat. Systeme (**Bild 59** - gelenkig gelagerter Einfeld-Träger vs. dreiseitig nachgiebig eingespannte und einseitig freie, orthotrope Platte) ist der vorgenommene Vergleich dennoch vordergründig qualitativ zu sehen, bei welchem aber gleichzeitig bereits die Richtigkeit der quantitativen Größenordnung sichergestellt ist. Ein Vergleich der Absolut-Beträge samt Erörterung der verbleibenden Abweichungen infolge der zugrunde gelegten Modelle erfolgt in **Kapitel 5.6** im Rahmen der Diskussion des Modellierungsfehlers.

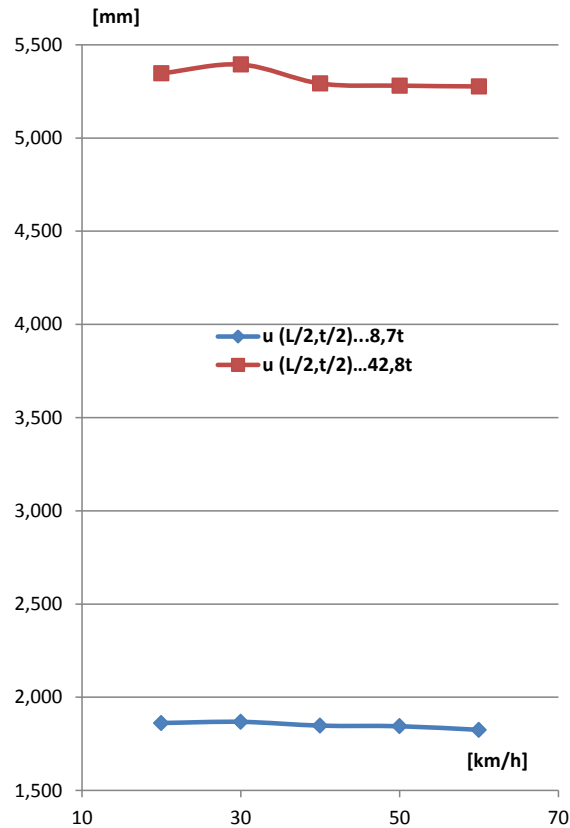


Bild 74: Modal superponierte Verschiebungsbeiträge infolge ω_{1-7} für beide Eichfahrzeuge bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Von einem Einzeichnen der statischen Durchbiegungs-Referenzlage aus dem passenden Finite Elemente-Rechenmodell (Tragwirkung des Brücken-Kragarmes) in **Bild 74** wurde hier Abstand genommen, da ein solcher Vergleich irreführend wäre. Der Grund ist wiederum die Unterschiedlichkeit der statischen Systeme im Zuge der vereinfachten mechanischen Betrachtung der fahrenden Last. Die maßgeblichste Einflussgröße bei der Entstehung der vorliegenden, rechnerischen Absolutbeträge am betrachteten statischen Ersatzsystems (Brücken-Gesamtfeld) sind - wie sich gezeigt hat - die Ordinaten der jeweils zugehörigen Eigenmodes ϕ_n . Insofern würde ein solcher Vergleich unnötiger Weise neue Detail-Erklärungen zur Unterschiedlichkeit der Absolutbeträge für diesen Sonderfall nach sich ziehen. Daher wird die statische Durchbiegungs-Referenzlage lediglich in die realen Verläufe aus dem Feldversuch eingetragen (**Bild 22**), dort ist die unmittelbare Vergleichbarkeit auch entsprechend gegeben. Die abschließende, räumliche Darstellung der Geschwindigkeits-Verschiebungs-Tonnagen Relation (**Bild 75**) ist notwendiger Weise wiederum durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Stützstellen der beiden Grenzkurven für die fahrenden Einzellasten ($p_0 = 419,9 \text{ kN}$ bzw. $p_0 = 85,4 \text{ kN}$) entstanden. Dies war ja bekanntlich bereits bei den beiden äquivalenten Grenzkurven aus den Messungen (**Bild 24**) der Fall.

[mm]					
$u_n = \sum \Phi_n * q_n(L/2, t)$					
$q_n(L/2, t) = u_{ST0} / (1 - ((n*\pi*v/L)/\omega_n)^2) * (\sin(n*\pi/2) - (n*\pi*v/(\omega_n*L)) * \sin(\omega_n*L/(2*v)))$					
	5,56	8,33	11,11	13,89	16,67
	20	30	40	50	60
42,8	5,347	5,394	5,292	5,281	5,277
42	5,265	5,312	5,212	5,200	5,196
41	5,163	5,208	5,111	5,100	5,095
40	5,061	5,105	5,010	4,999	4,993
39	4,959	5,001	4,909	4,898	4,892
38	4,856	4,898	4,807	4,797	4,791
37	4,754	4,794	4,706	4,696	4,690
36	4,652	4,691	4,605	4,596	4,589
35	4,550	4,588	4,504	4,495	4,487
34	4,448	4,484	4,403	4,394	4,386
33	4,345	4,381	4,302	4,293	4,285
32	4,243	4,277	4,201	4,193	4,184
31	4,141	4,174	4,100	4,092	4,082
30	4,039	4,071	3,999	3,991	3,981
29	3,937	3,967	3,898	3,890	3,880
28	3,834	3,864	3,797	3,789	3,779
27	3,732	3,760	3,696	3,689	3,678
26	3,630	3,657	3,595	3,588	3,576
25	3,528	3,554	3,494	3,487	3,475
24	3,426	3,450	3,393	3,386	3,374
23	3,323	3,347	3,292	3,286	3,273
22	3,221	3,243	3,191	3,185	3,171
21	3,119	3,140	3,090	3,084	3,070
20	3,017	3,037	2,989	2,983	2,969
19	2,915	2,933	2,888	2,882	2,868
18	2,812	2,830	2,787	2,782	2,767
17	2,710	2,726	2,686	2,681	2,665
16	2,608	2,623	2,585	2,580	2,564
15	2,506	2,520	2,484	2,479	2,463
14	2,404	2,416	2,383	2,379	2,362
13	2,301	2,313	2,282	2,278	2,260
12	2,199	2,209	2,181	2,177	2,159
11	2,097	2,106	2,080	2,076	2,058
10	1,995	2,003	1,979	1,976	1,957
9	1,893	1,899	1,878	1,875	1,856
8,7	1,862	1,868	1,848	1,845	1,825

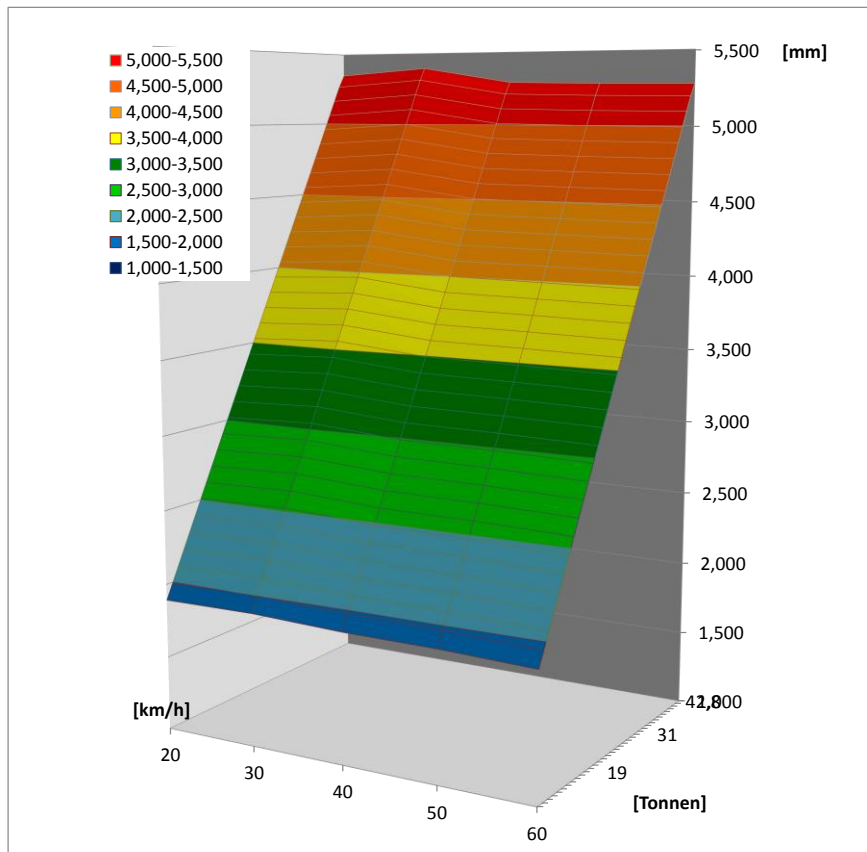


Bild 75: Räumliche Darstellung der superponierte Verschiebungsbeiträge aus ω_{1-7} infolge linearer Interpolation zwischen den beiden Grenzkurven (Eichfahrzeugen) bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

5.5.2 Schwerfahrzeug-Modell fahrende Einzellast: Überfahrtsgeschwindigkeit vs. Kragarm-Beschleunigungen

Die nachfolgende Ermittlung der Beschleunigungs-Ergebnisse ist deckungsgleich zum Vorgehen im Abschnitt zuvor. Im Wesentlichen werden auf Basis der ermittelten Werte für ϕ_n aus **Tabelle 13** sowie der Gleichungen (39) & (40) die am gewählten statischen Ersatzsystem in Feldmitte einwirkenden Maximal-Beschleunigungen infolge fahrender LKW-Lasten unter variabler Geschwindigkeit bestimmt.

Von einer Darstellung der einzelnen modalen Beiträge wie im Abschnitt zuvor wird hier abgesehen. Stattdessen werden direkt die erzielten Ergebnisse dargelegt und eingehend diskutiert.

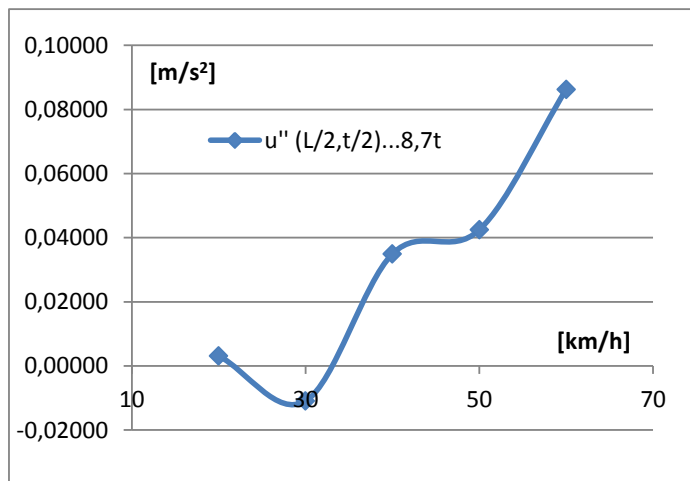


Bild 76: Superponierte Beschleunigungsbeiträge infolge ω_{1-7} für das 8,7t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

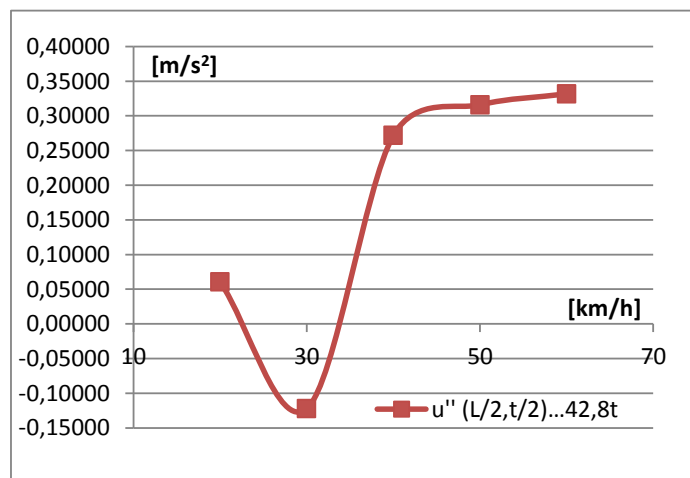


Bild 77: Superponierte Beschleunigungsbeiträge infolge ω_{1-7} für das 42,8t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Der charakteristische Verlauf der in **Bild 76** und **Bild 77** enthaltenen Beschleunigungs-/Geschwindigkeits-Funktionen entspricht qualitativ zunächst jenem der in **Bild 72** und **Bild 73** enthaltenen Verschiebungs-/Geschwindigkeits-Funktionen mit umgedrehtem Vorzeichen. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich diese bisher durch Gleichung (39) ermittelten Beschleunigungs-/Geschwindigkeits-Verläufe nachweislich auch in äquivalenter Form anhand des Einsetzens der zuvor in **Abschnitt 5.5.1** rechnerisch ermittelten Verformungen in Gleichung (26) und entsprechende Umformung (siehe Gleichung (41)) ermitteln lassen würden.

$$\ddot{q}_n(t) = \frac{P_n(t) - K_n q_n(t)}{M_n} \quad (41)$$

Die Zusammensetzung der umgeformten Bewegungsgleichung (41) und deren Betrachtung zum Überfahrtszeitpunkt $t = (L/2)/v$ bringt es mit sich, dass neben dem Verschiebungsterm ausschließlich konstante Größen vorliegen, wodurch die Verläufe in **Bild 76** und **Bild 77** qualitativ unmittelbar die negative Verformungscharakteristik $-q_n$ widerspiegeln.

Leer-LKW (8,7 t):		
p_0	v	$u'' (L/2, t/2)$
[kN]	[m/s]	[m/s ²]
85,35	5,6	0,00315
85,35	8,3	0,01095
85,35	11,1	0,03496
85,35	13,9	0,04247
85,35	16,7	0,08626

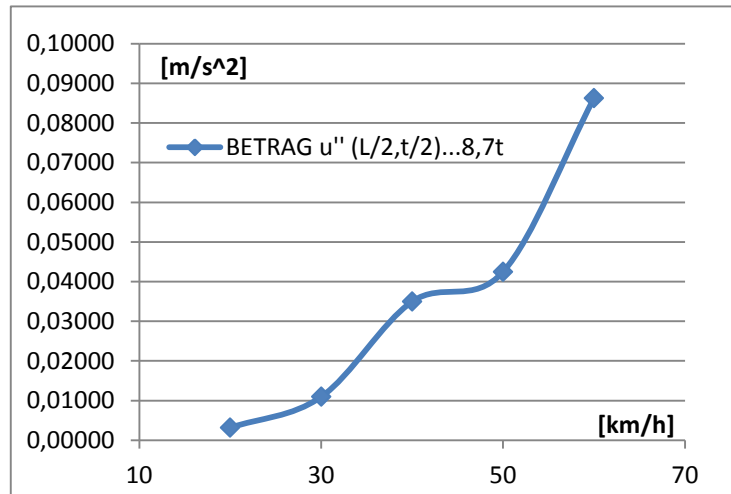


Bild 78: Superponierte BETRÄGE der Beschleunigungsbeiträge infolge ω_{1-7} für das 8,7t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Voll ausgelasteter LKW (42,8 t):		
p_0	v	$u'' (L/2, t/2)$
[kN]	[m/s]	[m/s ²]
419,87	5,6	0,06064
419,87	8,3	0,12213
419,87	11,1	0,27179
419,87	13,9	0,31589
419,87	16,7	0,33174

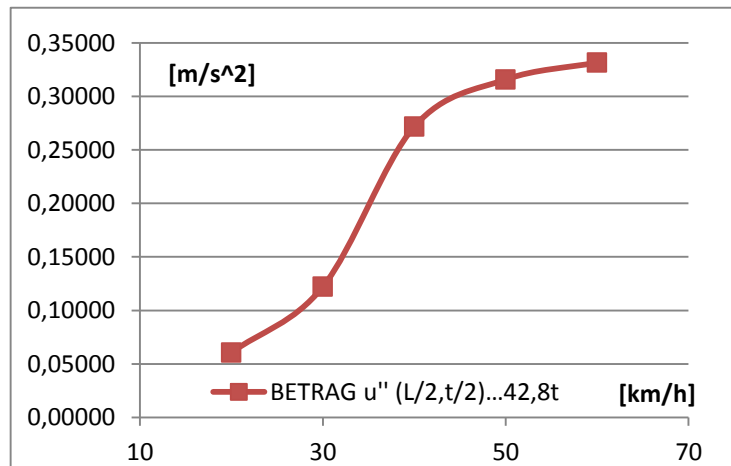


Bild 79: Superponierte BETRÄGE der Beschleunigungsbeiträge infolge ω_{1-7} für das 42,8t Eichfahrzeug bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Im Zuge der Superposition der einzelnen modalen Beiträge, die ursprünglich zu den resultierenden Verläufen in **Bild 76** und **Bild 77** geführt hatten, wurde nun richtiger Weise abschließend eine Vorzeichenvereinheitlichung bei den jeweiligen modalen Teilergebnissen vorgenommen. Dies ist eine Notwendigkeit, um dem experimentell basierten Vorgehen zu entsprechen. Im Rahmen der Verwertung der Messdaten wurde ja bekanntlich das Beschleunigungssignal zunächst im niederfrequenten Bereich geglättet (Intervall 1 Sekunde) um die höherfrequenten Störeinflüsse zu unterdrücken. Danach wurde quadriert und Wurzel gezogen, um nur noch die Beträge der Stützstellen infolge Überfahrtsimpuls zu erhalten und schließlich mittels Intervall-Sekantenverfahren eine resultierende Hüllkurve geschaffen, welche

stellvertretend für den zu identifizierenden Überfahrts-Impuls erhalten blieb. Erst der beschriebene Übergang auf Beträge im Sinne des DYGES-Algorithmus (Vz.-Vereinheitlichung) liefert jene Funktionen (**Bild 78 & Bild 79**), welche in weiterer Folge für den Vergleich mit dem Feldversuch herangezogen werden. Auch hier sei nun wiederum auf eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen den Referenzkurven des Feldversuchs (DYGES-Eichfahrten - **Bild 30**) und jenen der analytischen Nachrechnung (**Bild 78 & Bild 79**) hingewiesen. Die bereits angeführte Betrachtung zweier unterschiedlicher stat. Systeme (**Bild 59**) spielt eine etwas größere, aber nicht schwerwiegend beeinflussendere Rolle. Ein Vergleich der Absolut-Beträge samt Erörterung der verbleibenden Abweichungen infolge der zugrunde gelegten Modelle erfolgt wiederum in **Kapitel 5.6** im Rahmen der Diskussion des Modellierungsfehlers.

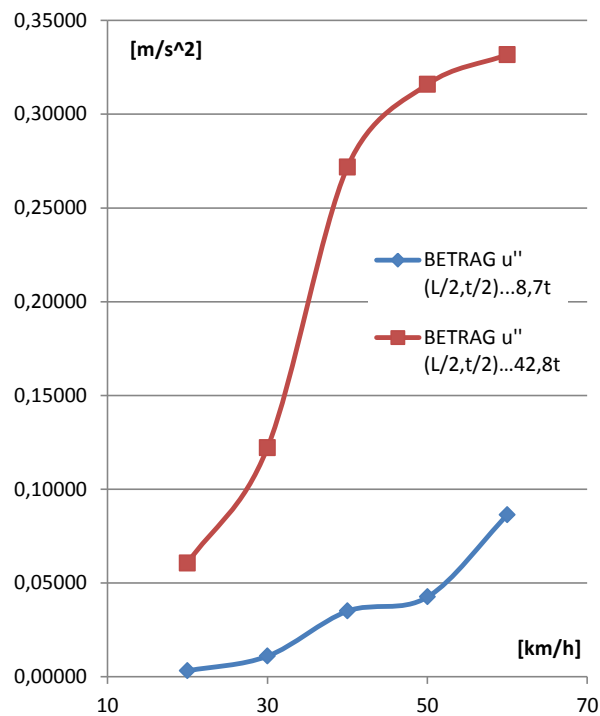


Bild 80: Superponierte BETRÄGE der Beschleunigungsbeiträge infolge ω_{1-7} für beide Eichfahrzeuge bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

		[m/s ²]				
		$u_n'' = \sum \Phi_n * q_n''(L/2, t)$				
		$q_n''(L/2, t) = 2 * p_0 / (m * L) * 1 / (\omega_n^2 - (n * \pi * v / L)^2) * (n * \pi * v / L) * (\omega_n * \sin(\omega_n * t) - (n * \pi * v / L) * \sin(n * \pi * v * t / L))$				
		5,56	8,33	11,11	13,89	16,67
		20	30	40	50	60
42,8		0,06064	0,12213	0,27179	0,31589	0,33174
42		0,05929	0,11952	0,26623	0,30947	0,32598
41		0,05760	0,11626	0,25929	0,30145	0,31878
40		0,05592	0,11300	0,25234	0,29344	0,31158
39		0,05423	0,10974	0,24540	0,28542	0,30439
38		0,05255	0,10648	0,23845	0,27740	0,29719
37		0,05086	0,10322	0,23151	0,26938	0,28999
36		0,04917	0,09996	0,22456	0,26136	0,28279
35		0,04749	0,09670	0,21762	0,25335	0,27559
34		0,04580	0,09344	0,21067	0,24533	0,26839
33		0,04412	0,09018	0,20373	0,23731	0,26119
32		0,04243	0,08692	0,19678	0,22929	0,25399
31		0,04075	0,08366	0,18984	0,22127	0,24679
30		0,03906	0,08040	0,18289	0,21325	0,23960
29		0,03737	0,07714	0,17595	0,20524	0,23240
28		0,03569	0,07388	0,16900	0,19722	0,22520
27		0,03400	0,07061	0,16206	0,18920	0,21800
26		0,03232	0,06735	0,15511	0,18118	0,21080
25		0,03063	0,06409	0,14817	0,17316	0,20360
24		0,02895	0,06083	0,14122	0,16515	0,19640
23		0,02726	0,05757	0,13428	0,15713	0,18920
22		0,02557	0,05431	0,12733	0,14911	0,18200
21		0,02389	0,05105	0,12039	0,14109	0,17481
20		0,02220	0,04779	0,11344	0,13307	0,16761
19		0,02052	0,04453	0,10650	0,12505	0,16041
18		0,01883	0,04127	0,09955	0,11704	0,15321
17		0,01714	0,03801	0,09261	0,10902	0,14601
16		0,01546	0,03475	0,08566	0,10100	0,13881
15		0,01377	0,03149	0,07872	0,09298	0,13161
14		0,01209	0,02823	0,07177	0,08496	0,12441
13		0,01040	0,02497	0,06483	0,07695	0,11721
12		0,00872	0,02171	0,05788	0,06893	0,11002
11		0,00703	0,01845	0,05094	0,06091	0,10282
10		0,00534	0,01519	0,04399	0,05289	0,09562
9		0,00366	0,01193	0,03705	0,04487	0,08842
8,7		0,00315	0,01095	0,03496	0,04247	0,08626

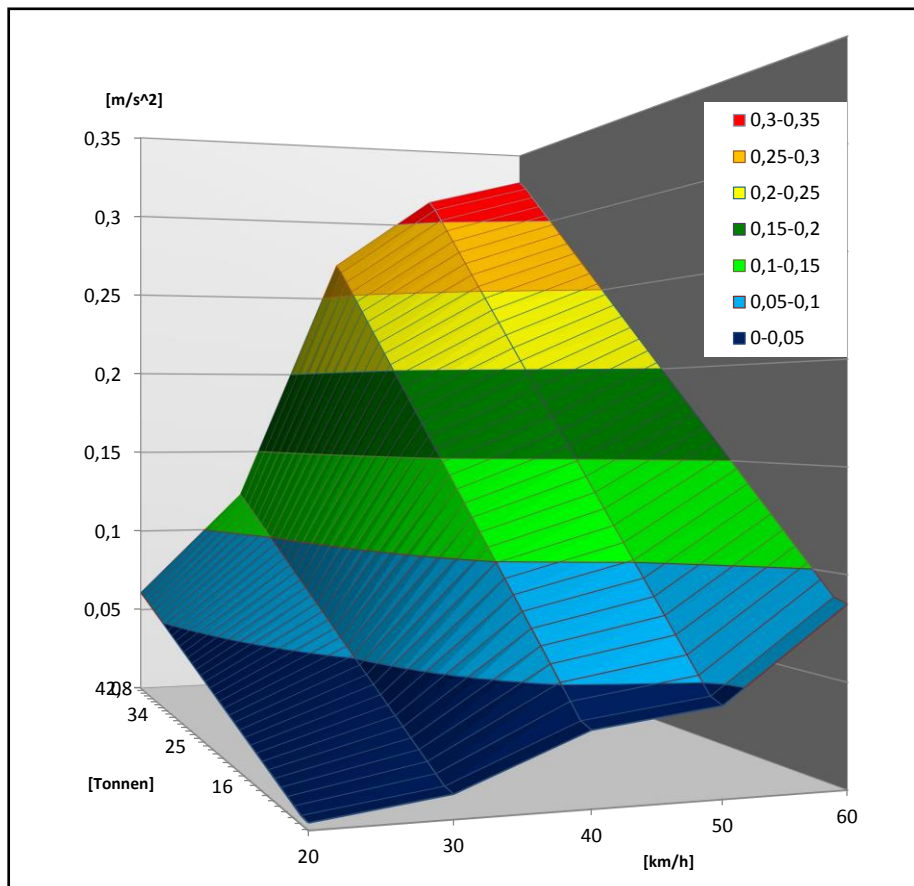


Bild 81: Räumliche Darstellung der superponierten BETRÄGE der Beschleunigungsbeiträge aus ω_{1-7} infolge linearer Interpolation zwischen den beiden Grenzkurven (Eichfahrzeugen) bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

5.5.3 Ad 2-achsige bzw. 5-achsige Schwerfahrzeuge

Es hat sich gezeigt, dass bei korrekter Implementierung der fahrenden Last als mehrachsiges Einwirkungsmodell zunächst gar keine akzeptable Übereinstimmung im Sinne der die Eichfahrten wiedergebenden Funktionen vorliegt. Bei einer Fortführung der iterativen Anpassung bis zu einer prinzipiellen Übereinstimmung zeigen sich folgende Missstände:

- Eine prinzipielle Übereinstimmung kann nur erzielt werden, wenn der Beitrag einzelner Eigenfrequenzen ω_n entweder vollständig unterdrückt oder für die partizipierenden Eigenfrequenzen einzelne Achsenbeiträge entweder überhöht, minimiert bzw. unterdrückt werden.
- Die dann erzielte Lösung würde zwar einigermaßen übereinstimmende Ergebnisse liefern, die Güte der Übereinstimmung wäre aber keinesfalls mit jener des Einzellastmodells vergleichbar.
- Vor allem aber legen die unter derart unnatürlichen Umständen erzielten Ergebnisse nahe, dass es sich bei den zugrundeliegenden Annahmen keinesfalls um ein Abbild des Regelbetriebs handelt oder um die mechanische Erklärung für das Dynamische Gewichtserfassungssystem. Vielmehr sind unter derartig künstlichen Simulations-Bedingungen rechnerisch erstellte Vergleichsergebnisse als rein hypothetisch anzusehen.

5.5.4 Fazit

Im Zuge der intensiven Modellanpassungs-Analysen hat sich gezeigt, dass das reale Tragverhalten am Brückenkragarm unter fahrender LKW-Last weitgehend der Reaktion infolge einer Einzellast und nicht der Reaktion unter einem mehrachsigen Schwerfahrzeug entspricht, wodurch die Fragestellung nach dem Einfluss der Achskonfiguration für den DYGES-Algorithmus hinfällig ist.

Die wesentlichste Grundlage für das Zustandekommen gleichwertiger Kurvenverläufe ist die Erkenntnis, dass die Verfeinerung des Einwirkungsmodells auf mehrere Achsen im Gegensatz zum fahrenden Einzellast-Modell völlig vom Feldversuch abweichende Verläufe liefert.

Eine realitätsnahe Abbildung des Tragverhaltens am Ersatzmodell unter fahrender Last ist also entscheidend von einer korrekten Berücksichtigung des Einflusses der Achsenkonfiguration und deutlich weniger von einem potentiell größeren Einfluss von ϕ_n abhängig. ϕ_n ist in der vorliegenden Betrachtung daher vordergründig als Model-Updating Parameter (d.h. als Skalierungsfaktor) bei der Optimierung von qualitativ bereits übereinstimmenden Verformungs-/Geschwindigkeits-Funktionen bzw. Beschleunigungs-/Geschwindigkeits-Funktionen anzusehen.

Im Lichte dieser Erkenntnisse erübrigt sich daher auch die Überlegung, die ϕ_n 's eventuell Geschwindigkeits-abhängig zu variieren. Der Parameter ϕ_n wurde bekanntlich pro Fahrzeug-Art und beitragender Eigenfrequenz ω_n konstant und unabhängig von der Geschwindigkeit angesetzt. Eine solche Überlegung wäre lediglich dann gerechtfertigt, wenn die getroffenen Maßnahmen beim Model-Updating immer noch eine unzureichende Übereinstimmung der Referenz-Kurven bedingt hätten und daher weiterhin ein Bedarf zu Anpassungen des mechanischen Modells bestanden hätte.

5.6 Diskussion der implizierten Modellierungs-Genauigkeit

5.6.1 Vergleich der Absolutwerte: Überfahrtsgeschwindigkeit vs. Kragarm-Vertikalverformung

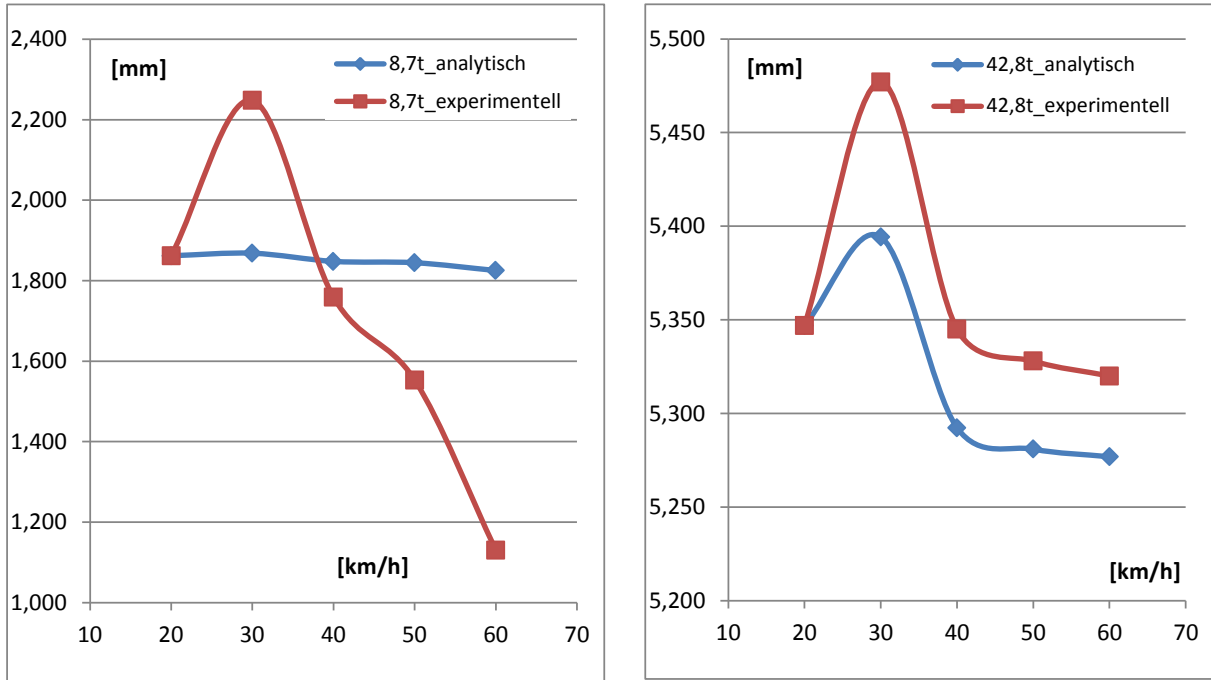


Bild 82: Grafischer Vergleich der analytischen und experimentellen Verschiebungsbeiträge anhand der beiden Eichfahrzeuge 8,7t (links) sowie 42,8t (rechts) bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

ANALYTISCH			
	8,7 t LKW:	42,8 t LKW:	Amplitudenverhältnis
Geschwindigkeit	Verschiebung	Verschiebung	Voll vs. Leer:
[km/h]	[mm]	[mm]	[]
20	1,862	5,347	2,872
30	1,868	5,394	2,888
40	1,848	5,292	2,864
50	1,845	5,281	2,863
60	1,825	5,277	2,891

EXPERIMENTELL			
	8,7 t LKW:	42,8 t LKW:	Amplitudenverhältnis
Geschwindigkeit	Verschiebung	Verschiebung	Voll vs. Leer:
[km/h]	[mm]	[mm]	[]
20	1,862	5,347	2,872
30	2,248	5,477	2,436
40	1,759	5,345	3,039
50	1,553	5,328	3,431
60	1,130	5,320	4,708

Tabelle 18: Gegenüberstellung der analytischen und experimentellen Vertikal-Verschiebungen für die beiden Eichfahrzeuge 8,7t sowie 42,8t bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Leer-LKW (8,7 t): Amplitudenverhältnis (Experimentell / Analytisch)	Voll ausgelasteter LKW (42,8 t): Amplitudenverhältnis (Experimentell / Analytisch)
1,00006	1,00001
1,20334	1,01534
0,95193	1,00995
0,84196	1,00891
0,61913	1,00818

Tabelle 19: Numerischer Vergleich der Relation der analytischen und experimentellen Verschiebungsbeiträge anhand der beiden Eichfahrzeuge: $p_0 = 85,4$ kN (links) sowie $p_0 = 419,9$ t (rechts) bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Wie **Bild 82** entnommen werden kann, bringt das beschriebene „curve-fitting“ nicht nur eine qualitativ hinreichend gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und gerechneten Ergebnissen mit sich, es wurde konsequenter Weise auch eine abschließende Angleichung der Startwerte (Offset) der beiden Funktionen vorgenommen, um die verbleibenden Unterschiede zwischen dem gemessenen, realen Verhalten und dem mechanischen Ersatzsystem möglichst gut hervorzuheben. Dieser Abgleich erfolgte über eine gleichartige Anpassung sämtlicher verwendeter Ordinaten der herangezogenen Eigenmodes ϕ_n um den gleichen skalaren Faktor (je Eichfahrzeug):

- Nach dieser Harmonisierung der beiden Verformungs-/Geschwindigkeits-Funktionen verbleibt weiterhin eine stärkere dynamische Vergrößerung des realen Tragsystems gegenüber dem Rechenmodell, welcher folgendermaßen erklärt werden kann. Obwohl beiden Systemen (reale Struktur vs. Ersatzsystem) die gleichen (aneinander angeglichenen) modalen Eigenschaften zugrunde liegen, fährt dieselbe dynamische Einwirkung tatsächlich über einen Brückenkragarm (SEKUNDÄRBAUTEIL-Verhalten aus dem Feldversuch), während im Rechenmodell ein ganzes Brückenfeld (PRIMÄRBAUTEIL-Verhalten) befahren wird.
- Des Weiteren ist festzuhalten, dass die experimentelle Kurve für das Leerfahrzeug eine größere Schwankungsbreite aufweist als die des voll beladenen LKW, was auf den stärkeren Einfluss der Fahrzeugdynamik (dynamische Wechselwirkung des Fahrzeuggestells mit der befahrenen Struktur) zurückzuführen sein dürfte.
- Kurzum sind der Vergleichbarkeit zwischen dem realen Tragsystem und dem zur Parameteridentifikation gewählten statischen Ersatzsystem Grenzen gesetzt, welche hier für die verbleiben Abweichungen verantwortlich zeichnen.

Die unmittelbare Folge dieser drei Aussagen ist der **Tabelle 19** zu entnehmen. Für das 42,8t Eichfahrzeug liegt die Abweichung zwischen Messung und Rechenmodell bei maximal + 1,5 %, beim 8,7t Eichfahrzeug treten Abweichungen von bis zu +20% bzw. – 38% auf.

5.6.2 Vergleich der Absolutwerte: Überfahrtsgeschwindigkeit vs. Kragarm-Beschleunigung

Den nachfolgenden Ergebnissen liegen je Eichfahrzeug natürlich dieselben Modellanpassungs-Parameter ϕ_n zugrunde, welche bereits bei zu den Ergebnissen in 5.6.1 führten.

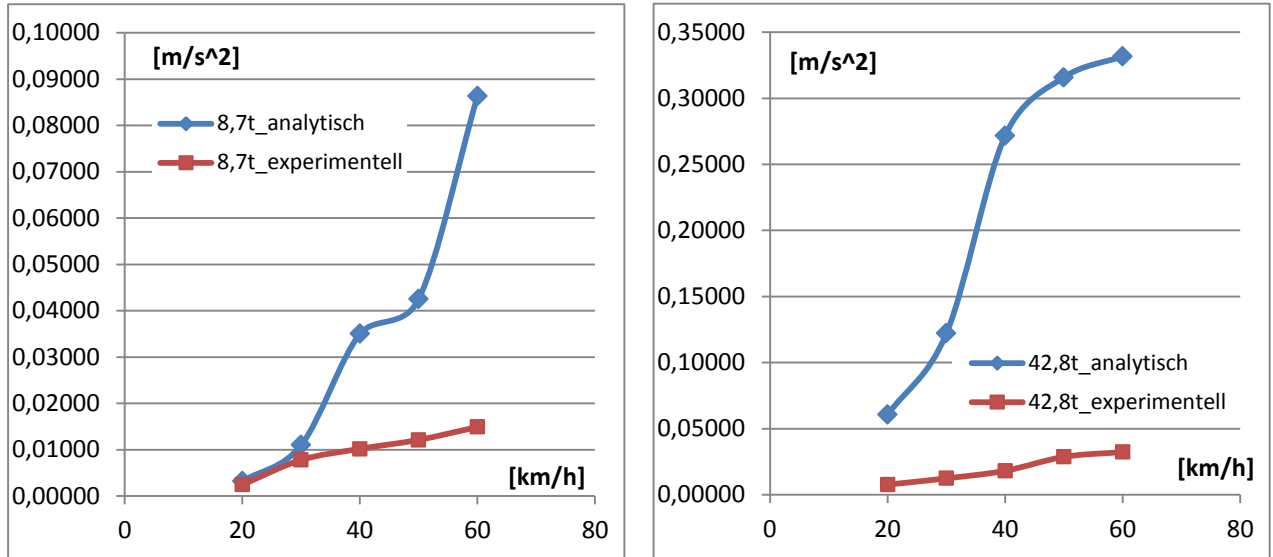


Bild 83: Grafischer Vergleich der analytischen und experimentellen BETRÄGE der Beschleunigungsbeiträge anhand der beiden Eichfahrzeuge mit 8,7t (links) sowie mit 42,8t (rechts) bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

ANALYTISCH			
	8,7 t LKW:	42,8 t LKW:	Amplitudenverhältnis
Geschwindigkeit	Beschleunigung	Beschleunigung	Voll vs. Leer:
[km/h]	[m/s^2]	[m/s^2]	[]
20	0,00315	0,06064	19,234
30	0,01095	0,12213	11,151
40	0,03496	0,27179	7,773
50	0,04247	0,31589	7,438
60	0,08626	0,33174	3,846

EXPERIMENTELL			
	8,7 t LKW:	42,8 t LKW:	Amplitudenverhältnis
Geschwindigkeit	Beschleunigung	Beschleunigung	Voll vs. Leer:
[km/h]	GEGLÄTTET [m/s^2]	GEGLÄTTET [m/s^2]	[]
20	0,00243	0,00765	3,149
30	0,00777	0,01240	1,596
40	0,01018	0,01810	1,779
50	0,01211	0,02867	2,367
60	0,01489	0,03231	2,170

Tabelle 20: Gegenüberstellung der analytischen und experimentellen BETRÄGE der Vertikal-Beschleunigungen für die beiden Eichfahrzeuge mit 8,7t (links) sowie mit 42,8t (rechts) bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Leer-LKW (8,7 t): Amplitudenverhältnis (Analytisch / Experimentell)	Voll ausgelasteter LKW (42,8 t): Amplitudenverhältnis (Analytisch / Experimentell)
1,29722	7,92471
1,40964	9,84909
3,43586	15,01371
3,50624	11,01752
5,79506	10,26822

Tabelle 21: Numerischer Vergleich der Relation der analytischen und experimentellen BETRÄGE der Beschleunigungsbeiträge anhand der beiden Eichfahrzeuge mit 8,7t (links) sowie mit 42,8t (rechts) bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

- In Bezug auf die größeren rechnerischen Beträge der Beschleunigungen (**Tabelle 20** oben) gegenüber den gemessenen (**Tabelle 20** unten) ist zunächst anzumerken, dass den Kurven des Feldversuchs ein Glättungs-Intervall von 1 sec zugrunde liegt (mit Glättung ist die Bildung eines gleitenden Durchschnitts über 100 Abtastwerte gemeint), während für das Rechenmodell Beschleunigungs-Absolutwerte vorliegen. Dies bedeutet, dass zwischen Beschleunigungs-Rohsignal und den aus dem DYGES-Prozess stammenden „geglätteten“ Beschleunigungen zwangsläufig ein systematischer Amplitudenunterschied auftritt. Diese Reduktion des Amplitudenbeitrags ist natürlich geschwindigkeitsabhängig, lässt sich aber anhand des gängig auftretenden LKW-Kollektivs in einer Spanne mit den Faktoren 30 bis 60 quantifizieren.
- Dennoch liegen an sich relativ niedrige Beschleunigungswerte des Rechenmodells vor, der Grund dafür im Folgenden erörtert:
Durch die Implementierung lokaler, modaler Parameter in ein globales Brückenmodell (im Zuge der aneinander angeglichenen modalen Eigenschaften der realen Struktur und des Ersatzsystems) - bei Befahren mit der gleichen LKW-Last - liegt ein rechnerisch faktisch 5,5-fach steiferes Brückenmodell gegenüber der zu erwartenden Größenordnung vor. Diese Tatsache lässt sich anhand des Unterschiedes zwischen dem für die globale Brücken-Grundschiwingung mit $100/L (=3,70 \text{ Hz})$ abgeschätzten ω_1 und dem tatsächlichen $\omega_1 = 8,64 \text{ Hz}$ des Brückenkragarmes sowie dem quadratischen Einflusses der Eigenfrequenzen auf die rechnerische Biegesteifigkeit erklären. Das heißt, dass der dominante Frequenzbereich lokal größer ist als der globale. Um eine tatsächliche Vergleichbarkeit der Absolut-Werte zu erzielen, wären die analytischen Beschleunigungs-Werte als Reaktion des rechnerisch steiferen Systems (**Tabelle 20** oben) also zusätzlich mit dem Faktor 5,5 zu multiplizieren.
- Eine Anwendung auf die bisherigen Beträge der auftretenden Amplitudenrelation gemäß **Tabelle 21** würde schließlich Abweichungen von bis zu Faktor 32 (8,7 t) bzw. von bis zu Faktor 83 (42,8 t) bedingen. Dies würde dann bereits hinreichend genau der im obigen Absatz angeführten Größenordnung vor der sich einstellenden Folgewirkung aus der

Signalglättung entsprechen. Dadurch wäre auch quantitativ eine bereits hinreichend gute Übereinstimmung zwischen den beiden Tragsystemen erreicht.

- Wie bereits beim Vergleich der analytischen und experimentellen Vertikal-Verschiebungsbeträge (**Abschnitt 5.6.1**) ist auch hier festzuhalten, dass die experimentelle Kurve für das Leerfahrzeug eine größere Schwankungsbreite als die des voll beladenen LKW aufweist (**Tabelle 20**), was auf den stärkeren Einfluss der Fahrzeugdynamik (dynamische Wechselwirkung des Fahrzeuggestells mit der befahrenen Struktur) zurückzuführen sein dürfte. Durch die Mess-Signalglättung wird dieser Effekt aber natürlich deutlich gegenüber den Rechenwerten reduziert.
- Der implizit enthaltene Einfluss der Signalglättung in den Messungs-basierten Ergebnissen ist der Grund, dass letztlich von einem vollständig numerischen Vergleich der Absolut-Werte der Beschleunigungen abgesehen wird, wie dies im **Abschnitt 5.6.1** noch der Fall war.

5.6.3 Abweichungen in der Verschiebungs-/Geschwindigkeitscharakteristik für einen hypothetischen 25t LKW – hergeleitet anhand der durch die beiden Eichfahrzeuge gegebenen Grenzkurven

Die Unterschiedlichkeit der Verlaufsfunktionen zwischen Leer-LKW und voll ausgelastetem Fahrzeug (**Bild 22** infolge Feldversuch) sowie **Bild 72 & Bild 73** (analytisch verifiziert) legt einen allmählichen Übergang für die Raumfunktion zwischen den beiden Grenzfällen nahe, um das LKW-Belastungskollektiv dazwischen abzubilden (wie es bei der experimentellen DYGES Entwicklung erfolgt ist). Es wird angenommen, dass dieser Bereich durch das gewählte Vorgehen und ohne Detailkenntnis durch weitere Eichfahrzeuge (mit gestaffelt veränderten Tonnagen) hinreichend genau abgebildet wurde.

Um die Größenordnung der Modellierungsgenauigkeit zu erfassen, wenn von einem der beiden Grenzfälle auf das gesamte Belastungskollektiv geschlossen würde, wird die Überlegung eines Schwerfahrzeugs „mittlerer Tonnage“, d.h. mit **25,0t** angesetzt.

In weiterer Folge wird weiterhin auf das Modell fahrende Einzellast zurückgegriffen unter Zugrundelegung all jener Annahmen, die zu den Ergebnissen in **5.5.1** geführt haben. Der einzige Unterschied in den Eingangsgrößen wird durch eine skalare Anpassung der Eingangskomponenten u_0 infolge der gleichförmig vergrößerten Belastung von **8,7t** auf **25,0t** einerseits bzw. infolge der gleichförmig verkleinerten Belastung von **42,8t** auf **25,0t** andererseits vorgenommen.

Von einer Darstellung der einzelnen modalen Beiträge wird neuerlich abgesehen, sodass unmittelbar die superponierten Ergebnisse dargelegt und diskutiert werden.

25t-LKW (infolge 8,7 t Ansatz):

		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	3,733
30	8,3	3,745
40	11,1	3,705
50	13,9	3,698
60	16,7	3,659

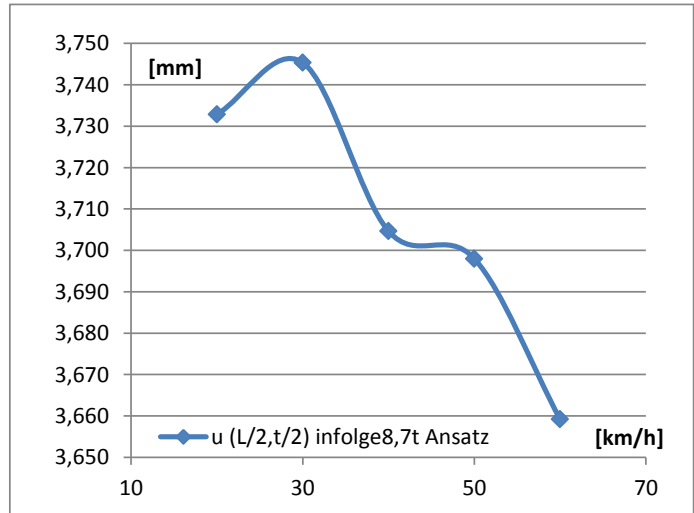


Bild 84: Superponierte Verschiebungsbeiträge infolge ω_{1-7} für einen fiktiven 25 t LKW auf Grundlage des rechnerischen Ansatzes für das Eichfahrzeug $p_0 = 85,4$ t bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

25t LKW (infolge 42,8 t Ansatz):

		[mm]
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t)
20	5,6	2,970
30	8,3	2,997
40	11,1	2,940
50	13,9	2,934
60	16,7	2,931

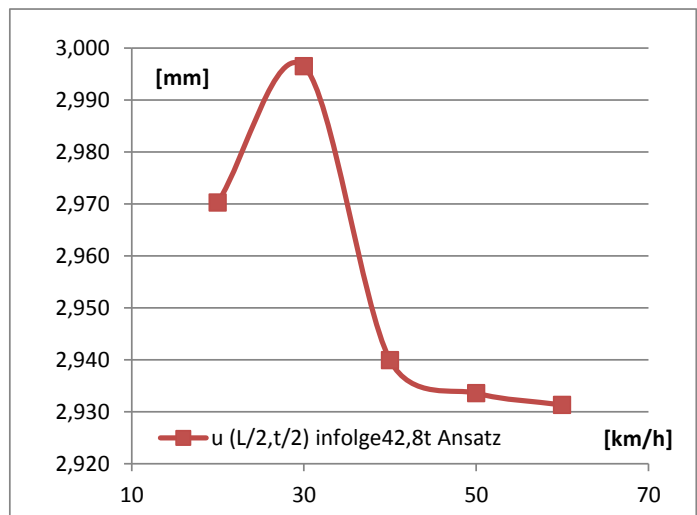


Bild 85: Superponierte Verschiebungsbeiträge infolge ω_{1-7} für einen fiktiven 25 t LKW auf Grundlage des rechnerischen Ansatzes für das Eichfahrzeug $p_0 = 419,9$ t bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

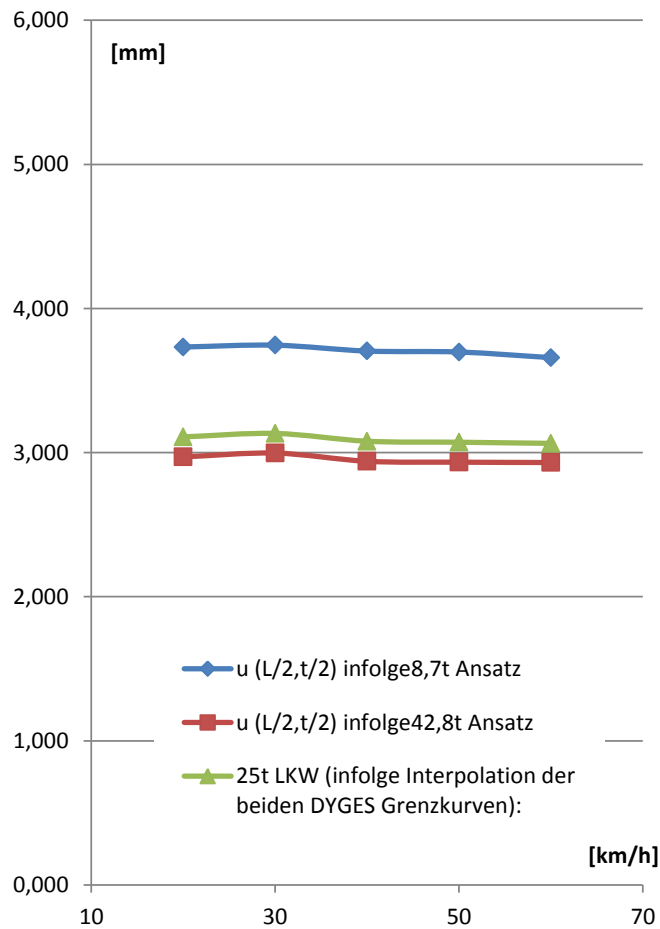


Bild 86: Vergleich der analytischen Verschiebungsbeiträge eines fiktiven 25t LKW auf Grundlage der rechnerischen Ansätze für die beiden Eichfahrzeuge - mit dem experimentellen Verlauf aus der linearen Interpolation zwischen den gemessenen Grenzkurven für $p_0 = 85,4 \text{ t}$ & $p_0 = 419,9 \text{ t}$

Wie **Bild 86** entnommen werden kann, führt das Hochskalieren der rechnerischen Tragwirkung des 2-achsigen LKWs zu größeren Verschiebungsbeträgen als das Herunterskalierten der rechnerischen Tragwirkung des 5-achsigen LKWs (größere Verteilungswirkung, kleinere Maximalverformung). Die Reihenfolge der Eichkurven im Vergleichsdiagramm wird daher vertauscht (d.h. größere rechnerische Verformungen infolge des Ansatzes $p_0 = 85,4\text{t}$ gegenüber dem Ansatz $p_0 = 419,9\text{t}$).

		25t LKW		
		infolge DYGES	infolge "8,7t Ansatz"	infolge "42,8t Ansatz"
v [km/h]	v [m/s]	u (L/2,t) [mm]	Δ [%]	Δ [%]
20	5,6	3,109	20,1	-4,5
30	8,3	3,133	19,5	-4,4
40	11,1	3,079	20,3	-4,5
50	13,9	3,072	20,4	-4,5
60	16,7	3,064	19,4	-4,3

Tabelle 22: Gegenüberstellung der Ergebnisse für analytische und experimentelle Vertikal-Verschiebungen eines fiktiven 25t LKWs bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Der abschließende numerische Vergleich in **Tabelle 22** zeigt nun auf, dass man bei einer Übertragung der Eichkurve des 2-achsigen Fahrzeuges auf das vorherrschende LKW-Belastungskollektiv einen deutlich größeren Modellierungsfehler gegenüber DYGES machen würde (Abweichungen in der Größenordnung von + 20 %) als bei Heranziehen der Eichkurve des 5-achsigen Fahrzeuges auf die anderen LKW-Kategorien (Abweichungen in der Größenordnung – 5 %). Da sich das reale Schwerverkehrsaufkommen in der Verteilung der Häufigkeit seines Auftretens nachweislich sehr stark am höheren Tonnagen-Bereich orientiert (rund 38% des auftretenden Verkehrs stammen aus der Kategorie $\geq 42,8$ t; in die Kategorie $\leq 8,7$ t fallen nur rund 22%, in die Kategorien dazwischen gestaffelt 4,5-7%), wäre ein generalisiertes Heranziehen der Eichkurve für den 5-Achser mit vergleichsweise geringeren Abweichungen gegenüber der Realität verbunden.

5.6.4 Abweichungen in der Beschleunigungs-/Geschwindigkeitscharakteristik für einen hypothetischen 25t LKW – hergeleitet anhand der durch die beiden Eichfahrzeuge gegebenen Grenzkurven

Wie für die Zustandsgröße Vertikal-Verschiebungen legt auch die gemessene Charakteristik der Verlaufsfunktionen für die Zustandsgröße Vertikal-Beschleunigungen zwischen Leer-LKW und voll ausgelastetem Fahrzeug (**Bild 30** infolge Feldversuch sowie **Bild 78 & Bild 79** - analytisch verifiziert) einen allmählichen Übergang für die Raumfunktion zwischen den beiden Grenzfällen nahe, um das LKW-Belastungskollektiv dazwischen abzubilden. Es wird angenommen, dass dieser Bereich durch das bei der DYGES-Entwicklung gewählte Vorgehen und ohne Detailkenntnis durch weitere Eichfahrzeuge (mit gestaffelt veränderten Tonnagen) hinreichend genau abgebildet wurde.

Identisch zum Abschnitt zuvor wird zur Erfassung der Größenordnung der Modellierungsgenauigkeit, wenn von einem der beiden Grenzfälle auf das gesamte Belastungskollektiv geschlossen würde, das Schwerfahrzeug „mittlerer Tonnage“, d.h. mit **25,0 t** angesetzt.

Sinngemäß zu Kapitel **5.6.3** wird auch hier auf das Modell fahrende Einzellast zurückgegriffen - unter Zugrundelegung all jener Annahmen, die zu den Ergebnissen in **5.5.2** geführt haben, bevor auch hier eine skalare Anpassung der Eingangskomponenten u_0 infolge der gleichförmig vergrößerten Belastung von **8,7t** auf **25,0t** einerseits bzw. infolge der gleichförmig verkleinerten Belastung von **42,8t** auf **25,0t** andererseits vorgenommen wurde.

Von einer Darstellung der einzelnen modalen Beiträge wird neuerlich abgesehen, sodass unmittelbar die superponierten Ergebnisse dargelegt und diskutiert werden.

25t-LKW (infolge 8,7 t Ansatz):			
			[m/s ²]
p_0 [kN]	v [km/h]	v [m/s]	u'' (L/2,t/2)
85,35	20	5,6	0,00906
85,35	30	8,3	0,03147
85,35	40	11,1	0,10047
85,35	50	13,9	0,12203
85,35	60	16,7	0,24787

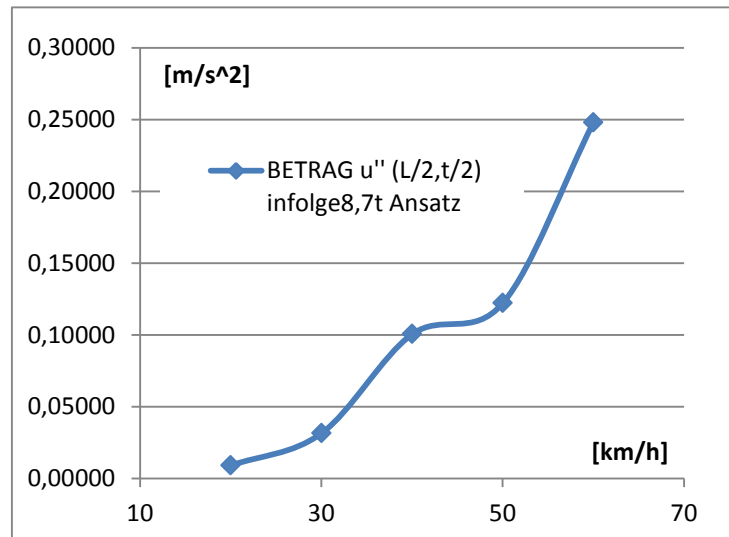


Bild 87: Superponierte BETRÄGE der Beschleunigungsbeiträge infolge ω_{1-7} für einen fiktiven 25 t LKW auf Grundlage des rechnerischen Ansatzes für das Eichfahrzeug 8,7t bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

25t LKW (infolge 42,8 t Ansatz):			
			[m/s ²]
p_0 [kN]	v [km/h]	v [m/s]	u'' (L/2,t/2)
419,87	20	5,6	0,03542
419,87	30	8,3	0,07134
419,87	40	11,1	0,15876
419,87	50	13,9	0,18451
419,87	60	16,7	0,19377

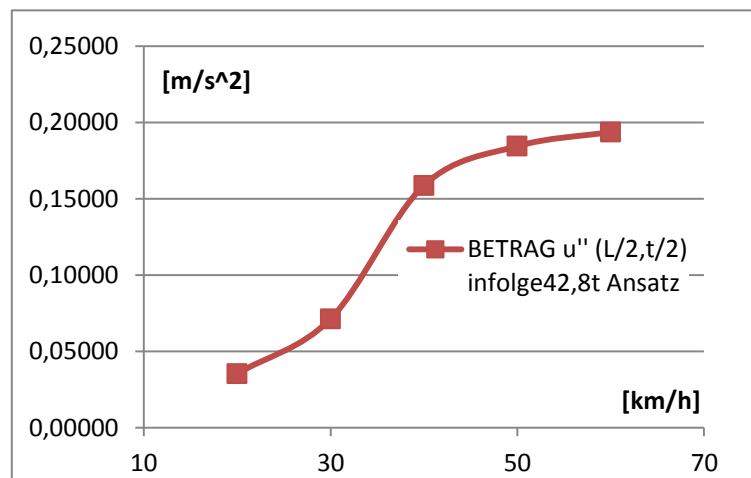


Bild 88: Superponierte BETRÄGE der Beschleunigungsbeiträge infolge ω_{1-7} für einen fiktiven 25 t LKW auf Grundlage des rechnerischen Ansatzes für das Eichfahrzeug 42,8t bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

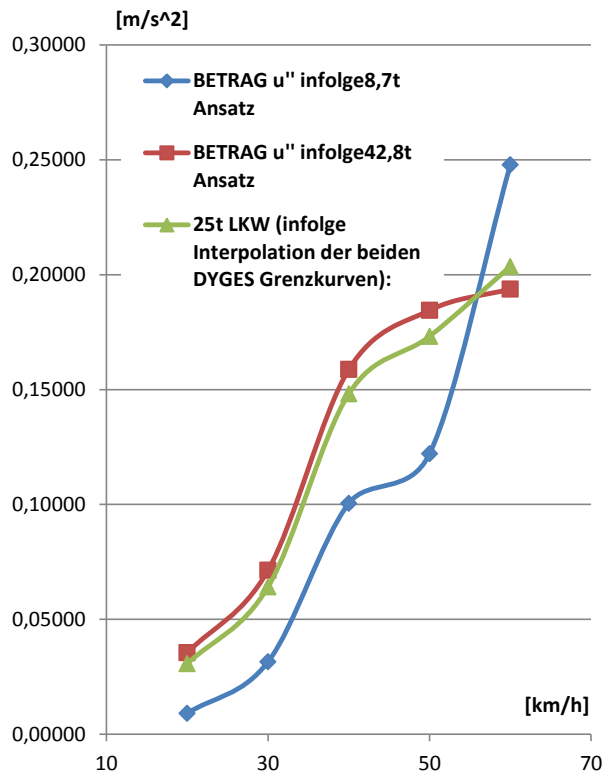


Bild 89: Vergleich der BETRÄGE der analytischen Beschleunigungsbeiträge eines fiktiven 25t LKW auf Grundlage der rechnerischen Ansätze für die beiden Eichfahrzeuge - mit dem experimentellen Verlauf aus der linearer Interpolation zwischen den gemessenen Grenzkurven 8,7 t & 42,8 t

Wie bereits bei der Untersuchung der Verschiebungen unter fahrender Einzellast kann auch dem **Bild 89** entnommen werden, dass das Hochskalieren der Tragwirkung des 2-achsigen LKWs zu einer größeren Veränderung der rechnerischen Beschleunigungsbeträge führt als das Herunterskalierten der rechnerischen Tragwirkung des 5-achsigen LKWs. Die Reihenfolge der Eichkurven im Vergleichsdiagramm bleibt aber im Gegensatz zu den Verformungen (**Bild 86**) bis auf jenen Punkt mit dem größten Geschwindigkeitseinfluss unverändert. Der Unterschied zwischen den ursprünglichen Verläufen für $p_0 = 85,4 \text{ kN}$ (= 8,7t) bzw. $p_0 = 419,9 \text{ t}$ (= 42,8t) war für die Zustandsgröße Beschleunigungen deutlich größer als für Verformungen, was sich auch leicht anhand eines Vergleiches der erfassten Amplitudenverhältnisse in **Tabelle 18** bzw. **Tabelle 20** nachprüfen lässt.

		25t LKW		
		infolge DYGES	infolge "8,7t Ansatz"	infolge "42,8t Ansatz"
v [km/h]	v [m/s]	u'' (L/2,t/2) [m/s ²]	Δ [%]	Δ [%]
20	5,6	0,03063	-70,4	15,6
30	8,3	0,06409	-50,9	11,3
40	11,1	0,14817	-32,2	7,1
50	13,9	0,17316	-29,5	6,6
60	16,7	0,20360	21,7	-4,8

Tabelle 23: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die BETRÄGE der analytische und experimentelle Vertikal-Beschleunigungen eines fiktiven 25t LKWs bei variabler Überfahrtsgeschwindigkeit

Der abschließende numerische Vergleich in **Tabelle 23** zeigt neuerlich auf, dass man bei einer Übertragung der Eichkurve des 2-achsigen Fahrzeuges auf das vorherrschende LKW-Belastungskollektiv einen deutlich größeren Modellierungsfehler gegenüber DYGES machen würde (Abweichungen in der Größenordnung von + 22 bis -70 %) als bei Heranziehen der Eichkurve des 5-achsigen Fahrzeuges auf die anderen LKW-Kategorien (Abweichungen in der Größenordnung von +16 % bis -5 %). Die auftretenden, betragsmäßigen Abweichungen fallen bei der Betrachtung von Beschleunigungen auch deutlich größer aus, als dies bei der Betrachtung von Verformungen der Fall war. Ursache ist das gerade eben angeführte rechnerische Amplitudenverhältnis zwischen 2- und 5-achsigen LKW, welches für Beschleunigungen deutlich größer als für Verformungen ist (siehe **Tabelle 18** bzw. **Tabelle 20**). Da sich das reale Schwerverkehrsaufkommen in der Verteilung der Häufigkeit seines Auftretens nachweislich sehr stark am höheren Tonnagen-Bereich orientiert (rund 38% des auftretenden Verkehrs stammen aus der Kategorie $\geq 42,8$ t; in die Kategorie $\leq 8,7$ t fallen nur rund 22%, in die Kategorien dazwischen gestaffelt 4,5-7%) gilt auch für die Zustandsgröße Beschleunigungen, dass ein generalisiertes Heranziehen der Eichkurve für den 5-achsigen LKW zumindest mit deutlich geringeren Abweichungen gegenüber der Realität verbunden wäre, auch wenn die Schwankungsbreite dabei bereits deutlich größer und daher unzuverlässigere Ausmaße hinsichtlich einer Verwertung der Ergebnisse annehmen würde als zuvor in **Abschnitt 5.6.3**.

5.6.5 Einfluss der Spurtreue des Schwerververkehrs am 1. Fahrstreifen (LKW-Spur)

Im aktuellen Abschnitt wird der Frage nachgegangen, welche rechnerischen Auswirkungen ein Abweichen von der idealisierten Vorstellung des zentrischen Befahrens der Fahrspur von einem Schwerfahrzeug prinzipiell haben kann und welche Schwankungsbreite dabei unter Umständen auftreten kann.

Dazu wird das bereits mehrfach für verschiedene Sachverhalte erstellte FE-Modell jenes Brückensegmentes herangezogen, welches den Bereich über dem Pfeiler II repräsentiert (siehe **Bild 91**). Ausgehend von der erwähnten, zentrischen Lage des Befahrens, der verfügbaren Fahrspurbreite sowie der Fahrzeugbreite bzw. des Achsmaßes der Räder (unter Vernachlässigung der genauen Radaufstandsfläche) wird der maximal mögliche Versatz in Fahrbahn-Querrichtung für beide Eichfahrzeuge modelliert und rechnerisch bewertet (siehe jeweils **Bild 90**).

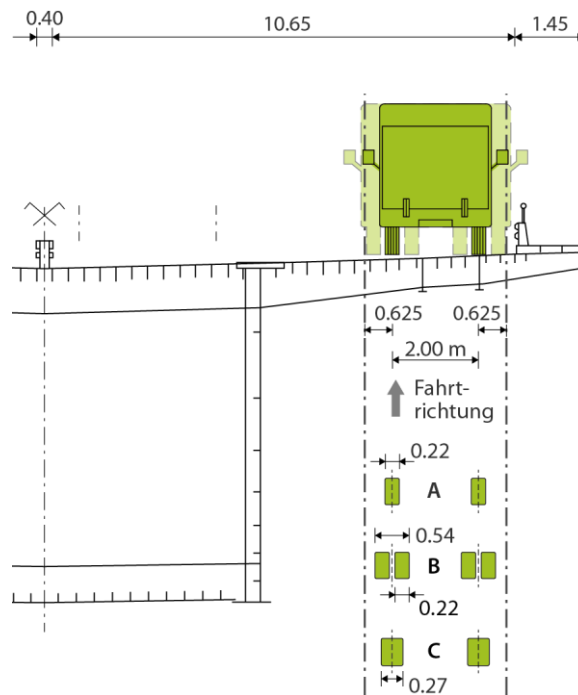


Bild 90: Detailgeometrie zur äußersten, LKW-relevanten Fahrspur innerhalb des Regelquerschnittes sowie die je nach Reifen-/Achsart ausgebildete Doppelachsen aus [40] & [41]

Für die FE-Berechnung ergeben sich dadurch in Bezug zum Referenzlastfall „zentrisches Befahren“ zwei Grenzfälle, welche sich aus dem maximal möglichen Querversatz in Richtung Fahrbahnmitte einerseits bzw. in Richtung Fahrbahnrand andererseits ergeben (ergibt einen potentiellen, rechnerischen Versatz von +/- 0,625m; siehe **Bild 91**). Wie sich gezeigt hat, entspricht das reale mechanische Verhalten des Tragsystems unter LKW-Überfahrt bekanntlich jenem infolge einer fahrenden Einzellast. Aus diesem Grund wird bei der aktuellen Betrachtung

des Einflusses der Spurtreue von der Analyse von Einflussflächen abgesehen und stattdessen ein einzelner Punkt (= FE-Knoten) im Sinne des Sensor-Standortes am DYGES-Messquerschnitt betrachtet. Die **Tabelle 24** nimmt daher auch entsprechenden Bezug auf diese Einzelpunktbetrachtung.

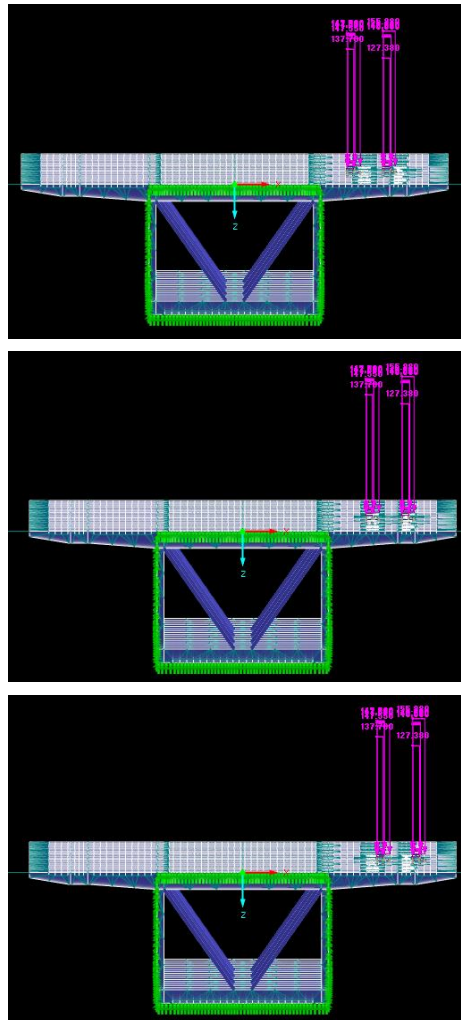


Bild 91: Der rechnerische Referenz-Lastfall des die äußerste Fahrspur zentrisch befahrenden Eichfahrzeuges 42,8t (Mitte) sowie die beiden Grenzfälle infolge Spurabweichung nach innen (oben) bzw. nach außen (unten)

Wie der abschließende numerische Vergleich in **Tabelle 24** zeigt, birgt eine rechnerische Berücksichtigung der variablen Spurtreue für das 2-achsige Eichfahrzeug potentielle Abweichungen in der Größenordnung von -23,1 bis + 30,8 % in sich. Bei Betrachtung des 5-achsigen Eichfahrzeuges treten mögliche rechnerische Abweichungen in der Größenordnung von -23,5 bis + 25,5 % auf.

	Rechnerische Evaluierung am Knoten Nr. 436					
	Referenzlastfall LKW-Achse = Spurachse		Lastfall "max. Spurfehler in Richtung Fahrbahnmitte"		Lastfall "max. Spurfehler in Richtung Fahrbahnrand"	
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
Eichfahrzeug 8,7 t	1,3	100	1,0	-23,1	1,7	30,8
Eichfahrzeug 42,8 t	5,1	100	3,9	-23,5	6,4	25,5

Tabelle 24: Vergleich der Ergebnisse des idealen (zentrischen) Befahrens der LKW-Spur mit den beiden Grenzfällen zur Abbildung der maximalen Schwankungsbreite anhand der beiden Eichfahrzeuge

5.6.6 Einfluss der Nebenspur (2.Fahrsstreifen) auf den DYGES-Messquerschnitt

Im Folgenden soll verifiziert werden, inwiefern das Verkehrsaufkommen auf der 2.Fahrspur das Kragarmverhalten beeinflusst. Hintergrund ist natürlich die Klärung der Frage, ob durch dieses parallele Belastungsaufkommen unmittelbar neben der instrumentierten LKW-Fahrspur die Ergebnisse der Dynamischen Gewichtserfassung ggf. verfälscht werden könnten.

Zunächst sei dazu auf **Bild 90** verwiesen, aus welchem bereits ersichtlich wird, dass jene Fahrzeuge, welche die 2.Fahrspur befahren, mit einer Hälfte der Doppelachsen-Lasten faktisch direkt über dem Hauptträger fahren, wodurch der etwaige Einfluss von solcher Herkunft bereits von vornherein auf rund 50% reduziert wäre.

In weiterer Folge wird nun auf **Kapitel 13.2** sowie insbesondere auf **Kapitel 18** zurückgegriffen und dabei von der Tatsache Gebrauch gemacht, dass dort sämtliche, tatsächlich im Feldversuch identifizierten und gezählten Lastkonfigurationen vorliegen. Daher wurden jene Belastungsszenarien, welche für den aktuellen Zusammenhang maßgeblich sind, aus dem gesamten Belastungskollektiv herausgelöst und – abgestuft nach deren Auftretenshäufigkeit - in **Tabelle 25** eingetragen. Wie an dieser tabellierten Zusammenstellung zu sehen ist, ist die Einbeziehung weiterer Lastbilder - aufgrund der jeweils in der letzten Zeile eingetragenen, bereits verschwindend geringen Beträge – ohne Bedeutung.

Richtungsfahrbahn Innsbruck (RFBI)			Richtungsfahrbahn Brenner (RFBB)		
Szenario Nr.	Merkmal des realen Lastbildes	Auftretenshäufigkeit	Szenario Nr.	Merkmal des realen Lastbildes	Auftretenshäufigkeit
32	1 LKW RFBI von Bus überholt	0,40%	18	2 LKWs RFBB sich überholend	0,41%
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt	0,40%	54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,21%
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0,13%	33	1 LKW RFBB von Bus überholt	0,19%
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0,12%	36	2 LKWs RFBB von Bus überholt	0,13%
19	2 LKWs RFBI sich überholend	0,09%	34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt	0,01%
SUMME		1,14%	SUMME		0,95%

Tabelle 25: Auszug aus der Häufigkeitszählung und Klassifizierung der realen Belastungsszenarien – mit Nebenspureinfluss – für die Richtungsfahrbahn Innsbruck (links) & die Richtungsfahrbahn Brenner (rechts)

Wie die vorangehende Aufstellung zeigt, repräsentiert die Akkumulation der 5 häufigsten und einzig maßgeblichen Lastbilder, bei denen auch ein Einfluss infolge 2.Fahrspur festgehalten werden kann, pro Fahrtrichtung nur rund 1% des gesamten Belastungsgeschehens. Unter gleichzeitiger Berücksichtigung der obigen Argumentation (die Hälfte der Achslasten tritt direkt über Hauptträger auf) – und verglichen mit den anderen, im aktuellen Kapitel diskutierten, potentiellen Modellierungsunsicherheiten - kann daher ein etwaiger Einfluss des Schwerverkehrs auf der Nebenspur auf den DYGES-Prozess als vernachlässigbar angesehen werden.

5.6.7 Einfluss des Belastungsgeschehens der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn

Auf Grundlage von Finite Elemente Analysen (**Kapitel 3.3.1**) sowie insbesondere infolge intensiver Sichtung der verfügbaren Messdaten wurde bisher prinzipiell argumentiert, dass der Einfluss der indirekten Lasteinwirkung (Schwerverkehr auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn) vernachlässigbar ist. Die Größenordnung der auftretenden Verschiebungs- bzw. Beschleunigungsamplituden lag dabei im Bereich der Messgenauigkeit bzw. unterhalb des im DYGES-Algorithmus definierten Schwellenwertes (Triggerkriterium), welcher im Zuge der Identifikation & Charakterisierung von Schwerverkehrsüberfahrten implementiert wurde.

Im Rahmen der vorliegenden Studie von potentiellen Modellunsicherheiten sollte dieser Frage nochmals für beide Eichfahrzeuge anhand jeweils zweier Grenzfälle nachgegangen werden. Für jedes der beiden Eichfahrzeuge mit bekannter Last (= Grenz-Tonnagen des DYGES-Algorithmus) wurde auf der Gegenseite das zeitsynchrone Auftreten derselben zwei Einwirkungs-Grenzwerte angesetzt, um die Spanne des Einflusses beziffern zu können (**Bild 92**).

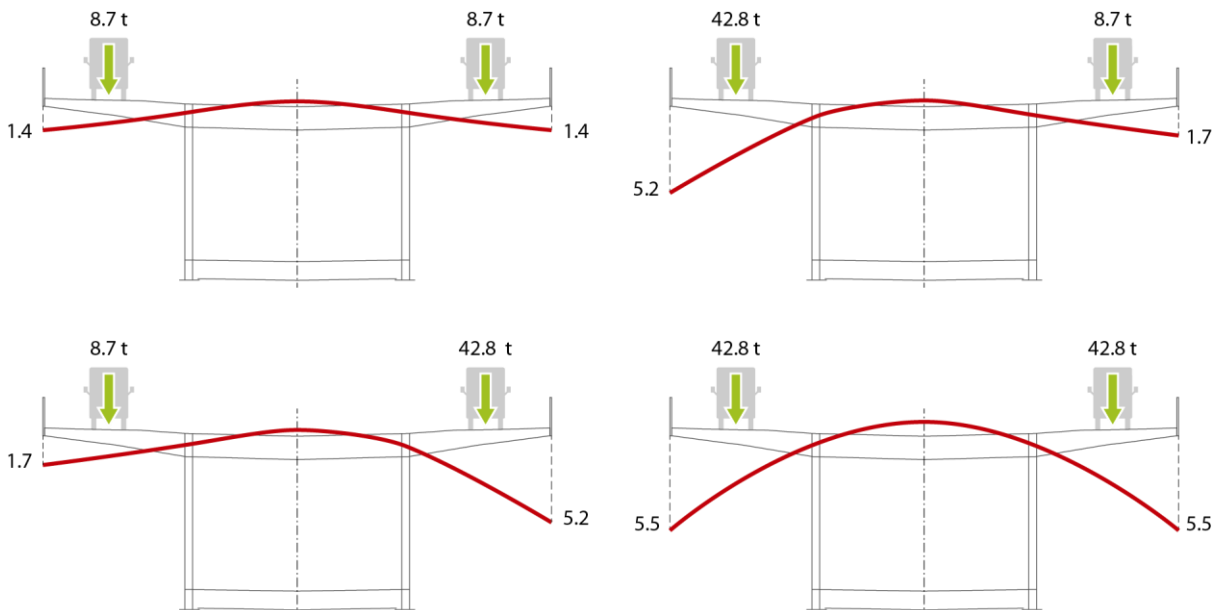


Bild 92: Direkte Belastung durch eines der beiden Eichfahrzeuge und Wechselwirkung zu den Grenzfällen (indirekte Belastung derselben Eichfahrzeuge) auf der gegenüberliegenden RFB: Rechnerische Referenz-Lastfälle Eichfahrzeug 8,7t (links) & 42,8t (rechts)

Zur Quantifizierung wurde wiederum auf das laufend hinzugezogene FE-Brückensegment (siehe **Bild 63**) zurückgegriffen und vereinfachender Weise die quasi-statischen Auslenkungen daraus

entnommen. Wie bereits im Abschnitt 5.6.5 erfolgte auch hier eine Einzelpunktbetrachtung (ein maßgeblicher FE-Knoten) im Sinne des Sensor-Standortes am DYGES-Messquerschnitt.

Angesetztes Szenario auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn				
Eichfahrzeug 8,7 t			Eichfahrzeug 42,8 t	
Kragarmbetrachtung für	[mm]	[%]	[mm]	[%]
Eichfahrzeug 8,7 t	1,3 + 0,1	+ 7,7	1,3 + 0,4	+ 30,8
Eichfahrzeug 42,8 t	5,1 + 0,1	+ 2,0	5,1 + 0,4	+ 7,8

Tabelle 26: Bewertung der Ergebnisse infolge direkter Lasteinwirkung (Belastungs-Ursprung rot markiert) bzw. Überlagerung mit den Ergebnissen infolge indirekter Lasteinwirkung (Belastungs-Ursprung blau markiert)

Wie der abschließende numerische Vergleich in **Tabelle 26** zeigt, birgt eine rechnerische Berücksichtigung des Belastungsgeschehens auf der Gegenfahrbahn potentielle Abweichungen in der Größenordnung von +7,7 bis +30,8 % für am DYGES Messquerschnitt erfasste Schwerfahrzeuge niedriger Tonnagen (2-achsiges Eichfahrzeug) in sich. Bei Betrachtung von Schwerfahrzeugen mit hohen Tonnagen am DYGES Messquerschnitt (5-achsiges Eichfahrzeug) treten mögliche rechnerische Abweichungen in der Größenordnung von +2,0 bis +7,8 % auf.

5.7 Zusammenfassung

Der Kern der vorliegenden Dissertation ist bekanntlich, das - anhand des sekundären Tragsystems Brückenkragarm - neu entwickelte Dynamischen Gewichtserfassungssystem DYGES. Im **Kapitel 3** wurde DYGES vom Autor auf Grundlage eines rein experimentellen Vorgehens detailliert dargelegt und erläutert sowie die Ergebnisse - zunächst für sich betrachtet – umfassend diskutiert.

Das Ansinnen des vorliegenden Hauptkapitels war es nun, den nachweislich funktionierenden experimentellen Prozess der Lasterkennung vollständig analytisch zu hinterlegen.

- ❖ Wie gezeigt wurde, konnten die stellvertretend für die entwickelte Dynamische Gewichtserfassung stehenden Grenzkurven aus dem Feldversuch anhand der Implementierung von möglichst vielen, bekannten Charakteristika des untersuchten (realen) Tragsystems in das herangezogene mechanische Vergleichsmodell sehr gut „gefittet“ werden (curve-fitting). Diese Implementierung anstatt des Treffens von Annahmen hat sich als großer Vorteil erwiesen. Der Konnex zur Analyse des realen Verhaltens wurde dadurch ganz wesentlich verbessert. Gleichzeitig wurden die Richtigkeit und Gültigkeit jedes - zuvor vorwiegend anhand experimenteller Einschätzungen – gesetzten Prozessschrittes vollständig bestätigt.
- ❖ Des Weiteren hat die angesprochene Implementierung realer Systemeigenschaften dazu geführt, dass sich die vereinfachte mechanische Modellierung keineswegs als Nachteil erwiesen hat, sondern qualitativ hinreichend kompensiert wurde. Wie die Abschnitte **5.6.1** und **5.6.2** gezeigt haben, bleiben aber einer vollständigen, quantitativen Vergleichbarkeit im Sinne von Absolut-Werten dennoch gewisse Grenzen gesetzt.
- ❖ Die für die vorliegenden Vergleiche mitunter herangezogenen statischen Referenz-Lastfälle aus FE-Analysen stellen insofern keinerlei Vereinfachung der mechanischen Betrachtung dar, als die durch die Gleichungen **(33)** & **(39)** geschaffenen analytischen Grundlagen ebenso auf den Parameter der statischen Durchbiegung aufbaut. Daher bleibt die Vergleichbarkeit zwischen gemessenen und rechnerischen, dynamischen Output-Größen (letztere anhand der FE-basierten statischen Eingangsgrößen) in vollem Umfang gewahrt.

potentielle Schwankungsbreite des MODELLIERUNGSFEHLERS [%]							
Angesetzte Charakteristik	1 - feldriges Biegebalken Ersatzsystem analytische Nachrechnung				Finite Elemente Rechenmodell (Brückenrandfeld Schönberg)		
	DYGES Verschiebungen	DYGES Beschleunigungen (Näherung)	DYGES Verschiebungen hypothetischer 25tLKW	DYGES Beschleunigungen hypothetischer 25tLKW	Einfluß der Spurtreue	Einfluß der ggf. befahrenen Nebenfahrbahn	Einfluß der gegenüberliegenden Richtungs-fahrbahn
Eichfahrzeug 8,7 t	+ 20,3 / - 38,1	+ 6,3	+ 20,4 / + 19,4	+ 21,7 / - 70,4	+ 30,8 / - 23,1	vernachlässigbar	+ 30,8 / + 7,7
Eichfahrzeug 42,8 t	+ 1,5 / + 0,8	+ 37,6	- 4,3 / - 4,5	+ 15,6 / - 4,8	+ 25,5 / - 23,5	vernachlässigbar	+ 7,8 / + 2,0

Tabelle 27: Übersicht potentieller, rechnerischer Modellierungs-Unsicherheiten bei der Analyse des realen fahrenden Schwerverkehrs am DYGES-Messquerschnitt

Zusammenfassend und bezugnehmend auf **Tabelle 27** sind im Folgenden die wesentlichsten Erkenntnisse des aktuellen Abschnitts im Zusammenhang mit dem gesamten **Kapitel 5 zusammengestellt**:

- ❖ Wie sich im Zuge der intensiven Modellanpassungs-Analysen gezeigt hat, entspricht das reale Tragverhalten am Europabrücken-Brückenkragarm unter fahrender LKW-Last weitgehend der Reaktion infolge einer Einzellast und nicht der Reaktion infolge eines mehrachsigen LKWs.
- ❖ Im Wesentlichen wurde gezeigt, dass die analytisch herzuleitende Funktion auf einer modalen Partizipation der ersten vier ungeraden Kragarm-Modes beruht (die ersten vier geraden Modes partizipieren mit $\phi_n=0$ in Feldmitte, höhere Modes sind vernachlässigbar).
- ❖ Grundlage für die übereinstimmenden Ergebnisse aus Feldversuch und rechnerischer Analyse ist die ungleichmäßigen modale Partizipation der einzelnen Modes, d.h. man erhält für die besagten vier Modes eine jeweils unterschiedliche, iterativ ermittelte Komposition des Parameters ϕ_n - für das 8,7t Eichfahrzeug einerseits und für das 42,8t Eichfahrzeug andererseits.
- ❖ Des Weiteren wurde analytisch bestätigt, dass eine sehr spezifische Abhängigkeit des Verlaufs der Systemantwort von der Überfahrtsgeschwindigkeit vorliegt.
- ❖ Darauf aufbauend ergeben sich aufschlussreiche Details zur Charakteristik der dynamischen Vergrößerung, welche die Ergebnisse beider Eichfahrzeuge bestätigen.
- ❖ Zur Evaluierung der durch die beiden Eichfahrzeuge gegebenen Grenzfälle wurde anhand eines hypothetischen 25t LKW gezeigt, dass man bei einer Übertragung der Eichkurve des 2-achsigen Eichfahrzeuges (8,7t) auf das vorherrschende LKW-Belastungskollektiv einen deutlich größeren Modellierungsfehler gegenüber DYGES machen würde als bei Heranziehen der Eichkurve des 5-achsigen Eichfahrzeuges (42,8 t) für die anderen LKW-Kategorien. Der 25t LKW orientiert sich daher bereits sehr stark an der realen Charakteristik der hoch ausgelasteten Schwerverfahrzeuge.
- ❖ Der Einfluss der Spurtreue (**Kapitel 5.6.5**) kann als einzige implizierte Modellierungsunsicherheit angesehen werden, während im Zusammenhang mit den

anderen, in **Abschnitt 5.6** erörterten Aspekten vielmehr von Modellierungsgenauigkeit gesprochen werden sollte.

- ❖ Das Schwerverkehrsaufkommen auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn kann im Fall bestimmter Lastkonfigurationen beeinflussend wirken, wobei dieses Szenario eine vollkommene zeitliche Synchronität erfordern würde, da bei der Erfassung der potentiellen Schwankungsbreiten (**Tabelle 27**) von einer Überlagerung der Durchbiegungsmaxima ausgegangen wurde. Dieser Voraussetzung ein generalisiertes Auftreten zuzuschreiben erscheint unrealistisch, wodurch die zuvor bezifferte, potentielle Modellierungsungenauigkeit deutlich zu relativieren wäre.
- ❖ Eine Einflussnahme des Schwerverkehrsaufkommens der gegebenenfalls befahrenen Nebenspur kann hingegen als vernachlässigbar angesehen werden.

Dem Ansinnen, die bisher experimentell basierte DYGES-Methode analytisch zu erklären, wurde ausführlich Rechnung getragen, indem an einem Biegebalken-Ersatzsystem ein umfassendes Parameteridentifikations- und Vergleichsverfahren durchgeführt wurde. Der DYGES-Algorithmus kann durch das im vorliegenden **Kapitel 5** beschriebene Vorgehen als hinreichend mechanisch plausibilisiert erachtet werden.

Zur Fragstellung, was retrospektiv an Verbesserungen für eine neuerliche DYGES-Modellierung vorstellbar wäre, werden zwei Aspekte hervorgehoben:

- ❖ Anstatt der tatsächlich stattgefundenen zwei Durchläufe an geschwindigkeitsgesteuerten Überfahrten der Eichfahrzeuge wäre mindestens ein dritter Durchlauf wünschenswert, was zu einer verbesserten Verifizierung bzw. Stabilisierung der Verläufe der Eichkurven beitragen würde.
- ❖ Weiters würde bei freier Handhabe über den Einsatz von Eichfahrzeugen idealerweise zumindest ein drittes und viertes Eichfahrzeug eingesetzt werden. Dadurch würde der Bereich zwischen den beiden Grenzkurven (8,7t und 42,8t) - welche hier durch lineare Interpolation überbrückt wurde – vollständiger in Hinblick auf die Erfassung des realen Belastungskollektivs abgebildet werden.

Unter den vorliegenden Voraussetzungen bzw. mit den - dem Autor zur Verfügung stehenden – Möglichkeiten wurde letztlich dennoch ein gangbarer Weg eingeschlagen, was nicht zuletzt durch die gegebene Tendenz zu hoch ausgelasteten Schwerfahrzeugen begünstigt wurde.

Ein Stärken/Schwächen Profil des DYGES-Verfahrens an sich liegt durch eine entsprechende Erörterung und Darlegung ausgewählter Detailspekte in den **Kapiteln 3.5** und **3.7** vor.

5.7.1 Ausblick und Überleitung zu weiterführenden Kapiteln

Dem Autor ist es ein Anliegen aufzuzeigen, dass das vorgestellte DYGES-Verfahren von allgemeiner Gültigkeit ist und daher prinzipiell universell eingesetzt werden könnte. Im Falle eines Einsatzes anderorts wäre natürlich eine entsprechende Anpassung (Kalibrierung) an die neue, örtlich bedingte Situation erforderlich.

Mit der Gewissheit einer messtechnisch (**Kapitel 3**) und mechanisch (vorliegendes **Kapitel 5**) richtig modellierten Langzeitreihe des Belastungskollektivs sei nun an dieser Stelle auf jene maßgeblichen Abschnitte innerhalb dieser Dissertation verwiesen, welche – auf die vorliegenden Ergebnisse aufbauend – die weiterführenden Analyse und Verwertung der vorliegenden Ergebnisse zum Ziel haben:

- ❖ **Kapitel 4**, in dem vom Autor eine ausführliche Evaluierung der DYGES-Zählung & -Klassifizierung anhand externer Untersuchungen an der gleichen bzw. sehr ähnlicher Schwerverkehrs-Einwirkung vorgenommen wurde
- ❖ **Kapitel 6** bzw. insbesondere **Kapitel 13**, in welchem vom Autor
 - zunächst eine gegenüberstellende Analyse der realen Betriebsbeanspruchung anhand der drei - im Sinne der Lastabtragung - maßgeblicher Bauteilebenen vorgenommen wird. Durch Kopplung eines umfassenden, integralen Messprogramms verschiedenster Zustandsgrößen mit Finite Elemente Vergleichsrechnungen wurde ein vollständig bestimmter, in mehreren Ebenen jederzeit überprüfbarer Kontroll-Mechanismus geschaffen.
 - In weiterer Folge wurde ein in-situ basiertes Lastmodell als Eingangsgröße für baustatische Nachrechnungen entwickelt, indem im Feldversuch ermittelte, reale Lastbilder, die zugehörige, resultierende Tonnagen-Belastung (aus dem DYGES-LKW Kollektiv) sowie deren jeweilige Auftretens-Häufigkeit entsprechend verknüpft werden. Darauf aufbauend wird abschließend eine α -Wert äquivalente Betrachtung hinsichtlich der Bewertung der Tragsicherheit vorgenommen.

6 ANWENDUNG

Am vorliegenden Brückentragwerk hat sich die Betrachtung dreier maßgeblicher Bauteilebenen herauskristallisiert, deren Reihung sich aus der Bedeutung für die Lastabtragung ergibt. Diese Gliederung resultierte in jeweils ergänzend durchgeführten messtechnischen Sonderuntersuchungen (Instrumentierung verschiedenster Messstellen) deren Grundgedanken in der nachfolgenden Auflistung beinhaltet sind:

- **Bauteilebene I** – Das **Tragverhalten der primären, lastabtragenden Struktur (Haupttragwerk)** in Bezug auf den Schwerverkehr (basierend auf Laser-Verformungsmessungen in den Brückenfeldern II & V)
- **Bauteilebene II** – Das **Verhalten der Querrahmen unter besonderer Berücksichtigung der Kragarme**. Grundlage ist die messungsbasierte, permanente dynamische Gewichtserfassung DYGES (Messquerschnitt an den Brücken-Kragarmen über dem Pfeiler II) zur Tonnagen-Klassifizierung des Schwerverkehrs für die Fahrtrichtung Innsbruck
- **Bauteilebene III** – Das **Verhalten der maßgeblichen lokalen Systeme**, im vorliegenden Fall das der oberen und unteren **Montageanschlüsse der Diagonal-Streben** an die Fahrbahn- und Bodenplatte (Verifizierung der realen Beanspruchung in einem ausgewählten Querverband des Randfeldes V durch Dehnungsmessungen)

Auf Grundlage der bisherigen Studien sollte durch ein detailliertes, vielschichtiges Messprogramm die reale Betriebsbeanspruchung in zeitsynchroner, integraler Form am Tragwerk erfasst werden. Durch Kopplung mit Finite Elemente Vergleichsrechnungen wurde letztlich ein vollständig bestimmtes, in mehreren Ebenen jederzeit überprüfbares System geschaffen.

In diesem abschließenden Abschnitt der Dissertation soll anhand der nachfolgenden **Unterkapitel 6.1 bis 6.5** ein kurzer Überblick zu den durchgeführten Sonder-Messungen, den vergleichenden FE Analysen und den wesentlichsten Ergebnissen der zugehörigen Auswertungen und Analysen im Sinne der angestrebten, ganzheitlichen Erfassung der Betriebsbeanspruchung gegeben werden.

<u>Kapitel 6.1</u>	Sondermessung 2007 – Ganzheitliche Erfassung der Betriebsbeanspruchung
<u>Kapitel 6.2</u>	Integrale Auswertungen und Analysen zur Sondermessung 2007 im Hinblick auf rechnerische Fragestellungen zur Nutzungsdauer maßgeblicher Bauteile
<u>Kapitel 6.3</u>	Ganzheitliche Evaluierung der gemessenen Belastung an analytischen Rechenmodellen der Brückenstruktur
<u>Kapitel 6.4</u>	Entwicklung eines in-situ basierten Lastmodells als Eingangsgröße baustatischer Nachrechnungen
<u>Kapitel 6.5</u>	Gegenüberstellung DYGES Lastmodell & Eurocode

Die eigentlichen inhaltlichen Details sind dann den **Kapiteln 13 bis 19** (entspricht den **ANHÄNGEN 5 bis 11**) sowie [58] zu entnehmen.

6.1 Sondermessung 2007 – Ganzheitliche Erfassung der Betriebsbeanspruchung

Im Jahr 2007 fand in der Kalenderwoche 21 von 22.05.2007 (Dienstagabend) bis 27.05.2007 (Sonntag-Mittag) eine Sondermessung im Brückenrandfeld WL Schönberg auf der Europabrücke statt.

Die Ergebnisse der Schwachstellenanalyse im Sommer 2006 (siehe **Kapitel 10**) legten bereits eine erhöhte Aufmerksamkeit für das **Randfeld V** nahe. Unter diesem Aspekt wird auch die letztlich getroffene Wahl des Standortes für die Sondermessung 2007 im Zuge der notwendigen örtlichen Einschränkung nachvollziehbar und plausibel.

Die Messung umfasste die nachfolgenden Teilbereiche, die bereits in der Reihenfolge angeführt sind, wie sie für das Konzept der - gerade eingeführten - drei Betrachtungsebenen konsistent sind:

- **Video-basierte Erfassung** des realen **Schwerverkehrsaufkommens** (Belastungsgeschehens)
Videokamera in der Nähe des Widerlagers Schönberg
- **Laser-basierte Verformungsmessung** im Feld V
Dokumentation des globalen, vertikalen Deformationsverhaltens
- Beschleunigungs-basierte **Analyse der Kragarm-Vertikalverformungen** unter **Hinzuziehen der Klassifizierung der einzelnen Schwerverkehrseinheiten** in Fahrtrichtung Innsbruck hinsichtlich Tonnage und zugehöriger Überfahrts-Geschwindigkeit
(aus dem permanenten Dynamischen Gewichtserfassungssystem DYGES über dem Pfeiler II)
- **Dehnmessstreifen-basierte Erfassung des Kraftflusses** entlang eines **repräsentativen Querverbandes**
Das tatsächliche Kräfte- und Deformationsverhalten sollte ermittelt werden und die Grundlage für vergleichende Spannungs-Berechnungen an Finite Elemente Modellen darstellen
- Erfassung der **realen Temperatureinwirkung** anhand eines Sensor-Profiles **entlang eines ausgewählten Querschnittes**
Verteilung der tatsächlichen Luft- und Stahltemperaturen über dem Pfeiler V
- Erfassung **meteorologischer Einwirkungsgrößen** in der Nähe des Widerlagers Schönberg

In weiterer Folge werden für das vorliegende Unterkapitel lediglich die wesentlichsten Ergebnisse zum Themenbereich „**Sondermessung 2007 – Ganzheitliche Erfassung der Betriebsbeanspruchung**“ angedeutet, sämtliche zugehörigen Auswertungen, Analysen und erweiterte Betrachtungen sind direkt dem **Kapitel 13** zu entnehmen.

Im Hinblick auf die Erstellung eines Monitoring-basierten Schwerverkehrs-Lastmodells wurden die Videoaufzeichnungen umfassend analysiert. Die Auswertung der vorliegenden 40 Stunden Videomaterial erfolgte im Hinblick auf eine Dokumentation jener Lastkonfigurationen, welche infolge Schwerverkehr überhaupt am Tragwerk auftreten. Die Aufbereitung der Ergebnisse erfolgte in Form von erfassten, kategorisierten und gezählten Belastungs-Anordnungen im Randfeld Schönberg der Europabrücke.

Dabei wurden Häufigkeitsverteilungen aller mit Video erfassten Belastungsszenarien generiert. Die Anordnung der kategorisierten Lastbilder erfolgt beginnend mit einfachen, häufigeren Konstellationen und wurde bis hin zu komplizierteren und selteneren Szenarien fortgeführt. Gemäß **Bild 93** sind dabei auf der längeren Horizontal-Achse die Last-Szenarien selbst aufgetragen, die kurze, zweite Horizontal-Achse unterscheidet die vier verschiedenen Beobachtungstage. Die Vertikalachse gibt Auskunft über die Häufigkeit des Auftretens dieser Ereignisse. Insgesamt wurden im Zuge der Sondermessung 76 verschiedene Last-Szenarien dokumentiert und anhand von 9969 gezählten Ereignissen klassiert. Für eine bessere Übersicht beschränken sich die Ergebnisse in **Bild 93 & Tabelle 28** auf die am häufigsten auftretenden Belastungsszenarien.

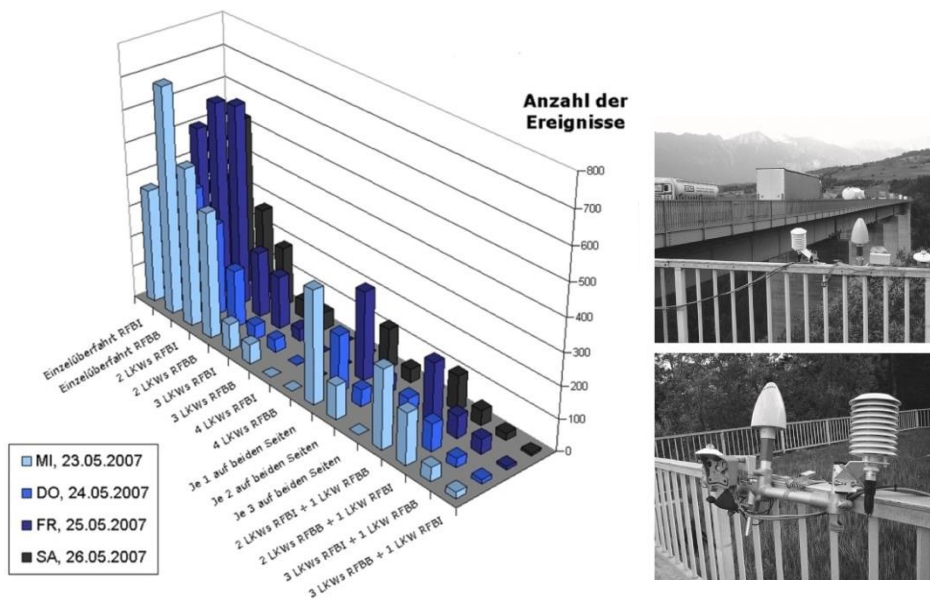


Bild 93: Häufigkeitsverteilung der maßgeblichen, dominant auftretenden Belastungsszenarien (links) infolge Video-basierter Erfassung des realen Schwerverkehrsaufkommens (rechts)

Nr.	Belastungsszenario	Summe total	Anteil an GesamtΣ in %
2	Einzelüberfahrt RFBB	2229	22,36
3	2 LKWs RFBI	1700	17,05
1	Einzelüberfahrt RFBI	1399	14,03
4	2 LKWs RFBB	973	9,76
9	Je 1 auf beiden Seiten	942	9,45
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	663	6,65
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	363	3,64
5	3 LKWs RFBI	352	3,53
10	Je 2 auf beiden Seiten	252	2,53
6	3 LKWs RFBB	198	1,99

Tabelle 28: Die 10 am häufigsten beobachteten Belastungsszenarien (direkte Erfassung)

6.2 Integrale Auswertungen und Analysen zur Sondermessung 2007 im Hinblick auf rechnerische Fragestellungen zur Nutzungsdauer maßgeblicher Bauteile

Während im Abschnitt zuvor mit dem Verweis auf **Kapitel 13** anhand einer umfassenden Sondermessung die realen Betriebsbeanspruchung ganzheitlich erfasst wurde, erfolgte in **Kapitel 14** eine vertiefte Auseinandersetzung mit der geschaffenen Datengrundlage, indem detaillierte, Zustandsgrößen-übergreifende Auswertungen, Analysen, Verifizierungen und Interpretationen der Messdaten anhand der zuvor identifizierten und klassifizierten Belastungsszenarien erfolgten.

Exemplarisch kann dies anhand von **Bild 94** nachvollzogen werden, in welchem die Ergebnisse konkreter Auswertungen und Analysen unter Betrachtung

- der globalen Brückenverformungen,
- der Kragarm-Vertikalverformungen,
- der Dehnungen entlang eines instrumentierten Querverbandes
- sowie der ausgewerteten Charakteristik der diese Zustandsgrößen auslösenden Schwerfahrzeuge im Sinne von Tonnagen und Überfahrtsgeschwindigkeiten dargestellt sind.

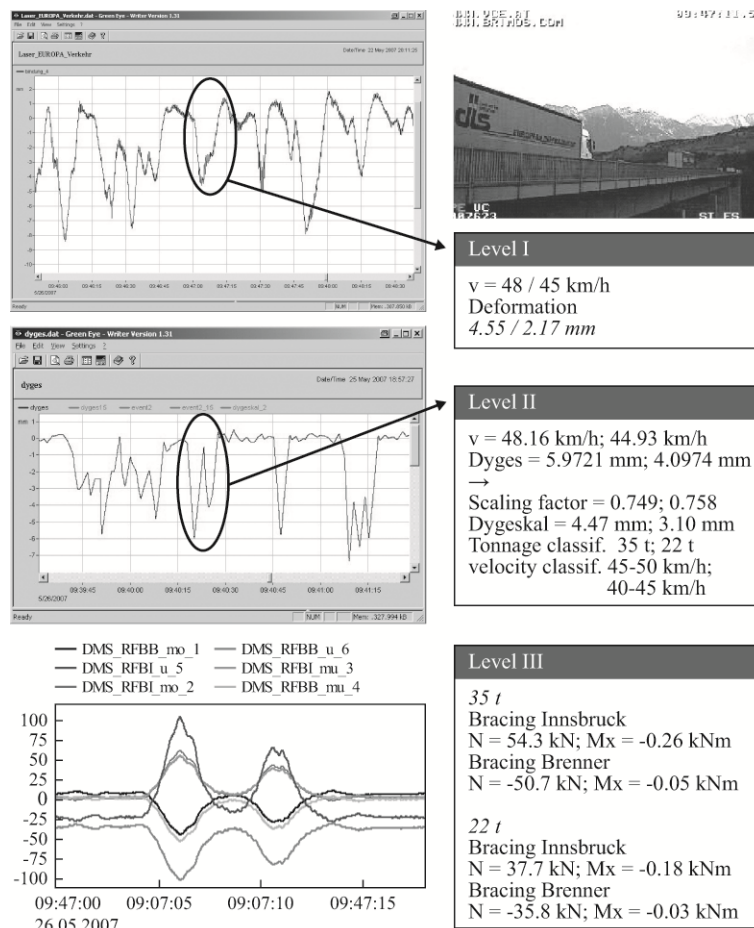


Bild 94: Überfahrt von 2 LKWs auf der RFB Innsbruck am 26.05.2007 um 09:47:11 Uhr:
 Der dadurch erzeugte, Laser-basierte Durchbiegungsverlauf in mm - Bauteilebene I (OBEN);
 Das durch die 2 Überfahrten erzeugte DYGES-Signal inklusive Auswertung - Bauteilebene II (MITTE);
 Die durch die 2 Überfahrten erzeugten Dehnungen in µm/m – Bauteilebene III (UNTEN)

Zu jedem der aufgelisteten Teilbereiche können anhand von **Kapitel 14** spezifische Details zu den sehr umfassenden Auswertungen, weiterführender Analysen und eine Diskussion der zeitsynchron am Tragwerk erfassten, realen Betriebsbeanspruchung entnommen werden. Vielen der einzelnen Bestandteile der Sondermessung 2007 waren ein oder mehrere verifizierende Pilotversuche vorausgegangen (siehe **Kapitel 13 & 14**). Durch Kopplung mit Finite Elemente Vergleichsrechnungen (siehe **Kapitel 6.3** bzw. **Kapitel 15**) wurde letztlich ein vollständig bestimmtes, in mehreren Ebenen jederzeit überprüfbares System geschaffen.

Weitere im **Kapitel 14** ausgearbeitete Erörterungen nehmen zu folgenden Aspekten Stellung:

- Bedeutung der Temperatur
 - Tragwerksbeanspruchung einerseits,
 - Implikation in der Messdaten andererseits
- Diskussion zum beobachteten Kraftfluss in den Diagonalen unter dem Einfluss
 - der Überfahrtsgeschwindigkeit
 - der Verweildauer der Schwerfahrzeuge am Tragwerk,
 - der exklusiven (alleinigen) Überfahrt von Schwerfahrzeugen gegenüber dem Zusammenwirken mehrerer Schwerfahrzeuge
 - des unsymmetrischen, einseitigen Befahrens des Brückenfeldes gegenüber dem tendenziell symmetrischen, beidseitigen Befahren des Brückenfeldes
- Diskussion zur Größenordnung der wirksamen Normalkräfte in den Querverbänden unter Hinzuziehen der Ergebnisse ausführlicher Finite Elemente Berechnungen
- Auswirkung auf die weiterführenden Themen Lastmodellierung und Bauteil-Schädigungsanalyse

6.3 Ganzheitliche Evaluierung der gemessenen Belastung an analytischen Rechenmodellen der Brückenstruktur

In Hinblick auf unterstützende Verifizierungen des DYGES Lastmodells sowie dessen Vergleich mit den Lastmodellen des Eurocode wurden ein Finite Elemente Rechenmodell vom Gesamttragwerk Europabrücke einerseits (Stabelemente) bzw. vom Randfeld Schönberg (Schalenelemente) andererseits erstellt. Mit der Erstellung dieser Modelle bzw. durch deren Kopplung mit der umfassend messtechnisch erfassten Betriebsbeanspruchung (siehe Kapitel 6.1 und 6.2) wurde angestrebt, ein vollständig bestimmtes, in mehreren Ebenen jederzeit überprüfbares System zu schaffen. Umfassende Details zur Modellierung und zu den darauffolgenden numerischen Analysen sind direkt dem **Kapitel 15** zu entnehmen.

In den nachfolgenden Ausführungen wird das Hauptaugenmerk auf einen notwendigen Kontrollmechanismus gelegt, der anhand eines markanten Vergleichsereignisses demonstriert wird. Der Kontrollmechanismus sah vor, für rechnerische Lastfälle mit den durch den DYGES Algorithmus bekannten Lasten numerische Zustandsgrößen zu generieren. Für diese Zustandsgrößen stehen gleichzeitig Messwerte aus spezifischen Messprogrammen zur Verfügung, deren etwaige Abweichungen zu den Rechenwerten zu analysieren waren.

Sinngemäß zu **Bild 94** wurde dazu ein weiteres, charakteristisches Belastungsszenario aus **Kapitel 14.3.2** herangezogen (= die alleinige Überfahrt eines LKWs auf der RFB Innsbruck).

	direkte MESSUNG				RECHNUNG ($E=210000 \text{ N/mm}^2$)	Δ
	Zustandsgrößen	Standort des Messaufnehmers	Betrag	Einheit	Vergleichswert	[%]
Bauteilebene I	Globale Vertikalverformungen	orthotrope Bodenplatte	5,98	[mm]	5,94	0,68
Bauteilebene II	Lokale Vertikalverformungen	orthotrope Fahrbahnplatten- auskragung	5,48	[mm]	5,10	7,45
Bauteilebene III	Lokale Strebendehnungen	4 Kant-Strebe (Diagonalverband)	12,67	[N/mm ²]	12,67	0,04

Tabelle 29: Maßgebliche Zustandsgrößen im Brückenrandfeld Schönberg für den 5-Achsiger LKW mit 42,8 t

- Zunächst wurde am DYGES-Messquerschnitt im Rahmen einer realen Überfahrt ein 5-Achsiger LKW mit 42,8t Gesamtgewicht identifiziert.
- Wie **Tabelle 29** zeigt, liegen für dieses Belastungs-Ereignis für jede der 3 definierten Bauteilebenen die korrespondierenden Bauwerksreaktionen durch direkte Messungen vor.
- Anhand des für das Randfeld Schönberg erstellten FE-Rechenmodells wurden für das gleiche Belastungsfahrzeug rechnerische Vergleichswerte zu den korrespondierenden, gemessenen

Zustandsgrößen ermittelt. Bei der Modellierung des Rechenfahrzeuges orientierte man sich nach Sichtung des Videomaterials bezüglich der Verteilung des Gesamtgewichtes auf die Achsen bzw. bezüglich der geometrischen Achsabstände an einem passenden Schwerfahrzeug aus der Gruppe der im **Kapitel 15.1.2** angeführten Standardlastkraftwagen (gemäß EN 1991-2).

- **Tabelle 29** zeigt schließlich die sehr hohe Übereinstimmung zwischen Messung und Vergleichsrechnung. Dabei zeigt sich, dass lediglich in der – im Sinne der Lastabtragung zu betrachtenden - Bauteilebene II eine nennenswerte Abweichung vorliegt, wobei dies voraussichtlich auf den Einfluss der Spurtreue der überfahrenden Schwerfahrzeuge zurückgeführt werden kann. Diese Einflussgröße wurde bereits im **Kapitel 5.6.5** im Rahmen der mechanischen Modellierung und analytischen Plausibilisierung des Dynamischen Gewichtserfassungssystems DYGES als einzige implizierte Modellierungsunsicherheit identifiziert.

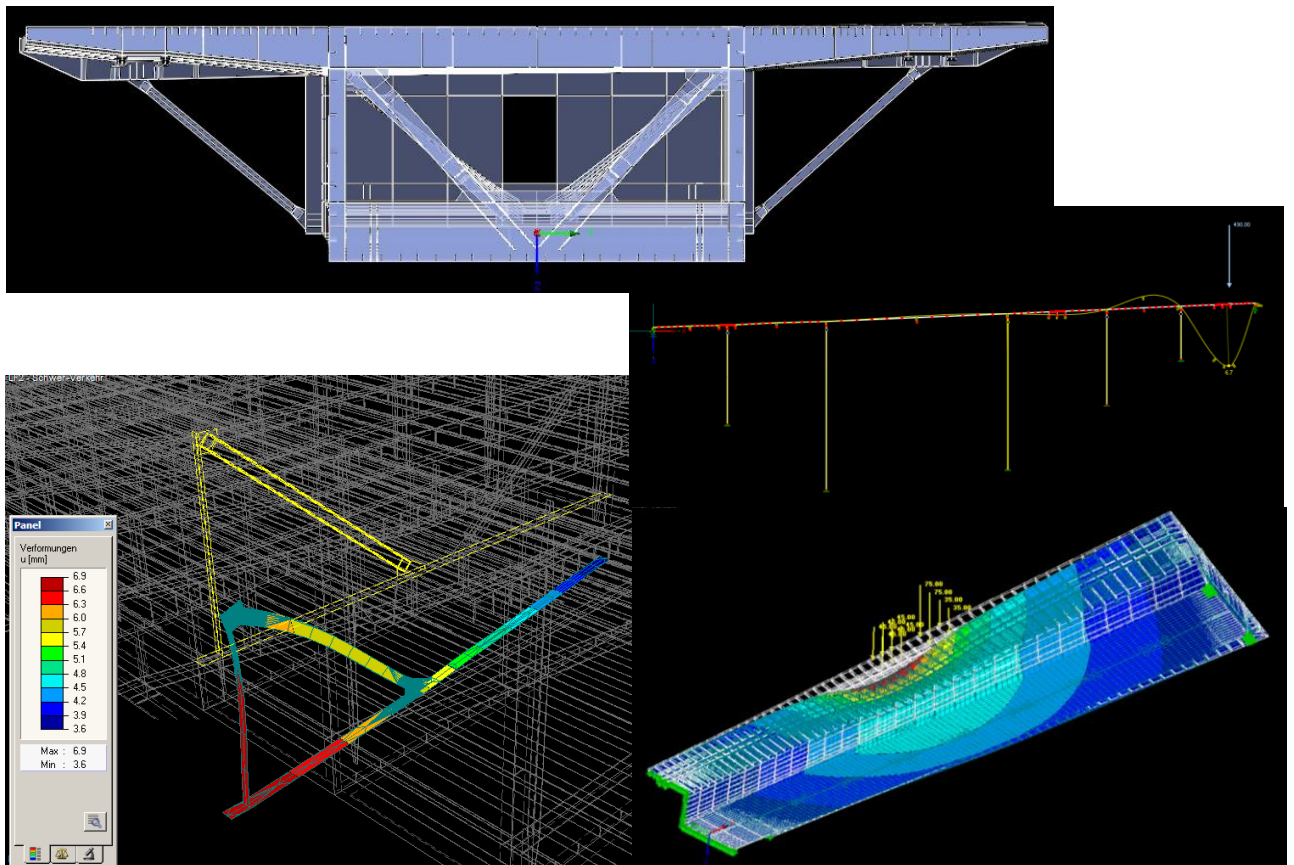


Bild 95: FE-Modell basierte Analyse der vertikalen Verformungen des Brückenfeldes (**Bauteilebene I**) bzw. des Brückenkragarmes (**Bauteilebene II**) sowie des lokalen Kraftflusses im ausgewählten Querverband V 30 QV-N (**Bauteilebene III**) infolge 42,8t Referenzfahrzeug

Ergänzend zu den im vorliegenden Unterkapitel dargelegten, wesentlichsten Ergebnissen wird auf **Kapitel 15** verwiesen. In diesem wird u.a. rechnerisch wie auch grafisch dokumentiert, wie anhand des Lastfalls ständige Lasten (**Kapitel 15.1.1**) bzw. anhand von Verkehrslasten (**Kapitel 15.1.2**) umfassende Plausibilitätskontrollen an den hergestellten Brückenmodellen hinsichtlich ihrer weiteren Verwendung für detaillierte Schädigungsrechnungen [58] durchgeführt wurden.

6.4 Entwicklung eines in-situ basierten Lastmodells als Eingangsgröße baustatischer Nachrechnungen

Die vorliegende Doktorarbeit zielt nicht auf eine Neubewertung von Bemessungs-relevanten Lastannahmen ab, der Fokus liegt vordergründig auf einer rechnerischen Bewertung bestehender Konstruktionen. Im Zuge der Entwicklung und Evaluierung eines realen Lastmodells (unter Berücksichtigung der durch Messungen und analytische Vergleichsrechnungen hinterlegten Beanspruchungsfunktionen) erfolgen aber natürlich eine Referenzierung und ein Vergleich mit den derzeit gültigen Bemessungslasten (ÖNORM B 1991-2 [40]).

Der Autor hält fest, dass mit dem in dieser Dissertation erstellten Lastmodell lediglich ein Werkzeug für statisch-konstruktive Nachrechnungen an bestehenden Bauwerken geliefert werden soll. Es handelt sich dabei nicht um ein im Detail ausgearbeitetes Modell für jeden in Betracht kommenden Nachweispunkt der Brücke. Es wird daher nicht, wie sonst üblich, mit Achslasten gearbeitet, sondern mit einer in **Kapitel 16.1.3** eingeführten, neuen Kenngröße – der sog. Schädigungsäquivalenten - auf Basis von tatsächlich auftretenden Lastbildern, der zugehörigen, resultierenden Lastintensitäten (Tonnagen) sowie deren Auftretens-Häufigkeiten. Anhand dieser realen Eingangsparameter kann jeder Benutzer dieses Modells die für ihn relevanten Lastkonfigurationen (bestehend aus realen Schwerverkehrseinheiten) selbst zusammenstellen und lokale Nachweise durchführen.

Grundlage für die vergleichende Lastmodellierung waren zunächst die fünf Ermüdungs-Lastmodelle (ELM 1-5) des Eurocode (ÖNORM B 1991-2 [40]), wobei die Betrachtung danach auch auf das dem Grenzzustand der Tragfähigkeit zugehörigen Lastmodell LM 1 ausgedehnt wird.

Für das vorliegende Unterkapitel werden in weiterer Folge lediglich die wesentlichsten Ergebnisse zum Themenbereich „*Entwicklung eines in-situ basierten Lastmodells als Eingangsgröße baustatischer Nachrechnungen*“ angedeutet, sämtliche zugehörigen Auswertungen, Analysen und erweiterte Betrachtungen sind direkt dem **Kapitel 16** zu entnehmen.

Zur Erstellung eines realen Lastmodells im Sinne der bisherigen, integralen Betrachtungsweise ist es notwendig, die beobachteten, realen Last-Stellungen mit den aus der permanenten Überwachung stammenden Eigenschaften der Belastungs-Intensität (Tonnagen) zu verknüpfen.

Während die neuartige Erfassung der LKW-Lasten ausführlich in **Kapitel 3** erörtert wurde (Dynamisches Gewichtserfassung DYGES – basierend auf permanentem Monitoring), stehen infolge ausgedehnter Videoaufzeichnungen (**Sondermessung 2007 - Kapitel 13**) zusätzlich auch die realen Lastbilder incl. deren jeweiliger Auftretens-Häufigkeit zur Verfügung (siehe **Kapitel 18**).

- ❖ Nach umfassender Verifizierung des Beobachtungszeitraums während der Sondermessung hinsichtlich eines als repräsentativ anzusehenden Samples der kategorisierten und gezählten Belastungsszenarien werden in einem ersten Schritt Stundenmittelwerte für die verschiedenen Lastbilder ermittelt, um daraus einen Häufigkeitsansatz pro Tag ableiten zu können.
- ❖ Zusammen mit den vorher ermittelten Tageshäufigkeiten pro Szenario wird dann ein Belastungskollektiv pro Werktag und pro Wochenende festgelegt. Mit diesen Eckdaten wird in weiterer Folge auf eine "Regel-Woche" geschlossen, welche letztlich auf einen typischen Schwerverkehrs-Monat beziehungsweise auf ein Regel-Jahr 2007 hochgerechnet wird.

Tabelle 30 zeigt dazu die extrapolierte, rechnerische Verteilung der zehn häufigsten Belastungsszenarien, welche in weiterer Folge bezüglich Ihrer Auswirkungen auf Alterungsaspekte (Schädigungsäquivalente pro Szenario) sowie auf Tragsicherheitsaspekte bewertet werden (siehe **Kapitel 16** bzw. insbesondere **Kapitel 17**).

Belastungs- Szenario	Anteil an Gesamtsumme
Einzelüberfahrt RFBB	23,9 %
2 LKWs RFBI	16,3 %
Einzelüberfahrt RFBI	15,1 %
2 LKWs RFBB	9,5 %
Je 1 auf beiden Seiten	8,8 %
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,2 %
2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,5 %
3 LKWs RFBI	3,2 %
Je 2 auf beiden Seiten	2,4 %
3 LKWs RFBB	2,0 %

Tabelle 30: Verteilung der **10 häufigsten Belastungsszenarien** in Prozent
 - Bezugsgröße 1 Betriebsjahr (infolge Extrapolation)

- ❖ Danach muss den einzelnen Lastbildern anhand der DYGES-Auswertungen (Tonnagen) eine anteilige Belastung zugewiesen werden. Dazu wird jedem Belastungsszenario mit Hilfe der ermittelten Häufigkeitsverteilung der Tonnagen-Klassen ein Gewicht zugeteilt um festzulegen, welche Belastungen infolge jedes realen Lastbildes in das System eingebracht werden. Hierfür wird auf die Auswertung der Langzeitreihe des Dynamischen Gewichterfassungs-Systems (DYGES) zurückgegriffen (vergleiche **Tabelle 4** im **Abschnitt 4.1.1**).

- ❖ Eine notwendige Verknüpfung der zehn häufigsten Belastungsszenarien (**Tabelle 30**) mit der DYGES-basierten Häufigkeitsverteilung der Tonnagen (**Tabelle 4**) legt nahe, dass innerhalb jeder Lastkonfiguration dieselbe Zusammensetzung im Sinne der Gewichtsklassen der involvierten, einzelnen, Schwerfahrzeuge angenommen wird. Ursache ist die sich bei der Langzeitbeobachtung des Gesamt-Schwerverkehrs als stabil erwiesene Klassifizierung der einzelnen Tonnagen-Klassen, welche daher in logischer Konsequenz auf jedes aus dem Gesamtverkehr herausgelöste Lastbild übertragen wird (siehe **Bild 96**).
- ❖ Mit anderen Worten bedeutet dies, dass - da DYGES den Schwerverkehr in acht Gewichtsklassen unterteilt - ein LKW acht verschiedene Tonnagen annehmen kann, die entsprechend der in der Langzeitreihe ermittelten Häufigkeitsverteilung (siehe nochmals **Tabelle 4** im **Abschnitt 4.1.1**) anzusetzen sind.
- ❖ Für sämtliche weiterführenden Überlegungen hinsichtlich eines vollwertigen Lastmodells als Alternative zum Eurocode wurde - als einzig sinnvoller Ansatz - für beide Fahrtrichtungen von der identischen Häufigkeitsverteilung der auftretenden LKW-Einheiten auf die Gewichtsklassen ausgegangen.

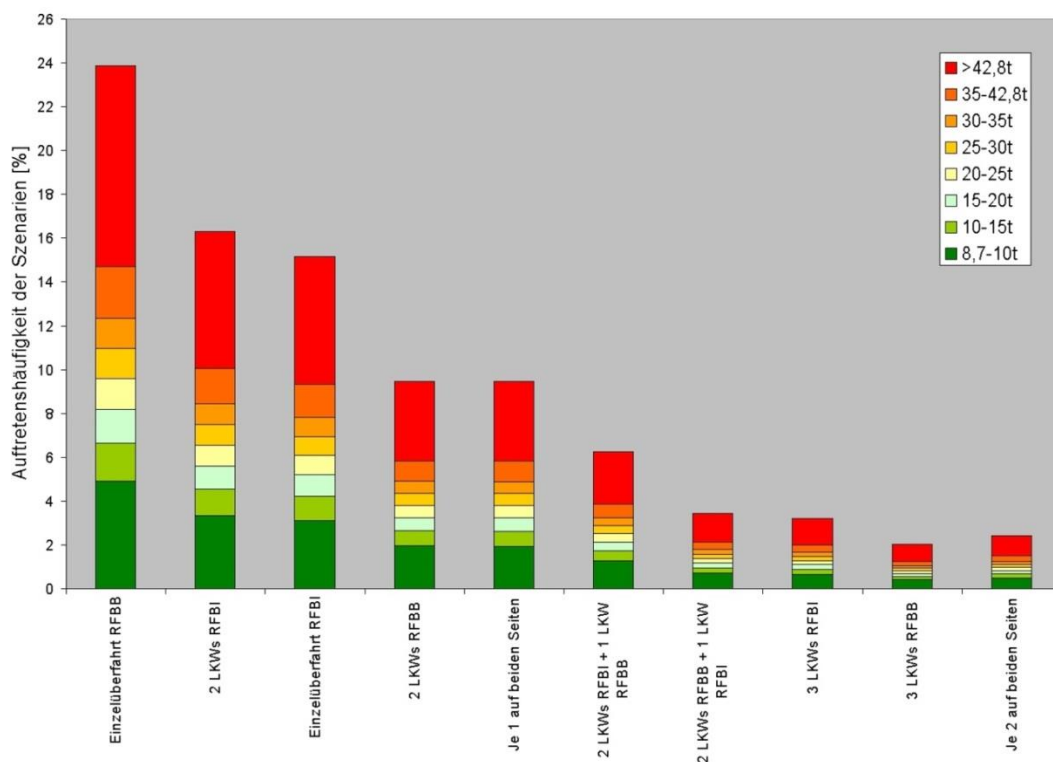


Bild 96: Die ermittelte Häufigkeitsverteilung der Gewichtsklassen am Beispiel der 10 häufigsten Belastungsszenarien

Die konkrete Erstellung des integralen Lastmodells erfolgt nun durch die mechanische und mathematische Verknüpfung (Kombinatorik)

- ❖ der realen Laststellungen (Video-basiert)
- ❖ mit den zugehörigen, gemessenen Tonnagen (DYGES-Monitoring)
- ❖ sowie mit der während der permanenten Messung erfassten Anzahl der Schwerverkehrseinheiten

Die konsistente Erstellung eines neuen Lastmodells für die zunächst vordergründig verfolgte Ermüdungsbewertung kann - im Gegensatz zu einer Analyse des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (erfolgt nachgereiht) – nicht über die Summe der am Tragwerk gleichzeitig befindlichen Tonnagen alleine erfolgen, sondern vor allem über deren Verknüpfung mit der Anzahl an Schwerfahrzeugen und der daraus resultierenden Schädigungsrelevanz.

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} = \sum \frac{n_i}{\Delta\sigma_D^m} \frac{\Delta\sigma_i^m}{N_D} \quad (42)$$

Als Bindeglied zwischen dem in der vorliegenden Dissertation zu entwickelnden DYGES-Lastmodell und den Lastmodellen der maßgeblichen Normen wurde vom Autor in **Kapitel 16.1.3** - basierend auf dem Schadensakkumulationsansatz nach Palmgren und Miner - nun stellvertretend für die voranschreitende Ermüdungsschädigung der sogenannte „Schädigungsäquivalent“ als Schlüsselparameter eingeführt, der gedanklich aus dem Formel-Ansatz (42) herausgelöst wird:

$$\text{Schädigungsäquivalent} = \frac{\text{Schädigungsbeitrag der Auftretenshäufigkeit } n_i}{\Delta\sigma_D^m} * \frac{\text{Schädigungsbeitrag der Auftretensintensität } \Delta\sigma_i^m}{N_D} \quad (43)$$

$\Delta\sigma_D$ und N_D sind in den Formelansätzen (42) bzw. (43) konstant, während für die Lastspiel-Anzahl n_i und die Schwingbreite $\Delta\sigma_i^m$ die Analogie zu gezählten LKW-Überfahrten und den zugehörigen Tonnagen erkannt und daher genutzt wurde. Anders ausgedrückt werden die ermittelten Tonnagen in weiterer Folge im Sinne der Miner-Regel stellvertretend für die Schwingbreite $\Delta\sigma$ verwendet. Die gezählten Schwerverkehrshäufigkeiten werden in weiterer Folge im Sinne der Miner-Regel stellvertretend für die Lastspiel-Anzahl n_i verwendet. Der resultierende Schädigungsäquivalent ergibt sich laut (43) als akkumuliertes mathematisches Produkt aus dem “Schädigungsbeitrag der Auftretens-Häufigkeit n_i ” mit dem “Schädigungsbeitrag der Auftretens-Intensität $\Delta\sigma_i^m$ ” und ist jeweils für Biegung und für Torsion herzuleiten.

- Die aus den LKWs zusammengesetzten Belastungsanordnungen werden nun für jedes der zehn betrachteten Szenarien entsprechend mit sämtlichen, kategorisierten Tonnagen verknüpft, um daraus Schädigungsäquivalente in Bezug auf Biegung und Torsion zu generieren. Bei den Berechnungen des Schädigungsäquivalents in Bezug auf Torsion ist zusätzlich der zugehörige Hebelsarm heranzuziehen (**Bild 97**).
- Für das zu erstellende Lastmodell bzw. in Hinblick auf den Vergleich mit dem Eurocode wird in die Berechnung der Schädigungsäquivalente die Beteiligungsrate jedes einzelnen, maßgeblichen Belastungsszenarios am Gesamt-Verkehrsaufkommen (**Tabelle 30**) berücksichtigt.

Die **Kapitel 16.5 & 17** fassen sämtliche dieser Berechnungen zusammen und zeigen dabei die errechneten, resultierenden Schädigungsäquivalente der analysierten Szenarien hinsichtlich Biege- und Torsionsbeanspruchung.

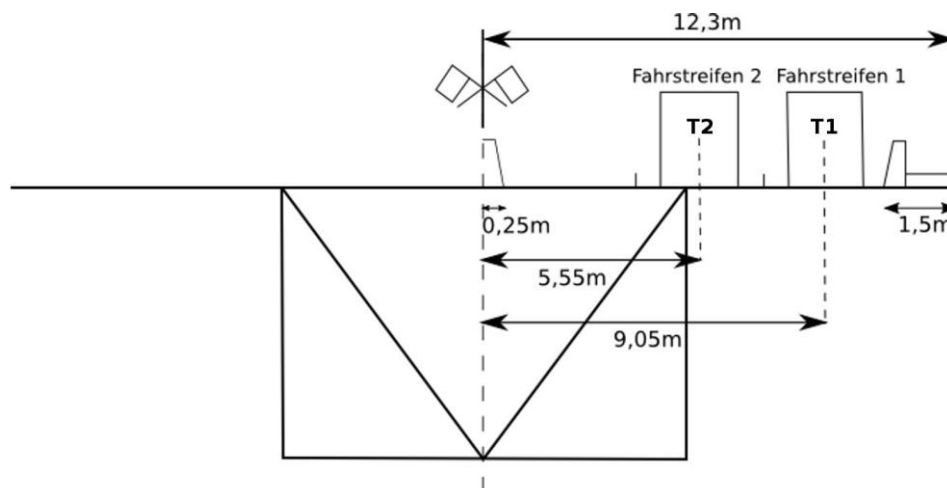


Bild 97: Schema zum Brückenquerschnitt und den verwendeten Exzentrizitäten für die Berechnung der Schädigungsäquivalente infolge Eurocode

Abschließend wird festgehalten, dass das vorliegende **Unterkapitel 6.4** im Wesentlichen die Zusammenfassung jener Grundlagen darstellt, wie sie aus den entwickelten Komponenten für einen Vergleich mit den Lastmodellen des Eurocode (ÖNORM B 1991-2 [40]) geschaffen wurden.

Die entsprechenden, umfassenden Details dazu sind

- ❖ dem **Kapitel 16**
- ❖ dem **Kapitel 18** (ANHANG 10: ZÄHLUNG UND KATEGORISIERUNG DER AUTRETENDEN LASTBILDER (BELASTUNGSSZENARIEN))
- ❖ sowie dem **Kapitel 19** (ANHANG 11: TABELLIERTE KOMBINATORIK DER SCHÄDIGUNGSÄQUIVALENTE ALS NEU FORMULIERTER ANSATZ ZUR BAUWERKSALTERUNG)

zu entnehmen.

Die eigentliche Gegenüberstellung des entwickelten realen Lastmodells mit dem EUROCODE erfolgt sowohl

- ❖ hinsichtlich des Grenzzustandes der Tragfähigkeit als auch
- ❖ hinsichtlich der maßgeblichen Ermüdungslastfälle

erst im **Kapitel 17** und wird im nachfolgenden **Unterkapitel 6.5** zusammengefasst.

6.5 Gegenüberstellung DYGES Lastmodell & Eurocode

Als Abrundung des gesamten **Kapitels 6 ANWENDUNG** werden im vorliegenden Unterkapitel 6.5 die wesentlichsten Ergebnisse zum Themenbereich „*Gegenüberstellung des realen, Monitoring-basierten Schwerverkehrslastmodells mit den rechnerischen Ansätzen des Eurocode*“ zusammengefasst, indem die maßgeblichen, in dieser Dissertation entwickelten Komponenten zusammengeführt werden. Sämtliche Analysen und erweiterte Betrachtungen zu den zugehörigen Auswertungen sind direkt dem **Kapitel 17** zu entnehmen.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass im Rahmen der Erstellung des vorliegenden, realen Lastmodells stets eine konsistente Referenzierung zu den Vergleichsmodellen des EC1-2 verfolgt wurde. Daher wurden zunächst die Ermüdungslastmodelle ELM 1-5 und in weiterer Folge das den Grenzzustand der Tragsicherheit abdeckende Lastmodell LM1 beschrieben bzw. einander gegenübergestellt, wodurch die Grundlage für den oben angeführten Vergleich geschaffen wurde.

Für den Aspekt der Tragwerksalterung zeigt sich dabei, dass nicht alle in [40] angeführten Ermüdungslastmodelle einen sinnvollen Vergleich zulassen. Bei Kenntnis der tatsächlichen Verkehrscharakteristik wird verständlich, warum man bei Ermüdungs-Überlegungen bzw. im Zusammenhang mit Bauteilalterung von einem Vergleich mit den entsprechenden Modellen ELM1 & ELM2 absieht. Dies liegt zunächst daran, dass diese Modelle des Eurocode zum Nachweis dienen, ob eine unbegrenzte Lebensdauer angenommen werden kann. Da an der Europabrücke bekanntlich ein konkretes, systematisches Ermüdungsproblem einer tertiären Bauteilreihe vorliegt, kommen zur Berechnung der tatsächlichen Ermüdungsdauer nur noch die Ermüdungslastmodelle 3, 4, und 5 in Frage (siehe **Abschnitt 17.2.1** bzw. **6.5.1**). Selbst von einer hypothetischen, rechnerischen Gegenüberstellung der Schädigungsraten zwischen ELM1 bzw. ELM2 und dem DYGES-Lastmodell wird abgesehen, da man lediglich eine maximierte Ersparnis zwischen Monitoring-basiertem Modell und dem Eurocode erzwingen würde. Dies wurde allerdings in keinster Weise angestrebt und würde gleichzeitig noch einen Vergleich mit – für Ermüdung - weitgehend realitätsfremden Lastmodellen darstellen.

Eine Referenzierung zu dem als stark konservativ konzipierten Lastmodell LM1 wird lediglich im Zusammenhang mit dem Grenzzustand der Tragfähigkeit – und dort berechtigter Weise wegen des Vergleichs mit den fallweise auftretender Stauszenarien – nachgeliefert (siehe **Abschnitt 17.2.2** bzw. **6.5.2**).

6.5.1 Vergleich hinsichtlich Ermüdung (Alterung als Voranschreiten der Ermüdungsschädigung)

In weiterer Folge werden nun zunächst die in **Kapitel 17.1** vorgestellten Ermüdungslastmodelle 3 und 4 verfolgt. Sie weisen sichtbare Parallelen zum in dieser Dissertation entwickelten Modell auf und können daher am besten mit diesem verglichen werden.

Das Ermüdungslastmodell 3 des Eurocodes gleicht dem in dieser Arbeit entwickelten DYGES-Lastmodell insofern, als beim ELM 3 zwei LKWs hintereinander über das Brückentragwerk fahren. Alle anderen Modelle verweisen dezidiert darauf, dass die Bemessungsfahrzeuge das Tragwerk einzeln überfahren müssen.

Das Ermüdungslastmodell 4 des Eurocode verwendet standardisierte Schwerfahrzeuge mit definierter Achsenanzahl und Tonnage und ordnet den jeweiligen Fahrzeugen anteilige Auftretenshäufigkeiten am gesamten Schwerverkehrsaufkommen in Prozent zu, die davon abhängen welche Entfernungen der LKW zurücklegt und so die Rangordnung der Straße festlegen. Das ELM 4 gleicht daher in diesem Punkt dem entwickelten DYGES-Modell, da auch dort eine Aufteilung auf die verschiedenen Tonnagen-Kategorien erfolgt. Dennoch wird auch beim Ermüdungslastmodell 4 davon ausgegangen, dass die definierten Schwerfahrzeuge das Tragwerk einzeln überfahren.

- Bei der Berechnung der Schädigungsäquivalente für die Ermüdungslastmodelle ELM 3 & ELM 4 mit Hilfe der einzelnen Szenarien des DYGES-Modells zeigen sich im Gegensatz zum Eurocode nun folgende Unterschiede:
 - Das Modell arbeitet nicht mit einer geschätzten Anzahl an Schwerverkehrs-Einheiten, sondern bezieht direkt die realen Zählungen der Mautstationen vor Ort ein. Der Eurocode geht aber bei "Straßen und Autobahnen mit zwei oder mehr Fahrstreifen je Richtung und hohem LKW-Anteil" von einem N_{obs} von 2×10^6 Schwerverkehrsfahrzeugen pro Jahr und LKW-Streifen aus. Zusätzlich dazu sollen auf jedem Streifen mit schnellem Verkehr 10% von N_{obs} berücksichtigt werden. Die Daten der ASFINAG Maut Service GmbH hingegen zeigen, dass im Jahr 2007 insgesamt rund $2,41 \times 10^6$ LKWs mit 2, 3, 4 oder mehr Achsen in beide Fahrtrichtungen gefahren sind. Somit ergibt sich für den Vergleichsparameter Schwerverkehrsvolumen ein weit geringeres Aufkommen je Fahrtrichtung als in der Norm, die von unweit mehr als der doppelten Anzahl ausgeht.
 - Der größte Unterschied zwischen den Modellen der Norm und dem hier entwickelten Last-Modell ergibt sich aber durch die Berücksichtigung der tatsächlich auftretenden, statischen Lastbilder (Belastungsanordnungen gemäß **Tabelle 30**), die auch mehrere Fahrzeuge gleichzeitig auf dem Tragwerk berücksichtigen. Wie sich zeigen wird, ergeben sich bei gleichzeitiger Vergabe von realen Gewichtseigenschaften (DYGES-Lastkollektiv

der Schwerverkehrseinheiten) auch deutlich geringere, resultierende Lasten am Gesamttragwerk.

- Folglich wurde im nächsten Schritt nun ein Vergleich zwischen den Schädigungsäquivalenten, die aus den Modellen der Norm berechnet wurden (**Tabelle 52 – Kapitel 17.2.1**) und jenen aus den einzelnen Belastungsszenarien angestellt. Dazu wurden die resultierenden Schädigungsäquivalente aus der Kombinationsberechnung der realen Belastungsszenarien herangezogen (siehe **Kapitel 19** im Sinne der Ausführungen des **Kapitels 16.5**), aufsummiert und schließlich - entsprechend der Häufigkeit der Szenarien – dem in Relation gesetzten Schädigungsbeitrag der Norm gegenübergestellt. Gerade durch den letztgenannten Schritt konnte der Bezug zur Schadensakkumulation unter sukzessiver Berücksichtigung aller Belastungsanordnungen hergeleitet werden. Eine Parameterstudie zum Schädigungseinfluss der einzelnen Belastungsszenarien bei unmittelbarem Bezug zum Eurocode ist die Folge.

Aufsummierte Szenarien	Anteil an Gesamtsumme	Schädigungsäquivalente Biegung				
		DyGeS [Mill.t]	ELM 3 [Mill.t]	Verhältniswert [%]	ELM 4 [Mill.t]	Verhältniswert [%]
1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI...	39,03%	16,9	534,5	3,2	145,1	11,6
...+ 2 LKW RFBI...	55,43%	84,5	534,5	15,8	145,1	58,2
...+ 2 LKW RBB...	64,80%	123,0	534,5	23,0	145,1	84,8
...+ je 1 auf beiden Seiten...	73,62%	133,4	534,5	25,0	145,1	91,9
...+ 2 LKW RFBI u. 1 LKW RFBB...	79,86%	168,6	534,5	31,5	145,1	116,2
...+2 LKW RFBB u. 1 LKW RFBI...	83,31%	187,9	534,5	35,1	145,1	129,5
...+ 3 LKW RFBI...	86,53%	252,7	534,5	47,3	145,1	174,2
...+ 3 LKW RFBB	88,57%	293,1	534,5	54,8	145,1	202,0
...+ je 2 auf beiden Seiten	91,00%	332,4	534,5	62,2	145,1	229,0

Tabelle 31 : Gegenüberstellung der stufenweisen Akkumulation der Schädigungsäquivalente für **Biegebeanspruchung** (DYGES-Modell vs. ELM 3 und 4 des Eurocode)

Aufsummierte Szenarien	Anteil an Gesamtsumme	Schädigungsäquivalente Torsion				
		DyGeS [Mill.t]	ELM 3 [Mill.t]	Verhältniswert [%]	ELM 4 [Mill.t]	Verhältniswert [%]
1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI...	39,03%	153,1	4667,5	3,3	1266,7	12,1
...+ 2 LKW RFBI...	55,43%	765,2	4667,5	16,4	1266,7	60,4
...+ 2 LKW RBB...	64,80%	1113,2	4667,5	23,9	1266,7	87,9
...+ je 1 auf beiden Seiten...	73,62%	1163,6	4667,5	24,9	1266,7	91,9
...+ 2 LKW RFBI u. 1 LKW RFBB...	79,86%	1397,4	4667,5	29,9	1266,7	110,3
...+2 LKW RFBB u. 1 LKW RFBI...	83,31%	1523,9	4667,5	32,6	1266,7	120,3
...+ 3 LKW RFBI...	86,53%	2110,7	4667,5	45,2	1266,7	166,6
...+ 3 LKW RFBB	88,57%	2475,8	4667,5	53,0	1266,7	195,5
...+ je 2 auf beiden Seiten	91,00%	2653,3	4667,5	56,8	1266,7	209,5

Tabelle 32 : Gegenüberstellung der stufenweisen Akkumulation der Schädigungsäquivalente für **Torsionsbeanspruchung** (DYGES-Modell vs. ELM 3 und 4 des Eurocode)

Der direkte Vergleich anhand von **Tabelle 31** und **Tabelle 32** zeigt, dass die Berücksichtigung der realen Eingangsgrößen des DYGES-Modells für Biegebeanspruchung rund 62% und für

Torsionsbeanspruchung rund 57% an resultierenden Schädigungsbeiträgen gegenüber dem Ermüdungslastmodell 3 des EC1-2 zur Folge hat.

Diese Aussage steht in keinerlei Widerspruch zu den vor Ort auftretenden und fortschreitenden Ermüdungsrissen. Aufgrund der vorliegenden Detaillierung und der sich daraus ergebenden Spannungskonzentrationsfaktoren an den maßgeblichen Anschlussdetails (siehe **Kapitel 15**) findet Ermüdung offensichtlich statt. Der rechnerische Vergleich aus **Tabelle 31** und **Tabelle 32** besagt aber, dass dies aufgrund der analysierten, realen Eingangswerte um rund 38% (Biegung) bzw. 43% (Torsion) langsamer vonstatten gehen würde, wie im Fall einer isolierten, Normen-basierten Analyse.

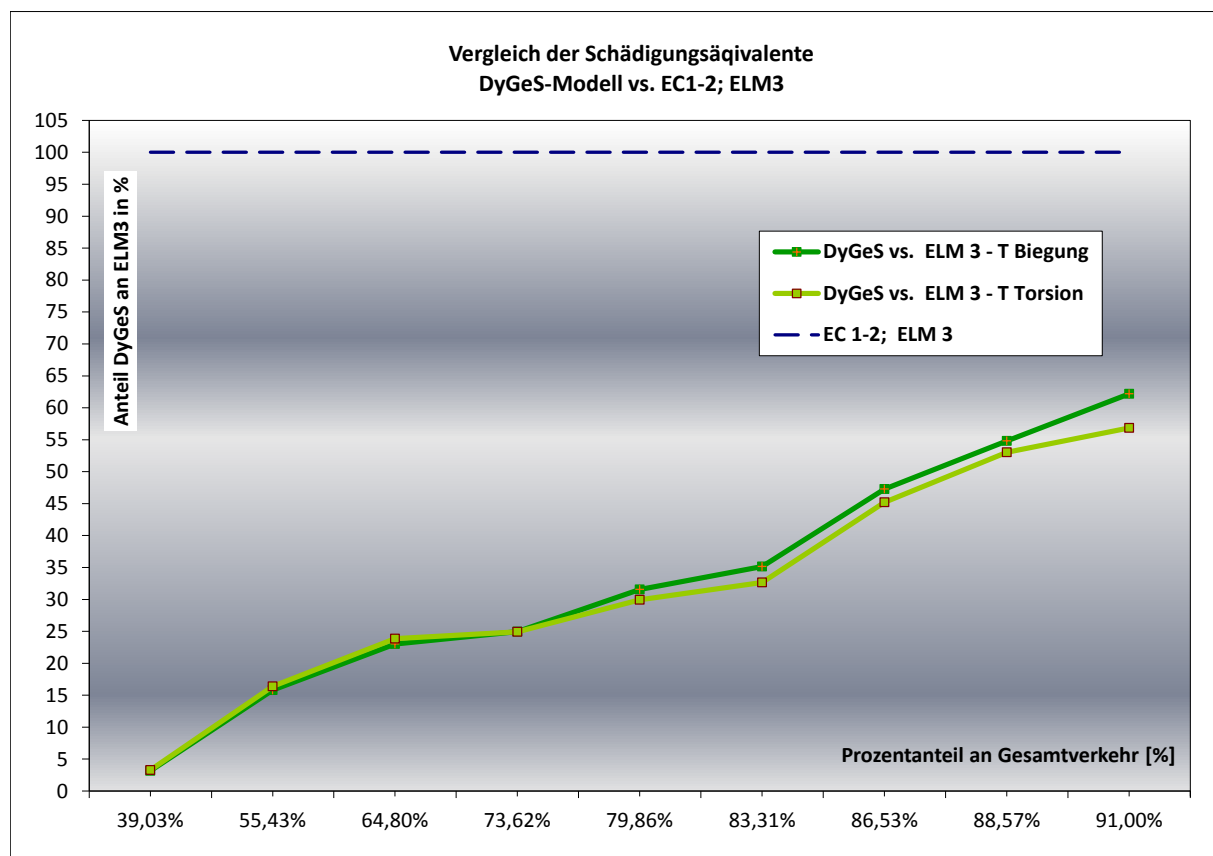


Bild 98: Schadensakkumulation unter sukzessiver Berücksichtigung aller Belastungsanordnungen - Direkter Vergleich des Ermüdungslastmodells 3 der ÖNORM B 1991-2 [40] mit dem DYGES-Modell

Bild 98 veranschaulicht grafisch den zuvor tabellierten Vergleich zwischen dem DYGES-Modell und ELM 3 hinsichtlich akkumulierter Ermüdungsschädigung. Dargestellt werden dabei sowohl die Vergleichs-Werte des DYGES-Modells für Biegung als auch jene für Torsion sowie das ELM 3 selbst.

6.5.2 Vergleich hinsichtlich Tragfähigkeit (α – Wert äquivalente Gesamtbetrachtung)

Wie bereits mehrfach angekündigt, wurde – abrundend zur bisher schwerpunktmäßig betrachteten ermüdungsrelevanten Beanspruchung – nun auch ein ganzheitlicher Vergleich der gemessenen Schwerverkehrs-Belastung mit den für den Aspekt der Tragsicherheit wesentlichen Lastfällen des Eurocode EC1-2 bzw. mit weiteren, für den Autobahnabschnitt A13 maßgeblichen Belastungs-Szenarien nachgereicht. Während bis zum vorangehenden **Abschnitt 6.5.1** die messungsbasierten Lastbilder & Tonnagen unter dem Aspekt der Bauwerksalterung in geeigneter Weise zur Vergleichsgröße der so genannten Schädigungsäquivalente zusammengeführt und für den Vergleich mit dem Eurocode aufbereitet wurden, erfolgt dies nun anhand der identischen Eingangsgrößen, aber mit Hilfe des Vergleichsparameters der resultierenden Summenbelastung (Tonnage). Durch die direkten Auswirkungen auf die zugehörigen, globalen Schnittgrößen können die nachfolgenden Vergleichsüberlegungen als α -Wert äquivalente Betrachtungen im Sinne des Grenzzustandes der Tragfähigkeit angesehen werden.

Die aus dem Monitoring stammende Belastung des Regelbetriebes (DYGES-Biegung & DYGES-Torsion) wird folgenden Lastfällen gegenübergestellt:

- Grenzzustand der Tragfähigkeit **LM1**
- Ermüdungslastfälle **ELM1, ELM3 & ELM4**
- **Vollstau** mit DYGES Tonnagen (Betrachtung 2 LKW- & 2 PKW-Spuren)
- Auf der A13 von der Genehmigungspflicht ausgenommene Sondertransporte bis **70 t**

Zunächst erfolgt eine Gegenüberstellung der Absolutbeträge – ausgedrückt durch die maximal auf das Brückenfeld aufzubringenden Tonnagen.

- Infolge des Ermüdungs-Lastmodells ELM 3 befinden sich konstant 62,4t auf dem Tragwerk, für das ELM 4 infolge einzeln fahrender Schwerfahrzeuge sind dies durchschnittlich 40,4t.
- Infolge des Ermüdungslastmodells 1 befinden sich durch die punktuelle wie flächige Belegung der relevanten rechnerischen Fahrstreifen 181 t auf dem Tragwerk.
- Ergänzend wird als neuer, aufschlussreicher Vergleichsparameter der Schwellenwert für die von der Genehmigungspflicht ausgenommenen Sondertransporte herangezogen. Laut Angaben der ASFINAG Alpenstraßen GmbH liegt dieser bei 70 t.
- Die Obergrenze für die vergleichenden Betrachtungen bildet das Lastmodell LM 1 des Eurocode 1-2 ([**40**] - Grenzzustand der Tragfähigkeit). Dessen Zusammensetzung wurde vorab grafisch wie numerisch dargelegt (**Bild 99**). Beim Lastmodell LM1 befinden sich infolge punktueller sowie flächiger Belegung der relevanten, rechnerischen Fahrstreifen 522 t auf dem Tragwerk.

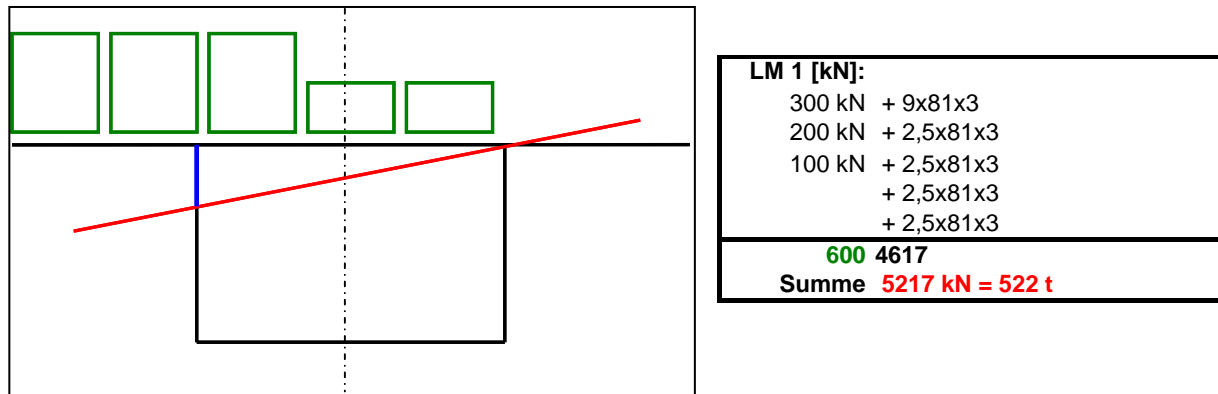


Bild 99: Übertragung des Belastungsbildes infolge **Lastfall Grenzzustand der Tragfähigkeit LM 1** auf das Randfeld Schönberg – Komponenten für die rechnerischen Fahrstreifen (links) und resultierende Gesamtbelastung (rechts)

- Abschließend wird ein weiterer, naheliegender Vergleichsparameter geschaffen. Für das Gedankenmodell des Rückstaus werden anstatt der bisher betrachteten, rechnerischen Fahrstreifen in Anlehnung an die realen Fahrbahn-Komposition 4 Fahrstreifen mit LKW- bzw. PKW-Belastung versehen (**17.2.2**). Unter Berücksichtigung der Spannweite des Brückenrandfeldes Schönberg, der geometrischen Abmessungen von Schwer- und Personenfahrzeugen sowie der Zusammensetzung der Schwerfahrzeuge im Sinne der durch die Langzeitreihe vorliegenden DYGES-Gewichtsklassen (**Tabelle 4** in **Kapitel 4.1.1**) ergibt sich eine resultierende Belastung von 425 t (weitere Details zum Vergleichsmodell des rückgestauten Autobahnverkehrs sind **17.2.2** zu entnehmen).

Von Seiten des DYGES-Modells wird für jedes Belastungsszenario jene Tonnage aufgetragen, die sich bei dieser Belastungsanordnung im rechnerisch ungünstigsten Fall (=das maximale Schädigungsäquivalent) ergibt sowie die zum Belastungsszenario zugehörige Auftretens-Häufigkeit (Sekundär-Ordinate).

Abschließend sind sämtliche, diesem Abschnitt zugrunde liegenden Größen numerisch (**Tabelle 33 & Tabelle 34**) sowie grafisch (**Bild 100**) aufbereitet. **Bild 101** liefert grafisch den selben Vergleichs-Ansatz aus **Bild 100** noch einmal, allerdings sind diesmal die prozentuellen Anteile der resultierenden, maximal auftretenden DYGES-Gewichtbelastung in Bezug auf die Tonnage des Lastmodells LM1 (**Bild 99**) dargestellt. Durch die Proportionalität der resultierenden Schnittgrößen zu den auslösenden Tonnagen werden alle nachfolgenden Diagramme und Tabellen als α -Wert äquivalente Betrachtungen bezeichnet.

Die Bedeutung des durch Feldversuche hinterlegten, realen Lastkollektivs und dessen Auswirkungen auf den zugehörigen Anpassungsfaktor für die Verkehrslast α lassen sich im Hinblick auf die wesentlichsten Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Für den Regelbetrieb (DYGES-Biegung & DYGES-Torsion) ergeben sich gegenüber dem **Grenzzustand der Tragfähigkeit LM1 α -Werte zur Abminderung der Verkehrslasten** in einer Bandbreite von **0,063-0,318**.
- Für den Regelbetrieb (DYGES-Biegung & DYGES-Torsion) ergeben sich gegenüber dem **ungünstigsten Ermüdungslastfall ELM1 α -Werte zur Abminderung der Verkehrslasten** in einer Bandbreite von **0,183-0,917**.
- Für ein mit DYGES Tonnagen konfiguriertes **VOLLSTAU-Szenario** ergibt sich gegenüber dem **Grenzzustand der Tragfähigkeit LM1 ein α -Wert zur Abminderung der Verkehrslasten von 0,814** => für Überlegungen hinsichtlich Tragsicherheit ist somit der Vollstau maßgebend.
- Das Belastungsniveau der für die A13 genehmigungsfreien Sondertransporte entspricht in etwa der Konstellation aus den 5 häufigsten Lastbildern, welche mit resultierenden Tonnagen zwischen 33 und 83 t gemeinsam rund 74% der auftretenden Lastfälle abdecken. Der für das Tragwerk festgelegte Schwellenwert für die von der Genehmigungspflicht ausgenommenen Sondertransporte bis 70t erscheint daher in der Größenordnung richtig gewählt.

SZENARIO	Max.Tonnage								
	Prozentanteil	DyGes Biegung	DyGeS Torsion	ELM3 62,4t	ELM4 40,4t	Sondertransport A13 - 70t	EC - ELM1 181 t	EC - LM1 522 t	Vollstau Dyges+PKW 425t
1 LKW RFBB	23,88	33,0	33,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
2 LKWs RFBI	16,30	83,0	83,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
1 LKW RFBI	15,15	33,0	33,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
2 LKWs RFBB	9,47	83,0	83,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
Je 1 auf beiden Seiten	8,82	83,0	43,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,24	133,0	93,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,45	133,0	93,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
3 LKWs RFBI	3,22	133,0	133,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
Je 2 auf beiden Seiten	2,42	166,0	103,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
3 LKWs RFBB	2,04	133,0	133,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425

Tabelle 33 : Vollständiger Vergleich der Lastfälle Ermüdung, Tragfähigkeit, einem messungsbasierten Vollstauszenario, dem auf der A13 genehmigungsfreien Sondertransport (70t) und DYGES – **Vergleichsgröße resultierende, maximale Tonnagen im Randfeld Schönberg**

SZENARIO	Anteil an LM1 in % α - Wert äquivalenter Gesamtvergleich (Ermüdung & Tragfähigkeit)								
	Prozentanteil	DyGes Biegung	DyGeS Torsion	ELM3 62,4t	ELM4 40,4t	Sondertransport A13 - 70t	EC - ELM1 181 t	EC - LM1 522 t	Vollstau Dyges+PKW 425t
1 LKW RFBB	23,88	6,3	6,3	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
2 LKWs RFBI	16,30	15,9	15,9	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
1 LKW RFBI	15,15	6,3	6,3	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
2 LKWs RFBB	9,47	15,9	15,9	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
Je 1 auf beiden Seiten	8,82	15,9	8,2	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,24	25,5	17,8	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,45	25,5	17,8	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
3 LKWs RFBI	3,22	25,5	25,5	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
Je 2 auf beiden Seiten	2,42	31,8	19,7	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
3 LKWs RFBB	2,04	25,5	25,5	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4

Tabelle 34 : α - Wert äquivalenter Gesamtvergleich der Lastfälle Ermüdung / Tragfähigkeit / messungsbasiertes Vollstauszenario / dem genehmigungsfreien Sondertransport (70t) und DYGES – **Vergleichsgröße Anteil** der resultierenden, maximalen Tonnagen im Randfeld Schönberg **am LM1 in %**

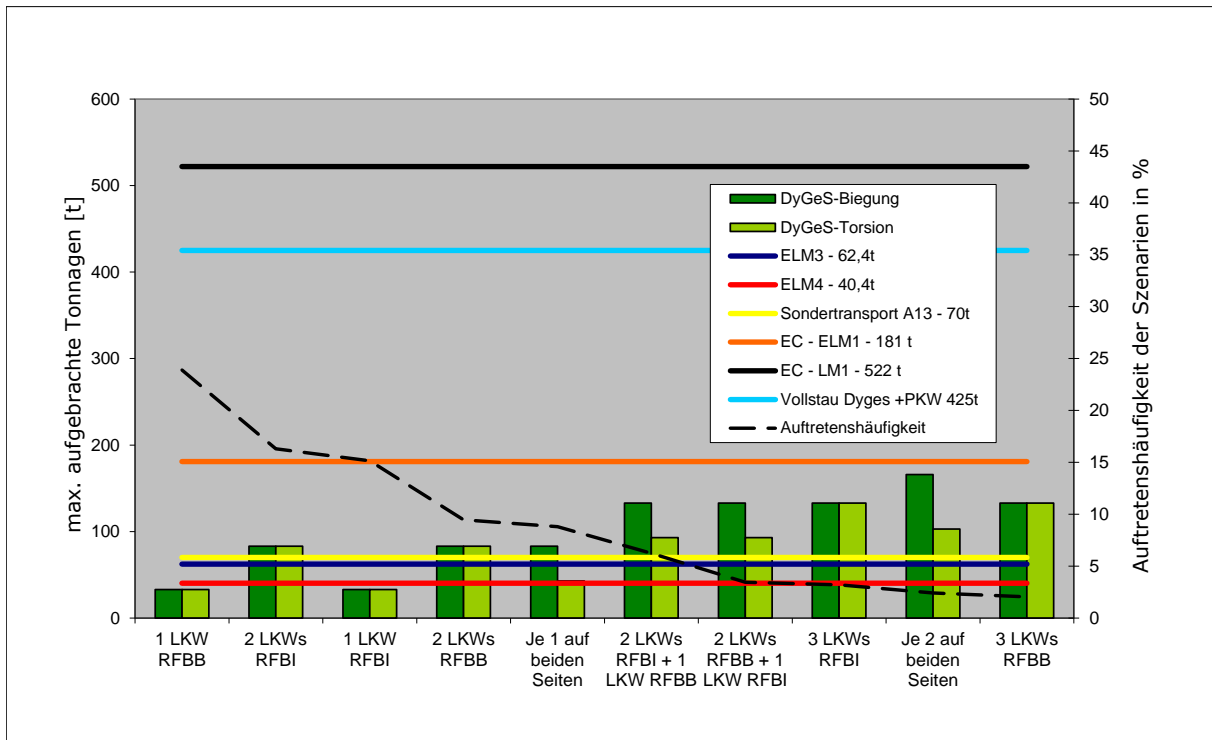


Bild 100: Vollständiger Vergleich - Lastfälle Ermüdung, Tragfähigkeit, messungsbasiertes Vollstauszenario, der auf der A13 genehmigungsfreie Sondertransport (70t) und DYGES - resultierende, maximale Tonnagen im Randfeld Schönberg

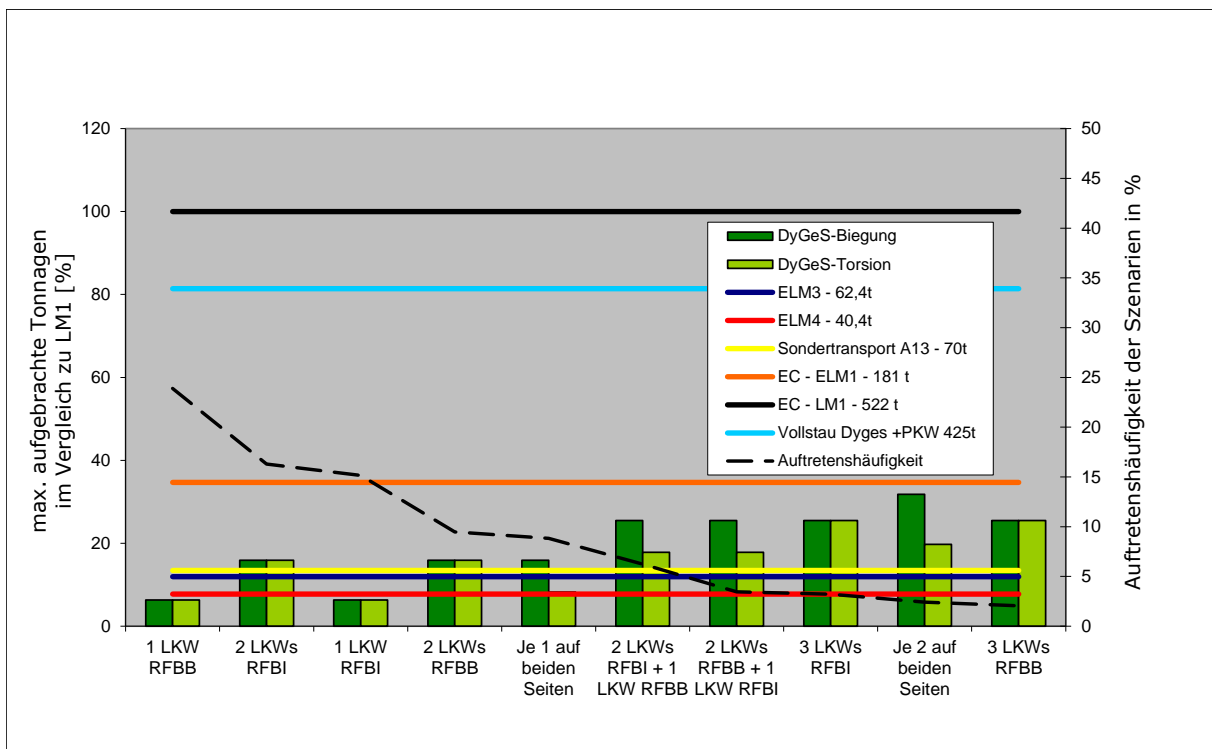


Bild 101: α - Wert äquivalenter, vollständiger Vergleich: Anteile der aus den Lastfällen Ermüdung, Tragfähigkeit, Vollstau, Sondertransport (70t) und DYGES resultierenden, maximalen Tonnagen im Vergleich zum ELM1 [%]

Abschließend sei noch auf weitere, im **Kapitel 17** detailliert ausgearbeitete Erörterungen hingewiesen:

- Zunächst wurden in **Abschnitt 17.3** zusammenfassende Gedanken zur vorliegenden Gegenüberstellung der Lastansätze dargelegt, wobei nochmals
 - auf die Vorzüge der in der Dissertation entwickelten Methodik einerseits
 - sowie deren Anwendungsgebiete andererseitshingewiesen wurde.
- In **Abschnitt 17.3.1** wurde die vorgenommene, α -Wert äquivalente Darstellung als Vergleichsgröße kommentiert. Dies erfolgte unter Hinzuziehen von externen Quellen, denen jeweils eine sehr ähnliche Charakteristik der analysierten Schwerverkehrseinwirkung zugrunde liegt:
 - Dabei handelt es einerseits um in Österreich (siehe [53]) wie auch in Deutschland mittlerweile in Vorschriften bzw. Arbeitsanweisungen zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken (Grenzzustand der Tragfähigkeit) verankerte α -Werte.
 - Andererseits ist dies eine für den Schweizer Raum relevante, aktuelle Studie von Meystre und Hirt [42].
- In **Abschnitt 17.3.2** wird eingehend auf die Zulässigkeit eingegangen, die vorgenommenen Analysen zum Lastmodell anhand einer isolierten Betrachtung des Randfeldes Schönberg vorzunehmen, wobei das Referenzieren auf die maßgeblichen Lastbilder bzw. die zugehörigen, realen Gewichtsbelastungen aus baustatischer Sicht
 - für Torsionsbeanspruchung
 - sowie für Biege- bzw. Querkraftbeanspruchungerörtert wird.
- Zur rechnerischen Auswirkung auf die Nutzungsdauer ausgewählter Bauteile:
 - Zur Analyse der rechnerischer Auswirkung der in dieser Dissertation geschaffenen Grundlagen für neue Last-Eingangsrößen auf Lebensdauer-Berechnungen an zwei maßgeblichen Bauteilen wird auf [58] verwiesen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Das folgende, abschließende Kapitel dient vordergründig der Zusammenführung ausgewählter, im Laufe der Dissertation ausgearbeiteten Antworten auf die eingangs in **Kapitel 1.3** formulierten Fragen und der Erörterung der konkreten Bedeutung für das untersuchte Tragwerk bzw. für diese Art der Infrastruktur. Da die zugrunde liegende Problemstellung vielerorts in sehr ähnlicher Weise auftritt, wird in dieser Arbeit der Anspruch auf eine grundsätzliche Gültigkeit bezüglich der Abbildung des realen Schwerverkehrsgeschehens einerseits und deren Auswirkung auf die Tragsicherheit bzw. auf das Alterungsverhalten andererseits erhoben.

Auf Grundlage der dargelegten Studien wurde durch ein detailliertes, vielschichtiges Messprogramm die tatsächliche Lasteinwirkung in zeitsynchroner, integraler Form am Tragwerk erfasst. Durch Kopplung mit analytischen Vergleichsrechnungen wurde letztlich ein vollständig bestimmtes, in mehreren Ebenen jederzeit überprüfbares System zur Bewertung der realen Betriebsbeanspruchung geschaffen.

Die vorliegenden Ergebnisse haben im Zuge umfassender Erörterungen im Rahmen dieser Doktorarbeit sowohl bezüglich der neuartigen Schwerverkehrsklassifizierung als auch hinsichtlich der daraus abgeleiteten, wesentlichen Ansätze für ein entsprechend ausgearbeitetes Lastmodell einer umfassenden Evaluierung standgehalten. Dabei wurde auch auf vorhandene nationale & internationale Studien referenziert, welche ausführlich die Aspekte Schwerverkehrscharakteristik und Lastmodellierung im hochrangigen europäischen Straßennetz behandeln.

7.1 Das Monitoring-basierte Dynamische Gewichtserfassungssystem DYGES

Der Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation lag in der Entwicklung eines neuen, messungsbasierten Algorithmus zur Dynamischen Gewichtserfassung von Schwerfahrzeugen. Dabei wurde ein permanentes Monitoring-System aus Beschleunigungssensoren eingesetzt, welches seit dem Sommer 2004 am Brückenkrugarm LKW-Einheiten zählt und „wiegt“. Unmittelbarer Output des Verfahrens sind lückenlose Abfragen zur Schwerverkehrsstatistik im Sinne einer Langzeitreihe, wobei die Fahrzeuge in Gewichts- und Geschwindigkeitsklassen eingeordnet werden.

- Nachdem die Notwendigkeit zur Inanspruchnahme eines vordergründig experimentellen Vorgehens erörtert wurde (Messdaten basierte Mustererkennung), erfolgte die umfassende

Darlegung zur Entwicklung des methodisch aus einzelnen Prozessblöcken zusammengesetzten DYGES-Algorithmus.

- Dieses Verfahren zur Nachbildung des realen LKW-Belastungskollektivs wurde im Zuge von Eichungs-Überfahrten mit Hilfe von Schwerfahrzeugen mit bekanntem Gewicht kalibriert, wobei deren Charakteristik bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfasst und in weiterer Folge für eine automatisierte LKW-Gewichtsbestimmung verwertet werden konnte.
- Die entwickelten und für die Auswertung geschaffenen Raumkurven decken grundsätzlich einen Lastintensitätsbereich für Tonnagen zwischen 8,7 und 42,8t und einen Geschwindigkeitsbereich zwischen 20 und 60 km/h ab, wobei hinsichtlich einer realitätsnahen Datengrundlage anhand der Betrachtung der auftretenden Grenzfälle (bzw. deren Überschreitung) eindeutige Stabilisierungsmechanismen innerhalb des entwickelten Algorithmus zur LKW-Charakterisierung festgelegt wurden.
- Eine ausführliche Auseinandersetzung mit analytischen Vergleichsrechnungen, mit offiziellen Mautportal-Zählraten der ASFINAG Maut Service GmbH sowie eine umfassende Video-gestützte Validierung haben zum schrittweisen Ausmerzen der auftretenden Instabilitäten und Unsicherheiten innerhalb des DYGES-Algorithmus geführt.
- Neben der Überprüfung von beliebig gewählten, einzelnen LKW-Überfahrten erfolgte parallel zu entsprechendem Video-Material eine lückenlose, Fahrzeug-weise Evaluierung der vom DYGES-Algorithmus generierten Ergebnisse über größere Zeitabschnitte. Dadurch wurde schließlich auch die nötige Gewissheit erlangt, mit dem entwickelten Instrument bedenkenlos eine gewissermaßen anonymisierte Auswertung der Schwerverkehrscharakteristik anhand großer Datenmengen durchführen zu können.

Weitere Details sind direkt dem **Kapitel 3** zu entnehmen.

7.2 Ergebnisse zum realen LKW-Lastkollektiv

- Im Zuge der Aufarbeitung der gemessenen Langzeitreihe der permanenten Zustandsüberwachung am Brückentragwerk Europabrücke zeigen die Ergebnisse des DYGES-Algorithmus eine Monat für Monat weitgehend konstante Verteilung auf die einzelnen Gewichtskategorien, d.h. **rund 25 % Leer-LKWs, etwas weniger als 40% voll ausgelasteten LKWs** und eine gleichmäßige Verteilung der verbleibenden Schwerfahrzeuge auf die übrigen Tonnagen-Klassen.

- Betrachtet man die Verteilung der Fahrzeuggesamtwichte auf der A13 Brennerautobahn im Zeitraum 1998-2007, so ist ein eindeutiger Trend zu höheren Gewichten sichtbar. Während der Anteil der LEER-LKWs in diesem Beobachtungszeitraum in etwa gleich bleibt, zeigt die Analyse der Fahrzeugkollektive eine starke Konzentration hin zu den Sattelzügen und damit eine Bestätigung der Tendenz zu größeren Transporteinheiten und einer besseren Transportlogistik.
- Der Anteil der Schwerfahrzeuge > 38t gegenüber 1998 hat sich bis 2007 mehr als verdoppelt (von 17% auf 42,6%).
- Die durchschnittliche Lkw-Belastung ist dadurch im gleichen Zeitraum um 20% angestiegen (von 24,9t auf 29,9 t).

Weitere Details sind direkt dem **Kapitel 4.1** zu entnehmen.

7.3 Evaluierung der DYGES-Zählung & -klassifizierung anhand externer Untersuchungen

Prinzipiell wurde ein detaillierter Bezug zu den nachfolgenden Datenquellen hergestellt:

- Zählstellen der ASFINAG Mautservice GmbH
- Die im Eurocode festgelegten „Standard“-Lastkraftwagen
 - ❖ Vergleichsparameter Achsanzahl infolge Fahrzeugtyp
 - ❖ Vergleichsparameter zugewiesenes Fahrzeuggewicht infolge Verkehrstyp
 - ❖ Vergleichsparameter durchschnittliches Fahrzeuggewicht des einzelnen Schwerfahrzeuges
- Externe Untersuchungen an der gleichen bzw. an sehr ähnlicher Schwerverkehrs-Einwirkung
 - ❖ **A13 Brenner-Autobahn**: Wiegeeinrichtung der Polizei am Standort Brennersee 1998
 - ❖ **A12-Inntalautobahn**: Bridge-Weigh-In-Motion Untersuchungen Dr. Petschacher 2008
 - ❖ **BAB A61 Deutschland** – Dynamische Untersuchungen der BAST 2004/2005

Folgende Vergleichsparameter wurden dabei Verfahrens-unabhängig herangezogen:

- ❖ prinzipielle Verteilung auf die einzelnen Gewichtskategorien
- ❖ das durchschnittliche LKW-Gewicht
- ❖ Anteil der hoch ausgelasteten Schwerfahrzeuge (> 38t)
- ❖ Anteil der überladenen LKWs (soweit ersichtlich)

Ungeachtet der individuellen Besonderheiten und Herangehensweisen bei allen einander gegenübergestellten Verfahren (gängige Lösungen einerseits und maßgeschneiderte Lösungen

andererseits) gelang die Untermauerung der Richtigkeit der qualitativen und quantitativen Abbildung des realen Schwerverkehrs, welche sich nach konsequenter Ausarbeitung des vom Autor entwickelten DYGES-Verfahrens ergibt.

Weitere Details sind direkt den **Kapiteln 4.2 - 4.3** zu entnehmen.

7.4 Mechanische Modellierung des Dynamischen Gewichtserfassungssystems DYGES

Dem Ansinnen, das - zunächst auf weitgehend experimenteller Basis anhand des sekundären Tragsystems Brückenkragarm - neu entwickelte Dynamische Gewichtserfassungssystem DYGES analytisch nachzubilden, wurde ausführlich Rechnung getragen, indem an einem Bernoulli-Euler Biegebalken-Ersatzsystem unter Krafterregung ein umfassendes Parameteridentifikations- und Vergleichsverfahren im Rahmen von Studien der Systemantwort durchgeführt wurde. Das nachweislich funktionierende, experimentell basierte Verfahren zur Lasterkennung wurde vollständig analytisch hinterlegt, indem die Eichkurven des DYGES-Prozesses und damit auch der weiterführende DYGES-Algorithmus durch ein baumechanisch basiertes Vorgehen hinreichend plausibilisiert wurden.

- Wie gezeigt wurde, konnten die stellvertretend für die entwickelte Dynamische Gewichtserfassung stehenden Grenzkurven aus dem Feldversuch anhand der Implementierung von möglichst vielen, bekannten Charakteristika des untersuchten (realen) Tragsystems in das herangezogene mechanische Vergleichsmodell sehr gut „gefittet“ werden (curve-fitting). Diese Implementierung anstatt des Treffens von Annahmen hat sich als großer Vorteil erwiesen. Der Konnex zur Analyse des realen Verhaltens wurde dadurch ganz wesentlich verbessert. Gleichzeitig wurden die Richtigkeit und Gültigkeit jedes - zuvor vorwiegend anhand experimenteller Einschätzungen – gesetzten Prozessschrittes voll bestätigt.
- Dabei wurde nicht nur die sehr spezifische Abhängigkeit des Verlaufs der Systemantwort von der Überfahrtsgeschwindigkeit analytisch bestätigt sondern auch die durch die Ergebnisse der beiden Eichfahrzeuge vorliegende Charakteristik der dynamischen Vergrößerung.

Schließlich wurden auch potentielle, rechnerische Modellierungs-Unsicherheiten bei der Auswertung des realen, über den DYGES-Messquerschnitt fahrenden Schwerverkehrs analysiert, dazu abrundend eine Auswahl der wesentlichsten Erkenntnisse:

- Die Einflussnahme des Schwerverkehrsaufkommens der gegebenenfalls befahrenen Nebenspur kann als vernachlässigbar angesehen werden.

- Das Schwerverkehrsaufkommen auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn kann im Fall bestimmter Lastkonfigurationen beeinflussend wirken, da die dafür notwendigen Voraussetzungen aber keineswegs generalisiert auftreten, ist die bezifferte, potentielle Modellierungsungenauigkeit deutlich zu relativieren.
- Der Einfluss der Spurtreue kann als einzige implizierte Modellierungsunsicherheit angesehen werden, während im Zusammenhang mit allen anderen erörterten Aspekten vielmehr von Modellierungsgenauigkeit gesprochen werden sollte.

Weitere Details sind direkt dem **Kapitel 5** zu entnehmen.

7.5 Lastmodell für den auf der Europabrücke vorherrschenden Schwerverkehr anhand der realen Betriebsbeanspruchung

- Die Zusammenführung der im Feldversuch erfassten, realen Belastungs-Anordnungen samt zugehöriger Auftretens-Häufigkeiten, der Lastintensitäten (DYGES-Tonnagenklassierung samt zugehöriger Häufigkeiten) liefert unter Verwendung mechanischer sowie mathematisch-kombinatorischer Überlegungen die wesentlichsten, aus dem realen Geschehen modellierten Eingangsgrößen eines entsprechenden Schwerverkehrs-Lastmodells.
- Als konsistentes Bindeglied zwischen dem entwickelten DYGES-Lastmodell und den seitens des Eurocode vorgegebenen Lastmodellen wurde vom Autor der Parameter der so genannten Schädigungsäquivalenz als Schlüsselparameter hergeleitet (**Kapitel 16.1.3**), welcher die genannten maßgeblichen Eingangsgrößen (Lastbilder, zugehörigen Tonnagen-Belastung sowie deren Auftretens-Häufigkeiten) in geeigneter Weise für eine Gegenüberstellung zwischen normativem und experimentellem Vorgehen heranzieht. Dabei wird der grundsätzliche Schädigungsbeitrag - welcher durch die in der Norm definierten Standardfahrzeuge erzeugt wird – jenem Schädigungsäquivalent gegenübergestellt, das auf das durch Monitoring beschriebene Belastungskollektiv zurückgeht. Bei dieser Entwicklung wurde gleichermaßen auf die Gültigkeit bzw. Anwendbarkeit im Zusammenhang mit Tragsicherheitsberechnungen geachtet.
- Dabei ist festzuhalten, dass mit dem in dieser Dissertation entwickelten Lastmodell vorwiegend ein prinzipielles Werkzeug bereitgestellt werden sollte, welches sich auf die tatsächlichen Lastaufstellungen und die zugehörigen Lastintensitäten (Tonnagen) samt Auftretens-Häufigkeiten für statische Nachrechnungen am bestehenden Bauwerk stützt. Es handelt sich dabei nicht um ein im Detail ausgearbeitetes Modell für jeden maßgeblichen, kritischen Querschnitt bzw. Nachweispunkt der Brücke (sämtliche derartige Fragestellungen bedingen, dass eine andere Kombination aus Laststellung, Auftretens-Intensität und Auftretens-Häufigkeit an

der jeweils betrachteten Nachweisstelle maßgebend ist) sondern um einen verallgemeinerten, übergeordnet gültigen (globalen) Ansatz.

- Aus diesem Grund wird der in dieser Dissertation vorgenommene Vergleich mit den Ansätzen des EC1-2 auch bewusst als so genannte, α -Wert äquivalente Gegenüberstellung tituliert.

Für den Fall des Abgehens vom normativen Verfahren bei der Bewertung der bestehenden Tragstruktur stehen durch das mit Feldversuchen hinterlegte, reale Lastkollektiv und dessen Analysen entsprechende, alternative Anpassungsfaktoren α für die Verkehrslast zur Verfügung.

Weitere Details sind direkt dem **Kapitel 6** zu entnehmen.

7.6 Schlussbemerkungen

- Durch das Monitoring-basierte Dynamische Gewichtserfassungssystem liegt der ASFINAG Alpenstraßen GmbH eine maßgebliche Erweiterung der offiziellen, bisher durch Mautzählungen vorliegenden Verkehrsvolumina (als Funktion der gezählten LKW-Einheiten samt zugehöriger Anzahl der Achsen) vor. Von Seiten des Eurocode standen in diesem Zusammenhang bis dato die standardisierten Lastkraftwagen (Ermüdungslastmodelle 2 bis 4) zur Verfügung.
- Mit dem in weiterer Folge ausgearbeiteten, in-situ basierten Lastmodell, welches dem Eurocode (ÖNORM B 1991-2 [40]) detailliert gegenübergestellt wurde, wird eine vollwertige, alternative Eingangsgröße für baustatische Nachrechnungen bereitgestellt, was insbesondere für den Fall einer notwendigen Aufhebung des Konsensschutzes am Bestandstragwerk von Bedeutung ist.
- Die gesicherte Dokumentation des aktuellen Belastungsgeschehens schafft im konkreten Fall die Grundlage, vom normativ geregelten Ablauf zur Bewertung bestehender Infrastruktur abgehen zu können, während eine rechnerische Auseinandersetzung unter Heranziehen des Eurocode wenig Möglichkeiten für den Fortbestand dieser Tragwerke geben würde.
- Mit der vorliegenden Dissertation liegt keineswegs eine ausschließlich für diese Brücke "maßgeschneiderte" Studie vor. Das entwickelte Lastmodell und die dabei entstandenen Kernaussagen und Erkenntnisse hinsichtlich Belastungsintensität & Bauwerksalterung haben grundsätzlich nicht nur für das Tragwerk Europabrücke, sondern nach einigen adaptierenden Überlegungen im Wesentlichen für die gesamte A13 Brennerautobahn Gültigkeit. Dieser Umstand ist dadurch zu begründen, dass alle großen Brücken auf diesem Autobahnabschnitt derselben Bauwerksgeneration angehören, ähnliche geometrische Verhältnisse (Feldlängen &

Bauhöhen) und daher eine gleichartige Bemessung sowie insbesondere auch dieselbe Belastungsgeschichte aufweisen.

- Letztlich soll mit der durch die Doktorarbeit geschaffenen Alternative für die Einwirkungsseite und der dabei aufbereiteten, α -Wert äquivalenten Darstellung der Messergebnisse vor allem die Größenordnung der Auswirkung auf die rechnerischen Zustandsgrößen aufgezeigt werden.
- Erst in weiterer Folge wurden Lebensdauer-Berechnungen für die maßgeblichen Bauteile – d.h. für Querverbände bzw. die Kragarme - durchgeführt. Dabei wurde die reale, im Feldversuch ermittelte Einwirkung in Rechenmodelle implementiert, um die rechnerische Auswirkung der in dieser Dissertation geschaffenen, neuen Eingangsgrößen auf die Alterung dieser beiden Bauteile analysieren zu können. Dabei wurde deutlich aufgezeigt, welche Bedeutung maßgebliche Abschnitte der Bauwerksgeschichte auf das Schwerverkehrsaufkommen bzw. die Verkehrsführung hatten, da sich deren Berücksichtigung bei der Berechnung zum akkumulierenden Schaden entsprechend deutlich auswirken. Insbesondere der beidseitigen Verbreiterung der Fahrbahn 1984 kommt dabei gewissermaßen eine initiale Bedeutung im Sinne eines tatsächlich relevanten, jährlichen Verzehrs der vorhandenen Ermüdungskapazität zu - dem ersatzlosen Wegfall des Transitvertrages 2003/04 eine wiederum extrem beschleunigende Bedeutung. Dieser Themenbereich war allerdings nicht Gegenstand dieser Doktorarbeit. Entsprechende Details dazu können aber [58] entnommen werden.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Wenzel H.: **Health Monitoring of Bridges**; J. Wiley and Sons Ltd, ISBN0470031735; Chichester England, Oct 2008
- [2] Wenzel H., Pichler D.: **Ambient Vibration Monitoring**; J. Wiley and Sons Ltd, ISBN 0470024305; Chichester England, April 2005
- [3] R. Veit, H. Wenzel, J. Fink.: **Measurement data based lifetime-estimation of the Europabrücke due to traffic loading - a three level approach**; Proceedings of the 58th International Conference of International Institute of Welding IIW2005, "Vol.49, Special Issue-2005"; Prague, Czech Republic, July 2005
- [4] Veit R., Wenzel H.: **"Measurement based performance prediction of the Europabrücke against traffic loading"** in "Proceedings of the 16th European Conference of Fracture ECF16", Alexandroupolis, Greece, July 2006, ISBN 13-978-1-4020-4972-9
- [5] H. Wenzel, R. Veit-Egerer : **Measurement based traffic loading assessment of steel bridges – a basis for performance prediction**; in "Structure & Infrastructure Engineering- Maintenance, Management and Life-Cycle Design & Performance" (International Journal), Taylor & Francis Group, New York, DOI: 10.1080/15732470802586428 (allocation to a printed issue for publication is under progress), First published on 18 March 2009
- [6] Veit-Egerer R.: **Condition compensation in frequency analyses – a basis for Damage Detection** in "Encyclopedia of Structural Health Monitoring", Edited by C. Boller, F-K. Chang, Y. Fujino, J. Wiley and Sons Ltd, Chichester - England, 2007
- [7] VCE: **Bericht 97/089-02: A13 Brennerautobahn Europabrücke - Dynamische Charakteristik des Brückentragwerkes (primäre Tragstruktur - Haupttragwerk), Messungen, Vergleichsrechnungen und Interpretationen der Ergebnisse.** 1999.
- [8] VCE: **Bericht 02/514-01: Europabrücke – Dynamische Charakteristik des Brückentragwerkes (sekundäre Tragstruktur - Brückenkragarme),** 2002.
- [9] VCE: **Bericht 06/2310-04: Diagonalstreben - Europabrücke. Monitoring-basierte Schwachstellenfindung hinsichtlich Bauteilermüdung.** 2006-2007.
- [10] Kratzer – Klement ZT GmbH: **"Berichte zu den Brücken-Inspektionen der Jahre – 1983,1984,1991,1999 und 2005"** für die ASFINAG Alpenstrassen GmbH, Graz bzw. Wr. Neustadt
- [11] Kratzer-Klement: **A13 Brenner Autobahn Europabrücke, Statische Nachrechnung 2007/2008.** Kratzer-Klement ZT GmbH Wiener Neustadt, 2008.
- [12] Kratzer-Klement: **A13 Brenner Autobahn Europabrücke, Technischer Bericht Nachrechnung 2006.** Kratzer-Klement ZT GmbH Wiener Neustadt, 2006.
- [13] BMVIT-Abteilung II/A/1: **Verkehrsprognose 2015 - vorläufige Ergebnisse hochrangiges Straßennetz Österreich,** Wien, 2000
- [14] Tiroler Landesregierung: **Verkehrsentwicklung in Tirol, Berichte 1984 – 2011,** Abteilung Gesamtverkehrsplanung Innsbruck.
- [15] BMVIT-Abteilung II/ST1: **Aufzeichnungen zum durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen – Mautstelle Matrei am Brenner 1972-2002,** Wien

- [16] Dreitler, V.: Diplomarbeit bei VCE: **Ein monitoring-basiertes Lastmodell für Stahlbrücken in Hinblick auf Bauteilmüdung am Beispiel der Europabrücke, A13 Brennerautobahn**, Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur, Wien 2008
- [17] Niemi, E.: **Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's Guide**. IIW Doc. XIII-1819-00/XV1090-01/XIII-WG3-06-99. IIW-International Institute of Welding, Department of Mechanical Engineering, Lappeenranta University of Technology, June 2003.
- [18] Blevins, R.D.: „**Formulas for natural frequency and mode shape**“ Van Nostrand Reinhold Company, New York 1979
- [19] Clough, R. W.; Penzien, J.: **Dynamics of Structures**. Second Edition, Mc Graw Hill 1993
- [20] Bachmann, H.; Ammann, W.: **Vibrations in Structures - Induced by Man and Machines**. Structural Engineering Documents 3e, IABSE 1987
- [21] Beards, C. F.: **Structural Vibration-Analysis and Damping**; Arnold (A Member of the Hodder Headline Group); London,GB, 1996
- [22] SAMCO Final Technical Report: **F08a Guideline for the assessment of existing structures/ F 09b Guideline for Structural Health Monitoring** (European Commission FP5), 2006
- [23] WKV: Wirtschaftskammer Vorarlberg: LKW-Wochenendfahrverbot. <http://www.wkv.at/sektionen/vk/verkehrsbehinderungen.htm> , zuletzt besucht am 04.09.2008.
- [24] Structurae.de: Eintrag zur Europabrücke. <http://de.structurae.de/structures/data/index.cfm?ID=s0000657> , zuletzt besucht am 29.10.2010.
- [25] Graf, B.: **Brücken, die die Welt verbinden**. S. 94-95 . Prestel Verlag, 2002.
- [26] Wenzel, H., P. Furtner und R. Veit: **i2-1 Intelligente Infrastruktur – Endbericht zur Veröffentlichung DyGeS**. BMVIT, Vienna Consulting Engineers, 2005.
- [27] Veit, R., M. Widmann, H. Wenzel und H. Rainer: **HOT SPOT - Advanced Weak Determination & Assessment of Bridges. Final Report Annex D**. i2-3 Intelligent Infrastructure (BMVIT & FFG); Project No.: 811355 / 3381-GLE / BLC, Consortium VCE, JR, ASFINAG Alpenstrassen GmbH, Vienna, Austria, Jan 2008
- [28] Consortium ARS, VCE, RWTH, CESI, LNEC: **LESSLOSS – Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides - IP: Subproject 5: In-situ assessment, monitoring and typification**; European Commission FP6; Project No.: GOCE-CT-2003-505488, Deliverable D20 "Assessment of existing structures and models", Sept 2007
- [29] Bogath, J.: **Verkehrslastmodelle für Straßenbrücken - Beitrag zur Entwicklung eines probabilistischen Verkehrslastmodells**. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, 1997.
- [30] IMC: FAMOS – Fast Analysis and Monitoring Of Signals, Version 5.0 Bedienerhandbuch. imc Meßsysteme GmbH Berlin, 2005.
- [31] Schott, G.: **Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit**. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 4. Auflage Aufl., 1997.
- [32] Christ, H.-J.: **Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe**. Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 1998.
- [33] Roik, K.: **Vorlesungen über Stahlbau: Grundlagen**. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München, 1983.
- [34] Ramberger, G. und S. Schnaubelt: **Stahlbau**. Manz Verlag Schulbuch GmbH, Wien, 1998.

- [35] Naubereit, H. und J. Weihert: **Einführung in die Ermüdungsfestigkeit**. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1999.
- [36] Horst, H.: **Aspekte der Ermüdung von Schweißkonstruktionen**. In: Christ, H.-J. (Hrsg.): Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe, S. 233–244. Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 1998.
- [37] Issler, L., H. Ruoß und P. Häfele: **Festigkeitslehre-Grundlagen**. Springer Verlag, 2.Auflage, Nachdruck 2003.
- [38] Radaj, D.: **Ermüdungsfestigkeit**. Springer Verlag, Berlin, 1995.
- [39] Haibach, E.: **Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung**, 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [40] ÖNORM B 1991-2: **Eurocode 1 –Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken**, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2004.
- [41] Unterweger, H.: **Lehrveranstaltung Brückenbau - Grundlagen: Anhang 1 - Einwirkungen auf Brücken nach Eurocode 1** . TU Graz.
- [42] Meystre, T. und M. Hirt: **Dokumentation - Überprüfung bestehender Straßenbrücken mit aktualisierten Straßenlasten**. Techn. Ber., Bundesamt für Straßen ASTRA, Abteilung für Straßennetze, Bern, 2006.
- [43] Veit-Egerer, R., H. Wenzel und J. Fink: **Performance Prediction of Torsional Bracings using strictly in-situ based loading impact**. EUROSTEEL 2008, Graz, Österreich, 2008.
- [44] prEN 1993-1-9: 2002 - **Fatigue strength of steel structures**. CEN. Brussels.
- [45] Centre Technique des Industries Mécaniques: **Pressure components fatigue design in the framework of Directive 97/23/EC on pressure equipment – Work Package 6 – Final Report..** Mulhouse-France. 2001
- [46] Hobbacher, A.: **Recommendations for fatigue design of welded joints and components**. IIW Doc. XIII-1539-96/XV-845-96. Update-First draft for development, International Institute of Welding – IIW/IIS, Paris, France June 2002.
- [47] Adam C. **Studienblätter zu den Rechenübungen aus Baudynamik**, Institut für allgemeine Mechanik, Technische Universität Wien, Sommersemester 2000
- [48] Chopra A. K.: **Dynamics of structures, Theory and application to Earthquake engineering**, 2nd Edition, Prentice-Hall, Inc. New Jersey ISBN 0-13-086973-2
- [49] Petschacher M.: **Bridge-Weigh-in-Motion**, Schriftenreihe des BMVIT - Straßenforschungs (Projekt Nr. 3.337), 2010.
- [50] Kaschner R.: **Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen**, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 68 Teil 1, Bergisch Gladbach, 2009.
- [51] Naumann J.: **Brücken und Schwerverkehr – Eine Bestandsaufnahme**, Straße und Autobahn, Ausgabe 10/2009, Seiten 652-659, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 2009.
- [52] Brennerautobahn A13: **Gschnitztalbrücke Schadensanalyse 2006/2007**; Baumann & Obholzer ZT_GmbH, Bericht an ASFINAG Alpenstraßen GmbH, Innsbruck, 2007.
- [53] ASFINAG Servicegesellschaften Arbeitsgruppe Brückeninstandsetzung-Eurocode: **Statische Nachrechnung mit Aufzeigen von Lösungsansätzen inkl. Grobkostenabschätzung von Bestandsbrücken** - Beilage zur Leistungsbeschreibung der Dienstleistung, Wien, 2010.
- [54] EUROSTAT, VCÖ: **Anteil LKW-Leerfahrten-Fahrzeugkilometer 2007**, <http://www.vcoe.at/start.asp?b=1&ID=3709> , zuletzt besucht am 29.10.2010.

- [55] Gruber J.: **Die Europabrücke im Zuge der Brenner-Autobahn in Tirol**, ÖIAZ, 114. Jahrgang, Heft 8, Seiten 253-295, Springer Verlag Wien-New York, 1969.
- [56] Veit-Egerer R., Widmann M., Wenzel H.: **Evaluation of input-energy dependence on the Key Performance Indicators extracted from ambient vibration measurements with regard to structural assessment**; in "Life Cycle Performance Engineering" (International Journal), Inderscience Publishers, Olney-Bucks UK, submitted in Jan 2011
- [57] Veit-Egerer R., Wenzel H.: **Straßenbrücke Komořany, Tschechien - Ermittlung der Tragfähigkeit und insbesondere der Belastbarkeit einer Spannbeton-Straßenbrücke mittels Dynamischem Bauwerksmonitoring** (Determination of structural integrity and explicit load capacity of a Prestressed concrete bridge by means of dynamic monitoring); in "Beton- und Stahlbetonbau" Ausgabe 6/2008 Seiten 364-377", Ernst & Sohn, Berlin, ISSN 0005-9900
- [58] Veit-Egerer R.: **Betriebsbeanspruchung von Stahlbrücken - Entwicklung eines neuartigen, Monitoring basierten Lastmodells und Analyse der Konsequenz für kritische Bauteile - am Beispiel der Europabrücke**; interner Forschungsbericht Büro VCE (unveröffentlicht); EU-Forschungsprojekte DETAILS (Design for optimal life cycle costs of high speed railway bridges by enhanced monitoring systems – Contract N° RFSR-CT-2006-00032) und FADLESS (Fatigue damage control and assessment for railway bridges – Contract N° RFSR-CT-2009-00027), Europäische Kommission, Brüssel, 2006 bzw. 2009
- [59] RSTAB: **Statik-Programm für die Berechnung und Bemessung von 2D & 3D Stabwerken**, <http://www.dlubal.de/rstab-8xx.aspx>, zuletzt besucht am 02.06.2013.
- [60] RFEM: **Statik-Software für die Berechnung und Bemessung von 2D & 3D Strukturen**, <http://www.dlubal.de/rfem-5xx.aspx>, zuletzt besucht am 02.06.2013.
- [61] Rücker W., Fritzen C.P.: **IMO-WIND: Integrales Monitoring- und Bewertungssystem für Offshore-Windenergieanlagen**. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft InnoNet (Projekträger VDI/VDE/IT); InnoNet-Projekt-Nr.: 16INO326 & 16INO327, Konsortialführer BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (Fachgruppe VII.2 Ingenieurbau) & Universität Siegen (Institut für Mechanik und Regelungstechnik), Berlin, BRD, Jan 2010

9 ANHANG 1: VERKEHRSENTWICKLUNG A13 EUROPABRÜCKE 1964 – 2015

HISTORIE ZUM VERKEHRSAUFKOMMEN GEMÄSS FOLGENDER QUELLEN

- **DER TIROLER LANDESREGIERUNG**
- **DES BMVIT (BUNDESMINISTERIUMS FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE)**
- **DER AUTOBAHN-MAUTSTELLEN**
- **ASFINAG MAUT SERVICE GMBH**

Verkehrsentwicklung Europabrücke

herangezogen: Zählstelle Matrei am Brenner bzw. Schönberg Mautstelle

Jahr	Zähldaten - Verkehrseinheiten					Frachtdaten - Beladung					
	DTV [Kfz/24h]	DTLV [LkwÄ/24h]	Delta DTV jährlich, %	Δ DTLV jährlich, %	DTLV / DTV	Güterverkehr [Mio t/J]	Δ Tonnage	Beladung/ [t]	Δ Beladung zu Vorjahr	Δ Beladung zu 1964	t/LKW bei SLZ-Bezug 70 % der LkwÄ
1964	8009	1522				1,4		2,5			3,6
1965	8249	1567	3,0%	3,0%		1,7	22,2%	3,0	18,7%	19%	4,3
1966	8496	1614	3,0%	3,0%		2,0	17,0%	3,4	13,6%	35%	4,9
1967	8751	1663	3,0%	3,0%		2,2	9,7%	3,6	6,5%	43%	5,2
1968	9014	1713	3,0%	3,0%		2,6	17,6%	4,1	14,2%	64%	5,9
1969	9284	1764	3,0%	3,0%		2,9	11,4%	4,5	8,2%	77%	6,4
1970	9563	1817	3,0%	3,0%		3,2	10,3%	4,8	7,1%	90%	6,9
1971	9850	1871	3,0%	3,0%		3,6	13,7%	5,3	10,4%	110%	7,6
1972	10145	1928	3,0%	3,0%	19%	4,7	28,9%	6,6	25,1%	162%	9,5
1973	10586	2011	4,3%	4,3%	19%	5,7	22,4%	7,8	17,3%	208%	11,1
1974	11286	2144	6,6%	6,6%	19%	6,3	9,8%	8,0	3,0%	217%	11,5
1975	11516	2188	2,0%	2,0%	19%	7,1	13,4%	8,9	11,2%	252%	12,7
1976	13247	2517	15,0%	15,0%	19%	8,9	25,4%	9,7	9,0%	284%	13,9
1977	14236	2705	7,5%	7,5%	19%	9,7	8,4%	9,8	0,9%	288%	14,0
1978	14451	2746	1,5%	1,5%	19%	10,3	6,5%	10,3	4,9%	306%	14,7
1979	15741	2991	8,9%	8,9%	19%	10,9	6,1%	10,0	-2,6%	296%	14,3
1980	15170	2937	-3,6%	-1,8%	19%	11,3	2,9%	10,5	4,7%	314%	15,0
1981	13666	2970	-9,9%	1,1%	22%	11,8	4,4%	10,8	3,3%	328%	15,5
1982	14317	2982	4,8%	0,4%	21%	12,5	6,4%	11,5	6,0%	354%	16,4
1983	14329	3089	0,1%	3,6%	22%	13,1	4,5%	11,6	0,9%	358%	16,6
1984	13953	3023	-2,6%	-2,1%	22%	13,5	3,3%	12,2	5,6%	383%	17,5
1985	15052	3584	7,9%	18,6%	24%	14,3	5,9%	10,9	-10,7%	332%	15,6
1986	16125	3856	7,1%	7,6%	24%	16,5	15,4%	11,7	7,2%	363%	16,7
1987	16997	4041	5,4%	4,8%	24%	16,6	0,6%	11,3	-4,0%	344%	16,1
1988	17611	4248	3,6%	5,1%	24%	17,2	3,6%	11,1	-1,4%	338%	15,8
1989	17833	4014	1,3%	-5,5%	23%	15,4	-10,5%	10,5	-5,2%	315%	15,0
1990	17060	3084	-4,3%	-23,2%	18%	13,6	-11,7%	12,1	14,9%	377%	17,3
1991	18101	3485	6,1%	13,0%	19%	14,9	9,6%	11,7	-3,0%	363%	16,7
1992	18514	3709	2,3%	6,4%	20%	16,5	10,7%	12,2	4,1%	381%	17,4
1993	19310	3812	4,3%	2,8%	20%	17,1	3,6%	12,3	0,8%	385%	17,6
1994	21161	4110	9,6%	7,8%	19%	17,6	2,9%	11,7	-4,5%	363%	16,8
1995	22365	4471	5,7%	8,8%	20%	20,0	13,6%	12,3	4,5%	384%	17,5
1996	23061	4412	3,1%	-1,3%	19%	19,0	-5,0%	11,8	-3,7%	366%	16,9
1997	23535	4518	2,1%	2,4%	19%	20,1	5,8%	12,2	3,3%	381%	17,4
1998	24864	4758	5,6%	5,3%	19%	22,5	11,9%	13,0	6,3%	412%	18,5
1999	26535	5531	6,7%	16,2%	21%	25,2	12,0%	12,5	-3,7%	393%	17,8
2000	27539	5597	3,8%	1,2%	20%	25,4	0,8%	12,4	-0,4%	391%	17,8
2001	28728	5601	4,3%	0,1%	19%	25,0	-1,6%	12,2	-1,6%	383%	17,5
2002	29716	5613	3,4%	0,2%	19%	25,8	3,2%	12,6	3,0%	397%	18,0
2003	29708	5791	0,0%	3,2%	19%	27,0	4,7%	12,8	1,4%	404%	18,2
2004	30805	6737	3,7%	16,3%	22%	31,5	16,7%	12,8	0,3%	406%	18,3
2005	31131	6773	1,1%	0,5%	22%	31,8	1,0%	12,9	0,4%	408%	18,4
2006	31793	7182	2,1%	6,0%	23%	33,4	5,0%	12,7	-0,9%	403%	18,2
2007	31991	7541	0,6%	5,0%	24%	35,1	5,1%	12,8	0,1%	404%	18,2
2008	31206	7140	-2,5%	-5,3%	23%	34,0	-3,1%	13,0	2,3%	415%	18,6
2009	30759	6063	-1,4%	-15,1%	20%	27,9	-17,9%	12,6	-3,4%	398%	18,0
2010	32580	6269	5,9%	3,4%	19%	28,3	1,4%	12,4	-1,9%	388%	17,7
2011	31983	6514	-1,8%	3,9%	20%	29,4	3,9%	12,4	0,0%	388%	17,7
2012	32900	6701	2,9%	2,9%		30,2		12,4	0,0%	388%	17,7
2013	33844	6893	2,9%	2,9%		31,1		12,4	0,0%	388%	17,7
2014	34815	7091	2,9%	2,9%		32,0		12,4	0,0%	388%	17,7
2015	35813	7294	2,9%	2,9%		32,9		12,4	0,0%	388%	17,7

496 %

504 %

Anmerkungen

1) Prognosen

a) Güterverkehrszuwachs	(lt. BMVIT)
modellierter Güterverkehr	
1998	2015
5994	9694
daraus aus errechneter jährlicher Zuwachs	2,9%

b) Zuwachs PKW+Lieferwagen	
modelliert	
1998	2015
19034	30742
	2,9%

c) aus a) und b) abzuleitender jährlicher Zuwachs JDTV	
gesamt, modelliert	
1998	2015
25028	40436
	2,9%

2) Rückrechnungen

a) Güterverkehr	
Mio. T *)	JDTLV
1980	11,3
1964	1,4

*) aus Verkehrsbericht Tirol 2002, Abb. 2-4

Legende:

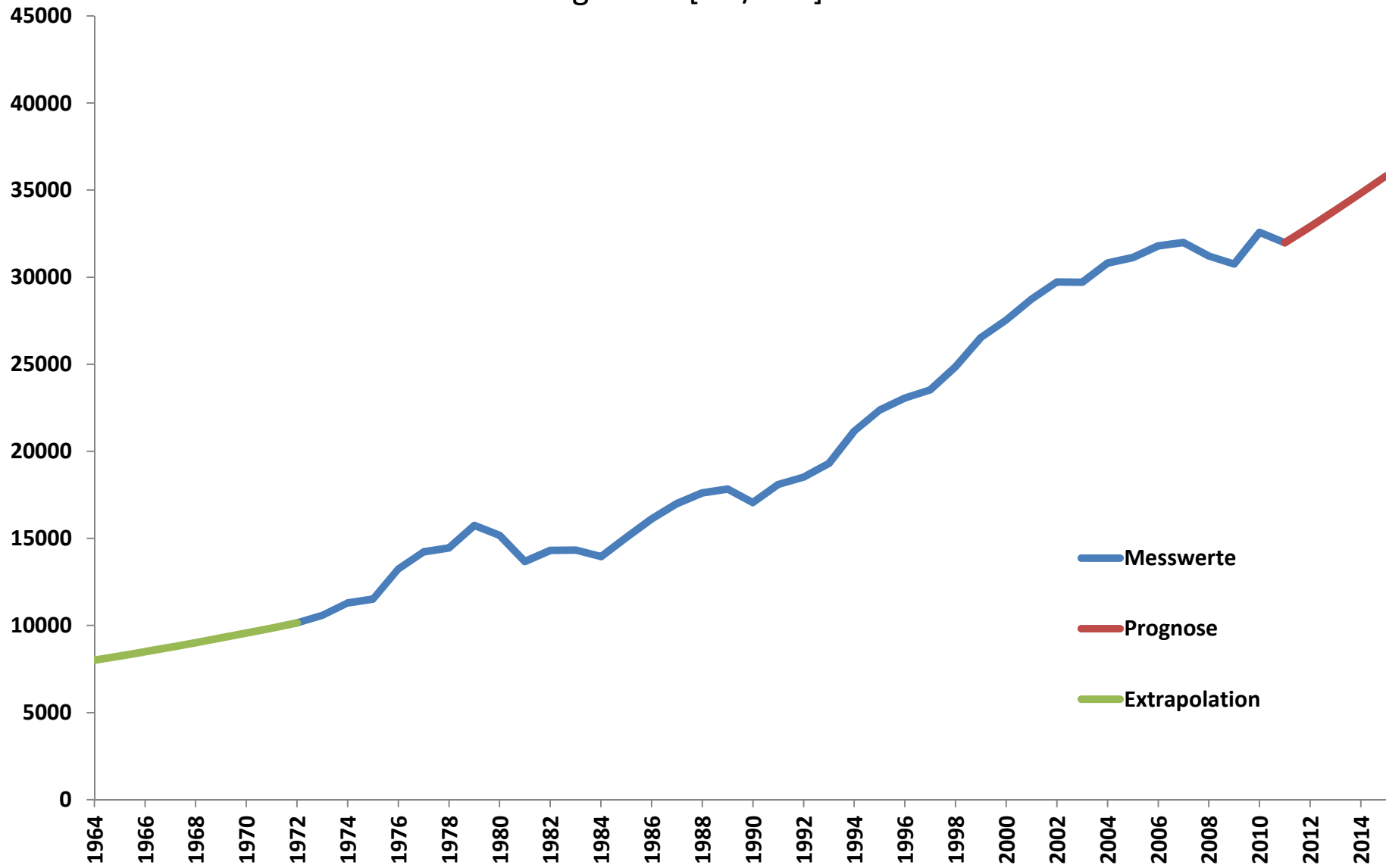
- Grün = vorhandene Aufzeichnungen lt. BMVIT, ARE Alpinfo und Land Tirol
- Blaue = prognostiziert lt. BMVIT
- Dunkel-Orange = sinngemäss gerechnet sowie 1964-71 extrapoliert
- Gelb = zuf Anteil DTLV (= "LKW") am DTV abgeschätzt

- LkwÄ**
- PKW mit Anhängern
 - Lieferwagen mit Anhängern
 - Busse mit mehr als 9 Sitzplätzen
 - LKW
 - LKW mit Anhänger
 - Sattelkraftfahrzeuge
 - Sonderfahrzeuge

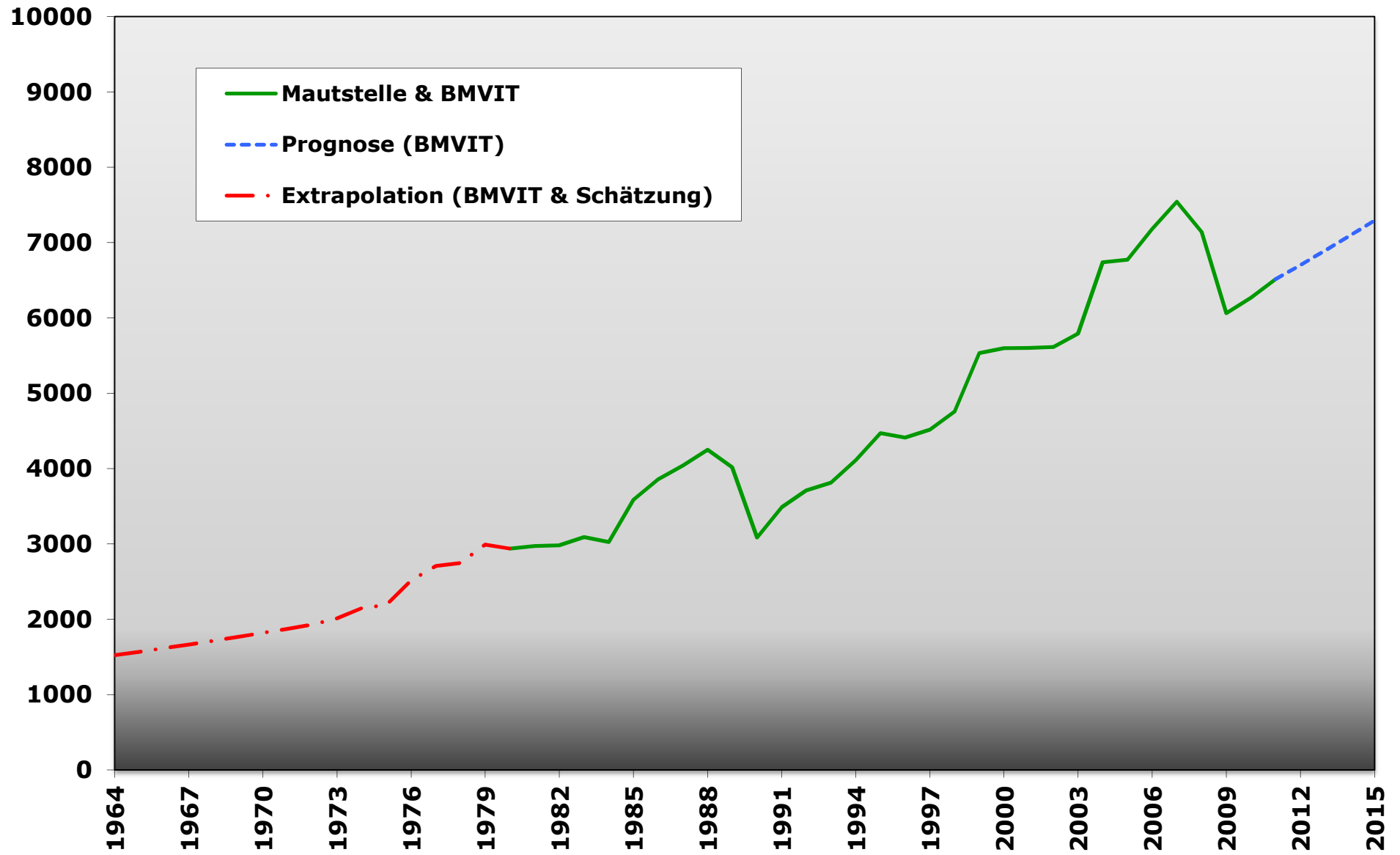
- SLZ**
- LKW mit Anhänger
 - Sattelkraftfahrzeuge

Verkehrsentwicklung Europabrücke 1964 bis 2015

JDTV gesamt [Kfz/24h]

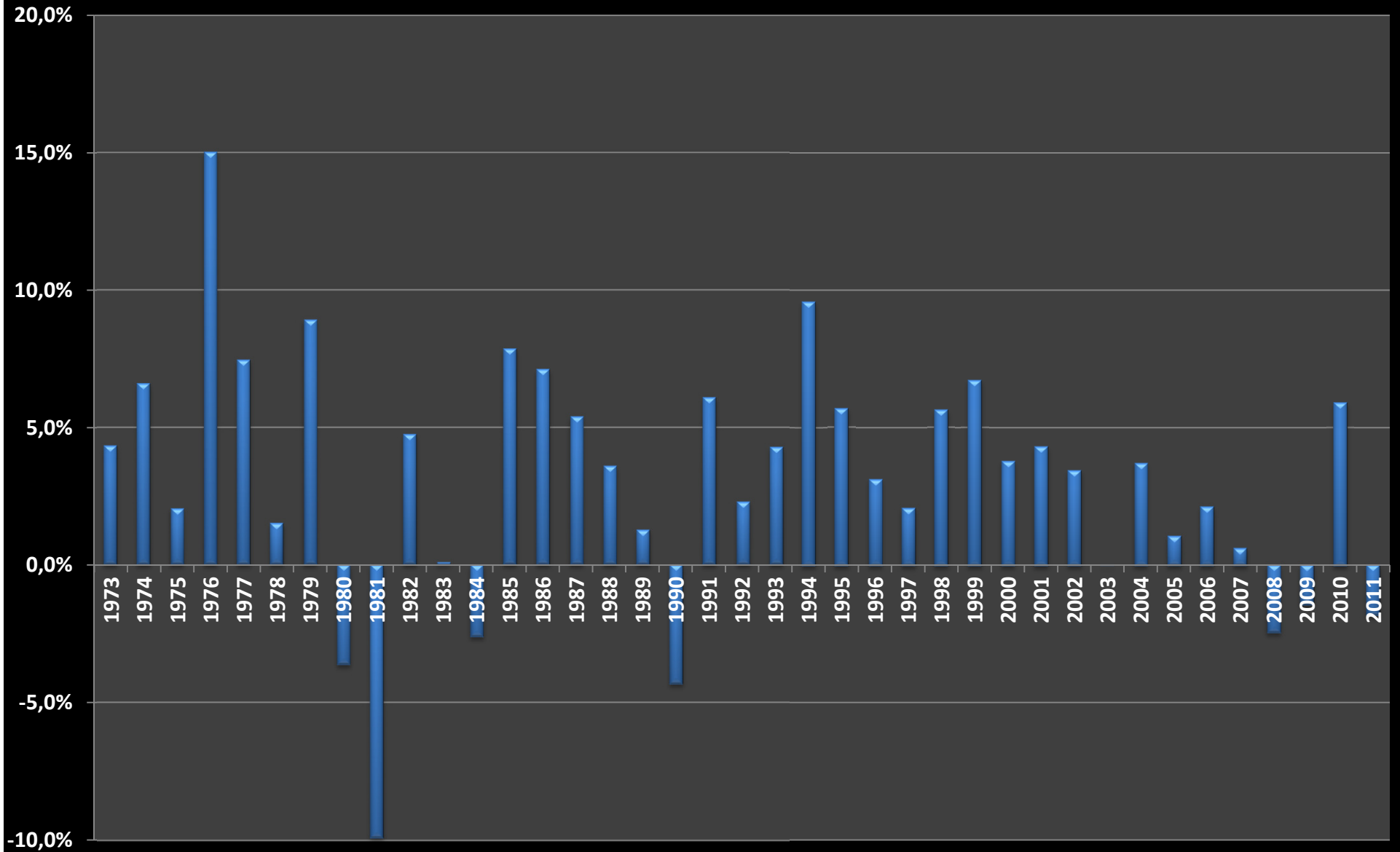


LKW / 24 h



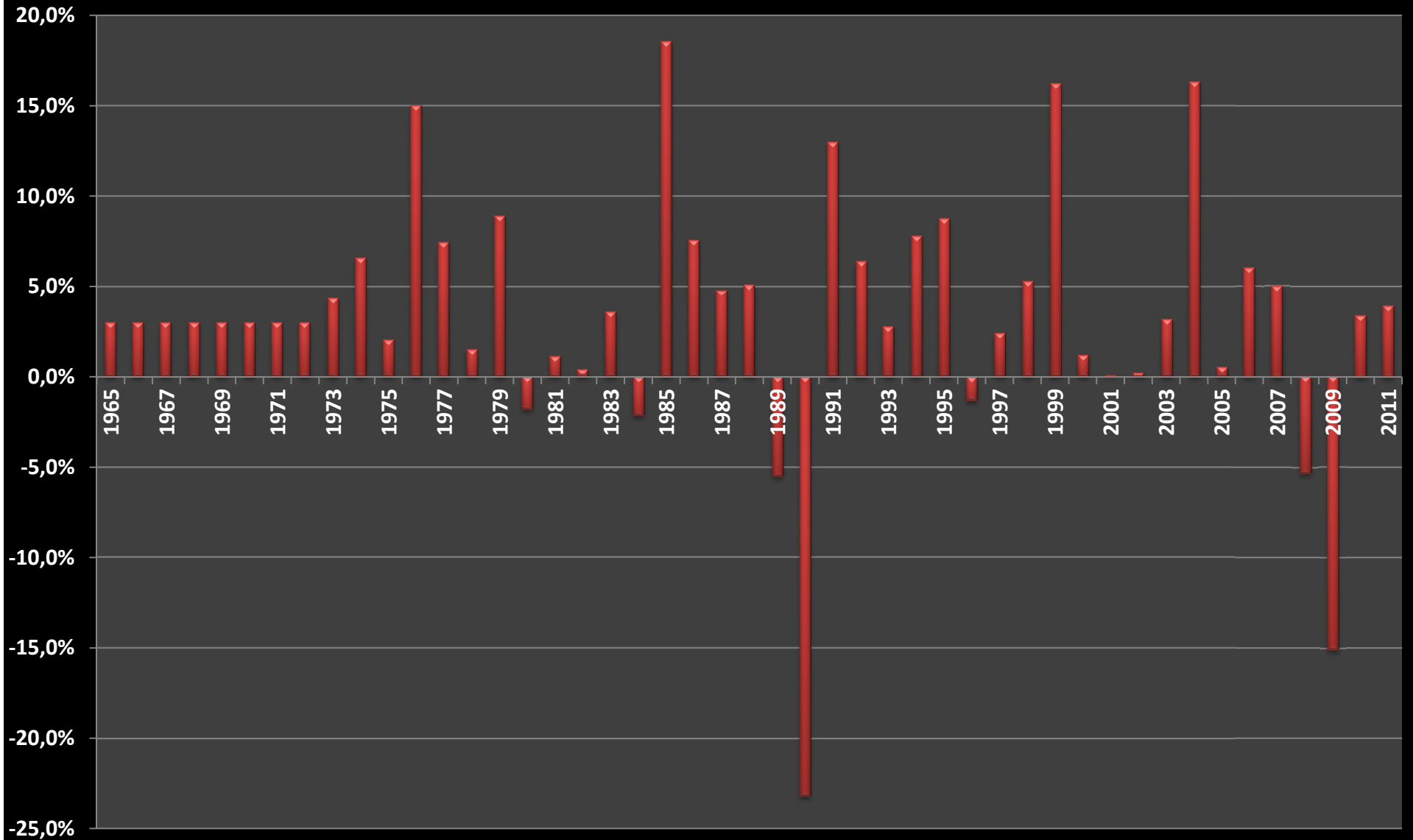
Verkehrsentwicklung Europabrücke (1964-2011)

JDTV, Änderung in % zum Vorjahr



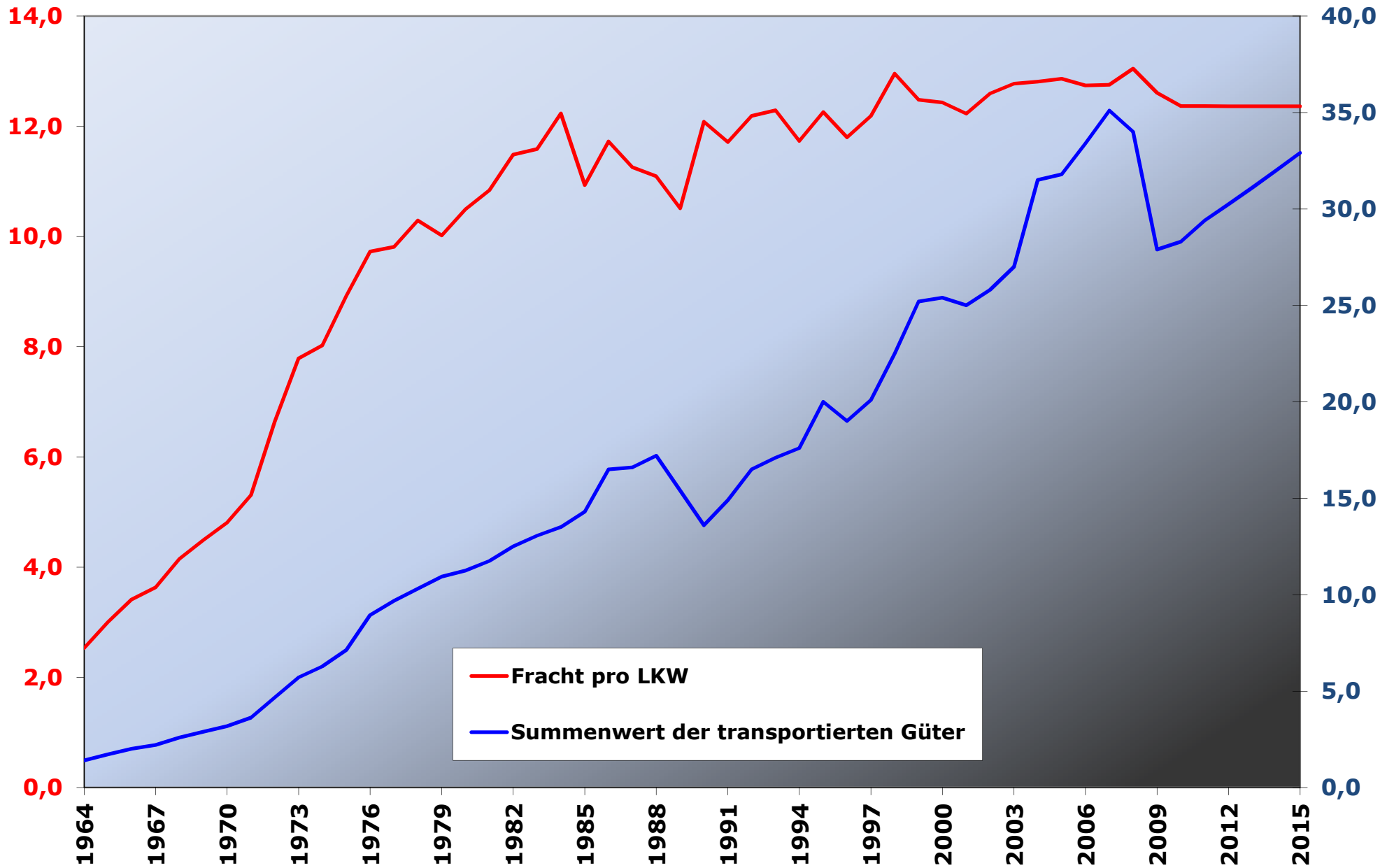
Verkehrsentwicklung Europabrücke (1964-2011)

JDTLV, Änderung in % zum Vorjahr



Güter [t] / LKW

[Mio. t/Jahr]



Detail-Analyse MAUSTELLE Schönberg

	2004	Anteil an Überfahrten- Gesamt in %	2005	Anteil an Überfahrten- Gesamt in %	2006	Anteil an Überfahrten- Gesamt in %	2004 - 2006	Anteil an Überfahrten- Gesamt in %
Kat II	126528	11,6	129525	11,7	129541	11,1	385594	11,5
Kat III	41388	3,8	47494	4,3	53828	4,6	142710	4,2
Kat IV +	920837	84,6	926621	84,0	982956	84,3	2830414	84,3
Summe	1088753		1103640		1166325		3358718	

	2007	Anteil an Überfahrten- Gesamt in %	2008	Anteil an Überfahrten- Gesamt in %	2009	Anteil an Überfahrten- Gesamt in %	2007 - 2009	Anteil an Überfahrten- Gesamt in %
BUS	51937	4,3	54251	4,6	54496	5,6	160684	4,7
Kat II + III	127962	10,5	124568	10,5	109165	11,1	361695	10,7
Kat IV +	1038475	85,2	1006305	84,9	816902	83,3	2861682	84,6
Summe	1218374		1185124		980563		3384061	

InfoProvider	
KalJahr/Monat	
Kennzahlen	
Claim. Fahrzeugkat.	
Location Station ID	

KalJahr/Monat	01.2004..12.2004
InfoProvider	ASF Mauttr. Verdicht
Claim. Fahrzeugkat.	2 Achsen, 3 Achsen, 4+ Achsen
Location Station ID	Igls Patsch - Schönberg Stubaital, Schönberg Stubaital - Igls Patsch
Version	Nicht zugeordnet, Ist-Daten

Claim. Fahrzeugkat.	Location Station ID	01.2004	02.2004	03.2004	04.2004	05.2004	06.2004	07.2004	08.2004	09.2004	10.2004	11.2004	12.2004	Gesamtergebnis
		Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.
2 Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	8.669	9.627	11.421	12.018	12.960	12.107	12.067	10.349	14.183	13.045	8.956	9.537	134.939
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	7.929	9.040	11.107	11.310	11.794	11.131	11.237	9.967	13.261	12.583	8.326	8.843	126.528
	Ergebnis	16.598	18.667	22.528	23.328	24.754	23.238	23.304	20.316	27.444	25.628	17.282	18.380	261.467
3 Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	3.104	3.462	3.830	3.653	3.763	3.695	3.710	3.401	4.750	4.885	3.375	3.066	44.694
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	2.908	3.355	3.775	3.387	3.427	3.376	3.379	3.191	4.285	4.252	3.204	2.849	41.388
	Ergebnis	6.012	6.817	7.605	7.040	7.190	7.071	7.089	6.592	9.035	9.137	6.579	5.915	86.082
4+ Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	59.883	67.089	74.397	71.467	73.886	80.461	79.095	60.792	83.263	78.916	82.005	70.009	881.263
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	61.649	69.960	82.372	75.720	74.805	80.118	84.675	61.754	87.015	85.123	82.713	74.933	920.837
	Ergebnis	121.532	137.049	156.769	147.187	148.691	160.579	163.770	122.546	170.278	164.039	164.718	144.942	1.802.100
Gesamtergebnis		144.142	162.533	186.902	177.555	180.635	190.888	194.163	149.454	206.757	198.804	188.579	169.237	2.149.649

InfoProvider	
KalJahr/Monat	
Kennzahlen	
Claim. Fahrzeugkat.	
Location Station ID	

KalJahr/Monat	01.2005..12.2005
InfoProvider	ASF Mauttr. Verdicht
Claim. Fahrzeugkat.	2 Achsen, 3 Achsen, 4+ Achsen
Location Station ID	Igls Patsch - Schönberg Stubaital, Schönberg Stubaital - Igls Patsch
Version	Nicht zugeordnet, Ist-Daten

	KalJahr/Monat	01.2005	02.2005	03.2005	04.2005	05.2005	06.2005	07.2005	08.2005	09.2005	10.2005	11.2005	12.2005	Gesamtergebnis
Claim. Fahrzeugkat.	Location Station ID	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.	Anzahl Trans.
2 Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	9.151	9.669	12.095	12.447	13.558	12.802	12.509	11.109	14.722	13.219	9.527	10.101	140.909
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	8.493	8.797	11.019	11.576	12.342	11.811	11.488	10.364	13.274	12.661	8.675	9.025	129.525
	Ergebnis	17.644	18.466	23.114	24.023	25.900	24.613	23.997	21.473	27.996	25.880	18.202	19.126	270.434
3 Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	3.624	3.942	4.248	4.157	4.150	4.453	4.046	3.843	5.519	4.933	3.877	3.696	50.488
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	3.525	3.807	4.002	3.891	3.989	4.243	3.837	3.600	4.777	4.651	3.637	3.535	47.494
	Ergebnis	7.149	7.749	8.250	8.048	8.139	8.696	7.883	7.443	10.296	9.584	7.514	7.231	97.982
4+ Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	68.295	73.074	79.717	76.417	77.577	80.749	79.326	62.187	81.528	78.257	80.254	67.508	904.889
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	68.523	75.749	82.216	82.418	76.154	82.413	82.567	59.354	84.519	81.098	80.823	70.787	926.621
	Ergebnis	136.818	148.823	161.933	158.835	153.731	163.162	161.893	121.541	166.047	159.355	161.077	138.295	1.831.510
Gesamtergebnis		161.611	175.038	193.297	190.906	187.770	196.471	193.773	150.457	204.339	194.819	186.793	164.652	2.199.926

KalJahr/Monat	
Kennzahlen	
Location Station ID	
Claim. Fahrzeugkat.	

KalJahr/Monat	01.2006..12.2006
InfoProvider	Mauttr. Verdichtung, ETN Mauttransaktion
Location Station ID	Igls Patsch - Schönberg Stubaital, Schönberg Stubaital - Igls Patsch

Claim. Fahrzeugkat.	Location Station ID	KalJahr/Monat	01.2006	02.2006	03.2006	04.2006	05.2006	06.2006	07.2006	08.2006	09.2006	10.2006	11.2006	12.2006	Gesamtergebnis
2 Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	253	9.587	10.060	12.539	12.740	13.332	12.619	11.314	10.788	14.846	13.040	10.025	10.290	141.180
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	646	8.537	8.863	11.341	10.475	11.643	12.359	11.682	10.163	13.860	12.569	8.805	9.244	129.541
	Ergebnis		18.124	18.923	23.880	23.215	24.975	24.978	22.996	20.951	28.706	25.609	18.830	19.534	270.721
3 Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	253	3.781	3.995	4.898	5.258	6.273	5.363	5.108	4.199	5.815	5.283	4.200	3.694	57.867
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	646	3.646	3.764	4.547	4.869	5.205	5.328	4.913	4.027	5.304	5.052	3.911	3.262	53.828
	Ergebnis		7.427	7.759	9.445	10.127	11.478	10.691	10.021	8.226	11.119	10.335	8.111	6.956	111.695
4+ Achsen	Igls Patsch - Schönberg Stubaital	253	73.832	75.471	85.458	71.615	85.588	81.569	82.599	66.736	82.353	87.070	90.434	71.254	953.979
	Schönberg Stubaital - Igls Patsch	646	72.925	77.284	89.355	74.275	83.163	86.475	84.361	69.270	87.668	88.424	93.486	76.270	982.956
	Ergebnis		146.757	152.755	174.813	145.890	168.751	168.044	166.960	136.006	170.021	175.494	183.920	147.524	1.936.935
Gesamtergebnis			172.308	179.437	208.138	179.232	205.204	203.713	199.977	165.183	209.846	211.438	210.861	174.014	2.319.351

KalJahr/Monat	
Kennzahlen	
Location Station ID	

KalJahr/Monat	01.2007..12.2007
InfoProvider	ETN, ATT0003
Location Station ID	Igls Patsch - Schönberg Stubaital, Schönberg Stubaital - Igls Patsch
Version	Nicht zugeordnet, Ist-Daten

Location Station ID	253			646		
	Igls Patsch - Schönberg Stubaital			Schönberg Stubaital - Igls Patsch		
KalJahr/Monat	BUS	LKW 2 + 3 Achsen	LKW 4+ Achsen	BUS	LKW 2 + 3 Achsen	LKW 4+ Achsen
01.2007	3.256	9.998	82.219	3.078	9.093	83.660
02.2007	3.501	10.343	80.403	3.412	9.428	84.803
03.2007	4.853	12.733	90.962	4.480	11.345	97.746
04.2007	4.880	11.651	78.099	4.886	10.653	82.055
05.2007	5.396	12.949	89.484	4.999	11.612	90.268
06.2007	4.859	12.136	86.177	4.989	11.375	91.954
07.2007	4.738	12.590	90.199	4.657	11.796	91.185
08.2007	4.421	10.341	67.869	4.117	9.374	71.894
09.2007	6.669	12.993	84.469	6.418	12.091	88.546
10.2007	5.030	13.273	93.634	5.306	12.467	94.284
11.2007	2.320	10.960	88.772	2.390	10.113	90.724
12.2007	3.470	9.329	67.853	3.205	8.615	71.356

192.689	1.000.140
	1.192.829

179.899	1.038.475
	1.218.374

FZG > 3,5t

				1.192.829	SUMME 2007				1218374	SUMME 2007
Location Station ID	253					646				
	Igls Patsch - Schönberg Stubaital					Schönberg Stubaital - Igls Patsch				
KalJahr/Monat	BUS	LKW 2 + 3 Achsen	LKW 4+ Achsen	BUS	LKW 2 + 3 Achsen	LKW 4+ Achsen				
01.2008		3.395	10.224	87.747	3.195	9.376	88.470			
02.2008		3.664	10.839	84.907	3.614	9.699	90.489			
03.2008		5.346	11.938	83.323	5.125	10.805	87.465			
04.2008		4.852	12.960	88.677	4.694	11.855	94.442			
05.2008		5.642	12.492	85.253	5.618	11.451	88.394			
06.2008		5.350	11.817	85.762	5.278	10.785	86.600			
07.2008		4.664	12.242	89.671	4.754	11.271	91.313			
08.2008		4.631	9.316	60.503	4.321	8.566	63.555			
09.2008		6.390	12.585	85.617	6.312	11.482	86.350			
10.2008		5.139	12.693	84.557	5.535	11.597	87.709			
11.2008		2.567	10.369	73.683	2.612	9.338	77.090			
12.2008		3.499	9.242	60.431	3.193	8.343	64.428			
		191.856	970.131			178.819	1.006.305			
		SUMME 2008	1.161.987	0,974143821	SUMME 2008	1.185.124	1.185.124	0,97270953		
01.2009		3.795	8.362	64.297	3.592	7.795	67.192			
02.2009		3.757	9.158	65.459	3.697	8.287	69.283			
03.2009		4.654	10.655	70.420	4.587	9.643	73.336			
04.2009		5.163	10.453	64.489	5.056	9.324	67.989			
05.2009		5.329	10.571	66.376	5.038	9.503	68.599			
06.2009		4.939	10.257	68.607	4.936	9.304	67.421			
07.2009		4.876	10.571	74.494	4.826	9.651	74.463			
08.2009		4.854	8.746	53.467	4.416	7.917	54.071			
09.2009		6.554	11.763	73.369	6.411	10.725	73.604			
10.2009		5.749	11.487	71.626	6.002	10.623	72.643			
11.2009		2.554	9.351	69.307	2.533	8.572	67.817			
12.2009		3.689	8.499	58.157	3.402	7.821	60.484			
		175.786	800.068			163.661	816.902			
		SUMME 2009	975.854	0,839814903	SUMME 2009	980.563	980.563	0,82739275		

10 ANHANG 2: SCHWACHSTELLENANALYSE 2006

- **PROBLEMATIK (VISUELLER EINDRUCK)**
- **DYNAMISCHE BASISUNTERSUCHUNG DER BAUTEILREIHE DIAGONALSTREBEN**
- **BEWERTUNG**
- **AUSWIRKUNGEN AUF DEN WEITEREN VERLAUF DER BRÜCKENUNTERSUCHUNGEN HINSICHTLICH BAUTEIL-ERMÜDUNG**

10.1 Problematik (visueller Eindruck)

Die kontinuierliche Auseinandersetzung mit dem Tragwerks-Zustand der Europabrücke im Rahmen von visuellen Brückenprüfungen in den letzten 25 Jahren hat zur Erkenntnis geführt, dass vor allem die Diagonalverbände besondere Aufmerksamkeit erfordern. Aufgrund der konstruktiven Ausbildung ihrer Montageanschlüsse an den Hohlkasten wurde eine hohe Empfindlichkeit gegenüber der vom Schwerverkehr dominierten Lasteinwirkung vermutet (**Bild 102**).



Bild 102: Unterer und oberer Montageanschluss der Diagonalstreben, Europabrücke

Seit der Fahrbahn-Verbreiterung 1984 sind die Querverbände infolge Verlängerung der Kragarme höheren Beanspruchungen ausgesetzt. Für das Grundmaterial im Bereich der Schweißnähte der Streben-Anschlussbleche an den Querrahmen liegt dadurch eine erhöhte Ermüdungsgefährdung vor. Aufgrund dieses Wissens wurden die Diagonalen und deren Anschlüsse im Rahmen der Brückeninspektionen und Kontrollbegehungen seither von Betreiberseite besonders sorgfältig geprüft. Dabei wurden immer wieder gelockerte Schrauben im oberen vertikalen Knotenblechanschluss gefunden (die mit dem Drehmomentenschlüssel nachzuziehen waren) sowie Lackrisse dokumentiert. Punktuell wurden immer wieder auch durchgerissene Schweißnähte, verbeulte Knotenbleche und gebrochene Schraubbleche registriert (**Bild 103 & Tabelle 35**). Das über lange Jahre hinweg dokumentierte, visuelle Gesamt-Schadensbild an der Europabrücke hat zur Erkenntnis geführt, dass die Diagonalstreben im Hinblick auf Überlegungen zur einer etwaigen Ermüdungsgefährdung dieses Tragwerks als die maßgeblichen Bauteile anzusehen sind.

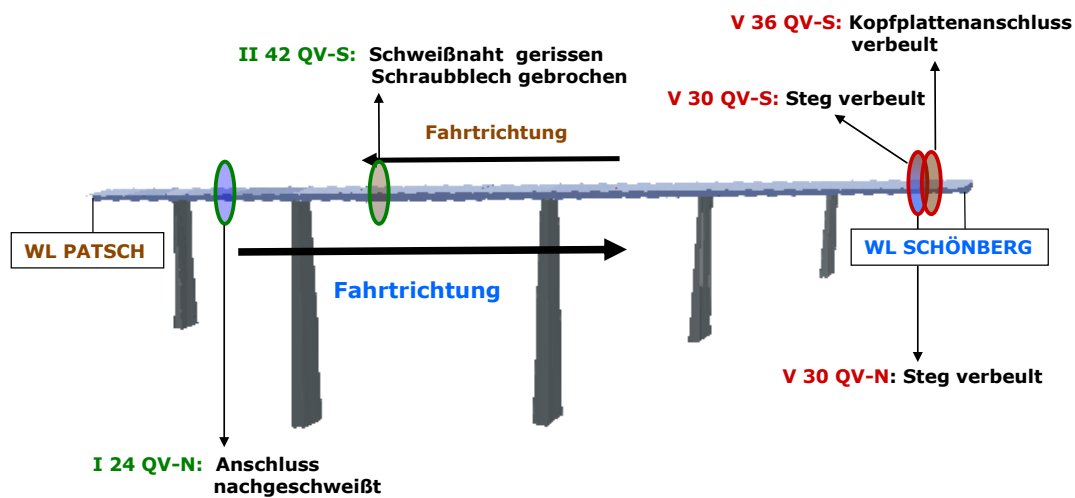


Bild 103: Visualisierung der wesentlichsten - bei Brückeninspektionen beanstandeten -Mängel an den Diagonalstreben seit 1983 (1991 in rot / 2005 in grün)

<p>1983: einige gelockerte Schrauben und immer wieder Lackrisse im Anschluss Diagonale zu QT</p> <p>1984 (Nachinspektion): häufig Lackrisse im Anschluss Diagonale zu QT</p> <p>1991: deformierte Knotenbleche bei V 30 QV-N und S (Montage?) geringe Lastdeformation im Kopfplattenanschluss von V 36 QV-S</p> <p>1999: häufig Lackrisse, einige Male fehlender Korrosionsschutz der Schweißnaht sowie einige gelockerte Schrauben im Kopfplattenanschluss - keine Angaben zu Deformationen -</p> <p>2005: ein nachgeschweißter Anschluss bei I 24 QV-N unten sowie eine durchgerissene Schweißnaht und ein gebrochenes Schraubblech im Anschlussbereich von II 42 QV-S unten (Ermüdung), ansonsten nur Lackrisse und -abplatzungen</p>
--

Tabelle 35: Auflistung der wesentlichsten - bei Brückeninspektionen beanstandeten -Mängel an den Diagonalstreben seit 1983

Ende Juli 2006 erfolgte eine dynamische Messung an sämtlichen Diagonalstreben des Tragwerks (siehe **Abschnitt 10.2**) samt begleitender visueller Inspektion. Stellvertretend für das dabei dokumentierte Schadensbild (siehe [58]) werden aus dieser visuellen Untersuchung nachfolgend zwei Streben hervorgehoben, wobei es sich dabei um ein eingerissenes unteres Knotenblech einerseits und um ein verbeultes unteres Knotenblech andererseits handelte. In beiden Fällen liegt eine spezifische Überbeanspruchung vor, welche diese beiden schwerwiegenden Fehlstellen zur Folge hatte (**Bild 104**).

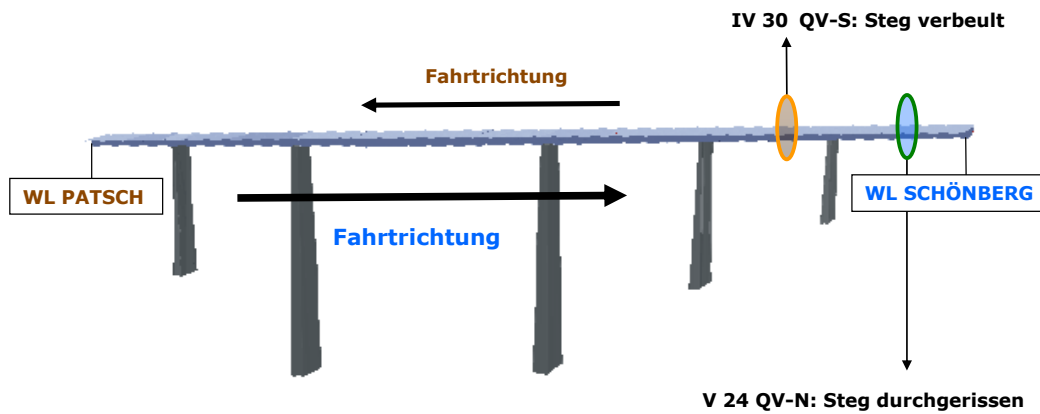


Bild 104: Visualisierung der wesentlichsten - im Rahmen der Messungen 2006 - an den Querverbänden gefundenen Mängel

Bei der **Strebe V 24 QV-N** hat die zyklischen Normalkraftbeanspruchung im Querverband infolge dynamischer Torsionsbelastung zu einem partiellen - von der Oberseite ausgehenden - Ermüdungseinriss des unteren Knotenbleches im Bereich der Querschweißnaht geführt, welcher sich allmählich ausbreitete (**Bild 105**).



Bild 105: Rund 13 cm langer Ermüdungsriss im Anschlussblech zwischen 4-Kant-Diagonale und Bodenplatten-Querträgerflansch - **Strebe V 24 QV-N**

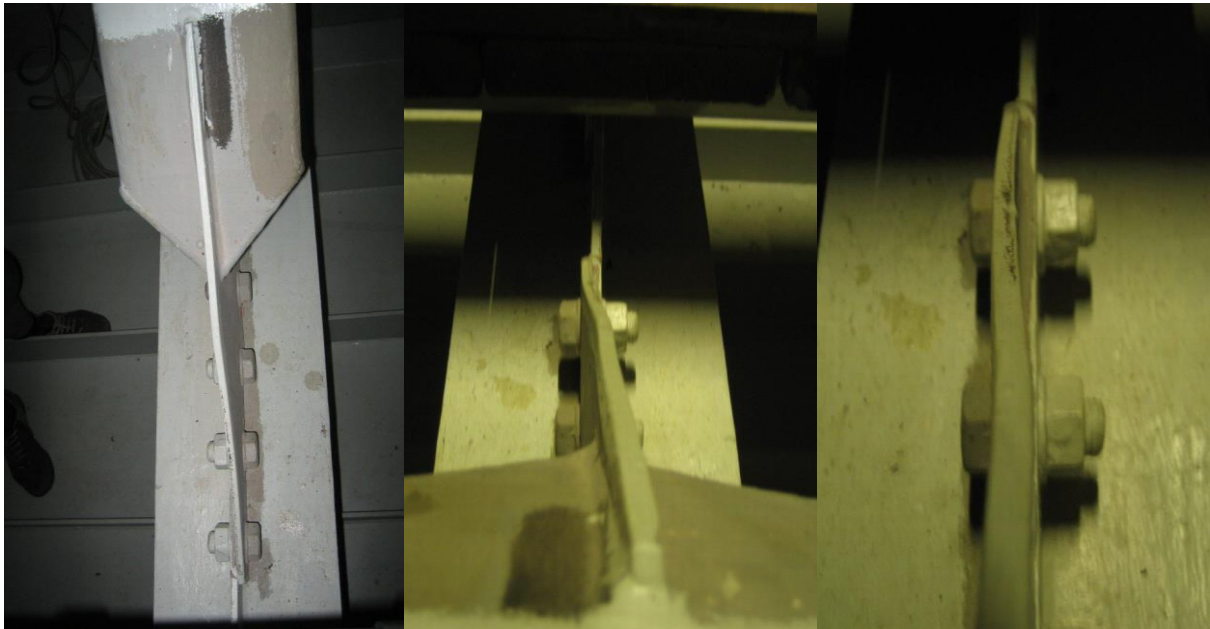


Bild 106: Verbeultes Anschlussblech zwischen 4-Kant-Diagonale und Bodenplatten-Querträgerflansch - **Strebe IV 30 QV-S**

Bei der Strebe **IV 30 QV-S** könnte überproportionale, statische Torsionsbelastung - durch die im Querverband wirksame Normalkraft - zu einer plastischen Verformung im Anschlussblech zwischen 4-Kant-Diagonale und Bodenplatten-Querträger geführt haben, wodurch dieses nachhaltig verbeult wurde (**Bild 106**). Obwohl in alten Inspektionsberichten nicht vermerkt, besteht aber durchaus auch die Möglichkeit, dass das ausgebeulte Anschlussblech auf eine Zwängung im Zuge des Bauteileinbaues zurückgeht (Montage-Imperfektion).

Der Fund dieser beiden offensichtlichen Schäden war jedenfalls Auslöser für eine vertiefte Sonderprüfung der Büros VCE & Kratzer-Klement ab dem September 2006. Dabei wurde im Vergleich zur regulären Brückeninspektion von 2005 eine starke Verschlechterung in Bezug auf die registrierte Rissbildung bzw. auf die Ausbreitung bereits vorhandener Risse festgestellt. Besonders häufig waren in diesem Zusammenhang Risse zu finden, die beim oberen Knoten-Anschluss an der Streben-Unterseite auftreten. Sie beginnen bei der Schweißnaht des Knotenblechansatzes und verlaufen in den angrenzenden Werkstoff [11]. **Bild 107** zeigt das seit 2006 am oberen Anschluss innerhalb aller auftretenden Fehlstellen dominant auftretende Schadensbild. **Bild 108** wiederum zeigt eine durchgerissene Schweißnaht am unteren Anschluss - eine vereinzelt aber mehrfach aufgetretene Fehlstellenkategorie der vergangenen Jahre.



Bild 107: Charakteristisches Rissbild am oberen Anschluss der Diagonalstrebe (zwischen den blauen Markierungen)



Bild 108: Entlang des Knotenblechs durchgerissene Schweißnaht am unteren Anschluss einer Diagonalstrebe

Bei den Recherchen zur Ursache der Risse an den oberen Diagonalen-Anschlüssen zeigte sich, dass im Zeitraum von April bis August 2006 die Verkehrsströme über die Brücke baustellenbedingt umgeleitet wurden. So waren von 03.04.2006 bis 14.05.2006 der erste und zweite Fahrstreifen in Fahrtrichtung Innsbruck gesperrt und der Verkehr wurde über die restlichen vier Spuren umgeleitet (2+2). Anschließend war zwischen dem 14.05.2006 und dem 18.06.2006 jeweils der dritte Fahrstreifen in beide Richtungen gesperrt. Schlussendlich waren von 18.06.2006 bis 04.08.2006 der

erste und zweite Fahrstreifen in Fahrtrichtung Brenner nicht befahrbar ([58]). Im Zuge einer unmittelbaren Nachrechnung durch das Büro Kratzer-Klement im Spätsommer 2006 schien das "allgemein vermehrte Auftreten von Anrissen zum damaligen Zeitpunkt mit dem möglichen Erreichen der Lebensdauer erklärt werden zu können. Das ungünstigere Belastungsbild dieser geänderten Verkehrsführung im Jahre 2006 könnte das Auftreten der Risse beschleunigt haben, wenngleich die Lastspielzahlen im Vergleich zur bisherigen Betriebsdauer gering waren. Es war allerdings positiv anzumerken, dass trotz der aufgetretenen Schäden beim jeweiligen Querverband eine Resttragfähigkeit vorhanden ist und daher nicht mit einem Totalausfall gerechnet werden muss" [11].

10.2 Dynamische Basisuntersuchung der Bauteilreihe Diagonalstreben

Im Rahmen der dynamischen Basis-Untersuchung an allen Diagonalstreben wurde im Sommer 2006 der mechanische Erhaltungszustand aller 144 Diagonalstreben umfassend analysiert (siehe [9]). Diese Untersuchung sollte dazu dienen, parallel zu konventionellen Tragwerksprüfungen Ergebnisse aus dem gemessenen Schwingungsverhalten zur Feststellung und Lokalisierung von (zukünftigen) Problemzonen heranzuziehen. Einerseits sollte messtechnisch überprüft werden, in welchem Ausmaß sich örtlich bereits erkennbare Schäden - die bei einer gleichzeitigen visuellen Inspektion dokumentiert wurden – auch baudynamisch auswirken. Andererseits sollten auffällige Streben mit noch nicht unmittelbar sichtbaren, aber ggf. bereits wirksamen (sich ankündigenden) Schäden identifiziert werden.

Die seinerzeitige Untersuchung stellte die Grundlage für allfällig durchgeführte, künftige Messungen dar (daher der Begriff Basismessung).

Es wird vorausgeschickt, dass die methodische Idee (**Kapitel 10.2.2**) zu dieser Untersuchung darin bestand, zunächst eine messungsbasierte Eigenfrequenzanalyse für diese gleichartig konstruierte Bauteilreihe durchzuführen und diesen Ergebnissen rechnerisch zu erwartende Referenzwerte für dieselbe Bauteilreihe gegenüberzustellen (**Kapitel 10.2.3**). Grundsätzlich sind veränderte Eigenfrequenzen von Bauteilen ein stabiler und wirksamer Indikator für etwaige Anomalien im Tragverhalten. Während lokale Schäden prinzipiell immer im höheren Spektralbereich der untersuchten Bauteile zu suchen wären, eignen sich die niedrigen Frequenzen – v.a. die Grundschwingungsfrequenz – sehr gut zur Bewertung der Funktionsfähigkeit von deren Lagerung. Wie bereits erwähnt, muss den Torsionsstreben aufgrund der konstruktiven Ausbildung ihrer Montageanschlüsse (**Bild 102**) besondere Aufmerksamkeit im Hinblick auf Ermüdungsgefährdung geschenkt werden. Insofern sollten etwaige Anomalien (lokale Schwächung der Knotenanschlüsse) entlang der Brückenlänge anhand des dargelegten Weges identifiziert und in weiterer Folge gemeinsam mit den restlichen, Untersuchungs-begleitenden Erkenntnissen bewertet werden (**Kapitel 10.3**). Dadurch sollte sich eine für das Tragwerk maßgebliche, weitere Vorgehensweise hinsichtlich der Auswirkungen auf die Restlebensdauer dieser Bauteile herauskristallisieren (die entsprechende Umsetzung und im Speziellen die Detaillierung der letztgenannten Thematik ist [58] zu entnehmen).

10.2.1 Messung

Die Messungen an sämtlichen Diagonalstreben der Europabrücke wurden im Zeitraum 27. bis 28. Juli 2006 realisiert. Die Arbeiten wurden mit zwei von der Firma VCE entwickelten BRIMOS[®]-Rekordern 800 mit extern angeschlossenen Beschleunigungssensoren durchgeführt. Für die Richtungsfahrbahn (RFB) Brenner wurde im Zuge der schrittweisen Messung der Bauteilreihe ein einzelner, dreidimensionaler Beschleunigungsaufnehmer stets etwa im Abstand von 1,5m von der unteren Einspannstelle der jeweiligen Diagonalstrebe befestigt. Für die RFB Innsbruck wurden zeitgleich drei eindimensionale Beschleunigungsaufnehmer jeweils im Abstand von 0,75 / 1,5 / 2,25 m von der unteren Einspannstelle der jeweiligen Diagonalstrebe befestigt.

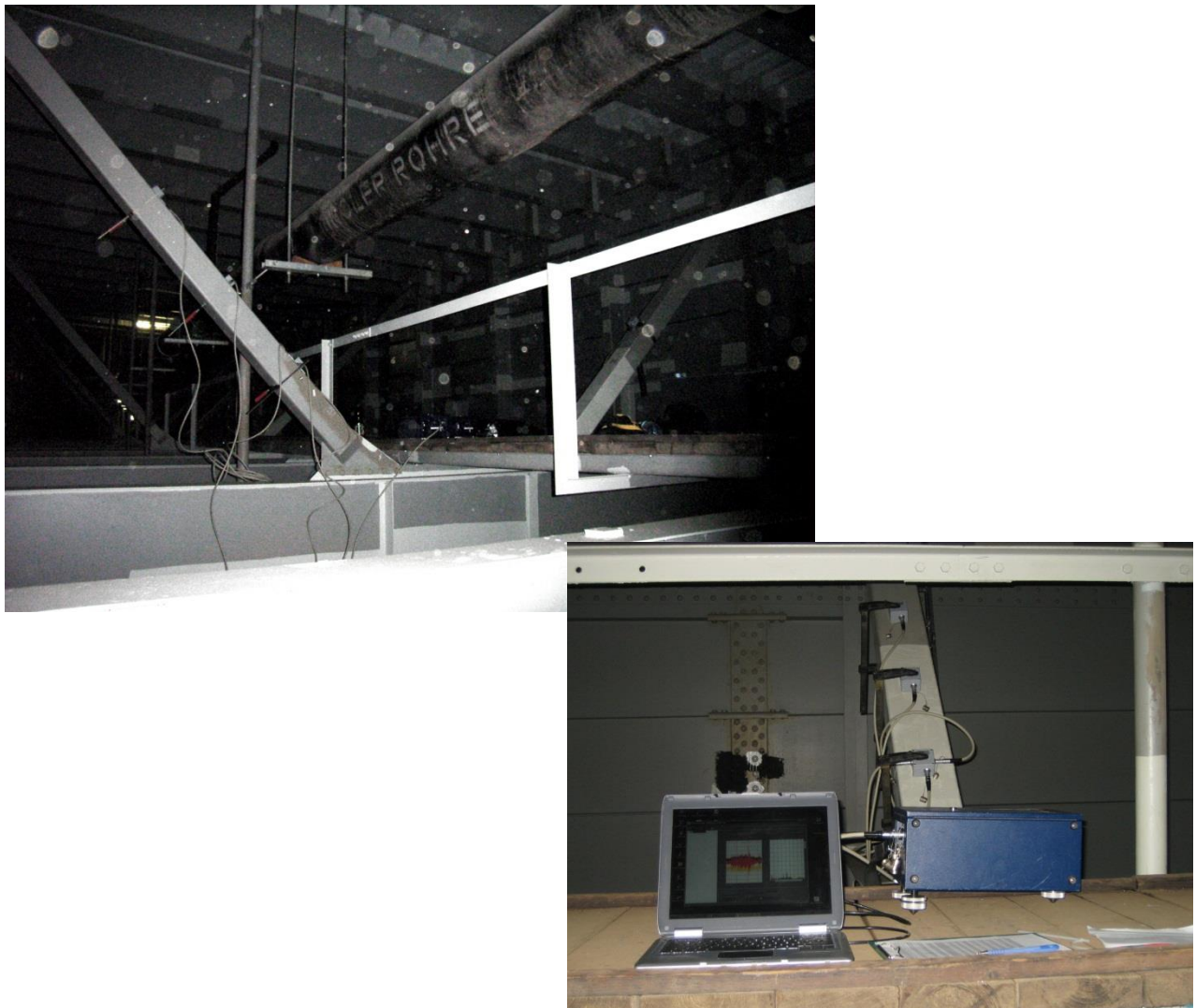


Bild 109: Die mit Beschleunigungsaufnehmern instrumentierten Diagonal-Streben (exemplarisch)

Wie dem **Bild 109** entnommen werden kann, fällt das Koordinatensystem der befestigten Beschleunigungsaufnehmer mit dem lokalen Koordinatensystem der instrumentierten Bauteile zusammen. Die Messungen wurden in den zwei Fahrtrichtungen parallel – Strebe für Strebe – vorgenommen (insgesamt 144 Streben). Pro Strebe wurden zwei Messfiles zu 165 Sekunden mit einer Abtastrate von 1000 Hz (1 Millisekunde) aufgezeichnet. Die Messdaten wurden vor Ort ausgelesen und auf Plausibilität geprüft.

Basierend auf der langjährigen Erfahrung bei der Durchführung von Messungen an Schrägseilen konnte davon ausgegangen werden, dass die - durch die gewählte Instrumentierung vorhandene - relative Nähe der Beschleunigungsaufnehmer zum unteren Montagestoß (=lokaler Schwingungsknotenpunkt) keinen negativen Einfluss auf die Verwertbarkeit der aufgezeichneten Messdaten für die Schwingungsuntersuchung haben würde – eine Folge der eingesetzten, hochsensiblen Beschleunigungssensoren. Ein Unterschied macht sich lediglich bei den Absolutwerten der Schwingungsamplituden bemerkbar.

Bei der beschriebenen Vorgehensweise wurde die Schwingungscharakteristik der einzelnen Diagonalstreben durch Messungen rasch und zerstörungsfrei ermittelt. Die Streben wurden durch ambiente (umweltbedingte) Bedingungen einerseits, sowie durch den auftretenden Verkehr samt Überfahrten schwerer Fahrzeuge andererseits zum Schwingen angeregt. Das Ausmaß der Schwingungsantwort für diese Tertiär-Bauteile zwischen 0,1 und 0,2g in der lokalen Vertikalrichtung der Diagonalverbände sei dabei als beachtlich hervorgehoben.

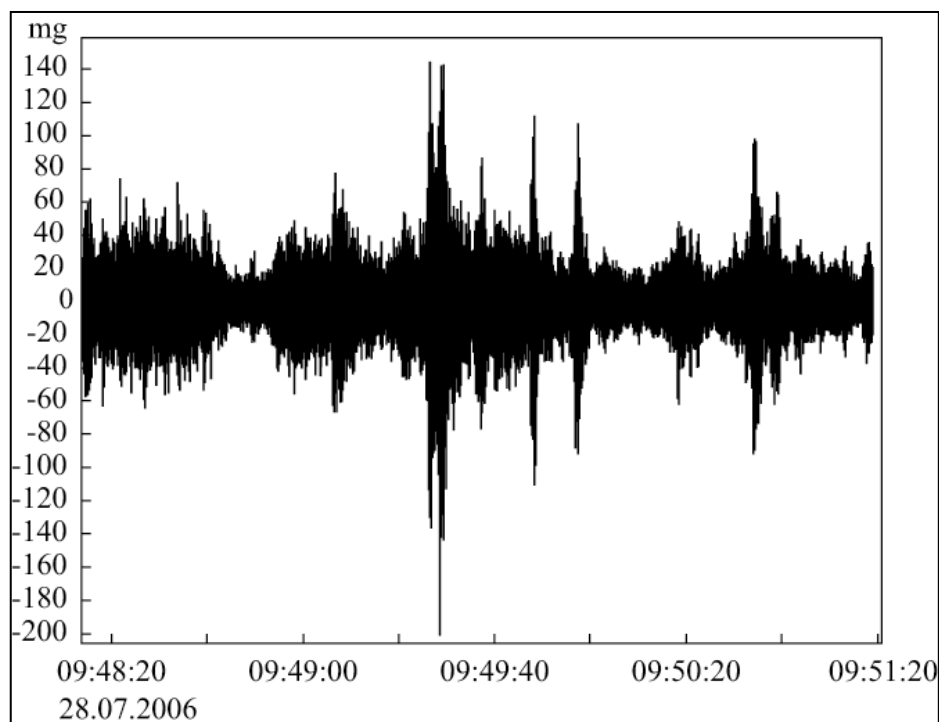


Bild 110: Exemplarisches Beschleunigungssignal unter ambienten Bedingungen,
Vertikalkanal – Strebe II 42 QV-N

10.2.2 Methodik - Referenzwerte für den Verlauf der Eigenfrequenzen

Aus den Messfiles werden die Eigenfrequenzen der Grund- und Oberschwingungen bestimmt. Mit anderen Worten werden die im Signal enthaltenen harmonischen, wiederkehrenden Schwingungsantworten ermittelt, welche die reale dynamische Steifigkeit der einzelnen Diagonalstreben als größte Einflussgröße beinhalten.

Die Auswertung der Messdateien (Signalbandpassfilterung, FFT-Fast Fourier Transformation und abschließende 3-Punkt-Glättung der erhaltenen Spektren) zeigte grundsätzlich eine klare dynamische Charakteristik. Die maßgeblichen - für den Bauteil dominanten - Eigenfrequenzspitzen sind deutlich ausgeprägt. Für die gesamte Untersuchung wird ausschließlich die Vertikalrichtung am lokalen Koordinatensystem der Streben betrachtet, d.h. in Querverbands-Ebene - normal zur Stabachse.

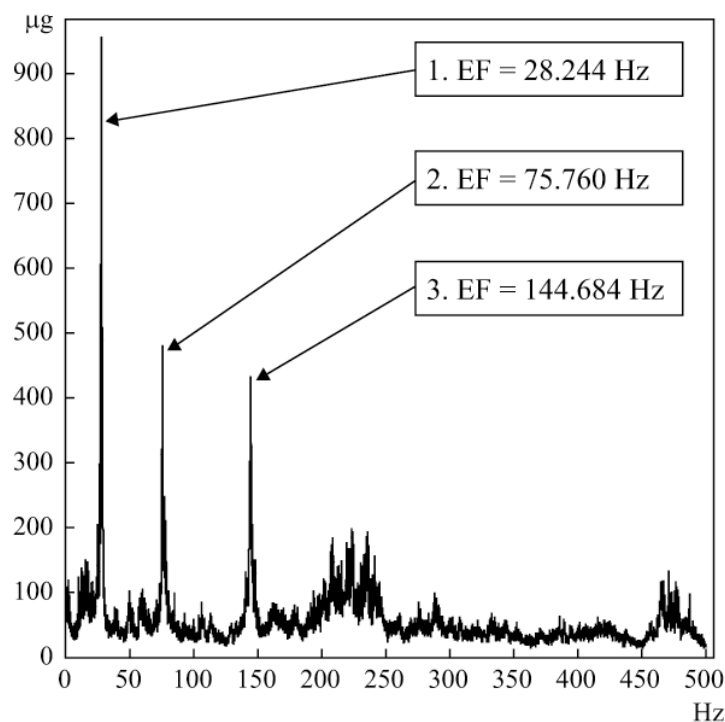


Bild 111: Exemplarisches Frequenzspektrum vertikal, geglättet – Strebe II 42 QV-N

Als nächster Schritt wurden seitens der analytischen Baudynamik Referenzwerte (in einer bereits sehr guten Näherung zu erwartende Werte) für die maßgeblichen Eigenfrequenzen innerhalb der Bauteilreihe generiert, welche in weiterer Folge mit den gemessenen Werten verglichen werden sollten. Gemäß [18] ist die Eigenfrequenz der **Grundschiwingung (natural frequency)** f_{1i} (in Hz) entlang der Bauteilreihe (mit dem Laufindex i) eine Funktion der Biegesteifigkeit EI des Querschnittes, der Länge L , der Masse m der Strebe pro Längeneinheit und der Lagerungsbedingungen (λ_i).

$$f_{li} = \frac{\lambda_i^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \left(\frac{EI}{m} \right)^{1/2} \tag{44}$$

- λ_i Lagerungsparameter (aus [18])
- L geometrische Länge der jeweiligen Strebe
d.h. das Planmaß (Länge zwischen den Montage-Stößen)
- EI Biegesteifigkeit der jeweiligen Strebe
(Eingangsdaten aus Plänen)
- m Massenbelegung pro Längeneinheit
(Eingangsdaten aus Plänen)

Dabei wurde bewusst der vorliegende Formelansatz (44) ohne Berücksichtigung der Normalkräfte verwendet. Dies ist insofern zulässig als die im Regelbetrieb auftretenden Normalkräfte (gemäß **Tabelle 40 & Tabelle 41** bzw. **Bild 149**) viel zu klein sind, um die Eigenfrequenzen entsprechend zu beeinflussen.

Real		Hypothese	
Rechnung	Rechnung	Messung	Rechnung
max. auftretende Normalkraft	rechnerisch daraus zu erwartende Abweichung	Innerhalb der Bauteilreihe auftretende Abweichungen für Δf_1	für diese Abweichungen notwendigen Normalkräfte
[kN]	Δf [%]	[%]	[kN]
-80	-0,42		
		-5	-1000
		-10	-1640
		-15	-2380

Tabelle 36 : Beweisführung zur Normalkraft-Unabhängigkeit der dargelegten Methodik

Umgekehrt gesprochen müssten im Regelbetrieb vollkommen unrealistische Normalkräfte auftreten, um Ursache für die gemessene Charakteristik der Bauteilreihe Diagonalstreben zu sein (**Tabelle 36** bzw. **Kapitel 10.3**). Zur Erbringung des Beweises für diese Aussage bzw. für den methodisch eingeschlagenen Weg wurden notwendiger Weise entsprechende Ergebnisse aus der Messung vorweggenommen, welche erst in weiterer Folge angeführt und diskutiert werden (reales Normalkraftaufkommen gemäß **Tabelle 40 & Tabelle 41** bzw. **Bild 149**; Charakteristik zum Verlauf der Eigenfrequenzen innerhalb der Bauteilreihe **Bild 115, Bild 116, Bild 121 & Bild 122**).

Weiters lässt sich zeigen, dass die Relation zwischen der jeweils rückgerechneten, freien Schwinglänge und der zugehörigen Diagonalen-Länge einer Konstanten innerhalb der Bauteilreihe entspricht. Dazu wird in Gleichung (44) das λ_i für einen beidseitig gelenkig gelagerten Stab angesetzt und die Längen L bei vorgegebenen Rechenwerten für f_{li} (z.B. für den realistischer Weise zu betrachtenden Lagerungsfall beidseitig eingespannt) ermittelt. Wie dadurch bewiesen wurde, ist der Parameter der freien Schwinglänge ebenso eine fixe, implizierte Systemgröße in der gewählten Methodik – unabhängig vom jeweils betrachteten Bauteil - und daher ohne Einfluss auf die Interpretation der auftretenden Ergebnisse.

Auf Grundlage der verfügbaren planlichen Dokumentation standen damit prinzipiell alle notwendigen Eingangsdaten zur Verfügung, um mittels (44) rechnerische Referenzwerte für die zu messenden Eigenfrequenzen entlang der gesamten Bauteilreihe bereitzustellen.

$$\frac{\lambda_i^2}{L^2} \quad (45)$$

Der Einfachheit halber wird in den nächsten Schritten ausschließlich der variable Anteil aus (44) betrachtet (siehe Gleichung (45)). Dieser - für die nachfolgenden Abbildungen gesondert hervorgehobene - rechnerische Verhältniswert repräsentiert den qualitativen Verlauf der zu erwartenden Referenzwerte für f_{li} . Wie **Bild 112** entnommen werden kann, wurden diese Verhältniswerte nun für unterschiedlichen Lagerungsvarianten generiert (λ_i gemäß [18]), d.h. beidseitig eingespannt / eingespannt-gelenkig sowie beidseitig nachgiebig eingespannt. Für den letztgenannten Lagerungsfall wurde ein näherungsweise, so genanntes Finite Elemente Model- Updating durchgeführt. Dabei wurde anhand des Lagerungsparameters λ_i die Steifigkeit der Drehfedern an den Montagestößen in Querverbandsebene solange variiert, bis die Streben-Frequenzen des Rechenmodells in hinreichend guter Übereinstimmung zu ausgewählten Messwerten (im Brückenhauptfeld) vorlagen. Dieser iterativ ermittelte Wert für λ_i wurde in weiterer Folge für die Referenzwertermittlung der gesamten Bauteilreihe angesetzt.

Bild 112 zeigt den grundsätzlichen Verlauf der Referenzkurven gemäß Gleichung (45) in Abhängigkeit von der variablen Geometrie (d.h. der Länge) der Diagonalstreben unter der Annahme einer unverändert idealen Integrität der jeweiligen Streben-Lagerung. **Bild 113** gibt dazu eine schematische Übersicht über die Grundrisskrümmung und die damit zusammenhängende Asymmetrie des Querschnittes unter der Fahrbahn. Bedingt durch die sich daraus ergebende Querneigung liegen unterschiedliche Längenverhältnisse für die Streben zwischen Berg- und

Talfahrbahn vor und damit - gemäß (44) – selbstverständlich auch entsprechend unterschiedliche, zu erwartende Eigenfrequenzwerte (die durch die Querneigung bedingte Verkürzung der Streben zu den Widerlagern hin verursacht automatisch höhere Frequenzbeträge).

Ebenso wird die Längenänderung der Diagonalstreben zufolge der zu den Brücken-Widerlagern abnehmenden Hohlkasten-Höhe berücksichtigt. Zum Widerlager Schönberg hin werden die Streben nochmals kürzer als zum Widerlager Patsch (4,7m vs. 5,6m Hohlkastenhöhe) wodurch die generierten Sollwerte zum südlichen Widerlager hin prinzipiell höhere Beträge annehmen (siehe jeweils Bild 112).

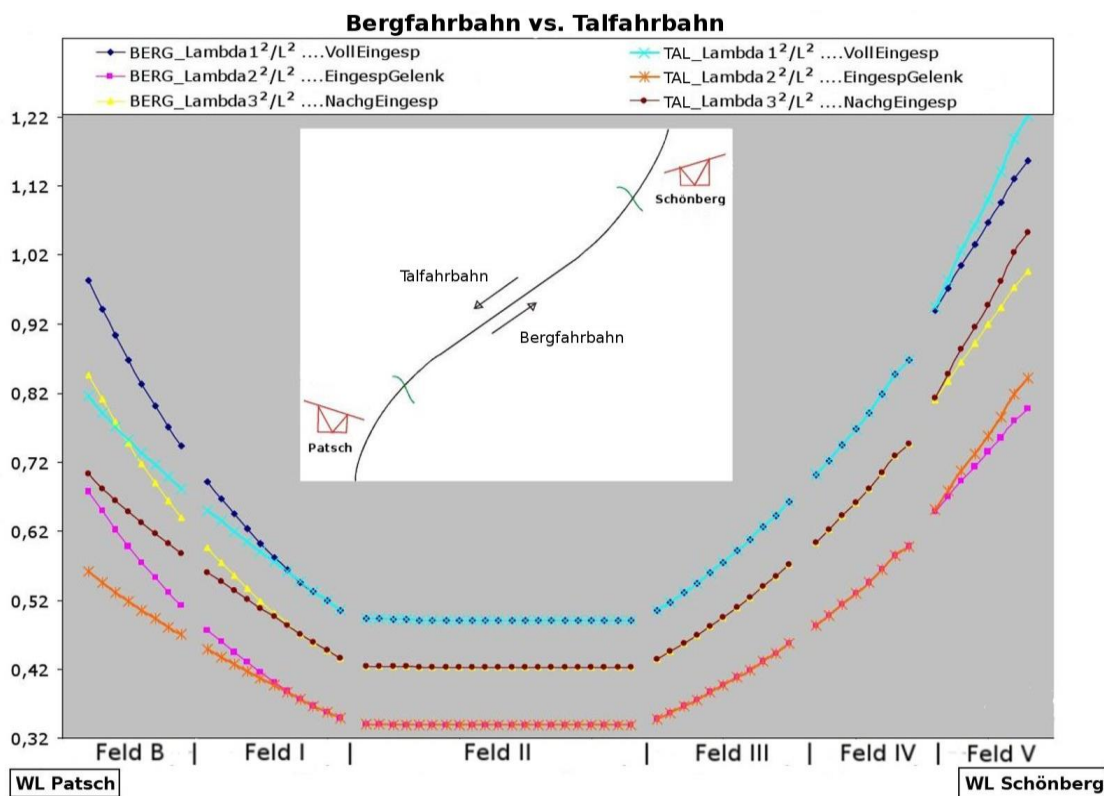


Bild 112: Verlaufsfunktion der Referenzwerte der Eigenschwingung der Diagonalstreben (Verhältniszerte für f_1) für unterschiedliche Lagerungsvarianten in Abhängigkeit von der sich verändernden Hohlkastengeometrie

Die Bauteillängen bzw. deren Veränderung im Brückenverlauf gehen in die Berechnung der Eigenfrequenz-Referenzwerte quadratisch in den Nenner ein. Dabei entstehen für jede der drei dargelegten Lagerungsvarianten jeweils zwei quadratische Parabeln im Sinne generierter Referenzfunktionen, die durch Multiplizieren mit dem jeweils konstanten Lagerungsparameter λ (für beidseitig eingespannt / eingespannt-gelenkig sowie beidseitig nachgiebig eingespannt) zu den Randbereichen hin mit größer werdenden λ s tendenziell auseinanderdriften. Das Quadrieren des Lagerungsparameters (gemäß Gleichung (44)) verstärkt diesen Effekt des sichtbaren

Auseinanderdriftens natürlich. Wie nachfolgend gezeigt wird (**Bild 114**), ist dies lediglich eine Folge des gewählten mathematischen Vorgehens ohne mechanische Auswirkung auf den methodischen Ansatz hinsichtlich des Herauslösen von Anomalien aus der gleichartig konstruierten Bauteilreihe.

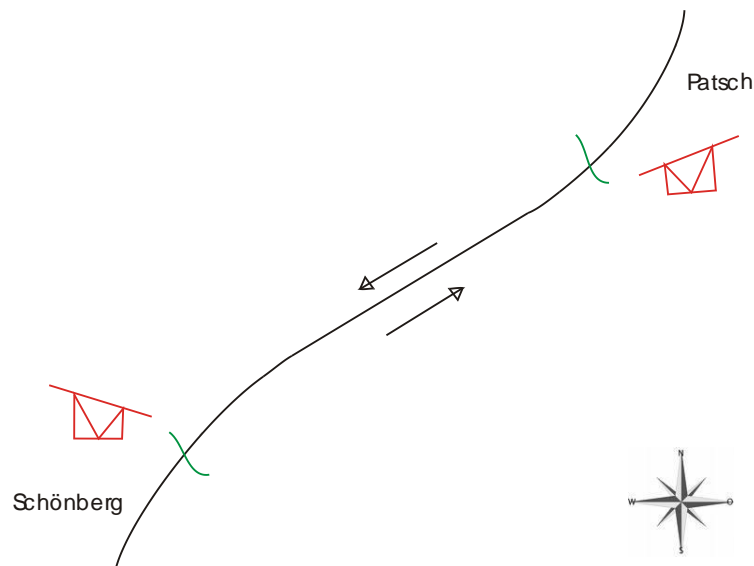


Bild 113: Schema der Krümmungsverhältnisse (qualitativ) im Grundriss - die daraus resultierenden Fahrbahn-Querneigungen bedingen unterschiedliche Diagonalstreben-Längen innerhalb des Tragwerksverlaufes auf Berg- und Talfahrbahn

Durch den gewählten methodischen Ansatz wird ein einheitliches Vergleichsniveau geschaffen, indem die entlang der Berg- bzw. Talfahrbahn über die Tragwerkslänge veränderliche geometrische Streben-Länge als einzige Variable im Prozess der zu generierenden Referenzwerte verbleibt. Mit anderen Worten wird an allen Stellen dieselbe „Modellierungs-Ungenauigkeit“ begangen, was im vorliegenden Fall absolut „erwünscht“ war. Nicht die möglichst gute Modellierung stand im Vordergrund, sondern lediglich die vergleichende Analyse einer im Querschnitt wie in ihren Lagerungsbedingungen vollkommen gleichartig hergestellten Bauteilreihe mit voraussichtlich unterschiedlichem Erhaltungszustand der Anschlussknoten an der Querrahmen.

Diese fundamentale Voraussetzung in der Methodik wird hinsichtlich der weiteren Analysen (**Kapitel 10.2.3 und 10.3**) nochmals verdeutlicht, indem für die Talfahrbahn einerseits sowie für die Bergfahrbahn andererseits jede der jeweils drei in **Bild 112** enthaltenen Kurven zueinander in Relation gesetzt wird und wiederum als Quotient über die Brückenlänge dargestellt wird (**Bild 114**).

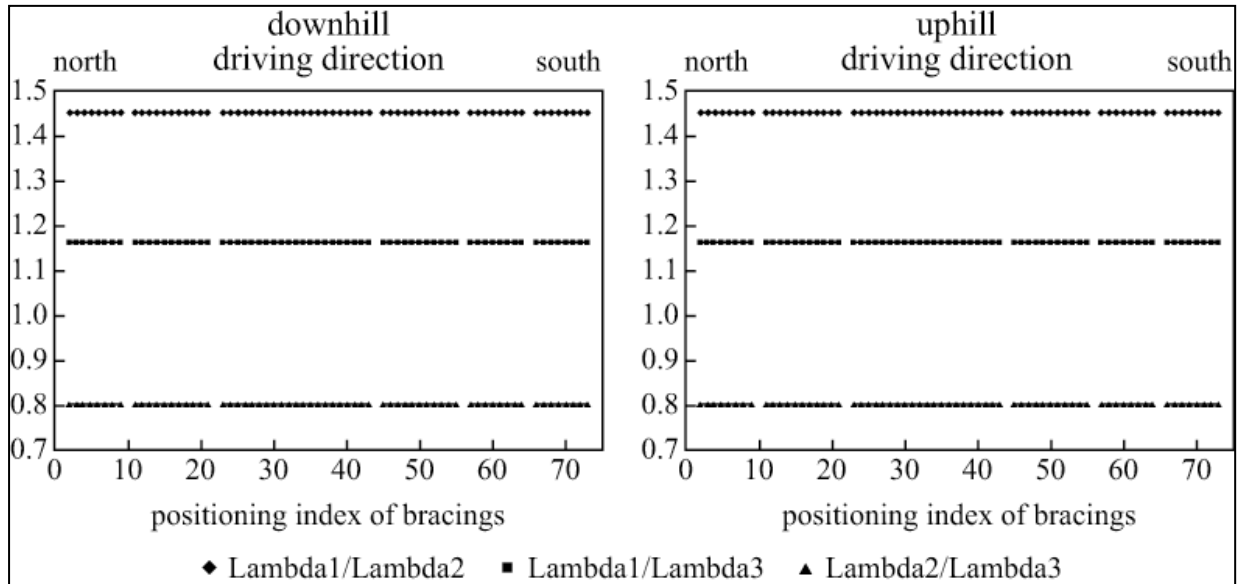


Bild 114: Verläufe des Verhältnisses der berechneten Referenzgrößen f_1 für unterschiedliche Lagerungsvarianten der TORSIONSSTREBEN – Talfahrbahn (links) vs. Bergfahrbahn (rechts)

In selbiger Art und Weise, wie gerade eben die einzelnen Referenzwert-Kurven zueinander in Beziehung gesetzt wurden (**Bild 114**), sollte in weiterer Folge ein Vergleich zwischen gemessenen Eigenfrequenz-Werten und deren rechnerischen Referenzwerten infolge einer durchgängigen Frequenzanalyse an den Diagonalstreben erfolgen. Die Vorgehensweise lässt unter regulären Umständen einen weitgehend horizontalen Ergebnisverlauf der gemessenen Abweichungen von den jeweiligen Referenzwerten erwarten. Dadurch sind etwaige Ausreißer aus diesem Trend wesentlich eindeutiger zu erkennen als beispielsweise aus dem Verlauf der Messwerte selbst.

10.2.3 Ergebnisse der Auswertung

Anhand der umfangreichen Messdaten, welche im Feldversuch entnommen wurden, erfolgte im Zuge der Analyse der Eigenfrequenzen eine systematische Evaluierung des realen Lagerungsverhaltens (=Integrität der Querverband-Anschlüsse) innerhalb der gesamten Bauteilreihe der Diagonalstreben.

Die detaillierten Auswerteergebnisse aller 144 Torsionsstreben können [58] entnommen werden. Die dort enthaltenen Tabellen beinhalten zunächst die Eingangsparameter für die Berechnung der dynamischen Referenzwerte (siehe **Kapitel 10.2.2**), des Weiteren wurden die Messwerte sowie deren Abweichungen von den jeweiligen Referenzwerten (in Prozent) angeführt. Ergänzende Kommentare geben Auskunft über etwaige visuellen Auffälligkeiten vor Ort während der Basismessung bzw. weisen auf Besonderheiten während der Auswertung hin. Eine entsprechende Legende zum Verständnis dieser Kommentare liegt ebenfalls vor.

Das vorliegende Kapitel fasst nun die Ergebnisse zur Gegenüberstellung der gemessenen Charakteristik der Diagonalstreben mit den Referenzwerten der dynamischen Berechnung grafisch zusammen. Diese sind in den nachfolgenden Abbildungen entsprechend aufbereitet (**Bild 115 bis Bild 118** - Messungen vom Juli 2006). Zu sehen ist der Verlauf (=Trend) der wirksamen Bauteilsteifigkeiten – ausgedrückt durch die Abweichung der gemessenen Streben-Frequenzen von den rechnerischen Sollwerten in % – entlang der Brückenlänge, wobei für jede der ersten beiden Eigenfrequenzen nach Fahrtrichtung und nach verwendetem Lagerungsfall unterschieden wird.

Dabei wird zunächst von zwei Grenzlagerungsfällen ausgegangen, und zwar beidseitig eingespannt sowie einseitig eingespannt-einseitig gelenkig gelagert. Wie [58] entnommen werden kann, liefert der Lagerungsfall beidseitig gelenkig viel zu sehr von der Messung abweichende Werte. Dabei ergeben sich derart niedrige Eigenfrequenz-Werte, dass diese einer viel zu „weichen“ Modellierung der Realität entsprechen würden.

Es zeigt sich, dass das reale Verhalten für den untersuchten Konstruktionstyp zwischen diesen zwei Lagerungsfällen zu modellieren ist (= beidseitig mittels Drehfeder nachgiebig eingespannt). Deswegen wurde (wie bereits erwähnt) eine entsprechende, FE-Model-Update basierte Referenzkurve für diesen dritten Lagerungsfall erstellt (siehe **Bild 112**).

Beim Studium der Abbildungen **Bild 115 bis Bild 118** wie auch der Tabellen in [58] (v.a. der 1. Eigenfrequenz) wird deutlich, dass es zunächst eine systematische, weitgehend konstante prozentuelle Abweichung der Messwerte von den Referenzwerten gibt (horizontaler Verlauf), aus welcher lokale Einzel-Ausreißer einerseits und ganze Bereiche andererseits als auffällig herausisoliert werden konnten. Die entwickelte Methodik sollte im Falle tatsächlich vorliegender Anomalien eine solche Identifikation entsprechend gewährleisten.

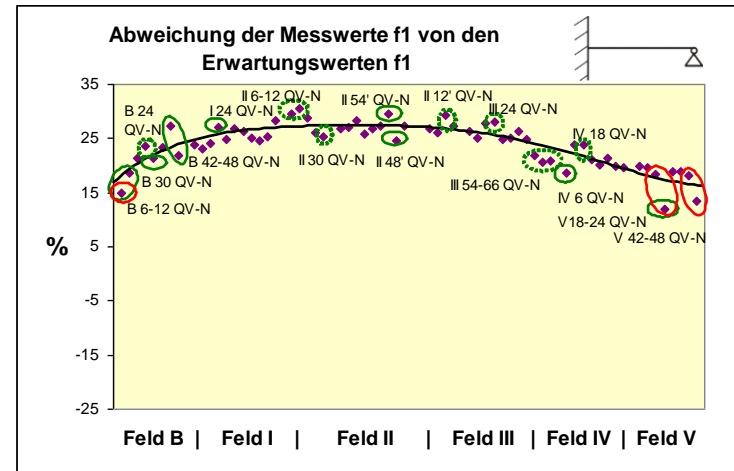
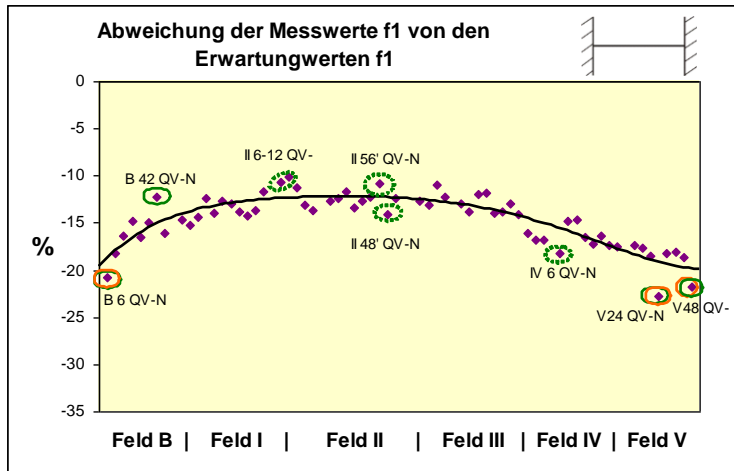


Bild 115: 1. Eigenfrequenz – Trend der Abweichungen der Messwerte von den berechneten Referenzwerten über die Tragwerkslänge - Fahrtrichtung Schönberg für die beiden Grenzlagerungsfälle

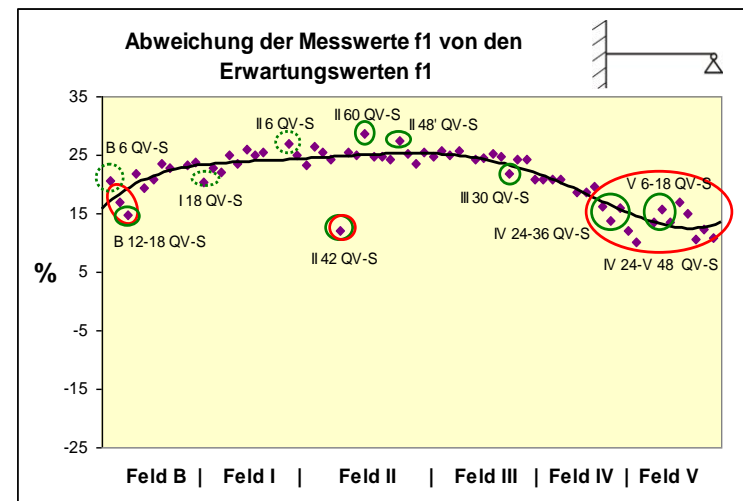
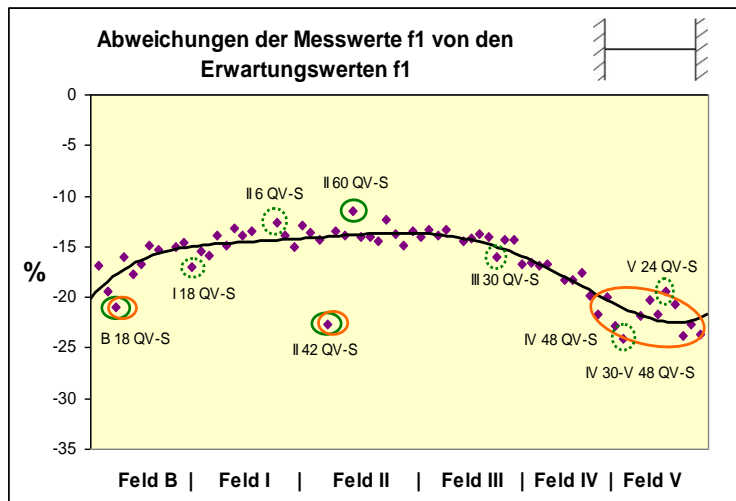


Bild 116: 1. Eigenfrequenz - Trend der Abweichungen der Messwerte von den berechneten Referenzwerten über die Tragwerkslänge - Fahrtrichtung Patsch für die beiden Grenzlagerungsfälle

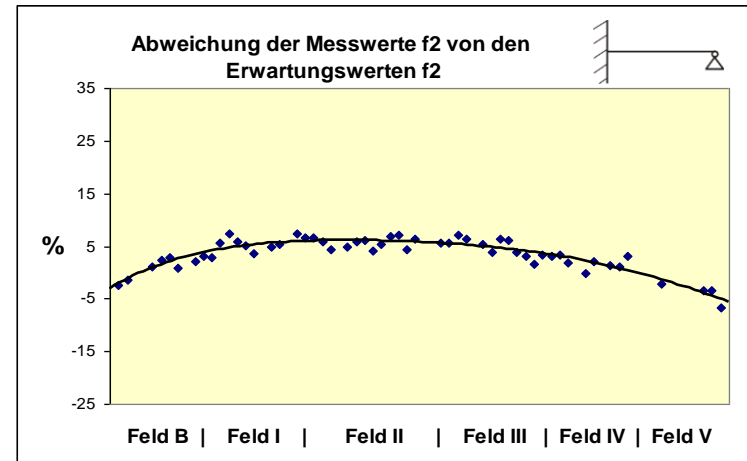
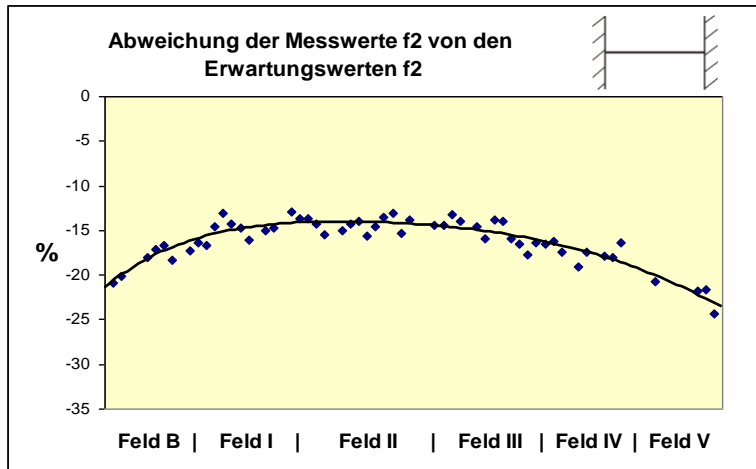


Bild 117: 2. Eigenfrequenz - Trend der Abweichungen der Messwerte von den berechneten Referenzwerten über die Tragwerkslänge - Fahrtrichtung Schönberg für die beiden Grenzlagerungsfälle

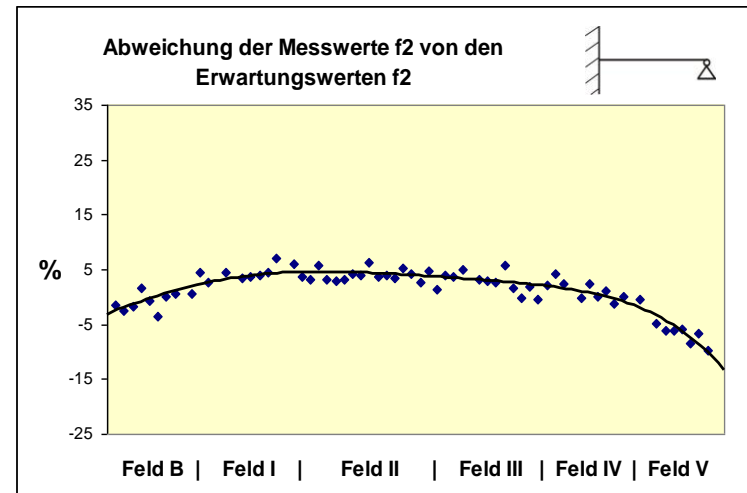
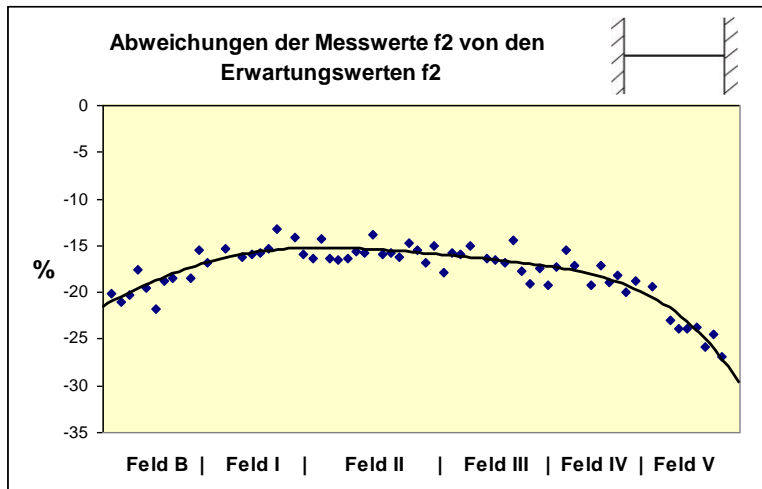


Bild 118: 2. Eigenfrequenz - Trend der Abweichungen der Messwerte von den berechneten Referenzwerten über die Tragwerkslänge - Fahrtrichtung Patsch für die beiden Grenzlagerungsfälle

10.3 Bewertung

Die wirksame Integrität der Diagonalstreben-Anschlussknoten wurde auf Basis der maßgeblichen, dynamischen Parameter ermittelt (Eigenfrequenzen). Da die Streben-Verbände über den Pfeilern durch deren massive Ausführung für die vorliegende Studie keine Relevanz haben, sind sie in den nachfolgenden Ausführungen nicht berücksichtigt worden. Die Monitoring-basierten **Erkenntnisse der Basismessung 2006** sind im Folgenden bewertet und zusammengefasst worden:

10.3.1 Gemessene, wirksame Integrität der Diagonalstreben-Anschlussknoten

- **Bild 119** verdeutlicht den grundsätzlichen, zu erwartenden, charakteristischen Verlauf der Referenzkurven für die Torsionsverbände entlang des Brückentragwerks bei regulärem, planmäßigem Verhalten (**Methodik 10.2.2**). Die Querneigung der Fahrbahn zu den Brückenwiderlagern hin bedingt, dass die Streben der Talfahrbahn zum WL Schönberg hin kürzer werden als jene auf der Gegenfahrbahn. Die zugehörigen Referenzkurven hinsichtlich der zu erwartenden Eigenfrequenzen der Talfahrbahn nehmen daher zum WL Bereich Schönberg deutlich höhere Werte an. Im WL Bereich Patsch gelten diese Voraussetzungen sinngemäß genau umgekehrt.

- Vergleicht man aber nun direkt die Verläufe der Messwerte zwischen Berg- und Talfahrbahn (**Bild 120**), so zeigt sich, dass sich der am Tragwerk zu erwartende Trend nicht mehr vollständig einstellt. Hervorgehoben sei an dieser Stelle insbesondere der Bereich Talfahrbahn - zum WL Schönberg hin. Die notwendige Überschreitung der Werte der Talfahrbahn gegenüber der Bergfahrbahn tritt nicht nur nicht mehr auf, die Werte der Kurve der Talfahrbahn erreichen mitunter gerade einmal jene der Bergfahrbahn bzw. unterschreiten diese stellenweise sogar, obwohl sie über diesen liegen müssten (**Bild 119**). Im WL Bereich Patsch ist der prognostizierte Trend zwar gut zu erkennen, jedoch verlassen auch hier die Messwerte im Endbereich den Sollverlauf der quadratischen Parabel und lassen einen deutlichen Abfall der Randwerte erkennen.

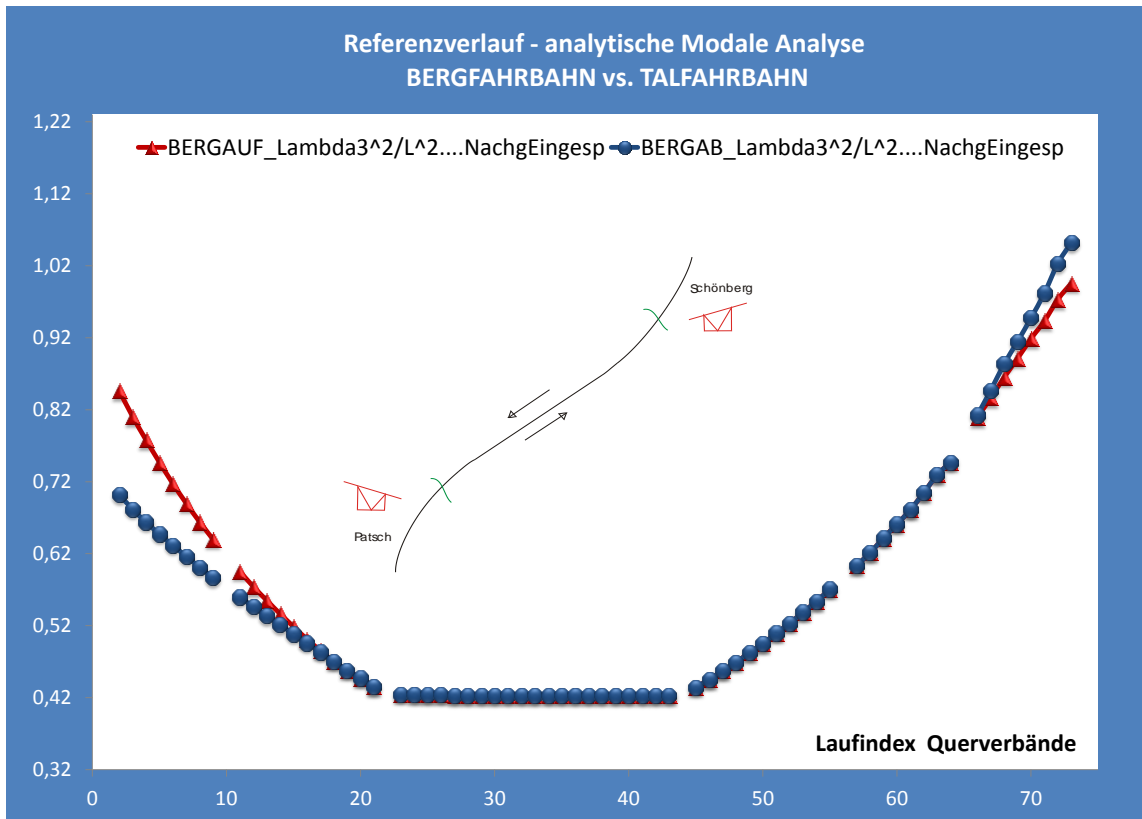


Bild 119: Verlaufsfunktion der Referenzwerte der Eigenschwingung der Diagonalstreben (Verhältniszerte für f_1) für unterschiedliche Lagerungsvarianten in Abhängigkeit von der sich verändernden Hohlkastengeometrie

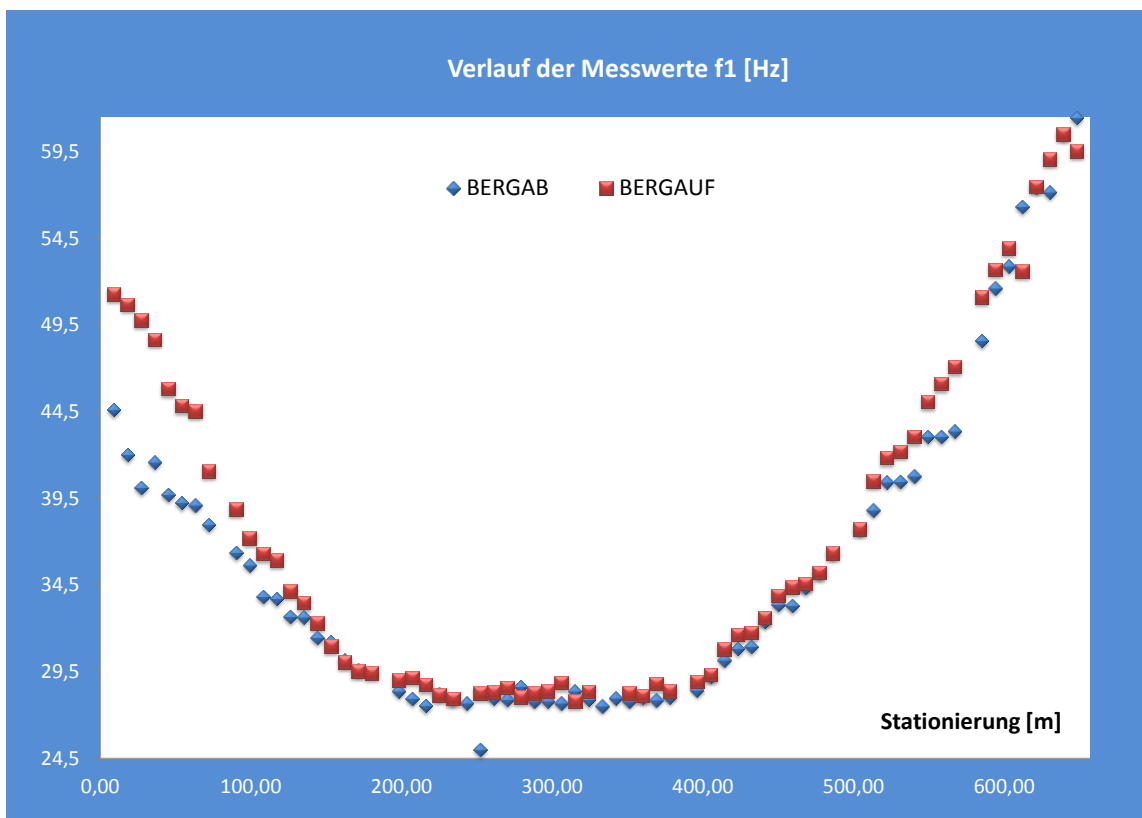


Bild 120: Verlauf der Messwerte entlang der Stationierung (WL Patsch -> WL Schönberg)

- Die aus der Messung ermittelten Grundeigenfrequenzen wurden mit ihren Referenzwerten aus der analytischen Baudynamik verglichen (drei Lagerungsvarianten). Die Vorgehensweise sieht unter regulären Umständen einen horizontalen Ergebnisverlauf der Abweichungen der gemessenen Eigenfrequenzen von den jeweiligen Referenzwerten vor (**Bild 114**). Dadurch sind etwaige Ausreißer aus diesem Trend wesentlich eindeutiger zu erkennen als beispielsweise aus dem Verlauf der Messwerte selbst.
- Die Basis-Untersuchung zur Integrität der Streben-Anschlüsse zeigte einen einheitlichen Trend, welcher eine systematische, abschnittsweise Abweichung der Messwerte von den Referenzwerten zeigte und insbesondere durch die Verläufe für alle drei analysierten Eigenfrequenzen bestätigt wurde (**Bild 121 & Bild 122**). Dieser Trend zeigt zunächst eine weitgehend konstant und horizontal verlaufende Abweichung über die Felder I, II und III, während die Randfelder B bzw. IV und V (Talfahrbahn & Bergfahrbahn gleichermaßen) bereits eine Degradation der Anschlüsse der Diagonalstreben zu indizieren scheinen. Diese Feststellungen wurden insbesondere auch dadurch bestätigt, als die im Rahmen der visuellen Inspektionen aufgetretenen Ermüdungsschäden an den Diagonalverbänden örtlich in deutlich größerer Häufigkeit den Randfeldern zuzuordnen waren (siehe **Tabelle 37 & Tabelle 38**).
- Die angesprochenen Fehlstellen sind in **Bild 121 & Bild 122** jeweils unterhalb der ausgewerteten Messergebnisse eingetragen. Die roten Markierungen repräsentierenden dabei jeweils einen oberen Streben-Anschluss, die gelben einen unteren Streben-Anschluss (weitere Details siehe **Kapitel 10.3.3**).
- Des Weiteren wird durch **Bild 121** und **Bild 122** (jeweils die oberen Teile) unterstrichen, dass die entwickelte Methodik zur Bereitstellung von rechnerischen Sollwerten in Hinblick auf die angestrebte Schwachstellenidentifikation unabhängig von der angenommenen Lagerung ausgearbeitet wurde. Die aus der Messung resultierenden Abweichungen der realen dynamischen Kenngrößen f_1 innerhalb der Bauteilreihe der Diagonalstreben können im Zuge einer geschlossenen Betrachtung auf jeden rechnerischen Referenzfall bezogen werden. Je nach herangezogenem Lagerungstyp (beidseitig eingespannt, eingespannt-gelenkig, nachgiebig eingespannt) bleiben die Verlaufsfunktion bzw. deren Krümmungsverhältnisse qualitativ vollständig erhalten.

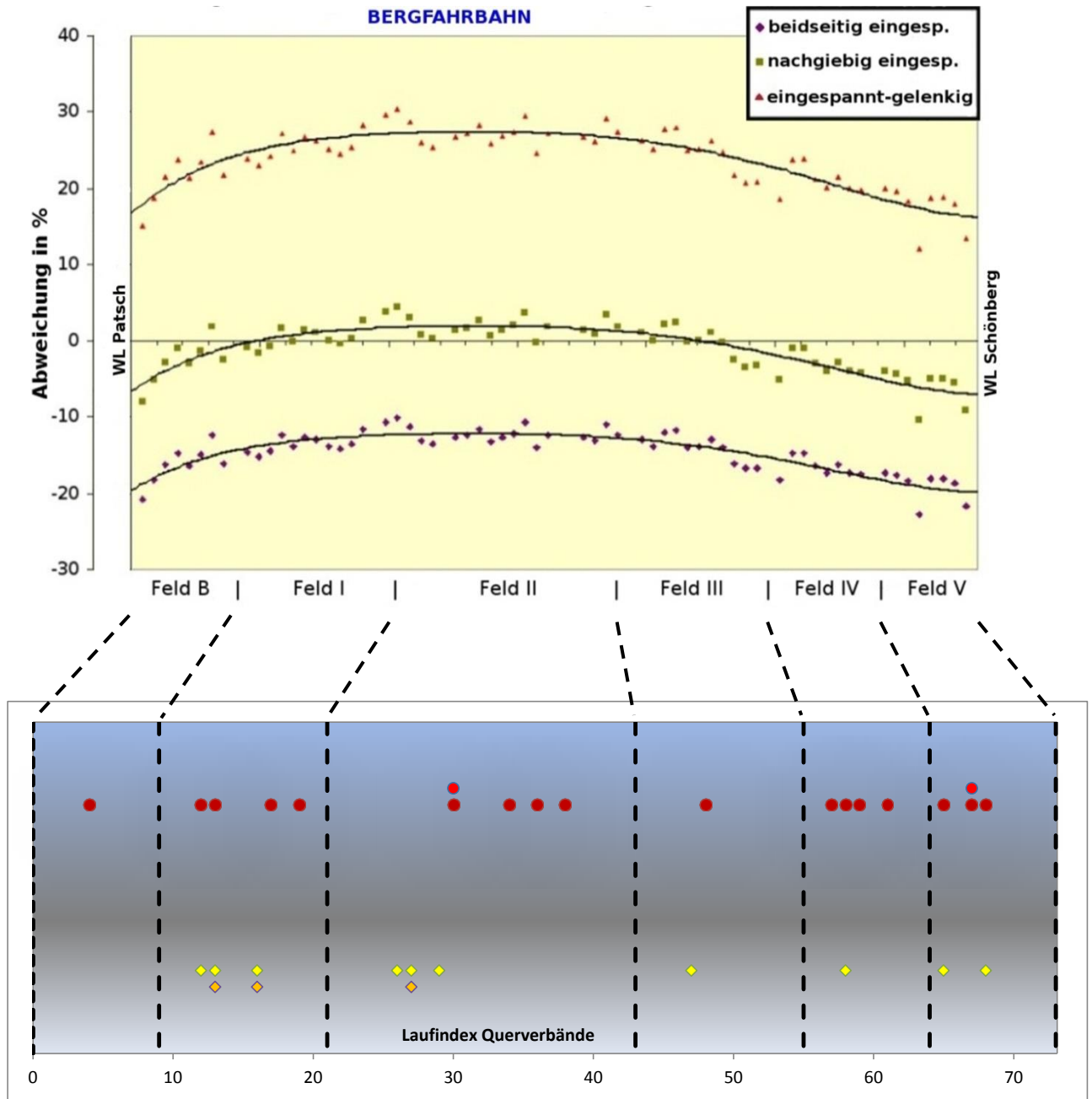


Bild 121: Abweichungen der gemessenen 1. Eigenfrequenzen gegenüber den berechneten Referenzwerten über die Tragwerkslänge für unterschiedliche Lagerungs-Varianten (OBEN) vs. dokumentierte Schadstellen 08/2006-07/2008 (UNTEN) - Fahrtrichtung Brenner

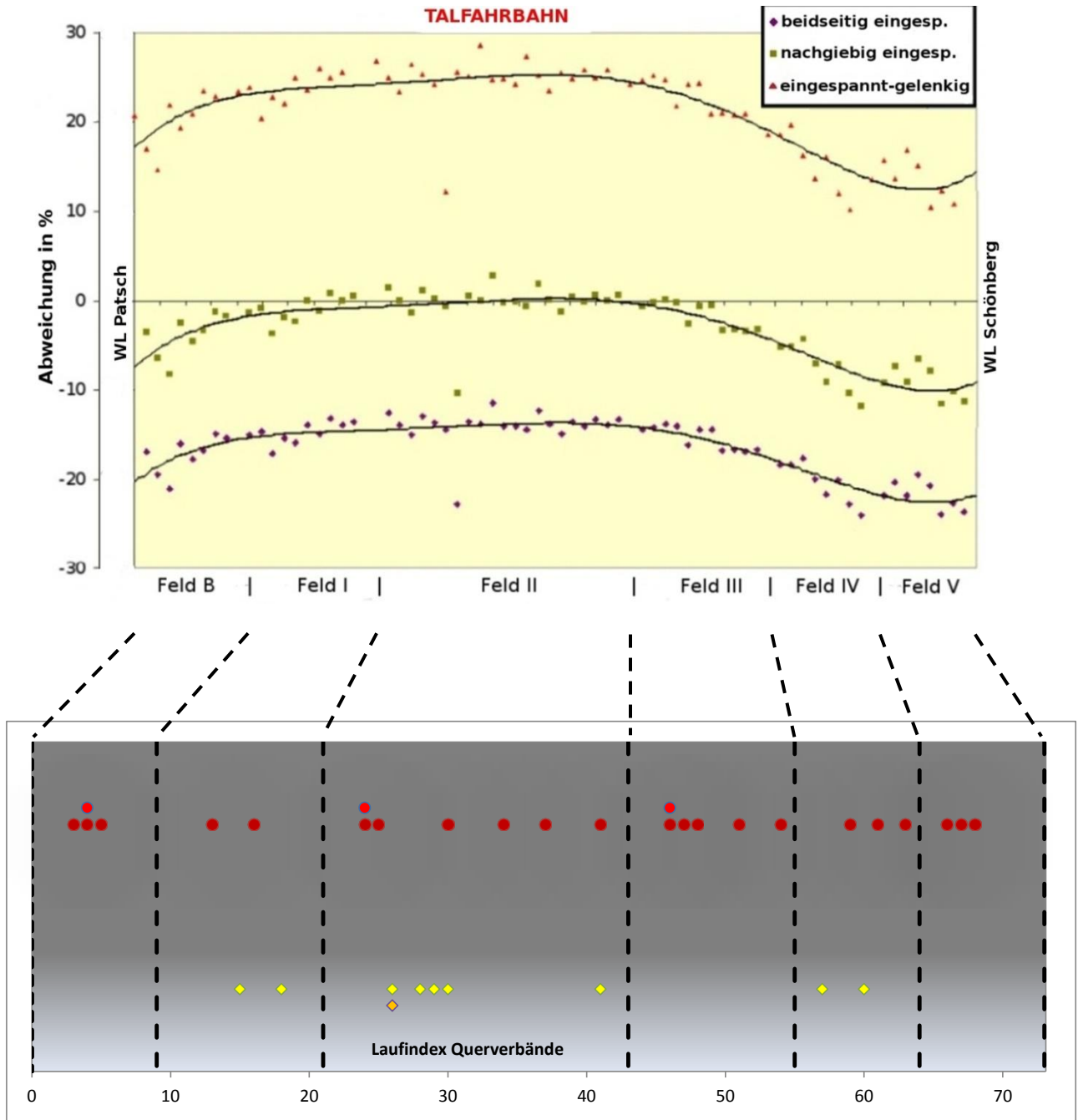


Bild 122: Abweichungen der gemessenen 1. Eigenfrequenzen gegenüber den berechneten Referenzwerten über die Tragwerkslänge für unterschiedliche Lagerungs-Varianten (OBEN) vs. dokumentierte Schadstellen 08/2006-07/2008 (UNTEN) - Fahrtrichtung Innsbruck

- **Bild 123** führt beide bisher betrachteten Aspekte zur Bewertung der Bauteilreihe Diagonalstreben (Vergleich der Absolutwerte Messung-Rechnung, prozentuelle Abweichung beider Größen) zusammen. Durch diese Form der Darstellung wird das Vorhandensein von „regulären“ gegenüber „auffälligen“ Bereichen nochmals deutlich hervorgehoben. Sobald der IST-Verlauf der die Messwerte beinhaltenden Funktion vom parabolischen SOLL-Verlauf der Vergleichsrechnung abweicht, wird dies unmittelbar durch ein gleichzeitiges Absinken jener Funktion unterstrichen, welche infolge der Abweichung von Messung und Rechnung verläuft.
- Aus allen bisherigen Abbildungen (insbesondere auch zusammenfassend durch **Bild 123**) gibt es deutliche Hinweise bezüglich verminderter Integrität der Diagonalstreben-Anschlüsse in den Brücken-Randbereichen. Obwohl sich dieser Trend in beiden Fahrtrichtungen zeigt, sind die Abweichungen aber auf der Talfahrbahn, vor allem in den Randfeldern beim Widerlager Schönberg (Feld IV und V), am stärksten ausgeprägt.
- Zu erklären ist dies durch die in die Torsionsverbände induzierte dynamische Stoßbelastung infolge Schwerverkehr, d.h. wenn die LKWs von der Freilandstrecke hinter dem Widerlager Schönberg (befestigter Straßenoberbau) auf das im Vergleich dazu relativ „weiche“ Brückentragwerk auffahren, wobei die Randfelder vom unmittelbaren Eintreffen der fahrenden Lasten überproportional betroffen sind. Es handelt sich also um eine zusätzliche dynamische Belastung ausgehend von der Talfahrbahn, welche natürlich vom gesamten Querverband abzutragen ist – also auch Bergfahrbahn-seitig, bevor sich der „gewöhnliche“ Lastfall der fahrenden Last einstellt. Im Bereich des Widerlagers Patsch lässt sich das gleiche Phänomen der dynamischen Stoßbelastung durch den Schwerverkehr identifizieren. Allerdings zeigen die Eigenfrequenzen dort keine so starken Abweichungen wie auf der Seite WL Schönberg, da die dynamische Zusatzbelastung bei Bergauf-Fahrten deutlich geringer ist, als bei Bergab-Fahrten.
- Aus den vorliegenden dynamischen Untersuchungen wird abgeleitet, dass die Randfelder der Brücke vom Schwerverkehr am stärksten beeinträchtigt sind. Dies wird nicht nur durch die dokumentierten Schäden der vergangenen Jahre bestätigt (**Tabelle 38 & Tabelle 37** samt zugehöriger Ausführungen) sondern insbesondere auch durch die Tatsache, dass es sich im dabei prinzipiell um ein durchaus gängiges Phänomen bei dynamisch hochbeanspruchten Brückentragwerken handelt.

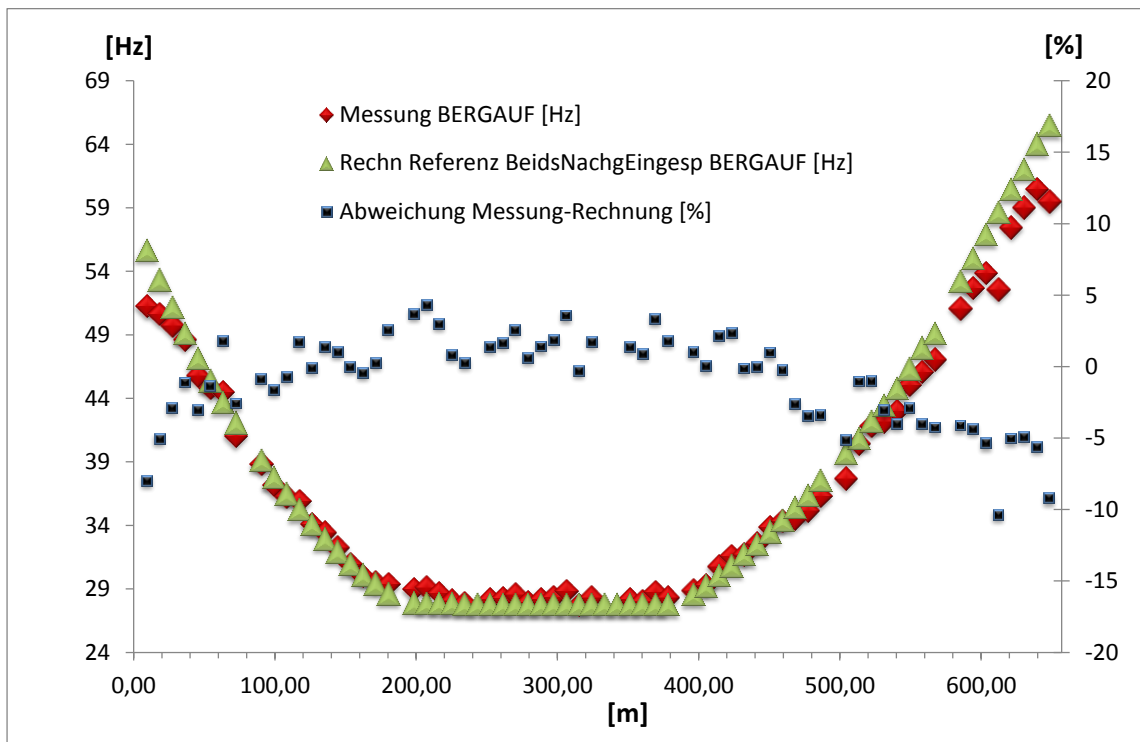
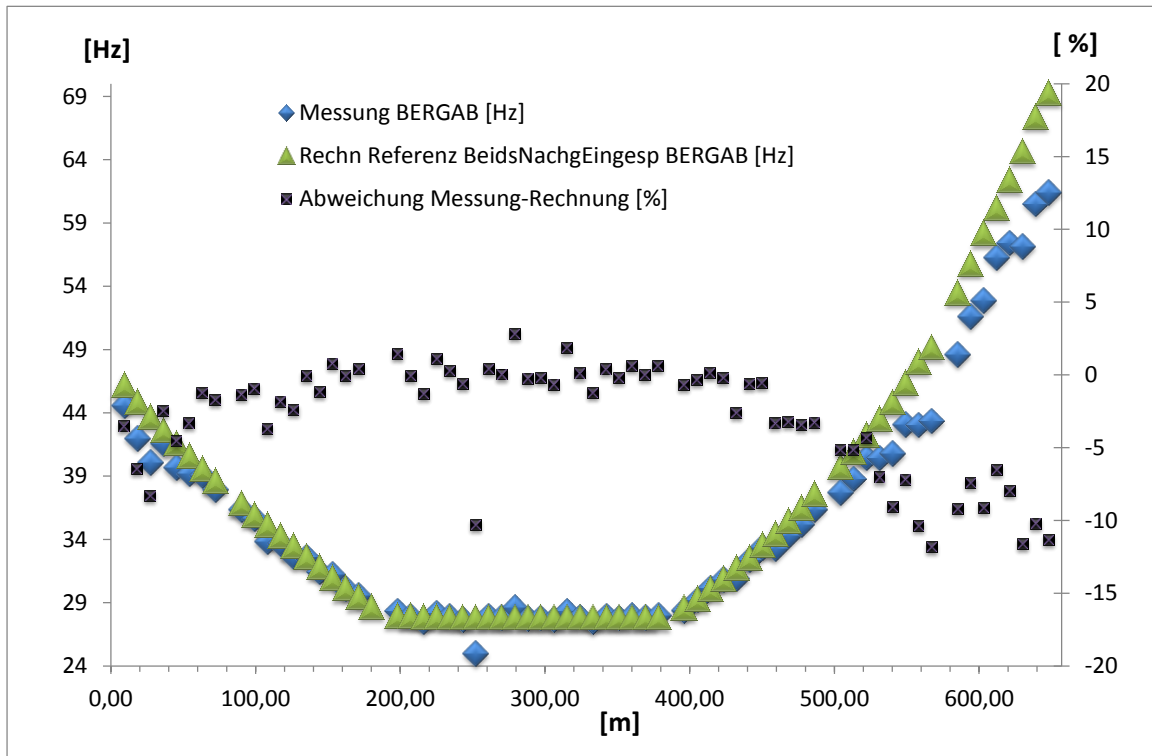


Bild 123: Gegenüberstellung der Messwerte f_1 zu den rechnerischen Referenzwerten sowie die sich daraus ergebende prozentuelle Abweichung – Tal-fahrbahn (oben) vs. Berg-fahrbahn (unten) (WL Nord -> WL Süd)

- In **Bild 124** wird eine Übersicht bezüglich jener auffälligen Bereiche gegeben, welche zum Untersuchungszeitpunkt (2006/2007) infolge der vorgestellten Methodik als Zonen mit verminderter Lagerungsintegrität identifiziert wurden. Im Anlehnung an **Bild 115** & **Bild 116** sowie die zugehörigen Tabellen in [58] ist anzumerken, dass weitere Diagonalstreben identifiziert wurden, deren seinerzeitige dynamische Systemantwort bereits eine deutliche Abweichung vom Soll-Zustand erkennen ließ. Diese Streben sind daher damals gesondert und ebenfalls als auffällig klassifiziert worden und sollten weiter beobachtet werden. Deren Abweichungen waren aber zum damaligen Zeitpunkt als noch nicht so schwerwiegend zu bewerten wie es bei den hier angesprochenen, hervorgehobenen Abschnitten der Fall war.
- Zusätzlich zu ganzen - als auffällig herausisolierten - Bereichen kommen auch noch einzelne Diagonalstreben, deren Abweichung auf ein lokales (singuläres) Verhalten ähnlich diesen stärker in Mitleidenschaft gezogenen Brücken-Randbereichen schließen lässt.

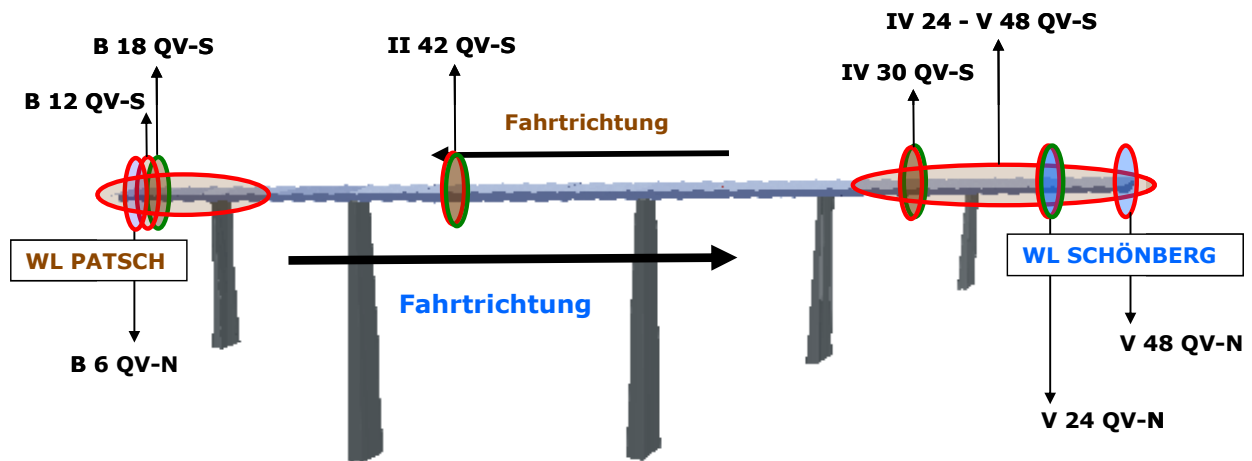


Bild 124: Visualisierung der **potentiellen Schwachstellen** über die Tragwerkslänge – für beide Fahrtrichtungen (Befund vom Sommer 2006)

10.3.2 Weiterführende Interpretation – Befundung aus Sicht des Stahlbaus

Wie aus den vorangehenden Kapiteln hervorgeht, legte die Messungs-basierte Frequenzanalyse innerhalb der gesamten Bauteilreihe eine bereichsweise Abnahme der Lagerungsintegrität an der Anschluss-Knoten nahe. Die Identifikation der beschriebenen Anomalien stellt ein systematisches Problem dar - d.h. es handelt sich keineswegs nur um ein punktuelles oder zufällig auftretendes Defizit. Diese Tatsache wird auch durch ein systematisches Rissbild mit entsprechender räumlicher Verteilung innerhalb des Brückentragwerkes unterstrichen. Des Weiteren lag durch das sich schrittweise vervollständigende Schadensbild gegenüber den vorab vorliegenden messtechnischen Untersuchungen ein nachweislich zugehöriges Ankündigungsverhalten bezüglich weiterer Risse in gleichartiger Form zum bisherigen Schadenstyp vor.

Im Folgenden wird der bisher tendenziell mechanisch basierten Argumentation eine stark Stahlbau-orientierte Sichtweise hinzugefügt:

- Im Zuge der über lange Jahre hinweg durchgeführten Begehungen des Hohlkastens war in der Regel stets eine starke Geräusentwicklung unter intensiver Schwerverkehrsbelastung zu vernehmen gewesen. Diese Geräusche sind einem auftretenden Schlupf bzw. einem zunehmend aktivierten Lochspiel in den Anschlussknoten der Querverbände zuzuordnen. Bei gezielten Inspektionen wurden insbesondere im oberen, vertikalen Knotenblechanschluss in der Vergangenheit häufig auch lockere Schrauben gefunden, die mit dem Drehmomentenschlüssel nachzuziehen waren.
- Dies bedeutet, dass an den vorliegenden, geschraubten Anschlüssen trotz Vorhandenseins einer HV-Verbindung unter der eingetragenen (Stoß-)Belastung der Reibwiderstand überwunden wird.
- Die messtechnisch nachgewiesenen Beanspruchungen am Querverband (gemäß **Kapitel 14**) zeigen eine deutliche Unterschreitung der realen Schnittgrößen (Normalkräfte) gegenüber den rechnerisch zulässigen (siehe [11]), wodurch diese nicht die Ursache für die Überwindung des Reibwiderstandes sein können. Auch die aus den Messungen rückgerechneten, realen Biegemomente sind von dermaßen geringem Betrag, dass sie trotz der Bemessung der Streben als gelenkig gelagerter Stab unerheblich bleiben.
- Die gesuchte Ursache der Nachgiebigkeit des HV-Schraubenstoßes wären daher

- in einer nicht ordnungsgemäß hergestellten Oberflächenbehandlung der HV-Verbindung zu suchen, wodurch der vorgeschriebene Reibbeiwert nicht immer eingehalten wurde,
 - ODER aber ein zu dick hergestellter, reibfester Anstrich, der unter Belastung zu einem Kriechphänomen am Montageanschluss führt.
- Dies hat unmittelbare Auswirkungen auf die Lagerungsintegrität der Streben, deren Verschlechterung sich in einem Absinken der 1. Eigenfrequenz (=Abweichung von den rechnerischen Sollwerten) besonders gut nachweisen lässt.
- Wie sich im Zuge der numerischen Simulationen in [58] zeigt, ist die im Zusammenhang mit der Ermüdungsschädigung treibende Komponente ausschließlich im so genannten **Spannungskonzentrationsfaktor K_s** am Kerbdetail zu suchen, d.h. es liegt ein aus heutiger Sicht ermüdungsbegünstigendes Detaillierungsproblem vor.
- Die an den Streben entstandene „Nachgiebigkeit“ ist daher nicht die Ursache für das vorhandene Schadensbild, die Anschlüsse reagieren aber natürlich in weiterer Folge zunehmend anfälliger auf die auftretende Stoßbelastung. Die dabei entstehende dynamische Vergrößerung wirkt daher unterstützend im Sinne der eingetragenen Beanspruchung, insbesondere an den vorhandenen Kerbdetails.

10.3.3 Begleitende Inspektion & Sanierung der ASFINAG

Im Folgenden ist zwecks Vervollständigung eine Dokumentation der visuellen Bauteilinspektionen angeführt, welche seit der dynamischen Basisuntersuchung (im Sommer 2006) in regelmäßigen und deutlich verkürzten Abständen (im Vergleich zum üblichen Vorgehen) durchgeführt wurde.

Tabelle 37 dient dabei als Zusammenfassung von **Tabelle 38** und zeigt im Wesentlichen die Summe der in diesem Zeitraum aufgetretenen Schäden an den Anschluss-Knoten – aufgliedert nach Richtungsfahrbahn, nach der Stelle der Schädigung (oberer oder unterer Knoten) sowie nach der Lage innerhalb des Brückentragwerks (Brückenrandfelder bzw. Brückenmitte).

RFBB oben	RFBB unten	RFBI oben	RFBI unten
19	13	25	10
12	8	11	4

Tabelle 37: Summe & Gliederung der Fehlstellen (**August 2006 – Juli 2008**) sowie deren anteilige Summen für die genannten Randfelder (rot)

Die nachfolgende **Tabelle 38** samt zugehöriger Legende dokumentiert im Detail das sukzessive Auftreten und Beschreiben von Schäden im Rahmen von fünf aufeinanderfolgenden, visueller Begutachtungen über einen Beobachtungszeitraum von 2 Jahren.

	Nr.	Bez.	Nord (RFB Brenner)		Süd (RFB Innsbruck)	
			Oben	Unten	Unten	Oben
Trennpfeiler	1	B06				
	2	B12				
	3	B18				Riss in Hohlprofil ca. 65mm saniert
	4	B24	Rissverdacht ca. 15mm			Anriss, beide Kehln. und Knotenblech
	5	B30				Riss in Hohlprofil ca. 100mm saniert
	6	B36				
	7	B42				
	8	B48				
Pfeiler I	9	I				
	10	I06				
	11	I12				
	12	I18	Riss in Hohlprofil ca. 70mm saniert	Riss in Hohlprofil ca. 45 mm		
	13	I24	Schweißnaht riss 25mm	gebrochener Anschluss saniert Rissverdacht Hohlprofil ca. 10mm		Riss ca. 15mm
	14	I30				
	15	I36			Knotenblech verbogen	
	16	I42		verdächtiger Lackriss im Knotenblech Knotenblech komplett gerissen		Rissverdacht entlang SN - Oberseite
	17	I48	Endkrater riss Schweißnaht Hohlprofil oben			
	18	I54			Knotenblech verbogen	
	19	I60	Rissverdacht Knotenblech oben			
	20	I66				
Pfeiler II	21	II				
	22	II06				
	23	II12				
	24	II18				Riss in Hohlprofil ca. 120mm saniert Rissverdacht SN ca. 10 mm Oberseite
	25	II24				Riss in Hohlprofil ca. 60mm saniert
	26	II30		Riss Hohlprofil ca. 19mm	Riss ca. 30mm	
	27	II36		Verdacht auf Riss im Hohlprofil ca. 10mm einseitig Riss 39mm (MT-Prüfung)		
	28	II42			gebrochener Anschluss saniert	
	29	II48		Rissverdacht Knotenblech	Rissverdacht Hohlprofil ca. 19mm	
	30	II54	Riss Kehlnaht einseitig und ca. 7mm in Hohlprofil Zuwachs um ca. 10mm		Rissverdacht Hohlprofil ca. 23mm	Riss in Hohlprofil ca. 70mm
	31	II60				
	32	II66				
	33	II60				
	34	II54	Riss in Hohlprofil ca. 85mm saniert			Riss in Hohlprofil ca. 80mm saniert
	35	II48				
	36	II42	Endkrater riss oben			
	37	II36				Riss in Hohlprofil ca. 50mm saniert
	38	II30	Rissverdacht ca. 15mm			
	39	II24				
	40	II18				
	41	II12			rostige Lackrisse + verbogenes Knotenblech	Anrisse in Beschichtung
	42	II06				
Pfeiler III	43	III				
	44	III06				
	45	III12				
	46	III18				Riss in Hohlprofil ca. 50mm saniert leichte Anrisse in Beschichtung
	47	III24		Knotenblech verbogen		Riss in Hohlprofil ca. 25mm saniert
	48	III30	Riss in Hohlprofil ca. 45mm saniert			Riss in Hohlprofil ca. 115mm saniert
	49	III36				
	50	III42				Riss in Hohlprofil ca. 140mm saniert
	51	III48				
	52	III54				
	53	III60				Anriss in Beschichtung Hohlprofil oben
	54	III66				
Pfeiler IV	55	IV				
	56	IV06				
	57	IV12	Verdacht auf Endkrater riss Knotenblech zu Stirnplatte Anriss Schweißnaht Knotenblech zu Stirnplatte ca. 10mm einseitig		Knotenblech verbogen	
	58	IV18	Anriss Schweißnaht Knotenblech zu Stirnplatte ca. 15mm	Rissverdacht SN-Hohlprofil Oberseite		
	59	IV24				Anriss in Beschichtung Knotenblech oben
	60	IV30			Knotenblech verbogen	
	61	IV36	Anriss Schweißnaht Knotenblech zu Stirnplatte gesamt ca. 25mm			Anriss in Beschichtung Knotenblech oben
	62	IV42				
	63	IV48				Anrisse in Beschichtung
Pfeiler V	64	V				
	65	V06	Anriss in Beschichtung Knotenblech oben	Rissverdacht Hohlprofil Unterseite		
	66	V12				Anriss in Beschichtung Knotenblech oben
	67	V18	Riss in Knotenblech ca. 40mm Zuwachs ca. 3mm			Endkrater riss oben 10mm
	68	V24	Anriss über Kehlnaht und Knotenblech	Riss in Knotenblech saniert		Riss in Hohlprofil ca. 55mm saniert
	69	V30				
	70	V36				
	71	V42				
	72	V48				
WLC						

Legende:

- Inspektion 08/2006
- Inspektion 11/2006
- Inspektion 04/2007
- Inspektion 09/2007
- Inspektion 07/2008

Tabelle 38: Übersicht über die Schadstellen an den Querverbänden samt örtlicher und zeitlicher Zuordnung (August 2006 – Juli 2008)

Seit dem vermehrten Auftreten der beschriebenen Ermüdungsschäden an den Anschlussknoten der Diagonalstreben (Sommer 2006) wurden zunächst punktuell gezielte Instandsetzungsarbeiten veranlasst. Dabei wurden am oberen Querverbandsanschluss unterseitig und am unteren Anschluss oberseitig verstärkende Stahllamellen zur Reduktion der Spannungskonzentration im Lasteinleitungsbereich aufgebracht.

Nach der letzten, detaillierten Inspektion (07/2008) der oberen und unteren Anschluss-Knoten an sämtlichen Querverbänden wurden

- zunächst an allen Diagonalen sowohl am oberen Anschluss (unterseitig) als auch am unteren Anschluss (oberseitig) Verstärkungslamellen auf die Hohlprofile aufgeschweißt.
- Gleichzeitig wurden die aufgetretenen Fehlstellen am unteren Querverbandsanschluss der Diagonalen ebenfalls saniert. Hier wurden alle Knotenbleche, welche offensichtlich bereits Risse bzw. Anrisse aufwiesen und solche, bei denen ein a-Maß von 4 mm unterschritten wurde (oder Nähte mit starken Unregelmäßigkeiten vorlagen) saniert. Diese mangelhaften, 2-seitigen Kehlnähte zum Obergurt des Bodenplatten-Querträgers wurden durch durchgeschweißte, verstärkte K-Nähte ersetzt ($a = 5 \text{ mm}$).

Beide Sanierungsmaßnahmen wurden noch vor dem Jahresende 2008 abgeschlossen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Verhalten der Bauteilreihe Diagonalstreben im Zuge einer umfassenden dynamischen Untersuchung für die Bereiche der Brückenrandfelder - und dabei nochmals verstärkt für die Richtungsfahrbahn Innsbruck - als auffällig herausgearbeitet wurde. Dabei sind die oberen Anschlussknoten der Diagonalverbände nochmals hervorzuheben. Letztlich wird deutlich, dass das gesamte Schadensbild insbesondere im Rahmen der nach den Messungen sukzessive durchgeführten visuellen Inspektionen in allen maßgeblichen Details bestätigt wurde. Die vorliegenden Studien (aufbauend auf die Basismessung des Sommers 2006) haben somit maßgeblich zur Beschreibung des Schlüsselproblems beigetragen und letztlich zu einer systematischen und kollektiven Verstärkung aller Querverbände infolge des sich sukzessive aufbauenden Schadensbildes geführt.

10.4 Auswirkungen auf den weiteren Verlauf der Brückenuntersuchungen hinsichtlich Bauteil-Ermüdung

Grundsätzlich hätte erwartet werden können, dass die orthotrope Fahrbahnplatte zwangsläufig jener Bauteil ist, welcher in erster Linie ermüdungsrelevant ist. Zahlreiche Beobachtungsfälle an stählernen Brücken vergleichbaren Alters im hochrangigen Straßennetz weisen ein gemeinsames Schadensmerkmal auf, welches zumeist Risse parallel zu den Längsrippen der Fahrbahnplatte infolge lokaler Rad- bzw. Achsbeanspruchung zeigt. Schäden dieser oder ähnlicher Art an der Fahrbahnplatte sind aber über all die Jahre im Zuge periodischer Brückenkontrollen bzw. visueller Brückenhauptprüfungen niemals aufgetreten.

Wie im vorliegenden **Kapitel 10** bisher ausführlich dargelegt wurde, liegt im Gegensatz dazu an einem anderen Tertiärbauteil aber sehr wohl ein systematisches Ermüdungsproblem vor – nämlich an den Diagonalstreben.

Im Kontext mit den langjährigen Untersuchungen an diesem Brückentragwerk war daher eine Vorgehensweise zur Klärung der Fragestellung zu konzipieren, welches Gefährdungspotential prinzipiell von der realen Beanspruchung am Bauwerk hinsichtlich Ermüdungsschädigung ausgeht bzw. welcher Einfluss damit auf die Lebensdauer der maßgeblichen Bauteile einher geht. Die vorliegende Dissertation liefert dazu im Zuge Ihrer Schwerpunktsetzung die entsprechenden Eingangsgrößen im Sinne der realen Belastungskomponenten.

Wie bereits im **Abschnitt 1.3** dargelegt wurde, sind mehrere wesentliche Komponenten erforderlich, um das reale Belastungsgeschehen infolge Schwerverkehr abzubilden.

Dazu gehören:

- **Das reale Lastkollektiv** für den vorherrschenden Schwerverkehr **in Form von Tonnagen** aus dem Dynamisches Gewichtserfassungssystem **DYGES** (messungsbasierte Wiege- und Zählleinrichtung mittels Beschleunigungssensoren – siehe Kapitel 3 - 5)
- Die Verwertung der **tatsächlich auftretenden Lastbilder**, d.h. der Belastungskonfigurationen und deren **Auftretens-Häufigkeiten** unter Verknüpfung mit der realen Charakteristik der Schwerfahrzeuge (Gesamt-Tonnagen und Häufigkeit - keine Achslasten) - siehe Kapitel 13, 18 und 19
=>
Monitoring-basiertes Lastmodell für den auf der Europabrücke vorherrschenden Schwerverkehr (siehe Kapitel 16 & 17)

Mit dem Wunsch nach einer ganzheitlichen und gleichzeitig möglichst strukturierten Betrachtung aller wesentlichen, ermüdungsrelevanten Einflüsse des Schwerverkehrs wurde vom Autor eine Konzeption zur Analyse dreier maßgeblicher Bauteilebenen entwickelt. Die bereits im **Abschnitt 13**

vorgenommene Reihung im Sinne der Lastabtragung sei an dieser Stelle nochmals in Erinnerung gerufen, da diese auch gleichzeitig die Vorgabe für ein zu konzipierendes Messprogramm darstellt:

- **Bauteilebene I** – Das **Tragverhalten der primären, lastabtragenden Struktur (Haupttragwerk)** in Bezug auf den Schwerverkehr
 - basierend auf Laser-Verformungsmessungen in den Brückenfeldern II & V**siehe Kapitel 13 & 14**

- **Bauteilebene II** – Das **Verhalten der Querrahmen unter besonderer Berücksichtigung der Kragarme**
 - messungsbasierte, permanente dynamische Gewichtserfassung DYGES für die Fahrtrichtung Innsbruck - Messquerschnitt über dem Pfeiler II**siehe Kapitel 3, 13 & 14**

- **Bauteilebene III** – Das **Verhalten der maßgeblichen lokalen Systeme**, d.h. der oberen und unteren **Montageanschlüsse der Diagonal-Streben** an die Fahrbahn- und Bodenplatte
 - Verifizierung der realen Beanspruchung in einem ausgewählten Querverband des Randfeldes V durch Dehnungsmessungen**siehe Kapitel 13 & 14**

Die daraus resultierende Quantifizierung des tatsächlichen Ermüdungspotentials durch analytische Strukturberechnungen unter Verwendung der gemessenen Einwirkungen ist den umfassenden Studien zur Schädigungsberechnung des Autors in [58] zu entnehmen. Die normengestützten Belastungsannahmen werden dort vollständig durch Monitoring-basierte Ansätze ersetzt, d.h. die gemessenen Einwirkungen aus dem Schwerverkehr werden als Belastungs-Lastfälle in entsprechende Finite Elemente Modelle implementiert.

**11 ANHANG 3: PROGRAMMIERTE DYGES-BASISSEQUENZ &
VISUALISIERUNG DER WESENTLICHSTEN ELEMENTE IM
ZUGE DES GENERIERENS DER DYGES-FUNKTION**

DYGES-Originalsequenz (Programmierung FAMOS):

```

; ** Eichfahrten_BRIMOS_D_Europa4.seq **

; *****FBA11 Patsch*****

;Offsetbereinigung
Mean=Mitte(Kanal_11)
Patsch=Kanal_11-Mean
Seteinheit (Patsch,"m",1)
;Vorabglättung und Ausschneiden
PatschGL=Glatt(Patsch,1.0)
Pa=Gren(PatschGL,1.0,329.0)
; ** VORZEICHENELIMINATION**
Quadr=Pa^2
WURZE=(Quadr^0.5)
; **Rescaling via overall calibration**
Dis=WURZE*(-1.0)
; **Envelope-Funktion**
Hülle=Envelope1(Dis,1.8,2,0)
; **Nachabtasten der Envelope-Funktion**
Hüllkurve = XYdt(Hülle.X,Hülle.Y, 0.01)
GHülle=Glatt(Hüllkurve,0.3's')
; **Einziehen einer neuen Referenzebene zuf. unsymm. Signal**
Histo=Histo(GHülle,0.00015,150)
Häuf=gl3(Histo)
Peaky=Max(Häuf)
OffsetNeu = posi(Häuf,Peaky)
DYGES=GHülle-OffsetNeu

; *****FBA11 Patsch15*****

;Offsetbereinigung
Mean15=Mitte(Kanal_12)
Patsch15=Kanal_12-Mean15
Seteinheit (Patsch15,"m",1)
;Vorabglättung und Ausschneiden
Patsch15GL=Glatt(Patsch15,1.0)
Pa15=Gren(Patsch15GL,1.0,329.0)
; ** VORZEICHENELIMINATION**
Quadr15=Pa15^2
WURZE15=(Quadr15^0.5)
; **Rescaling via overall calibration**
Dis15=WURZE15*(-1.0)
; **Envelope-Funktion**
Hülle15=Envelope1(Dis15,1.8,2,0)
; **Nachabtasten der Envelope-Funktion**
Hüllkurve15 = XYdt(Hülle15.X,Hülle15.Y, 0.01)
GHülle15=Glatt(Hüllkurve15,0.3's')
; **Einziehen einer neuen Referenzebene zuf. unsymm. Signal**
Histo15=Histo(GHülle15,0.00015,150)
Häuf15=gl3(Histo15)
Peaky15=Max(Häuf15)
OffsetNeu15 = posi(Häuf15,Peaky15)
DYGES15=GHülle15-OffsetNeu15

```

```
***GRENZWERTBEDINGUNG***
```

```
DYGES_Lge=Lang?(DYGES)
i=1
DYGES_NEU=DYGES
solange i<=DYGES_Lge
  Wenn DYGES_Neu [i] <-0.0100 ;Empirisch basierte Beschränkung hinsichtlich
                               plausibler Ausschlagsintensität auf -0.0100 m
    Schwellenwert=-0.0100
    DYGES_NEU[i]=Schwellenwert
  ende
  i=i+1
ende

DYGES = DYGES_NEU
```

```
;Event - Suche
```

```
DYGES=DYGES*(-1)
DYGES15=DYGES15*(-1)
schwelle = 0.0005
schwelle15 = 0.0005 ;Eine ausführliche, experimentelle Verifizierung der vorliegenden
                    ;Prozedur hat gezeigt, dass der Schwellenwert zum Herauslösen
                    ;tatsächlicher Schwerverkehrs-Überfahrten sowohl bei DYGES als
                    ;auch bei DYGES15 auf 0,5 mm herabzusetzen ist , um
                    ;Unschärfen bei einer konsistenten Schwerverkehrs-
                    ;Klassifizierung zu vermeiden.
```

```
;Erzeugen eines Schwellenwert-bereinigten Datensatzes
```

```
EventS2=SuchePegel(DYGES,2,schwelle,0,0,0,0) ;alle Werte über der Schwelle
EventS2_15=SuchePegel(DYGES15,2,schwelle15,0,0,0,0)
EventS3=Wert(EventS2,xMaxi(EventS2,schwelle)) ;Datensatz der identifizierten relativen Maxima
EventS3_15=Wert(EventS2_15,xMaxi(EventS2_15,schwelle15))
Extrema=Lang?(EventS3)
Extrema_15=Lang?(EventS3_15)
```

*****Identifikation & Herauslösen für der einzelnen Überfahrts-Ereignisse (Sensor Patsch)*****

```
j = 1 ;Startindex Event
x = 49 ;Laufindex Event als Gesamtüberschreitung der Schwelle (ASCII-Code für 1)
Event_x=KmpX(EventS2)
Event_x[lang?(Event_x)] = Event_x[lang?(Event_x)-1] + 1 ;Abbruchkriterium für das File-Ende
```

Solange x <= Extrema + 48 ;Festlegung, wie oft eine Eventabgrenzung durchgeführt wird, ist hier **ASCII-Code-bedingt** nur bis zu Extrema=10 angeführt, tatsächlich können im File natürlich **mehr als 10 Ereignisse** stattfinden.

```
wenn j < lang?(Event_x)
  i = j ;Laufindex Abtastzeit
  Name = Tadd("Event_",Tzeichen(x)) ;Erzeugen einer Variablen namens Event_mit
  Laufindex ;reines Zählkriterium (falls Abtastzeit
  Solange Event_x[j+1]-Event_x[j] < 0.015 unvorhergesehener Weise nicht exakt 0.01)
```

```
  j = j + 1
  ende
```

```
<Name> = gren(EventS2.y,i,j) ;Herausschneiden der eigentlichen Ereignisse in den Grenzen
<Name> = xdel(<Name>,0.01) ;Nachabtasten
```

```
<Name> [lang?(<Name>)] = <Name>[lang?(<Name>)-1] ;beim Nachabtasten entstehen fallweise
eine Instabilitäten auslösende
Minimalsingularität
;=> vorletzter Wert=letzter Wert
```

```
<Name> = xoff(<Name>,Event_x[i]) ;Startwertsynchronisierung
Name1 = Tadd("Event_",Tadd(Tzeichen(x),"_Lge")) ;Längenbestimmung
<Name1> = Lang?(<Name>)
Name2 = Tadd("Event_",Tadd(Tzeichen(x),"_Hoch")) ;Anzahl der Hochpunkte
<Name2> = xMaxi(<Name>,schwelle)
<Name2>=Lang?(<Name2>)
Name3 = Tadd("Event_",Tadd(Tzeichen(x),"_Tief")) ;Anzahl der Tiefpunkte
<Name3>=-<Name>
<Name3> = xMaxi(<Name3>,min(<Name3>)) ;x-Koordinaten der Tiefpunkte
Name4 = Tadd("Event_",Tadd(Tzeichen(x),"Anzahl_Tief"))
<Name4>=Lang?(<Name3>)
```

```
Wenn <Name4>=1
  Startwert=xoff?(<Name>)
  Tiefpunkt1=<Name3>[1]
  Endwert=Startwert+(<Name1>-1)/100
  <Name>_1=gren(<Name>,Startwert,Tiefpunkt1)
  <Name>_2=gren(<Name>,Tiefpunkt1,Endwert)
```

```
  ende
  Wenn <Name4>=2
    Startwert=xoff?(<Name>)
    Tiefpunkt1=<Name3>[1]
    Tiefpunkt2=<Name3>[1+1]
    Endwert=Startwert+(<Name1>-1)/100
    <Name>_1=gren(<Name>,Startwert,Tiefpunkt1)
    <Name>_2=gren(<Name>,Tiefpunkt1,Tiefpunkt2)
    <Name>_3=gren(<Name>,Tiefpunkt2,Endwert)
```

```
  ende
  j = j + 1 ; neuer Laufindex Event=alter Laufindex+1
  ende
  x = x + 1
  ende
```

Eine sog. Einzel-Überfahrt hat keinen Tiefpunkt im Szenario oberhalb der Schwelle (Event_1), nur einen Start- und Endwert !!



Eine sog. Zweifach -Überfahrt hat einen Tiefpunkt im Szenario oberhalb der Schwelle (Event_1_1 & Event_1_2).



...usw. Im Programm zu begrenzen mit 6 Tiefpunkten

```

;*****Identifikation & Herauslösen für der einzelnen Überfahrts-Ereignisse (Sensor Patsch15)*****
j15 = 1
x15 = 49
Event_x_15=KmpX(EventS2_15)
Event_x_15[lang?(Event_x_15)] = Event_x_15[lang?(Event_x_15)-1] + 1
Solange x15 <= Extrema_15 + 48
  wenn j15 < lang?(Event_x_15)
    i15 = j15
    Name_15 = Tadd("Event15_",Tzeichen(x15))
    Solange Event_x_15[j15+1]-Event_x_15[j15] < 0.015
      j15 = j15 + 1
    ende
    <Name_15> = gren(EventS2_15.y,i15,j15)
    <Name_15> = xdel(<Name_15>,0.01)
    <Name_15> [lang?(<Name_15>)] = <Name_15>[lang?(<Name_15>)-1]
    <Name_15> = xoff(<Name_15>,Event_x_15[i15])
    Name1_15 = Tadd("Event15_",Tadd(Tzeichen(x15),"_Lge"))
    <Name1_15> = Lang?(<Name_15>)
    Name2_15 = Tadd("Event15_",Tadd(Tzeichen(x15),"_Hoch"))
    <Name2_15> = xMaxi(<Name_15>,schwelle15)
    <Name2_15>=Lang?(<Name2_15>)
    Name3_15 = Tadd("Event15_",Tadd(Tzeichen(x15),"_Tief"))
    <Name3_15>=-<Name_15>
    <Name3_15> = xMaxi(<Name3_15>,min(<Name3_15>))
    Name4_15 = Tadd("Event15_",Tadd(Tzeichen(x15),"Anzahl_Tief"))
    <Name4_15>=Lang?(<Name3_15>)
    Wenn <Name4_15>=1
      Startwert_15=xoff?(<Name_15>)
      Tiefpunkt1_15=<Name3_15>[1]
      Endwert_15=Startwert_15+(<Name1_15>-1)/100
      <Name_15>_1=gren(<Name_15>,Startwert_15,Tiefpunkt1_15)
      <Name_15>_2=gren(<Name_15>,Tiefpunkt1_15,Endwert_15)
    ende
    Wenn <Name4_15>=2
      Startwert_15=xoff?(<Name_15>)
      Tiefpunkt1_15=<Name3_15>[1]
      Tiefpunkt2_15=<Name3_15>[1+1]
      Endwert_15=Startwert_15+(<Name1_15>-1)/100
      <Name_15>_1=gren(<Name_15>,Startwert_15,Tiefpunkt1_15)
      <Name_15>_2=gren(<Name_15>,Tiefpunkt1_15,Tiefpunkt2_15)
      <Name_15>_3=gren(<Name_15>,Tiefpunkt2_15,Endwert_15)
    ende
  j15 = j15 + 1
ende
x15 = x15 + 1
ende

```

Aus der ursprünglichen Verlaufsfunktion

DYGES

wird mit Hilfe der Schwellenwert-bereinigten Hilfsfunktionen

EventS und EventS_15

d.h. die letztlich maßgebliche Verlaufsfunktion

DYGES_kal

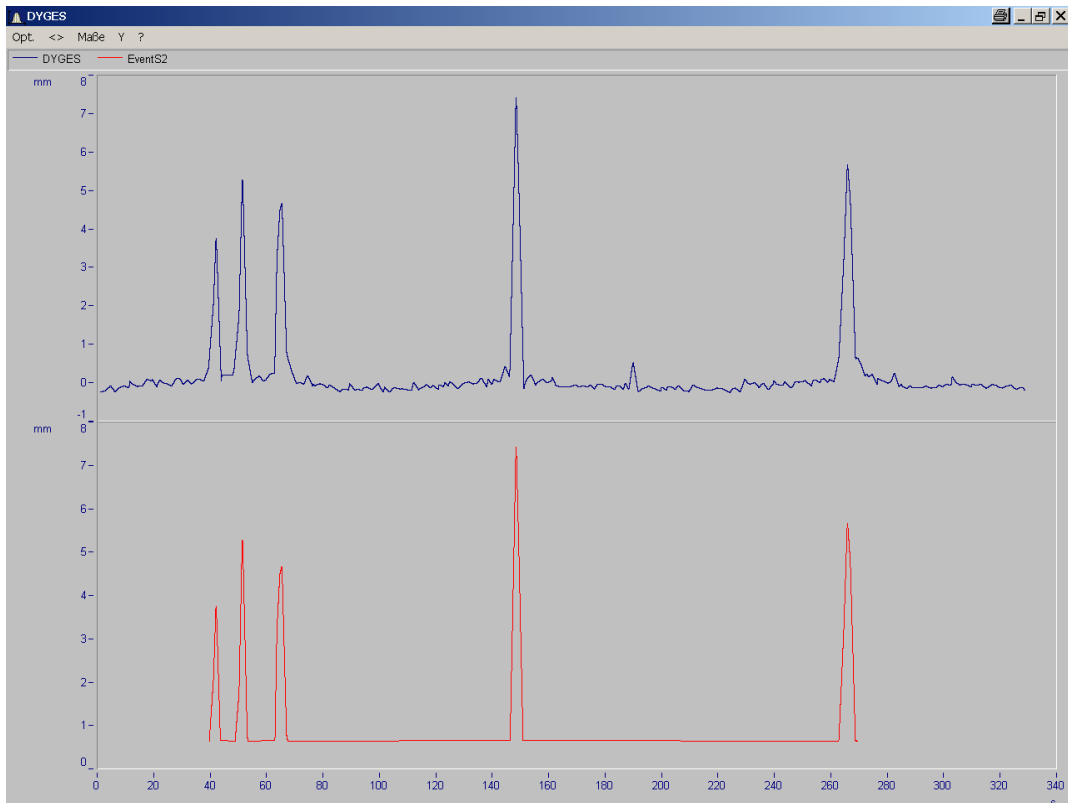
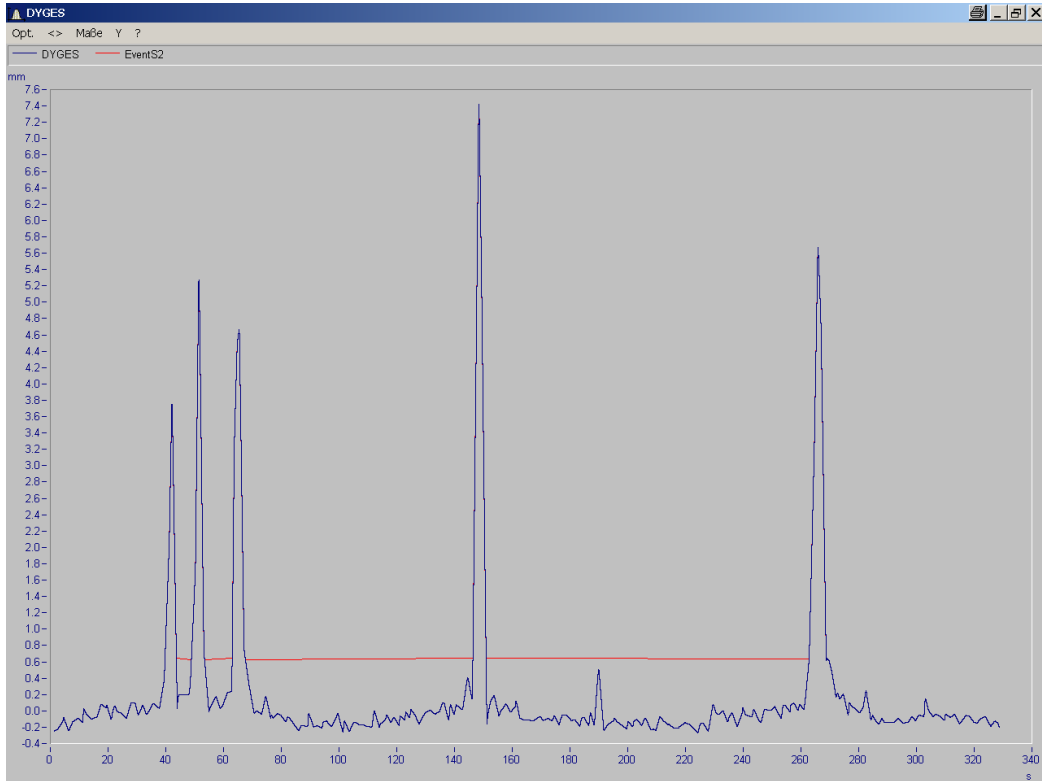
erzeugt.

Visualisierung & Detaillierung des Prozesses zur Schwerverkehrs-Klassifizierung

DYGES

=>

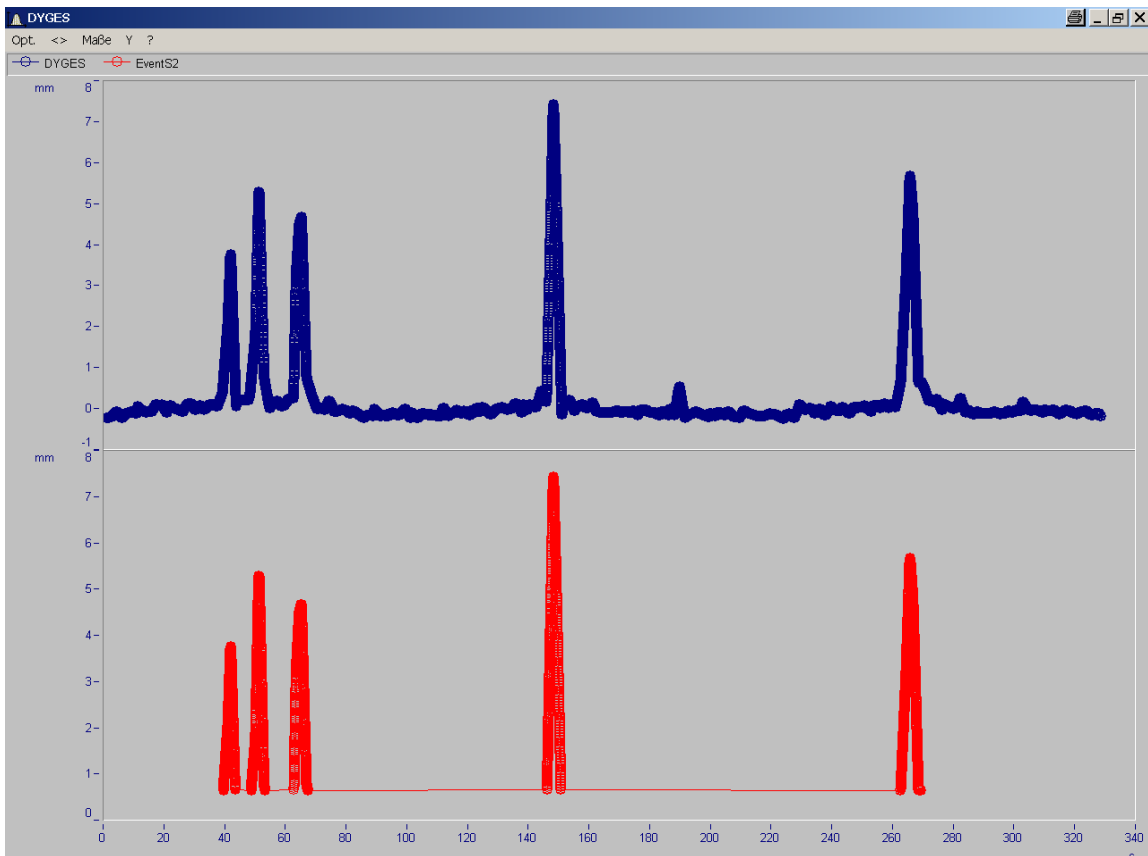
EventS2 (D050518211155_11.dat)



DYGES

=>

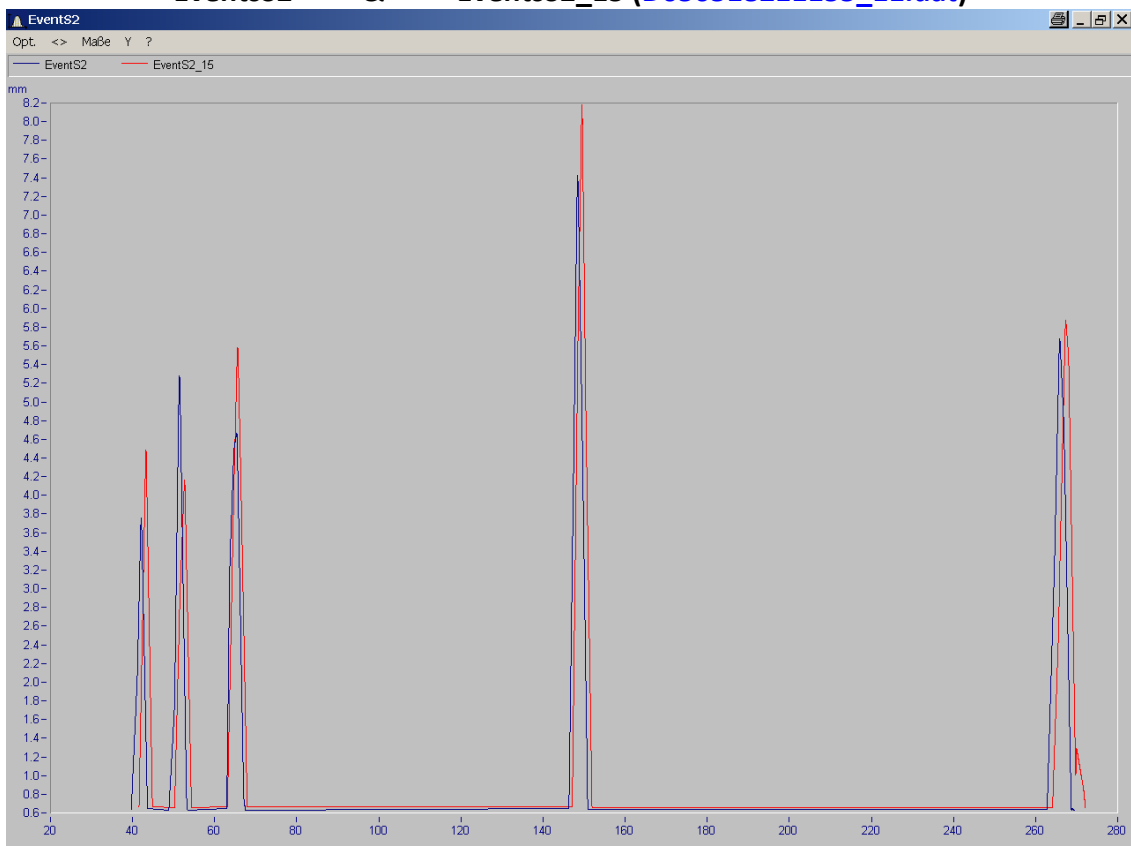
EventS2 (D050518211155_11.dat)



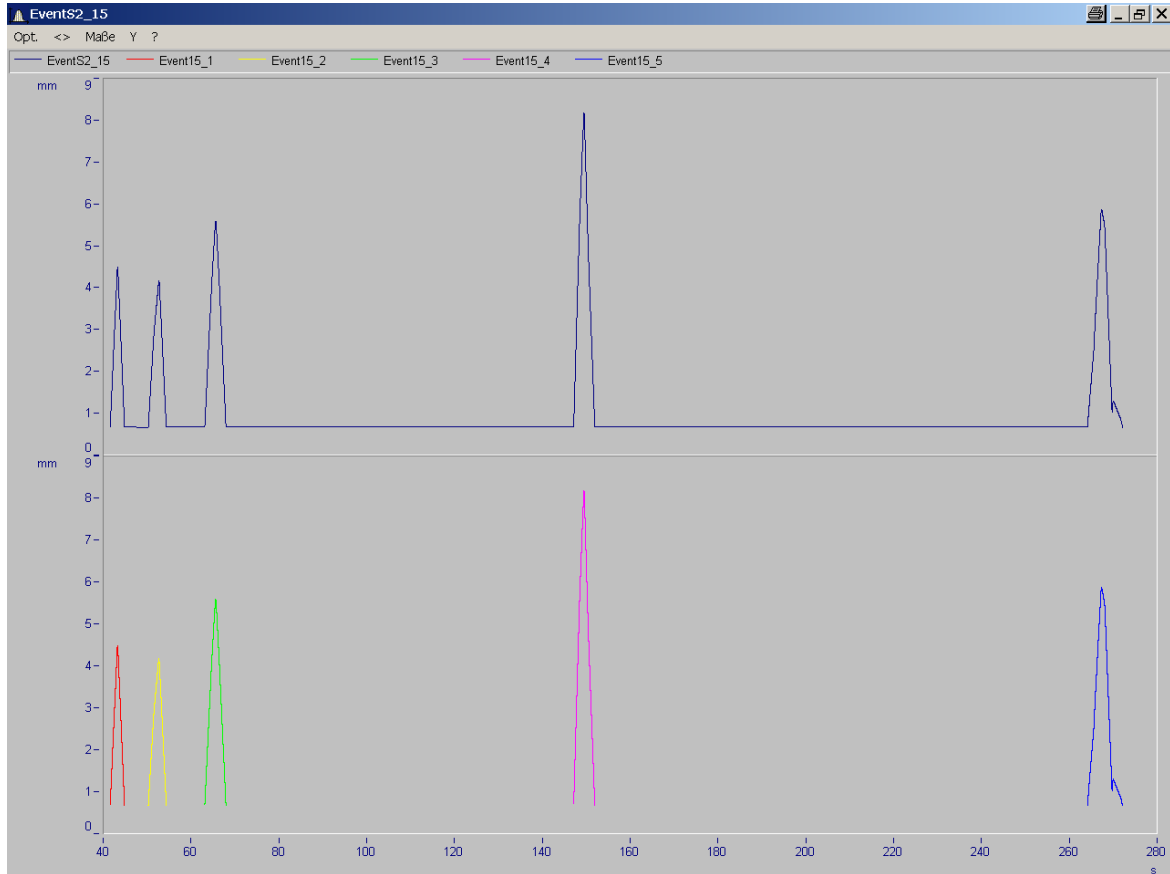
EventsS2

&

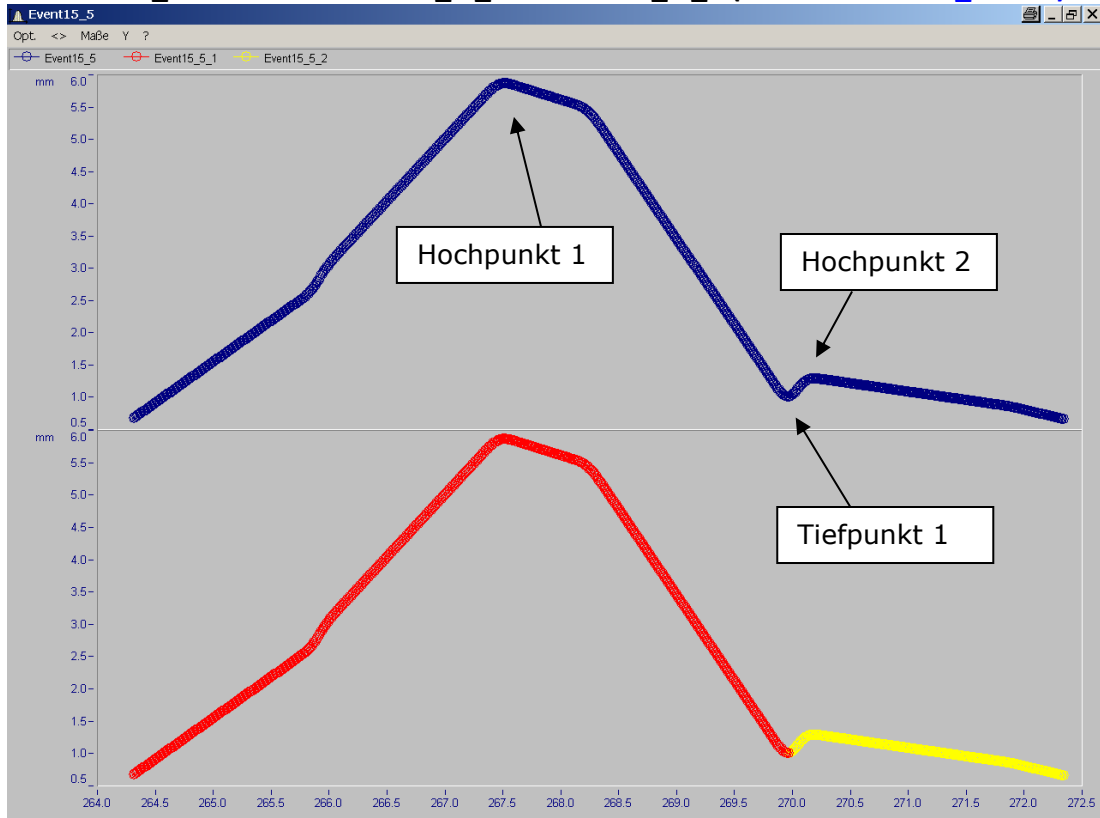
EventsS2_15 (D050518211155_11.dat)



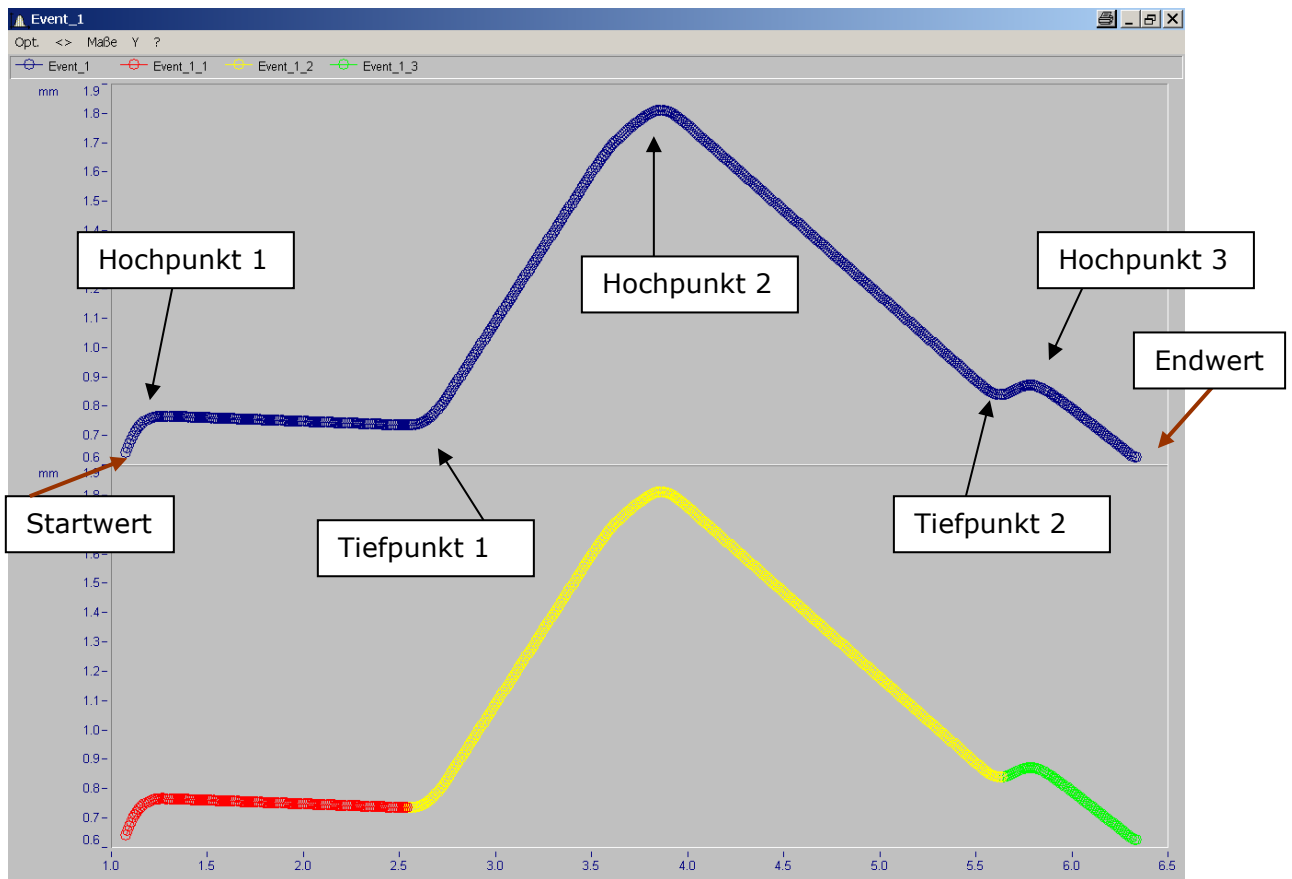
EventS2_15 => Event15_1 & Event15_2 & Event15_3 & Event15_4 & Event15_5
(D050518211155_11.dat)



Event15_5 => Event15_5_1 & Event15_5_2 (D050518211155_11.dat)



Event_1 => Event_1_1 & Event_1_2 & Event_1_3
(D050518225638_11.dat)



STABILISIERUNGSMECHANISMEN, die im Zuge der Umsetzung von FAMOS in C++ zusätzlich zu berücksichtigen waren:

I) Ein Überfahrtereignis in EventS2 wird in EventS2_15 nicht bestätigt

=> Ereignis im EventS2-Signal unskaliert belassen

Für eine Schwerfahrzeug-Klassifizierung ist dies ohne Bedeutung, da ein solches Ereignis dann nicht erfasst wird.

Im reproduzierten Kragarm-Verschiebungsverlauf über die Zeit bleibt ein solches Ereignis aber erhalten (auf der sicheren Seite).

Ein Nicht-Bestätigen eines von EventS2 registrierten Ereignisses in EventS2_15 äußert sich bei sog. Mehrfachüberfahrten (Fahrzeug-Kolonnen) insbesondere dadurch, dass das nächste Ereignis in EventS2 zeitlich schon früher da ist, als eine Bestätigung in EventS2_15.

II) Falls Reihenfolge verletzt (Ereignis in EventS2_15 vor EventS2)

=> Ereignis im EventS2-Signal unskaliert belassen => programmiertechnisch eigentlich gleich wie Punkt I behandelt, da man die Event-Erkennung & die Event-Skalierung ja vordergründig auf Merkmale im Signal-EventS2 stützt.

Da die Prozedur also konsequent am Kanal „MQ3_KragPatsch_FBA“ angelehnt wird, führt dies zwangsläufig dazu, dass alle Ereignisse, die „voausreilen“ in EventS2 unbestätigt bleiben.

In beiden Fällen war noch ein sog. „Einfangkriterium“ zu definieren, bis wann ein wieder erkanntes Ereignis von EventS2_15 noch jenem in EventS2 zugeordnet werden kann:

- Zeitspanne: $(\text{Abstand}) / (10 \text{ km/h}) = 15 \text{ m} / 2,778 \text{ m/s} = \mathbf{5,4 \text{ sec}}$

III)

a) Differenz im Amplitudenbetrag zwischen einzelnen Hoch und Tiefpunkten ($H_i - T_i$) **muss zumindest dem Betrag von Δu_{\min} ausmachen.**

Eine ausführliche, experimentelle Verifizierung der vorgestellten Prozedur hat gezeigt, dass erst eine Begrenzung des Amplitudenbetrages mit 0,25 mm zu einer stabilen und korrekten Geschwindigkeitserfassung und -klassifizierung führt, d.h.

0,00025 bei EventS2 und 0,00025 bei EventS_15

b) Ein weiteres sog. „Einfangkriterium“, ab wann ein wieder erkanntes Ereignis von EventS2_15 bereits jenem in EventS2 zugeordnet werden kann:

Spitzen dürfen nicht näher als

$(\text{Abstand}) / (90 \text{ km/h}) = 15 \text{ m} / 25 \text{ m/s} = \mathbf{0,600 \text{ sec}}$ beisammen liegen.

Obwohl auf der Europabrücke selbst ein allgemeines Tempolimit für den Schwerverkehr von 40 km/h gilt, hat eine ausführliche, experimentelle Verifizierung der vorgestellten Prozedur verdeutlicht, dass die Charakteristik der Schwerverkehrs insbesondere während der Nachtstunden die Notwendigkeit eines derartig deutlichen Heraufsetzens dieser Temposchwelle erfordert, um Unschärfen bei einer konsistenten Schwerverkehrs-Klassifizierung zu vermeiden.

c) Eine ausführliche, experimentelle Verifizierung der vorgestellten Prozedur hat gezeigt, dass Amplituden infolge Schwerverkehrs-Überfahrten einander zugeordnet werden, solange der Faktor 2 zwischen EventS2 und EventS2_15 nicht überschritten wird (Eine Folge der sich im Laufe der Zeit eingestellten, unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich der Beträge der Amplituden-Ausschläge bei den beiden 1D-Kragarmbeschleunigungssensoren).

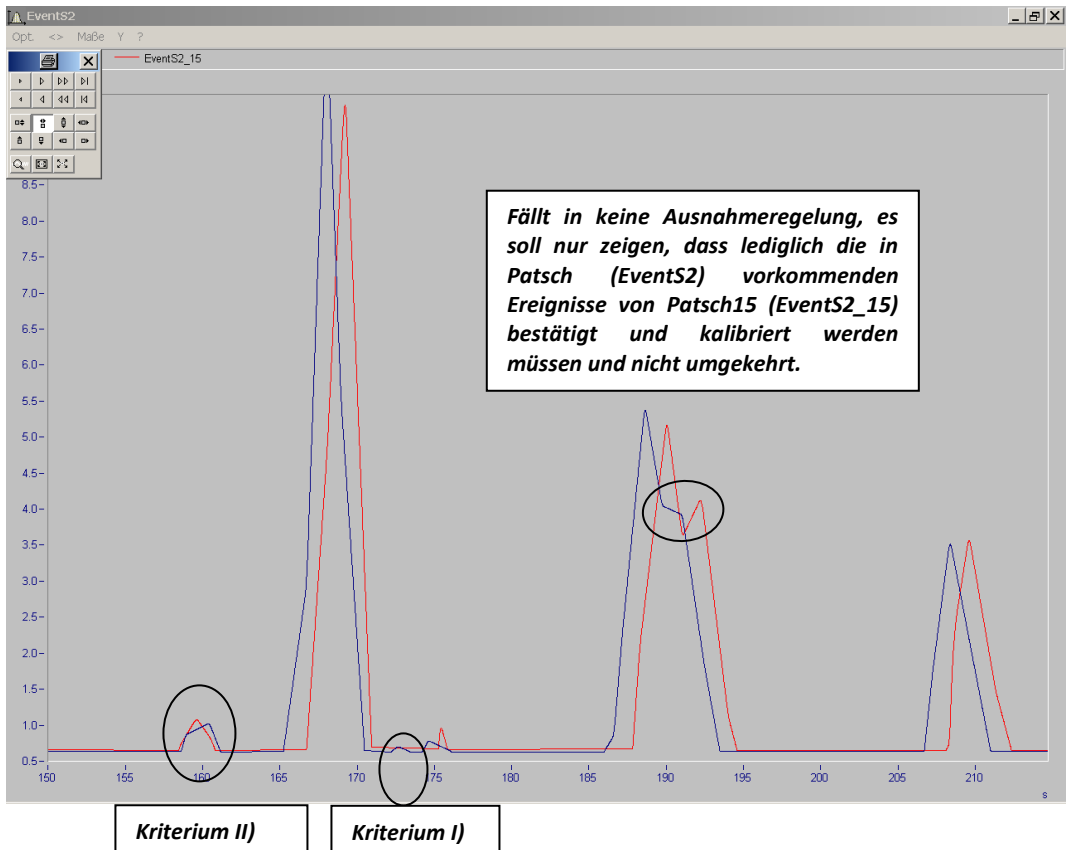
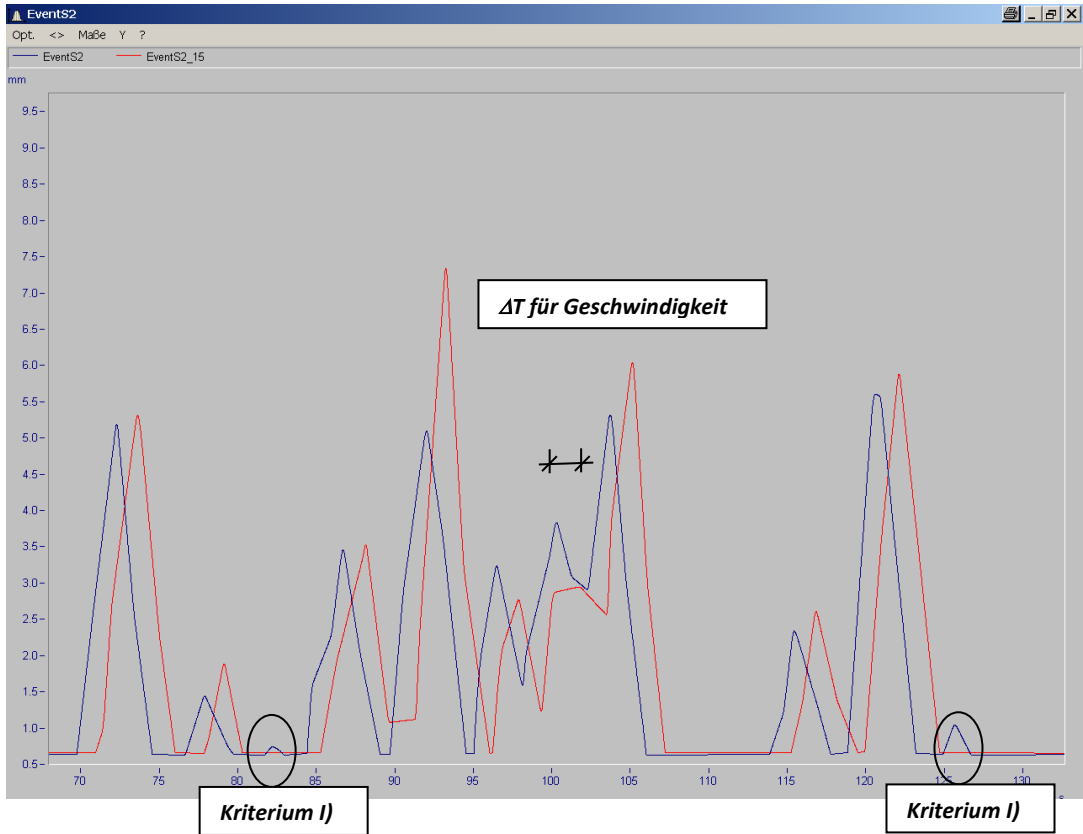
IV) Einzelne „Hacker“ (Kriterium $H_i - T_i < \Delta u_{\min}$), die mitten im Ereignis auftauchen, ignorieren und mit dem Gesamt ereignis mitskalieren !! (Konsequenz aus Punkt III)

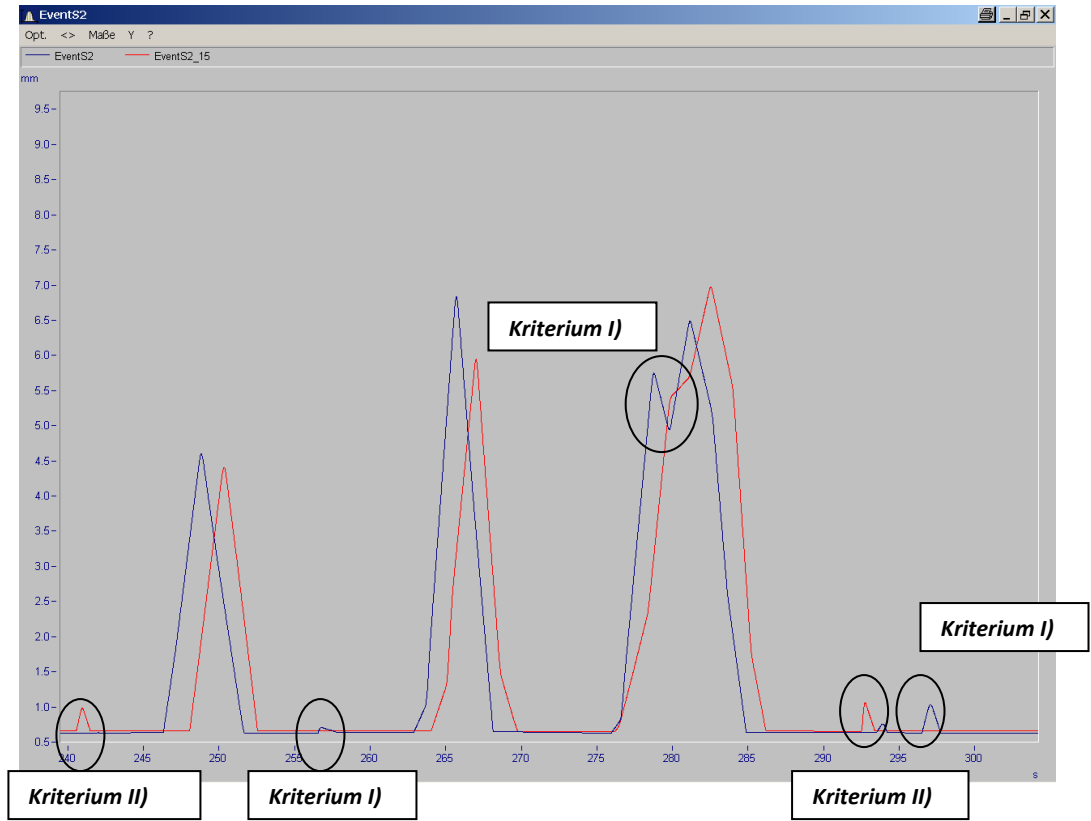


Für alle 4 bisher formulierten Ausnahmekriterien fällt auf, dass sich die Notwendigkeit zu deren Anwendung nur bei kleinen, offensichtlich eher unbedeutenden Szenarien ergibt. Umso mehr ist hervorzuheben, dass im Rahmen der vorliegenden Mustererkennungs- und Kalibrierungsprozedur die überwiegende Zahl an Schwerverkehrsüberfahrten eindeutig ist und diese daher problemlos gehandhabt werden können.

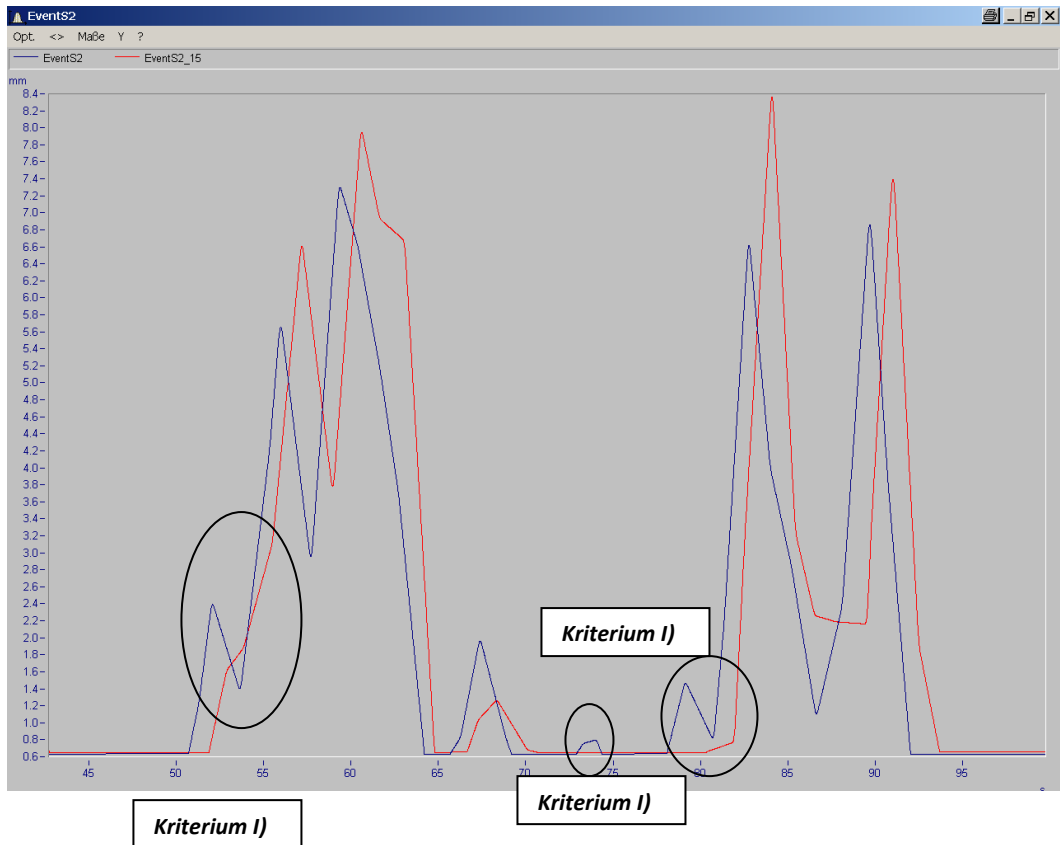
Die nachfolgenden Bilder visualisieren die beschriebenen Kriterien. Die große Fülle an Beispielen dient lediglich dem Verständnis – tatsächlich wiederholen sich viele Phänomene und zu berücksichtigende Ausnahmefälle im Laufe dieser Bilder. Nicht jedes auftretende Aufnahmekriterium wird in den folgenden Bildern jedes Mal beschriftet, sondern es werden jeweils die interessanten Fälle hervorgehoben.

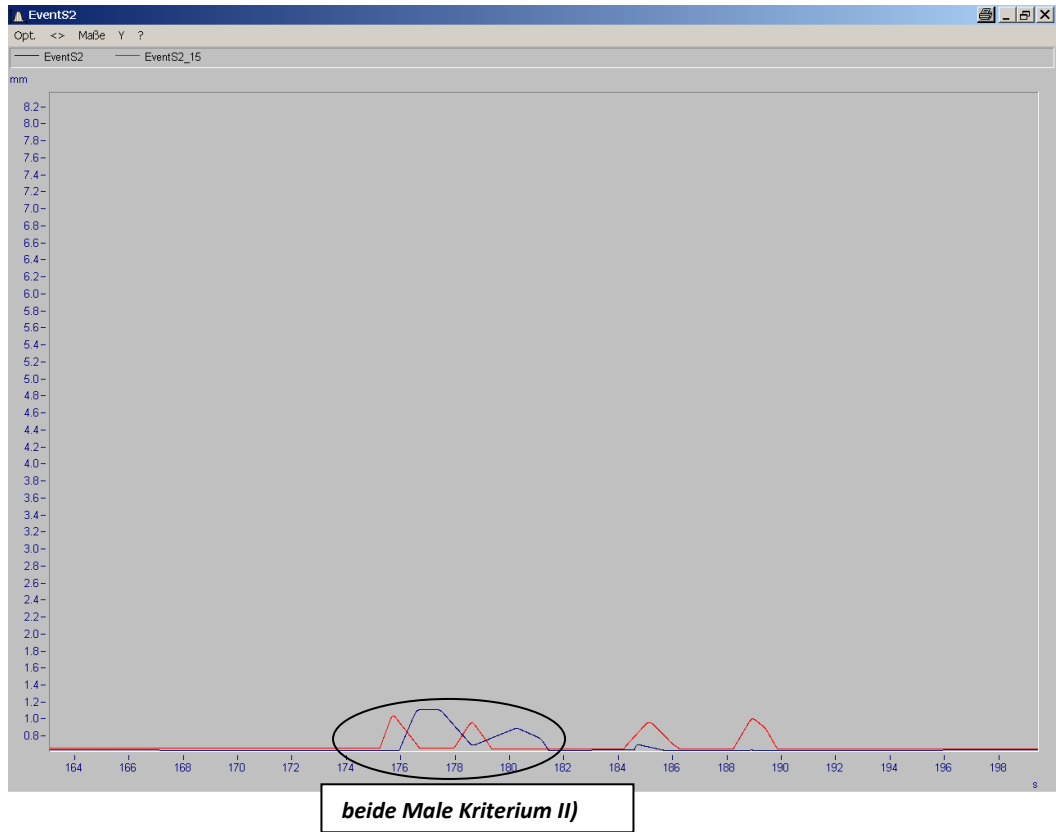
(D050518172556.dat)



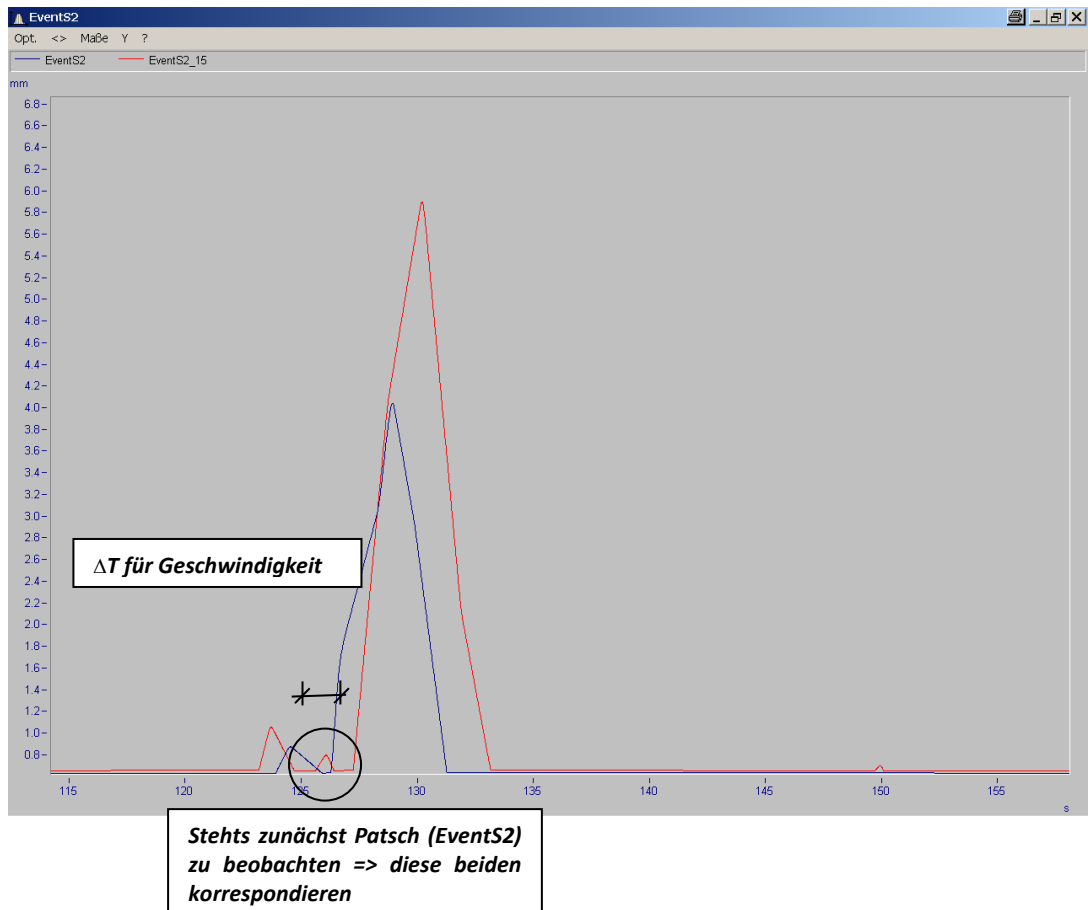


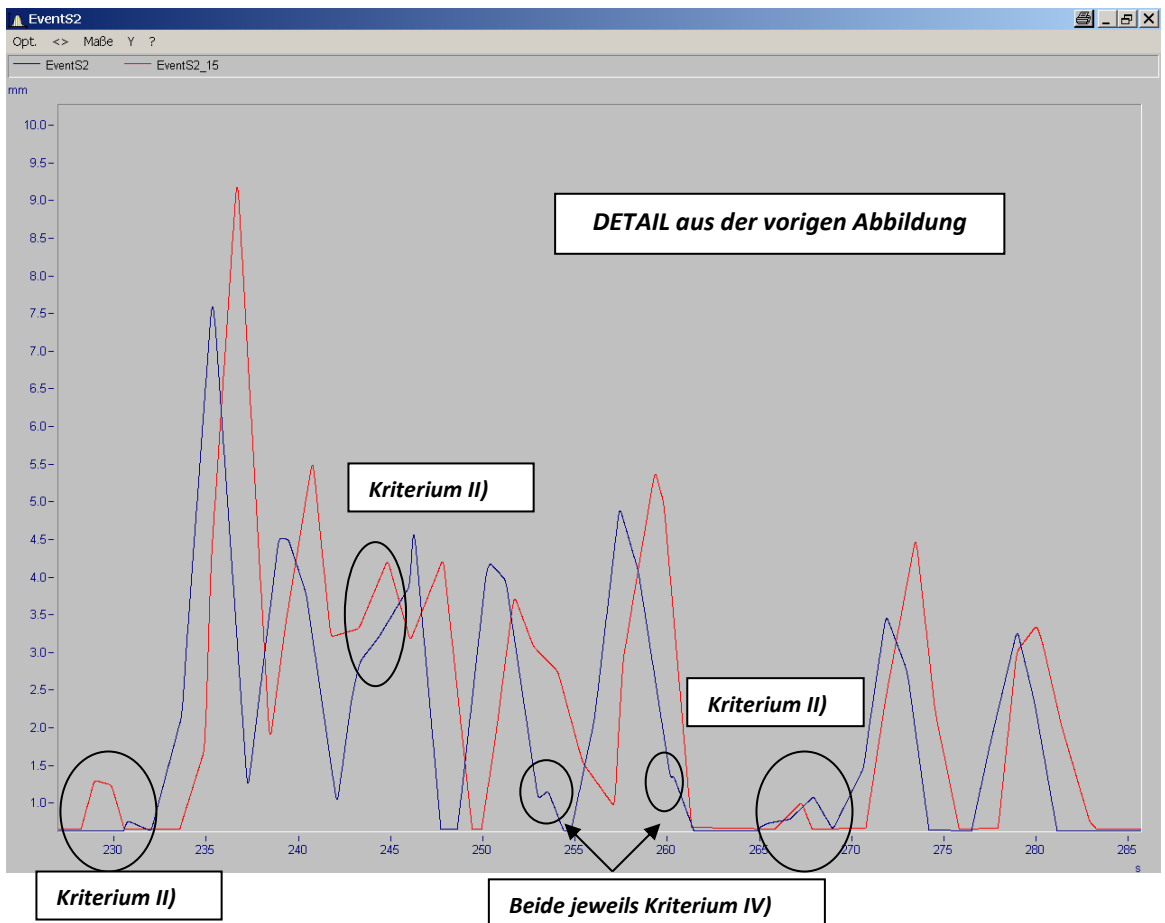
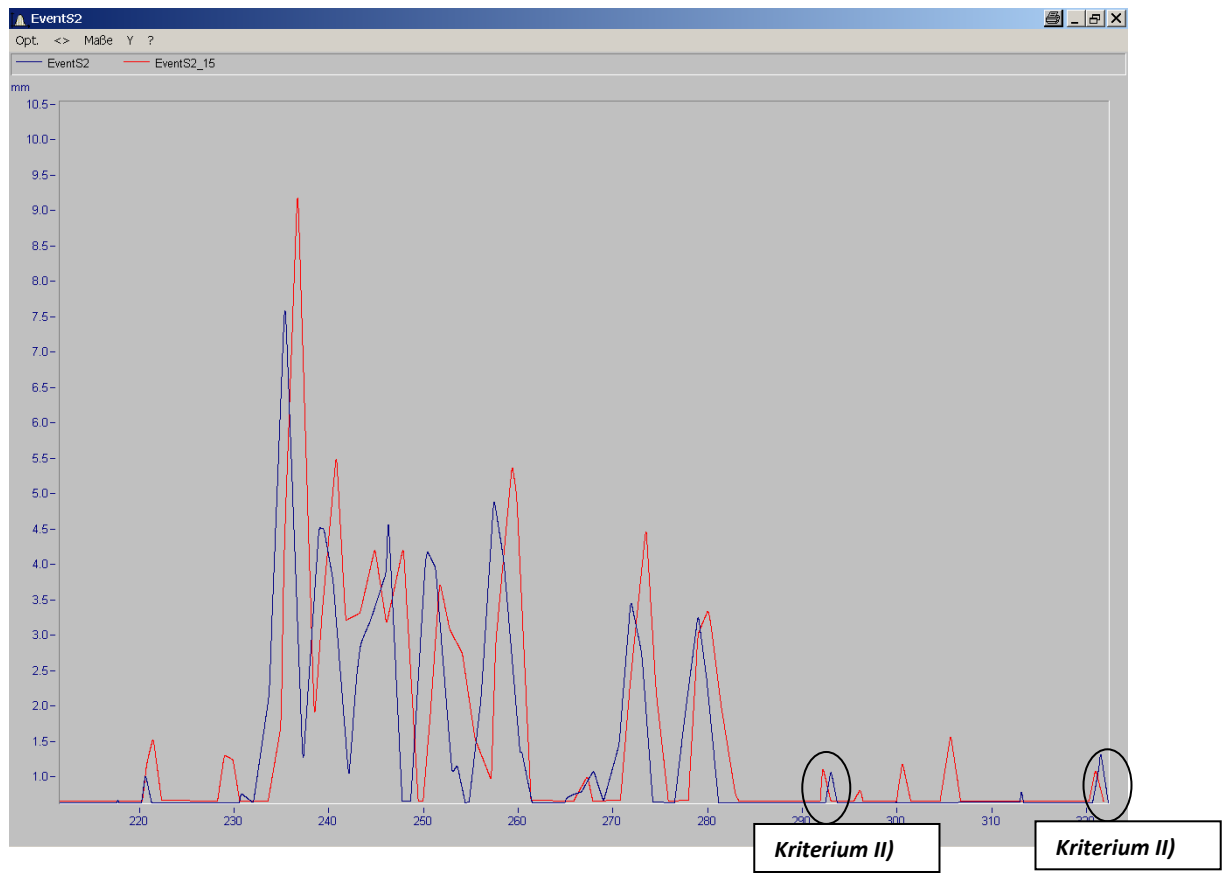
(D050518165251.dat)



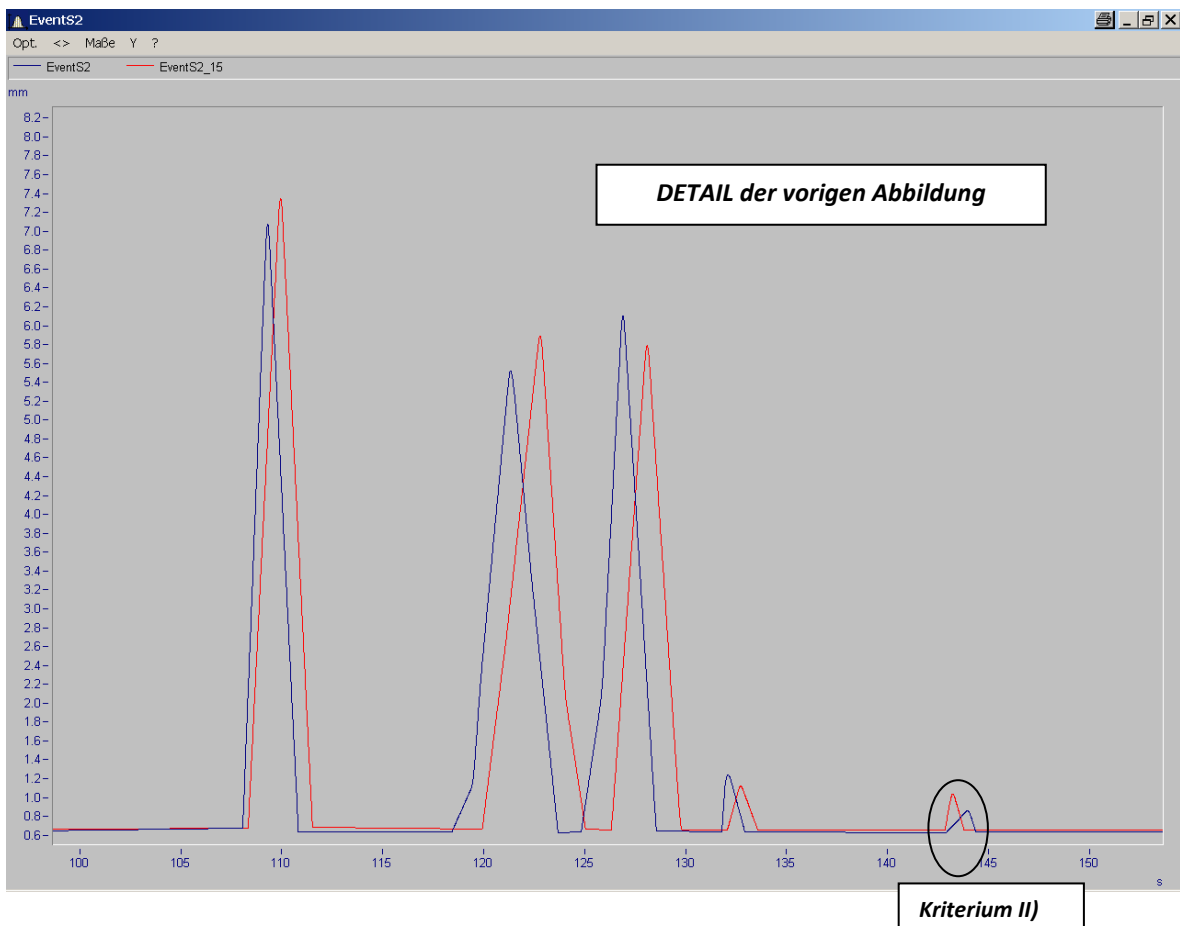
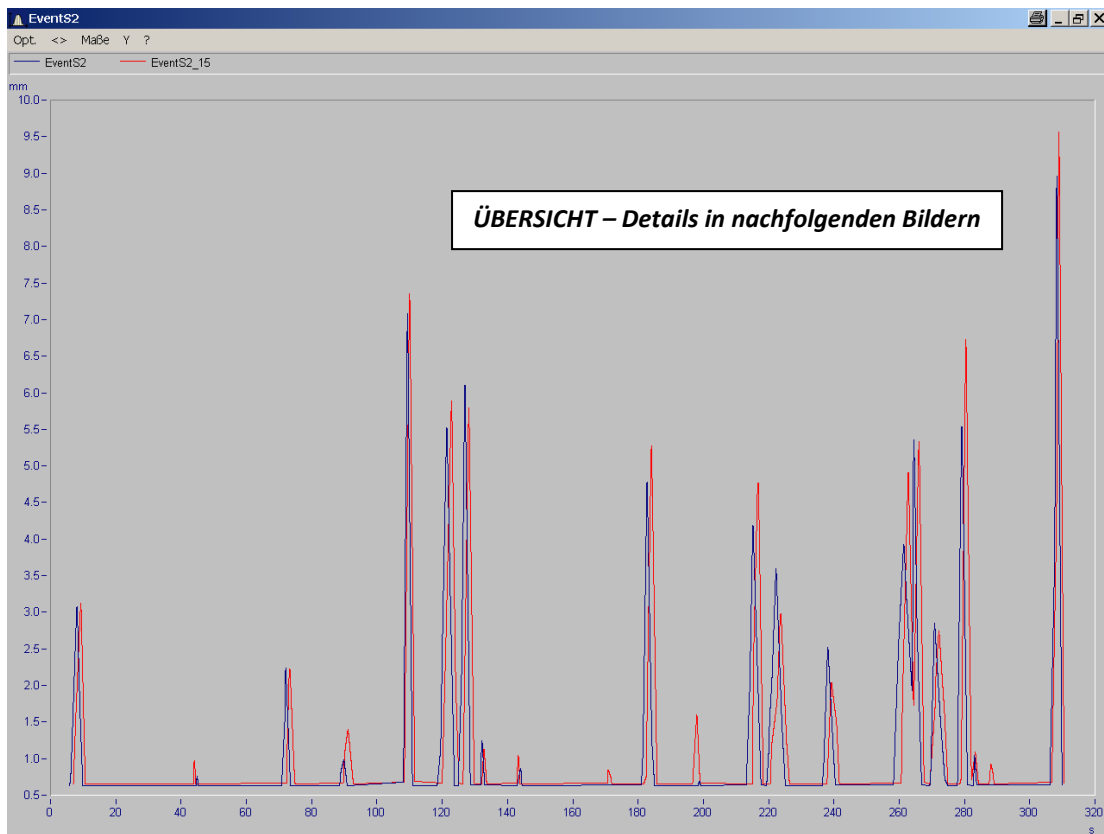


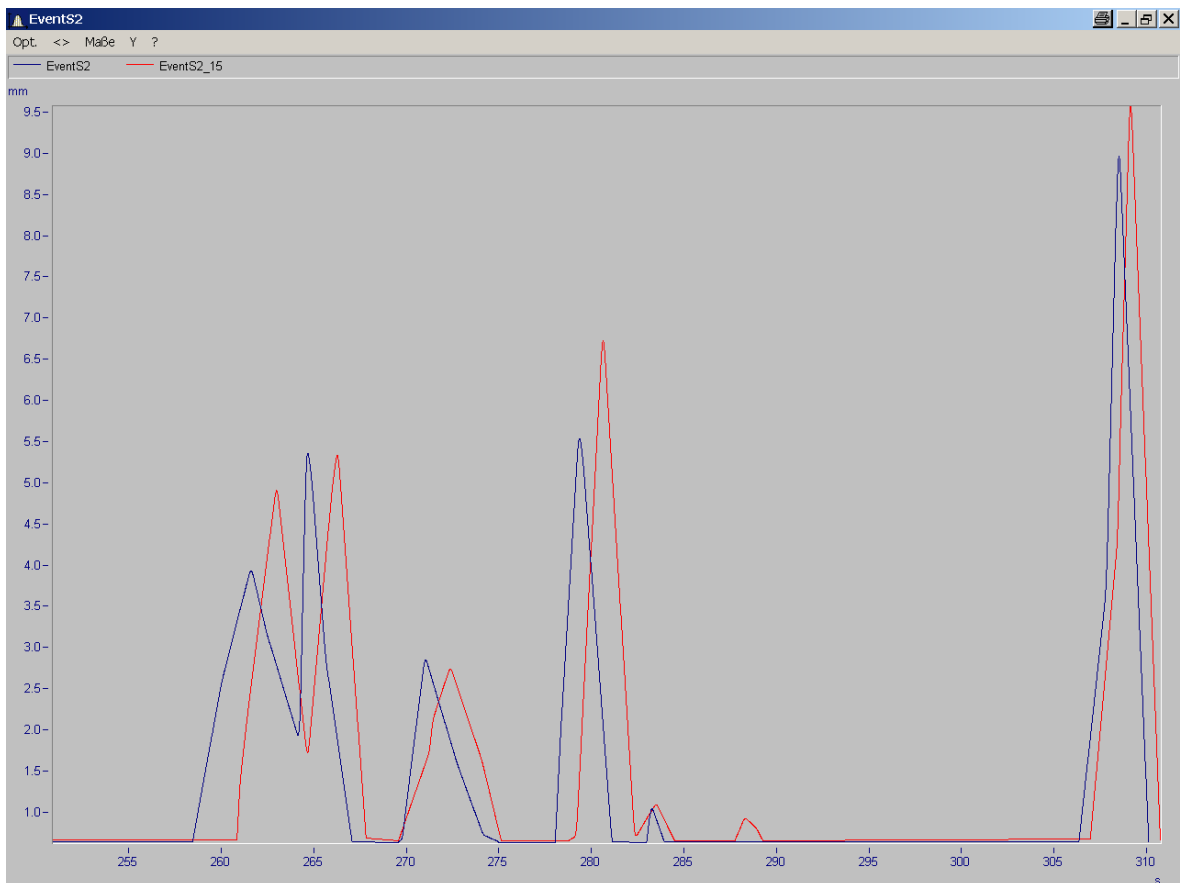
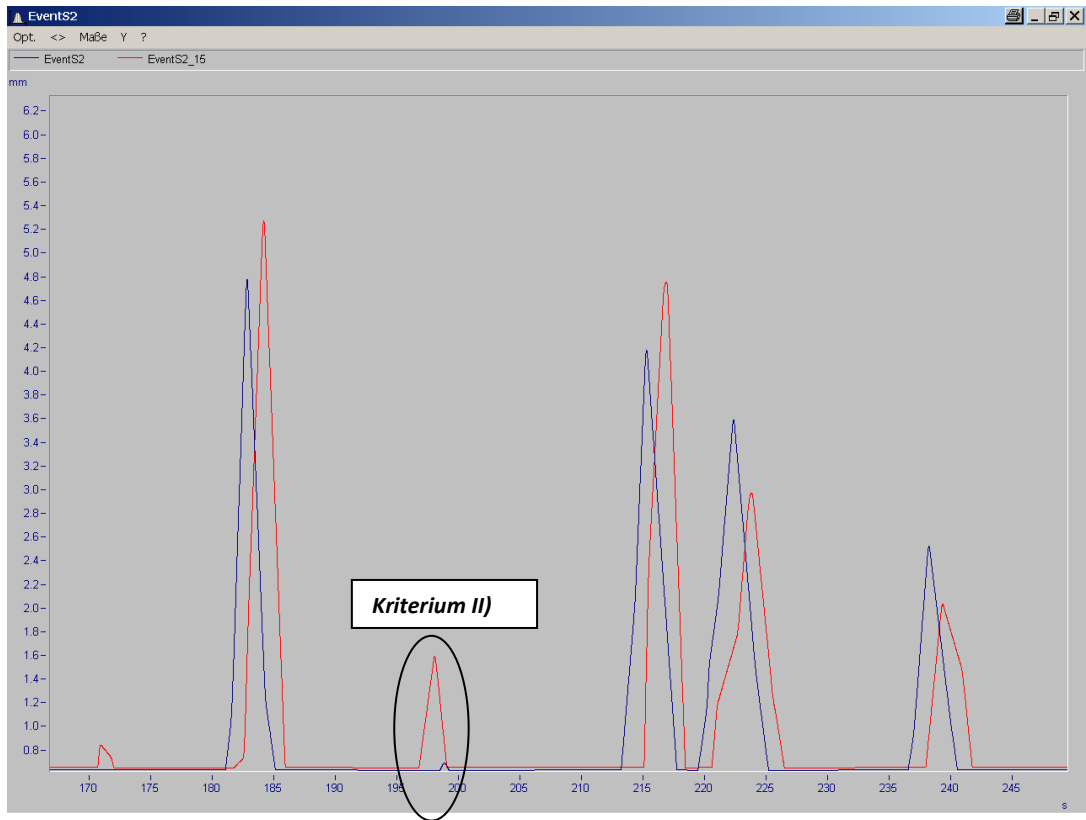
(D050518151909.dat)



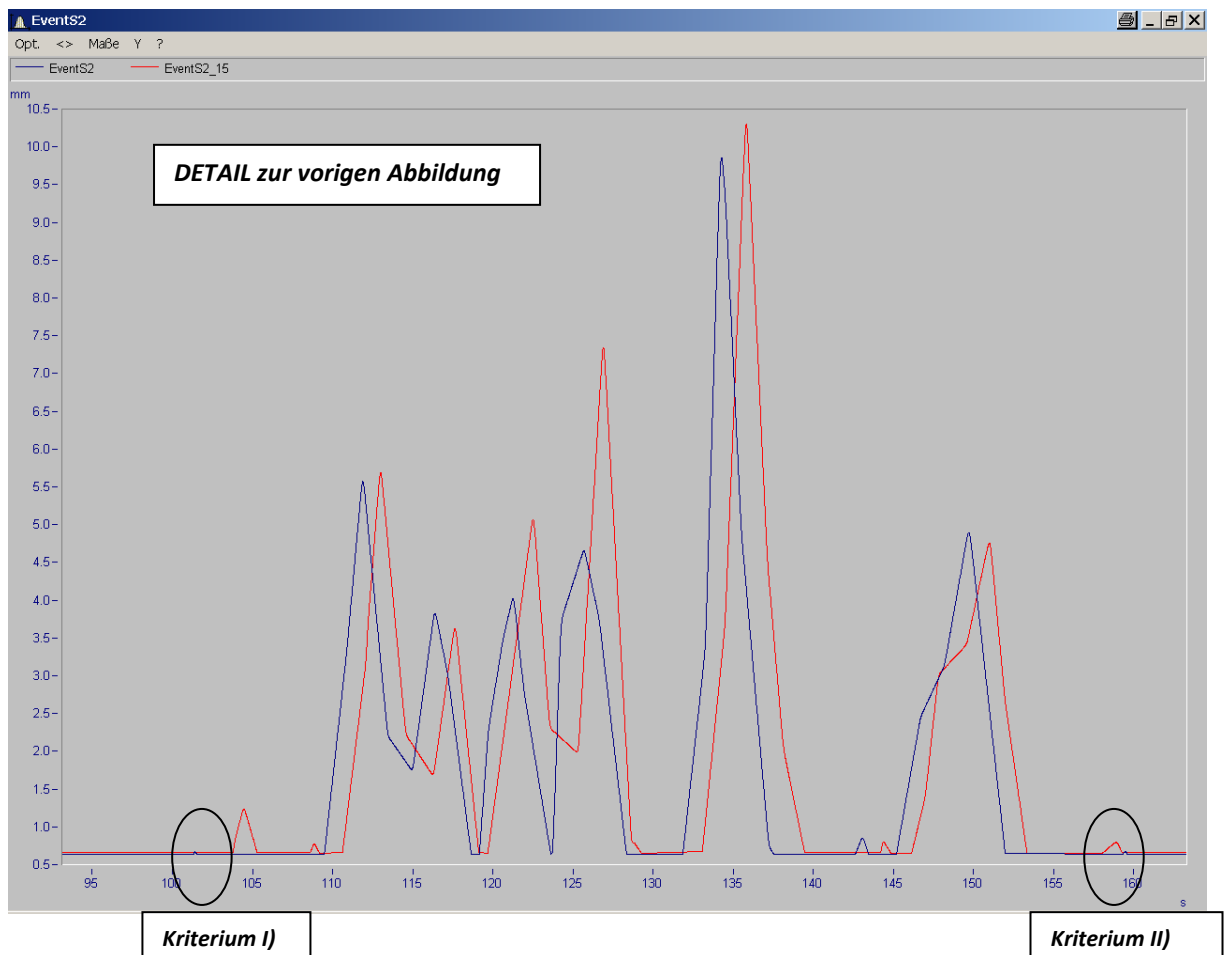
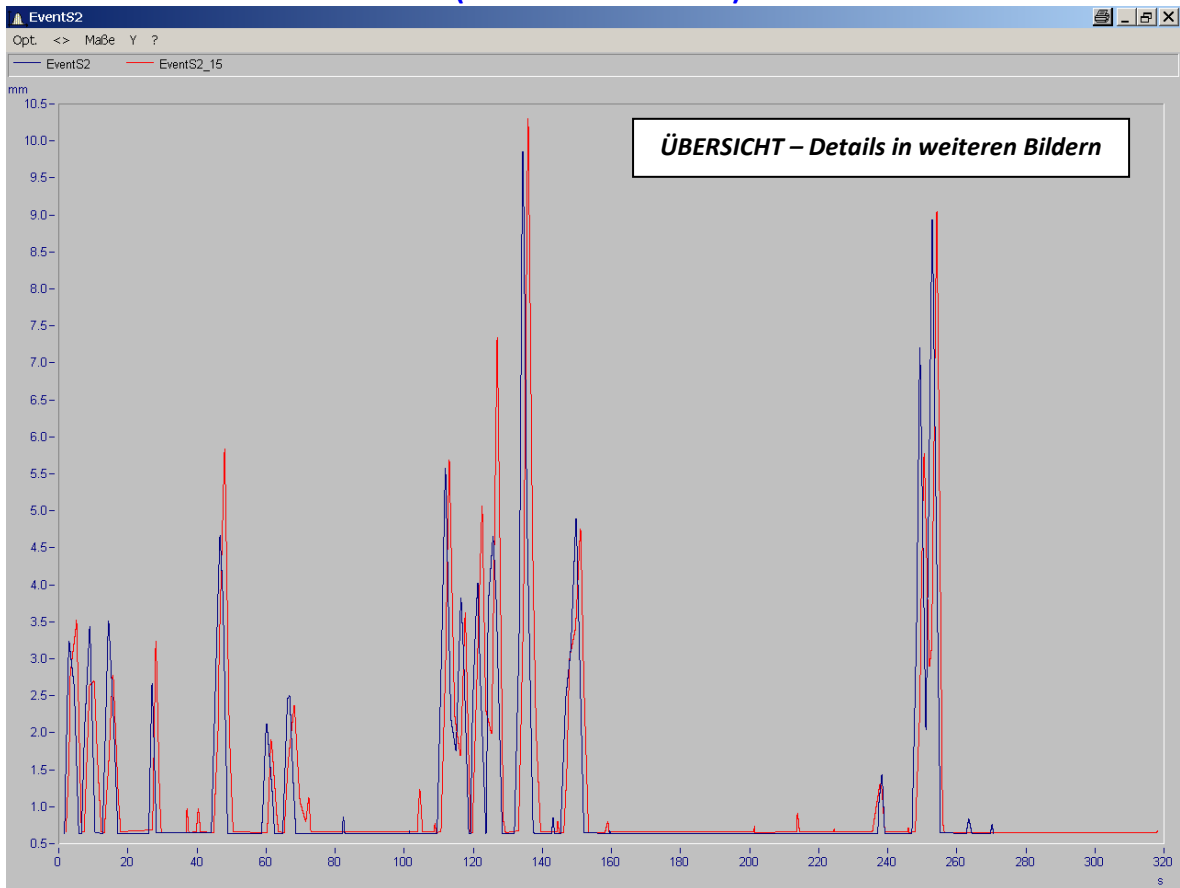


(D050518085850.dat)

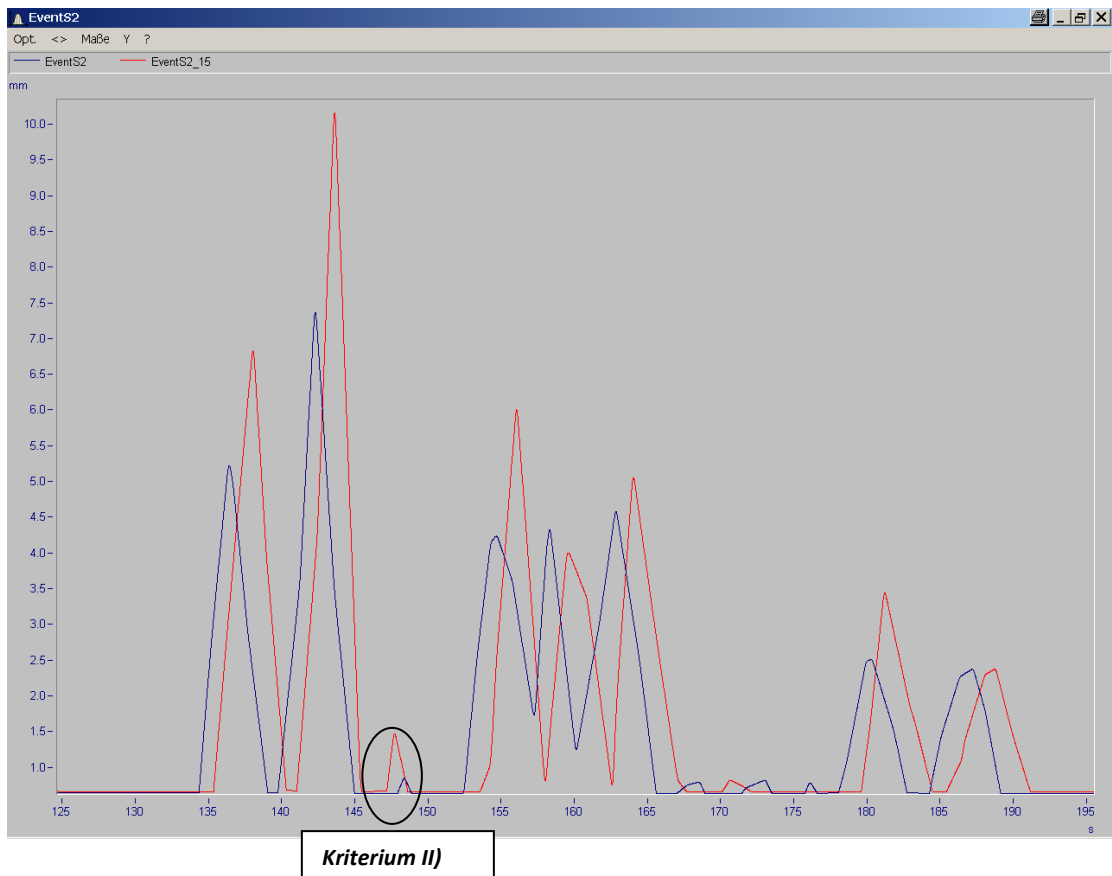
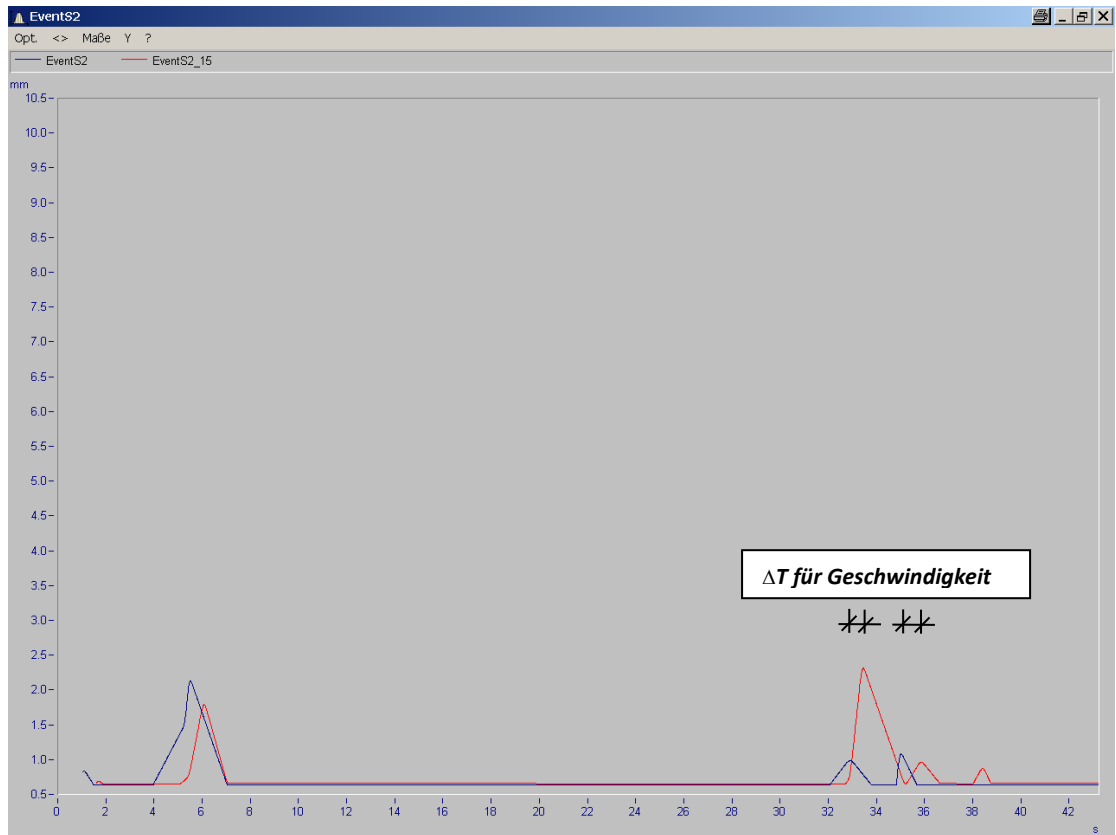




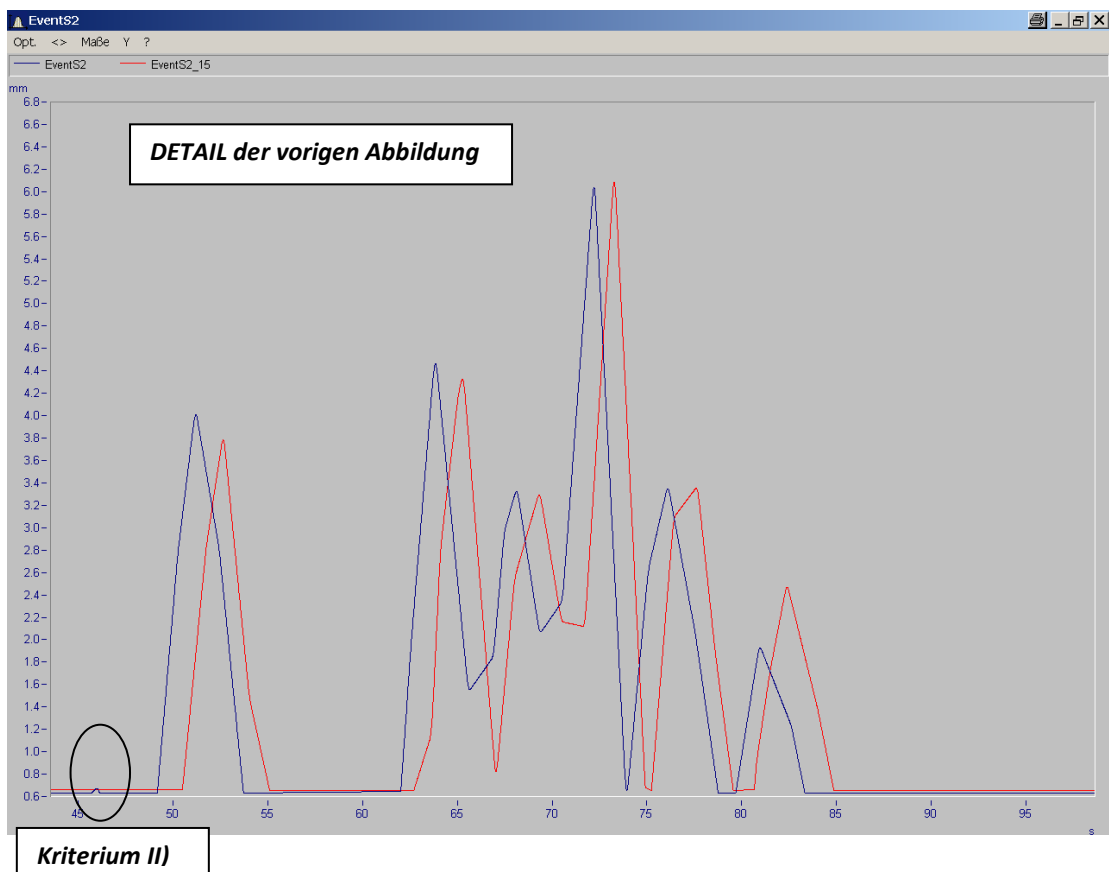
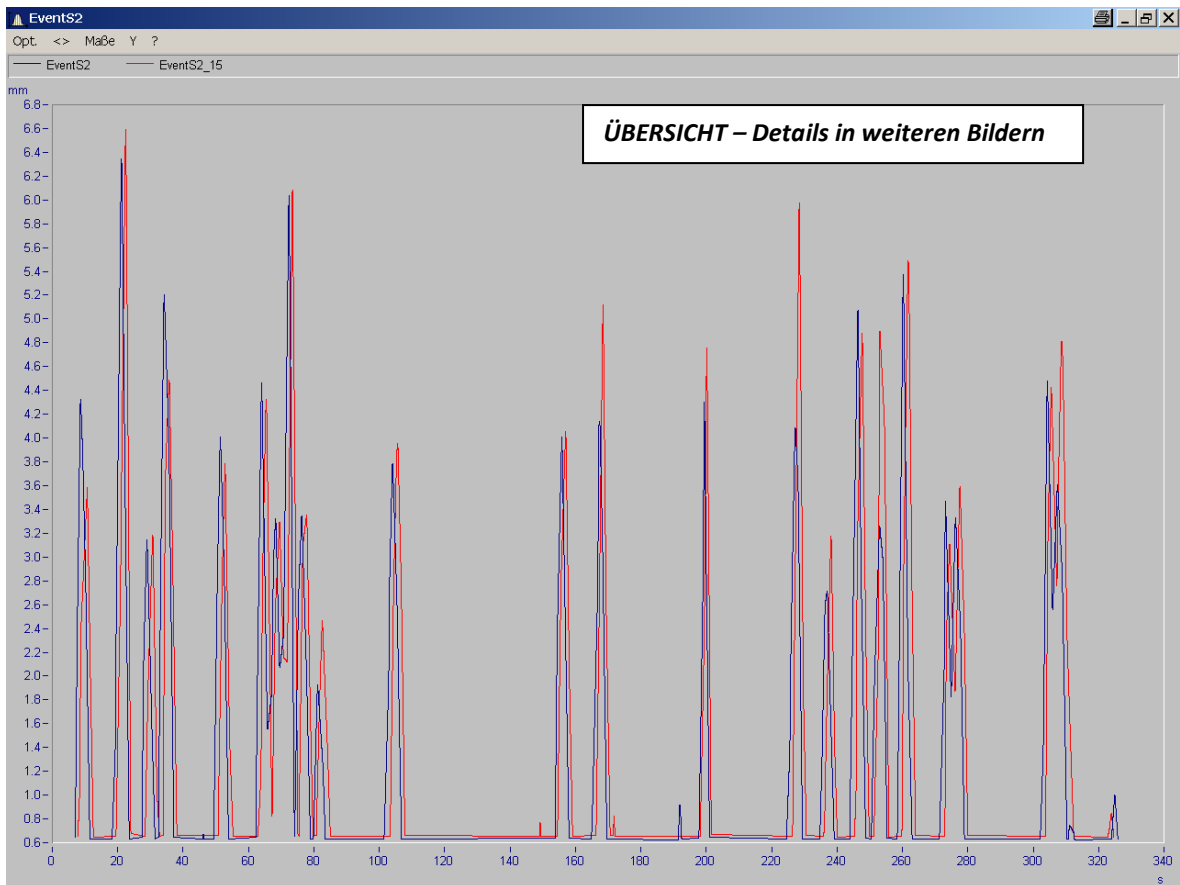
(D050518094255.dat)



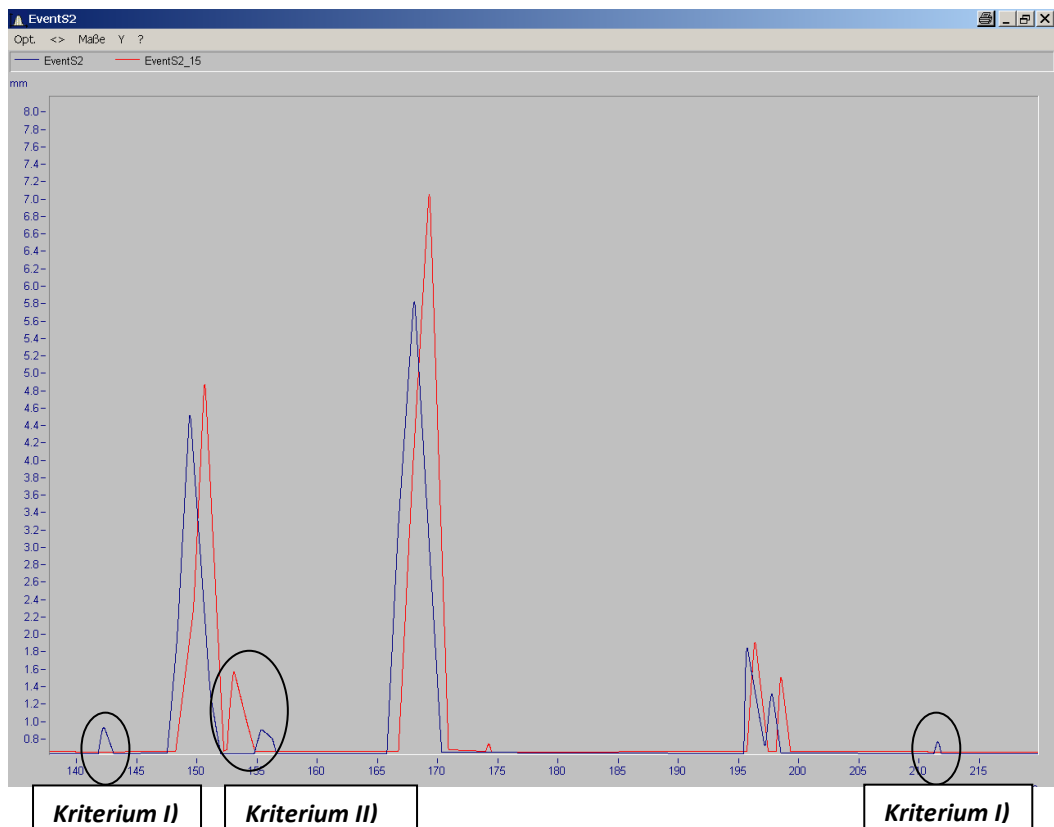
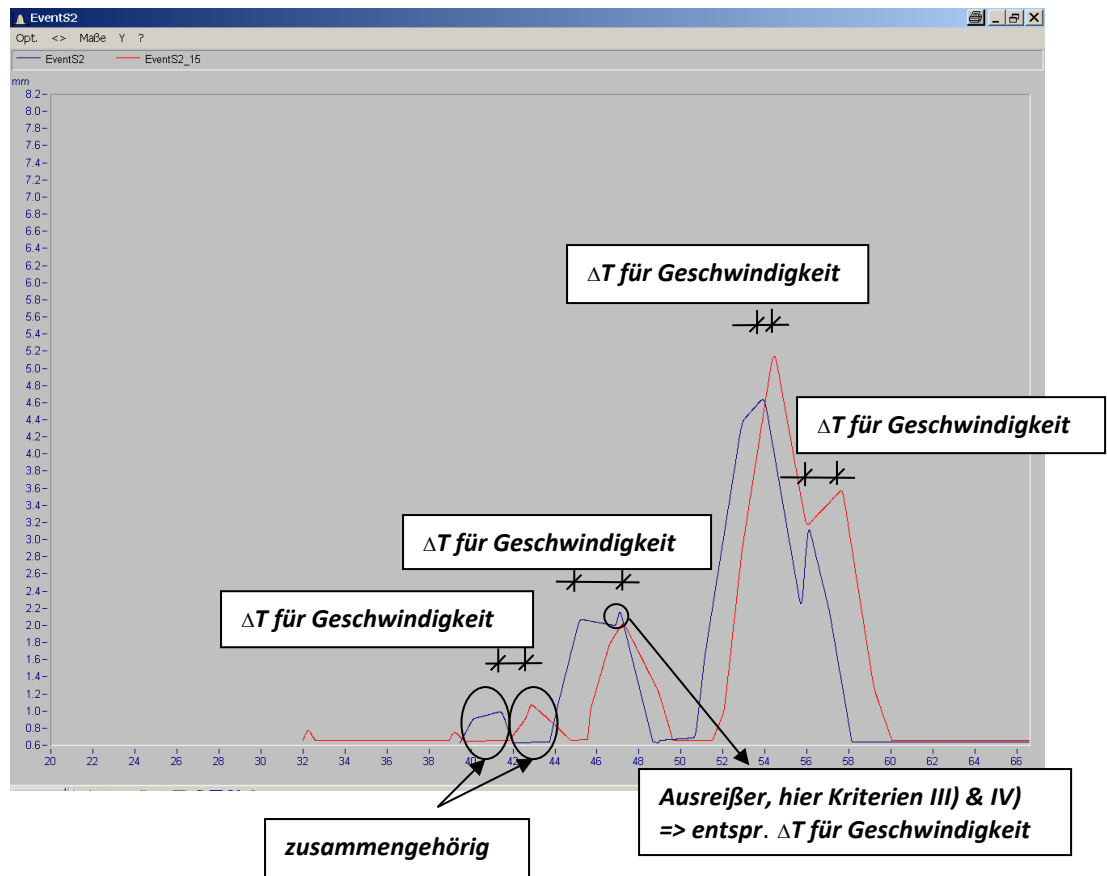
(D050518114411.dat)



(D050518200016.dat)



(D050518182634.dat)



**12 ANHANG 4: AUSWERTUNG DER DYGES LANGZEITREIHE
– PERMANENTES MONITORING 07 / 2004 – 12 /2007**

	8.7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t	Gesamtüberfahrten ASFINAG	Original Daten DYGES v3.0	% Dyges an ASFINAG	Kategorie IV ASFINAG	% Kategorie IV an ASFINAG	% DYGES >38t an ASFINAG
mit ASFINAG Maut Service GmbH harmonisiert															
Jänner															
Summe Überfahrten	18992	6245	5567	5164	5138	5308	4222	4549	26256	80541	67565	84	68523	85	38
Prozent	22	8	7	6	5	4	7	5	6	33					
Summe Überfahrten	19170	6034	5349	4868	4765	4948	3907	4246	31920	85108	nicht vorhanden	---	72925	86	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	6	5	5	38					
Summe Überfahrten	21585	6795	6023	5482	5365	5459	4400	4781	35842	95831	unter 50%	---	83660	87	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
Februar															
Summe Überfahrten	19443	6868	6141	5741	5833	6107	4784	5115	28320	88353	72249	82	75749	86	38
Prozent	22	8	7	6	7	7	5	6	32						
Summe Überfahrten	20252	6375	5651	5143	5034	5121	4128	4486	33722	89911	nicht vorhanden	---	72784	86	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
Summe Überfahrten	20127	7185	6409	5865	5874	5802	4817	5065	37215	97643	74897	77	85157	87	43
Prozent	20	7	7	6	6	6	5	5	38						
März															
Summe Überfahrten	19970	7043	6591	6180	6118	6104	4925	5232	35075	97237	78408	81	82216	85	41
Prozent	21	7	7	6	6	6	5	5	36						
Summe Überfahrten	23705	7462	6615	6020	5892	5995	4832	5250	39472	105243	nicht vorhanden	---	89355	85	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
Summe Überfahrten	25581	8052	7138	6497	6359	6469	5214	5666	42595	113571	unter 50%	---	98134	86	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
April															
Summe Überfahrten	19081	7445	6619	6010	5704	5858	4793	5119	37256	97885	80713	82	82418	84	43
Prozent	19	8	7	6	6	6	5	5	38						
Summe Überfahrten	20186	6354	5633	5126	5018	5105	4115	4471	33612	89619	unter 50%	---	74275	83	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
Summe Überfahrten	21982	6920	6134	5583	5464	5559	4481	4889	36603	97594	nicht vorhanden	---	82055	84	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
Mai															
Summe Überfahrten	19837	6576	5879	5470	5202	5092	4261	4586	35582	92485	76595	83	76154	82	43
Prozent	21	7	6	6	6	6	5	5	38						
Summe Überfahrten	26711	7528	5986	5006	4390	4269	3333	3561	25227	100011	74994	75	83163	83	33
Prozent	37	8	6	5	4	4	3	4	29						
Summe Überfahrten	24073	7578	6718	6114	5884	6088	4907	5332	40085	106879	unter 50%	---	90268	84	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
Juni															
Summe Überfahrten	20097	6858	6106	5407	5383	5562	4550	5002	39503	98467	80892	82	82413	84	45
Prozent	20	7	6	5	5	6	5	5	40						
Summe Überfahrten	27444	6079	5677	5323	5268	5492	4228	4625	40026	104162	101556	97	86475	83	43
Prozent	26	6	5	5	5	5	4	4	38						
Summe Überfahrten	24398	7680	6808	6196	6064	6170	4973	5404	40625	108318	nicht vorhanden	---	91954	84	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
Juli															
Summe Überfahrten	22457	7212	6360	5711	5168	5375	4301	4766	38040	99291	79208	80	84675	85	43
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	4	38						
Summe Überfahrten	19909	6527	5767	5394	5186	5421	4486	4973	40230	97892	82297	84	84675	84	46
Prozent	20	7	6	6	6	6	5	5	41						
Summe Überfahrten	26360	5979	5252	4967	4926	5016	3867	4342	40296	100956	101557	101	84361	84	44
Prozent	26	6	5	5	5	5	4	4	40						
Summe Überfahrten	24244	7632	6765	6157	6026	6131	4942	5370	40370	107638	nicht vorhanden	---	91185	85	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
August															
Summe Überfahrten	17614	5368	4321	3751	3679	3638	3220	3504	29816	74912	67064	90	61754	82	44
Prozent	24	7	6	5	5	5	4	5	40						
Summe Überfahrten	17053	4903	4284	3690	3585	3708	3059	3379	29457	73318	64542	88	59354	81	45
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	4	40						
Summe Überfahrten	18567	5771	4978	4311	4124	4294	3433	3854	33728	83460	72025	86	69270	83	45
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	40						
Summe Überfahrten	19232	6054	5367	4884	4780	4854	3920	4260	32024	85385	nicht vorhanden	---	71894	84	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
September															
Summe Überfahrten	21570	7180	6210	5663	5568	5733	4866	5374	42398	104561	85337	82	87015	83	46
Prozent	21	7	6	5	5	5	5	5	41						
Summe Überfahrten	20958	6999	6280	5405	5367	5595	4609	5143	42213	102570	83741	82	84519	82	46
Prozent	20	7	6	5	5	5	4	5	41						
Summe Überfahrten	21444	7219	6453	5734	5778	5604	4539	5048	45012	106832	87063	81	87668	82	47
Prozent	20	7	6	5	5	5	4	5	42						
Summe Überfahrten	21950	7468	6683	6190	5986	6061	4933	5386	42399	107055	87259	82	88546	83	45
Prozent	21	7	6	6	6	6	5	5	40						
Oktober															
Summe Überfahrten	20882	7818	6733	6039	5789	5947	4977	5357	38416	101958	82564	81	85123	83	43
Prozent	20	8	7	6	6	6	5	5	38						
Summe Überfahrten	21009	6505	5935	5452	5454	5532	4603	5101	38710	98410	81700	83	81098	82	45
Prozent	21	7	6	6	6	6	5	5	39						
Summe Überfahrten	22117	7976	7036	6117	5990	5878	4644	4946	41342	106045	84948	80	88424	83	44
Prozent	21	8	7	6	6	6	4	4	39						
Summe Überfahrten	23549	8026	7182	6618	6408	6588	5337	5535	42015	112057	81257	73	94284	84	43
Prozent	21	7	6	6	6	6	5	5	38						
November															
Summe Überfahrten	18785	6820	6326	5779	5802	6199	4817	5282	34432	94243	77201	82	82713	88	42
Prozent	20	7	7	6	6	7	5	6	37						
Summe Überfahrten	19340	6853	6125	5788	5814	6020	4724	5040	33430	93135	78567	84	80823	87	41
Prozent	21	7	7	6	6	6	5	5	36						
Summe Überfahrten	20184	7838	6855	6460	6333	6214	5074	5511	41715	106202	90168	85	93486	88	44
Prozent	19	7	6	6	6	6	5	5	39						
Summe Überfahrten	22391	7705	7021	6358	6135	6299	5048	5356	36913	103227	72200	70	90724	88	41
Prozent	22	7	7	6	6	6	5	5	36						
Dezember															
Summe Überfahrten	18587	6760	6164	5621	5584	5603	4559	4739	28999	86625	72682	84	74933	87	39
Prozent	21	8	7	6	6	6	5	5	33						
Summe Überfahrten	19651	6835	6053	5739	5603	5731	4708	4695	24332	83347	68473	82	70787	85	35
Prozent	24	8	7	7	6	7	6	6	29						
Summe Überfahrten	18996	6294	5580	5078	4970	5057	4076	4429	33296	88776	nicht vorhanden	---	76270	86	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						
Summe Überfahrten	18735	5897	5228	4758	4657	4738	3819	4150	31196	83176	unter 50%	---	71356	86	---
Prozent	23	7	6	6	6	6	5	5	38						

Farbcodes	
Notwendige Ungleichung:	
Überfahrten ASFINAG Gesamt > Überfahrten DYGES < 60km/h > Überfahrten ASFINAG Kategorie 4	
Notwendige Ungleichung nicht erfüllt, daher Angleich	

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2004									
2004	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	21,4	7,3	6,4	5,8	5,6	5,8	4,8	5,2	37,7

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 01/2005 - 12/2005									
2005	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	21,3	7,2	6,5	5,9	5,8	6,0	4,9	5,3	37,0

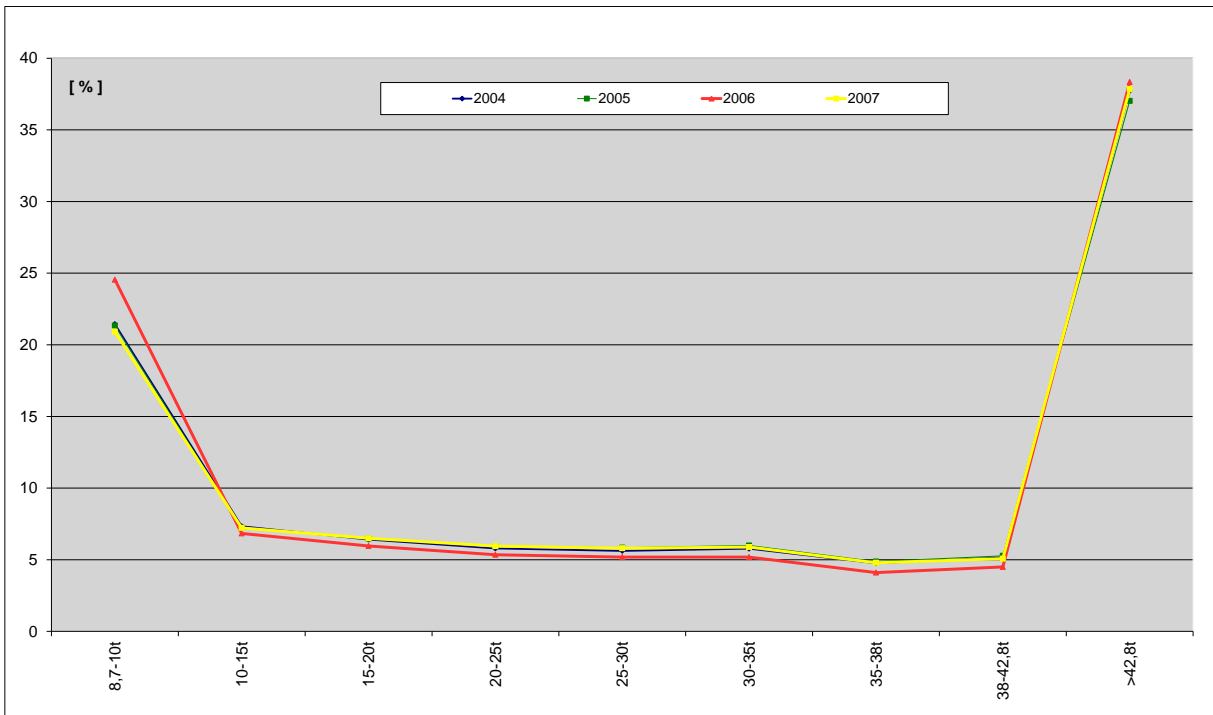
Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 01/2006 - 12/2006									
2006	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	24,5	6,8	6,0	5,3	5,2	5,2	4,1	4,5	38,3

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 01/2007 - 12/2007									
2007	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	20,9	7,2	6,5	6,0	5,8	5,9	4,8	5,1	37,9

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2005									
2004-2005	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	21,3	7,2	6,5	5,9	5,8	6,0	4,9	5,3	37,0

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2006									
2004-2006	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	22,9	7,0	6,2	5,6	5,5	5,6	4,5	4,9	37,7

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung in % der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2007									
2004-2007	8,7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42,8t	>42,8t
	22,2	7,1	6,3	5,8	5,6	5,7	4,6	5,0	37,6



13 ANHANG 5: SONDERMESSUNG 2007 – GANZHEITLICHE ERFASSUNG DER BETRIEBSBEANSPRUCHUNG

- **MESSPROGRAMM**
- **VIDEO-BASIERTE ERFASSUNG DES TATSÄCHLICHEN BELASTUNGSGESCHEHENS**
- **LASER-BASIERTE ERFASSUNG DER GLOBALEN BRÜCKENVERFORMUNG**
- **BESCHLEUNIGUNGS-BASIERTE ERFASSUNG DER KRAGARMVERFORMUNGEN
(AUS DER DYNAMISCHEN GEWICHTERFASSUNG – DYGES ÜBER DEM PFEILER
II)**
- **DEHNMESSSTREIFEN-BASIERTE ERFASSUNG DES KRAFTFLUSSES IN EINEM
REPRÄSENTATIVEN QUERVERBAND**
- **ERFASSUNG DER TEMPERATUREINWIRKUNG IN FORM EINES SENSOR-PROFILS
ÜBER EINEM AUSGEWÄHLTEN QUERSCHNITT**
- **METEOROLOGISCHE EINWIRKUNGSGRÖSSEN**

Am vorliegenden Brückentragwerk hat sich die Betrachtung dreier maßgeblicher Bauteilebenen herauskristallisiert, deren Reihung sich aus der Bedeutung für die Lastabtragung ergibt. Diese Gliederung resultierte in jeweils ergänzend durchgeführten messtechnischen Sonderuntersuchungen (Instrumentierung verschiedenster Messstellen) deren Grundgedanken in der nachfolgenden Auflistung beinhaltet ist:

- **Bauteilebene I** – Das **Tragverhalten der primären, lastabtragenden Struktur (Haupttragwerk)** in Bezug auf den Schwerverkehr (basierend auf Laser-Verformungsmessungen in den Brückenfeldern II & V)
- **Bauteilebene II** – Das **Verhalten der Querrahmen unter besonderer Berücksichtigung der Kragarme**. Grundlage ist die messungsbasierte, permanente dynamische Gewichtserfassung DYGES (Messquerschnitt an den Brücken-Kragarmen über dem Pfeiler II) zur Tonnagen-Klassifizierung des Schwerverkehrs für die Fahrtrichtung Innsbruck
- **Bauteilebene III** – Das **Verhalten der maßgeblichen lokalen Systeme**, im vorliegenden Fall das der oberen und unteren **Montageanschlüsse der Diagonal-Streben** an die Fahrbahn- und Bodenplatte (Verifizierung der realen Beanspruchung in einem ausgewählten Querverband des Randfeldes V durch Dehnungsmessungen)

Auf Grundlage der bisherigen Studien (insbesondere **Kapitel 3**) sollte durch das nachfolgend beschriebene Messprogramm die reale Betriebsbeanspruchung in zeitsynchroner, integraler Form am Tragwerk erfasst werden. Durch Kopplung mit Finite Elemente Vergleichsrechnungen (**Kapitel 15 und [58]**) wurde letztlich ein vollständig bestimmtes, in mehreren Ebenen jederzeit überprüfbares System geschaffen.

Im Folgenden soll nun ein Überblick zu den durchgeführten Messungen und deren Inhalten gegeben werden. Das detaillierte Protokoll der Messung kann **[58]** entnommen werden.

Die Ergebnisse zur Auswertung der zugehörigen Daten sind dann überwiegend dem **Kapitel 14** sowie **[58]** zu entnehmen.

13.1 Messprogramm

Im Jahr 2007 fand in der Kalenderwoche 21 von 22.05.2007 (Dienstagabend) bis 27.05.2007 (Sonntag-Mittag) eine Sondermessung im Brückenrandfeld WL Schönberg auf der Europabrücke statt.

Die Ergebnisse der Schwachstellenanalyse im Sommer 2006 (siehe **Kapitel 10**) legten bereits eine erhöhte Aufmerksamkeit für das **Randfeld V** nahe. Unter diesem Aspekt wird auch die letztlich getroffene Wahl des Standortes für die Sondermessung 2007 im Zuge der notwendigen örtlichen Einschränkung nachvollziehbar und plausibel.

Die Messung umfasste die nachfolgenden Teilbereiche, die bereits in der Reihenfolge angeführt sind, wie sie für das Konzept der - gerade eingeführten - drei Betrachtungsebenen konsistent ist:

- **Video-basierte Erfassung** des realen **Schwerverkehrsaufkommens** (Belastungsgeschehens)
Videokamera in der Nähe des Widerlagers Schönberg
- **Laser-basierte Verformungsmessung** im Feld V
Dokumentation des globalen, vertikalen Deformationsverhaltens
- Beschleunigungs-basierte **Analyse der Kragarm-Vertikalverformungen** unter **Hinzuziehen der Klassifizierung der einzelnen Schwerverkehrseinheiten** in Fahrtrichtung Innsbruck hinsichtlich Tonnage und zugehöriger Überfahrts-Geschwindigkeit
(aus dem permanenten Dynamischen Gewichtserfassungssystem DYGES über dem Pfeiler II)
- **Dehnmessstreifen-basierte Erfassung des Kraftflusses** entlang eines **repräsentativen Querverbandes**
Das tatsächliche Kräfte- und Deformationsverhalten sollte ermittelt werden und die Grundlage für vergleichende Spannungs-Berechnungen an Finite Elemente Modellen darstellen
- Erfassung der **realen Temperatureinwirkung** anhand eines Sensor-Profiles **entlang eines ausgewählten Querschnittes**
Verteilung der tatsächlichen Luft- und Stahltemperaturen über dem Pfeiler V
- Erfassung **meteorologischer Einwirkungsgrößen** in der Nähe des Widerlagers Schönberg

In weiterer Folge wird jeder der aufgelisteten Teilbereiche bezüglich der Details zur messtechnischen Erfassung erörtert. Gleichzeitig wird eine Datengrundlage in Form einiger, bereits spezifischer Auswertungen extrahiert und erläutert, welche dann für weiterführende rechnerische Analysen/Diskussionen herangezogen wird.

13.2 Video-basierte Erfassung des tatsächlichen Belastungsgeschehens

Eine Videokamera und eine GPS-Einheit wurden gemeinsam mit einer Meteorologie-Einheit etwas außerhalb des Widerlagers - seitlich der Richtungsfahrbahn Innsbruck - positioniert. **Bild 125** zeigt alle Komponenten, wobei sich GPS und Videokamera im rot markierten Bereich befinden. Auf die meteorologischen Zustandsgrößen wird in Abschnitt **13.7** noch näher eingegangen. Die Installation sämtlicher Geräte erfolgte bereits am Abend des Anreisetages (Dienstag), die Videoaufnahmen wurden jedoch erst am Mittwoch gestartet. Ebenso musste die Kamera jeden Messtag nach Erreichen der Speicherkapazität ausgelesen und neu gestartet werden, weswegen kein vollständig durchgehendes Material zur Verfügung steht. Von Mittwoch, den 23.05.2007 bis inklusive Samstag, den 26.05.2007 liegen insgesamt 40 Stunden verwertbares Video-Material vor.



Bild 125: Video basierte Erfassung der Einwirkung sowie meteorologische Mess-Station am Widerlager Schönbögen

13.2.1 Erste Auswertungen und Analysen

Im Hinblick auf die Erstellung eines Monitoring-basierten Verkehrs-Lastmodells wurde das Videomaterial umfassend analysiert. Die Auswertung der vorliegenden 40 Stunden Videomaterial erfolgte im Hinblick auf eine Dokumentation jener Lastkonfigurationen, welche infolge Schwerverkehr überhaupt am Tragwerk auftreten.

Die Aufbereitung der Ergebnisse erfolgte in Form von erfassten, kategorisierten und gezählten Belastungs-Anordnungen am Tragwerk Europabrücke. Die genaue grafische und tabellarische Aufbereitung zur Zählung und stundenweisen Aufschlüsselung der Belastungsszenarien ist [16] sowie dem **Kapitel 18** zu entnehmen. Nachfolgend seien lediglich die wesentlichsten Ergebnisse zusammengeführt.

Die beiden Grafiken in **Bild 126** zeigen Übersichten zur Häufigkeitsverteilung der einzelnen Tagessummen aller mit Video erfassten Belastungsszenarien. Die Anordnung der kategorisierten Lastbilder erfolgt beginnend mit einfachen, häufigeren Konstellationen und wird bis hin zu komplizierteren und selteneren Szenarien fortgeführt. Dabei sind auf der längeren Horizontal-Achse die Last-Szenarien selbst aufgetragen, die kurze, zweite Horizontal-Achse unterscheidet die vier verschiedenen Beobachtungstage. Die Vertikalachse gibt Auskunft über die Häufigkeit des Auftretens dieser Ereignisse. Insgesamt wurden im Zuge der Sondermessung 76 verschiedene Last-Szenarien dokumentiert und anhand von 9969 gezählten Ereignissen klassiert.

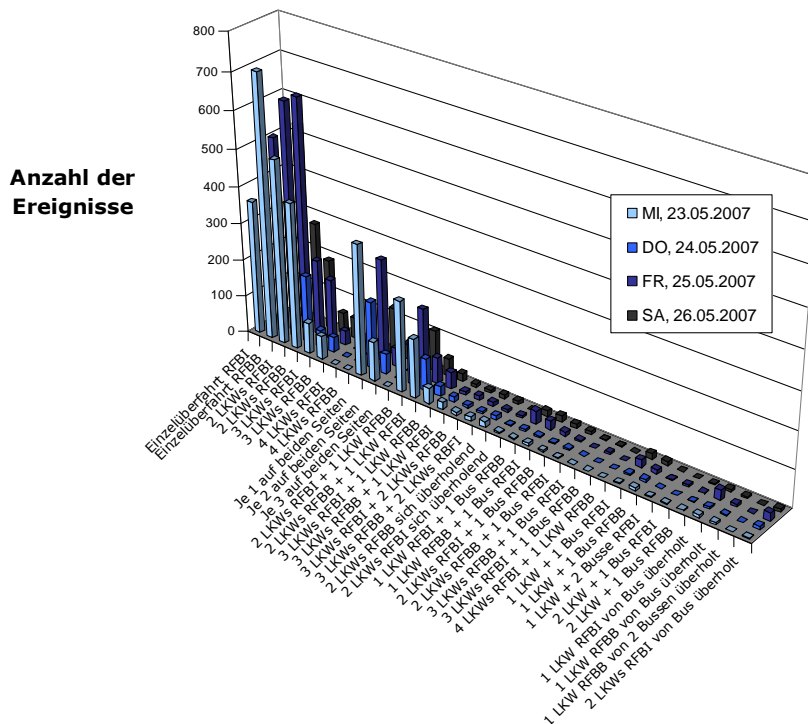
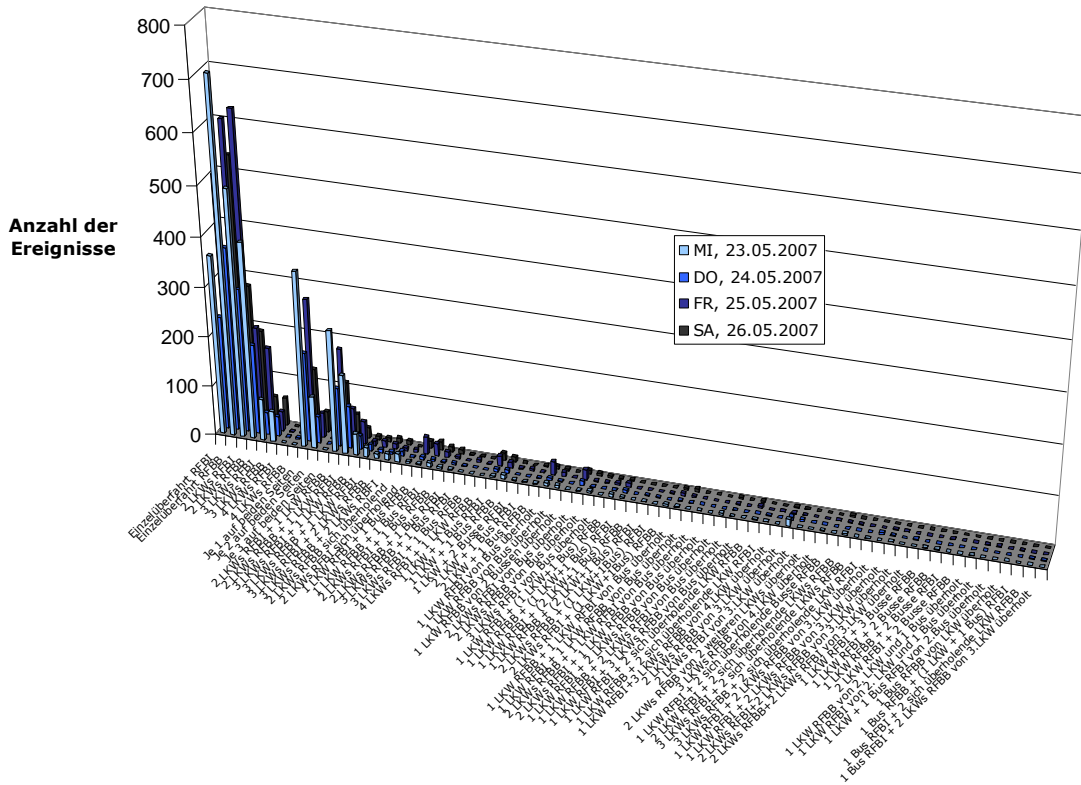


Bild 126: Klassifizierung & Häufigkeitsvergleich der auftretenden, video-basierten Belastungsszenarien – Gesamtübersicht (oben) vs. Detail (unten)

In **Bild 127** ist nun zur besseren Lesbarkeit eine weitere Fokussierung auf die gängigsten Szenarien vorgenommen worden.

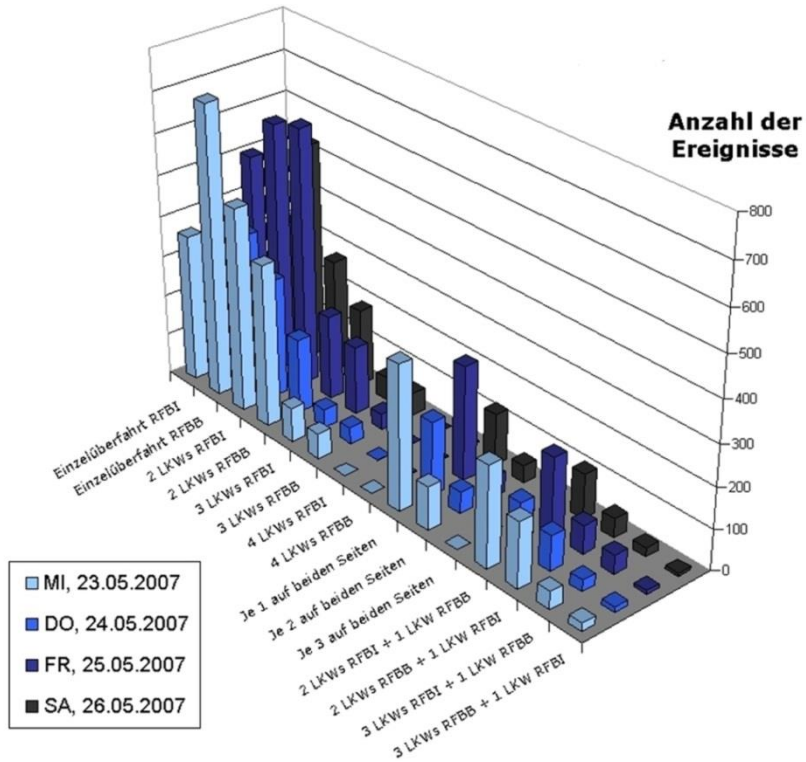


Bild 127: Ausschnitt der dominant auftretenden Belastungsszenarien

Die dokumentierten Belastungsszenarien wurden in weiterer Folge nach deren Häufigkeit geordnet, wobei hier die Last-Szenarien aller vier Tage aufsummiert wurden. Für eine bessere Übersicht wird **Bild 128** daher auf die Darstellung von Belastungsszenarien beschränkt, die innerhalb der vier Tage zumindest 40-mal oder häufiger aufgetreten sind. Anhand dieser Selektion erfolgt eine Festlegung der in weiterer Folge als maßgeblich betrachteter Lastkonfigurationen.

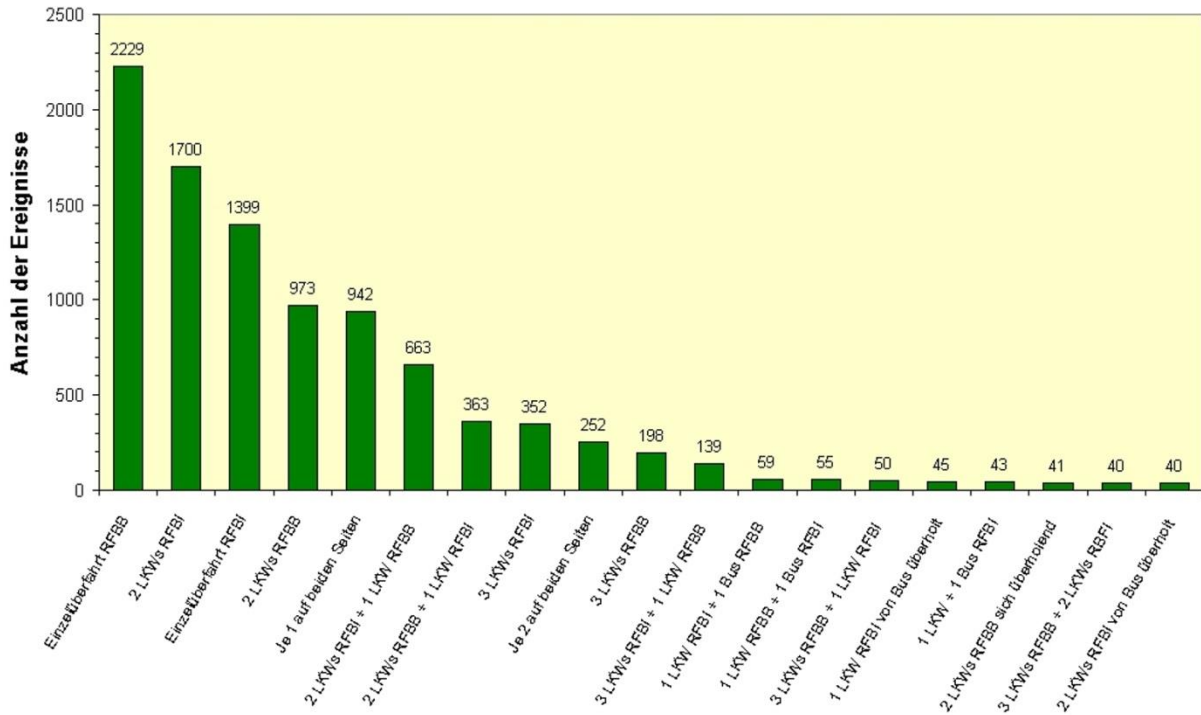


Bild 128: Auftretens-Häufigkeiten aller Szenarien, die öfter als 40-mal aufgetreten sind (alle Tage aufsummiert)

Nr.	Belastungsszenario	Summe total	Anteil an GesamtΣ in %
2	Einzelüberfahrt RFBB	2229	22,36
3	2 LKWs RFBI	1700	17,05
1	Einzelüberfahrt RFBI	1399	14,03
4	2 LKWs RFBB	973	9,76
9	Je 1 auf beiden Seiten	942	9,45
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	663	6,65
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	363	3,64
5	3 LKWs RFBI	352	3,53
10	Je 2 auf beiden Seiten	252	2,53
6	3 LKWs RFBB	198	1,99

Tabelle 39: Die 10 am häufigsten beobachteten Belastungsszenarien

In **Tabelle 39** sind die zehn häufigsten Belastungs-Konfigurationen gemäß der beobachtete Anzahl ihres Auftretens aufgelistet. Dazu sei noch bemerkt, dass durch diese zehn Belastungskonfigurationen bereits 91% der insgesamt auftretenden (beobachteten) und dokumentierten Szenarien abgedeckt werden.

Um Unterschiede zwischen Werktag und Wochenende sichtbar zu machen, wurden in **Bild 129** die zehn häufigsten Belastungsszenarien nach Mess-Tagen aufbereitet dargestellt. Für diese Gegenüberstellung wurden die Stundenmittelwerte benutzt, da die Videoaufnahmen zu unterschiedlichen Zeiten gestartet wurden und sich daher für die einzelnen Tage unterschiedlich viele Stunden zählbares Videomaterial ergeben haben. Notwendiger Weise

wurden zusätzlich auch die Zählungen vom Samstag aufgegliedert (bis 16 Uhr einerseits und ab 16 Uhr andererseits), da das LKW-Wochenendfahrverbot erst am Nachmittag einsetzt und sich die Verkehrsströme am Vormittag und frühen Nachmittag noch Werktags-ähnlich einstellen. Der verbleibende Wochenendverkehr beschränkt sich dann auf vergleichsweise wenige Belastungsszenarien, hauptsächlich finden Einzelüberfahrten statt.

Diese Beobachtungen werden im Übrigen durch die Lasermessung bestätigt, die nachfolgend (**Abschnitt 13.3**) genauer beschrieben wird.

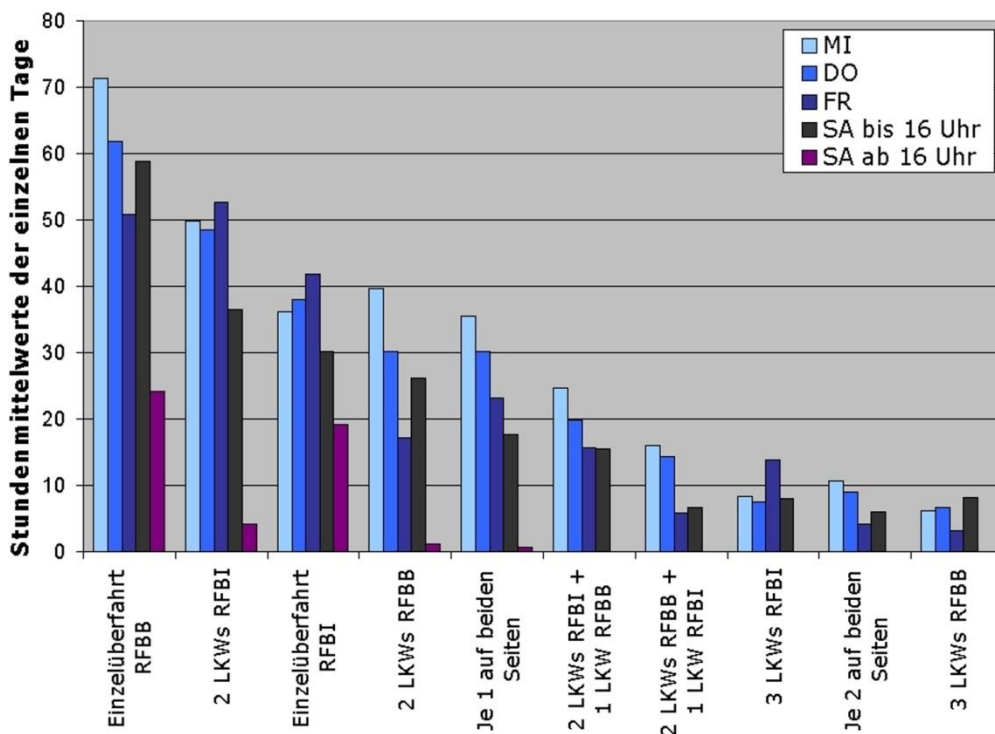


Bild 129: Tageweiser Vergleich der 10 häufigsten Belastungs-Szenarien anhand der Stundenmittelwerte

Für eine ausführliche, weiterführende Auseinandersetzung mit dem vorliegenden Datenmaterial und dessen Verwertung sei an dieser Stelle auf die **Kapitel 16** und **17** verwiesen.

13.3 Laser-basierte Erfassung der globalen Brückenverformung

Der vorliegende Abschnitt dokumentiert die während der Kalenderwoche 21/2007 (22.05.2007 20:11 - 27.05.2007 09:40) durchgeführte Sonder-Messung der **vertikalen Absolut-Verformungen des Randfeldes (Feld V)** der Europabrücke. Die Verschiebungsmessdaten wurden im vorliegenden Fall von einem Mess-System zur Deformationserfassung geliefert. Dabei wird die Ausmittigkeit eines Laserstrahles auf einem optoelektrischen Empfänger gemessen und in elektrische Ausgangssignale gewandelt. Eine veränderte Position des Empfängers verursacht so eine sich verändernde Ausmittigkeit.

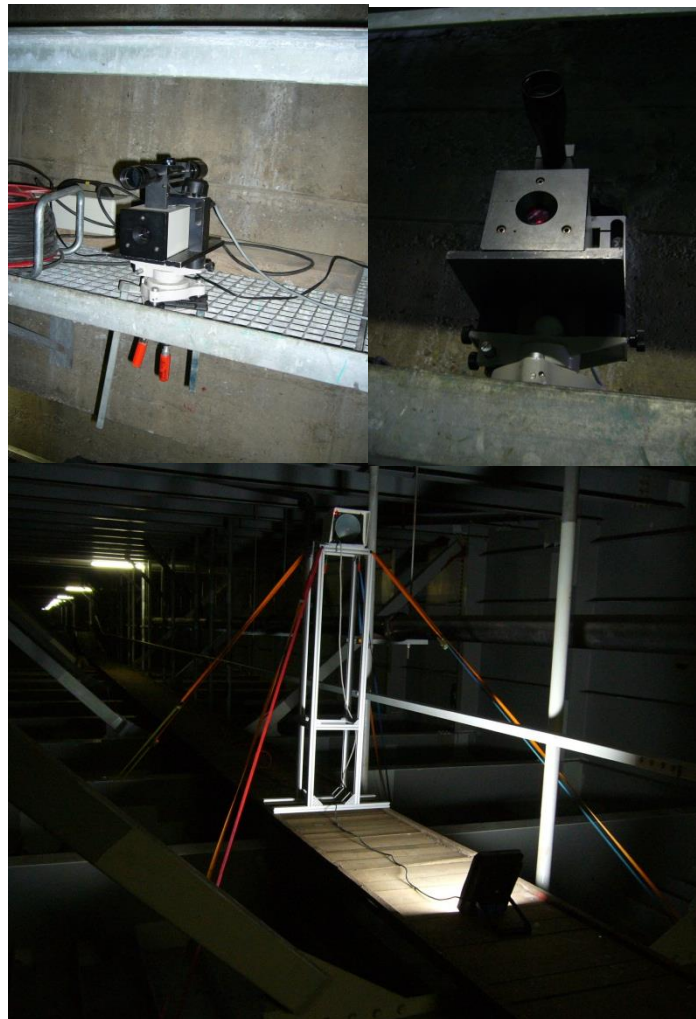


Bild 130: Der Aufbau des Lasers am WL Schönberg (oben) und des Empfängerschirmes im Feld V (unten)

Der Lasersender wurde am Widerlager Schönberg montiert, der zugehörige optoelektrische Empfängerschirm wurde im Feld V - 39m von der Endquerträger Schönberg entfernt - aufgebaut. Dieser Punkt entspricht annähernd der Stelle der maximalen Durchbiegung im Sinne der Einflusslinienordinate für eine bewegliche Einzellast. Der Empfängerschirm wurde auf einer speziellen Rahmenkonstruktion befestigt und kraftschlüssig mit der Bodenplatte verbunden

(siehe Photo-Dokumentation **Bild 130**) um die vertikalen, globalen Verschiebungen des Brückenfeldes aufzuzeichnen. Da die Lasermessung ohne größere Unterbrechungen fortlaufend durchgeführt wurde, konnten so von Dienstagabend bis Sonntagvormittag knapp 110 Stunden verwertbares Material gesammelt werden (siehe **Bild 133**).

An dieser Stelle sei festgehalten, dass mit Hilfe dieser Art der Zusatzmessung bereits deutlich früher – nämlich im Zuge von Pilotversuchen im Dez 2004 bzw. im Mai 2005 – Erfahrungen gesammelt wurden. Damals stand eine Verifizierung der globalen Tragwerksantwort des Brückenhauptfeldes unter Betriebsbedingungen im Vordergrund. Eine Prinzipskizze (**Bild 131**) beziehungsweise die darauf folgende Photo-Dokumentation (**Bild 132**) zeigen den Messaufbau zu diesen Pilotversuchen, d.h. den wiederum auf einem Rahmen aufgesetzten und kraftschlüssig mit der Bodenplatte verbundenen Empfängerschirm (**in der Mitte des Feldes Nr. II**) sowie den in 369 m Entfernung an der Widerlagerwand Schönberg (= ein unbeweglicher Fixpunkt) befestigten Lasersender. Dieser Messaufbau wurde nun sinngemäß für die Messung der globalen Vertikalverformungen im **Randfeld V** im Mai 2007 übernommen.

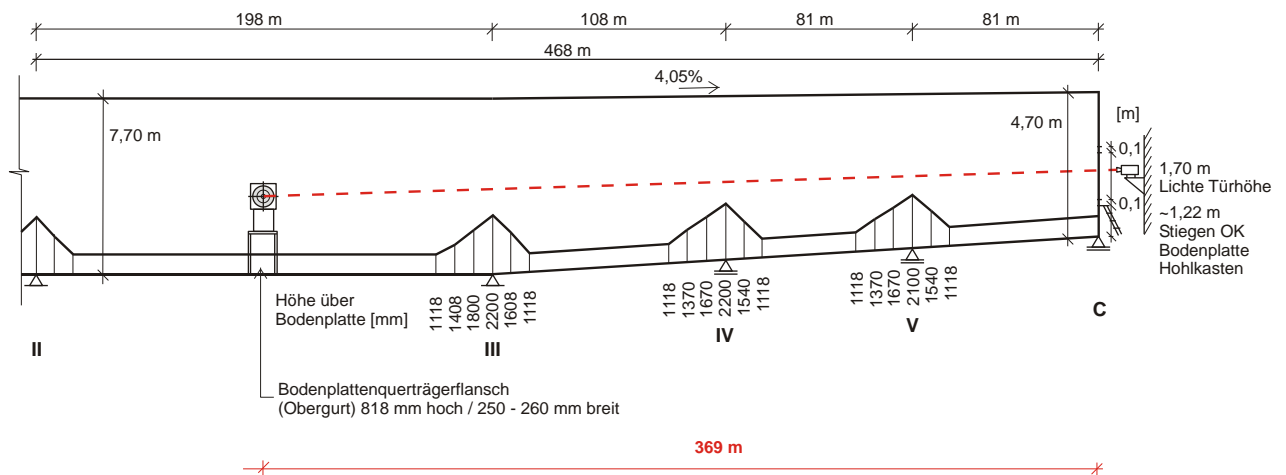


Bild 131: Sensorlayout zur **Messung der globalen Brückenverformung** in Brückenmitte (zu sehen sind lediglich die **Brückenfelder II bis V**)

Die gemessene Eingangsgröße sollte jedenfalls in weiterer Folge auch für eine etwaige Bewertung des globalen Erhaltungszustandes zur Verfügung stehen. Mit anderen Worten wurde für den Bedarfsfall dadurch ein messungsbasierter **Belastungs-Eingangsparameter für weiterführende Ermüdungsanalysen** geschaffen. Die Verformungsfunktion liefert dafür eine sehr gute Grundlage, da die auftretenden Verformungen als Lastfall „eingepögte Verformungen“ auf ein Brückenmodell aufgebracht werden können. Einen prinzipiellen Einblick zum gemessenen Tragwerksverhalten während des seinerzeitigen Pilotversuchs gibt **Bild 145** im Abschnitt **14.2**. Die interpretierten Ergebnisse und Details dazu sind insbesondere auch einer gesonderten Publikation zu entnehmen (siehe [3]).



Bild 132: Kraftschlüssig mit der Bodenplatte verbundener Empfängerschirm (Brückenhauptfeld Nr. II) bzw. der im Bereich des Brückenwiderlagers Süd instrumentierte Laser-Sender (Feld II)

13.3.1 Erste Auswertungen und Analysen

Während des Messzeitraums ist das Tragwerk unmittelbaren (dynamischen) und allmählichen (statischen) Verformungen unterworfen, die jeweils berücksichtigt werden müssen.

Bild 133 zeigt den direkt aus der Lasermessung gewonnen Verformungsverlauf als Folge des überlagerten Auftretens dieser beiden Einflüsse.

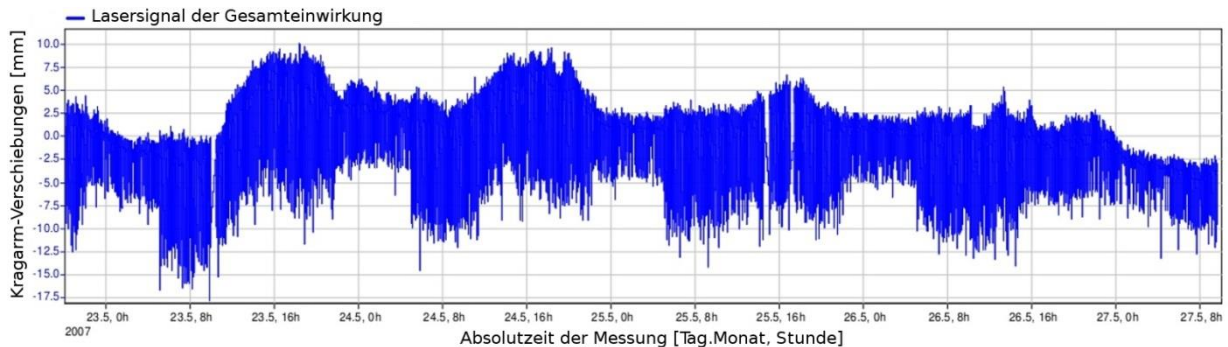


Bild 133: Während der Sondermessung gewonnene Laserdaten in der KW 21 (22.05.2007 20:11 - 27.05.2007 09:40)

Beim Betrachten der Laser-Aufzeichnungen (**Bild 133** und **Bild 144**) ist sofort das Nachtfahrverbot für den Schwerverkehr und dessen Einfluss auf die dynamische Tragwerksbeanspruchung zwischen 22:00 und 05:00 jedes Werktages zu erkennen. In dieser Zeit ist auch sehr gut der abnehmende Einfluss der dynamischen Verkehrsbelastung ersichtlich (abnehmende Streuung der Verformungsamplituden).

Natürlich treten auch nachts immer wieder Überfahrten von Schwerfahrzeugen auf, deren Auftretens-Häufigkeit steht jedoch in keiner nennenswerten Relation zum Tagesverkehr. Des Weiteren bietet sich auch die Möglichkeit eines Vergleiches zwischen Werktags- und Wochenendverkehr. Der Samstag zeigt bis zirka 15:00 (16:00) Uhr noch Betriebsbedingungen eines Werktages, danach zeigt das Lasersignal eine Charakteristik ähnlich dem Nachtbetrieb während der Werktage. Grund dafür ist das ganzjährige Wochenendfahrverbot für LKWs, das von Samstag 15:00 Uhr bis Sonntag 22:00 Uhr gilt [23]. Gerade diese 15:00 Uhr-Grenze zeigte sich in dieser Woche allerdings etwas nach hinten verschoben, was darauf zurückzuführen sein dürfte, dass der darauf folgende Montag ein Feiertag war, an dem ebenso ein Fahrverbot für LKWs herrschte, wodurch vermehrt Transporte mit Sondergenehmigungen aufgetreten sein dürften.

Das Signal am Sonntagvormittag zeigt eine äquivalente Charakteristik zu jener vom Samstag nach 16:00 Uhr beziehungsweise wie im Nachtbetrieb in der Werktagsperiode. Der Wochenend-Tagesverkehr ähnelt somit dem Werktags-Nachtverkehr. Die Nacht auf Sonntag repräsentiert den Nachtverkehr am Wochenende. Der Unterschied zum Tagesverkehr ist hier zwar nicht so augenscheinlich wie an Werktagen, aber dennoch zu erkennen.

13.4 Beschleunigungs-basierte Erfassung der Kragarmverformungen (aus der Dynamischen Gewichterfassung – DYGES über dem Pfeiler II)

Die dynamische Gewichterfassung ist bereits Teil der Dauermessanlage (**Kapitel 3.1**). Insofern war es nicht nötig, weitere Sensorik zu installieren. Vielmehr wurden die Daten für den entsprechenden Zeitraum aus der DMA ausgelesen und verarbeitet.

13.4.1 Erste Auswertungen und Analysen

Da die Kragarm-Instrumentierung nur für die RFB Innsbruck vollwertig vorliegt, können bei der späteren Auswertung nur LKWs aus dieser Fahrtrichtung herangezogen werden. LKWs in Fahrtrichtung Brenner könnten theoretisch registriert, aber nicht klassifiziert werden und spielen daher keine weiterführende Rolle (siehe **Abschnitt 2.1, Bild 11**). Um die Abfrage relevanter (interessierender) LKWs aus dem Datenmaterial heraus zu ermöglichen, wurden die Messuhren des permanenten Monitoring-Systems und der Videoaufzeichnung manuell synchronisiert. Allerdings wurde dieser Vorgang aufgrund der großen Distanz zwischen den Messpunkten mitunter etwas erschwert, da die aktuelle Sondermessung im Brückenrandfeld V stattgefunden hat, während der DYGES-Messquerschnitt erst über dem Pfeiler II installiert ist. Somit liegen knapp 400m zwischen den beiden instrumentierten Standorten. Mit Hilfe der Voraussetzung, dass die LKWs die Strecke mit 40km/h befahren und bei gleichzeitigem Heranziehen typischer, gleichartiger Signaturen im Signal infolge ausgewählter Fahrzeugkolonnen kann überhaupt erst ein Zusammenhang zwischen den beiden Datenquellen (Videozeit und DYGES-Zeit) hergestellt werden. Wie im langjährigen Beobachtungszeitraum evident wurde, befahren die LKWs die Europabrücke tatsächlich mit nur geringfügig von 40km/h auftretenden Schwankungen. Die als relevant abgefragten Überfahrten waren daher jeweils innerhalb eines definierbaren Zeitfensters infolge der abgeschätzten Überfahrtszeit von markanten Ereignissen zu finden. Dadurch wurde eine standardisierte Zuordnung der Daten ermöglicht.

Die Erfassung der Überfahrten erfolgt für diese Komponente des Messprogramms über das aus dem DYGES-Algorithmus stammende Zeitsignal der reproduzierten Kragarm-Verschiebungen (zusätzlich werden bekanntlich die Überfahrtsgeschwindigkeit und die zugehörige Tonnage registriert). **Bild 134** zeigt einen solchen Zeitverlauf der Belastungsgeschichte am Kragarm während der Sondermessung 2007 - KW 21.

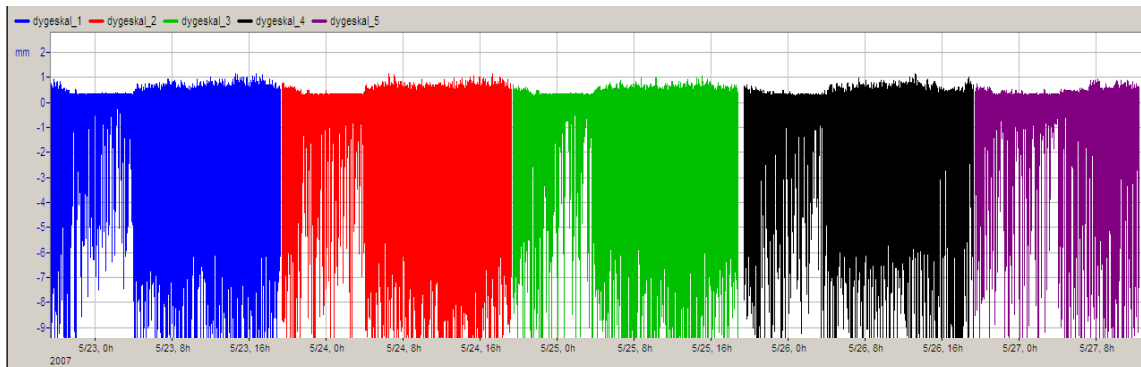


Bild 134: Die während der Sondermessung gewonnenen, reproduzierten vertikalen Kragarm-Verschiebungen aus der dynamischen Gewichtserfassung RFB Innsbruck in der KW 21 (**22.05.2007 19:30 - 27.05.2007 12:30**) – Einheit mm

13.5 Dehnmessstreifen-basierte Erfassung des Kraftflusses in einem repräsentativen Querverband

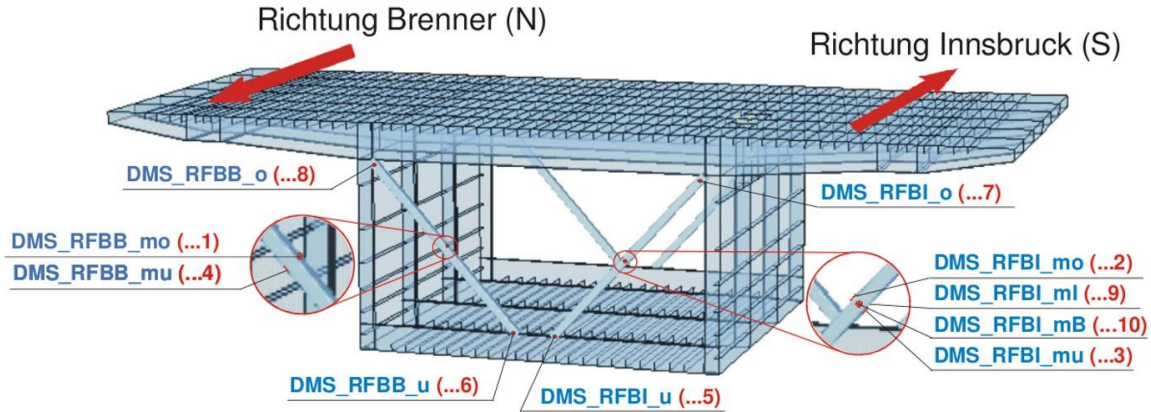
Zwischen 22.05.2007 (Donnerstagabend) und 26.05.2007 (Samstagabend) wurde ein ausgewählter Querverband, bestehend aus den Torsionsstreben V30 QV-N und V30 QV-S mit insgesamt zehn Dehnmessstreifen (DMS) an ausgewählten Punkten instrumentiert, um die in den Streben wirkenden Dehnungs- bzw. Spannungszyklen sowie das tatsächliche Zug- und Druckaufkommen unter Verkehrslast zu erfassen. Der instrumentierte Querverband befindet sich 36m vom Widerlager Schönberg entfernt, etwa in Feldmitte des 81m langen Randfeldes. Die Position wurde aus aktuellem Anlass am Querverband V30 N&S gewählt, da dieser der im Sommer 2006 als schwerwiegend identifizierten Fehlstelle (Einriss des Knotenbleches bis zur Hälfte der Blechbreite - **Bild 105**) am nächsten gelegen ist (in Talrichtung). In **Bild 135** sind die Positionen der einzelnen Dehnmessstreifen in einer Übersicht dargestellt, die zugehörige Indizierung in den Klammern beschreibt die Reihenfolge in der sie aufgeklebt wurden.

Um ein leichteres Auffinden von bestimmten Überfahrten zu ermöglichen und zwecks konsistenter und gleichzeitig flexibler Handhabung des Datenmaterials wurden auch für diese lokale Teilbereichsmessung die Messuhren der DMS-Messung und der Videoaufnahmen synchronisiert. Durch den vorher beschriebenen Zeit-Abgleich zwischen permanentem Monitoring-System (DYGES) und der Videoaufzeichnung – und nach gleichartiger Miteinbeziehung der Laser-Verformungsmessung im Brückenrandfeld Schönberg (**Abschnitt 13.3**) - liegt nun tatsächlich eine zeitsynchrone, ganzheitliche Erfassung der maßgeblichen Einwirkungen am Tragwerk für das angestrebte, in mehreren Ebenen jederzeit überprüfbare Nachweiskonzept vor.

DMS - Profil (V30 QV-N und S)
Sondermessung Mai 2007

Sensor: Spider 8_1 CH...
Nummerierung nach Reihenfolge der Montage

Stationierung des Profils: x = 621 m (entspricht
36m von WL Schönberg)



Lage der Dehnmessstreifen:

RFBB_o...Richtungsfahrbahn Brenner, oberer Anschluss
RFBB_mo...RFB Brenner, Strebenmitte, Oberseite
RFBB_mu...RFB Brenner, Strebenmitte, Unterseite
RFBB_u...RFB Brenner, Unterer Anschluss

RFBI_o...Richtungsfahrbahn Innsbruck, oberer Anschluss
RFBI_mo...RFB Innsbruck, Strebenmitte, Oberseite
RFBI_ml...RFB Innsbruck, Strebenmitte, seitlich (Innsbruck)
RFBI_mB...RFB Innsbruck, Strebenmitte, seitlich (Brenner)
RFBI_mu...RFB Innsbruck, Strebenmitte Unterseite
RFBI_u...RFB Innsbruck, unterer Anschluss

Bild 135: Mittels Dehnmessstreifen vollständig instrumentierter Querverband

Im Hinblick auf eine stabile Erfassung des Normalkraftaufkommens wurde die Ober- und -unterseite beider Streben jeweils etwa die Streben-Mitte, d.h. im Bereich eines gleichmäßigen Kraftflusses, mit je einem DMS instrumentiert (Bild 137). Danach wurden die unteren Anschlüsse der Streben an die orthotrope Bodenplatte mit je einem Dehnmessstreifen versehen – jeweils in einem Abstand von 2-mal der Blechstärke des Knotenbleches von der Schweißnahtwurzel entfernt (Bild 136). Gemäß [17] ist in diesen Bereichen die Singularität der Kerbstelle soweit abgeklungen, dass nur noch so genannte Nennspannungen gemessen werden, die unmittelbar mit jenen einer konventionellen statischen Berechnung verglichen werden können (Verifizierung der Finite Elemente Nachfolgeberechnungen – siehe Abschnitt 15.2). Genauso wurden dann die oberen Anschlüsse der Streben an die orthotrope Fahrbahnplatte mit je einem Streifen versehen (Bild 136). Zuletzt wurden dann zur Beobachtung des Verhaltens aus der Querrahmen-Ebene noch zwei weitere DMS auf der Strebe der Richtungsfahrbahn Innsbruck angebracht. Dies geschah ebenfalls in Streben-Mitte, diesmal aber an den seitlichen Ansichtsflächen der Diagonalstrebe (Bild 137).

Wie aus der nachfolgenden Photo-Dokumentation hervorgeht, wurde selbstverständlich jeder DMS-Messquerschnitt jeweils mit einem ausschließlich zur Temperatur-Kompensation instrumentierten, zusätzlichen DMS ausgestattet.

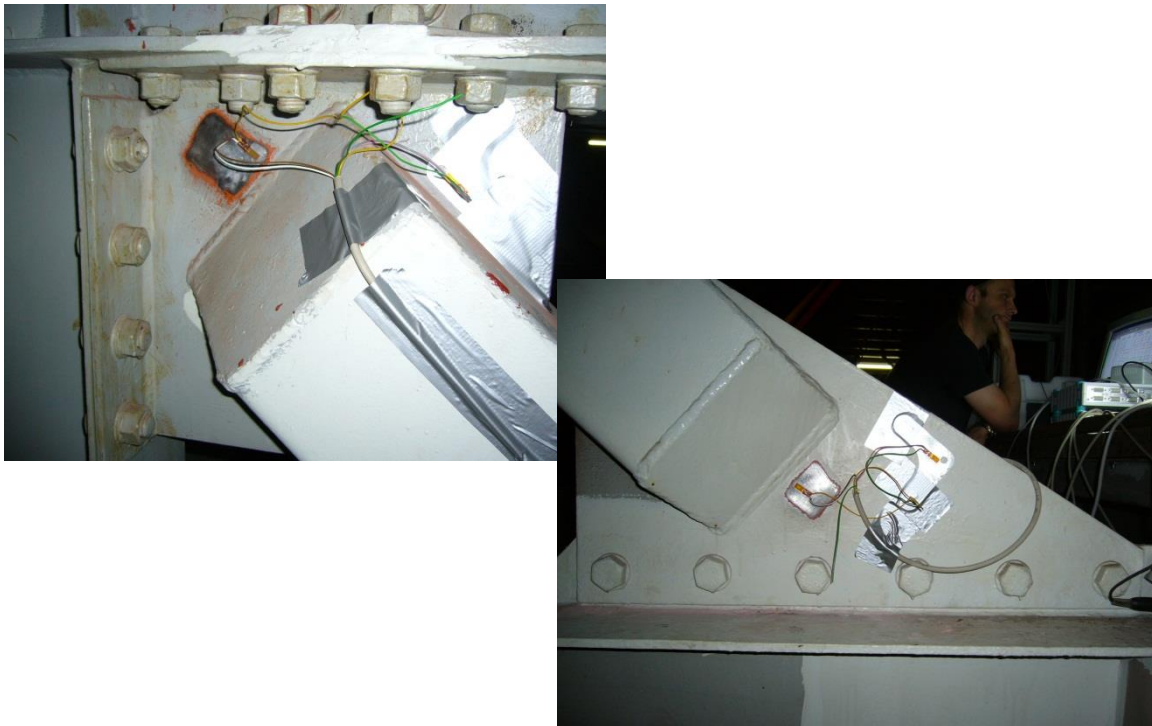


Bild 136: Für die Sondermessung installierte Dehnmessstreifen an den oberen (links) und unteren (rechts) Anschlüssen

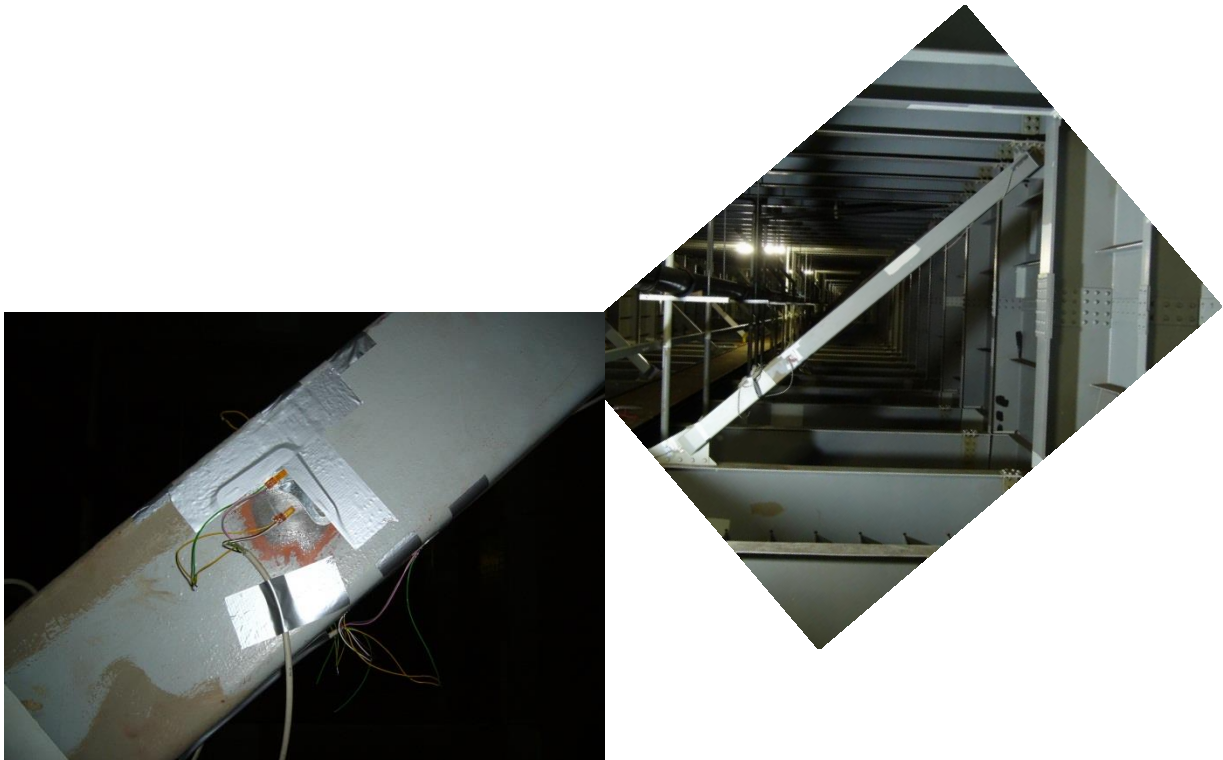


Bild 137: Die angeschlossenen Dehnmessstreifen in Strebenmitte

13.5.1 Erste Auswertungen und Analysen

Die Dehnmess-Streifen wurden sukzessive entlang des Querverbands angebracht, wodurch für die verschiedenen Positionen unterschiedlich lange Messzeiträume (=> unterschiedlich großes Datenvolumen) vorliegen. Zusätzlich traten durch die Vibrationen des Schleifgerätes bei der sukzessiven Montage der einzelnen DMS auch vereinzelt Signal-Störungen auf, die im Rahmen der Bearbeitung und Auswertung der Daten entfernt werden mussten. Beiden Umstände gehen aus dem nachfolgenden **Bild 138** hervor, in welchem ein Überblick über alle während der Sondermessung aufgezeichneten Dehnmessstreifen-Signale gegeben wird.

Weitere Details zur Verwertung der Daten dieses Messquerschnittes sind den **Kapiteln 14** sowie [58] zu entnehmen. Dabei erfolgt eine Verifizierung und Überprüfung der Betriebsbeanspruchung im Sinne des mehrstufigen Lastabtrags anhand der durch **Kapitel 13.2** vorliegenden, beliebig ausgewählten und im Detail analysierten Belastungsszenarien (siehe **Kapitel 14**) bzw. die Implementierung der gemessenen Beanspruchung in rechnerische Lebensdaueranalysen zu den Anschlussstellen der Diagonalstreben ([58]).

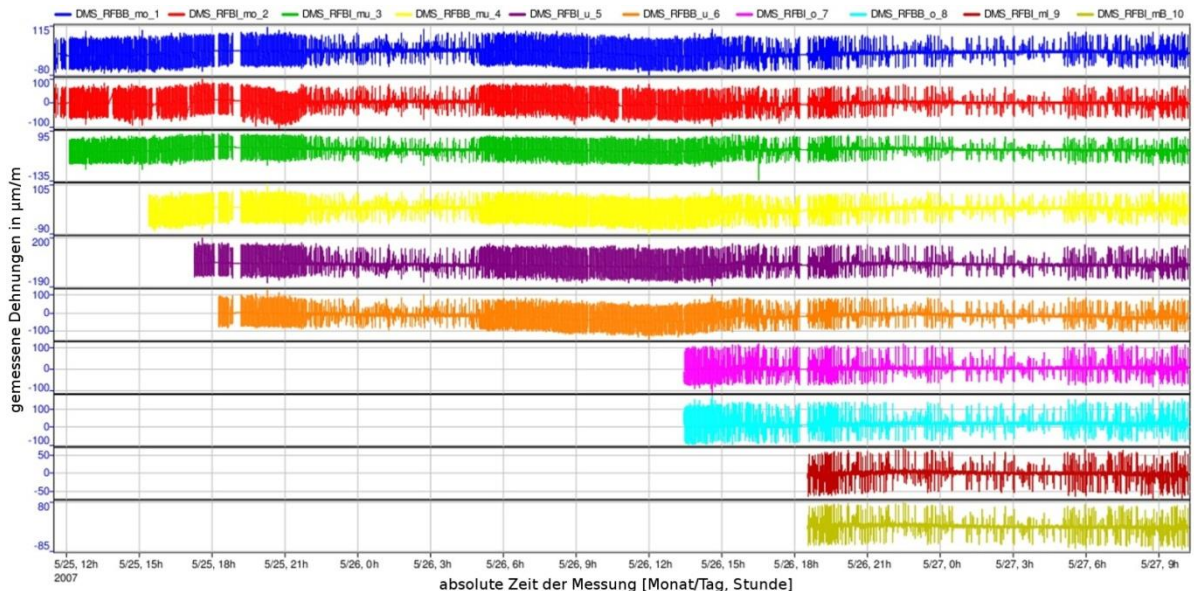
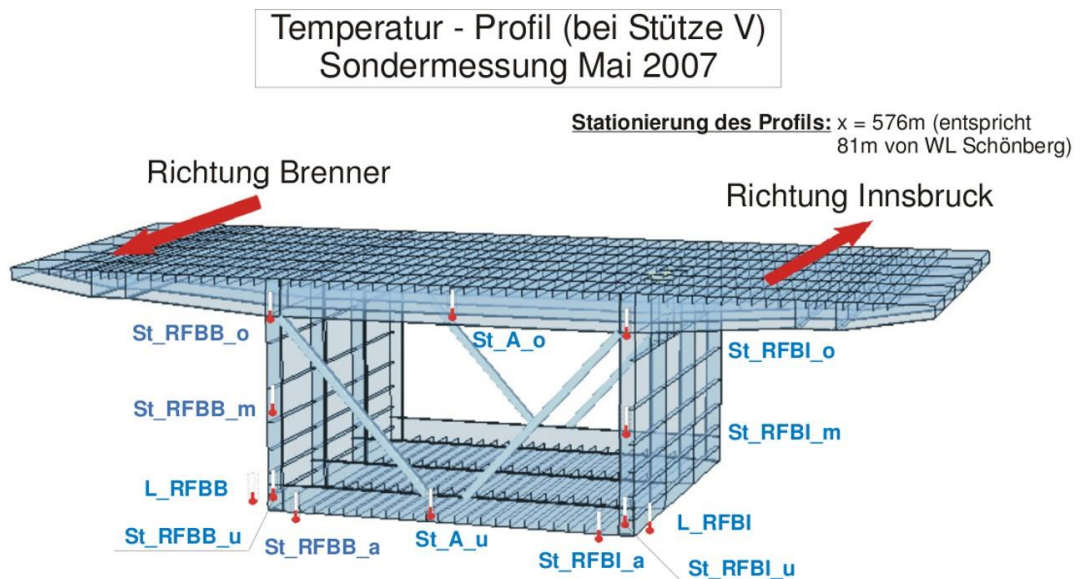


Bild 138: Übersicht aller, während der Sondermessung schrittweise angeschlossenen DMS (Einheit = Dehnungen); 25.05.2007 11:31 - 27.05.2007 10:13

13.6 Erfassung der Temperatureinwirkung in Form eines Sensor-Profiles über einem ausgewählten Querschnitt

Zum Zeitpunkt der Identifikation der für dieses Bauwerk kritischen Bauteile (dynamischen Basismessung der Diagonalstreben – **Kapitel 10**) konnte man sich nicht erklären, warum bei den prinzipiell auf Ermüdung (Bemessungslastfall Schwerverkehr) dimensionierten Querverbandsanschlüssen das beschriebene, systematische Ermüdungs-Schadensbild auftritt. Ursprünglich lag die Vermutung nahe, dass der während der langjährigen Messungen ausgeprägte, aber nur qualitativ beobachtete Zwangs-Eintrag aus nichtlinearer Temperaturverteilung (infolge Sonneneinstrahlung) in das System Beanspruchungszustände hervorruft, die stark von den Bemessungs-Zuständen abweichen. Diesem Zwangseintrag wurde eine Größenordnung ähnlich jener des Schwerverkehrs selbst zugeschrieben. Zur Klärung dieses Sachverhaltes wurde die zusätzliche Instrumentierung eines Temperatur-Profiles an einem ausgewählten Querschnitt in Form einer lokalen Dauermessung vorgenommen.



Lage der Sensoren an den Bauteilen

- | | |
|--|---|
| St_RFBB_o...Stahl, RFB Brenner, oben, Hohlkastenwand Innenseite | St_RFBI_o...Stahl, RFB Innsbruck, oben, Hohlkastenwand Innenseite |
| St_RFBB_m...Stahl, RFB Brenner, mittig, HKW Innenseite | St_RFBI_m...Stahl, RFB Innsbruck, mittig, HKW Innenseite |
| St_RFBB_u...Stahl, RFB Brenner, unten, HKW Innenseite | St_RFBI_u...Stahl, RFB Innsbruck, unten, HKW Innenseite |
| L_RFBB...Luftaußentemperatur, RFB Brenner | L_RFBI...Luftaußentemperatur, RFB Innsbruck |
| St_RFBB_a...Stahl, RFB Brenner, Bodenplatte Außenseite | St_RFBI_a...Stahl, RFB Innsbruck, Bodenplatte Außenseite |
| St_A_o...Stahl, Brückenlängsachse, oben, Fahrbahnplatte Unterseite | St_A_u...Stahl, Brückenlängsachse, unten, Bodenplatte Innenseite |

Bild 139: Installiertes Temperatur-Profil

Mit der Installation dieses Temperaturprofils wurde am zweiten Tag der Sondermessung (Mittwoch der 23.05.07) begonnen. Das Sensor-Profil befand sich über dem Pfeiler V und war daher 81 m vom Widerlager Schönberg entfernt. Das Profil umfasste insgesamt zwölf

Temperatursensoren, wovon acht an der Hohlkasten-Innenfläche montiert wurden, zwei Sensoren befanden sich an der Hohlkasten-Außenfläche (jeweils Stahltemperaturen). Weitere zwei Sensoren wurden außerhalb des Hohlkastens angebracht, um zusätzlich auch noch die korrespondierende Luftaußentemperatur aufzuzeichnen. **Bild 139** zeigt die installierten Temperaturfühler entlang des Querschnittes.

Am Sonntagvormittag (27.05.07) wurden alle temporären Messeinrichtungen der Sondermessung, welche im vorliegenden **Kapitel 13** beschrieben wurden wieder demontiert. Davon ausgenommen ist das Temperaturprofil über dem Pfeiler V. Für diese Messstelle wurden deutlich über den beschriebenen Feldeinsatz hinaus Daten zur Temperaturverteilung über den ausgesuchten Hohlkastenquerschnitt in Form einer permanenten Aufzeichnung gesammelt.

13.6.1 Erste Auswertungen und Analysen

Bild 140 zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen den Stahltemperaturen der Fahrbahnplatte und der Bodenplatte für den gesamten Zeitraum der Sondermessung. Die Temperaturwerte bewegten sich während dieser Zeit zwischen 12°C und knapp 33°C. Der Unterschied zwischen den Temperaturen der Fahrbahnplatte und der Bodenplatte beträgt zum Zeitpunkt der Tagesspitzen zwischen 5 und 7,5°C, wodurch die tatsächlich einwirkende, vertikale Temperatur-Gradienten sehr anschaulich dargestellt wird.

Sinngemäß wurde auch die tatsächlich einwirkende, horizontale Temperatur-Gradienten erfasst. Auf jeder Seitenwand sind bekanntlich drei Sensoren angebracht - oben, mittig und unten. Die gemessenen Aufzeichnungen hinsichtlich der einwirkenden Temperaturverteilung zeigten zumindest während dieses Sondermessungs-Aufenthaltes, dass für die Gradienten in Horizontalrichtung deutlich kleinere Beträge als in Vertikalrichtung registriert wurden, d.h. Unterschiede traten damals stärker für die der Höhe nach ausgerichteten Sensoren auf als durch die Nord-Süd-Ausrichtung (siehe **Bild 141**).

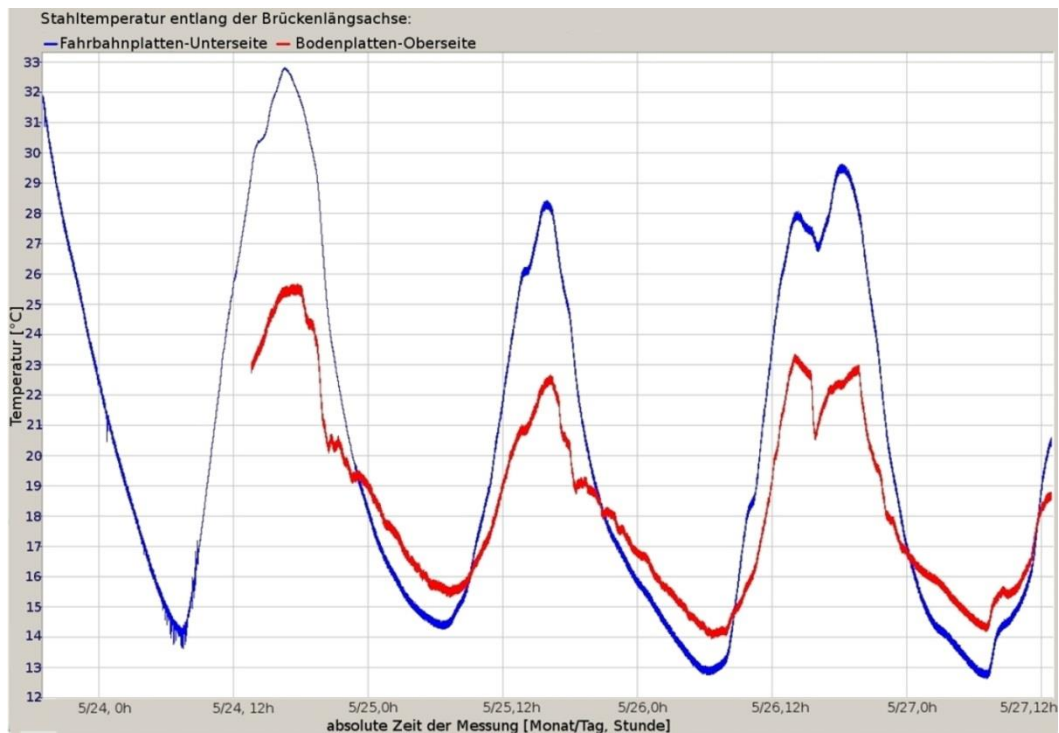


Bild 140: Messzeitraum KW 21: Vergleich zwischen der Temperatur der Fahrbahnplatte und Bodenplatte (Vertikale Temperaturgradiente)

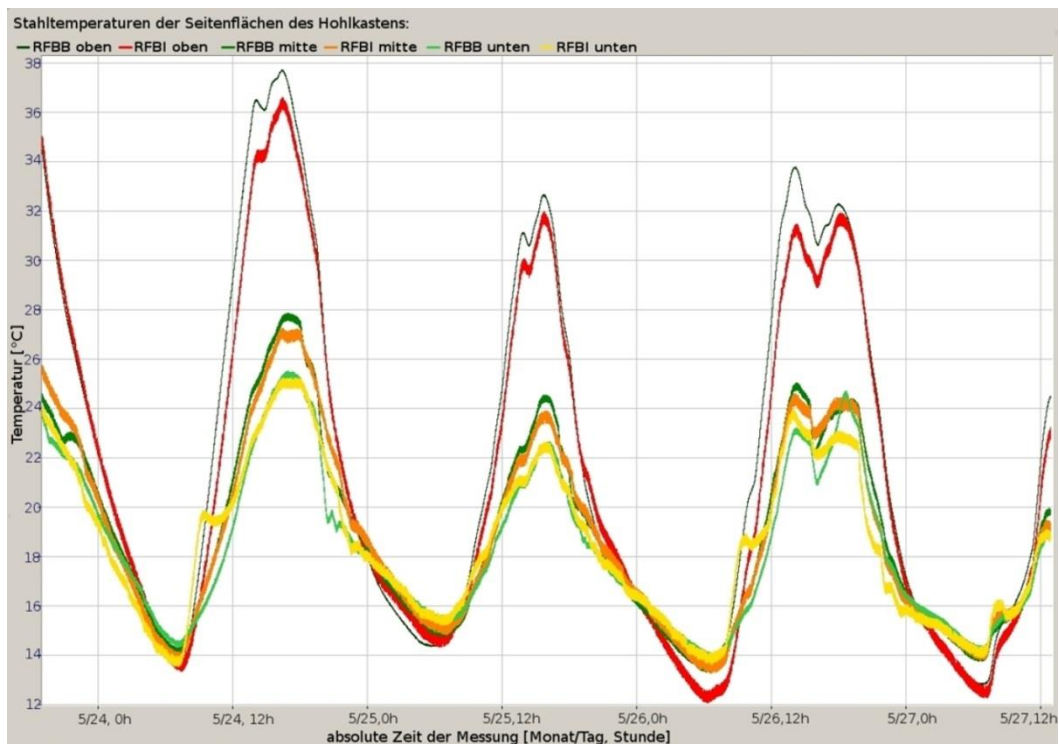


Bild 141: Messzeitraum KW 21: Vergleich zwischen den Messkanälen der Südseite (RFB Innsbruck) und der Nordseite (RFB Brenner) – Horizontale Temperaturgradiente

Beide Beobachtungsrichtungen wurden schließlich im Rahmen umfassender Auswertungen eines ausgedehnten, repräsentativen Zeitfensters von 14 Monaten (27.05.2007 13:10 - 14.09.2008 23:50) aufbereitet und interpretiert (Details siehe **Abschnitt 14.1** sowie [58]).

13.7 Meteorologische Einwirkungsgrößen

Zusammen mit der Videokamera wurde in der Nähe des Widerlagers Schönberg auch eine ergänzende meteorologische Mess-Station installiert. Dabei wurde je ein Gerät zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit (siehe **Bild 125** – links neben dem roten Kreis) und der Strahlungsintensität (siehe **Bild 125** - rechts neben dem roten Kreis) aufgebaut. Die Geräte lieferten durchgehend Daten für den Zeitraum der Sondermessung 22.05.2007 (Dienstagabend) bis 27.05.2007 (Sonntag-Mittag).

13.7.1 Erste Auswertungen und Analysen

In Hinblick auf ein besseres Verständnis der meteorologischen Zustandsgrößen wurden die Strahlungsintensität und die Luftfeuchtigkeit zusammen mit der gemessenen Hohlkasten-Innentemperatur (Luft) dargestellt. Letztere wurde von der Dauermessanlage Europabrücke (**Bild 8**) erfasst und hier hinzugezogen. Der augenscheinlich auftretende Versatz zwischen den Hoch- und Tiefpunkten der jeweiligen Verläufe (Hohlkasten-Innentemperatur und meteorologische Zustandsgrößen außerhalb des Hohlkastens) hängt damit zusammen, dass der Temperaturgang im Hohlkasten mangels Luftaustausch oft bis zu drei Stunden zeitversetzt zum Temperaturverlauf der Außenluft verläuft. Qualitativ ist aber jedenfalls eine deutliche Korrelation festzustellen (steigende Strahlungsintensität bedingt steigende Temperaturen bei reduzierter Luftfeuchtigkeit und umgekehrt - siehe **Bild 142**).

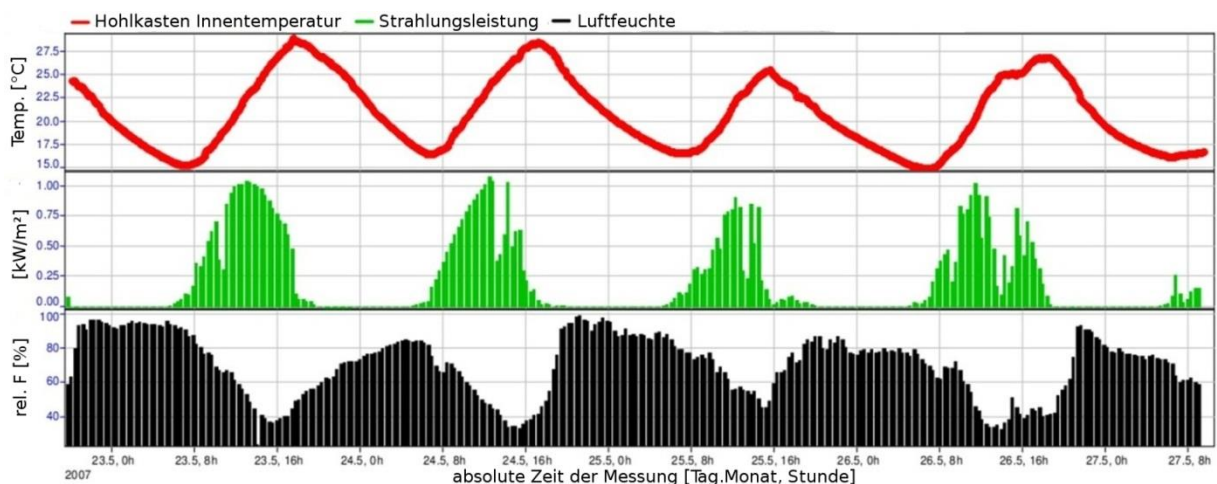


Bild 142: Messzeitraum KW 21: Vergleich zwischen der Temperatur im Hohlkasten (rot), der Strahlungsintensität (grün) und der relativen Luftfeuchtigkeit (schwarz)

14 ANHANG 6: INTEGRALE AUSWERTUNGEN UND ANALYSEN ZUR SONDERMESSUNG 2007 IM HINBLICK AUF RECHNERISCHE FRAGESTELLUNGEN ZUR NUTZUNGSDAUER MASSGEBLICHER BAUTEILE

- **EINFLUSS DER NICHTLINEAREN TEMPERATUREINWIRKUNG AUF DEN BRÜCKENQUERSCHNITT**
- **TEMPERATUR-KOMPENSATION**
- **ZUSTANDSGRÖSSE-ÜBERGREIFENDE VERIFIZIERUNG DER BETRIEBSBEANSPRUCHUNG**

Im Rahmen des **Kapitels 13** wurden die Grundlagen zur Aufarbeitung der realen, messtechnisch erfassten Betriebsbeanspruchung geschaffen, indem die konzipierte Sondermessung zur Betrachtung der drei definierten, maßgeblichen Bauteilebenen dargelegt wurde sowie ein erster Ausblick bezüglich der Verwertung der Daten gegeben wurde.

Im Folgenden soll nun eine vertiefte Auseinandersetzung in Form von Auswertungen und Interpretationen der Messdaten erfolgen. Als grundlegenden Sachverhalt gilt es vorneweg die Bedeutung der Temperatur zu erörtern, wobei dabei zwischen

- dem direkten Einfluss, d.h. der expliziten Beanspruchung des Tragwerks (Lastfall Temperatur – **Kapitel 14.1**)

sowie

- dem indirekten Einfluss, d.h. deren Implikation in den Messdaten (**Kapitel 14.2**)

zu unterscheiden ist.

14.1 Einfluss der nichtlinearen Temperatureinwirkung auf den Brückenquerschnitt

Die Analyse sämtlicher - aus dem Feldversuch entnommener und langfristig beobachteter - Zustandsgrößen am Brückentragwerk zeigt eine durchgehend erkennbare und mitunter ungewöhnlich starke Korrelation mit der Temperatur.

- ❖ Daher wurde ursprünglich - entgegen der überwiegenden Annahmen in der Literatur – ein so genannter Mittelspannungs-Einfluss unterstellt. Das heißt man ging davon aus, dass die beobachteten, erzwungenen Lasten (Zwangsverdrehung aus Sonneneinstrahlung + Zwangsverformung aus allmählich eingebrachter Schwerverkehrseinwirkung) zusätzlich zur ohnehin bereits beachtlichen dynamischen Verkehrsbelastung in den Diagonalstreben wesentlich ungünstigere Beanspruchungszustände hervorrufen.
- ❖ Daraus ergibt sich insofern ein Widerspruch zur Ermüdungstheorie als diese voraussetzt, dass in geschweißten Anschlussdetails seit der Herstellung der Nähte Eigenspannungen vorliegen, die in ihrem Betrag der Größenordnung der Fließgrenze entsprechen. Daher werden diese Anschlüsse im Gegensatz zu ungeschweißten Bauteilen üblicherweise auch unabhängig von der Mittelspannung auf Ermüdungsgefährdung hin analysiert.
- ❖ Unter der Annahme, dass nach über 40 Betriebsjahren diese Schweißnahtzwänge aus den Eigenspannungen zumindest bis zu einem gewissen Grad abgebaut sind, könnten derart

analysierte Anschlussdetails in weiterer Folge tendenziell wie ungeschweißte Bauteile mit entsprechender Mittelspannungsabhängigkeit angesehen werden. Ein etwaiger Sonnenstrahlungs-bedingter Zwangseintrag würde so automatisch entsprechende Bedeutung erlangen.

- ❖ **Der EC 1, Teil 1-5:** Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen empfiehlt, **linear veränderliche Temperaturanteile** in der Vertikale mit **bis zu 20°C** anzusetzen, während **horizontal lediglich 5°C** zu verwenden wären. Wie aus [58] hervorgeht, treten während eines vollständig durch **Messung** erfassten Jahreszyklus (**Mai 2007-September 2008**) am Temperaturprofil **vereinzelt vertikale Gradienten von bis zu 16°C** auf, wodurch die Grenzwerte der Normempfehlung nicht erreicht werden. Allerdings treten am Temperaturprofil **vereinzelt horizontale Gradienten von bis zu 18°C** auf, was die Grenzwerte der Normempfehlung bei weitem übersteigt (siehe [58]) und daher die ursprüngliche Postulierung als eventuell maßgebliche Komponente rechtfertigt.
- ❖ Um diese Tatsache hinsichtlich Ihrer **Auswirkung auf die wirksamen Normalkräfte** zu evaluieren, sei auf **Kapitel 14.2.3** bzw. neuerlich auf [58] verwiesen. Dort zeigt sich, dass das **tatsächliche Zug- und Druckkraftaufkommen infolge Schwerverkehr** sich in einer Bandbreite von **±80 kN** bewegt (= **Amplitude von 160kN**), während sich der Einfluss der **Zwängung infolge Temperatureinwirkung** auf **Amplituden von höchstens 40 kN beschränkt** bleibt. Mit anderen Worten treten etwaige - durch Sonneneinstrahlung bedingte - Normalkräfte im ungünstigsten Fall mit **maximal 1/4 der Schwerverkehrs-bedingten Beträge** auf. Im Rahmen der analytischen Schädigungsrechnung an einzelnen Bauteilen [58] wird sich zeigen, dass der direkte Lasteintrag infolge Schwerverkehr bereits eine derart dominante & entscheidende Rolle spielt, dass die ursprüngliche Bedeutung der Einflussgröße Temperatur stark relativiert und daher in weiterer Folge für die Berechnungen der Bauteil-Nutzungsdauer vernachlässigt wird.

14.2 Temperatur-Kompensation

Anhand der gewonnenen Daten konnte ein durchgängiger Temperatureinfluss auf das Tragwerk bzw. auf alle gemessenen Zustandsgrößen festgestellt werden. Dieser kann einführend besonders veranschaulicht werden, wenn man den Verlauf der laser-basierten Vertikalverformung ganzer Brückenfelder den Verläufen der meteorologischen Daten gegenüberstellt (siehe **Bild 143**).

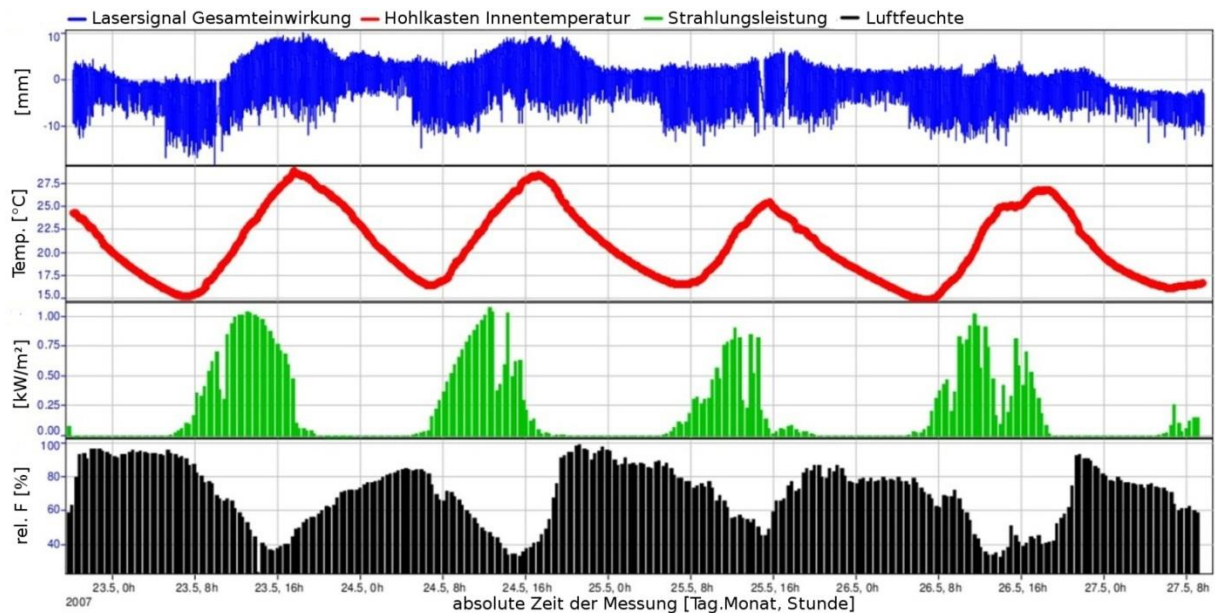


Bild 143: Ein Vergleich der Laserdaten (blau) mit der Hohlkasten Luft-Temperatur (rot) sowie Strahlungsleistung (grün) und Luftfeuchte (schwarz); **22.05.2007 20:11 - 27.05.2007 09:40**

Nachdem ursprünglich vermutet wurde, dass beide Hauptparameter (Verkehr, Umwelteinwirkungen) von entscheidendem Einfluss auf die berechnete Bauwerksalterung sein würden, war ein zweistufiges Vorgehen angedacht.

- ❖ Zunächst hätte die Konsequenz von exklusiver Verkehrseinwirkung auf das Ermüdungsverhalten ausgewählter Schwachstellen des Tragwerkes ermittelt werden sollen.
- ❖ Danach sollte aus der eingetragenen Zwängungs-Beanspruchung infolge Sonnenbestrahlung ein etwaiger Mehranteil für das Schädigungspotential bewertet werden.

Aus den im vorangehenden **Abschnitt 14.1** dargelegten Gründen konnte von der Berücksichtigung der klimatischen Einflüsse im Rahmen der Schädigungsanalysen Abstand genommen werden.

Die gewonnenen Messdaten wurden - sofern von der Temperatur beeinflusst - um diese Einwirkung bereinigt, wodurch die maßgeblichen Analysen ausschließlich auf die Bauteil-Beanspruchung infolge des Schwerverkehrs konzentriert werden können.

14.2.1 Globale Tragwerksverformung

Für eine isolierte Betrachtung der Durchbiegung infolge des Schwerverkehrs ist die Verformungsfunktion auf eine neue Nulllage zu nivellieren, indem der geglättete, allmähliche Zeitverlauf der gemessenen Verformung vom Rohsignal subtrahiert wird. Dadurch wird die Reaktion des Tragwerks infolge Verkehrsbelastung aus der Gesamtbelastung herausgelöst und als vordergründige Einflussgröße auf das Brückentragwerk dargestellt.

Bild 144 gibt einen Gesamtüberblick über den Verlauf der globalen Brückenverformung im Randfeld V während der Sondermessung 2007 (siehe **Kapitel 13**). In roter Farbe zu sehen ist die Reaktion des untersuchten Brückenfeldes zufolge Wechselbeanspruchung (Verkehr). Dabei liegen die dynamischen Durchbiegungen (d.h. statische Durchbiegungen samt dynamischer Vergrößerung) im Bereich von bis zu -17,1 mm (d.h. nach unten) sowie bis zu +4,7 mm (d.h. nach oben). Das Signal hat eine stark ausgeprägte Asymmetrie nach unten (in Belastungsrichtung) welche sich unter der vorherrschenden Verkehrseinwirkung auf das Tragsystem einstellt. Die sich aus dem Verkehrsverlauf ergebende Bandbreite (Verformungs-Amplitude in **Bild 144 unten**) liegt bei rund 22 mm, während die Amplitude aus der Gesamtreaktion (**Bild 144 oben**) für denselben Zeitraum bei rund 28 mm liegt. Wie **Bild 144** zeigt, stellt die Verkehrseinwirkung daher die Hauptkomponente der Einwirkungen dar, während die restlichen Anteile der Gesamtbelastung sich aus den kurz- und längerfristig aufbauenden und schließlich wieder freigegebenen Zwangseinträgen ergeben (Einflüsse der Umgebungstemperatur, Sonnen-Einstrahlung, Wind, mitschwingende Masse, Energieeintrag).

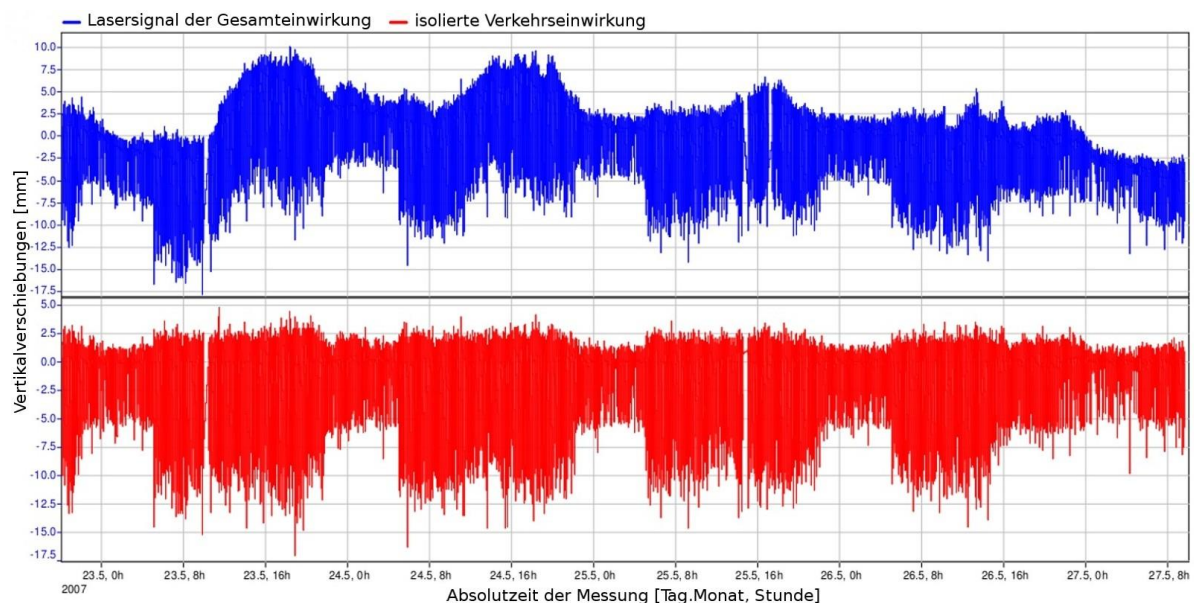


Bild 144: Verkehrsbedingte Verformungsreaktion (rot) – isoliert aus der temperaturbeeinflussten Gesamteinwirkung (blau) auf das **Brückenrandfeld V** (WL Schönberg); **22.05.2007 20:11 - 27.05.2007 09:40**

Erweiternd gibt **Bild 145** einen Gesamtüberblick über den Verlauf der bereits von 19. - 20.05.2005 gemessenen globalen Brückenverformung im Brückenhauptfeld II (es handelt sich hierbei um den im Abschnitt **13.3** erwähnten Pilotversuch). Dieser ist qualitativ sehr gut mit **Bild 144** vergleichbar. Für die **isolierte - auf die Nulllage nivellierte - Verformungsreaktion** zufolge Wechsellasten (Verkehr) in roter Farbe liegen die dynamischen Durchbiegungen (d.h. statische Durchbiegungen samt dynamischer Vergrößerung) im Bereich von bis zu -56,6 mm (d.h. nach unten) sowie bis zu +13,2 mm (d.h. nach oben). Das Signal hat wiederum eine stark ausgeprägte Asymmetrie nach unten, sprich in Belastungsrichtung. Die sich aus der Verkehrs-Einwirkung ergebende Bandbreite (Verformungs-Amplitude in **Bild 145 unten**) liegt bei rund 70 mm, während die Amplitude aus der Gesamteinwirkung (**Bild 145 oben**) für denselben Zeitraum bei rund 131 mm liegt. Die Verkehrsbelastung stellt hier neuerlich die Hauptkomponente der Einwirkungen für das Brückenhauptfeld dar, während der restliche Anteil sich aus den über mehrere Stunden aufbauenden und schließlich wieder freigegebenen Zwängen infolge Umwelteinwirkungen zusammensetzt (überwiegend Temperatur- und Strahlungseinflüsse).

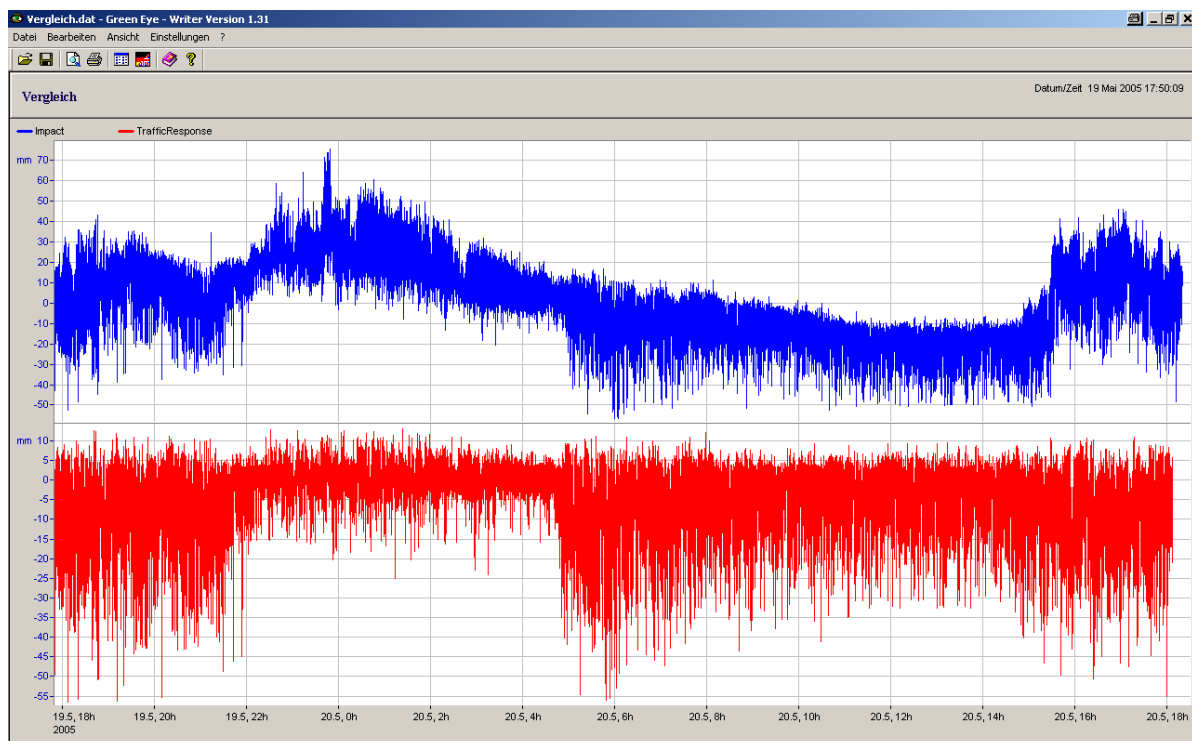


Bild 145: Verkehrsbedingte Verformungsreaktion (*unten*) – isoliert aus der Gesamteinwirkung (*oben*) für das **Brückenhauptfeld II; 19.05.2005 18:00 - 20.05.2005 18:00**

Bild 146 steht stellvertretend für die allererste Messung dieser Art (ausgewählter Feiertag im Dezember 2004) in einer danach konsequent fortgeführten Messreihe (**Bild 145** bzw. **Bild 144**) und gibt einen Gesamtüberblick über den Verlauf der globalen Brückenverformung – neuerlich im

Hauptfeld. Die dynamischen Durchbiegungen (d.h. statische Durchbiegungen samt dynamischer Vergrößerung) liegen im Bereich von + 6,4 mm bis zu – 26,3 mm.

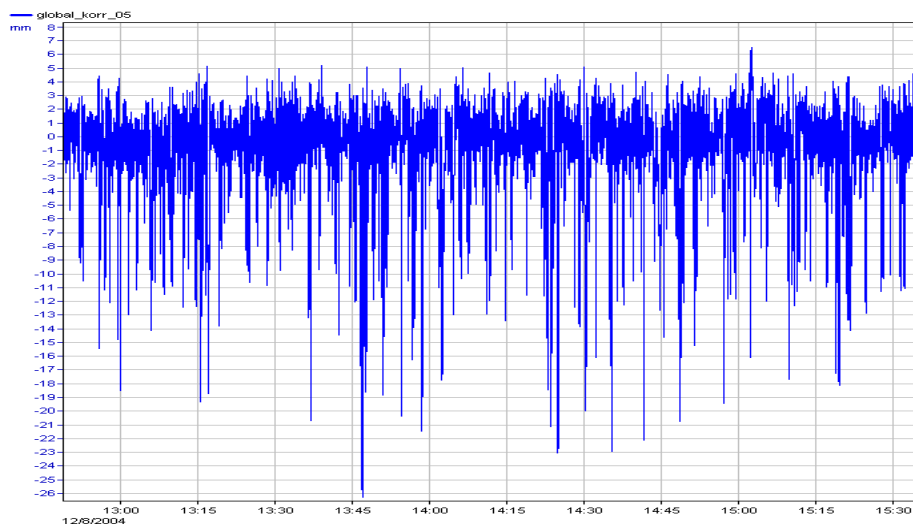


Bild 146: Verkehrsbedingte Verformungsreaktion des Brückenhauptfeldes; **08.12.2004 13:00 - 15:30**

Im Regelbetrieb wird die vorliegende Spannweite des Hauptfeldes von 198m üblicherweise von mehreren LKWs gleichzeitig befahren, wodurch eine Identifikation einzelner Überfahrten nicht immer möglich ist. Im vorliegenden Fall wurde die Messung aber an einem Feiertag (08.12.2004 – Maria Empfängnis) durchgeführt, an welchem bis auf wenige Ausnahmen ein LKW-Fahrverbot gilt. Gerade dieser davon ausgenommene Verkehr ermöglichte aber überhaupt erst eine konsistente Überprüfung auf qualitative und quantitative Plausibilität.

Zur mechanischen Verifizierung des auftretenden Signals (z.B. durch **Bild 147**) sei angemerkt, dass die Größenordnung der statischen Durchbiegung unter der Belastung eines 30t-LKWs (entspricht der durch DYGES vorliegenden, durchschnittlichen LKW-Einheit – siehe **Tabelle 7; Kapitel 4.2.3**) am Aufstellungsort-Feldmitte rechnerisch bei 12mm liegt.

Ergänzend zur quantitativen Richtigkeit (Absolutbeträge der Verformung) sollte gerade beim Pilotversuch 2004 auch der qualitative Verlauf genauer betrachtet werden. Die zugehörige Visualisierung bestätigt die richtige Erfassung des Systemverhaltens. Konkret herausisolierte Einzelereignisse mit einer Dauer von 15-20 sec entsprechen bei der vorliegenden Feldlänge von 198 m Geschwindigkeiten von einzeln überfahrenden Schwerverkehrs-Einheiten von 40-50 km/h. Dieser Umstand korrespondiert unmittelbar mit der am Autobahnabschnitt verhängten Geschwindigkeitsbeschränkung von 40 km/h für Schwerverfahrzeuge.

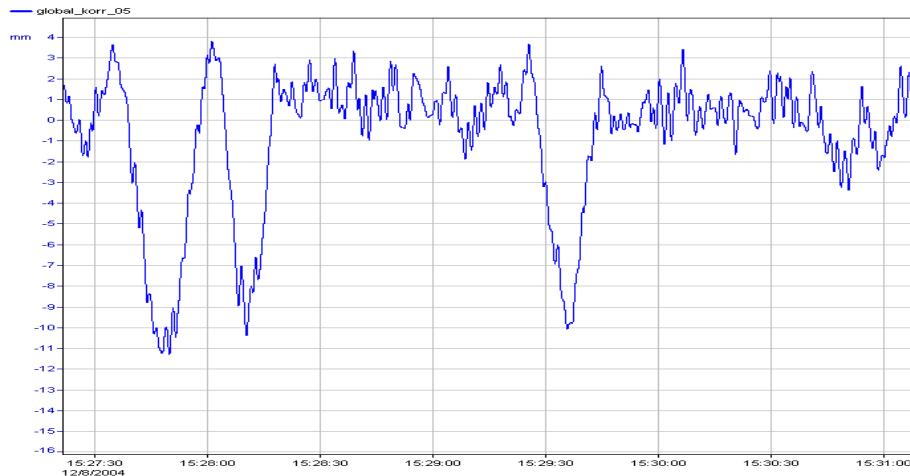


Bild 147: Identifikation von Einzelereignissen aus dem Gesamtsignal in **Bild 146**

Nach erfolgreicher Realisierung dieses Pilotversuches galt es – wie bereits vorweggenommen - die Aussagekraft der erhaltenen Ergebnisse durch wiederholende, gleichartig, durchgeführte Folgemessungen zu bestätigen und zu erweitern, d.h. eine Messreihe im Sinne der applizierten Instrumentierung zu erzeugen. Deren Durchführung und zugehörige Detailspekte liegen durch die **Kapitel 13.3** (Beschreibung der Messaufgabe) sowie durch den aktuellen **Abschnitt 14.2.1** (Beschreibung der Ergebnisse) vor.

14.2.2 Durchbiegung am Kragarm (über dem Pfeiler II)

Für die Auswertung der dynamischen Gewichterfassung spielt die Temperatur insofern keine Rolle, als der DYGES-Algorithmus bereits eingangs für jedes aufgezeichnete File (Länge jeweils 330 sec) jeweils eine Offset-Bereinigung vorsieht und die Messdaten so von einem Einfluss der Temperatur befreit werden.

14.2.3 Örtliche Beanspruchung der Querverbände

Auch bei der Auswertung der Dehnmessstreifen (DMS) muss der Temperatureinfluss auf die gemessenen Zustandsgrößen berücksichtigt und kompensiert werden. Dieser wird am deutlichsten sichtbar, wenn die Signale der einzelnen DMS nicht wie in **Bild 138** einzeln untereinander, sondern gemeinsam (überlappend) dargestellt werden (**Bild 148** und **Bild 149**). Die DMS liefern prinzipiell Dehnungen, wurden aber für eine bessere Verständlichkeit und Weiterverwertbarkeit im Zuge der Signalverarbeitung bereits in Normalkräfte umgerechnet. Dies geschah – unter Vorwegnahme der Beschreibung in **Abschnitt 14.3.1** - durch Multiplikation der Originaldaten mit dem E-Modul und der beim Lastabtrag wirksamen Querschnittsfläche. Je nach Position des betrachteten DMS wird entweder die Vierkant-Fläche der Diagonalstrebe oder der Querschnitt des Knotenblechs angesetzt.

Aus der zur Verfügung stehenden Plandokumentation der Europabrücke geht hervor, dass die Stahlsorten St 37 t, St 44 t und Alfort verwendet wurden, daher wird der E-Modul einheitlich mit 210.000 N/mm² angenommen.

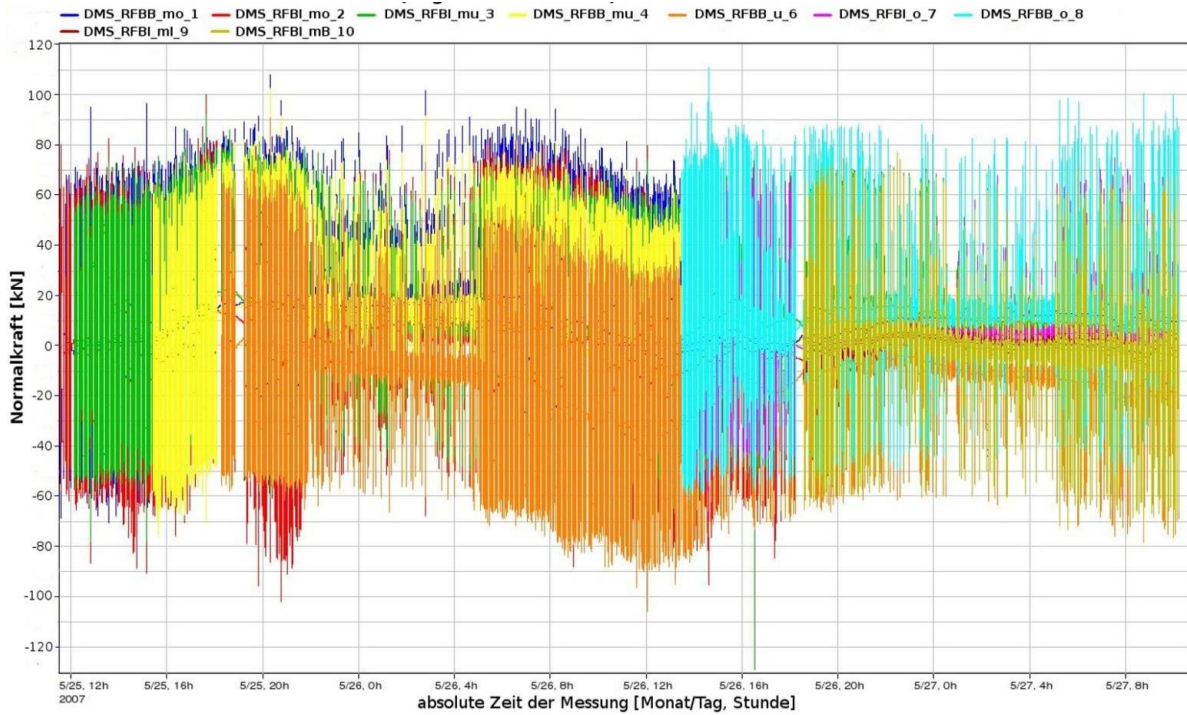


Bild 148: Originalverläufe zur Dehnmessstreifen-Messung samt Temperatureinfluss [kN]

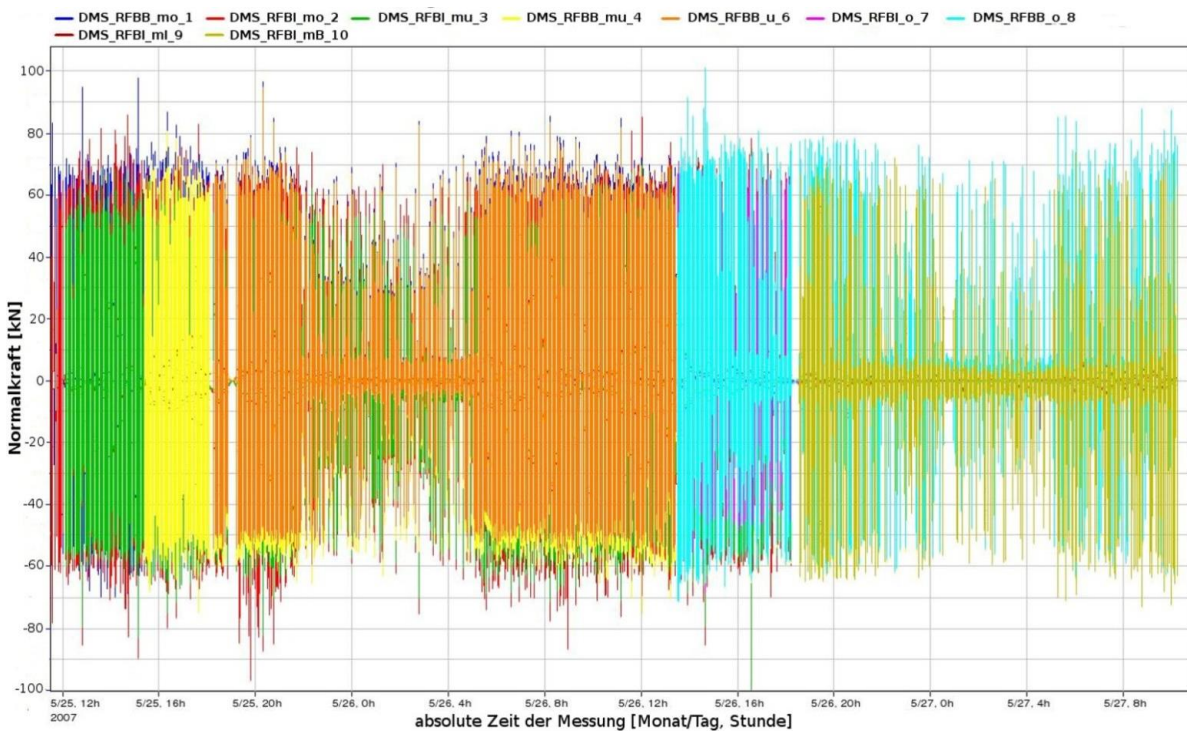


Bild 149: Daten der Dehnmessstreifen-Messung übereinander gelegt und temperaturbereinigt [kN]

Das Nivellieren des Beanspruchungsverlaufes (Beibehalten des Schwerverkehrseinflusses bei gleichzeitigem Herauslösen des allmählichen, langwelligen Zusatzeinflusses infolge Umweltbedingungen) wurde gleichartig zur Lösung für den laser-basierten Verformungsverlauf ganzer Brückenfelder (**Kapitel 14.2.1**) vorgenommen.

14.3 Zustandsgröße-übergreifende Verifizierung der Betriebsbeanspruchung

Zur detaillierten Auswertung der Daten des mit Dehnmessstreifen instrumentierten Querverbandes wurde eigens ein Tabellenblatt erstellt (MS Excel), mit welchem von den gemessenen, lokalen Dehnungen ($\mu\text{m}/\text{m}$) auf die wirksamen Streben-Normalkräfte (kN) geschlossen werden kann. Dazu wurden in erster Linie die in Streben-Mitte angebrachten DMS herangezogen (d.h. die Bereiche gleichmäßigen Kraftflusses - **Bild 135**).

Zusätzlich wurden anhand der Dehnmessstreifen in Streben-Mitte (RFBI_mo und _mu sowie RFBB_mo und _mu) die Biegemomente in der Ebene des Querrahmens ermittelt. Mit den zwei Dehnmessstreifen, die noch zusätzlich an den Seitenflächen der Strebe Richtungsfahrbahn (RFB) Innsbruck angebracht wurden (RFBI_mB und _ml), konnte auch das gleichzeitige Biege-Verhalten der Strebe aus der Ebene beschrieben werden.

Bei jenen Dehnmessstreifen, die an den oberen und unteren Knotenblechanschlüssen angebracht wurden, darf die dort ermittelte Normalkraft jedoch nur als Näherung betrachtet werden, da die für deren Berechnung angesetzte, wirksame Last-Übertragungsfläche natürlich nicht genau bekannt ist, sondern nur abgeschätzt werden kann.

Verwendet wurden diese Auswerteformulare im Rahmen einer umfassenden, Zustandsgrößen-übergreifenden Analyse der maßgeblichen Messgrößen im Sinne der bereits mehrfach dargelegten Betrachtung der drei Bauteilebenen der Lastabtragung

- Bauteilebene I - Haupttragwerk
- Bauteilebene II - Brückenkragarme
- Bauteilebene III - Lokale Diagonalstreben-Anschlüsse

Daher erfolgte diese Art der Analyse konsequenter Weise im Zuge der Beobachtung und Verifizierung aller wesentlichen Belastungsszenarien. Zu sehen ist dies exemplarisch im nachfolgenden **Kapitel 14.3.2 (Bild 160 bis Bild 162)** sowie in ausführlicherer Form in [58].

14.3.1 Festgelegte Konvention hinsichtlich der DMS-basierten Auswertung der Querverbände

Nach Kompensation des Temperatureinflusses aus den gemessenen Dehnungsgrößen (**Kapitel 14.2.3**) erfolgte eine detaillierte Auswertung der einzelnen Dehnmessstreifen. Wie im Abschnitt zuvor gerade ausgeführt wurde, konnte dabei neben der Normalkraftbeanspruchung mit Hilfe des in MS Excel erstellten Tabellenblattes auch die Biegemomenten-Bbeanspruchung in Streben-Mitte ermittelt werden. In Hinblick auf eine eindeutige Handhabung der Wirkungsweise der dabei ermittelten Schnittgrößen wurden vier maßgeblichen Beanspruchungsszenarien festgelegt, welche - durch die nachfolgenden Abbildungen veranschaulicht – definiert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Normalkraft N in der Strebe positiv ist, wenn die Fasern an der Strebenober- und unterseite einheitlich gezogen werden. Das Biegemoment wird dann als positiv angesehen, wenn die obere Faser gedrückt und die untere Faser gezogen wird. Die Strebe biegt sich dadurch nach unten durch (**Bild 150**).

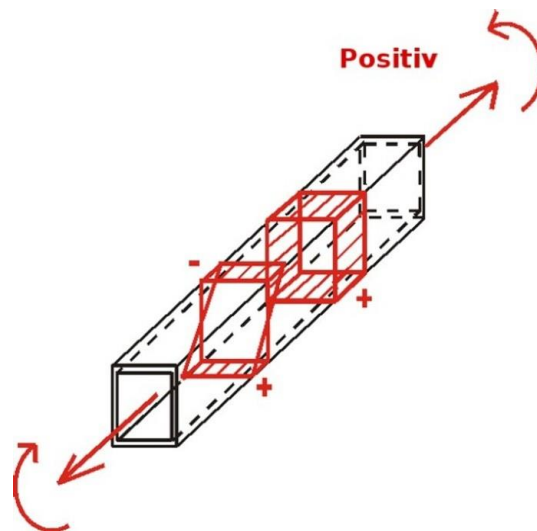


Bild 150: Definition der positiven Wirkungsweise der zu ermittelnden Schnittgrößen

Szenario I (Bild 151) tritt dann auf, wenn die Normalkräfte positiv sind, das Biegemoment jedoch negativ ist. Dies ist besonders häufig bei einer einseitigen Überfahrt durch einen einzelnen LKW über die unmittelbar zu dieser Fahrtrichtung gehörenden Strebe am instrumentierten Querschnitt zu beobachten (**Bild 155** bzw. **Kapitel 14.3.2.1**). Durch die Verdrehungsreaktion im Sinne eines biegesteifen Rahmenecks im Zuge der vertikalen Belastung des Kragarmes durch den überfahrenden LKW wird in der Strebe Zug erzeugt - die Strebe wölbt sich dabei nach oben.

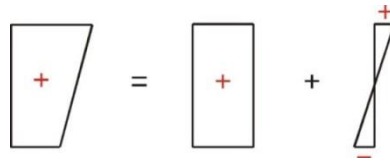


Bild 151: Definition der Wirkungsweise der einwirkenden Schnittgrößen, **Szenario I**

Die nachfolgenden Szenarien können nicht mehr ohne weiteres mit einer speziellen Belastungskonfiguration verknüpft werden, denn sobald sich mehrere Fahrzeuge gleichzeitig auf dem Brückenfeld in der Nähe des instrumentierten Querschnittes bewegen, ist aus der alleinigen Beobachtung der Schnittgrößen keine eindeutige Zuordnung zu den definierten Szenarien mehr möglich.

Bei **Szenario II (Bild 152)** sind sowohl die Normalkräfte als auch das Biegemoment positiv.

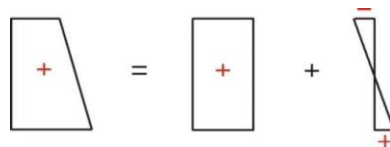


Bild 152: Definition der Wirkungsweise der einwirkenden Schnittgrößen, **Szenario II**

Bei **Szenario III (Bild 153)** sind sowohl die Normalkräfte als auch das Biegemoment negativ.

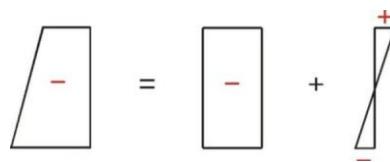


Bild 153: Definition der Wirkungsweise der einwirkenden Schnittgrößen, **Szenario III**

Szenario IV (Bild 154) tritt dann ein, wenn die Normalkräfte negativ sind, das Biegemoment aber positiv ist.

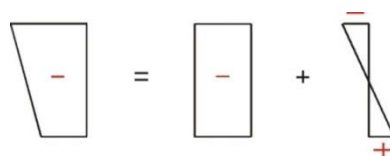


Bild 154: Definition der Wirkungsweise der einwirkenden Schnittgrößen, **Szenario IV**

Zum besseren Verständnis des Kraftflusses während einer LKW-Überfahrt wurden schematisch entlang des in Kapitel 13.5 eingeführten, instrumentierten Hohlkastenquerschnittes die auftretenden Dehnungen in $\mu\text{m}/\text{m}$ aufgetragen. **Bild 155** zeigt den besagten Querschnitt mit den Werten einer exemplarischen Überfahrt, im konkreten Fall eine LKW-Einzelüberfahrt in Fahrtrichtung Innsbruck. Die zugehörige Tabelle neben dem Querschnitt beinhaltet die einzelnen Sensoren mit den jeweiligen Dehnungswerten in $\mu\text{m}/\text{m}$ (Maximalwerte zum Ereignis). Die rechte Spalte zeigt das Verhältnis der einzelnen Sensoren in Bezug auf den ersten montierten Dehnmessstreifen (d.h. Referenzierung auf den in rot markierten Mess-Kanal RFBB_mo).

Verlauf der gemessenen Dehnungen über den instrumentierten Querschnitt

Datum/Uhrzeit: 20:10:33 26.05.2007

Laufkoordinate: 621m ab Widerlager Patsch
(36m von WL Schönberg)

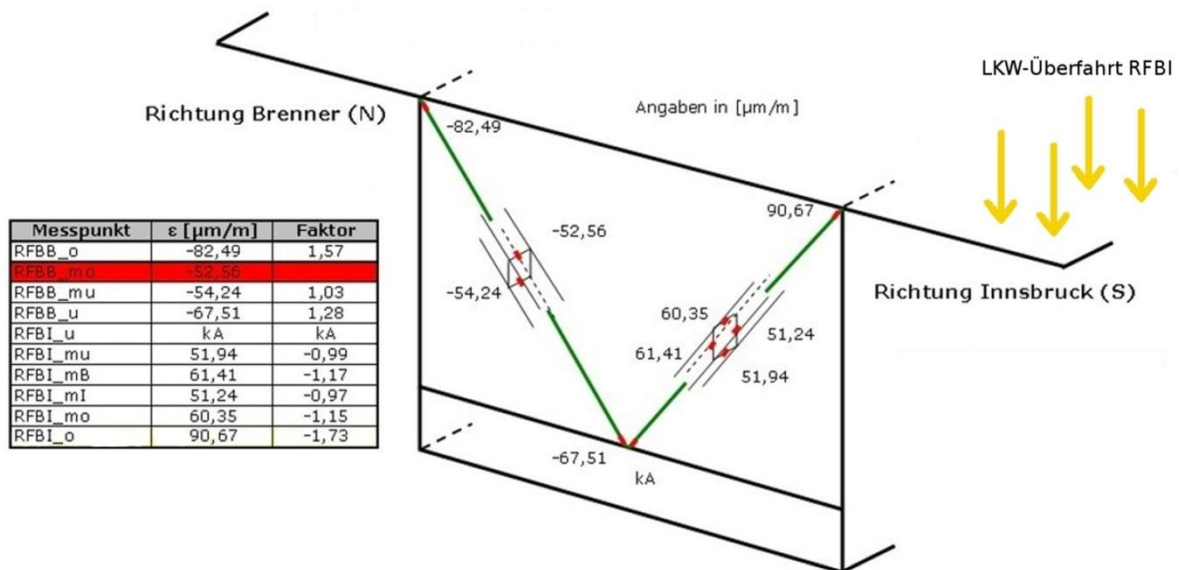


Bild 155: Visualisierung des Kraftflusses während einer exemplarischen Überfahrt mittels gemessener Dehnungen entlang des instrumentierten Querschnittes

Die unterschiedlichen Dehnungswerte, d.h. bei den Montagestößen (Knotenbleche) einerseits bzw. in Strebenmitte andererseits sind durch die unterschiedlich großen Querschnittsflächen an den einzelnen Stellen zu erklären. Die für die Kraftübertragung wirksame Fläche in Strebenmitte (Vierkant-Diagonale) ist natürlich größer als die der Knotenbleche.

Unglücklicherweise musste festgestellt werden, dass der DMS am unteren Anschluss der Diagonalstrebe auf der Seite der RFB Innsbruck durchgehend überproportional überhöhte und daher unplausible Werte lieferte. Da dies vermutlich auf einen Montagefehler zurückzuführen ist, wurde beschlossen, die Werte dieses DMS nicht zu verwenden.

Tatsächlich lässt sich nun anhand der bereits beschriebenen, ausgewählten LKW-Überfahrt (**Bild 155**) die Funktionsweise des Querrahmens bzw. die Lastableitung entlang des gesamten Querschnittes sehr gut nachvollziehen. Durch eine solche Überfahrt wird in der Strebe der befahrenen Seite Zugbeanspruchung (+) ausgelöst, die nach Übertragung zur unbefahrenen Seite (unterer Anschlussknoten des Querverbandes) in eine Druckkraft (-) übergeht. Am Vergleich der Dehnungen während dieser Überfahrt zeigt sich jedoch, dass bei der Kraftübertragung an den unteren Montageanschlüssen geringfügige „Verluste“ auftreten. Diese Abminderung der eingeleiteten Kraft lässt sich auf Montage-Imperfektionen und/oder den räumlich wirkenden Kraftfluss im Bereich der orthotropen Bodenplatte zurückführen. Am idealisierten Gedankenmodell des ebenen Fachwerksknotens würde die Übertragung der Normalkraft an diesem Knotenpunkt nur durch einen Wechsel des Vorzeichens, aber mit unvermindertem Betrag erfolgen.

Durch die anhand des gezeigten Kraftflusses gezeigte, vollständige Aktivierung des Torsionsverbandes bei Schwerverkehrs-Überfahrten kann von einer direkt und einer indirekt befahrenen Seite gesprochen werden. Das bestätigt auch einen Schlüsselaspekt im Rahmen der Interpretation zur Schwachstellenlokalisierung im Rahmen der Bewertung der Bauteilreihe Diagonalstreben (**Kapitel 10.3**) – nämlich, warum die Streben der Brücken-Randfelder bzw. im Widerlagerbereich in beiden Fahrtrichtungen in Mitleidenschaft gezogen werden. Ursache ist die in die Torsionsverbände induzierte dynamische Stoßbelastung infolge Schwerverkehr, wenn die LKWs von der Freilandstrecke (befestigter Straßenoberbau) auf das im Vergleich dazu relativ „weiche“ Brückentragwerk auffahren, wobei die Randfelder vom unmittelbaren Eintreffen der fahrenden Lasten überproportional betroffen sind.

Aufgrund der Montage der Dehnmessstreifen an Stellen mit gleichmäßiger Spannungsverteilung (wie der Streben-Mitte) können die gewonnenen Spannungswerte in weiterer Folge als Nennspannungen betrachtet werden. Um an den Montageanschlüssen der Streben ebenfalls von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung ausgehen zu können, wurden die Dehnmessstreifen - wie bereits in **Kapitel 13.5** erörtert - in einem Abstand von zweimal der Blechstärke des Knotenbleches von der Nahtwurzel entfernt angebracht.

14.3.2 Auswertung der häufigsten Belastungsszenarien

Anhand der Videoaufzeichnung wurden, wie in **Kapitel 13.2** bereits detailliert erläutert, die am häufigsten vorkommenden Belastungsszenarien des Brückenfeldes herausgearbeitet (**Tabelle 39**). Diese Szenarien sind die Grundlage für weiterführende Untersuchungen. Unter Einbeziehung der parallel gewonnenen Messdaten konnten die Auswirkungen für jede dieser Belastungs-Situationen

anhand der das primäre/sekundäre/tertiäre Tragverhalten abbildenden Zustandsgrößen analysiert werden.

Nachfolgend werden ausgewählte Szenarien aus dieser Untersuchung dokumentiert, indem das sich während dieser Belastungssituationen einstellende mechanische Verhalten in den 3 definierten Ebenen der Lastabtragung

Bauteilebene I - Haupttragwerk,

Bauteilebene II - Kragarme und

Bauteilebene III - Montageanschlüsse der Diagonalverbände

nachvollzogen und interpretiert wird. Anhand der einfachsten, vorkommenden Lastkonfiguration – der einzelnen LKW-Überfahrt - wird zunächst die genaue Vorgehensweise anschaulich erklärt (**Abschnitt 14.3.2.1**). Danach werden weitere, beispielhafte Belastungs-Szenarien in gleichartiger Art und Weise aber in reduziertem Umfang dargelegt (siehe **14.3.2.2** bis **14.3.2.5**). Eine äquivalente, detaillierte Datenaufbereitung zu diesen Belastungs-Szenarien ist in [58] zu finden.

14.3.2.1 Einzelüberfahrt Richtungsfahrbahn Innsbruck



Bild 156: Einzelüberfahrt eines LKWs auf der RFB Innsbruck am 26.05.2007 um 20:10:33 Uhr

Am Haupttragwerk (Bauteilebene I) ist das Ereignis mit 5,98mm Vertikalverformung deutlich im Laser-Signal zu erkennen (**Bild 157**). Einen LKW mit dieser Signifikanz kann man bereits vorab als „schweren LKW“ einstufen.

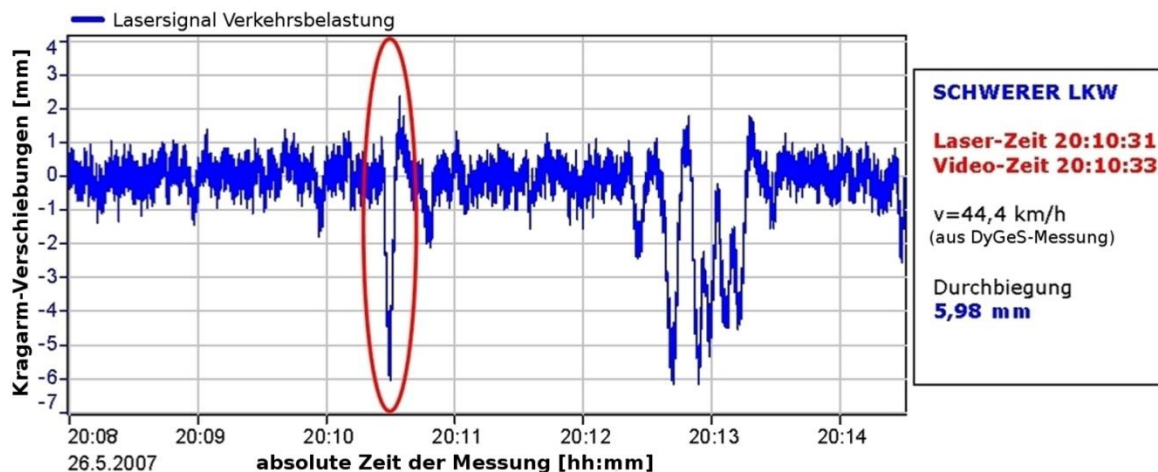


Bild 157: Der durch die Einzelüberfahrt erzeugte, Laser-basierte Durchbiegungsverlauf in mm - Bauteilebene I

Anhand der Bauteilebene II (Quertragverhalten) wird weitere Komplementärinformation bereitgestellt. Der DYGES-Messquerschnitt liefert die zum aktuellen Ereignis zugehörige Geschwindigkeit sowie anhand dieser und der gemessenen Beschleunigung am Kragarm mit Hilfe des DYGES-Algorithmus eine reproduzierte Kragarm-Durchbiegung. Zusätzlich wird mit Hilfe der anhand von Eichfahrten kalibrierten Auswerte-Tabellen die Tonnage des betreffenden LKWs generiert.

Im vorliegenden Fall fährt der beobachtete LKW bei einem Gewicht von 42,8t mit einer Geschwindigkeit von 44,4km/h und löst dabei eine Kragarm-Durchbiegung von 5,48 mm aus (siehe jeweils **Bild 158**).

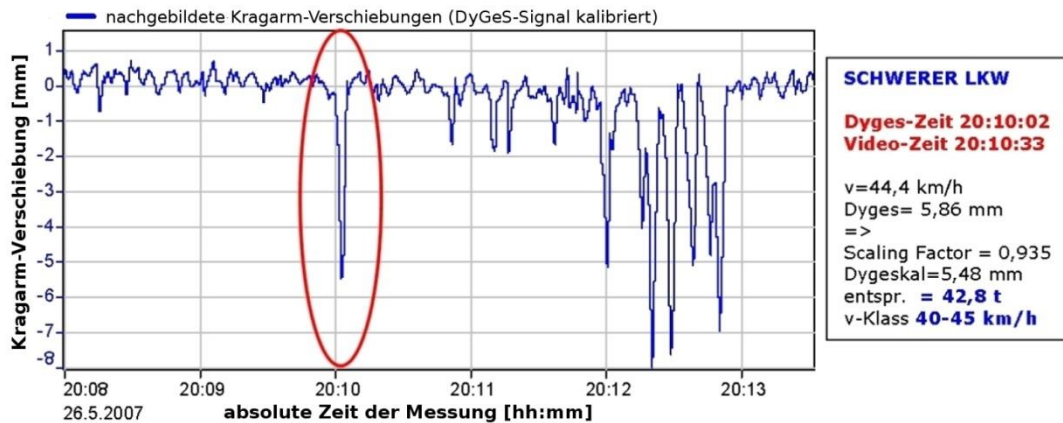


Bild 158: Das durch die Einzelüberfahrt erzeugte DYGES-Signal inklusive Auswertung - Bauteilebene II

In der Bauteilebene III werden aus den gemessenen Dehnungen die im Strebenverband auftretenden Kräfte erfasst, während der LKW den instrumentierten Querschnitt passiert. **Bild 159** zeigt zunächst die gemessenen Dehnungen der einzelnen Sensoren in $\mu\text{m}/\text{m}$.

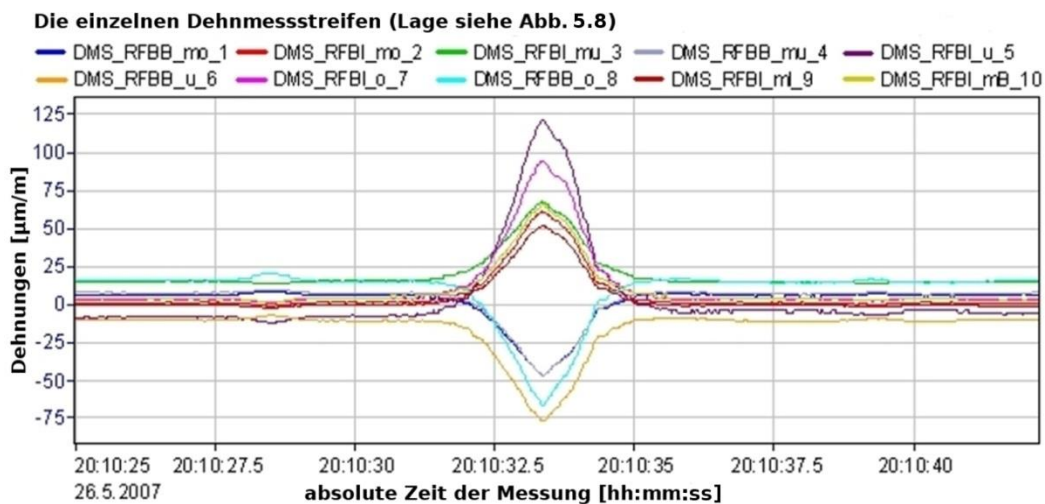


Bild 159: Die durch die Einzelüberfahrt erzeugten Dehnungen in $\mu\text{m}/\text{m}$ – Bauteilebene III

Diese werden dann mit Hilfe der vorgefertigten Auswerteformulare in Normalkräfte und Biegemomente umgerechnet. Gleichzeitig werden die generierten Streben-Spannungen auf Ihre jeweiligen Normalkraft- und Biegeanteile hin spezifiziert.

Bild 160 und **Bild 161** zeigen die Auswertung in der Querverbands-Ebene (in-plane). Dabei wird zunächst zwischen den beiden Seiten des Querverbandes unterschieden (Fahrtrichtung Innsbruck oder Brenner). Die Auswertung der einzelnen, ausgewerteten Streben erfolgt dann schrittweise für die einzelnen DMS-Sensorpositionen (Anschluss oben, Strebenmitte, Anschluss unten).

DMS - Auswertung (Sondermessung Mai 2007: V30 QV-N und S)

Lage DMS: Richtungsfahrbahn Innsbruck, oben

Uhrzeit: 20:10:33 26.05.2007

Bestimmung Spannung/Normalkraft

Laufkoordinate Strebe: 621m ab Widerlager Patsch (36m von WL Schönberg)

Dehnung ϵ = 90,67 $\mu\text{m}/\text{m}$
= 0,00009067 m/m

Spannung $\sigma = \epsilon \cdot E$ $E = 210000 \text{ N}/\text{mm}^2$
= 19,0407 N/mm^2

Normalkraft $N = \sigma \cdot A$

N = 57,58 kN $A = 3024 \text{ mm}^2$
wirksame Fläche zum Lastrabtrag (Näherung)
=> auch die hier ermittelte Normalkraft ist eine Näherung

Lage DMS: Richtungsfahrbahn Innsbruck, Strebenmitte, oben und unten

Bestimmung Normalkraft plus Biegeanteil in der Ebene

Dehnung ϵ_o = 60,35 $\mu\text{m}/\text{m}$ Spannung $\sigma_o = 12,6735 \text{ N}/\text{mm}^2$ $E = 210000 \text{ N}/\text{mm}^2$
= 0,00006035 m/m

Dehnung ϵ_u = 51,94 $\mu\text{m}/\text{m}$ Spannung $\sigma_u = 10,9074 \text{ N}/\text{mm}^2$ $A = 4656 \text{ mm}^2$
= 0,00005194 m/m

$\sigma_o = N/A - Mx/W_o$ + ... Zug
 $\sigma_u = N/A + Mx/W_u$ - ... Druck

$W_o = W_u = I/y$
 $I = 29233472 \text{ mm}^4$
 $y = 100 \text{ mm}$
 $W_o = W_u = 292334,72 \text{ mm}^3$

Durch Lösen 2er Gleichungen mit 2 Unbekannten ergibt sich für N und Mx:

N = 54,8963 kN
Mx = -0,25815 kNm

$\sigma_o = 12,6735 \text{ N}/\text{mm}^2$ $\sigma_u = 10,9074 \text{ N}/\text{mm}^2$

Normalkraftanteil:	11,79045	93,03 %	11,79045	108,10 %
Biegeanteil:	0,88305	6,97 %	-0,88305	-8,10 %

Diese Werte können dann einem der vier nachfolgenden Szenarios zugeordnet werden um genaueres über die Beanspruchung zu erfahren..

Lage DMS: Richtungsfahrbahn Innsbruck, unten

Bestimmung Spannung/Normalkraft

Dehnung ϵ = # WERT! $\text{kA } \mu\text{m}/\text{m}$
= # WERT! m/m

Spannung $\sigma = \epsilon \cdot E$ $E = 210000 \text{ N}/\text{mm}^2$
= # WERT! N/mm^2

Normalkraft $N = \sigma \cdot A$

N = # WERT! kN $A = 3356,8 \text{ mm}^2$
wirksame Fläche zum Lastrabtrag (Näherung)
=> auch die hier ermittelte Normalkraft ist eine Näherung

Bild 160: Dehnmessstreifen-Auswertung für die Diagonalstrebe Fahrtrichtung Innsbruck (in-plane observation)

DMS - Auswertung (Sondermessung Mai 2007: V30 QV-N und S)

Lage DMS: Richtungsfahrbahn Brenner, oben

Uhrzeit: 20:10:33 26.05.2007

Bestimmung Spannung/Normalkraft

Laufkoordinate Strebe: 621m ab Widerläuer Patsch (36m von WL Schönberg)

Dehnung ϵ = -82,49 $\mu\text{m}/\text{m}$
 = -0,00008249 m/m

Spannung $\sigma = \epsilon \cdot E$ $E = 210000 \text{ N}/\text{mm}^2$
 = -17,3229 N/mm^2

Normalkraft $N = \sigma \cdot A$

N = -52,38 kN

$A = 3024 \text{ mm}^2$
 wirksame Fläche zum Lastrabtrag (Näherung)
 => auch die hier ermittelte Normalkraft ist eine Näherung

Lage DMS: Richtungsfahrbahn Brenner, Strebenmitte oben und unten

Bestimmung Normalkraft plus Biegeanteil in der Ebene

Dehnung ϵ_o = -52,56 $\mu\text{m}/\text{m}$ Spannung $\sigma_o = -11,038 \text{ N}/\text{mm}^2$ $E = 210000 \text{ N}/\text{mm}^2$
 = -0,00005256 m/m

Dehnung ϵ_u = -54,24 $\mu\text{m}/\text{m}$ Spannung $\sigma_u = -11,39 \text{ N}/\text{mm}^2$ $A = 4656 \text{ mm}^2$
 = -0,00005424 m/m

$\sigma_o = N/A - Mx/W_o$ + ... Zug
 $\sigma_u = N/A + Mx/W_u$ - ... Druck

$W_o = W_u = I/y$
 $I = 29233472 \text{ mm}^4$
 $y = 100 \text{ mm}$

$W_o = W_u = 292334,72 \text{ mm}^3$

Durch Lösen 2er Gleichungen mit 2 Unbekannten ergibt sich für N und Mx:

N = -52,2124 kN

Mx = -0,05157 kNm

$\sigma_o = -11,0376 \text{ N}/\text{mm}^2$

$\sigma_u = -11,39 \text{ N}/\text{mm}^2$

Normalkraftanteil:	-11,214	101,60 %	-11,214	98,45 %
Biegeanteil:	0,1764	-1,60 %	-0,1764	1,55 %

Diese Werte können dann einem der vier nachfolgenden Szenarios zugeordnet werden um genaueres über die Beanspruchung zu erfahren.

Lage DMS: Richtungsfahrbahn Brenner, unten

Bestimmung Spannung/Normalkraft

Dehnung ϵ = -67,51 $\mu\text{m}/\text{m}$
 = -0,00006751 m/m

Spannung $\sigma = \epsilon \cdot E$ $E = 210000 \text{ N}/\text{mm}^2$
 = -14,1771 N/mm^2

Normalkraft $N = \sigma \cdot A$

N = -47,96 kN

$A = 3383,2 \text{ mm}^2$
 wirksame Fläche zum Lastrabtrag (Näherung)
 => auch die hier ermittelte Normalkraft ist eine Näherung

Bild 161: Dehnmessstreifen-Auswertung für die Diagonalstrebe Fahrtrichtung Brenner (in-plane observation)

Zusammenfassend kann also anhand der in **Bild 160** und **Bild 161** ausgewerteten Daten für das vorliegende Belastungsszenario festgehalten werden, dass der mit einem identifizierten Gewicht von 42,8t auftretende LKW bei einer Überfahrts-Geschwindigkeit von 44,4km/h über den instrumentierten Querverband auf der direkt befahrenen Seite rund 55kN an Zugkraft in der Strebe erzeugt. Zusätzlich wirkt ein Moment mit -0,26kNm. Der Kraftfluss innerhalb des Querverbandes führt auf der indirekt belasteten Strebe zu einer Druckkraft von zirka 52kN bzw. zu einem Biegemoment von -0,05kNm.

Bei den ermittelten Kräften sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die angenommenen Normalkräfte an den beiden Knoten-Anschlüssen (oben und unten) nur als Näherung aufgefasst werden sollten, da auch die wirksame Fläche zum Lastabtrag nur eine Näherung darstellt. In Strebenmitte sind die Angaben für die wirksame Fläche gegeben und somit kann auch die gewonnene Normalkraft in Ihrer Größenordnung als zuverlässig angesehen werden.

DMS - Auswertung (Sondermessung Mai 2007: V30 QV-N und S)

Lage DMS: Richtungsfahrbahn Innsbruck, Strebenmitte, seitlich (Innsbruck + Brenner) **Uhrzeit:** 19:28:05 26.05.2007

Bestimmung Normalkraft plus Biegeanteil aus der Ebene **Laufkoordinate Strebe:** 621m ab Widerlager Patsch (36m von WL Schönberg)

Dehnung ϵ_B 61,41 $\mu\text{m/m}$ = 0,00006141 m/m	Spannung $\sigma_B =$ 12,896 N/mm ²	E = 210000 N/mm ²
Dehnung ϵ_T 51,24 $\mu\text{m/m}$ = 0,00005124 m/m	Spannung $\sigma_T =$ 10,76 N/mm ²	A = 4656 mm ²

$\sigma_B = N/A - My/W_B$	+ ... Zug	
$\sigma_T = N/A + My/W_T$	- ... Druck	

$W_B = W_T = I/y$
 $I = 29233472 \text{ mm}^4$
 $y = 100 \text{ mm}$
 $W = 292334,72 \text{ mm}^3$

Durch Lösen der Gleichungen mit 2 Unbekannten ergibt sich für N und Mx:

N = 55,0723 kN		
My = -0,31217 kNm		

$\sigma_B =$ 12,8961 N/mm ²	$\sigma_T =$ 10,7604 N/mm ²	
--	--	--

Normalkraftanteil: 11,82825	91,72 %	11,82825	109,92 %
Biegeanteil: 1,06785	8,28 %	-1,06785	-9,92 %

Bild 162: Dehnmessstreifen-Auswertung für die Diagonalstrebe Fahrtrichtung Innsbruck (out of plane observation)

Wie in **Bild 162** zu sehen ist, kann anhand der vorgefertigten Auswerteformulare für die Fahrtrichtung Innsbruck zusätzlich auch noch das Biegeverhalten aus der Querverbands-Ebene (out-of plane) beschrieben werden. Da die dafür notwendigen DMS zu allerletzt installiert wurden, sind

sie nicht für den gesamten Zeitraum der Messung verfügbar und können daher nicht bei jedem der exemplarisch ausgewerteten Belastungsszenarien (14.3.2.2 bis 14.3.2.5) herangezogen werden.

Für die quantitative Verifizierung der gemessenen Schnittgrößen an den Querverbänden sei auch auf die Dokumentation der umfassenden Finite Elemente Simulationen im **Kapitel 15.2** verwiesen.

Generell ist in diesem Zusammenhang zu sagen, dass die in [58] vorgenommenen, weiterführenden Schädigungs-Analysen nicht ausschließlich auf Grundlage der Dehnmessstreifen-Messungen erfolgten, sondern zusätzlich anhand eines detailgetreuen FE-Modells des Brückenfeldes. Die Daten der DMS-Auswertung sollen hier zur Prüfung der Plausibilität und danach zur Kalibrierung einer FE-basierten Hot Spot Analyse zur Verfügung stehen (siehe **Kapitel 15.1** und insbesondere [58]).

14.3.2.2 Überfahrt von 2 LKWs RFB Innsbruck



Bild 163: Überfahrt von 2 LKWs auf der RFB Innsbruck am 26.05.2007 um 09:47:11 Uhr

Am Haupttragwerk (Bauteilebene I) erzeugt das nächste analysierte Überfahrtereignis - zwei hintereinander fahrende LKWs (**Bild 163**) – zunächst den Verformungsverlauf in **Bild 164**. Die Überfahrten führen zu einer maximalen Durchbiegung des Brückenrandfeldes von 4,55mm.

Bild 165 zeigt für die Bauteilebene II, d.h. für das Tragsystem Kragarm die entsprechenden Auswertungsergebnisse. Der DYGES-Messquerschnitt liefert wieder die zum aktuellen Ereignis zugehörigen Geschwindigkeiten und Tonnagen. Der erste LKW fährt mit einer Geschwindigkeit von 48,16km/h, löst eine Kragarm-Durchbiegung von 4,47 mm aus und weist ein Gewicht von 35t auf. Der zweite LKW passiert den Messquerschnitt bei einer Geschwindigkeit von 44,93km/h. Sein Gewicht von 22t erzeugt dabei eine Kragarmdurchbiegung von 3,11 mm (siehe jeweils **Bild 165**).

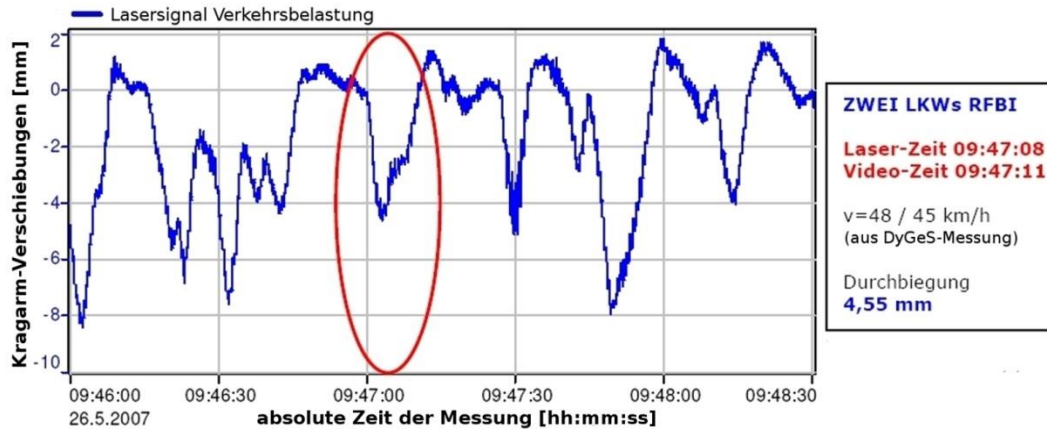


Bild 164: Der durch die 2 Überfahrten erzeugte, Laser-basierte Durchbiegungsverlauf in mm - Bauteilebene I

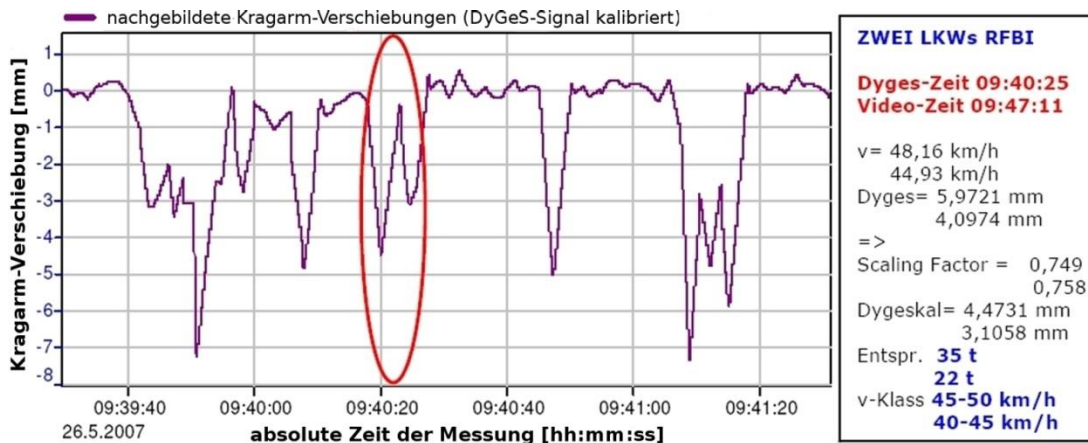


Bild 165: Das durch die 2 Überfahrten erzeugte DYGES-Signal inklusive Auswertung - Bauteilebene II

Für die Bauteilebene III werden in **Bild 166** wiederum die gemessenen Dehnungen der einzelnen Sensoren in $\mu\text{m/m}$ ausgewiesen. Als Folge der Auswertungen analog zum Vorgehen in **Abschnitt 14.3.2.1** ergibt sich für die erste LKW-Überfahrt eine Belastung von zirka 54kN Zugkraft in der Strebe auf der direkt befahrenen Seite, bei einem Biegemoment von -0,25kNm. Der Kraftfluss innerhalb des Querverbandes führt auf der indirekt belasteten Seite zu einer Strebendruckkraft von zirka -51kN, bei einem Biegemoment von -0,05kNm.

Der zweite LKW erzeugt rund 38kN Zugkraft und ein Moment mit -0,18kNm in der direkt belasteten Strebe - und eine Druckkraft von rund -36kN bei gleichzeitigem Biegemoment von -0,03kNm in der gegenüberliegenden Diagonalstrebe. Alle Angaben zur Biegebeanspruchung gelten aus den genannten Gründen der Verfügbarkeit der Daten ausschließlich für Kraftflüsse in der Querverbandebene (in-plane observation). Für ergänzende (wenn zeitlich vorliegende) Angaben zur Biegebeanspruchung aus der Querverbandebene sei auf [58] verwiesen.

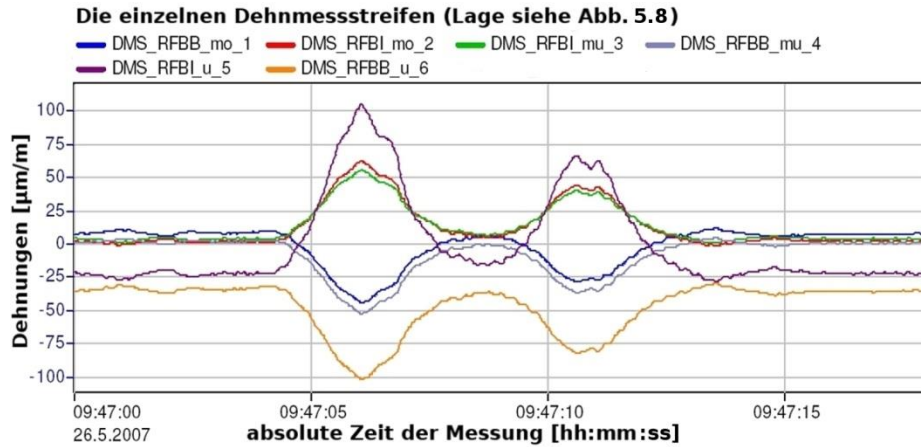


Bild 166: Die durch die 2 Überfahrten erzeugten Dehnungen in $\mu\text{m}/\text{m}$ – Bauteilebene III

14.3.2.3 Überfahrt von 3 LKWs RFB Innsbruck

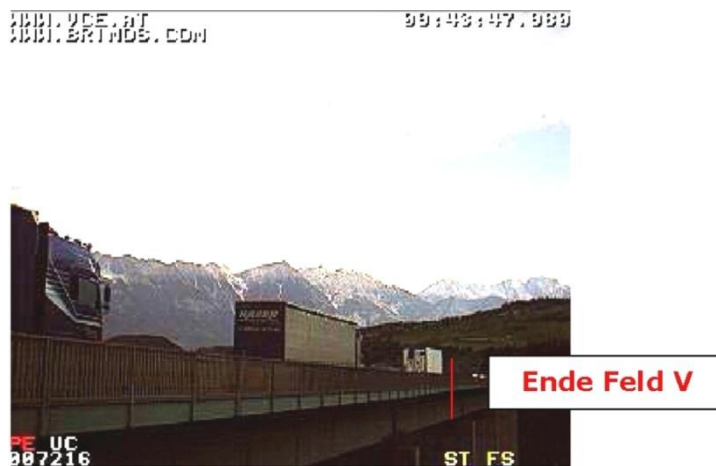


Bild 167: Überfahrt von 3 LKWs auf der RFB Innsbruck am 26.05.2007 um 09:43:48 Uhr

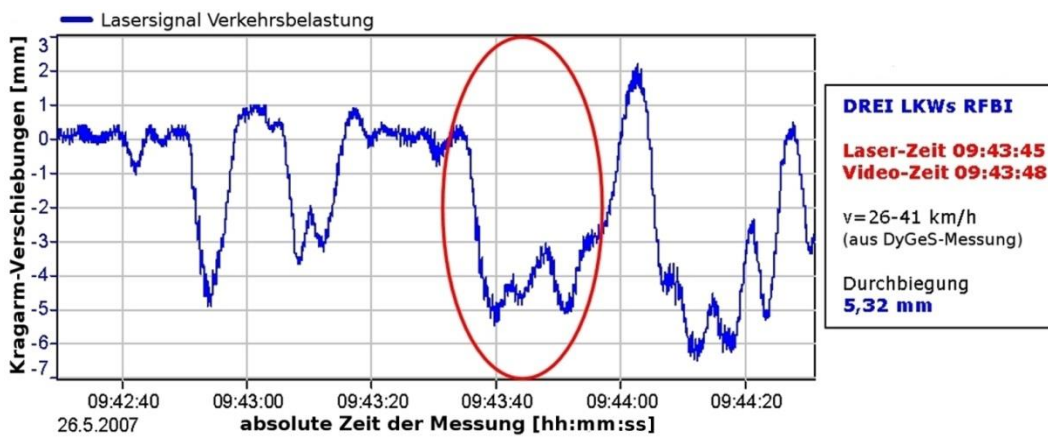


Bild 168: Der durch die 3 Überfahrten erzeugte, Laser-basierte Durchbiegungsverlauf in mm - Bauteilebene I

Die Überfahrt dieser LKW Kolonne verursacht am Haupttragwerk eine Durchbiegung von maximal 5,32mm am definierten Messungs-Standort des Randfeldes V.

Am Kragarm RFB Innsbruck über dem Pfeiler II (= zweite Bauteilebene der Lastabtragung) liefert der DYGES-Algorithmus für den ersten LKW eine Überfahrts-Geschwindigkeit von 39,9 km/h. Dieser löst bei einem Gewicht von >42,8t eine Kragarmdurchbiegung von 5,16 mm aus. Der zweite LKW folgt mit einer Geschwindigkeit von 40,9km/h, einem Gewicht von rund 27t (=> Kragarmdurchbiegung 3,82 mm). Der dritte LKW löst mit einem Gewicht von ebenfalls mehr als 42,8t und einer Geschwindigkeit von 26,1km/h eine Kragarmdurchbiegung von 3,14 mm aus (siehe jeweils **Bild 169**).

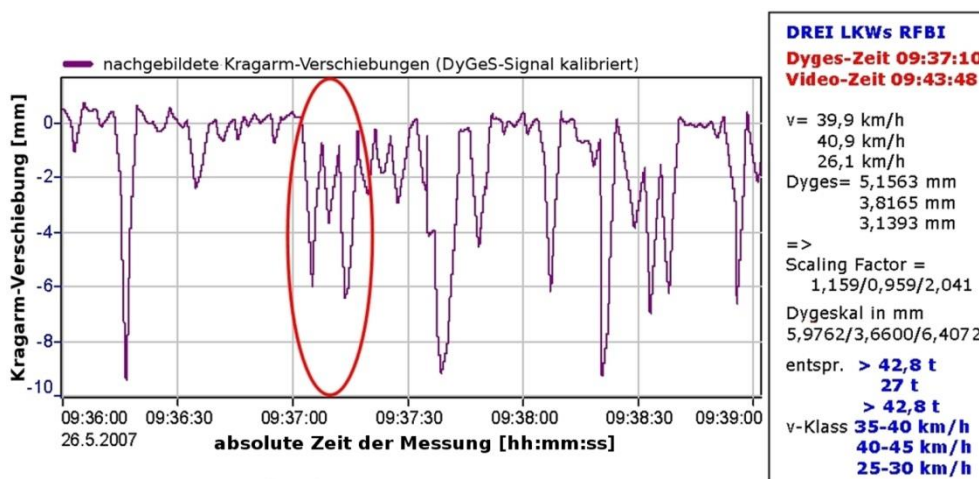


Bild 169: DYGES-Auswertung infolge dreier, hintereinander überfahrender LKWs - Bauteilebene II

Im Querverband (= **Bauteilebene III**) erzeugt der 1. LKW der betrachteten Kolonne rund 59kN Zugkraft in der Strebe der RFB Innsbruck (bei gleichzeitigem Biegemoment von -0,28kNm). Im Zuge der weiterführenden Lastableitung über den gesamten Querschnitt erfährt die andere, indirekt belastete Seite des Querverbandes eine Strebendruckkraft von zirka -55kN sowie ein Moment von -0,07kNm.

Der zweite LKW erzeugt rund 37kN Zugkraft und ein Moment von -0,17kNm in der direkt belasteten Strebe und auf der gegenüberliegenden Seite eine Druckkraft von ca. -34kN und -0,04kNm Biegemoment.

Der dritte LKW erzeugt zirka 44kN Zugkraft sowie -0,21kNm Biegemoment in der direkt belasteten Strebe und eine Druckkraft von rund -41kN bei gleichzeitigem Biegemoment von -0,04kNm in der gegenüberliegenden Diagonalstrebe.

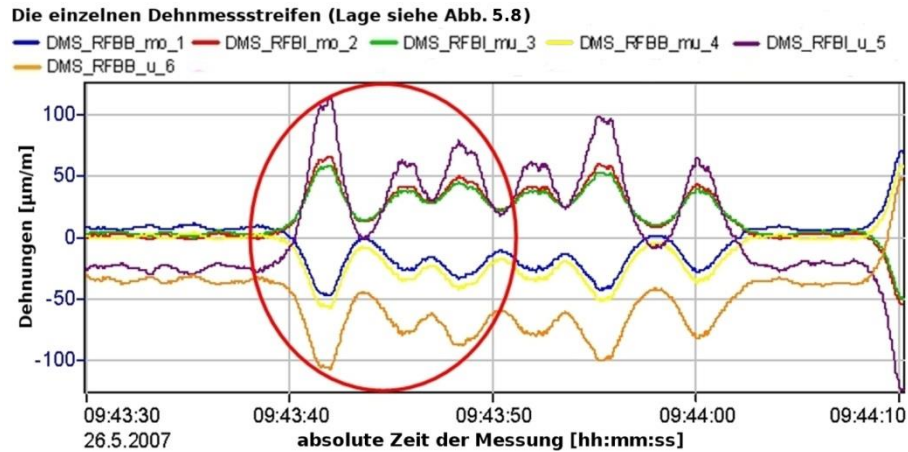


Bild 170: Der infolge dreier, hintereinander überfahrender LKWs erzeugte Dehnungsverlauf in $\mu\text{m}/\text{m}$ - Bauteilebene III

14.3.2.4 Überfahrt von je einem LKW auf beiden Seiten



Bild 171: Überfahrt von je einem LKW in beiden Fahrrichtungen am 26.05.2007 um 14:58:33 Uhr

Bei diesem Belastungsszenario wird das Tragwerk nun nicht mehr nur einseitig belastet, sondern es erfolgt eine annähernd symmetrische Belastung aufgrund der gleichzeitigen Befahrung des Brückenfeldes durch je einen LKW pro Fahrtrichtung. Die Auswirkung im Sinne globaler Zustandsgrößen ist in der nachfolgenden Abbildung sichtbar. Das Feld erfährt durch dieses Lastbild eine maximale Durchbiegung von 3,89 mm (**Bild 172**).

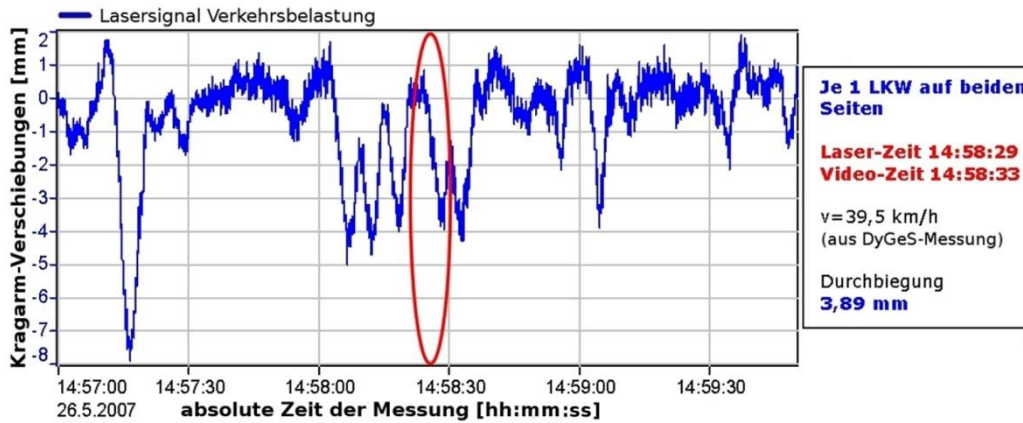


Bild 172: Der durch die Überfahrt von je einem LKW pro Fahrtrichtung erzeugte, Laser-basierte Durchbiegungsverlauf in mm - Bauteilebene I

Da das DYGES-Messquerschnitt bekanntlich nur für die Fahrtrichtung Innsbruck kalibriert wurde (siehe **Kapitel 3**), können LKWs in Fahrtrichtung Brenner zwar erkannt, aber nicht in Ihrer Gewichts- und Geschwindigkeitscharakteristik kategorisiert werden. Insofern sind nachfolgend Geschwindigkeit und Gewicht nur für LKW-Überfahrten der RFB Innsbruck bestimmt worden. Der zur Richtungsfahrbahn Innsbruck zugehörige LKW des aktuell erörterten Lastbildes hat ein Gewicht von 9t und löst bei einer Geschwindigkeit von 39,5km/h eine Kragarmdurchbiegung von 1,81 mm aus (**Bild 173**).

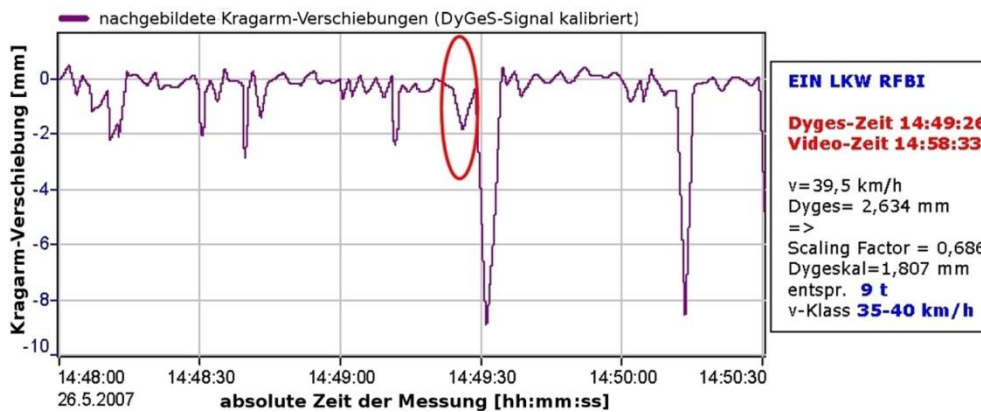


Bild 173: DYGES-Auswertung infolge Überfahrt des zur Fahrtrichtung Innsbruck zugehörigen LKW - Bauteilebene II

Die Bauteilebene III ist von der oben beschriebenen Einschränkung bei der Bestimmung der Eingangsgrößen nicht betroffen. Da - wie in **Kapitel 13.5** beschrieben - der Querverband vollständig instrumentiert wurde, ist die Erfassung der Normalkräfte auf Basis der Dehnmessstreifen-Analyse in der bisherigen Art und Weise möglich.

So liefert die Analyse des Kraftflusses im Querverband für den LKW in Fahrtrichtung Innsbruck zirka 31kN Zugkraft in der direkt belasteten Strebe sowie ein Moment von 0,4kNm. Die andere, indirekt belastete Seite des Querverbandes zeigt eine Strebendruckkraft von zirka -21kN sowie ein Moment von -0,01kNm.

Der LKW in Fahrtrichtung Brenner erzeugt im Querverband zirka 22kN Streben-Zugkraft auf der direkt überfahrenen Seite (bei -0,23kNm Biegemoment) und in der gegenüberliegenden Strebe eine Druckkraft von rund -20kN, sowie ein Moment von 0,19kNm (siehe jeweils **Bild 174**).

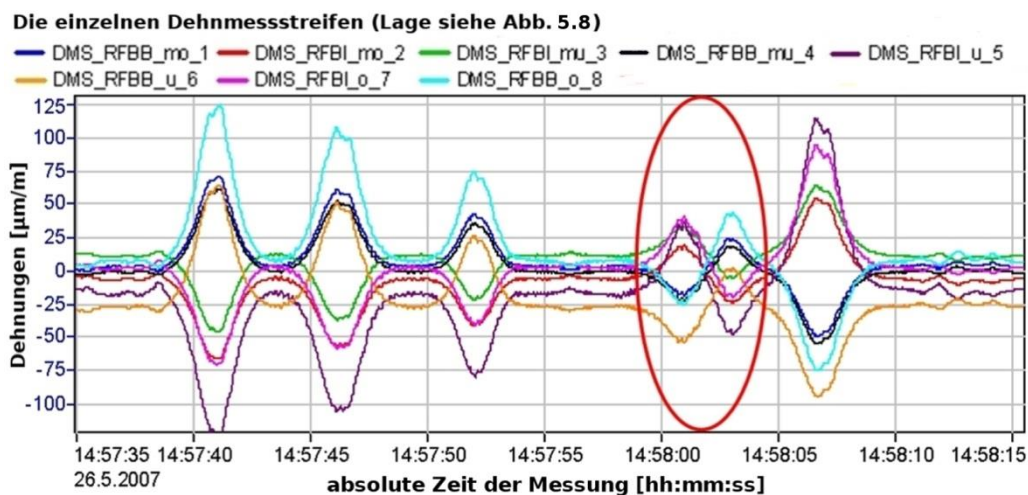


Bild 174: Der durch die Überfahrt von je einem LKW pro Fahrtrichtung erzeugte Dehnungsverlauf in µm/m - Bauteilebene III

Generell muss an dieser Stelle die Tatsache hervorgehoben werden, dass die in den Streben ermittelten Kräfte geringer ausfallen, sobald das Tragwerk nicht mehr nur einseitig befahren wird. Begründet kann dies dadurch werden, dass der Verdrehungswiderstand - und damit auch der Torsionsverband - in diesen Fällen nur mehr zum Teil aktiviert wird, weil der Einfluss des Schwerverkehrs dann größtenteils über das primäre Tragsystem (Hauptträger) abgeleitet wird. Dies zeigt sich besonders gut am vorliegenden Lastbild, wenn die beiden LKWs annähernd zeitgleich das instrumentierte Brückenrandfeld befahren.

14.3.2.5 Überfahrt von je zwei LKWs auf beiden Seiten



Bild 175: Überfahrt von je zwei LKWs in beiden Fahrtrichtungen am 26.05.2007 um 09:11:21 Uhr

Dieses Szenario zeichnet sich wie das vorangehend in **Abschnitt 14.3.2.4** diskutierte Lastbild dadurch aus, dass das Brücken-Randfeld V nun beidseitig befahren wird. Dabei kann es aber noch deutlich schlechter im Sinne der einzelnen Einwirkungs-Komponenten nachvollzogen werden als zuvor (Überfahrt von je einem LKW pro Fahrtrichtung). **Bild 176** zeigt wiederum die Auswirkungen des vorliegenden Lastbildes im Sinne globaler Zustandsgrößen. Die Überfahrten führen zu einer maximalen Durchbiegung des Brücken-Haupttragwerks von 6,03 mm.

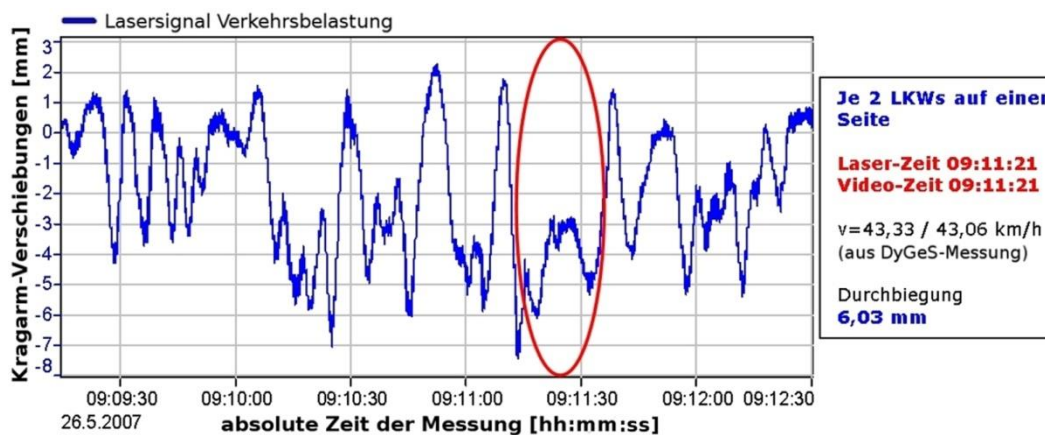


Bild 176: Der durch die Überfahrt von je zwei LKWs in beiden Fahrtrichtungen erzeugte, Laser-basierte Durchbiegungsverlauf in mm - Bauteilebene I

Wiederum können am Brücken-Kragarm (DYGES-Querschnitt) wie zuvor begründet nur die LKW-Überfahrten in Fahrtrichtung Innsbruck hinsichtlich Tonnage und Geschwindigkeit kategorisiert werden.

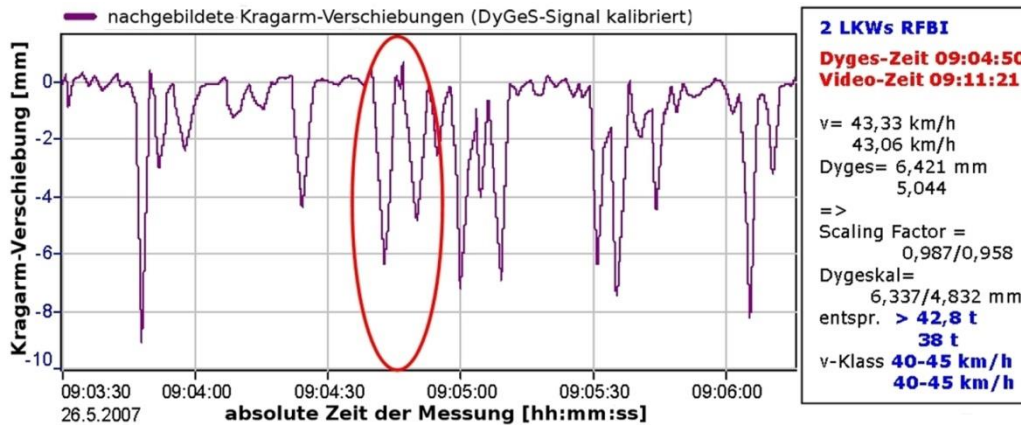


Bild 177: DYGES-Auswertung infolge Überfahrt der beiden zur Fahrtrichtung Innsbruck zugehörigen LKWs - Bauteilebene II

Aus der Bauteilebene II ergeben sich durch die Auswertung am DYGES-Messquerschnitt für den ersten LKW in Fahrtrichtung Innsbruck eine Geschwindigkeit von 43,33km/h und ein Gewicht >42,8t, welche ein Kragarmdurchbiegung von 6,34 mm auslösen (**Bild 177**).

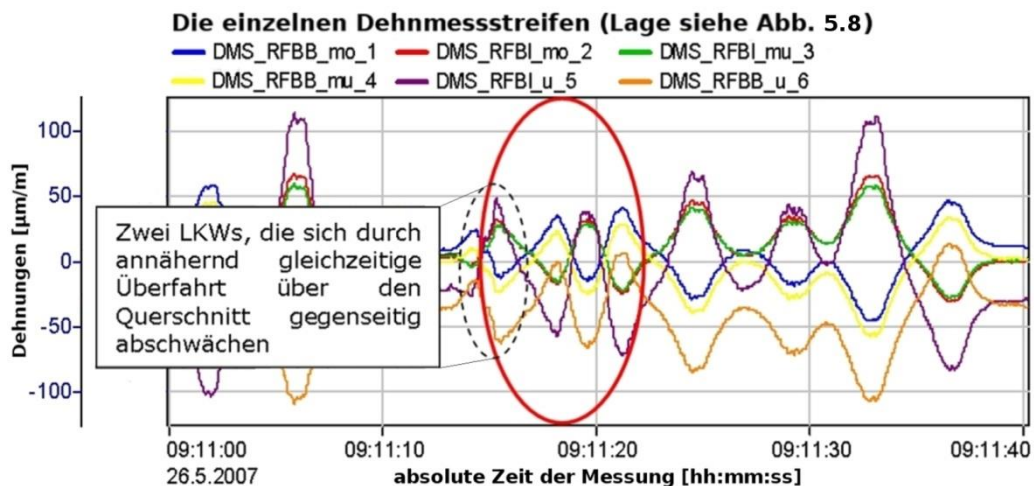


Bild 178: Die durch die Überfahrt von je zwei LKWs in beiden Fahrtrichtungen erzeugten Dehnungen in µm/m - Bauteilebene III

Nach Analyse und Umrechnung der registrierten Dehnungen (Bauteilebene III) ergeben sich für diese Überfahrt zirka 27kN Zugkraft in der direkt überfahrenen Strebe sowie ein Moment von -0,16kNm. Der Kraftfluss innerhalb des Querverbandes führt auf der indirekt belasteten Seite zu einer Strebendruckkraft von zirka -22kN und -0,07kNm Biegemoment.

Die ermittelte Normalkraft ist in diesem Fall in Relation zur Tonnage deswegen so gering, weil kurz vor der dieser Streben-Belastung ein weiterer LKW in die entgegengesetzte Fahrtrichtung fuhr, wobei diese wechselseitige Beeinflussung der beiden Einwirkungen zu einer Abschwächung des Kräftespiels führte. Der Torsionswiderstand wird nur zum Teil aktiviert, da der Schwerverkehr überwiegend über

Biegebeanspruchung des primären Tragsystems abgeleitet wird. Der „beeinflussende“ LKW hat zum Zeitpunkt der isolierten Betrachtung des vorliegenden Belastungsszenarios das Tragwerk bereits wieder verlassen und ist somit in der Video-Dokumentation (**Bild 175**) nicht mehr ersichtlich. Dessen Präsenz ist aber sehr wohl im Lasersignal (**Bild 176**) und insbesondere im DMS-Signal (**Bild 178**) deutlich zu erkennen. Dadurch wird klar, warum ein LKW mit über 42,8t vergleichsweise geringe Kräfte in der Strebe auslöst.

Der erste LKW in Fahrtrichtung Brenner erzeugt (bei unbekanntem Gewicht und unbekannter Geschwindigkeit) im Querverband zirka 24kN Zugkraft in der direkt überfahrenen Strebe sowie ein Moment von -0,28kNm. In der gegenüberliegenden Strebe werden eine Druckkraft von rund -21kN und ein Moment von 0,15kNm erzeugt.

Der zweite LKW in Fahrtrichtung Innsbruck erzeugt bei einer Geschwindigkeit von 43,06km/h und einem Gewicht von über 38t zirka 25kN Zugkraft und -0,01kNm Biegemoment in der direkt belasteten Strebe des Querverbandes, wobei der Brückenkragarm am DYGES-Messquerschnitt eine maximale Durchbiegung von 4,83 mm aufweist. Im Zuge der weiterführenden Lastableitung über den gesamten Querschnitt erfährt die andere, indirekt belastete Seite des Querverbandes eine Strebendruckkraft von zirka -24kN und ein Moment von -0,20kNm.

Der zweite LKW in Fahrtrichtung Brenner erzeugt (bei unbekanntem Gewicht und unbekannter Geschwindigkeit) im Querverband zirka 29kN Zugkraft und -0,26kNm Biegemoment in der direkt befahrenen Strebe. Für die gegenüberliegende Strebe wurden eine Druckkraft von rund -27kN sowie ein Moment von -0,17kNm registriert.

14.3.3 Diskussion zum beobachteten Kraftfluss in den Diagonalen

Zusammenfassend zur Auswertung der vom Schwerverkehr in den instrumentierten Querverband eingetragenen Kräfte wurde diese tabellarisch aufbereitet und einander gegenübergestellt.

Tabelle 40 fasst die Ergebnisse für jene Lastbilder zusammen, welche aus dem unsymmetrischen Befahren des Brückenrandfeldes durch LKWs resultieren. **Tabelle 41** hingegen zeigt die ermittelten Ergebnisse für jene beiden detaillierter aufbereiteten Belastungsszenarien, bei denen das Brückenfeld beidseitig befahren wurde.

Tonnage LKW [t]	Geschwindigkeit [km/h]	Durchbiegung Kragarm [mm]	Kräfte RFB Innsbruck		Kräfte RFB Brenner	
			N [kN]	M [kNm]	N [kN]	M [kNm]
>42,8	~40	5,98	59	-0,28	-55	-0,07
>42,8	~26	6,41	44	-0,21	-41	-0,04
42,8	~44	5,48	55	-0,26	-52	-0,05
35	~48	4,47	54	-0,25	-51	-0,05
27	~41	3,66	37	-0,17	-34	-0,04
22	~45	3,11	38	-0,18	-36	-0,03

Tabelle 40 : Zusammenfassung der **Ergebnisse** aus den ausgewerteten Belastungsszenarien für **unsymmetrisches, einseitiges Befahren**

- An den beiden LKWs mit einem Gewicht von > 42,8 t kann man beobachten, dass eine niedrigere Geschwindigkeit eine höhere Kragarm-Durchbiegung zur Folge hat. Wie in Feldversuchen oftmals beobachtet werden konnte und insbesondere in **Kapitel 3 (Bild 22 & Bild 24)** veranschaulicht, offenbart die beschleunigte Einwirkung des Lastfalls „fahrender LKW“ über den instrumentierten Querschnitt eine Tendenz zur betragsmäßig reduzierten Tragwerksreaktion infolge einer nicht vollständig entfalteten Belastungswirkung. Ein langsamerer LKW kommt hingegen der grundsätzlichen Vorstellung einer bewegten Last (statische Belastung samt dynamischer Vergrößerung) näher. Ansonsten liegt bei vergleichbaren Geschwindigkeits-Verhältnissen ein nachweislich deutlicher linear-elastischer Zusammenhang zwischen auftretenden Tonnagen und Kragarm-Durchbiegungen auf.
- Prinzipiell gilt jedoch, dass der expliziten Betrachtung und Berücksichtigung der Geschwindigkeit primär nur bei der Ermittlung der Tonnagen im Zuge der dynamischen Gewichterfassung Bedeutung zukommt. Bei den weiterführenden Schädigungsrechnungen aus den DMS-Daten – insbesondere für die maßgeblichste Bauteilebene III in (siehe [58]) - ist der Geschwindigkeitseinfluss bereits in der Messung impliziert. Gleiches gilt für die Bauteilebene II, bei der eine geschwindigkeitsabhängige Kalibrierung des Durchbiegungs-Zeitverlaufs vorgenommen wurde, wodurch unmittelbar eine Einwirkungsfunktion generiert wurde. Im Zuge der Finite Elemente Strukturberechnungen, in die das reale Lastmodell später implementiert

wird, ist der Geschwindigkeitseinfluss im DYGES-Algorithmus zwar ein elementarer Bestandteil der kalibrierten Durchbiegungs-Zeitfunktion, die Umrechnung von Tonnagen in HOT SPOT Strukturspannungen erfolgte aber vereinfachend nach quasi-statischen Gesichtspunkten. Für weitere Details siehe [58].

- Weiters gilt es hervorzuheben, dass sich direkte, isolierte Betrachtungen der Relation zwischen einwirkenden Tonnagen und den dabei auftretenden Schnittgrößen an den Streben nicht so ohne weiteres herstellen lassen, da natürlich nicht jeder LKW das Brückenfeld einzeln im Sinne einer exklusiven (alleinigen) Überfahrt passiert hat.
- Auch bei der bereits hervorgehobenen, unsymmetrischen Belastung infolge einseitigen Befahrens ist das instrumentierte Brückenfeld durch das hohe Schwerverkehrsaufkommen oftmals bis zu einem gewissen Grad durch einen vor oder hinter dem betrachteten Fahrzeug fahrenden LKW beeinflusst worden. Durch die unterschiedliche Verweildauer der überfahrenden Einwirkungen ist das primäre Tragsystem (Hauptträger) der Brücke davon ungleich stärker betroffen als das sekundäre Tragsystem (Brücken-Kragarme).

So verursacht ein am Tragwerk auftretender LKW bereits Kräfte in den Diagonalstreben, sobald er auf das Brückenfeld auffährt und nicht erst wenn er direkt über dem instrumentierten Querverband ist. Ebenso bleibt sein Einfluss auf die Gesamtbelastung (gemeinsam mit anderen Fahrzeugen) bestehen, bis er das Feld wieder verlässt. Unter diesem Gesichtspunkt erscheinen **Tabelle 40 & Tabelle 41** wesentlich aufschlussreicher. So erklärt sich dadurch beispielsweise, warum ein 22t Fahrzeug im vorliegenden Fall vermeintlich größere Kräfte im Querverband verursacht als ein 27t Fahrzeug. Ein linearer Zusammenhang zwischen den Tonnagen und ihren Auswirkungen könnte nur dadurch hergestellt werden, wenn die Fahrzeuge tatsächlich alleine über das gesamte Brückenfeld fahren würden.

Tonnage LKW [t]	Geschwindigkeit [km/m]	Durchbiegung Kragarm [mm]	Kräfte RFB Innsbruck		Kräfte RFB Brenner	
			N [kN]	M [kNm]	N [kN]	M [kNm]
>42,8	43	6,34	27	-0,16	-22	-0,07
38	43	4,83	25	-0,01	-24	-0,2
9	40	1,81	31	0,4	-21	-0,01

Tabelle 41 : Zusammenfassung der **Ergebnisse** aus den ausgewerteten Belastungsszenarien **für tendenziell unsymmetrisches, beidseitiges Befahren**

- Bezüglich der Ergebnisse infolge weitgehend symmetrischer Belastung des betrachteten Brückenfeldes (beidseitiges Befahren von Schwerverkehr - **Tabelle 41**) ist anzumerken, dass hier zusätzlich zu einer entsprechenden Beeinflussung des primären Tragverhaltens auch das tertiäre Tragverhalten (Querverbände) entsprechend betroffen ist. Sobald also das Tragwerk nicht mehr

nur in einer Fahrtrichtung befahren wird und sich auch eines oder mehrere Fahrzeuge auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn befinden, treten die Normalkräfte in den Diagonalstreben in reduziertem Ausmaß gegenüber den Fällen des einseitigen Befahrens auf, da der Großteil der Überfahrtsbelastung in solchen Fällen als Querkraft von den Hauptträgern abgeleitet wird und der Torsionswiderstand der Querverbände nur noch bedingt aktiviert wird. Dies zeigt sich besonders stark wenn zwei LKWs (annähernd) zeitgleich über den instrumentierten Querschnitt fahren. Daher können in solchen Fällen auch keine Zusammenhänge mehr zwischen einwirkenden Tonnagen und den resultierenden Normalkräften in den Streben hergestellt werden.

14.3.4 Diskussion zur Größenordnung der wirksamen Normalkräfte in den Querverbänden

Das infolge Schwerverkehrsbelastung ermittelte Druck- bzw. Zugkraftaufkommen in den Streben liegt prinzipiell in einer **Größenordnung von ± 50 bis 60 kN**, wobei sich dieses vereinzelt auch in den Bereich von **± 80 kN** bzw. etwas darüber erstreckt (siehe **Kapitel 14.2.3**).

Anders gesprochen bedeutet dies, dass unter Ansetzen des Gedankenmodells eines alleinigen, einseitigen Befahrens **rund 20 % der LKW-Belastung** (bei Ansetzen eines durchschnittlichen Gesamtgewichts von 30t/LKW – siehe **Kapitel 4**) **als wirksame Normalkraft vom Querverband übernommen werden**, der Rest vom primären Tragsystem (Hohlkasten). Dieser Anteil wird bei beidseitiger, zeitsynchroner Belastung noch verringert (wurde in **Abschnitt 14.3.3** begründet).

Was für diese Größenordnung spricht, ist der folgenden Auflistung zu entnehmen:

- Erste Berechnungen des Autors im Vorfeld zur Entwicklung des DYGES-Algorithmus (**Kapitel 3**) sowie auch später im Vorfeld zur Sondermessung 2007 an einem 45m langen, räumlichen Brückensegment (siehe **Kapitel 3.3.1** und **Kapitel 15**) zeigten, dass die Überfahrt des am Häufigsten anzutreffenden Schwerfahrzeuges (des 5-achsigen LKW mit einer Fahrzeuglänge von rund 12m - siehe **Kapitel 4**) über den Kragarm entlang der äußersten Fahrspur zu einer beträchtlichen Längsverteilung der eingetragenen Belastung führt (siehe **Bild 179**). Die Schwerverkehrslast wird dabei zunächst in das sekundäre Tragsystem (Kragarm) eingetragen und dann via Rahmeneck in den Hauptträger einerseits und in die Querverbände andererseits fortgeleitet. Der vom besagten LKW verursachte Durchbiegungsverlauf in Form einer Halbwelle zeigt entlang des Kragarmes eine Belastungsverteilung, welche geometrisch zunächst eine weitgehend gleichmäßige Aufteilung auf den Bereich von 2 Querverbänden indiziert. Der

verbleibende Einfluss der eingetragenen LKW-Last reicht auf beiden Seiten noch jeweils in den angrenzenden, geometrisch vorgegebenen 9m Abschnitt, wodurch zu beiden Seiten nach außen noch ein weiterer Querverband bei der Lastabtragung herangezogen wird (siehe nochmals **Bild 179**). Somit scheint sich der Einflussbereich der eingetragenen Last insgesamt auf eine Kragarm-Länge von 27m zu erstrecken, was später durch ein eingehendes Finite Elemente Model-Update im Rahmen der *Mechanischen Modellierung und Mechanischen Plausibilisierung des Dynamischen Gewichtserfassungssystems DYGES (Kapitel 5)* bestätigt wurde.

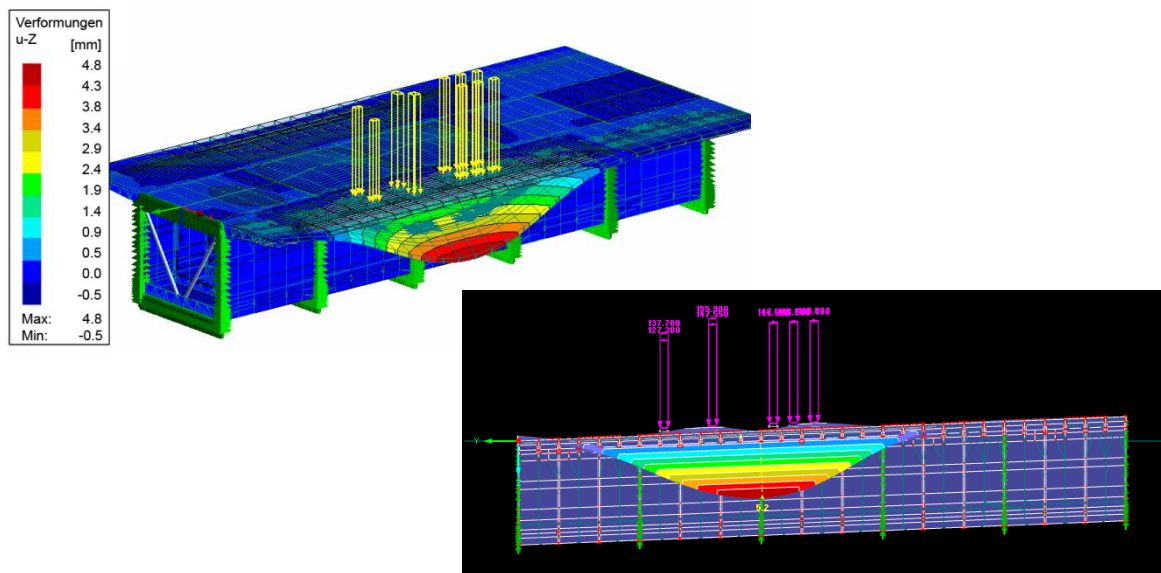


Bild 179: Unsymmetrische Belastung eines herausgelösten Brückensegmentes - Rechnerische Bewertung der Längsverteilung des Kraftflusses am Kragarm

- Es gilt zu bedenken, dass der im Vergleich zu den Diagonalstreben wesentlich massivere Hauptträger mit ungleich höherer Steifigkeit den Kraftfluss entsprechend beeinflusst und daher einen wesentlichen Anteil der einwirkenden Belastung übernimmt (die Querverbände dienen bekanntlich in erster Linie zur Bewahrung der Formtreue des Querschnittes im Rahmen der Torsionsbeanspruchung des Hohlkastens).
- Die im vorliegenden Abschnitt getätigten Aussagen decken sich mit Ergebnissen ausführlicher Finite Elemente Berechnungen (**Kapitel 15.2**), die vom Autor als Grundlage zur weiterführenden Ermittlung der Bauteil-Nutzungsdauer (siehe [58]) durchgeführt wurden.

Zum Aspekt der Zweckmäßigkeit, die vorliegenden Ergebnisse durch eine weitere Messung an einer anderen Stelle zu vervollständigen, ist Folgendes anzumerken. Ein Wiederholen der Messung - z.B. im Brückenhauptfeld - sollte keine anderen, insbesondere keine größeren Normalkraft-Beträge liefern. Die bisherige Konzeption war genau darauf ausgerichtet, zunächst in einer strukturierten,

ganzheitlichen (globalen) Analyse sämtliche Querverbände dynamisch zu untersuchen (**Kapitel 10**), um dann gezielter auf (lokal) auffällige Bereiche eingehen zu können (Kapitel 13, 14 & [58]).

Wie aus **Kapitel 10** hervorgeht, wurden dabei im Rahmen einer vorangestellten Schwachstellenanalyse die Brückenränder aufgrund der evidenten Beeinträchtigung infolge dynamischer Vergrößerung der Schwerverkehrseinwirkung herausisoliert.

Dass sich diese Randbereiche als geschwächt und dynamisch anfälliger gezeigt haben, liegt nicht zuletzt auch daran, dass weniger globaler Tragwerkswiderstand für die gleiche Schwerverkehrsbelastung zur Verfügung steht als zur Brückenmitte hin. Somit wird sich beispielsweise im Brückenhauptfeld keine ungünstigere Aufteilung des Kraftflusses infolge Schwerverkehr auf die Querverbände bzw. auf die Hauptträger einstellen, wo doch im besagten Brückenhauptfeld ein deutlich massiverer Regelquerschnitt im Sinne des vorhandenen Torsionswiderstandes vorliegt.

14.3.5 Abschließende Schlüssel-Erkenntnisse & Ausblick auf die weiterführenden Themen Lastmodellierung und Bauteil-Schädigungsanalyse

Die Konzeption einer vollständig bestimmten, in mehreren Ebenen jederzeit überprüfaren Bauteilanalyse durch die ganzheitliche Kopplung von Tragwerksmessungen mit Finite Elemente Vergleichsrechnungen erwies sich als großer Vorteil. Die dabei im Rahmen der Dissertation vorgenommenen, umfassenden Evaluierungen schafften Klarheit und Sicherheit bei der Entstehung der für die Themen Lastmodellierung und Schädigungsrechnung geschaffenen Eingangsparameter.

- Einerseits liegt eine sehr gute Korrelation zwischen den verschiedenen, messtechnisch betrachteten Bauteilebenen (I – Haupttragwerk; II – Brückenkrägarne; III - Lokale Streben Anschlüsse) vor. Wie sich im nachfolgenden **Kapitel 15** zeigen wird, liegt auch nachweislich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den erhaltenen Messgrößen und den entsprechenden Zustandsgrößen aus den Rechenmodellen vor.
- An den Torsionsstreben wird der Lastangriff überwiegend durch Normalkräfte abgetragen. Die kleinen Biege-Anteile ($\leq 10\%$) indizieren, dass nur ein geringer Einfluss von den auftretenden Sekundär-Biegemomente ausgeht. Das systematisch aufgetretene Schadensbild (**Kapitel 10**) ist daher mit größter Wahrscheinlichkeit die Folge eines aus heutiger Sicht evidenten, konstruktiven Detaillierungsproblems des Anschluss-Knotens an das im Rahmeneck - im Zusammenwirken mit den mittlerweile vorherrschenden Belastungsbedingungen.

- Solange am Brückenfeld „klar geregelte Lasteinwirkungsverhältnisse“ herrschen, d.h. solange die Belastungs-Szenarien nach Fahrrichtungen getrennt auftreten und nachvollziehbar sind, sodass es zu keinerlei Beeinflussung durch die andere Fahrrichtung kommt, herrschen immer einheitlich (strikt linear-elastische) Verhältnisse zwischen allen am Diagonalverband angeschlossenen DMS. Das heißt die Verhältnis-Faktoren zwischen den verschiedenen DMS sind nicht nur prinzipiell übereinstimmend, sondern mitunter bis zur zweiten Nachkommastelle vollkommen identisch. Dies bedeutet, dass es einen eindeutigen und direkten Kraftfluss ab der Stelle der Einwirkung und insbesondere innerhalb des Querverbandes gibt, was grundsätzlich eine gute Funktionsfähigkeit der Querverbände indiziert.
- Sobald das Tragwerk nicht mehr nur einseitig befahren wird und sich auch eines oder mehrere Schwerverfahrzeuge auf dem gegenüberliegenden Kragarm befinden, fallen die ermittelten Kräfte in den Streben geringer aus. Begründet kann dies dadurch werden, dass der Verdrehungswiderstand in solchen Fällen in deutlich geringerem Ausmaß aktiviert wird, weil der Schwerverkehr bei symmetrischer Belastung verstärkt über das primäre Tragsystem (Hauptträger) abgeleitet wird. Die in den Streben auftretenden Normalkräfte fallen dann in Relation zur Tonnage mitunter vergleichsweise niedrig aus. Dieser Einfluss der sich verringernden Torsionsbelastung auf die korrespondierenden Zustandsgrößen zeigt sich besonders stark, wenn zwei LKWs (annähernd) zeitgleich aus entgegengesetzter Richtung kommend den instrumentierten Querschnitt passieren.
- Mehrere LKWs - in knappen Abständen hintereinander am Brückenrandfeld fahrend - bewirken ein Verfälschen der Vergleichbarkeit mit jenen Ergebnisse, die infolge klar definierter, einseitiger (nur einer Fahrrichtung zugeordneter) Belastung vorliegen. Die Folge ist eine nicht mehr vollständig nachvollziehbare, uneinheitliche aber stets gegebenen Überlagerung der einzelnen Antwort-Komponenten am instrumentierten Querverband.
- Aufgrund der beiden letztgenannten Punkte ist es nicht möglich, jene DMS, die erst zunehmend später am instrumentierten Querverband hinzugefügt wurden, durch einfaches Skalieren anderer, bereits angeschlossener und aufzeichnender Messkanäle auf denselben Beobachtungszeitraum zu extrapolieren wie jene beiden DMS, die zu allererst angeschlossen wurden und daher die meiste Information beinhalten. Vordergründiger Grund ist Beeinflussung des instrumentierten Querverbandes durch den „Gegenverkehr“, welcher die Nachvollziehbarkeit bzw. die gezielte Zuordnung zu den auslösenden Belastungsszenarien in automatisierter (algorithmisch anonymisierter) Weise dann aber nicht mehr ermöglicht.
- Sämtliche bisherigen Beobachtungen bestätigen, dass für die später vorgenommenen Ermüdungsberechnungen [58] ausschließlich von linear-elastischer Wechselbeanspruchung

ausgegangen werden kann und die zugrunde gelegten theoretischen Ansätze (High-Cycle Fatigue) daher die richtigen sind.

An dieser Stelle der Doktorarbeit sollte vorausgeschickt werden, dass das festgestellte Normalkraft-Niveau alleine, welches man unter Umständen im Vorfeld der Untersuchungen höher erwartet hätte, noch nichts über die ermüdungswirksamen Kerbspannungen und damit über die verbleibende Restnutzungsdauer aussagt. Die auftretenden Spannungen wurden bekanntlich einerseits mit DMS an Stellen mit gleichmäßiger Spannungsverteilung (Streben-Mitte) erfasst (siehe **Kapitel 13**). Andererseits wurden der obere und der untere Anschluss (Knotenbleche) ebenso mit DMS instrumentiert. Da die Dehnmessstreifen in ausreichender Entfernung von der Nahtwurzel ($2 \times \text{Blechdicke}$) geklebt wurden, werden an diesen Stellen so genannte Nennspannungen ermittelt, die stabil mit Vergleichsberechnungen von Finite Elemente Modellen verglichen werden können bzw. zur Kalibrierung von diesen dienen (**Kapitel 15**). Danach könnte grundsätzlich bereits mit den Nennspannungen und passenden Wöhler-Kurven aus dem Eurocode 3 eine Ermüdungsberechnung durchgeführt werden.

Der mittlerweile im Rahmen detaillierter Analysen mehr und mehr angestrebte Übergang im Ermüdungsnachweis von Nennspannungen zu Strukturspannungen (siehe **Bild 180**) erfolgte mit Hilfe einer entsprechender Verifizierung am Rechenmodell selbst (HOT SPOT Methode). Für das vorliegende Kerbdetail konnte jedenfalls von lokalen Vergrößerungen mit einem Faktor von ≥ 2 ausgegangen werden (weitere Details siehe **Kapitel 15.2.2**).

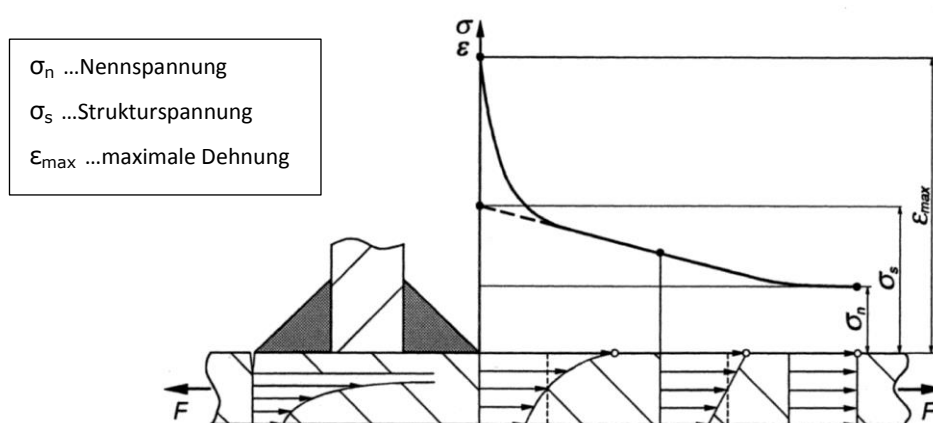


Bild 180: Nichtlineare Spannungsverteilung der wirksamen Spannungen am geschweißten Anschluss (**Lokale Vergrößerung**) infolge geometrischer Diskontinuitäten => **Schädigungsgrößen für Festigkeitskonzepte [37]**

Ausführlichen Nachlaufrechnungen an 3 dimensionalen – ausschließlich mit Schalenelementen modellierten – Finite Elemente Strukturmodellen stellen den logischen, abschließenden Schritt dar,

bei welchem die gemessene Einwirkung (anstatt der durch die Belastungsnorm vorgegeben) hinsichtlich Ihrer Konsequenzen für die verbleibende Betriebsdauer bzw. für das Auftretensrisiko von weiteren Ermüdungsschäden bewerten wird. Die konkreten, ausführlichen Schädigungsberechnungen (incl. der vergleichenden Ermittlung der Nenn- und Strukturspannungen) samt zugehöriger Erklärungen und Interpretationen sind [58] zu entnehmen.

15 ANHANG 7: GANZHEITLICHE EVALUIERUNG DER GEMESSENEN BELASTUNG AN ANALYTISCHEN RECHENMODELLEN DER BRÜCKENSTRUKTUR

- **RECHNERISCHE FE-ANALYSE AN GLOBALEN BRÜCKENMODELLEN**
- **RECHNERISCHE FE-ANALYSE AN EINEM AUSGEWÄHLTEN QUERVERBAND**

15.1 Rechnerische FE-Analyse an globalen Brückenmodellen

In Hinblick auf unterstützende Verifizierungen beim Vergleich zwischen dem DYGES Lastmodell und den Lastmodellen des Eurocode wurden ein globales Finite Elemente Rechenmodell vom Gesamttragwerk einerseits bzw. vom Randfeld Schönberg andererseits erstellt. Dabei kamen jeweils Softwarepakete von DLUBAL zum Einsatz. Das Gesamtbrückenmodell wurde als Stabwerk in der Software RSTAB [59] realisiert, das detailliertere Modell des Randfeldes Schönberg (ausschließlich aus Schalenelementen) in RFEM [60]. Mit der Erstellung dieser Modelle wurde angestrebt, die gemessenen Werte durch Vergleichsrechnungen zu überprüfen, um darauf aufbauend mit entsprechender Sicherheit notwendige und flexibel gestaltete Detailberechnungen nur noch am Modell durchzuführen die nicht mehr so ohne weiteres bzw. kurzfristig hätten gemessen werden können.

Nachfolgend wird rechnerisch wie auch grafisch dokumentiert, wie anhand der Lastfälle ständige Lasten (**Kapitel 15.1.1**) bzw. Verkehrslasten (**Kapitel 15.1.2**) umfassende Plausibilitätskontrollen an den hergestellten Brückenmodellen hinsichtlich ihrer weiteren Verwendung für detaillierte Schädigungsrechnungen [58] durchgeführt wurden.

15.1.1 Modellierung & Plausibilität

Hauptaugenmerk ist auf das ausschließlich mit 2D-Schalenelementen modellierte Randfeld Schönberg zu legen (**Bild 181 & Bild 182**). Dieses besteht aus mehr als 10200 händisch versetzten Stahlblechen und berücksichtigt alle wesentlichen, im Folgenden aufgelisteten Merkmale:

- Krümmung im Brückenquerschnitt
- Querneigung der Brückenfahrbahn
- Veränderliche Hohlkastenhöhe
- Sämtliche tragenden und de facto auch alle konstruktiven Bleche in Längs- und Querrichtung
- Detailgetreue Berücksichtigung der Diagonalverbände samt zugehöriger Anschlussknoten

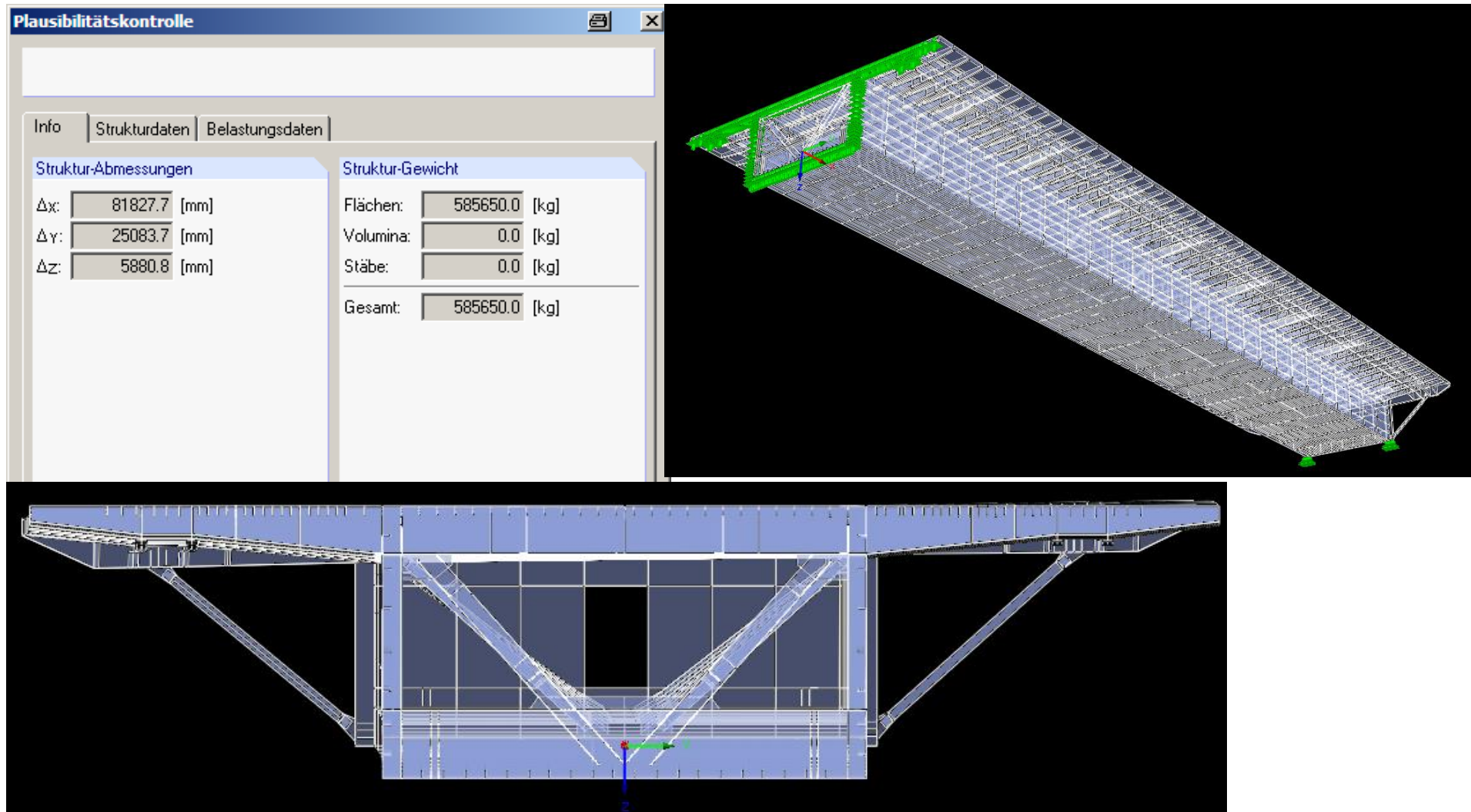


Bild 181: Finite Elemente Modellierung – Randfeld Schönberg und Plausibilitätskontrolle der eingegebenen Brückengeometrie und Massenbelegung

Laut [55] liegt für das Brückenhauptfeld eine Massenbelegung von 11 MP / m bei einer Hohlkastenhöhe von 7,70 m vor. Für das Randfeld Schönberg ergibt sich bei einer linear veränderlichen Höhe von 4,8 – 5,6 m (\Rightarrow ca. 5,2m durchschnittliche Höhe) ein anteiliges Gewicht ca. 602 MP (beinhaltet rund 5 % Ausbaulasten, sonst 572 MP. Das Eigengewicht der verarbeiteten Stahlmasse beträgt beim Randfeld-Modell 585,65t (siehe **Bild 181**).

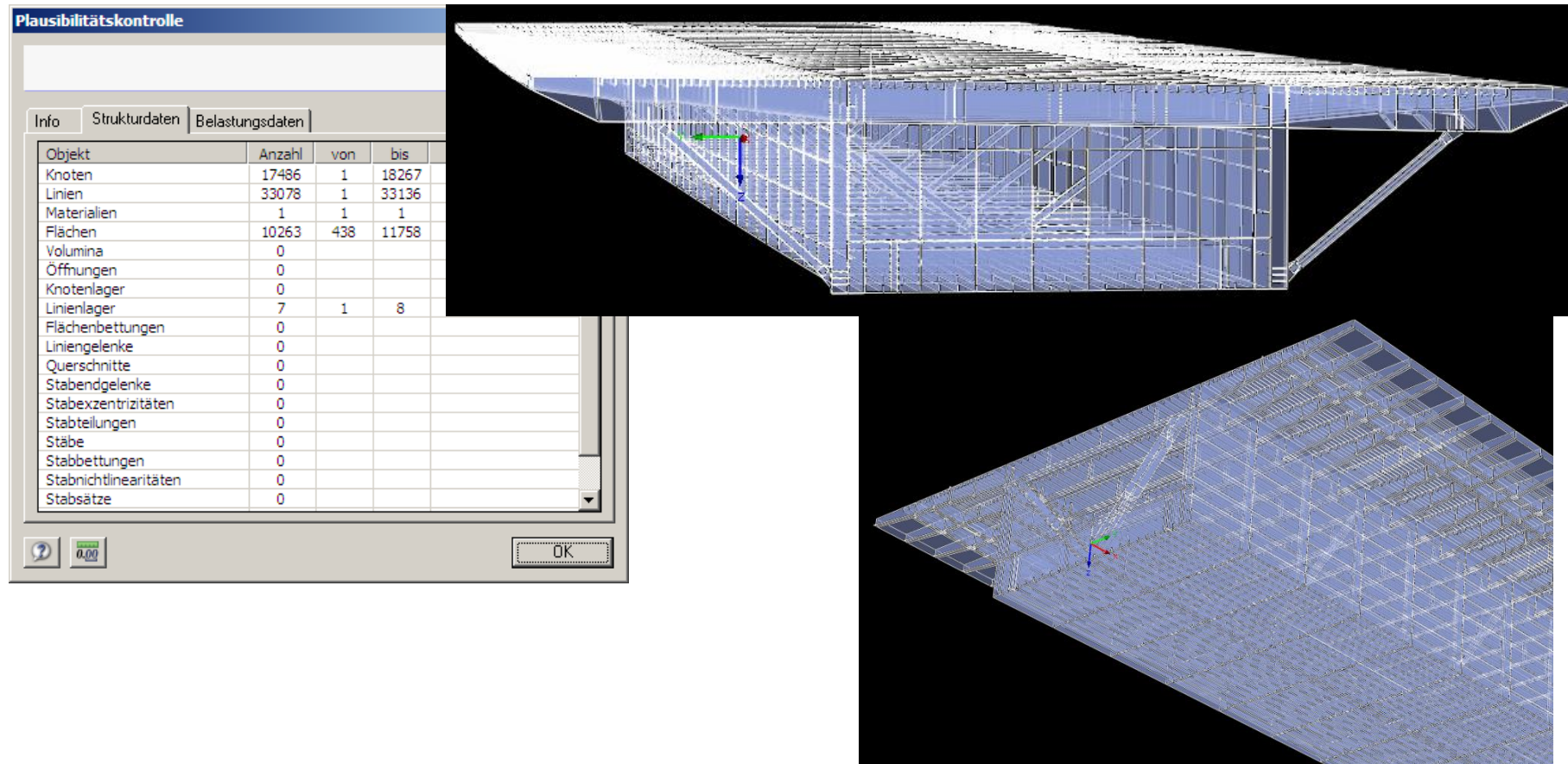


Bild 182: Finite Elemente Modellierung – Randfeld Schönberg und **Plausibilitätskontrolle der eingegebenen Brückengeometrie**

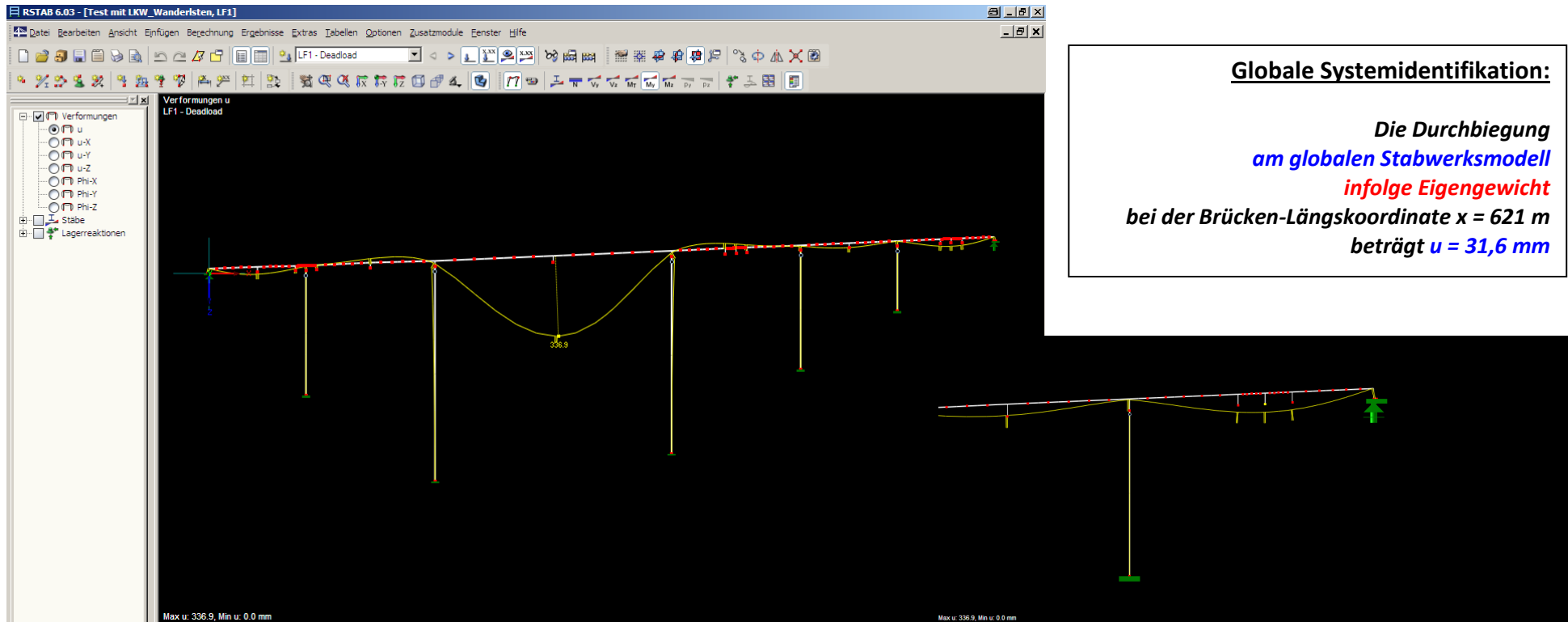
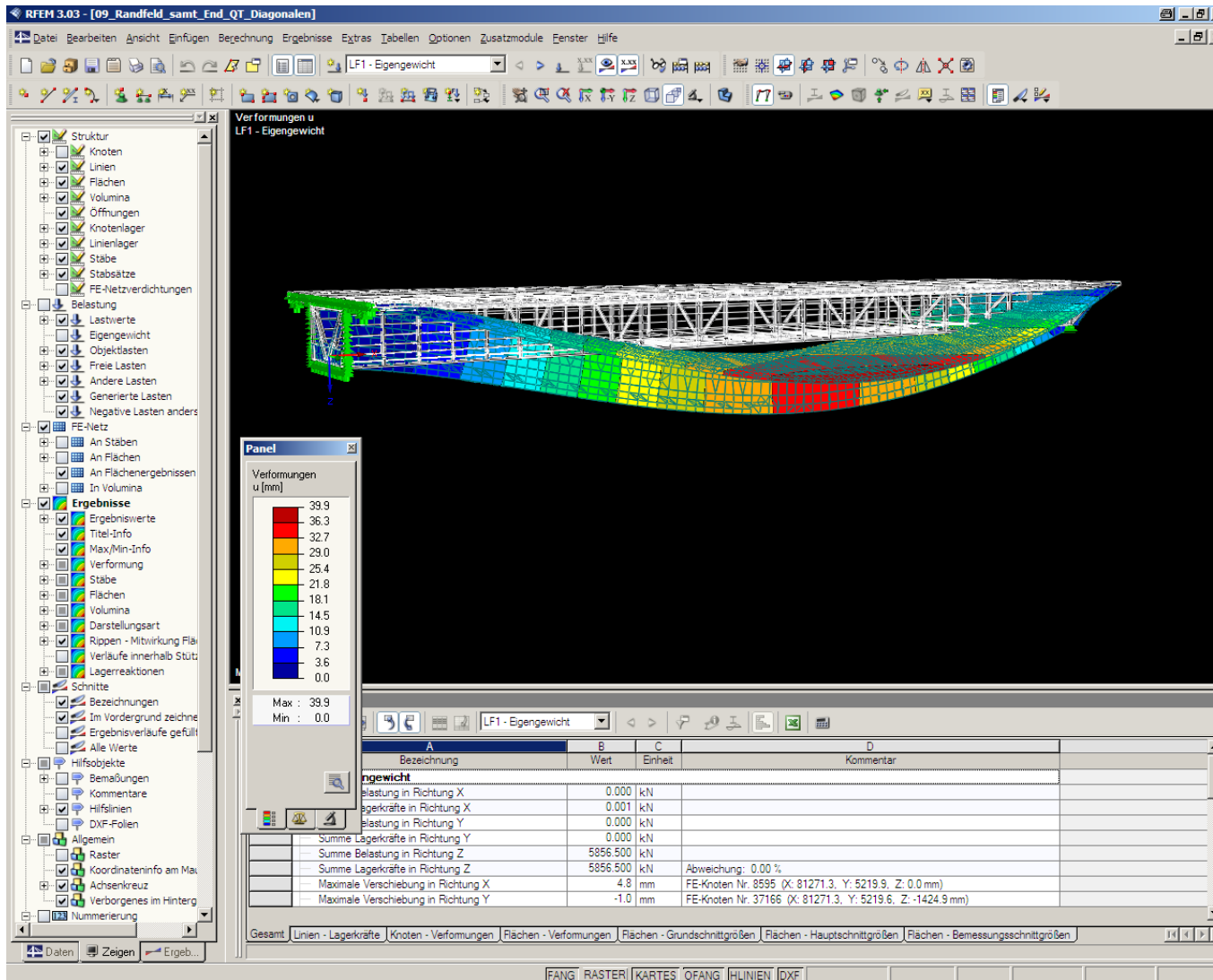


Bild 183: Finite Elemente Modellierung – Gesamtes Brückentragwerk - Plausibilitätskontrolle der Verformungen infolge ständiger Lasten

Es liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Gesamtbrückenstruktur (**Bild 183**) und dem globalen Randfeldmodell (**Bild 184**) vor. Das der Kontrolle dienende Stabwerks-Modell berücksichtigt keinerlei Quer-Elemente, d.h. weder Querträger der Fahrbahn- und Bodenplatte noch die Diagonalverbände. Das Schalenmodell wurde vereinfachender Weise im Pfeilerbereich entlang des dünnwandigen QS mittels Linienlagern festgehalten. Diese Näherung für den Übergang zum kontinuierlichen Durchlaufbalken entspricht weitgehend einer Einspannung, was für die vorliegende, rechnerische Anwendung und deren Aspekte hinreichend genau ist.



Globale Systemidentifikation:

Die Durchbiegung am globalen Schalenmodell infolge Eigengewicht bei der Brücken-Längskoordinate $x = 621$ m beträgt $u = 33,3$ mm

Bild 184: Finite Elemente Modellierung – Randfeld Schönberg - Plausibilitätskontrolle der Verformungen infolge ständiger Lasten

15.1.2 Der Lastfall 490 kN gemäß EN 1991-2

Nach Sicherstellung der strukturmechanisch richtigen Abbildung der Realität durch das im vorangegangenen Abschnitt dargelegte, erstellte FE-Modell wird nun der Vergleich zwischen den gemessenen Auswirkungen eines 42,8t LKWs (höchstmögliche im DYGES Algorithmus kalibrierte Belastung) mit den rechnerischen Auswirkungen eines 49 t LKWs (aus EN 1991-2) diskutiert, wobei das Schwerfahrzeug bezüglich seiner Lage in Brückenlängsrichtung zentral über dem untersuchten Querverband (V 30 QV-N) aufgestellt wurde. Die Wahl fiel insofern auf dieses Rechenfahrzeug innerhalb der Gruppe der Standardlastkraftwagen (**Bild 185**), da die Verteilung des Gesamtgewichtes auf die einzelnen Achsen bzw. die geometrischen Achsabstände sehr gut mit dem realen 42,8t Eichfahrzeug korrespondieren.

Es sei vorausgeschickt, das die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung prinzipiell sehr gut ist. Je nach – im Sinne der Lastabtragung - betrachteter Bauteilebene des entwickelten, 3-stufigen Untersuchungskonzeptes (**Kapitel 13**) liegen aber gewisse Unterschiede vor.



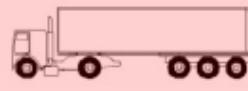

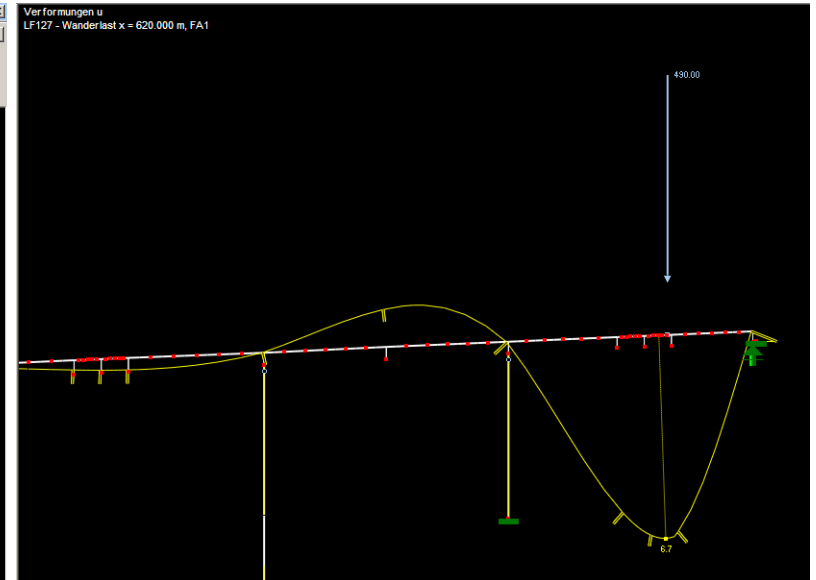
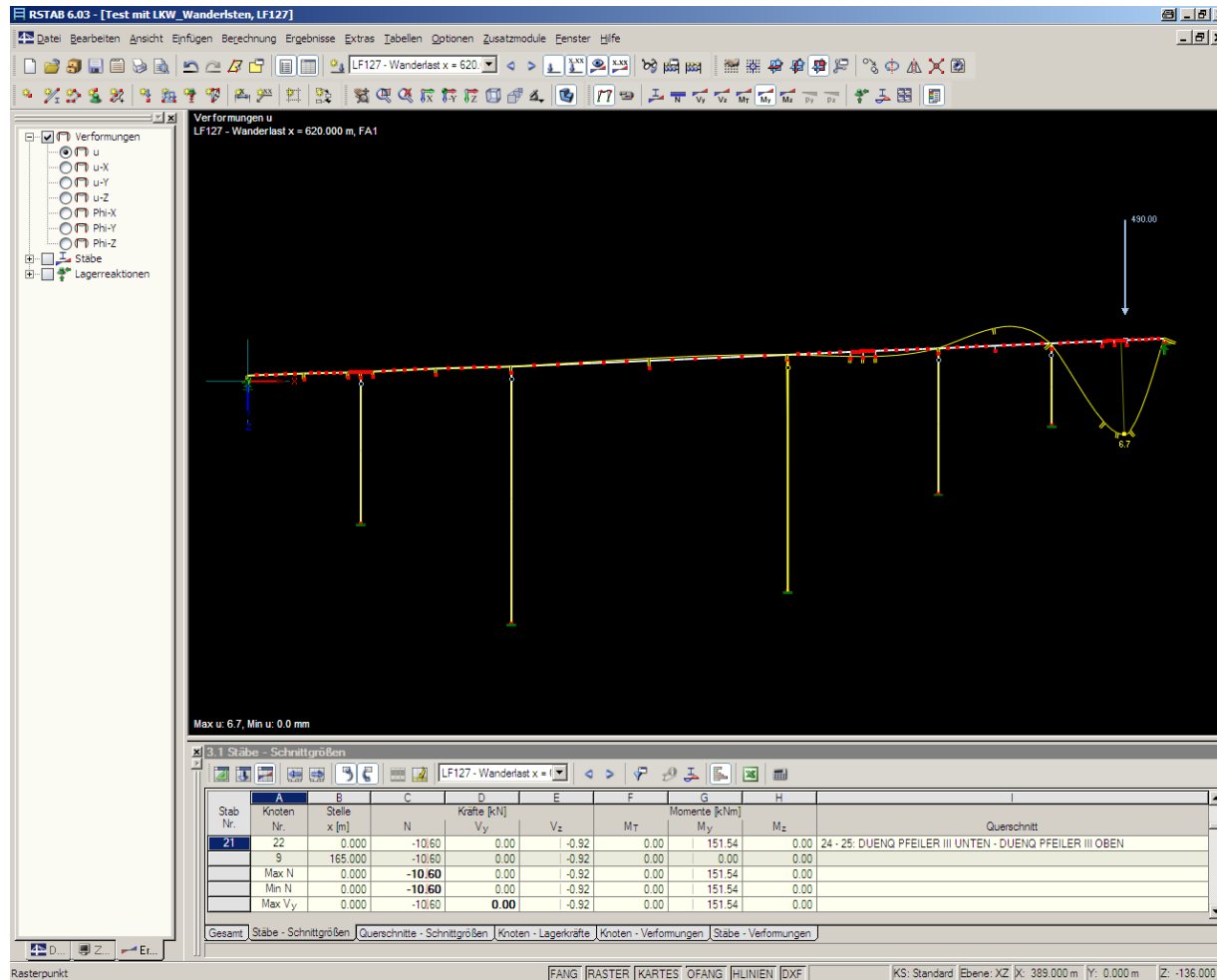
FAHRZEUGTYP			VERKEHRSART			
	Achsabstand (m)	Ersatzachslast (kN)	Große Entfernung	Mittlere Entfernung	Ortsverkehr	Reifenart
SCHWERFAHRZEUG			Schwerverkehrsanteil	Schwerverkehrsanteil	Schwerverkehrsanteil	
	4,5	70	20%	40%	80%	A
		130				B
	4,20	70	5%	10%	5%	A
		120				B
	1,30	120				B
	3,20	70	50%	30%	5%	A
		150				B
	5,20	90				C
	1,30	90				C
	1,30	90				C
Rechenfahrzeug lt. EN 1991-2: 490 kN = 49 t						
	1,30	90				B
		70	10%	5%	5%	A
	4,80	130				B
	3,60	90				C
	4,40	80				C
	1,30	80				C

Bild 185: Auswahl eines geeigneten „Rechenfahrzeugs“ aus der Gruppe der Standardlastkraftwagen des Ermüdungslastmodells 4 der EN 1991-2



Globale Systemidentifikation:

*Die Durchbiegung
am globalen Stabwerksmodell
infolge 49 t Normfahrzeug
bei der Brücken-Längskoordinate x = 621 m
beträgt u = 6,7 mm*

Bild 186: Finite Elemente Berechnung – Gesamtes Brückentragwerk - Plausibilitätskontrolle der Verformungen infolge 49t Normfahrzeug

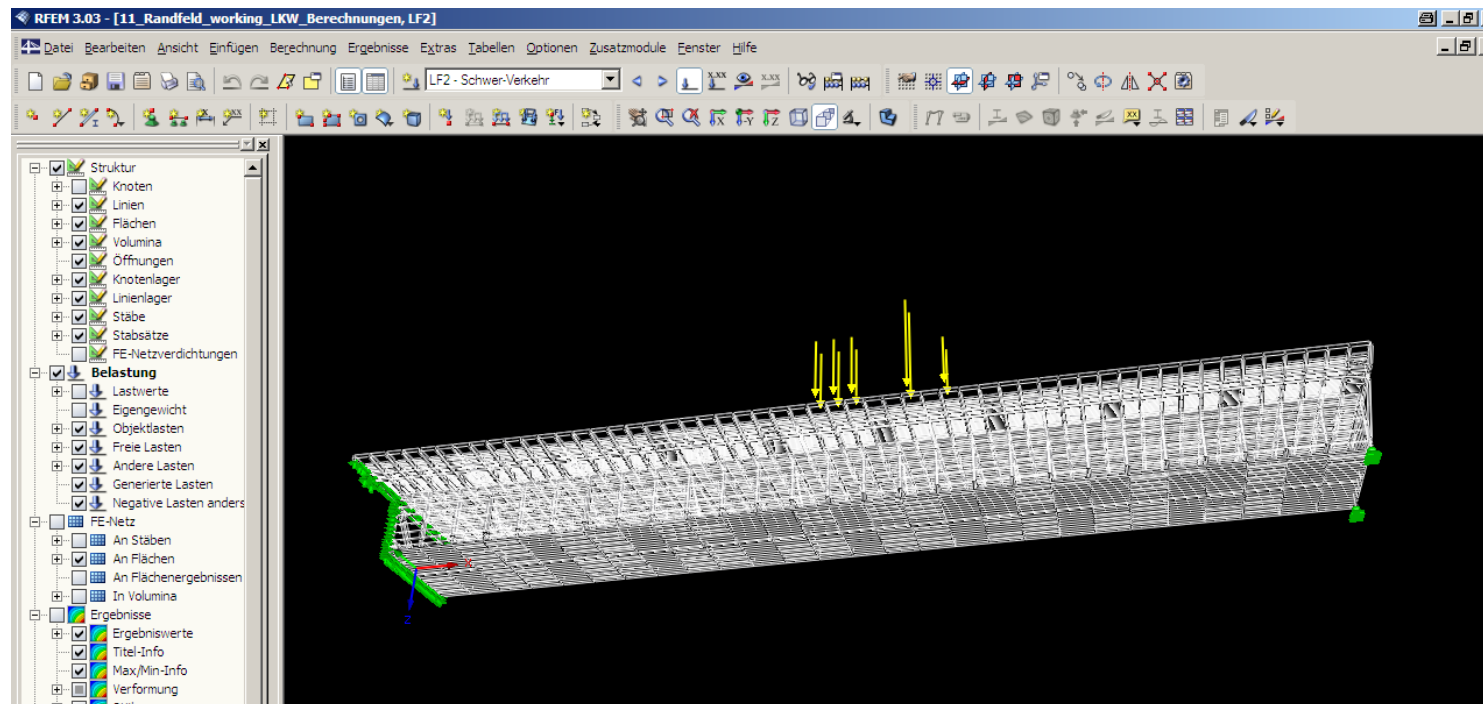
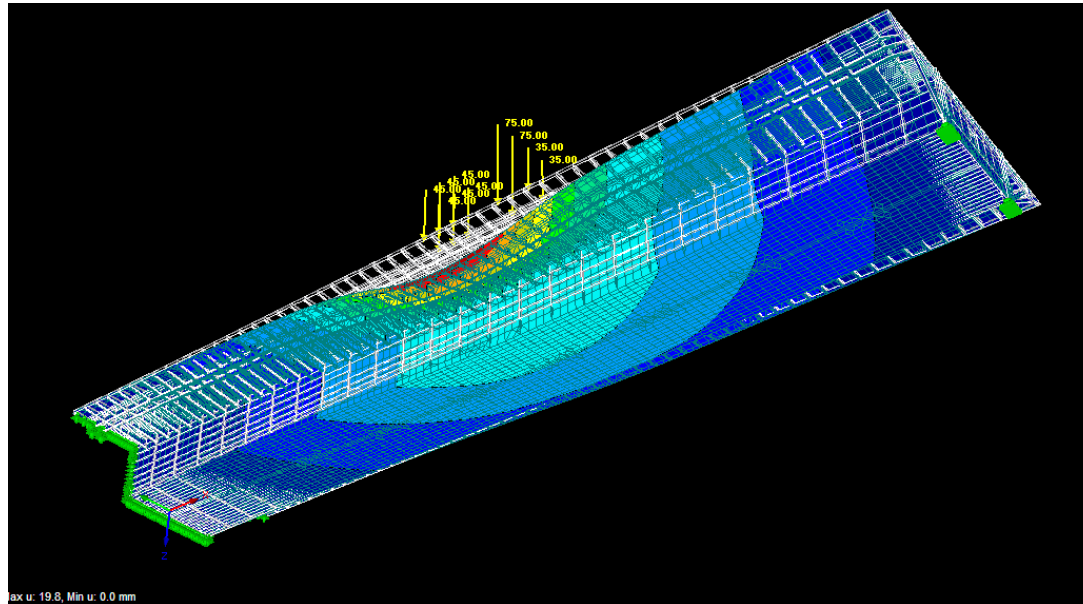


Bild 187: Finite Elemente Modellierung – das 49t Normfahrzeug am Randfeld Schönberg

- Im Zuge der **Analyse primären, lastabtragenden Struktur (Bauteilebene I)** zeigt sich zwischen den am globalen Finite Elemente Brückenmodell gerechneten und den am Randfeld Schönberg direkt gemessenen Brückenverformungen (Laser) eine hervorragende Übereinstimmung (vergleiche **Bild 186 & Bild 188**).
- Gleiches gilt für die **Analyse der sekundären, lastabtragenden Struktur (Bauteilebene II)**, d.h. zwischen den am FE-Modell des Brückenrandfeldes gerechneten und den direkt am Randfeld Schönberg bzw. über dem Pfeiler II gemessenen Kragarmverformungen (Laser) – siehe **Bild 188**.



49 t Normfahrzeug (gerechnet):
 Die Durchbiegung
 am globalen Schalenmodell
 bei der Brücken-Längskoordinate $x = 621\text{m}$
 beträgt für die Hauptträger $u = 6,8\text{ mm}$
 sowie für den Kragarm $u = 19,4\text{ mm}$

42,8 t DYGES LKW (gemessen):
 Die Durchbiegung im Randfeld Schönberg
 bei der Brücken-Längskoordinate $x = 621\text{m}$
 beträgt für die Hauptträger $u = 6,0\text{ mm}$
 sowie für den Kragarm $u \leq 17,0\text{ mm}$
 (bei der Brücken-Längskoordinate $x = 642\text{ m}$)

zum Vergleich:
 Die Durchbiegung am Kragarm über Pfeiler II
 beträgt gemessen $u = 5,5\text{ mm}$ sowie gerechnet $u = 4,8\text{ mm}$

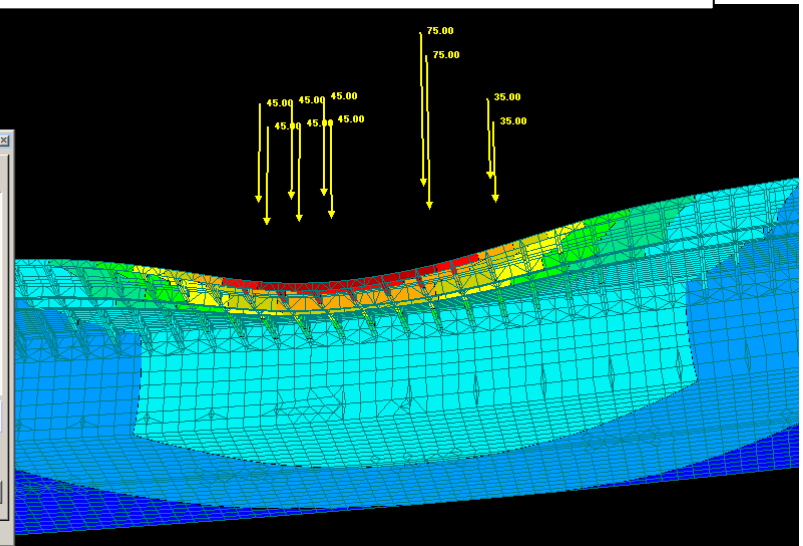
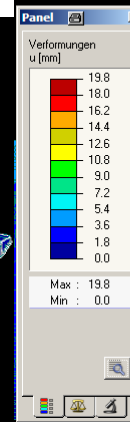
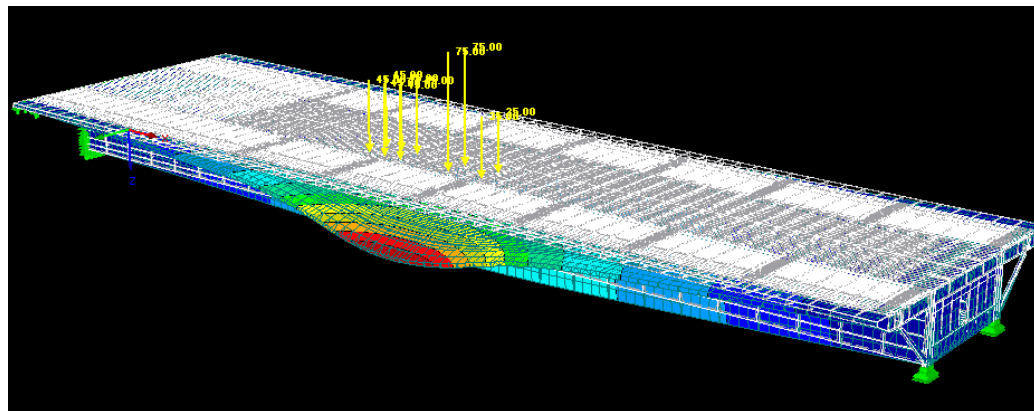


Bild 188: Finite Elemente Berechnung – Randfeld Schönberg - Plausibilitätskontrolle der Verformungen infolge 49t Normfahrzeug

15.2 Rechnerische FE-Analyse an einem ausgewählten Querverband

(betrachtet wird V 30 QV-N, d.h. vierter QV vom oberen Widerlager Schönberg aus Richtung Brenner)

15.2.1 Verformungen & Normalkräfte

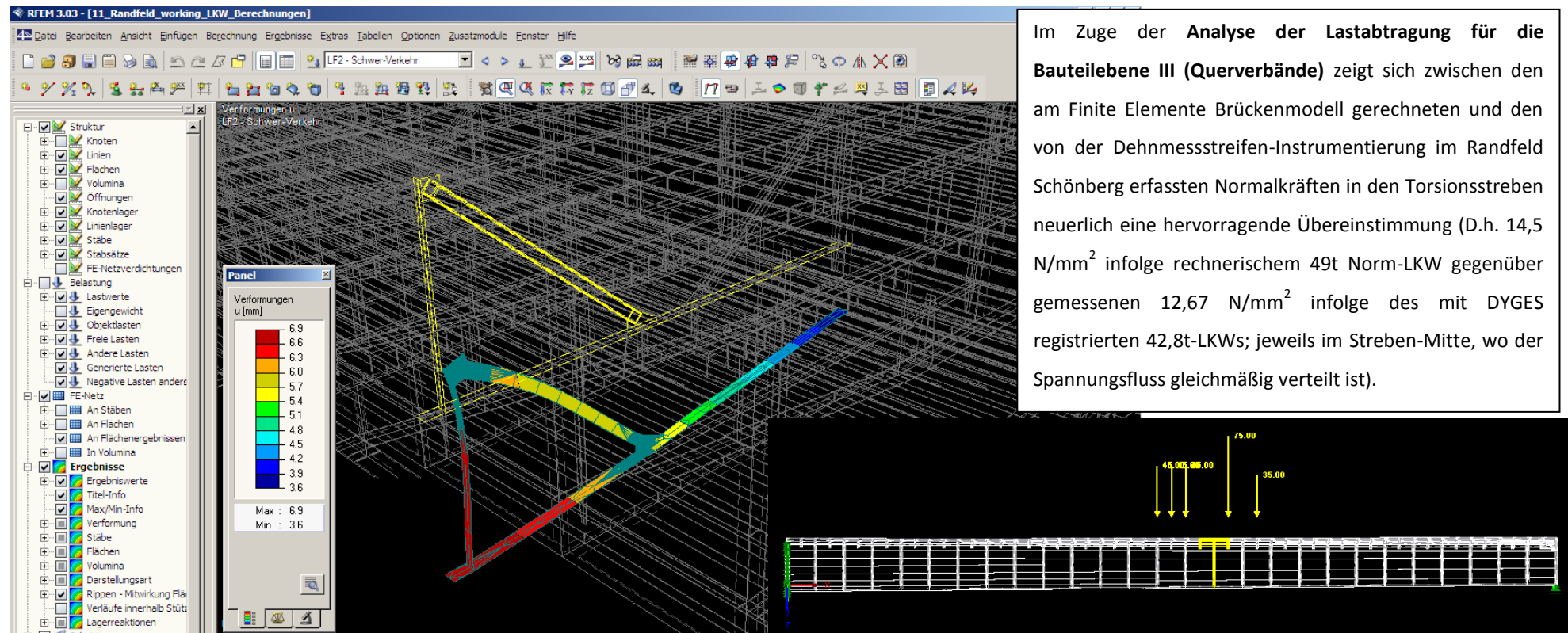


Bild 189: Finite Elemente Berechnung – Hervorheben der Verformungen des untersuchten Querverbandes V 30 QV-N infolge 49t Normfahrzeug im Randfeld Schönberg

15.2.2 Spannungs-Konzentrationsfaktor an den Kerben

Im vorliegenden Abschnitt erfolgt die Zusammenfassung der rechnerischen Ermittlung des so genannten **Spannungskonzentrations-Faktors**, welcher die an den jeweiligen Anschlussknoten auftretende **Kerbvergrößerung** der Spannungen (= Strukturspannungen) infolge Geometrie und Detail-Ausführung beziffert. Diese bedingt einen **überproportionalen Anstieg** der in hinreichend großer (definierter) Entfernung von der **Kerbe** entnommenen und normalerweise herangezogenen Nennspannungen.

Für jede – Finite Elemente gestützte - Schädigungsberechnung kommt der Bestimmung des Spannungskonzentrationsfaktors eine Schlüsselbedeutung zu. In [58] wird vom Autor der vorliegenden Dissertation im Rahmen detaillierter Schädigungsberechnungen zwei Mal auf Finite Elemente basierte Spannungskonzentrationsfaktoren zurückgegriffen, nämlich im Rahmen einer Schädigungsberechnung an den Diagonalstreben sowie im Rahmen einer Schädigungsberechnung an den Brücken-Kragarmen.

So wurde z.B. für Detailberechnungen an den Diagonalverbänden die **Maschenweite des FE-Netzes**, welche für das **Randfeld Schönberg** grundsätzlich mit **0,75 m** angesetzt wurde, örtlich auf **4 mm** verdichtet (**Bild 189 & Bild 190**). Danach wurden die in definierten Rasterpunkten berechneten Spannungs-Werte entnommen und in sog. Extrapolationsformeln eingesetzt, um die Singularität am Kerbdetail stabil und mechanisch korrekt abbilden zu können (**Bild 191 - Bild 193**) & [17]).

Die Ergebnisse dieses sehr lokalen Spannungsvergleiches werden nachfolgend zusammengefasst:

- Im Zuge der **Analyse der Lastabtragung für die Bauteilebene III (Querverbände)** zeigen sich zwischen den am Finite Elemente Brückenmodell gerechneten und den von der Dehnmessstreifen-Messung direkt erfassten Spannungen höhere Ergebniswerte in einer Größenordnung von **15-20%**.
- Während also – im Sinne der „klassischen“ statischen und dynamischen Zustandsgrößen – weitgehende Deckungsgleichheit besteht (siehe **Kapitel 15.1.2** und **15.2.1**), findet bei den lokalen Schnittgrößen (Spannungen) am analytischen Brückenmodell tendenziell eine Überhöhung der gerechneten Zustandsgrößen gegenüber der Messung statt.
- Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass die reale Konstruktion jedenfalls Möglichkeiten der Umlagerung des Kraftflusses infolge einer wirksamen Nachgiebigkeit der Anschlussknoten (Redundanz) gegenüber den als ideal, starr und biegesteif modellierten Knoten aufweist.

- Dieser Effekt kommt am oberen Diagonalen-Anschluss nochmals verstärkt zum Tragen, wo das Knotenblech unmittelbar in das geschraubte Rahmeneck mündet und der Kraftfluss dadurch an einem Punkt sehr hoher Steifigkeitskonzentration ankommt (siehe
- **Bild 191; $K_s > 4,2$**), während am unteren Anschluss der Vierkantdiagonale an den Flansch des Bodenplatten-Querträgers eine gewisse Nachgiebigkeit zu einer deutlich geringeren Spannungskonzentration führt (siehe **Bild 192 & Bild 193; $K_s > 2,5$**).
- Abschließend sei vervollständigend angemerkt, dass Spannungskonzentrationsfaktoren dieser Größenordnung im Bauwesen durchaus nicht unüblich sind. Beispielhaft dafür sei auf vergleichende rechnerische und messtechnische Untersuchungen hingewiesen, welche unter Federführung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM bzw. der Universität Siegen durchgeführt und veröffentlicht wurden [61].

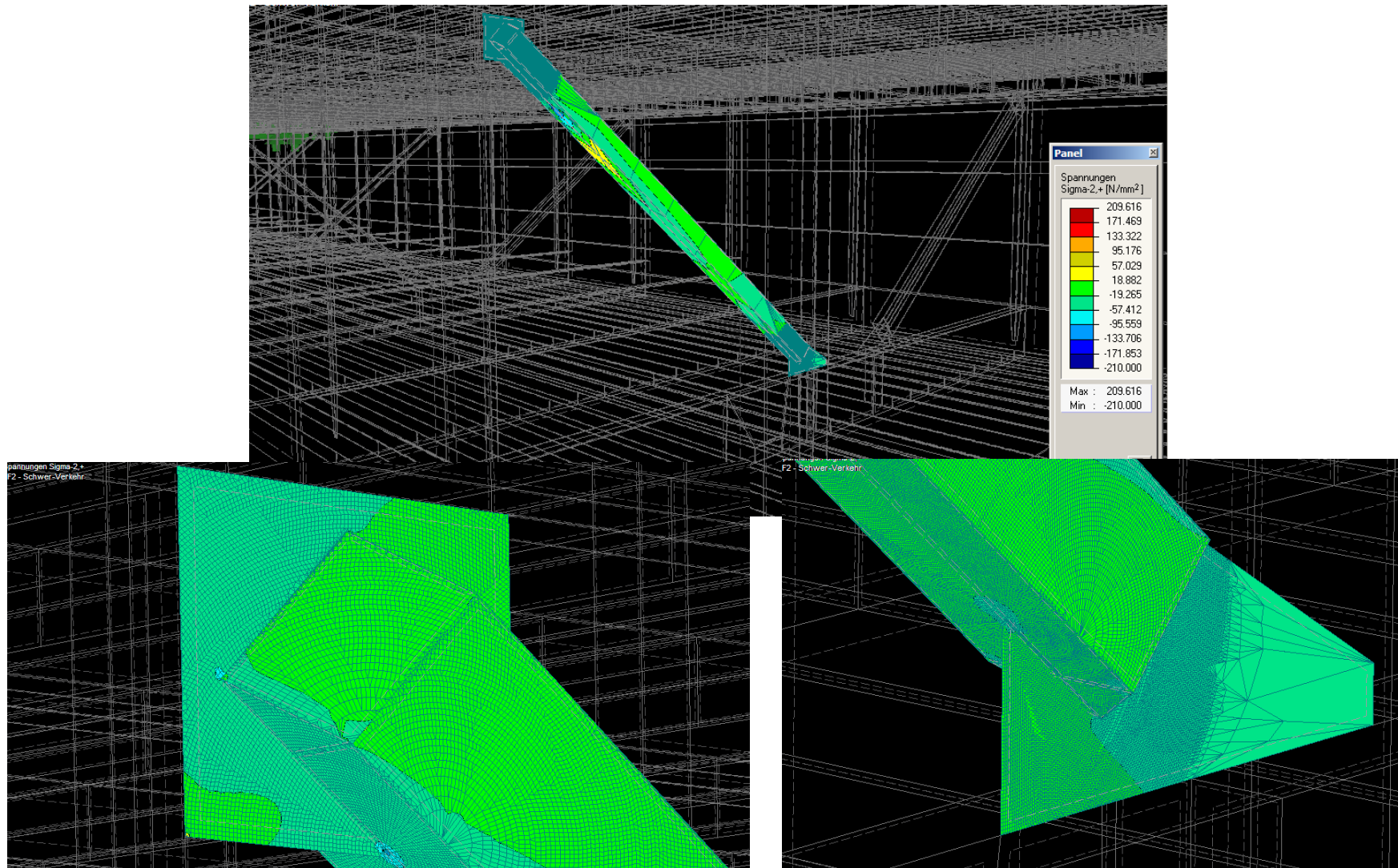


Bild 190: Finite Elemente Berechnung – maßgebliche Spannungsverteilung am untersuchten Querverband V 30 QV-N infolge des 49t Normfahrzeuges im Randfeld Schönberg

Detail: Oberer Anschluss der Diagonale an das Knotenblech
Type:
Kerbklasse: 100
Spannungsart: Strukturspannung
Stelle:

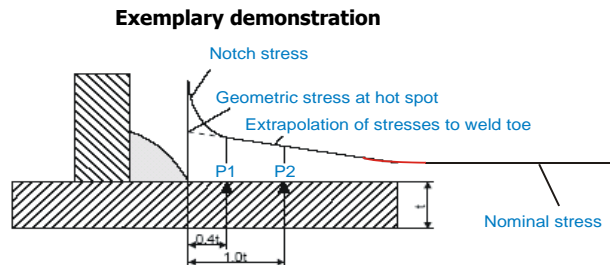
Relatively Coarse Meshing

$$\sigma_{hs} = 1.5 \cdot \sigma_{(0.5t)} - 0.5 \cdot \sigma_{(1.5t)}$$

$$\sigma_{(0.5t)} =$$

0 kN/cm²

$$\sigma_{(1.5t)} =$$



Comparative FE-based Nominal Stress

$$\sigma_{(2.0t)} =$$

kN/cm²

Relatively Fine Meshing

$$\sigma_{hs} = 1.67 \cdot \sigma_{(0.4t)} - 0.67 \cdot \sigma_{(1.0t)}$$

$$\sigma_{(0.4t)} =$$

0,00 kN/cm²

$$\sigma_{(1.0t)} =$$

ENHANCED

Relatively Coarse Meshing

Strukturspannungen FEM

Nennspannung FEM

$$\sigma_{hs} = 1.875 \cdot \sigma_{(0.5t)} - 1.25 \cdot \sigma_{(1.5t)} + 0.375 \cdot \sigma_{(2.5t)}$$

31,2 N/mm²

$$\sigma_{(0.5t)} = 102,9 \quad 131,95 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{(1.5t)} = 65,8$$

$$\sigma_{(2.5t)} = 56,7$$

Spannungskonzentrationsfaktor

4,23

Bild 191: FE-Analysen basierte Erfassung des Spannungskonzentrationsfaktors Ks
Oberer Anschluss: Vierkantdiagonale => Knotenblech

Detail: Unterer Anschluss der Diagonale an das Knotenblech
Type:
Kerbklasse: 100
Spannungsart: Strukturspannung
Stelle:

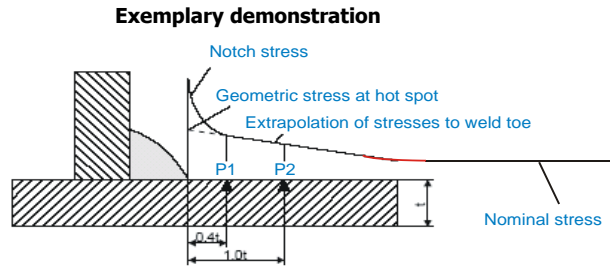
Relatively Coarse Meshing

$$\sigma_{hs} = 1.5 \cdot \sigma_{(0.5t)} - 0.5 \cdot \sigma_{(1.5t)}$$

$$\sigma_{(0.5t)} =$$

0 kN/cm²

$$\sigma_{(1.5t)} =$$



Comparative FE-based Nominal Stress

$$\sigma_{(2.0t)} =$$

kN/cm²

Relatively Fine Meshing

$$\sigma_{hs} = 1.67 \cdot \sigma_{(0.4t)} - 0.67 \cdot \sigma_{(1.0t)}$$

$$\sigma_{(0.4t)} =$$

0,00 kN/cm²

$$\sigma_{(1.0t)} =$$

ENHANCED

Relatively Coarse Meshing
Strukturspannungen FEM

Nennspannung FEM

$$\sigma_{hs} = 1.875 \cdot \sigma_{(0.5t)} - 1.25 \cdot \sigma_{(1.5t)} + 0.375 \cdot \sigma_{(2.5t)}$$

-30,5 N/mm²

$$\sigma_{(0.5t)} =$$

-58,9 -76,68 N/mm²

Spannungskonzentrationsfaktor

$$\sigma_{(1.5t)} =$$

-35,8

2,51

$$\sigma_{(2.5t)} =$$

-29,3

Bild 192: FE-Analysen basierte Erfassung des Spannungskonzentrationsfaktors Ks

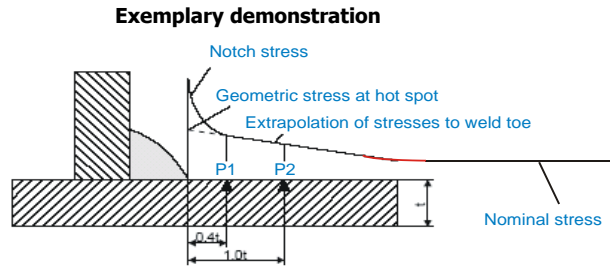
Unterer Anschluss: Vierkantdiagonale => Knotenblech

Detail: Unterer Diagonalen-Knotenblech an Querträger
Type:
Kerbklasse: 100
Spannungsart: Strukturspannung
Stelle:

Relatively Coarse Meshing

$$\sigma_{hs} = 1.5 \cdot \sigma_{(0.5t)} - 0.5 \cdot \sigma_{(1.5t)}$$

$\sigma_{(0.5t)} =$ **0 kN/cm²**
 $\sigma_{(1.5t)} =$



Comparative FE-based Nominal Stress

$\sigma_{(2.0t)} =$ **kN/cm²**

Relatively Fine Meshing

$$\sigma_{hs} = 1.67 \cdot \sigma_{(0.4t)} - 0.67 \cdot \sigma_{(1.0t)}$$

$\sigma_{(0.4t)} =$ **0,00 kN/cm²**
 $\sigma_{(1.0t)} =$

ENHANCED

Relatively Coarse Meshing
Strukturspannungen FEM

Nennspannung FEM

$$\sigma_{hs} = 1.875 \cdot \sigma_{(0.5t)} - 1.25 \cdot \sigma_{(1.5t)} + 0.375 \cdot \sigma_{(2.5t)}$$

$\sigma_{(0.5t)} =$ **60,7** **77,44** N/mm²
 $\sigma_{(1.5t)} =$ **36,3**
 $\sigma_{(2.5t)} =$ **24**

Nennspannung FEM **-30,5** N/mm²

Spannungskonzentrationsfaktor **-2,54**

Bild 193: FE-Analysen basierte Erfassung des Spannungskonzentrationsfaktors Ks
 Unterer Anschluss: Knotenblech => Flansch des Bodenplatten-Querträgers

16 ANHANG 8: ENTWICKLUNG EINES IN-SITU BASIERTEN LASTMODELLS ALS EINGANGSGRÖSSE BAUSTATISCHER NACHRECHNUNGEN

- **GRUNDLAGE - AUSGEWÄHLTE ASPEKTE DER BETRIEBSFESTIGKEIT (ERMÜDUNG)**
- **ZUSAMMENFASSUNG ZUM VORGEHEN**
- **EXTRAPOLATION DER DATEN AUF EINE „REGEL-WOCHE“**
- **REALE LASTSZENARIEN - ZUWEISUNG VON BELASTUNGSEIGENSCHAFTEN AUS
DYGES (MONITORING)**
- **INTEGRALES LASTMODELL**

Die vorliegende Doktorarbeit zielt nicht auf eine Neubewertung von Bemessungs-relevanten Lastannahmen ab, der Fokus liegt vordergründig auf einer rechnerischen Bewertung bestehender Konstruktionen. Im Zuge der Entwicklung und Evaluierung eines realen Lastmodells (unter Berücksichtigung der durch Messungen und analytische Vergleichsrechnungen hinterlegten Beanspruchungsfunktionen) erfolgen aber natürlich eine Referenzierung und ein Vergleich mit den derzeit gültigen Bemessungslasten (ÖNORM B 1991-2 [40]).

Der Autor hält fest, dass mit dem in dieser Dissertation erstellten Lastmodell lediglich ein Werkzeug für statisch-konstruktive Nachrechnungen an bestehenden Bauwerken geliefert werden soll. Es handelt sich dabei nicht um ein im Detail ausgearbeitetes Modell für jeden in Betracht kommenden Nachweispunkt der Brücke. Es wird daher nicht, wie sonst üblich, mit Achslasten gearbeitet, sondern mit einer nachfolgend in **Kapitel 16.1.3** eingeführten, neuen Kenngröße – der sog. Schädigungsäquivalenten - auf Basis von tatsächlich auftretenden Lastbildern, der zugehörigen, resultierenden Lastintensitäten (Tonnagen) sowie deren Auftretens-Häufigkeiten. Anhand dieser realen Eingangsparameter kann jeder Benutzer dieses Modells die für ihn relevanten Lastkonfigurationen (bestehend aus realen Schwerverkehrseinheiten) selbst zusammenstellen und lokale Nachweise durchführen.

Grundlage für die vergleichende Lastmodellierung waren zunächst die fünf Ermüdungs-Lastmodelle (ELM 1-5) des Eurocode (ÖNORM B 1991-2 [40]), wobei die Betrachtung danach auch auf das dem Grenzzustand der Tragfähigkeit zugehörigen Lastmodell LM 1 ausgedehnt wird.

16.1 Grundlage - Ausgewählte Aspekte der Betriebsfestigkeit (Ermüdung)

Gerade zu Thema Ermüdung und dessen Grundlagen bietet die Literatur eine Fülle an erstklassigen Buch-Publikationen, die sich umfassend und ganzheitlich mit dieser weitreichenden Materie beschäftigen. Aus dieser Reihe ist nach Meinung des Autors insbesondere das Buch Betriebsfestigkeit von Haibach hervorzuheben [39]. In der ursprünglichen Fassung der vorliegenden Dissertation [58] wurde eine prinzipielle Gesamtübersicht zum Thema Ermüdung gegeben.

In der nunmehrigen Fassung unterbleibt dies, vielmehr soll mit dem **aktuellem Unterkapitel 16.1** nur einen verständlichen Übergang zwischen den bisherigen Analysen zur Erfassung der realen Betriebsbeanspruchung und deren Umsetzung zur Generierung eines neuen Lastmodells (als Grundlage zur Schädigungsberechnung an maßgeblichen Bauteilen) geschaffen werden – unter komprimierter Aufbereitung der dafür herangezogenen, grundlagentheoretischen Komponenten.

16.1.1 Das Prinzip der Schadensakkumulation

Mit Hilfe der Schadensakkumulations-Hypothese nach Palmgren und Miner lässt sich die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils unter wirklichkeitsnahen Betriebsbedingungen – d.h. die Betriebsfestigkeit - ermitteln [39].

In Hinblick auf die rechnerische Ermittlung des Beginns eines Ermüdungsbruches gilt es zunächst aus einer regellosen Abfolge von Belastungen unterschiedlicher Größe und Häufigkeit ein Beanspruchungskollektiv abzuleiten. Für die Auswertung der Beanspruchungskollektive wird im Allgemeinen $\Delta\sigma$ verwendet (siehe auch **Bild 197**). Mit Hilfe von Rainflow- oder Reservoir-Zählungen (siehe **Kapitel 3.5.4** bzw. **16.1.2** sowie insbesondere [58]) wird das sogenannte Spannungsschwingbreitenspektrum ermittelt welches angibt, wie oft eine Schwingbreite $\Delta\sigma_i$ auftritt. Die Ermüdungsanalysen selbst werden in weiterer Folge durch einen Vergleich der Anzahl der auftretenden Vollschwingspiele n mit der Anzahl der aufnehmbaren Vollschwingspiele N realisiert. Die Teilschäden D_i selbst definieren sich infolge Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren und Miner aus

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (46)$$

wobei n_i für die Anzahl der auftretenden Vollschwingspiele mit einer bestimmten Schwingbreite $\Delta\sigma$ steht und N_i die Anzahl der auf diesem Intensitätsniveau aufnehmbaren Vollschwingspiele vorgibt.

Bild 194 zeigt die im EC 3 [44] verankerten Ermüdungsfestigkeitskurven (Wöhlerkurven), welche durch gezielte Dauerschwingversuche an diversen Konstruktionsdetails erzeugt wurden. Diese Kurven beinhalten den Einfluss lokaler Kerben zufolge Schweißen, jenen der Beanspruchungsausrichtung, der Eigenspannungen und aus Herstellungscharakteristika.

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad D_1 = \sum_1^j \frac{n_i}{N_i} \quad D_2 = \sum_{j+1}^z \frac{n_i}{N_i} \quad D = \sum_1^z D_i = D_1 + D_2 \quad (47)$$

Die Teilschädigungen D_i , welche aus Schwingbreiten innerhalb der Wöhlerkurven-Neigung $m=3$ resultieren, werden in D_1 zusammengefasst während jene, die in den Bereich der Wöhlerkurven-Neigung $m=5$ fallen, in D_2 zusammengefasst werden. Spannungsamplituden, welche den Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ unterschreiten, bleiben in weiterer Folge unberücksichtigt (**Bild 194**).

Das geschilderte Vorgehen lässt sich wie folgt zusammenfassen: Nachdem die einwirkende, nichtperiodische Beanspruchung durch entsprechende Auswertungen in ein Beanspruchungskollektiv übergeführt wird, kann dieses mit den Wöhlerkurven verglichen werden, welche die Ermüdungsfestigkeit infolge periodischer Beanspruchung repräsentieren [34].

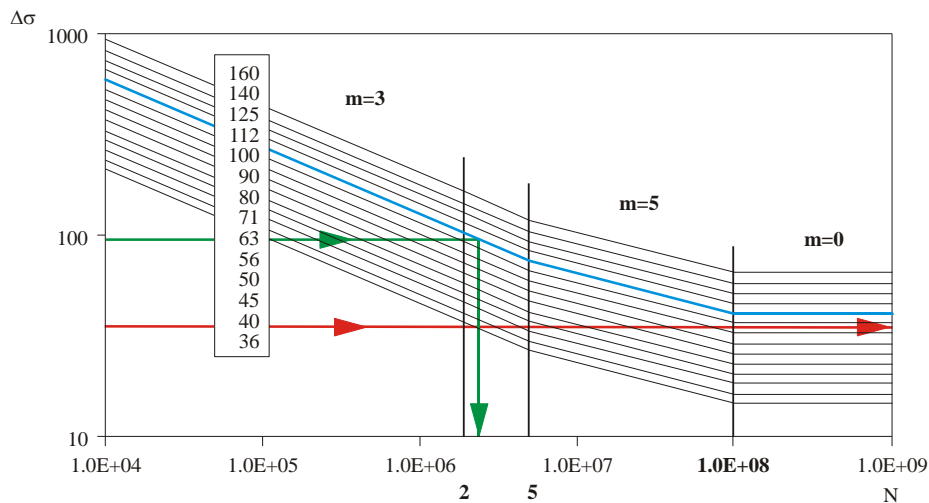


Bild 194: Die aus dem EC3 [44] entnommenen Wöhlerkurven für einzelne Kerbklassen - ermüdungsrelevante (grün) vs. irrelevante Belastungszyklen (rot)

16.1.2 Überführung der Beanspruchungs-Zeit-Funktion in Zählungsmatrizen

Das Ergebnis einer Ermüdungs-relevanten Auswertung von nichtperiodischen Beanspruchungsfunktionen ist letztlich eine 2-parametrische Zählungsmatrix (sog. Rainflowmatrix), welche die Häufigkeit n_i der auftretenden Verformungszyklen als Überschreitungen von einem bestimmten Beanspruchungslevel zu einem anderen beinhaltet. Diese Matrix kann sowohl 2-dimensional als auch 3-dimensional dargestellt werden, wie z.B. in **Bild 195** zu sehen ist.

Diese Zählungsmatrizen können auch als Grundlage für eine gedankliche, nachgeschaltete Isolierung des ermüdungsrelevanten Verkehrs (maßgebliche Ereignisse pro Tag) vom wahllos und zufällig auftretenden Gesamtverkehr (Schwerfahrzeuge pro Tag) aufgefasst werden. **Bild 195** zeigt für den DYGES-Messquerschnitt am Kragarm die Rainflow-Auswertung für einen repräsentativen Beispiel-Monat. Bei der Bewertung solcher Zählungsmatrizen spricht man von registrierten, ermüdungsrelevanten Tragwerksantworten auf die auftretende, zeitlich vorab definierte Verkehrsbelastung, die nicht mehr direkt mit Daten einer typischen Verkehrszählung verglichen werden können.

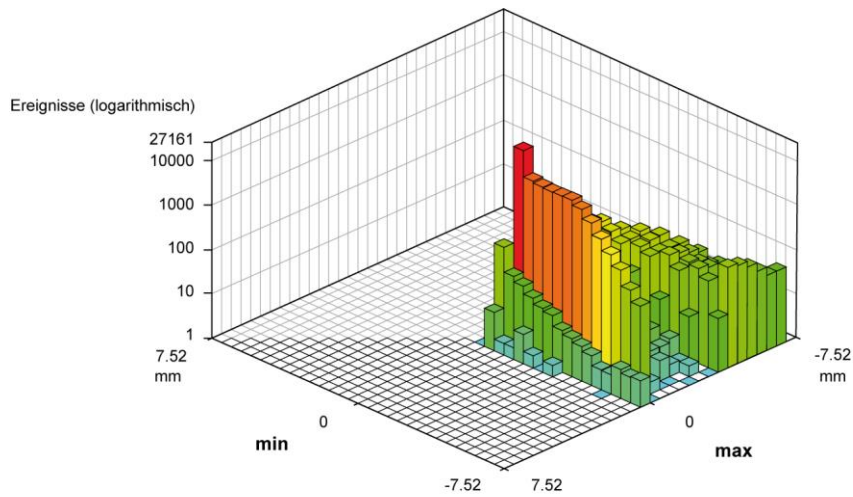


Bild 195: Räumliche Darstellung einer Rainflow-Matrix für die DYGES-Beanspruchungsfunktion des Beispielmonats Juli 2004

Um einen direkten Bezug von gezählten Schwingspielen zu ihrer ermüdungsrelevanten Auswirkung herzustellen, ist eine Umrechnung der Rainflow-Matrix in eine so genannte Damage-Matrix (siehe **Bild 196**) notwendig. Dafür wird die aus dem gewählten Signal abgeleitete Zählungs-Matrix mit einer für das analysierte Detail passenden Wöhlerkurve (Kerbklasse) verknüpft. Auf dem Prinzip der Schadensakkumulation werden die gezählten Ereignisse innerhalb jedes Matrix-Feldes in Schädigungsbeiträge D_i übergeführt und schließlich für die gesamte Zählungsmatrix zu einer Gesamtschädigung D der zeitlich abgegrenzten Beanspruchungsfunktion hochgerechnet.

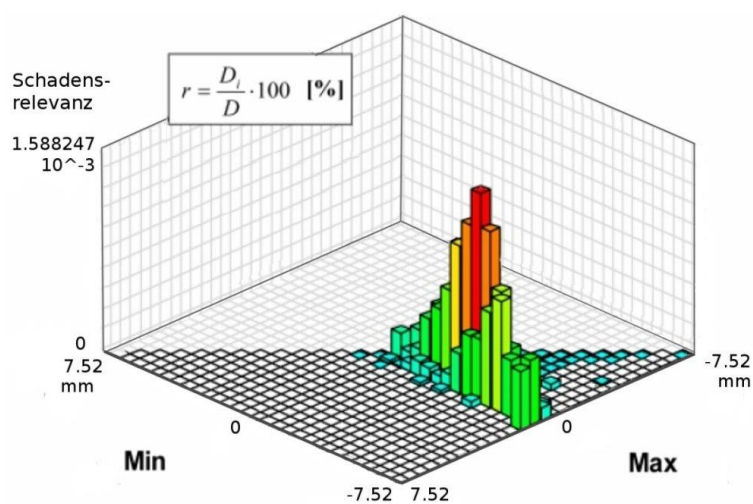


Bild 196: Damage-Matrix für das Beispielmonat Juli 2004 aus **Bild 195**

Die nachfolgende Formel wird benutzt, um die jeweilige Schadensrelevanz r der einzelnen Matrix-Einträge D_i innerhalb der Gesamtschädigung D je Beobachtungszeitraum in Prozent zu quantifizieren.

$$r = \frac{D_i}{D} * 100[\%] \quad (48)$$

Gegebenenfalls erfolgt im Zuge der Kopplung mit den Wöhler-Kurven eine Bereinigung der gezählten Antwortzyklen um die „Kleinstereignisse“ unterhalb des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$, die für Überlegungen der Betriebsfestigkeit entsprechend ohne Bedeutung bleiben (**Bild 194**). Zur Nachvollziehbarkeit einer solchen Überführung sei wiederum auf [58] hingewiesen.

Die Darstellung in **Bild 196** unterstreicht, dass für Ermüdungsüberlegungen bekanntlich nicht die maximalen (Einzel)-Ereignisse entscheidend sind, sondern ein konstant hohes Belastungsspektrum oberhalb des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit der anzuwendenden Wöhlerkurve. Dies wird - nach Überführung der an sich registrierten Ereignisse in die Damage-Matrix - durch die im Bewertungsprozess verbliebenen, wiederkehrenden Ereignisse der Häufigkeit n_i reflektiert.

Das vorgestellte Verfahren zur Generierung von Rainflow- bzw. Damage-Matrizen wird in [58] im Zuge der vorgenommenen Analysen zur Bauteilalterung infolge realer Einwirkung auch unmittelbar dazu verwendet, für jede der im **Kapitel 13** definierten Lastabtragungs-Bauteilebenen jeweils den maßgebliche Verkehr (ermüdungsrelevante Ereignisse pro Tag) vom wahllos, zufällig auftretenden Gesamtverkehr (Fahrzeuge pro Tag) herauszulösen. Dieser resultierende Einfluss geht in weiterer Folge in die Ermüdungs-Berechnungen in Form eines jährlichen Verbrauchs der bauteilweise verfügbaren Gesamtkapazität ein.

16.1.3 Überführung der Palmgren-Miner Schadensakkumulation in schädigungsäquivalente Betriebsbeanspruchung infolge Schwerverkehr

Kernaussage der Palmgren-Miner Regel ist, dass unterschiedliche Beanspruchungen $\Delta\sigma_i$, die jeweils n_i - fach auftreten, entsprechende Teilschädigungen D_i bedingen - vergleiche Formel (46). Per Definition ist die Aufnahmekapazität an Schwingspielen nicht aufgebraucht, solange die nachfolgende Beziehung erfüllt ist:

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (49)$$

Der Ermüdungsschaden wird im Rahmen der vorliegenden Schadensakkumulations-Hypothese mit dem Auftreten eines sichtbaren Anrisses an der Kerbe gleichgesetzt.

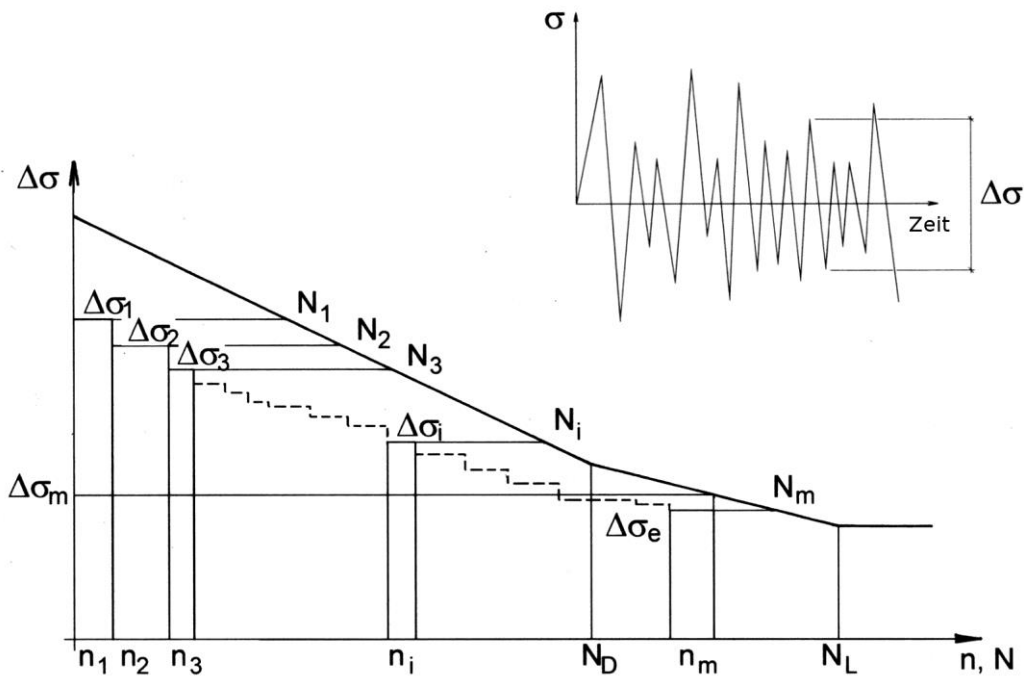


Bild 197: Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner [34]

Mit Hilfe der Miner-Regel können gegebene Spannungsschwingbreitenspektren auch in schadensäquivalente Spannungsschwingbreiten umgewandelt werden [34]. Dieser Ansatz wird nachfolgend weiterverwendet, um überhaupt eine Vergleichsbasis zwischen dem in der vorliegenden Doktorarbeit zu erstellenden Lastmodell und den (Ermüdungs)-Lastmodellen des Eurocode zu schaffen.

Dazu kann aus der Gleichung der Wöhlerkurve über die Miner-Regel nachfolgendes Gleichnis hergeleitet werden

$$\Delta\sigma_i^m N_i = \Delta\sigma_D^m N_D \tag{ 50}$$

$\Delta\sigma_D$ steht für die Dauerfestigkeit und N_D für die zugehörige Lastspielzahl (in der Regel 2×10^6). Durch die vereinfachende Annahme, dass jeder Beitrag schädigungsrelevant ist, wird der Parameter der Wöhlerkurven-Neigung einheitlich mit $m=3$ angesetzt (vergleiche [39] - Elementare Form des Miner-Ansatzes). Umgeformt nach N_i erhält man

$$N_i = \frac{\Delta\sigma_D^m}{\Delta\sigma_i^m} N_D \tag{ 51}$$

Durch Einsetzen in den Ansatz **(49)** der Schadensakkumulation erhält man

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} = \sum \frac{n_i}{\Delta\sigma_D^m} \frac{\Delta\sigma_i^m}{N_D} \quad (52)$$

Als Bindeglied zwischen dem in der vorliegenden Dissertation zu entwickelnden DYGES-Lastmodell und den Lastmodellen der maßgeblichen Normen wird vom Autor nun stellvertretend für akkumulierende Ermüdungsschädigung der sogenannte „Schädigungsäquivalent“ als Schlüsselparameter eingeführt, der gedanklich aus dem Formel-Ansatz **(52)** herausgelöst wird:

$$\text{Schädigungsäquivalent} = \frac{\text{Schädigungsbeitrag der Auftretenshäufigkeit } n_i}{\text{Schädigungsbeitrag der Auftretensintensität } \Delta\sigma_i^m} * \quad (53)$$

$\Delta\sigma_D$ und N_D sind in den Formelansätzen **(52)** bzw. **(53)** konstant, während für die Lastspiel-Anzahl n_i und die Schwingbreite $\Delta\sigma_i^m$ die Analogie zu gezählten LKW-Überfahrten und den zugehörigen Tonnagen erkannt wurde und daher genutzt wird. Anders ausgedrückt werden die ermittelten Tonnagen in weiterer Folge im Sinne der Miner-Regel stellvertretend für die Schwingbreite $\Delta\sigma$ verwendet. Die gezählten Schwerverkehrshäufigkeiten werden in weiterer Folge im Sinne der Miner-Regel stellvertretend für die Lastspiel-Anzahl n_i verwendet. Der resultierende Schädigungsäquivalent ergibt sich laut **(53)** als mathematisches Produkt aus dem “Schädigungsbeitrag der Auftretens-Häufigkeit n_i ” mit dem “Schädigungsbeitrag der Auftretens-Intensität $\Delta\sigma_i^m$ ” und ist jeweils für Biegung und für Torsion herzuleiten (weitere Details bzw. die unmittelbaren Umsetzung können den **Kapiteln 16.5 & 17** entnommen werden).

16.2 Zusammenfassung zum Vorgehen

Zur Erstellung eines realen Lastmodells im Sinne der bisherigen, integralen Betrachtungsweise ist es notwendig, die beobachteten, realen Last-Stellungen mit den aus der permanenten Überwachung stammenden Eigenschaften der Belastungs-Intensität (Tonnagen) zu verknüpfen.

Während die neuartige Erfassung der LKW-Lasten ausführlich in **Kapitel 3** erörtert wurde (Dynamisches Gewichtserfassung DYGES – basierend auf permanentem Monitoring), stehen infolge ausgedehnter Videoaufzeichnungen (**Sondermessung 2007 - Kapitel 13**) zusätzlich auch die realen Lastbilder incl. deren jeweiliger Auftretens-Häufigkeit zur Verfügung (siehe **Kapitel 18**).

Bereits zu Beginn der Auswertung der Messdaten dieser Sondermessung wurde anhand der Aufzeichnungen des permanenten Monitoringsystems geklärt, dass es sich bei der Kalenderwoche 21/2007 um einen durch tatsächlichen Regelbetrieb gekennzeichneten Zeitraum handelt. Das Schwerverkehrsaufkommen im vorliegenden Zeitfenster von mehreren Tagen konnte nach einem Abgleich mit der vorangegangenen und der nachfolgenden Woche als typisch charakterisiert werden.

- ❖ Nach umfassender Verifizierung des Beobachtungszeitraums während der Sondermessung hinsichtlich eines als repräsentativ anzusehenden Samples der kategorisierten und gezählten Belastungsszenarien werden in einem ersten Schritt Stundenmittelwerte für die verschiedenen Lastbilder ermittelt, um daraus einen Häufigkeitsansatz pro Tag ableiten zu können.
- ❖ Zusammen mit den vorher ermittelten Tageshäufigkeiten pro Szenario wird dann ein Belastungskollektiv pro Werktag und pro Wochenende festgelegt. Mit diesen Eckdaten wird in weiterer Folge auf eine "Regel-Woche" geschlossen, welche letztlich auf einen typischen Schwerverkehrs-Monat beziehungsweise auf ein Regel-Jahr 2007 hochgerechnet wird.

Wie bereits eingangs festgehalten, soll die Zusammenführung der genannten Quellen eine realitätsnahe Einwirkungscharakteristik für etwaige statische Nachrechnungen bereitstellen. Trotz des Anspruches einer allgemeingültigen Verwendbarkeit des entwickelten Lastmodells im Sinne der beiden wesentlichen rechnerischen Grenzzustände (Tragfähigkeit & Gebrauchstauglichkeit) gilt das vordergründige Interesse beim vorliegenden Brückentragwerk der Bewertung des realen Alterungsprozesses. Dadurch ergibt sich eine schwerpunktmäßige Referenzierung zu den Ermüdungslastmodellen des Eurocode [40] bzw. versteht sich das Lastmodell dieser Dissertation als die im Eurocode vorgesehene Möglichkeit, eine Alternative aus einem Feldversuch als sog. Ermüdungslastmodell 5 bereitzustellen (siehe **Kapitel 17.1.5**). Dennoch wird abrundend auch eine vollwertige Vergleichsbetrachtung zu den Traglasten ausgearbeitet (siehe **Abschnitt 17.2.2**).

16.3 Extrapolation der Daten auf eine „Regel-Woche“

In der **Tabelle 42** sind die Daten der Mautstationen Iglis-Patsch und Schönberg-Stubaital für die Kalenderwoche 21 des Jahres 2007 zusammengefasst. Die stundenweise aufgeschlüsselten Werte der ASFINAG Mautservice GmbH, auf deren Basis diese Tabelle erstellt wurde, sind im **Kapitel 18** zu finden.

- ❖ Anhand dieser Zahlen wurden die Stundenmittelwerte für die einzelnen Tage beziehungsweise Nächte in beiden Fahrtrichtungen berechnet.
- ❖ Daraus wurden dann
 - die das Tragwerk überfahrende LKW-Summen pro Stunde
 - und Mittelwerte des LKW-Aufkommens für Werkzeuge, für das Wochenende bzw. für den Nachtverkehr gebildet (siehe jeweils **Tabelle 42**).

Mautdaten ASFINAG KW 21 2007	LKW / Stunde		Summe LKW / h auf dem Tragwerk
	RFB Brenner	RFB Innsbruck	
MO 0-5 Uhr	24	11	35
MO 5-22 Uhr	263	197	460
MO 22-DI 5 Uhr	18	21	39
DI 5-22 Uhr	272	249	521
DI 22-MI 5 Uhr	23	21	44
MI 5-22 Uhr	288	262	550
MI 22-DO 5 Uhr	22	22	44
DO 5-22 Uhr	263	257	520
DO 22-FR 5 Uhr	26	22	48
FR 5-22 Uhr	187	259	446
FR 22-SA 5 Uhr	37	25	62
SA 5-16 Uhr	202	244	446
SA 16-22 Uhr	41	39	80
SA 22-SO 5 Uhr	14	10	24
SO 5-22 Uhr	41	35	76
SO 22-0 Uhr	130	15	145
MITTELWERTE			
Werktags tagsüber	246	245	491
Werktags Nacht	25	22	47
Wochenende tagsüber	41	37	78
Wochenende Nacht	14	10	24

Tabelle 42: Stundenmittelwerte für den Schwerverkehr – Für die gesamte Kalenderwoche 21

Ein Tag wird grundsätzlich unterteilt in 17 Stunden Tagesverkehr (von 5-22 Uhr) und 7 Stunden Nachtverkehr (von 22 Uhr bis 5 Uhr des darauf folgenden Tages). Dieser Unterteilung liegt das zwischen 22 und 5 Uhr aufrechte Nachtfahrverbot für Schwerverkehr zugrunde. Dennoch wird das Brückentragwerk aber während dieser Zeit von LKWs mit Sondergenehmigungen befahren. Diese Tatsache ist in den Aufzeichnungen zu den Mautdaten der ASFINAG Mautservice GmbH gut dokumentiert (siehe **Tabelle 42**), aber zum Beispiel auch im gemessenen Laser-Verformungssignal der Sondermessung 2007 gut nachvollziehbar (siehe **Bild 133 – Abschnitt 13.3**).

Anhand der gebildeten Mittelwerte im untersten Abschnitt der **Tabelle 42** sei insbesondere daraufhin hingewiesen, dass beide Fahrrichtungen gleichmäßig stark befahren werden.

- ❖ Der Mittelwert “Werktags tagsüber” setzt sich zusammen aus Montag bis Freitag jeweils von 5 bis 22 Uhr plus Samstag von 5 bis 16 Uhr, da in diesem Zeitraum das Verkehrsaufkommen dem eines normalen Wochentages entspricht. Das ist sowohl in den Mautdaten der ASFINAG Mautservice GmbH als auch in der aus dem Laser-Verformungssignal herausisolierten Verkehrseinwirkung während dieser Woche gut zu sehen (siehe **Bild 144 – Abschnitt 14.2.1**). Grund dafür ist, dass das LKW-Wochenendfahrverbot erst am Samstag um 15 Uhr beginnt und bis Sonntag 22 Uhr gilt [23]. Für die vorliegende KW 21 zeigt sich vermutlich wegen eines Feiertages am darauffolgenden Montag ein gewisser Versatz dieser für 15 Uhr vorgesehenen Grenze. Die Stundenmittelwerte von Samstag ab 16 Uhr zeigen eine hohe Übereinstimmung mit jenen des nachfolgenden Sonntags, was ebenfalls sowohl in den Mautdaten der ASFINAG ersichtlich ist als auch im Laser-Verformungssignal (siehe **Bild 144 – Abschnitt 14.2.1**).
- ❖ Der Mittelwert “Werktags Nacht” beinhaltet auch die Nacht von Freitag auf Samstag. Da vor diesem Wochenende sehr viele Schwerfahrzeuge unterwegs waren, liegt das Stundenmittel in diesem Fall sogar über dem durchschnittlichen Wert der anderen Nächte. Aus den Zahlen geht prinzipiell hervor, dass die Brücke wochentags während der Nacht von knapp 10 % des Tages-Schwerverkehrsaufkommens befahren wird.
- ❖ Der Mittelwert “Wochenende tagsüber” besteht aus dem Stundenmittel von Samstag zwischen 16 und 22 Uhr und Sonntag zwischen 5 und 22 Uhr.
- ❖ Der Mittelwert “Wochenende Nachtverkehr” wurde mit dem Stundenmittel der Nacht von Samstag auf Sonntag gleichgesetzt. Bezüglich der Nacht von Sonntag auf Montag bestehen insofern Auffälligkeiten, als in diesem Fall zwischen 22 Uhr und Mitternacht 130 LKWs pro Stunde in Richtung Brenner gefahren sind, in die entgegengesetzte Fahrrichtung allerdings nur 15 LKWs pro Stunde. Anhand weiterer angeforderter Mautdaten der ASFINAG (KW 20 und 22) konnte festgestellt werden, dass es in Nächten von Sonntag auf Montag ein tendenzielles Mehraufkommen an LKWs in Richtung Brenner gibt. Im Falle dieser einen Nacht wurde jedoch ein ungewöhnlich hohes LKW-Aufkommen in Richtung Brenner verzeichnet. Der Umstand eines Feiertages am darauffolgenden Montag (Pfingstmontag) samt aufrechtem LKW-Fahrverbot könnte die Erklärung für verstärkte Sondergenehmigungen in diesem kurzen Zeitfenster sein. Daher wurde die Woche vor und nach der KW 21 eingesehen. Anhand dieser Daten bestätigt sich, dass in der Nacht von Sonntag auf Montag

zwischen 22 Uhr und Mitternacht in Fahrtrichtung Innsbruck auch hier nur 16 (KW 22) beziehungsweise 18 (KW 20) LKWs pro Stunde gefahren sind.

In der **Tabelle 43** werden nun bereits die Summen der einzelnen LKWs pro Stunde (Mautstelle) mit der Anzahl der realen Belastungsszenarien pro Stunde (aus der Videoaufzeichnung während der Sondermessung - **Kapitel 13**) verglichen. Anhand einer Verhältnisbildung zwischen der Anzahl der Szenarien (Lastbilder) und den LKW-Summen sowie anschließender Mittelung soll mit Hilfe der für die gesamte Kalenderwoche gegebenen Anzahl an LKWs pro Stunde auf die Anzahl der Szenarien pro Stunde in jenen Tagen und Nächten der Kalenderwoche 21 geschlossen werden, die nicht durch die Sondermessung abgedeckt sind.

Mautdaten ASFINAG KW 21 2007	Summe LKW / h auf dem Tragwerk	gezählte Szenarien / h	Anteil der Szenarien in %
MI 5-22 Uhr	550	320	58,1
DO 5-22 Uhr	520	293	56,3
FR 5-22 Uhr	446	256	57,4
SA 5-16 Uhr	446	241	54,1
<i>Werktags im Mittel</i>			56,5
SA 16-22 Uhr	80	52	64,5
<i>Wochenende Tag bzw. Werktags Nacht im Mittel</i>			64,5

Tabelle 43: Anteil der gezählten Szenarien pro Stunde an den Stundenmittelwerten für den Schwerverkehr – für das Zeitfenster der Sondermessung (anteilige Kalenderwoche 21)

So zeigt sich für die betrachteten Werktage, dass am instrumentierten Brücken-Randfeld im Mittel eine Relation von 56,5% zwischen der Anzahl an Szenarien pro Stunde und der Summe an LKW-Überfahrten pro Stunde besteht. Für das Wochenende erhöht sich diese Relation auf 64,5%. Der Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass am Wochenende weniger Schwerverkehr über die Brücke fährt. Durch die geringere Überfahrtsdichte treten zumeist Einzelüberfahrten oder Begegnungen einzelner LKWs auf, was dazu führt, dass die Anzahl der einzelnen Lastbilder sich tendenziell der Anzahl der Schwerverkehr-Überfahrten nähert (im Gegensatz zu Zeiten mit stärkerem Verkehrsaufkommen, wo vermehrt Belastungsszenarien mit mehreren Fahrzeugen gleichzeitig am Brücken-Randfeld auftreten).

Am gemessenen Zeitverlauf der globalen Brückenverformungen infolge Schwerverkehr (Lasermessungen in **Bild 144 – Abschnitt 14.2.1**) ist zu erkennen, dass der Tagesverkehr am Wochenende in seiner Intensität dem Nachtverkehr an Werktagen entspricht, daher wird für beide Zeiträume die gleiche Relation zwischen der Anzahl an Szenarien pro Stunde und der Summe an LKW-Überfahrten pro Stunde angesetzt (siehe **Tabelle 43 unten**). Für den Nachtverkehr am Wochenende wurde ein Verhältniswert aus den LKWs/h im Nachtbetrieb an Werktagen und den

LKWs/h in der Nacht auf Sonntag gebildet. Dies erfolgte mit Hilfe der stundenweise aufbereitet vorliegenden Mautdaten der ASFINAG für die Kalenderwochen 20-22. Aus diesen ergab sich, dass die Nacht von Samstag auf Sonntag in der gemittelten Größenordnung von 46% des Verkehrsaufkommens von Nachtverkehr an Werktagen liegt, was einem Anteil der gezählten Belastungs-Szenarien an der Summe an LKW-Überfahrten (pro Stunde) von 29,5% entspricht (siehe **Tabelle 44 unten**).

In der **Tabelle 44** wird nun anhand der Vorberechnungen der **Tabelle 42** bzw. **Tabelle 43** das - mangels Videoaufzeichnungen in Teilen der betreffenden Kalenderwoche - nicht dokumentierte Schwerverkehrs-Aufkommen hinsichtlich Anzahl der Belastungs-Szenarien ergänzt. Die schwarz geschriebenen und grau hinterlegten Zahlen stellen die tatsächlich gezählten Szenarien und das sich daraus ergebende Verhältnis zur Summe der LKWs pro Stunde auf dem Tragwerk dar. Die färbig geschriebenen Werte entsprechen jeweils der aus der gemittelten Charakteristik der **Tabelle 43** (LKW-Anzahl/h) berechneten Anzahl an Szenarien pro Stunde, wobei Werte für den Tagesverkehr an Werktagen blau eingetragen sind. Die rot markierten Werte zeigen den ebenfalls gemäß **Tabelle 43** berechneten Nachtverkehr an Werktagen bzw. den Wochenend-Tagesverkehr. Grün steht für den berechneten Wert des Nachtverkehrs an Wochenenden.

Mautdaten ASFINAG KW 21 2007	Summe LKW / h auf dem Tragwerk	gezählte Szenarien / h	Anteil der Szenarien in %
MO 0-5 Uhr	35		
MO 5-22 Uhr	460	260	56,5
MO 22- DI 5 Uhr	39	25	64,5
DI 5-22 Uhr	521	294	56,5
DI 22- MI 5 Uhr	44	28	64,5
MI 5-22 Uhr	550	320	58,1
MI 22- DO 5 Uhr	44	28	64,5
DO 5-22 Uhr	520	293	56,3
DO 22- FR 5 Uhr	48	31	64,5
FR 5-22 Uhr	446	256	57,4
FR 22- SA 5 Uhr	62	40	64,5
SA 5-16 Uhr	446	241	54,1
SA 16-22 Uhr	80	52	64,5
SA 22- SO 5 Uhr	24	7	29,5
SO 5-22 Uhr	76	49	56,5
SO 22-0 Uhr	145		

Tabelle 44: Vergleich der Stundenmittelwerte für den Schwerverkehr mit der Anzahl der Szenarien pro Stunde - gezählte bzw. extrapolierte Daten für die gesamte Kalenderwoche 21

So konnten mittels der errechneten, gemittelten Charakteristik die fehlenden Tage und Nächte hinsichtlich der LKW-Summe/h und der anteilig auftretenden Lastbilder pro Stunde ergänzt werden.

- ❖ Das heißt, dass mit Hilfe der als typisch anzusehenden - im Feldversuch während der KW 21 erfassten - Betriebsbedingungen in einem ersten Schritt die Anzahl der Belastungsszenarien pro Stunde auf eine Anzahl pro Woche hochgerechnet wurde (Eine detaillierte Tabelle mit den Werten für die gesamte KW 21 im Jahr 2007 ist dem **Kapitel 18** beigelegt).
- ❖ Daraus konnte in einem zweiten Schritt ein ganzes „Regel-Jahr 2007“ nachgebildet werden. Ebenso wurde der prozentuelle Anteil jedes einzelnen Belastungs-Szenarios an der ermittelten Jahressumme festgehalten.

Durch das Hochrechnen der Szenarien von vier Mess-Tagen auf eine Regel-Woche bzw. dann auf ein Regel-Jahr hat sich die ursprünglich ermittelte Verteilung der am häufigsten auftretenden Belastungs-Konfigurationen geringfügig verändert (vergleiche **Tabelle 39** im **Abschnitt 13.2** mit der vorliegenden **Tabelle 45**). Dies ist dadurch erklärbar, dass der video-dokumentierte, gemischte Wochenend- und Nachtverkehr eine andere Häufigkeitsverteilung der Szenarien aufweist, als der reine Tagesverkehr an Werktagen (siehe jeweils **Tabelle 44**). Letzterer wird aber nun in der Extrapolation stärker gewichtet mitberücksichtigt. **Tabelle 45** zeigt daher abschließend die finale, rechnerische Verteilung der zehn häufigsten Belastungsszenarien, welche dann im **Kapitel 17** bezüglich Ihrer Auswirkungen auf Alterungs- und Tragsicherheitsüberlegungen (Schädigungsäquivalente pro Szenario) bewertet werden.

Belastungs- Szenario	Anteil an Gesamtsumme
Einzelüberfahrt RFBB	23,9 %
2 LKWs RFBI	16,3 %
Einzelüberfahrt RFBI	15,1 %
2 LKWs RFBB	9,5 %
Je 1 auf beiden Seiten	8,8 %
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,2 %
2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,5 %
3 LKWs RFBI	3,2 %
Je 2 auf beiden Seiten	2,4 %
3 LKWs RFBB	2,0 %

Tabelle 45 : Verteilung der **10 häufigsten Belastungsszenarien** in Prozent (Bezugsgröße 1 Betriebsjahr)

16.4 Reale Lastszenarien - Zuweisung von Belastungseigenschaften aus DYGES (Monitoring)

Zunächst muss den einzelnen Lastbildern anhand der DYGES-Auswertungen (Tonnagen) eine anteilige Belastung zugewiesen werden. Dazu wird jedem Belastungsszenario mit Hilfe der ermittelten Häufigkeitsverteilung der Tonnagen-Klassen ein Gewicht zugeteilt um festzulegen, welche Belastungen infolge jedes realen Lastbildes in das System eingebracht werden. Hierfür wird auf die Auswertung der Langzeitreihe des Dynamischen Gewichterfassungs-Systems (DYGES) zurückgegriffen (vergleiche **Tabelle 4** im **Abschnitt 4.1.1**).

Eine notwendige Verknüpfung der zehn häufigsten Belastungsszenarien mit der DYGES-basierten Häufigkeitsverteilung der Tonnagen legt nahe, dass innerhalb jeder Lastkonfiguration dieselbe Zusammensetzung im Sinne der Gewichtsklassen der involvierten, einzelnen, Schwerfahrzeuge angenommen wird. Ursache ist die sich bei der Langzeitbeobachtung des Gesamt-Schwerverkehrs als stabil erwiesene Klassifizierung der einzelnen Tonnagen-Klassen, welche daher in logischer Konsequenz auf jedes aus dem Gesamtverkehr herausgelöste Lastbild übertragen wird (**Bild 198**).

Mit anderen Worten bedeutet dies, dass - da DYGES den Schwerverkehr in acht Gewichtsklassen unterteilt - ein LKW acht verschiedene Tonnagen annehmen kann, die entsprechend der in der Langzeitreihe ermittelten Häufigkeitsverteilung (**Tabelle 4**) anzusetzen sind.

Für sämtliche weiterführenden Überlegungen hinsichtlich eines vollwertigen Lastmodells als Alternative zum Eurocode wird - als einzig sinnvoller Ansatz - für beide Fahrtrichtungen von der identischen Häufigkeitsverteilung der auftretenden LKW-Einheiten auf die Gewichtsklassen ausgegangen.

Bild 198 veranschaulicht die als maßgeblich kategorisierten, realen Belastungsszenarien, wobei eine Beschränkung auf die 10 am häufigsten auftretenden Belastungssituationen erfolgte (vergleiche mit **Tabelle 45**).

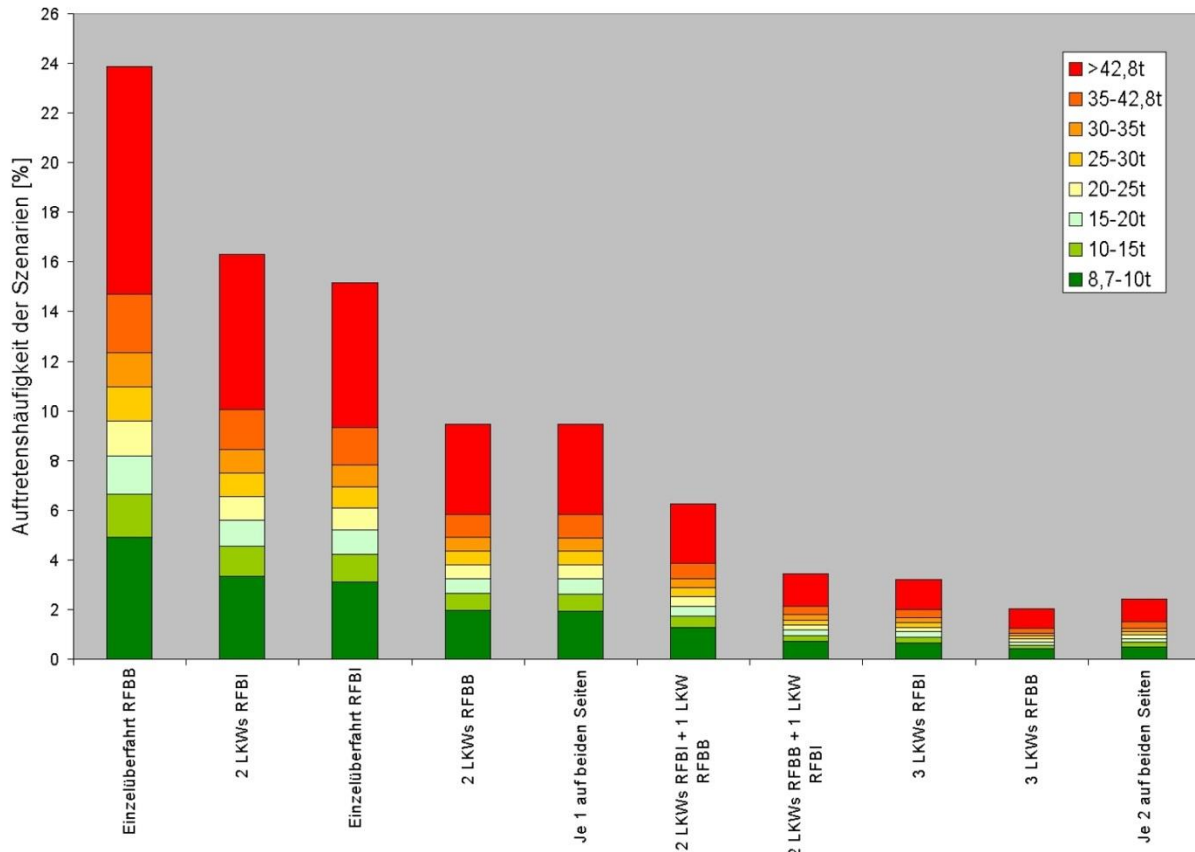


Bild 198: Die ermittelte Häufigkeitsverteilung der Tonnagenklassen am Beispiel der 10 häufigsten Belastungsszenarien

16.5 Integrales Lastmodell

Die konkrete Erstellung des integralen Lastmodells erfolgt nun durch die mechanische und mathematische Verknüpfung (Kombinatorik)

- ❖ der realen Laststellungen (Video-basiert),
- ❖ den zugehörigen, gemessenen Tonnagen (DYGES-Monitoring)
- ❖ sowie der während der permanenten Messung erfassten Anzahl der Schwerverkehrs-Einheiten

Die konsistente Erstellung eines neuen Lastmodells für die zunächst vordergründig verfolgte Ermüdungsbewertung kann - im Gegensatz zu einer Analyse des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (erfolgt nachgereiht) – nicht über die Summe der am Tragwerk gleichzeitig befindlichen Tonnagen alleine erfolgen, sondern vor allem über deren Verknüpfung mit der Anzahl an Schwerverfahrzeugen und der daraus resultierenden Schädigungsrelevanz.

Daher werden die genannten Einflussgrößen in weiterer Folge durch den Parameter der Schädigungsäquivalente zusammengeführt. Wie bereits im **Kapitel 16.1.3** ausgeführt, setzen sich diese aus dem akkumulierten Produkt des Schädigungsbeitrages infolge Auftretens-Häufigkeit n_i mit dem Schädigungsbeitrag infolge Auftretens-Intensität $\Delta\sigma_i^m$ zusammen.

- Für das zu erstellende Lastmodell bzw. in Hinblick auf den Vergleich mit dem Eurocode wird in die Berechnung der Schädigungsäquivalente die Beteiligungsrate jedes einzelnen, maßgeblichen Belastungsszenarios am Gesamt-Verkehrsaufkommen (**Tabelle 45**) berücksichtigt.
- Dabei werden die Obergrenzen der eigentlich bereichsweise definierten Tonnagenklassen herangezogen. Zusätzlich wird für die Kategorie “>42,8t” eine Obergrenze von 50t festgelegt. Diese vom Autor gewählte Tendenz, im Zuge der realen Lastmodellierung dennoch auf der sicheren Seite liegende Ansätze zu verwenden, erfolgte ganz bewusst. Dadurch sollte demonstriert werden, dass man sich methodisch keinesfalls „künstliche Vorteile“ gegenüber der Belastungs-Norm verschaffen will und daher im Zweifelsfall stets die ungünstigeren Lastannahmen getroffen werden.
- Die aus den LKWs zusammengesetzten Belastungsanordnungen werden nun für jedes der zehn betrachteten Szenarien entsprechend mit sämtlichen, kategorisierten Tonnagen verknüpft, um daraus Schädigungsäquivalente in Bezug auf Biegung und Torsion zu generieren.
- Zur Beschreibung der Schwerverkehrs-Volumina (Anzahl der überfahrenden LKW-Einheiten) werden die Daten der ASFINAG-Mautservice GmbH des Jahres 2007 verwendet, welche eine genaue Aufgliederung der LKW-Überfahrten je Fahrtrichtung liefern (siehe **Kapitel 9**). Für die Fahrtrichtung Innsbruck liegen 1,22 Millionen Schwerfahrzeuge vor, für die Fahrtrichtung Brenner 1,19 Millionen. Auch bei diesem Aspekt wird im DYGES-Lastmodell vom ungünstigeren Fall ausgegangen, indem diese Daten zum Schwerverkehrsaufkommen vollständig dem LKW-Streifen zugewiesen werden. Während des Videostudiums konnte allerdings beobachtet werden, dass es immer wieder zu Überholsituationen zwischen den Schwerfahrzeugen kommt, wodurch in der Realität sicher nicht alle von der ASFINAG erfassten Schwerfahrzeuge den äußersten Fahrstreifen befahren.

Die Berechnung der Schädigungsäquivalente soll nun beispielhaft anhand der einfachsten, vorkommenden Lastkonfiguration – der einzelnen LKW-Überfahrt (RFB Brenner bzw. RFB Innsbruck) - gezeigt und erklärt werden (**Tabelle 46**).

DYGES-Modell Szenario	Schädigungsbeitrag Auftrittensintensität $\Delta\sigma$		$\Delta\sigma^m$ "m=3"	Excentrität [m] Fahrstreifen 1	Schädigungsbeitrag Auftrittenshäufigkeit n_i			Schädigungsäquivalent	
	Fahrzeuge OG - [t]	Auftretens- gewichtung [%]			LKWs/Jahr ASFİNAG 07	Häufigkeit Szenario [%]	LKWs/ Szenario	Beitrag Biegung [Mill.t]	Beitrag Torsion [Mill.t.m]
1 LKW RFBB	50	38,3							
	42,8	9,9							
	35	5,9							
	30	5,6							
	25	5,9							
	20	6,5							
	15	7,3							
	10	20,4							
SUMME	33,0		36043,7	9,05	1.192.829	23,9	284888	10,3	92,9
1 LKW RFBI	50	38,3							
	42,8	9,9							
	35	5,9							
	30	5,6							
	25	5,9							
	20	6,5							
	15	7,3							
	10	20,4							
SUMME	33,0		36043,7	9,05	1.218.374	15,1	184574	6,7	60,2

Tabelle 46: Exemplarisch für die Belastungsszenarien „1 LKW RFBI“ und „1 LKW RFBB“ ermittelten Schädigungsäquivalenten für Biegung und Torsion

Dabei bedient sich der Autor der im **Abschnitt 16.1.3** dargelegten Analogie.

- Als Eingangsparameter für den „Schädigungsbeitrag Auftretens-Intensität“ $\Delta\sigma_i^m$ wird jene Tonnage angesetzt, die sich auf der jeweiligen Richtungsfahrbahn (RFBI oder RFBB) aufgrund der rechnerischen Gewichtung aus der Summe der einzelnen Tonnagen-Klassen und deren Auftretens-Häufigkeiten ergibt (33,0t). Die Wöhlerkurven-Neigung m wird dabei konsequent mit 3 angenommen, wodurch jedes Ereignis $\Delta\sigma_i^m$ als schadensrelevant behandelt wird (konservative Annahme – siehe **Abschnitt 16.1.3**).
- Als Eingangsparameter für den „Schädigungsbeitrag Auftretens-Häufigkeit“ n_i werden die am Mautportal gezählten Jahressummen an LKWs der jeweiligen Fahrtrichtung (1,19 Mio.LKW bzw. 1,21 Mio. LKW) unter Berücksichtigung der Auftretens-Häufigkeit der jeweiligen Szenarien (23,9% bzw. 15,1%) angesetzt. So kann letztendlich das Schädigungsäquivalent eines Szenarios anhand des mathematischen Produktes aus „Schädigungsbeitrag Auftretens-Intensität“ $\Delta\sigma_i^m$ und „Schädigungsbeitrag Auftretens-Häufigkeit“ n_i ermittelt werden.
- Der rechnerische Betrag für die herangezogene Richtungsfahrbahn entspricht im Falle der in **Tabelle 46** herangezogenen Last-Bilder auch bereits dem resultierenden Beitrag des Schädigungsäquivalents hinsichtlich Biege-Beanspruchung.
- In komplexeren Belastungsfällen, wo es zu einer beidseitigen Befahrung des Tragwerkes kommt, sind die Beiträge beider Fahrtrichtungen aufzusummieren. Für ein maximales Schädigungsäquivalent in Bezug auf Biegebeanspruchung ist stets maßgeblich, dass alle Fahrzeuge auf dem Tragwerk möglichst schwer sind. Daher sind für diesen Aspekt die der 50 t Kategorie zugehörigen LKW-Einheiten entscheidend, auch weil ihr Einfluss durch die zugehörige Auftretens-Häufigkeit (38,3%) nicht so stark abgemindert wird wie bei anderen

Tonnagen (so relativiert sich z.B. der Einfluss der an sich schweren Fahrzeuge der Kategorie 42,8 t durch ihre geringe Auftretens-Häufigkeit von 9,9%, wodurch die durch diese Gruppe erzeugten Schädigungsäquivalente entsprechend abgemindert werden).

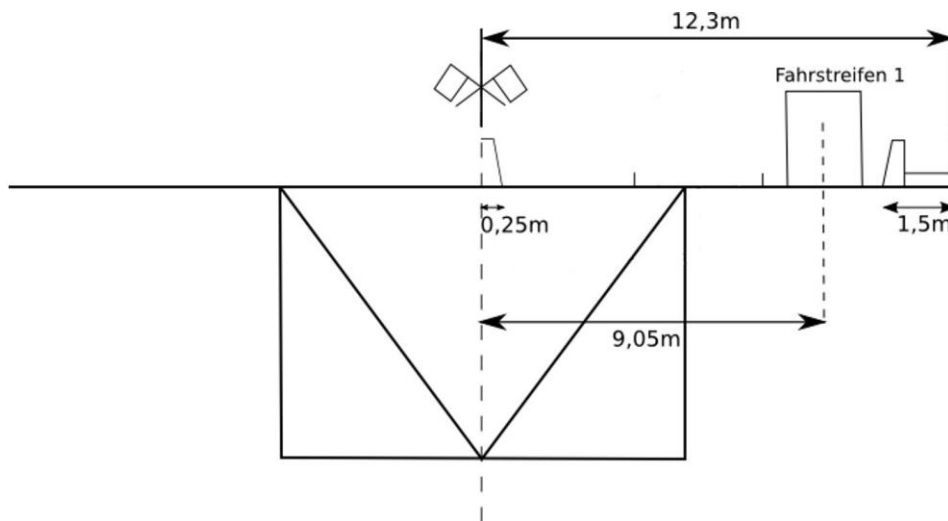


Bild 199: Schema zum Torsions-beanspruchten Brückenquerschnitt und anzusetzender Exzentrizität

- Bei den Berechnungen des Schädigungsäquivalents in Bezug auf Torsion ist zusätzlich der zugehörige Hebelsarm heranzuziehen, der von Querschnittsmitte bis zur Achse der LKW-Fahrspur reicht. Dieser beträgt 9,05m für die äußerste Spur. **Bild 199** zeigt einen schematischen Überblick des Brückenquerschnitts, samt der zur Torsions-Berechnung herangezogenen Exzentrizität. Nach Einbeziehen dieser Exzentrizität ergibt sich für die resultierenden Ergebnisgrößen in Bezug auf Torsion also die Einheit Tonnenmeter [tm].
- Für ein maximales Schädigungsäquivalent in Bezug auf Torsionsbeanspruchung ist eine einseitige Befahrung durch ebenfalls möglichst schwere LKWs maßgebend. Auch hier sind die der 50 t Kategorie zugehörigen LKW-Einheiten entscheidend. Bei den Szenarien, in denen sich Fahrzeuge in beiden Fahrrichtungen bewegen gilt jedoch, dass die Torsionsbeanspruchung dann umso größer ist, je mehr die resultierende Gewichtsbelastung der Fahrzeuge für die beiden Fahrrichtungen differiert. Wenn auf der einen Seite also möglichst leichte LKWs auftreten und auf der anderen RFB möglichst schwere LKWs, wird eine entsprechend maßgebliche Verdrehungs-Beanspruchung am Querschnitt wirksam. Den Konterpart auf der gegenüberliegenden RFB zum Erzielen der ungünstigsten Torsionskonfiguration bei einseitiger Befahrung mit einem 50t Fahrzeug übernehmen aufgrund der Auftretensgewichtung allerdings nicht die 10 t Fahrzeuge wie anzunehmen wäre, sondern die 15 t Fahrzeuge, da sie viel seltener vorkommen und daher akkumuliert weniger resultierende Schädigungsbeiträge erzeugen als die leichteren 10-Tonner, die durch

ihre stärkere Präsenz ein höheres Schädigungsäquivalent erzeugen (die Auftretens-Häufigkeit der Kategorie 10t liegt bei 20,4%, im Vergleich dazu hat die Kategorie 15t nur eine Häufigkeit von 7,3%, also zirka ein Drittel).

Belastungsszenario	Häufigkeit Szenario	Summe der Belastungen	
		Biegung [Mill.t]	Torsion [Mill.tm]
Einzelüberfahrt RFBB	23,9 %	10,3	92,9
2 LKWs RFBI	16,3 %	28,2	255,3
Einzelüberfahrt RFBI	15,1 %	6,7	60,2
2 LKWs RFBB	9,5 %	16	145,1
Je 1 auf beiden Seiten	8,8 %	4,50	34,3
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,2 %	11,3	97,8
2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,5 %	6,1	52,9
3 LKWs RFBI	3,2 %	14,2	128,6
Je 2 auf beiden Seiten	2,4 %	5,8	37,1
3 LKWs RFBB	2,0 %+	8,8	80

Tabelle 47 : Zusammenfassende Übersicht der resultierenden Schädigungsäquivalente für Biegung und Torsion

Dem **Kapitel 19** sind die vollständigen, tabellarisch aufbereiteten Kombinationsberechnungen zur Schädigungsrelevanz der zehn häufigsten Belastungsszenarien zu entnehmen. Diese werden natürlich mit komplexeren Last-Bildern zunehmend vielschichtiger. **Tabelle 47** fasst sämtliche dieser Berechnungen zusammen und zeigt dabei die errechneten, resultierenden Schädigungsäquivalente der analysierten Szenarien hinsichtlich Biege- und Torsionsbeanspruchung.

Mit Hilfe des Schädigungsäquivalents wurde durch Zusammenführung von

- ❖ durch einen umfassenden Feldversuch charakterisierten Lastbildern,
- ❖ gemessenen Lastintensitäten und
- ❖ gezählten Lasthäufigkeiten

unter Verknüpfung mechanischer sowie mathematischer Überlegungen eine Grundlage entwickelt, welche die Ergebnisse nun mit den Modellen des Eurocode (ÖNORM B 1991-2 [40]) vergleichbar macht. Eine umfassende Referenzierung erfolgt im **Kapitel 17.2**.

17 ANHANG 9: GEGENÜBERSTELLUNG DYGES LASTMODELL & EUROCODE

- **DIE ERMÜDUNGSLASTMODELLE (LM E) DER ÖNORM B 1991-2**
- **UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEM EC-BASIERTEM UND DEM MONITORING-BASIERTEM LASTMODELL**
- **ABSCHLIESSENDE, ZUSAMMENFASSENDE GEDANKEN ZUR VORLIEGENDEN GEGENÜBERSTELLUNG**

17.1 Die Ermüdungslastmodelle (LM E) der ÖNORM B 1991-2

(Zusammengefasst aus [40] und [41])

Der über die Brücke fließende Verkehr führt zu einem Spannungsspektrum, welches Ermüdung herbeiführen kann. Dieses Spannungsspektrum hängt von den Abmessungen der Fahrzeuge, den Achslasten, dem Fahrzeugabstand, der Verkehrszusammensetzung und deren dynamischen Wirkungen ab. Im Eurocode (ÖNORM B 1991-2 [40]) werden fünf Lastmodelle (ELM 1-5) für die Ermüdungsberechnung von Brücken definiert, diese werden nachfolgend einzeln dargelegt. Bei den definierten Modellen wird nur auf vertikale Verkehrslasten Bezug genommen, Horizontalachsen sind laut Norm normalerweise nicht zu berücksichtigen.

Zunächst ist laut Eurocode im Zuge von Ermüdungsnachweisen die Verkehrskategorie einer Brücke festzulegen. Diese definiert sich durch

- die Anzahl der Streifen mit Lastkraftverkehr sowie
- durch die Anzahl der Lastkraftwagen N_{obs} pro Jahr und Streifen.

In Bezug auf die Anzahl der LKW-Fahrstreifen ist im nationalen Anhang des Eurocode 1-2 [40] definiert, dass pro Fahrtrichtung jeweils der rechte Fahrstreifen als derjenige mit Lastkraftverkehr festgelegt wird. Die Anzahl der Lastkraftwagen N_{obs} gilt für Fahrzeuge, deren maximales Gewicht über 100 kN (rund 10 t) liegt. N_{obs} wird anhand von Verkehrszählungen oder -schätzungen bestimmt.

	Verkehrskategorien	N_{obs} pro Jahr und LKW-Streifen
1	Straßen und Autobahnen mit zwei oder mehr Fahrstreifen je Richtung und hohem LKW-Anteil	2×10^6
2	Straßen und Autobahnen mit mittlerem LKW-Anteil	$0,5 \times 10^6$
3	Hauptstraßen mit geringem LKW-Anteil	$0,125 \times 10^6$
4	Örtliche Straßen mit geringem LKW-Anteil	$0,05 \times 10^6$

Tabelle 48 : Definierte Verkehrskategorien und das zugehörige, erwartete LKW-Verkehrsaufkommen pro Jahr und Streifen

Der Eurocode sieht grundsätzlich vier Verkehrskategorien für Ermüdung vor, welche in der nachfolgenden **Tabelle 48** beschrieben werden. Die Zahlenwerte für N_{obs} in der Tabelle beziehen sich auf einen Streifen mit LKW-Verkehr unter der Verwendung der Ermüdungslastmodelle 3 und 4. Auf jedem Streifen mit schnellerem Verkehr sollten zusätzlich 10% von N_{obs} berücksichtigt werden. Die Zahlenwerte für die Verkehrskategorien 1 bis 3 entsprechen typischem Schwerverkehr auf den europäischen Autobahnen und Hauptstrecken.

Die Aufstellung der Verkehrslasten erfolgt auf der Fahrbahn. Diese wird seitlich durch Bordsteine (Höhe > 10cm) oder Leiteinrichtungen begrenzt und umfasst Fahrstreifen, Standstreifen, Bankette und Markierungsstreifen. Die gesamte Fahrbahnfläche wird dann in einzelne, rechnerische Fahrstreifen und eine Restfläche aufgeteilt. **Tabelle 49** definiert die Breite der rechnerischen Fahrstreifen w_1 und die größte ganzzahlige Anzahl n_1 dieser Streifen auf der jeweiligen Fahrbahn.

Fahrbahnbreite w	Anzahl der rechnerischen Fahrstreifen	Breite eines rechnerischen Fahrstreifens w_1	Breite der verbleibenden Restfläche
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_1$
ANMERKUNG Zum Beispiel ergibt sich für eine Fahrbahn von 11m die Anzahl der rechnerischen Fahrstreifen zu $n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3$. Die Breite der vorhandenen Restfläche beträgt: $11 - 3 \times 3 = 2\text{m}$.			

Tabelle 49 : Ermittlung von Anzahl und Breite der rechnerischen Fahrstreifen laut [40]

Die Lage der einzelnen Fahrstreifen ist nach deren Auswirkung auf das Bauwerk einzuteilen. So wird der am ungünstigsten wirkende Streifen als Fahrstreifen 1 geführt, der am zweitungünstigsten Wirkende als Fahrstreifen 2 und so weiter. Die Lage der rechnerischen Fahrstreifen hängt nicht notwendigerweise mit ihrer Nummerierung zusammen. Zur Ermittlung von repräsentativen Werten bei Ermüdung kann die Lage und Nummerierung der Streifen entsprechend der zu erwartenden Verkehrsbedingungen festgelegt werden.

Besteht die Fahrbahn aus zwei getrennten Richtungsfahrbahnen auf einem gemeinsamen Überbau, so wird für die gesamte Fahrbahn nur eine Nummerierung durchgeführt. Wenn die Fahrbahn jedoch aus zwei getrennten Teilen auf zwei unabhängigen Überbauten besteht, so ist für jeden Teil eine eigenständige Nummerierung vorgesehen, da jeder Teil als eine Fahrbahn zu betrachten ist. Für den Fall dass diese beiden Überbauten jedoch auf gemeinsamen Pfeilern und/oder Widerlagern aufliegen, wird bei Berechnung und Bemessung der Unterbauten nur eine Nummerierung durchgeführt.

Für die Ermittlung globaler Einwirkungen sollten alle Ermüdungsmodelle in der Achse der rechnerischen Fahrstreifen angeordnet werden. Für die Ermittlung lokaler Einwirkungen hingegen können die rechnerischen Fahrstreifen an jeder beliebigen Stelle der Fahrbahn liegen. Aber auch hier sollten die Modelle in der Achse der Fahrstreifen angeordnet werden.

In den Ermüdungslastmodellen 1-4 sind bei Annahme einer guten Belagsqualität bereits dynamische Vergrößerungsfaktoren beinhaltet. In der Nähe von Fahrbahnübergängen sollte allerdings ein zusätzlicher Vergrößerungsfaktor $\Delta\varphi_{fat}$ berücksichtigt und für alle Lasten angenommen werden. Der Faktor errechnet sich aus:

$$\Delta\varphi_{fat} = 1,3 \left(1 - \frac{D}{6} \right); \Delta\varphi_{fat} \geq 1 \quad (54)$$

D ist in diesem Fall der Abstand zum Fahrbahnübergang (in Metern). Direkt am Fahrbahnübergang beträgt $\Delta\varphi_{fat}$ 1,3 und nimmt bis zu einer Entfernung von 6m vom Fahrbahnübergang linear auf 1,0 ab.

Nachfolgend soll ein Überblick über die Spezifika der fünf Ermüdungslastmodelle gegeben werden.

17.1.1 Lastmodell 1 (Tragfähigkeit) bzw. Ermüdungslastmodell (ELM 1)

Dieses Lastmodell entspricht in seiner Basis-Konfiguration dem Lastmodell 1 für die Berechnung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit [40]. Der Unterschied zwischen den beiden Lastannahmen besteht jedoch darin, dass der aus dem Grenzzustand der Tragfähigkeit bekannte Anpassungsfaktor α für die Berechnung der Achslasten mit fixen - den Schwerverkehr deutlich abmindernden - Zahlenwerten versehen wird. Im Ermüdungslastmodell werden die charakteristischen Lasten Q_{ik} (für eine Einzellast) mit $\alpha_Q = 0,7$ beziehungsweise mit q_{ik} oder q_{rk} (für Gleichlasten) mit $\alpha_q = 0,3$ multipliziert.

Das Ermüdungslastmodell 1 besteht aus zwei Komponenten. Als Komponente 1 wird auf jedem rechnerischen Fahrstreifen eine Doppelachse aufgestellt (Tandem-System TS). Jede Achslast beträgt

$$0,7 Q_{ik} \quad (55)$$

Die Konfiguration für die Berechnung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit sieht vor, dass in jedem rechnerischen Fahrstreifen nur eine vollständige Doppelachse aufgestellt werden soll. Jede Achse dieser Doppelachse sollte mit zwei identischen Rädern berücksichtigt werden, was bedeutet, dass

jede Radlast $0,5 \times (0,7 Q_{ik})$ beträgt. Die Aufstandsfläche pro Rad soll mit einem Quadrat von $0,4 \times 0,4$ Meter angenommen werden.

Für globale Nachweise sollte jede Doppelachse in der Mitte des rechnerischen Fahrstreifens angenommen werden, für den Fall eines lokalen Nachweises dürfen sie auch enger angeordnet werden, wobei der Abstand der Radachsen zueinander $0,5\text{m}$ nicht unterschreiten sollte (siehe **Tabelle 50**).

Lastmodell 1 LM 1	Doppelachse (Tandem-System TS) $\alpha_Q Q_k$		Mit diesen Lasten sind auch Sonderfahrzeuge bis 600 kN abgedeckt
	Gleichmäßig verteilte Belastung (UDL) $\alpha_q q_k$ Je Fahrstreifen nur 1 (vollständige!) Doppelachse!		
Fahrstreifen	Doppelachsen TS Achslast Q_{ik}	Gleichlast UDL q_{ik}	Werte $\alpha_Q = \alpha_q = 1,0$ {Ö-B1991-2/4.1.2.1} Der dynamische Beiwert ist in diesen Lasten enthalten!
Fahrstreifen 1	300 kN	9,0 kN/m ²	
Fahrstreifen 2	200 kN	2,5 kN/m ²	
Fahrstreifen 3	100 kN	2,5 kN/m ²	
Weitere Fahrstreifen	0	2,5 kN/m ²	
Restfläche q_{rk}	0	2,5 kN/m ²	

* ... für $w_1 = 3,0 \text{ m}$
Global: jede Doppelachse in der Mitte eines Fahrstreifens

Tabelle 50 : Einleitende Übersicht zum **Lastmodell 1 – Grenzzustand der Tragfähigkeit**

Als Komponente 2 des Lastmodells wird eine gleichmäßig verteilte Belastung pro Grundfläche angenommen. Für die Ermüdungsberechnungen werden die charakteristischen Werte der Gleichlast wie folgt abgemindert:

$$0,3 q_{ik} \text{ und } 0,3 q_{rk} \tag{56}$$

Aus der Last-Konfiguration für den Grenzzustand der Tragfähigkeit sollen diese Lasten in Längs- und Querrichtung auf den belasteten Flächen der Einflussfläche aufgebracht werden.

Mit diesem Lastmodell sollen der fließende und zäh fließende Verkehr beziehungsweise Stausituationen mit einer hohen Anzahl an LKWs abgedeckt werden. Daher sollte das Lastmodell auf jedem rechnerischen Fahrstreifen (q_{ik}) und auf der Restfläche (q_{rk}) angeordnet werden. Die bereits abgeminderten charakteristischen Werte für Doppelachslasten beziehungsweise gleichmäßig verteilten Lasten des Ermüdungsmodells sind in **Tabelle 51** angeführt.

Das Ermüdungslastmodell 1 ist laut Norm beim Nachweis der unbegrenzten Ermüdungslebensdauer heranzuziehen. Die Maximal- und Minimalspannungen, die zur Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_{max} - \Delta\sigma_{min}$ im Nachweispunkt führen, sollen aus den möglichen Laststellungen des Modells auf der Brücke bestimmt werden.

Ermüdungs- Lastmodell 1	Ähnlich Lastmodell LM1 Lasten: $0,7 \cdot Q_{ik}$ und $0,3 \cdot q_{ik}$ bzw. $0,3 \cdot q_{rk}$		Der dynamische Beiwert ist in diesen Lasten enthalten!
	Fahrstreifen	Doppelachsen TS Achslast $0,7 \cdot Q_{ik}$	
Fahrstreifen 1	210 kN	$2,7 \text{ kN/m}^2$	
Fahrstreifen 2	140 kN	$0,75 \text{ kN/m}^2$	
Fahrstreifen 3	70 kN	$0,75 \text{ kN/m}^2$	
Weitere Fahrstreifen	0	$0,75 \text{ kN/m}^2$	
Restfläche q_{rk}	0	$0,75 \text{ kN/m}^2$	

Tabelle 51 : Charakteristische Lasten für das Ermüdungslastmodell 1 laut [41]

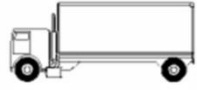


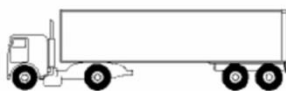

17.1.2 Ermüdungslastmodell 2

Dieses Modell wird durch die sog. Gruppe von "häufigen" Lastkraftwagen charakterisiert – eine Zusammenstellung von idealisierten Fahrzeugen. Die Minimal- und Maximalspannungen sollten in diesem Ermüdungsmodell aus der ungünstigsten Wirkung verschiedener LKWs bestimmt werden. Dabei sollte die Überfahrt jedes einzelnen Fahrzeuges pro Fahrstreifen isoliert betrachtet werden. Diese "häufigen" Fahrzeuge sind definiert durch:



- Achszahl und Achsabstand
- Häufige Last je Achse
- Achs(Rad)-type, d.h. Radaufstandsfläche und Radabstand in Querrichtung

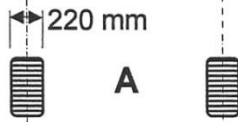
Bild 200 zeigt die im Eurocode für das ELM 2 definierten Schwerfahrzeugtypen sowie die unterschiedlichen Reifen- beziehungsweise Achsarten.

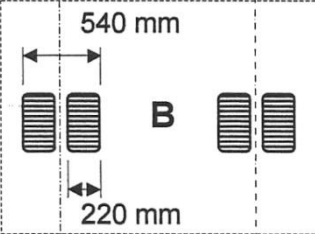
Wie bereits das ELM 1 ist auch dieses Ermüdungslastmodell laut Norm beim Nachweis der unbegrenzten Ermüdungslebensdauer heranzuziehen. Die Norm selbst betitelt dieses Modell als konservativ. Es ist zwar genauer als das ELM 1, soll aber nur angewendet werden wenn das gleichzeitige Auftreten mehrerer Fahrzeuge vernachlässigt werden kann. Es dient lediglich zur Überprüfung, ob ein genaueres Lastmodell notwendig ist, wenn der Nachweis nicht gelingen sollte.

SCHWERFAHRZEUG	Achs- abstand (m)	Häufige Achslast (kN)	Reifen- art
	4,5	90 190	A B
	4,20 1,30	80 140 140	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	90 180 120 120 120	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	90 190 140 140	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	90 180 120 110 110	A B C C C

Reifen-/Achsart:

Alle Räder:



A


B


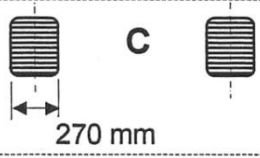
C


Bild 200: Definition der “häufigen” Lastkraftwagen und Erklärung der Reifen- und Achsart ([40] und [41]) – Ermüdungslastmodell 2

17.1.3 Ermüdungslastmodell 3

Dieses Ermüdungslastmodell wird auch Einzelfahrzeugmodell genannt und besteht aus vier Achsen zu je 2 identischen Rädern. Die genaue Geometrie ist in **Bild 201** zu sehen. Demgemäß betragen die Achslasten je 120 kN und die Radaufstandsflächen werden von Quadraten mit 0,4 x 0,4 Metern Seitenlänge gebildet. X steht in dieser Abbildung für die Richtung der Brückenlängsachse und w_j für die Spurbreite.

Wo maßgebend, sollten zwei Fahrzeuge hintereinander in der gleichen Spur berücksichtigt werden, wobei das erste Fahrzeug den bereits beschriebenen Vorgaben entspricht und das Zweite genauso definiert ist, jedoch statt den 120 kN Achslast nur 36 kN pro Achse aufweist. Auch darf der Abstand

zwischen den Fahrzeugen, gemessen von der Mitte der beiden Fahrzeuge, nicht kleiner als 40 Meter sein.

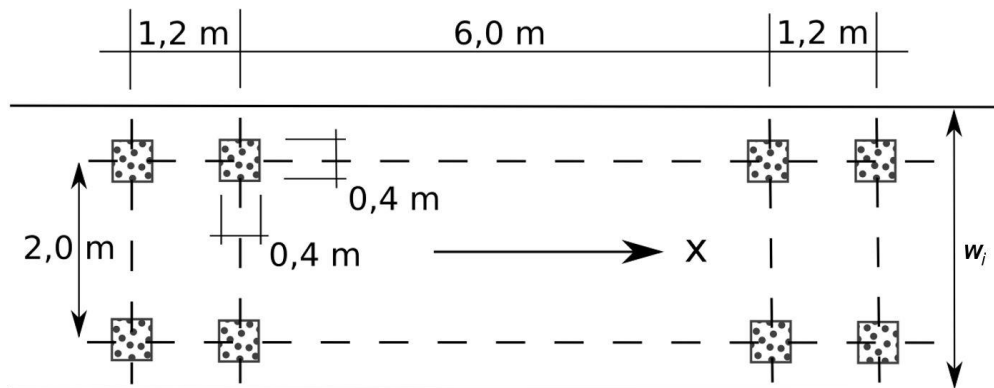


Bild 201: Geometrie des **Ermüdungslastmodells 3**

Die maximalen und minimalen Spannungen sowie die Spannungsunterschiede $\Delta\sigma$ bzw. $\Delta\tau$ im betrachteten Bauteil, d.h. ihre algebraische Differenz infolge Überfahrt des Lastmodells über die Brücke, sollten berechnet werden.

17.1.4 Ermüdungslastmodell 4

Dieses Ermüdungsmodell wird durch die Gruppe von so genannten Standardfahrzeugen repräsentiert. Die gemeinsam erzeugten Einwirkungen entsprechen der typischen Schwerverkehrsbelastung des hochrangigen, Europäischen Straßennetzes. Das nachfolgende **Bild 202** zeigt eine Übersicht über die fünf definierten Standardfahrzeuge. Diese werden sowohl durch die Anzahl ihrer Achsen, die Achsabstände und die zugehörigen Achslasten definiert als auch durch die Radaufstandsfläche und den Radabstand. Die infolge der genannten Eckdaten festgelegte Reifen-/Achsentart ist wiederum **Bild 200** zu entnehmen.

Den betrachteten Standardfahrzeugen wird ein jeweiliger Anteil am Schwerverkehr zugeordnet, welcher auf der Definition dreier verschiedener Verkehrsarten samt zugehöriger Verkehrszusammensetzung basiert. Bei den drei Verkehrsarten wird zwischen Strecken "großer Entfernung" (hunderte von Kilometern), Strecken "mittlerer Entfernung" (50 bis 100 Kilometer) und "Ortsverkehr" (≤ 50 Kilometer) unterschieden.

Die Berechnung erfolgt dann anhand der Verkehrszusammensetzung (siehe **Bild 202**) und der Gesamtanzahl der Schwerverfahrzeuge $\sum N_{\text{obs}}$, die pro Jahr für die Fahrbahn zu berücksichtigen sind (siehe **Tabelle 48**).

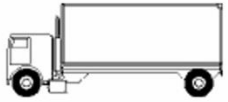
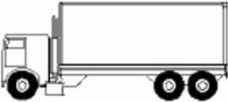

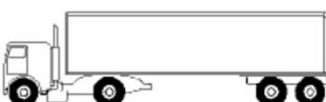

FAHRZEUGTYP			VERKEHRSART			
			Große Entfernung	Mittlere Entfernung	Ortsverkehr	
SCHWERFAHRZEUG	Achsabstand (m)	Ersatzachslast (kN)	Schwerverkehrsanteil	Schwerverkehrsanteil	Schwerverkehrsanteil	Reifenart
	4,5	70 130	20%	40%	80%	A B
	4,20 1,30	70 120 120	5%	10%	5%	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90 90	50%	30%	5%	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	15%	15%	5%	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10%	5%	5%	A B C C C

Bild 202: Definition der Gruppe von „Standardlastkraftwagen“ für das Ermüdungslastmodell 4 [40]

Dabei wird vorausgesetzt, dass jeder „Standard-LKW“ alleine über die Brücke fährt. Die Ermüdungsrate sollte dann anhand des errechneten Spannungsspektrums und der zugehörigen Anzahl von Lastwechseln infolge der LKW-Überfahrten mittels Rainflow-Zählung oder Reservoir-Zählmethode ermittelt werden.

17.1.5 Ermüdungslastmodell 5

Dieses Lastmodell basiert auf der direkten Auswertung messungs- bzw. zählungsbasierter Verkehrsdaten, die unter Umständen durch eine angemessene statistische oder zukunftsbezogene Extrapolation ergänzt werden. Es wird vom Eurocode als das Allgemeingültigste bezeichnet, da es aktuelle Verkehrsdaten verwendet, jedoch werden keine genauen Angaben für eine Umsetzung gemacht. Lediglich die richtige Annahme der Rauigkeit der Straßenoberfläche - und der sich daraus ableitenden dynamischen Faktor – werden detaillierter beschrieben.

In diesem Sinne setzt die vorliegende Doktorarbeit an genau dieser Stelle des Eurocode 1-2 [40] an, indem ein Monitoring-basierter Vorschlag für ein äquivalentes Lastmodell ausgearbeitet wird.

17.1.6 Erörterung zu den Unterschieden zwischen den fünf Lastmodellen-Ermüdung des EC

Die Ermüdungslastmodelle 1, 2 und 3 dienen dazu, die maximalen und minimalen Spannungen infolge der möglichen Anordnung von jedem dieser Modelle auf der Brücke zu bestimmen. In vielen Fällen wird nur die algebraische Differenz zwischen diesen Spannungen in den bemessungsrelevanten Eurocodes verwendet. Die Ermüdungslastmodelle 4 und 5 hingegen dienen zur Ermittlung der Bandbreite des Spannungsspektrums aus der Überfahrt von LKWs. Dieses Spannungsspektrum hängt sowohl von den Abmessungen der Fahrzeuge ab, als auch von deren Achslasten, dem Fahrzeugabstand, der Verkehrszusammensetzung und deren dynamischen Wirkungen.

Wie bereits erwähnt, dienen die Ermüdungslastmodelle 1 und 2 zum Nachweis, ob eine unbegrenzte Ermüdungslebensdauer angenommen werden kann, wenn ein Ermüdungsgrenzwert für eine konstante Spannungsamplitude gegeben ist. Sie sind daher für Stahlkonstruktionen geeignet, während sie es für andere Baumaterialien nicht sein müssen. Das Ermüdungslastmodell 1 ist grundsätzlich konservativ und deckt mehrstreifige Einwirkungen ab. Das Ermüdungslastmodell 2 ist genauer als das Ermüdungslastmodell 1, wenn das gleichzeitige Auftreten von mehreren Schwerlastfahrzeugen auf der Brücke bei Ermüdungsnachweisen außer Acht gelassen werden kann. Für den Fall, dass dies jedoch nicht der Fall ist, sollte man es nur anwenden, wenn es durch weitere Angaben ergänzt werden kann (siehe Nationaler Anhang).

Die Ermüdungsmodelle 3, 4 und 5 dienen zur Berechnung der Ermüdungslebensdauer unter Verwendung der in den Eurocodes 3-9 [44] für Bemessung festgelegten Kurven der Ermüdungsfestigkeit. Sie sollten nicht zum Nachweis einer unbegrenzten Ermüdungslebensdauer herangezogen werden und sind daher auch zahlenmäßig nicht mit den Modellen 1 und 2 vergleichbar. Das Ermüdungslastmodell 3 kann auch für einen direkten Nachweis mit vereinfachten Berechnungsmethoden benutzt werden, bei dem der Einfluss des jährlichen Verkehrsaufkommens

und bestimmte Brückenabmessungen durch den materialabhängigen Anpassungsfaktor λ_e berücksichtigt werden.

Das Ermüdungslastmodell 4 ist für eine Vielzahl von Brücken und Verkehrszusammensetzungen genauer als das Ermüdungslastmodell 3, wenn die gleichzeitige Anwesenheit von mehreren Schwerlastfahrzeugen auf der Brücke unberücksichtigt bleiben kann. Falls dies nicht der Fall ist, sollte es nur angewendet werden, wenn es durch weitere Angaben ergänzt wird, die explizit spezifiziert werden oder im Nationalen Anhang festgelegt sind.

17.2 Unterschiede zwischen dem EC-basierten und dem Monitoring-basierten Lastmodell

Grundsätzlich ist zu sagen, dass im Rahmen der Erstellung des vorliegenden, realen Lastmodells stets eine konsistente Referenzierung zu den Vergleichsmodellen des EC1-2 verfolgt wurde. Gleichzeitig zeigt sich aber, dass nicht alle in [40] angeführten Ermüdungslastmodelle einen sinnvollen Vergleich zulassen. Bei Kenntnis der tatsächlichen Verkehrscharakteristik wird verständlich, warum man bei Ermüdungs-Überlegungen bzw. im Zusammenhang mit Bauteilalterung von einem Vergleich mit den vorliegenden ELM1 & ELM2 absieht. Dies liegt zunächst daran, dass diese Modelle des Eurocode zum Nachweis dienen, ob eine unbegrenzte Lebensdauer angenommen werden kann. Da an der Europabrücke bekanntlich ein konkretes, systematisches Ermüdungsproblem einer tertiären Bauteilreihe vorliegt, kommen zur Berechnung der tatsächlichen Ermüdungslebensdauer nur noch die Ermüdungslastmodelle 3, 4, und 5 in Frage (siehe **Abschnitt 17.2.1**). Selbst von einer hypothetischen, rechnerischen Gegenüberstellung der Schädigungsraten zwischen ELM1 bzw. ELM2 und dem DYGES-Lastmodell wird abgesehen, da man lediglich eine maximierte Ersparnis zwischen Monitoring-basiertem Modell und dem Eurocode erzwingen würde. Dies wurde allerdings in keinsten Weise angestrebt und würde gleichzeitig noch einen Vergleich mit – für Ermüdung - weitgehend realitätsfremden Lastmodellen darstellen. Eine Referenzierung zu den als stark konservativ konzipierten Lastmodellen LM1 bzw. ELM 1 wird lediglich im Zusammenhang mit dem Grenzzustand der Tragfähigkeit – und dort berechtigter Weise wegen des Vergleichs mit den fallweise auftretender Stauszenarien – nachgeliefert (siehe **Abschnitt 17.2.2**).

In weiterer Folge werden nun zunächst die in **Kapitel 17.1** vorgestellten Ermüdungslastmodelle 3 und 4 verfolgt. Sie weisen sichtbare Parallelen zum in dieser Dissertation entwickelten Modell auf und können daher am besten mit diesem verglichen werden.

17.2.1 Vergleich hinsichtlich Ermüdung (Alterung als Voranschreiten der Ermüdungsschädigung)

Das Ermüdungslastmodell 3 des Eurocode gleicht dem in dieser Arbeit entwickelten DYGES-Lastmodell insofern, als beim ELM 3 zwei LKWs hintereinander über das Brückentragwerk fahren. Alle anderen Modelle verweisen dezidiert darauf, dass die Bemessungsfahrzeuge das Tragwerk einzeln überfahren müssen. Das Ermüdungslastmodell 4 des Eurocode verwendet standardisierte Schwerfahrzeuge mit definierter Achsenanzahl und Tonnage und ordnet den jeweiligen Fahrzeugen anteilige Auftretens-Häufigkeiten am gesamten Schwerverkehrsaufkommen in Prozent zu, die davon abhängen welche Entfernungen der LKW zurücklegt und so die Rangordnung der Straße festlegen. Das ELM 4 gleicht daher in diesem Punkt dem entwickelten DYGES-Modell, da auch dort eine Aufteilung auf die verschiedenen Tonnagen-Kategorien erfolgt. Dennoch wird auch beim Ermüdungslastmodell 4 davon ausgegangen, dass die einzelnen Fahrzeuge das Tragwerk einzeln überfahren.

- Um die angesprochenen Ermüdungslastmodelle der Norm mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell vergleichbar zu machen, werden zunächst vorbereitend die Schädigungsäquivalente für die Ermüdungslastmodelle ELM 3 & ELM 4 im Sinne des **Kapitels 16.1.3** bzw. der **Tabelle 46** in Bezug auf Biegungs- und Torsionsbelastung berechnet. Für die Berechnung des Schädigungsäquivalents sind dabei beide Fahrstreifen heranzuziehen. Der Eurocode gibt bekanntlich vor, 10% von N_{obs} des äußersten Schwerverkehr-Streifens auch auf schnelleren Fahrstreifen zu berücksichtigen.

Zur Berechnung des Schädigungsäquivalents für die Torsionsbelastung (Beitrag Torsion) werden - wie beim DYGES-Modell (**Bild 199 & Tabelle 46**) - Exzentrizitäten miteinbezogen. Letztere wurden für den ersten und zweiten Fahrstreifen jeweils zentrisch in dessen Achse angesetzt. Zur Ermittlung der Schädigungsäquivalente in **Tabelle 52** steht T1 für die anteilige Schädigungsäquivalente auf dem ersten Fahrstreifen, und T2 für selbige auf dem zweiten Fahrstreifen (vergleiche mit **Bild 203**).

EC 1 - 2 Lastmodell	Schädigungsbeitrag Auftrittensintensität $\Delta\sigma$		$\Delta\sigma^*m$ "m=3"	Excentrität [m]		Schädigungsbeitrag Auftrittenshäufigkeit n_i		Schädigungsäquivalent			
	Fahrzeuge [t]	Auftretens- gewichtung [%]		Fahrstr1	Fahrstr2	Nobs/ Jahr	Fahrstr1 Fahrstr2	Fahrstr1 =T1	Fahrstr2 = T2	Beitrag Biegung [Mill.t]	Beitrag Torsion [Mill.t]
LM 3	48	100									
	14,4	100									
SUMME		62,4	242970,6	9,05	5,55	2000000	200000	485,941248	48,6	534,5	4667,5
LM 4	20	20									
	31	5									
	49	50									
	39	15									
	45	10									
SUMME		40,4	65939,3	9,05	5,55	2000000	200000	131,9	13,2	145,1	1266,7
ELM 3 vs. ELM 4		0,65	0,27			1,00	1,00			0,27	0,27

Tabelle 52: Vergleich der resultierenden Gesamtlasten sowie der Schädigungsraten für Biegung und Torsion: Ermüdungslastmodelle 3 und 4 der ÖNORM B 1991-2 [40]

- Es zeigt sich, dass das Ermüdungslastmodell 4 rund 65% an resultierendem, rechnerischem Gesamtgewicht am Tragwerk des Ermüdungslastmodells 3 aufweist (siehe **Tabelle 52**). Dieser Unterschied in den anzusetzenden, resultierenden Tonnagen führt - nach Überführung der maßgeblichen Parameter in Schädigungsäquivalente – zu einer rechnerischen Alterungsrate des ELM4, welche rund 27% im Vergleich zum ELM3 beträgt (vergleiche **Tabelle 52**).

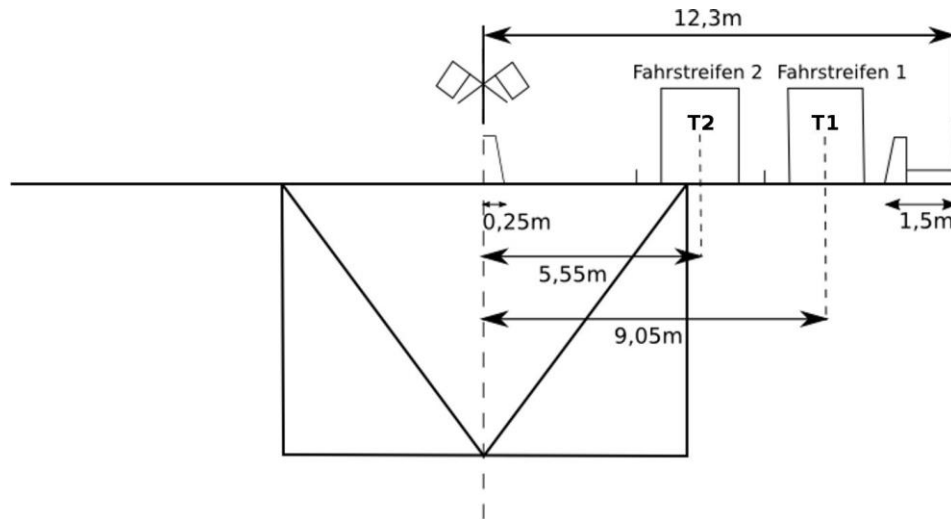


Bild 203: Schema zum Brückenquerschnitt und den verwendeten Exzentrizitäten für die Berechnung der Schädigungsäquivalente infolge Eurocode

- Bei der Berechnung der Schädigungsäquivalente mit Hilfe der einzelnen Szenarien des DYGES-Modells zeigen sich im Gegensatz zum Eurocode nun folgende Unterschiede:
 - Das Modell arbeitet nicht mit einer geschätzten Anzahl an Schwerverkehrs-Einheiten, sondern bezieht direkt die realen Zählungen der Mautstationen vor Ort ein. Der Eurocode geht aber bei "Straßen und Autobahnen mit zwei oder mehr Fahrstreifen je Richtung und hohem LKW-Anteil" von einem N_{obs} von 2×10^6 Schwerverkehrsfahrzeugen pro Jahr und LKW-Streifen aus. Zusätzlich dazu sollen auf jedem Streifen mit schnellem Verkehr 10% von N_{obs} berücksichtigt werden. Die Daten der ASFINAG Maut Service GmbH hingegen zeigen, dass im Jahr 2007 insgesamt rund $2,41 \times 10^6$ LKWs mit 2, 3, 4 oder mehr Achsen in beide Fahrtrichtungen gefahren sind. Somit ergibt sich für den Vergleichsparameter Schwerverkehrs-Volumen ein weit geringeres Aufkommen je Fahrtrichtung als in der Norm, die von unweit mehr als der doppelten Anzahl ausgeht.
 - Der größte Unterschied zwischen den Modellen der Norm und dem hier entwickelten Last-Modell ist aber, dass - der Realität entnommene - verschiedene Lastszenarien (Belastungsanordnungen) angesetzt werden, die auch mehrere Fahrzeuge gleichzeitig auf dem Tragwerk berücksichtigen. Diese Szenarien werden, ebenso wie die Lastklassen,

mit Auftretens-Häufigkeiten versehen um ihren Einfluss auf das Verkehrsgeschehen zu verdeutlichen (gemäß **Tabelle 45**). Dieser Umstand macht dieses Lastmodell deutlich realitätsnäher als die Norm.

- Folglich wurde im nächsten Schritt nun ein Vergleich zwischen den Schädigungsäquivalenten, die für die Modelle der Norm berechnet wurden (**Tabelle 52**) und denen aus den einzelnen Belastungsszenarien angestellt. Dazu wurden die resultierenden Schädigungsäquivalente aus der Kombinationsberechnung der realen Belastungsszenarien herangezogen (siehe **Kapitel 19** im Sinne der Ausführungen des **Kapitels 16.5**), aufsummiert und schließlich - entsprechend der Häufigkeit der Szenarien – dem in Relation gesetzten Schädigungsbeitrag der Norm gegenübergestellt. Gerade durch den letztgenannten Schritt konnte der Bezug zur Schadensakkumulation unter sukzessiver Berücksichtigung aller Belastungsanordnungen hergeleitet werden. Eine Parameterstudie zum Schädigungseinfluss der einzelnen Belastungsszenarien bei unmittelbarem Bezug zum Eurocode ist die Folge.

Tabelle 53 und **Tabelle 54** zeigen die Ergebnisse dieses Vergleichs. Das in dieser Arbeit entwickelte DYGES-Modell wird zunächst mit beiden Modellen des Eurocode verglichen, da aber gemäß Norm tendenziell vom ungünstigeren Fall auszugehen ist, sollte primär auf den Vergleich mit dem Ermüdungslastmodell 3 geachtet werden.

Aufsummierte Szenarien	Anteil an Gesamtsumme	Schädigungsäquivalente Biegung				
		DyGeS [Mill.t]	ELM 3 [Mill.t]	Verhältniswert [%]	ELM 4 [Mill.t]	Verhältniswert [%]
1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI...	39,03%	16,9	534,5	3,2	145,1	11,6
...+ 2 LKW RFBI...	55,43%	84,5	534,5	15,8	145,1	58,2
...+ 2 LKW RBB...	64,80%	123,0	534,5	23,0	145,1	84,8
...+ je 1 auf beiden Seiten...	73,62%	133,4	534,5	25,0	145,1	91,9
...+ 2 LKW RFBI u. 1 LKW RFBB...	79,86%	168,6	534,5	31,5	145,1	116,2
...+2 LKW RFBB u. 1 LKW RFBI...	83,31%	187,9	534,5	35,1	145,1	129,5
...+ 3 LKW RFBI...	86,53%	252,7	534,5	47,3	145,1	174,2
...+ 3 LKW RFBB	88,57%	293,1	534,5	54,8	145,1	202,0
...+ je 2 auf beiden Seiten	91,00%	332,4	534,5	62,2	145,1	229,0

Tabelle 53 : Gegenüberstellung der stufenweisen Akkumulation der Schädigungsäquivalente für **Biegebeanspruchung** (DYGES-Modell vs. ELM 3 und 4 des Eurocode)

Aufsummierte Szenarien	Anteil an Gesamtsumme	Schädigungsäquivalente Torsion				
		DyGeS [Mill.t]	ELM 3 [Mill.t]	Verhältniswert [%]	ELM 4 [Mill.t]	Verhältniswert [%]
1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI...	39,03%	153,1	4667,5	3,3	1266,7	12,1
...+ 2 LKW RFBI...	55,43%	765,2	4667,5	16,4	1266,7	60,4
...+ 2 LKW RBB...	64,80%	1113,2	4667,5	23,9	1266,7	87,9
...+ je 1 auf beiden Seiten...	73,62%	1163,6	4667,5	24,9	1266,7	91,9
...+ 2 LKW RFBI u. 1 LKW RFBB...	79,86%	1397,4	4667,5	29,9	1266,7	110,3
...+2 LKW RFBB u. 1 LKW RFBI...	83,31%	1523,9	4667,5	32,6	1266,7	120,3
...+ 3 LKW RFBI...	86,53%	2110,7	4667,5	45,2	1266,7	166,6
...+ 3 LKW RFBB	88,57%	2475,8	4667,5	53,0	1266,7	195,5
...+ je 2 auf beiden Seiten	91,00%	2653,3	4667,5	56,8	1266,7	209,5

Tabelle 54 : Gegenüberstellung der stufenweisen Akkumulation der Schädigungsäquivalente für **Torsionsbeanspruchung** (DYGES-Modell vs. ELM 3 und 4 des Eurocode)

Dieser direkte Vergleich zeigt, dass die Berücksichtigung realer Eingangsgrößen des DYGES-Modells für Biegebeanspruchung rund 62% und für Torsionsbeanspruchung rund 57% an resultierenden Schädigungsbeiträgen gegenüber dem Ermüdungslastmodell 3 des EC1-2 zur Folge hat.

Diese Aussage steht in keinerlei Widerspruch zu den vor Ort auftretenden und fortschreitenden Ermüdungsrissen. Aufgrund der vorliegenden Detaillierung und der sich daraus ergebenden Spannungskonzentrationsfaktoren an den maßgeblichen Anschlussdetails (siehe **Kapitel 15**) findet Ermüdung offensichtlich statt. Der rechnerische Vergleich aus **Tabelle 53** und **Tabelle 54** besagt aber, dass dies aufgrund der analysierten, realen Eingangswerte um rund 38% (Biegung) bzw. 43% (Torsion) langsamer vonstattengehen würde, wie im Fall einer isolierten, Normen-basierten Analyse.

Der vorliegende Vergleich zwischen realem Modell und dem Eurocode impliziert, dass die errechneten Schädigungsäquivalente beider Ansätze im Sinne von "Beiträgen infolge Nennspannungen" zu verstehen sind. Wie sich in **Kapitel 15** bzw. in [58] zeigt, führt die Berücksichtigung der Spannungsvergrößerung am Kerbdetail zu Strukturspannungen und damit zu deutlich angemesseneren Ergebnissen hinsichtlich Ermüdung, als es unter Verwendung von Nennspannungen der Fall ist.

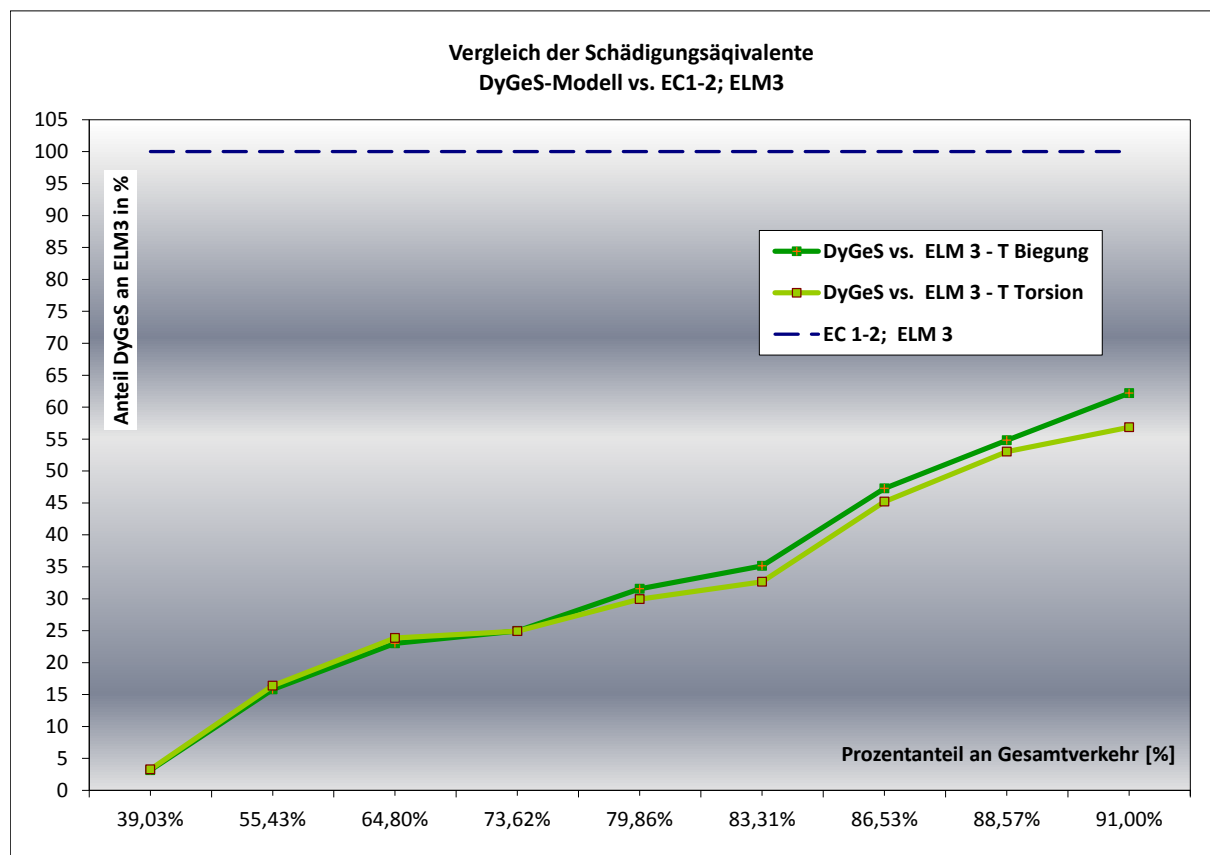


Bild 204: Schadensakkumulation unter sukzessiver Berücksichtigung aller Belastungsanordnungen - Direkter Vergleich des Ermüdungslastmodells 3 der ÖNORM B 1991-2 [40] mit dem DYGES-Modell

Bild 204 veranschaulicht grafisch den zuvor tabellierten Vergleich zwischen dem DYGES-Modell und ELM 3 hinsichtlich akkumulierter Ermüdungsschädigung. Dargestellt werden dabei sowohl die Vergleichs-Werte des DYGES-Modells für Biegung als auch jene für Torsion sowie das ELM 3 selbst.

Wie aus **Tabelle 53** und **Tabelle 54** hervorgeht, werden durch die vorliegende Alterungsbewertung des Schwerverkehrs mittels Schadensäquivalenten 91% der beobachteten, realen Lastbilder repräsentiert. Die Szenarien der verbleibenden 9% bestehen überwiegend aus zahlreichen, komplexeren Lastbildern von in beiden Fahrtrichtungen gleichzeitig auftretenden Schwerverkehrs-Überfahrten – mit jeweils geringer Auftretens-Häufigkeit. Die Belastung durch diese Szenarien ist eher als biegerelevant zu bezeichnen, während die Torsionsrelevanz (maßgeblich im Zusammenhang mit der Ermüdungseinwirkung an den Querverbänden) bei dieser tendenziell symmetrischen Belastung des Querschnittes in den Hintergrund tritt. Die individuelle Auftretens-Häufigkeit bei all den verbleibenden Szenarien liegt - bis auf eine Ausnahme - unterhalb von einem Prozent. Dadurch bleibt nach Umrechnung in Schädigungsäquivalente kaum noch ein Beitrag zur akkumulierbaren Alterung übrig (der Verlauf in **Bild 204** würde entsprechend verflachen).

17.2.2 Vergleich hinsichtlich Tragfähigkeit (α – Wert äquivalente Gesamtbetrachtung)

Wie bereits im Vorfeld zu diesem Abschnitt angekündigt, wird – abrundend zur bisher schwerpunktmäßig betrachteten ermüdungsrelevanten Beanspruchung – an dieser Stelle nun auch ein ganzheitlicher Vergleich der gemessenen Schwerverkehrs-Belastung mit sämtlichen, wesentlichen Lastfällen des Eurocode EC1-2 bzw. mit weiteren, für den Autobahnabschnitt A13 maßgeblichen Belastungs-Szenarien nachgereicht. Während bis zum vorangehenden **Abschnitt 17.2.1** die messungsbasierten Lastbilder & Tonnagen unter dem Aspekt der Bauwerksalterung in geeigneter Weise zur Vergleichsgröße der so genannten Schädigungsäquivalente zusammengeführt und für den Vergleich mit dem Eurocode aufbereitet wurden, erfolgt dies nun anhand der identischen Eingangsgrößen, aber mit Hilfe des Vergleichsparameters der resultierenden Summenbelastung (Tonnage). Durch die direkten Auswirkungen auf die zugehörigen, globalen Schnittgrößen können die nachfolgenden Vergleichsüberlegungen als α -Wert äquivalente Betrachtungen im Sinne des Grenzzustandes der Tragfähigkeit angesehen werden.

Die aus dem Monitoring stammende Belastung des Regelbetriebes (DYGES-Biegung & DYGES-Torsion) wird folgenden Lastfällen gegenübergestellt:

- Grenzzustand der Tragfähigkeit **LM1**
- Ermüdungslastfälle **ELM1, ELM3 & ELM4**
- **Vollstau** mit DYGES Tonnagen (Betrachtung 2 LKW- & 2 PKW-Spuren)
- Auf der A13 von der Genehmigungspflicht ausgenommene Sondertransporte bis **70 t**

Dazu wird nachfolgend eine erste, vergleichende Gegenüberstellung – ausgedrückt durch die maximal auf das Brückenfeld aufzubringenden Tonnagen – vorgenommen. Dies erfolgt zunächst mit den bis dato ausschließlich betrachteten, für Alterungsbetrachtungen als maßgeblich definierten und weiterverfolgen Ermüdungslastmodelle ELM 3 & ELM 4 (**Bild 205**). Während sich infolge Ermüdungslastmodell 3 konstant 62,4t auf dem Tragwerk befinden, sind dies für das ELM 4 infolge einzeln fahrender Schwerfahrzeuge durchschnittlich 40,4t (siehe jeweils **Tabelle 52**). Vom DYGES-Modell wird für jedes Belastungsszenario jene Tonnage aufgetragen, die sich bei dieser Belastungsanordnung im rechnerisch ungünstigsten Fall ergibt sowie die zum Belastungsszenario zugehörige Auftretens-Häufigkeit (Sekundär-Ordinate). Aus diesen Grafiken ist ersichtlich, dass die resultierenden, realen Tonnagen in der überwiegenden Zahl der Fälle zwar über der Norm (ELM 3 & ELM 4) liegen, gerade die größeren Überschreitungen rücken aber durch die geringe Auftretens-Häufigkeit dieser Belastungsszenarien bezüglich ihrer Bedeutung etwas in den Hintergrund.

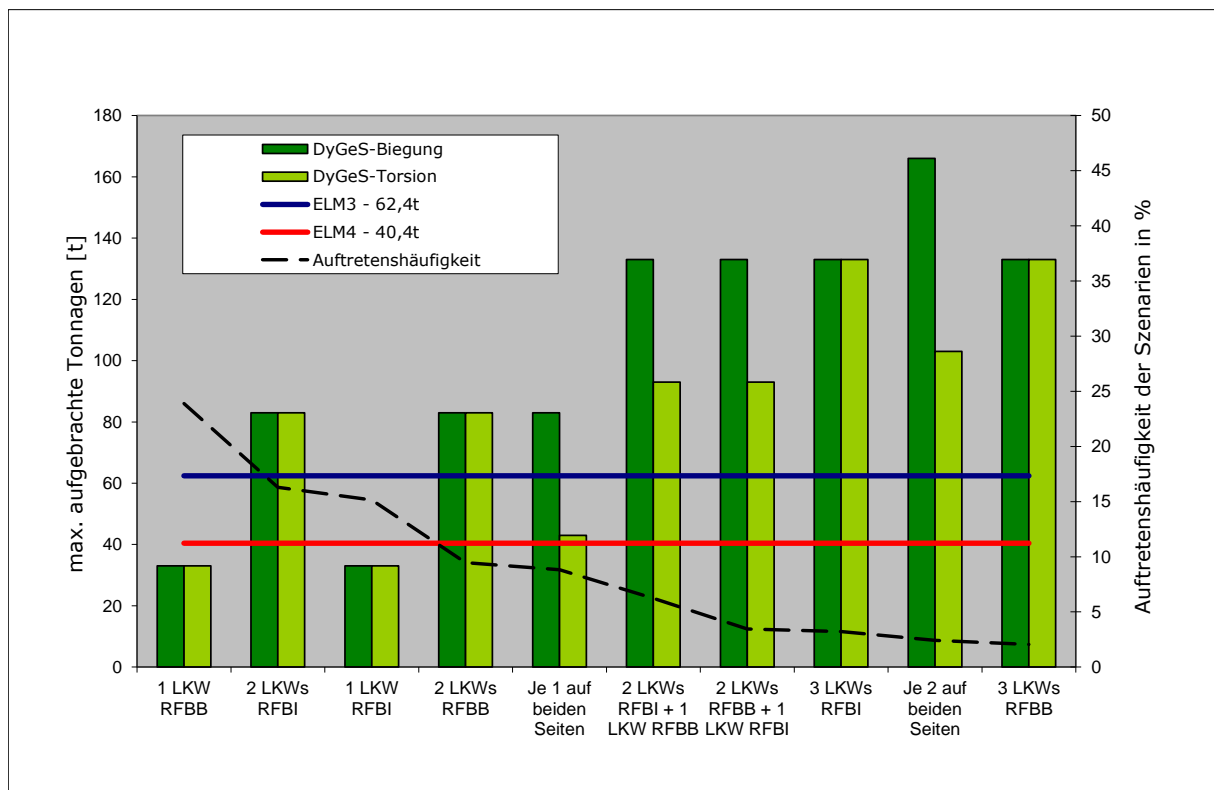


Bild 205: Grundsätzlicher Vergleich zwischen den Ermüdungslastfällen ELM3, ELM4 und DYGES - resultierende, maximale Tonnagen im Randfeld Schönberg

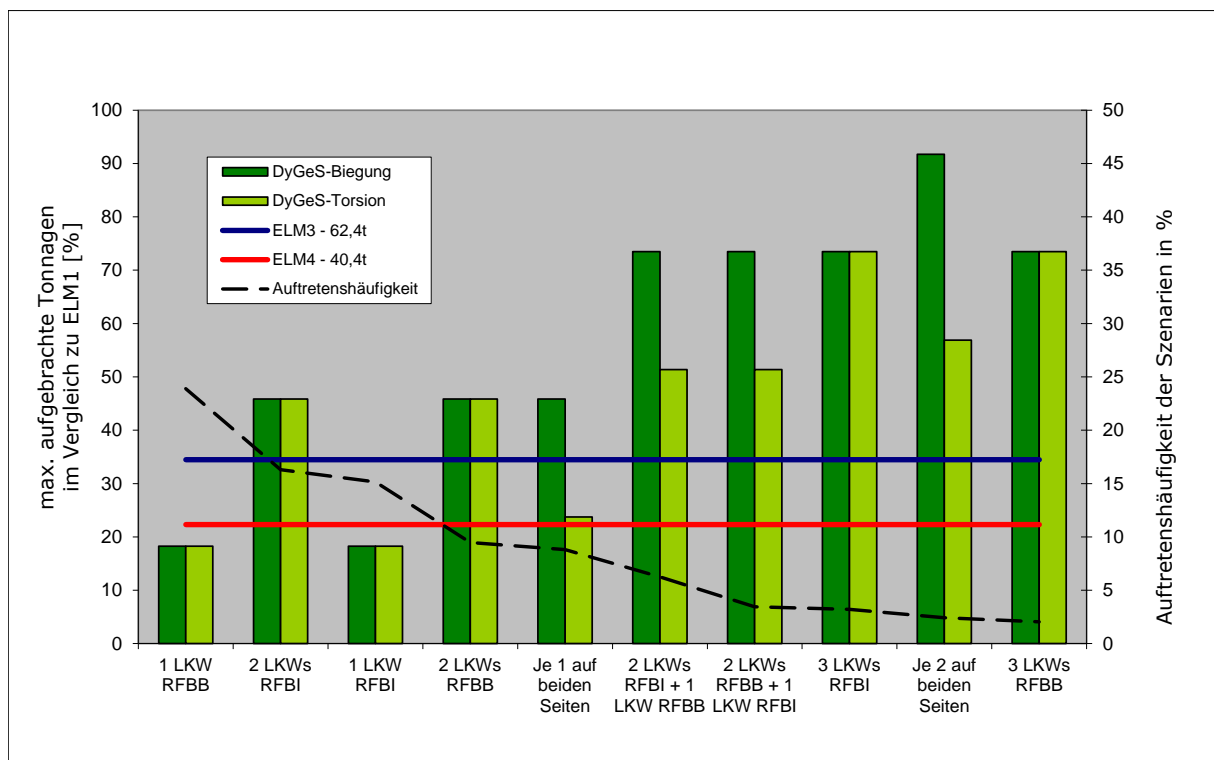


Bild 206: α - Wert äquivalenter, grundsätzlicher Vergleich (Ermüdung) - Anteile der aus den Modellen ELM3 & ELM4 und DYGES resultierenden, maximalen Tonnagen im Vergleich zum ELM1 [%]

Bild 206 zeigt den selben Vergleichs-Ansatz aus **Bild 205** noch einmal, allerdings sind diesmal die prozentuellen Anteile der resultierenden, maximal auftretenden DYGES-Gewichtsbelastung in Bezug auf die Tonnage des Ermüdungslastmodells 1 (**Bild 207**) dargestellt. Durch die Proportionalität der resultierenden Schnittgrößen zu den auslösenden Tonnagen werden alle nachfolgenden Diagramme und Tabellen als α -Wert äquivalente Betrachtungen bezeichnet.

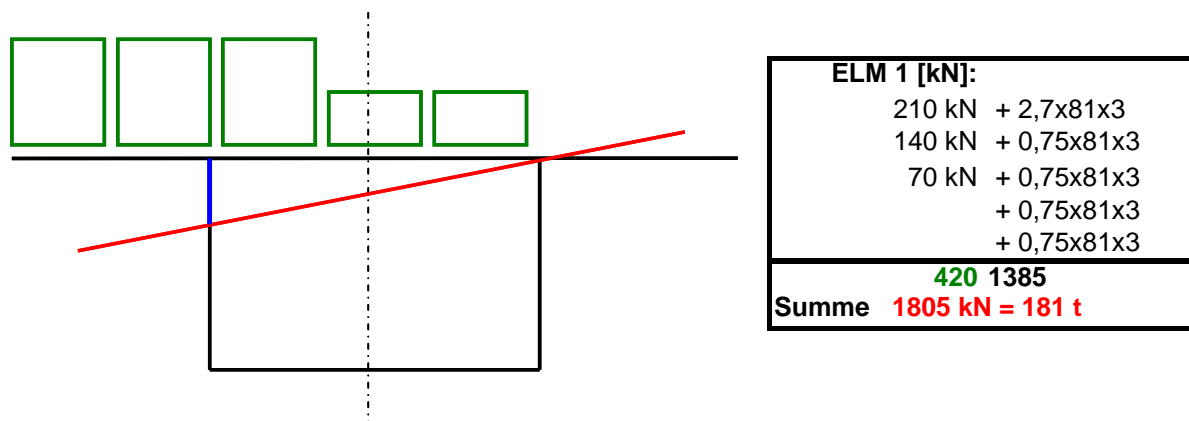


Bild 207: Übertragung des Belastungsbildes infolge **Ermüdungslastfall ELM 1** auf das Randfeld Schönberg – Komponenten für die rechnerischen Fahrstreifen (links) und resultierende Gesamtbelastung (rechts)

In den nächsten, bereits deutlich erweiterten Gegenüberstellungen (**Bild 208 & Bild 209**) bildet der Ermüdungslastfall ELM 1 des Eurocode die Obergrenze, während alle sonstigen, bisherigen Vergleichsinhalte von **Bild 205 & Bild 206** erhalten bleiben. Dessen Zusammensetzung wird grafisch wie numerisch in **Bild 207** dargelegt. Neuerlich erfolgt zunächst eine Gegenüberstellung von Absolutbeträgen – ausgedrückt durch die Summe der maximal auf das Brückenfeld aufzubringenden Tonnagen (**Bild 208**). Infolge Ermüdungslastmodell 1 befinden sich durch die punktuelle wie flächige Belegung der relevanten rechnerischen Fahrstreifen 181 t auf dem Tragwerk. Aus dem DYGES-Modell wird wiederum für jedes Belastungsszenario jene resultierende Tonnage aufgetragen, für die sich bei dieser Belastungsanordnung das maximale Schädigungsäquivalent ergibt. Ergänzend wird als neuer, aufschlussreicher Vergleichsparameter der Schwellenwert für die von der Genehmigungspflicht ausgenommenen Sondertransporte herangezogen. Laut Angaben der ASFINAG Alpenstraßen GmbH liegt dieser bei 70 t.

Bild 209 zeigt dieselben Eingangsgrößen aus **Bild 208** noch einmal, allerdings sind wiederum deren prozentuellen Anteile in Bezug auf die resultierende Tonnage des Ermüdungslastmodells 1 dargestellt.

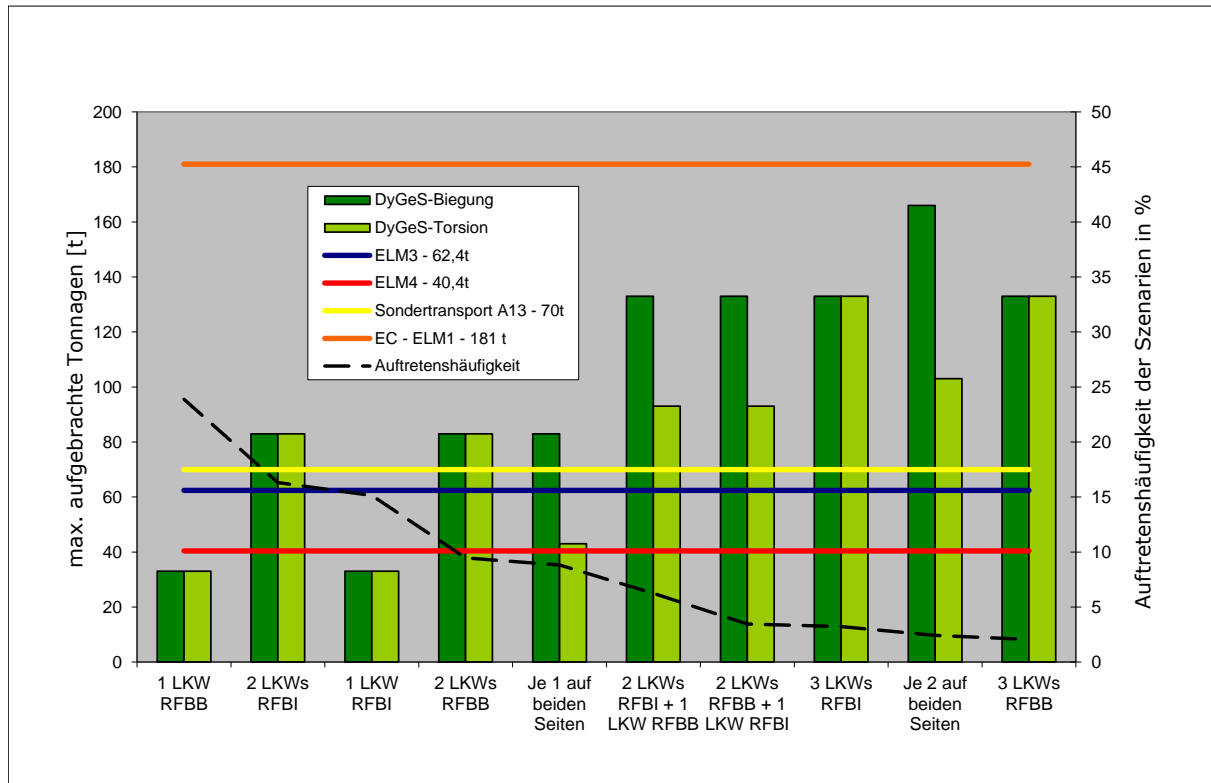


Bild 208: Grundsätzlicher Vergleich zwischen den Ermüdungslastfällen ELM1,ELM3, ELM4, dem auf der A13 genehmigungsfreien Sondertransport (70t) und DYGES - resultierende, maximale Tonnagen im Randfeld Schönberg

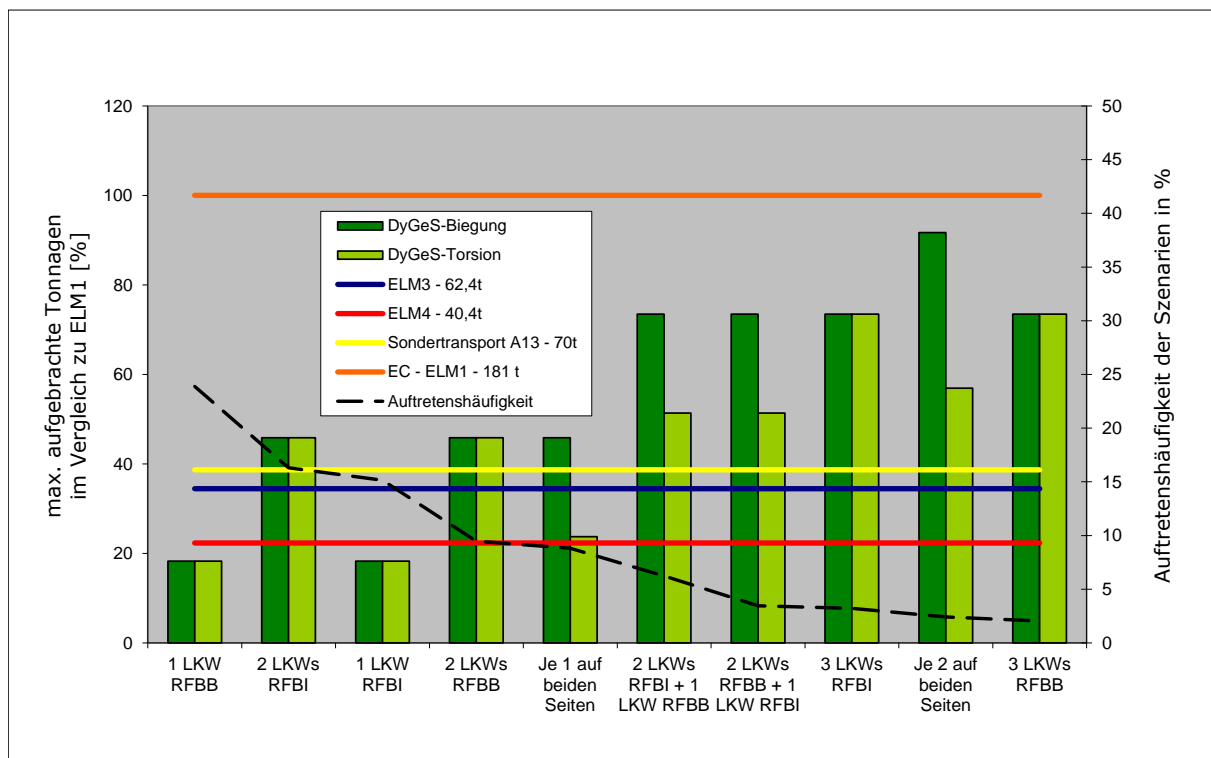


Bild 209: α - Wert äquivalenter, grundsätzlicher Vergleich (Lastfälle Ermüdung & Sondertransport) - Anteile der aus den Ermüdungsmodellen, dem Sondertransport (70t) und DYGES resultierenden, maximalen Tonnagen im Vergleich zum ELM1 [%]

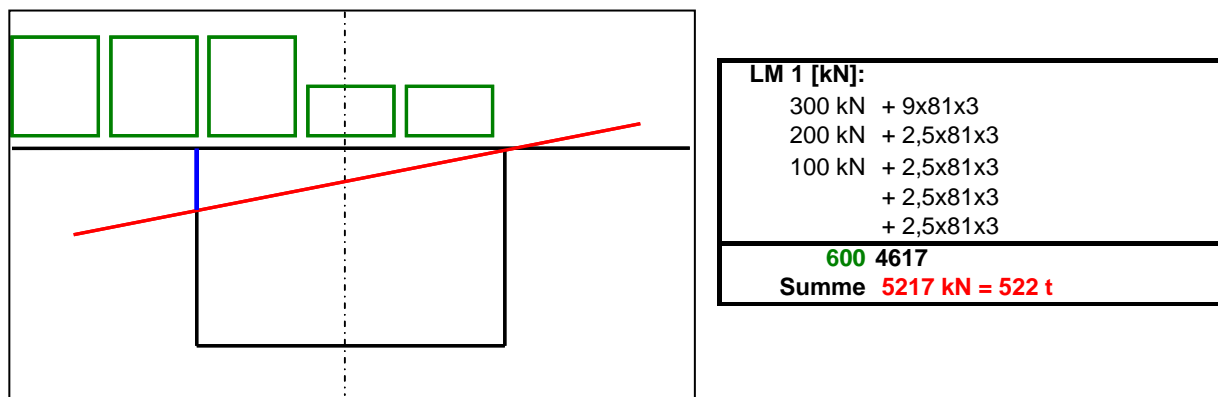


Bild 210: Übertragung des Belastungsbildes infolge **Tragfähigkeitslastfall LM 1** auf das Randfeld Schönberg – Komponenten für die rechnerischen Fahrstreifen (links) und resultierende Gesamtbelastung (rechts)

Im nächsten Schritt bildet das Lastmodell LM 1 des Eurocode 1-2 ([40] - Grenzzustand der Tragfähigkeit) die Obergrenze, während alle sonstigen, bisherigen Vergleichsinhalte von **Bild 208** bzw. **Bild 209** erhalten bleiben. Dessen Zusammensetzung wird wiederum vorab grafisch wie numerisch dargelegt (**Bild 210**). Beim Lastmodell LM1 befinden sich infolge punktueller sowie flächiger Belegung der relevanten, rechnerischen Fahrstreifen 522 t auf dem Tragwerk. Neuerlich erfolgt zunächst eine Gegenüberstellung von Absolutbeträgen – ausgedrückt durch die maximal auf das Brückenfeld aufzubringenden Tonnagen (**Bild 212**).

Abschließend wird ein weiterer, naheliegender Vergleichsparameter geschaffen. Für das Gedankenmodell des Rückstaus werden anstatt der bisher betrachteten, rechnerischen Fahrstreifen in Anlehnung an die realen Fahrbahn-Komposition 4 Fahrstreifen mit LKW- bzw. PKW Belastung versehen (**Bild 211**).

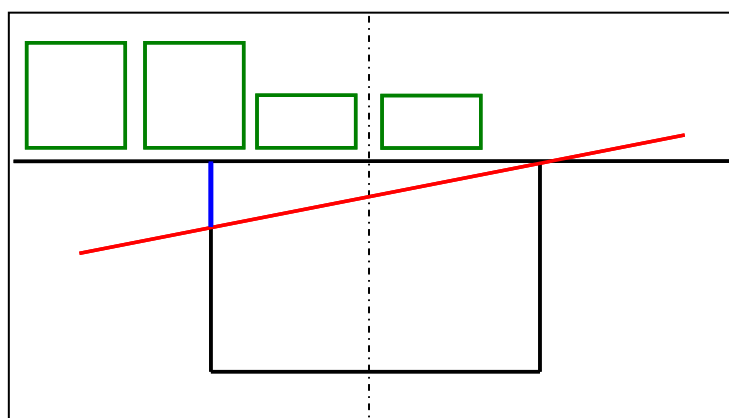


Bild 211: Alternatives Belastungsszenario Rückstau am Randfeld Schönberg - DYGES Komponenten für die realen Fahrstreifen für die maximale Belastung des Hauptträgers

Unter Berücksichtigung der Spannweite des Brückenrandfeldes Schönberg, der geometrischen Abmessungen von Schwer- und Personenfahrzeugen sowie der Zusammensetzung der Schwerfahrzeuge im Sinne der durch die Langzeitreihe vorliegenden DYGES-Gewichtsklassen (siehe **Tabelle 4 in Kapitel 4.1.1**) ergibt sich eine resultierende Belastung von 425 t.

Weitere Details zum Vergleichsmodell des rückgestauten Autobahnverkehrs sind **Tabelle 55** zu entnehmen.

Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung der Tonnagen aus der Langfrist-Zeitreihe 07/2004 - 12/2007 in [%]									
8.7-10t	10-15t	15-20t	20-25t	25-30t	30-35t	35-38t	38-42.8t	>42.8t	
10,0	13,0	18,0	23,0	28,0	32,0	36,5	40,4	50,0	
22,2	7,1	6,3	5,8	5,6	5,7	4,6	5,0	37,6	

ad LKWs									
Durchschnittliche Länge samt Abstandspuffer (aus ELM 4 oben)	7 m	7 m	7 m	8 m	8 m	12,5 m	12,5	12,5 m	15,5
PROZENTuell gewichtete durchschnittliche LKW Länge samt Puffer	11,2 m								
Aufteilung dieser 14 LKWs auf die Tonnagenklassen	81 m Feldlänge / 11,2 m = 7,23 LKW Einheiten x 2 Fahrstreifen = 14 LKWs								
	3,11	0,99	0,88	0,81	0,78	0,80	0,64	0,70	5,28
	entspr. 3 Stück	entspr. 1 Stk.	entspr. 1 Stk.	entspr. 1 Stk.	entspr. 1 Stk.	entspr. 1 Stk.	entspr. 0,5 Stk.	entspr. 0,5 Stk.	entspr. 5 Stk.
	= 3 x 10 t = 30	= 1 x 13 t = 13	= 1 x 18 t = 18	= 1 x 23 t = 23	= 1 x 28 t = 28	= 1 x 32 t = 32	= 0,5 x 36,5 t = 18,25	= 0,5 x 40,4 t = 20,2	= 5 x 50 t = 200
SUMME im Randfeld	382,45 t								
ad PKWs									
Durchschnittliche Länge aus der Spanne 3,6 bis 5,2 m = 4,4 m samt Abstandspuffer = 5,5 m									
Durchschnittliche Tonnage aus der Spanne 0,8 t bis 2,5 t = 1,1 t samt Beladung = 1,5 t									
	81 m Feldlänge / 5,5 m = 14,7 PKW Einheiten x 2 Fahrstreifen x 1,5 t = 42 t								
	SUMME Rückstau = 383t + 42t = 425t								

Tabelle 55 : Alternatives Belastungsszenario Rückstau am Randfeld Schönberg unter Berücksichtigung der DYGES Gewichtsverteilung sowie der geometrischen Abmessungen zur Bildung einer resultierenden Tonnage infolge rückgestauten LKW- und PKW-Verkehrs

Abschließend sind sämtliche, diesem Abschnitt zugrunde liegenden Größen numerisch (**Tabelle 56 bis Tabelle 58**) sowie grafisch (**Bild 212 & Bild 213**) aufbereitet. Die Bedeutung des durch Feldversuche hinterlegten, realen Lastkollektivs und dessen Auswirkungen auf den zugehörigen Anpassungsfaktor für die Verkehrslast α lässt sich im Hinblick auf die wesentlichsten Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Für den Regelbetrieb (DYGES-Biegung & DYGES-Torsion) ergeben sich gegenüber dem **Grenzzustand der Tragfähigkeit LM1 α -Werte** zur **Abminderung der Verkehrslasten** in einer Bandbreite von **0,063-0,318**.
- Für den Regelbetrieb (DYGES-Biegung & DYGES-Torsion) ergeben sich gegenüber dem **ungünstigsten Ermüdungslastfall ELM1 α -Werte** zur **Abminderung der Verkehrslasten** in einer Bandbreite von **0,183-0,917**.
- Für ein mit DYGES Tonnagen konfiguriertes **VOLLSTAU-Szenario** ergibt sich gegenüber dem **Grenzzustand der Tragfähigkeit LM1** ein **α -Wert** zur **Abminderung der Verkehrslasten von 0,814** => für Überlegungen hinsichtlich Tragsicherheit ist somit der Vollstau maßgebend
- Das Belastungsniveau der für die A13 genehmigungsfreien Sondertransporte entspricht in etwa der Konstellation aus den 5 häufigsten Lastbildern, welche mit resultierenden Tonnagen zwischen 33 und 83 t gemeinsam rund 74% der auftretenden Lastfälle abdecken. Der für das Tragwerk festgelegte Schwellenwert für die von der Genehmigungspflicht ausgenommenen Sondertransporte bis 70t erscheint daher in der Größenordnung richtig gewählt.

SZENARIO	Max. Tonnage								
	Prozentanteil	DyGes Biegung	DyGeS Torsion	ELM3 62,4t	ELM4 40,4t	Sondertransport A13 - 70t	EC - ELM1 181 t	EC - LM1 522 t	Vollstau Dyges+PKW 425t
1 LKW RFBB	23,88	33,0	33,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
2 LKWs RFBI	16,30	83,0	83,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
1 LKW RFBI	15,15	33,0	33,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
2 LKWs RFBB	9,47	83,0	83,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
Je 1 auf beiden Seiten	8,82	83,0	43,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,24	133,0	93,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,45	133,0	93,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
3 LKWs RFBI	3,22	133,0	133,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
Je 2 auf beiden Seiten	2,42	166,0	103,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425
3 LKWs RFBB	2,04	133,0	133,0	62,4	40,4	70,0	181	522	425

Tabelle 56 : **Vollständiger Vergleich** der Lastfälle Ermüdung, Tragfähigkeit, einem messungsbasierten Vollstauszenario, dem auf der A13 genehmigungsfreien Sondertransport (70t) und DYGES – **Vergleichsgröße** resultierende, **maximale Tonnagen** im Randfeld Schönberg

SZENARIO	Anteil an ELM1 in % α - Wert äquivalenter Grundsätzlicher Vergleich (Ermüdung & Sondertransport)								
	Prozentanteil	DyGes Biegung	DyGeS Torsion	ELM3 62,4t	ELM4 40,4t	Sondertransport A13 - 70t	EC - ELM1 181 t	EC - LM1 522 t	Vollstau Dyges+PKW 425t
1 LKW RFBB	23,88	18,3	18,3	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
2 LKWs RFBI	16,30	45,9	45,9	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
1 LKW RFBI	15,15	18,3	18,3	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
2 LKWs RFBB	9,47	45,9	45,9	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
Je 1 auf beiden Seiten	8,82	45,9	23,8	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,24	73,5	51,4	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,45	73,5	51,4	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
3 LKWs RFBI	3,22	73,5	73,5	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
Je 2 auf beiden Seiten	2,42	91,7	56,9	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8
3 LKWs RFBB	2,04	73,5	73,5	34,5	22,3	38,7	100	288,4	234,8

Tabelle 57 : **α - Wert äquivalenter Gesamtvergleich** der Lastfälle Ermüdung / Tragfähigkeit / messungsbasiertes Vollstauszenario / dem genehmigungsfreien Sondertransport (70t) und DYGES – **Vergleichsgröße Anteil** der resultierenden, maximalen Tonnagen im Randfeld Schönberg **am ELM1 in %**

SZENARIO	Anteil an LM1 in % α - Wert äquivalenter Gesamtvergleich (Ermüdung & Tragfähigkeit)								
	Prozentanteil	DyGes Biegung	DyGeS Torsion	ELM3 62,4t	ELM4 40,4t	Sondertransport A13 - 70t	EC - ELM1 181 t	EC - LM1 522 t	Vollstau Dyges+PKW 425t
1 LKW RFBB	23,88	6,3	6,3	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
2 LKWs RFBI	16,30	15,9	15,9	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
1 LKW RFBI	15,15	6,3	6,3	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
2 LKWs RFBB	9,47	15,9	15,9	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
Je 1 auf beiden Seiten	8,82	15,9	8,2	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,24	25,5	17,8	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,45	25,5	17,8	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
3 LKWs RFBI	3,22	25,5	25,5	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
Je 2 auf beiden Seiten	2,42	31,8	19,7	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4
3 LKWs RFBB	2,04	25,5	25,5	12,0	7,7	13,4	34,7	100	81,4

Tabelle 58 : **α - Wert äquivalenter Gesamtvergleich** der Lastfälle Ermüdung / Tragfähigkeit / messungsbasiertes Vollstauszenario / dem genehmigungsfreien Sondertransport (70t) und DYGES – **Vergleichsgröße Anteil** der resultierenden, maximalen Tonnagen im Randfeld Schönberg **am LM1 in %**

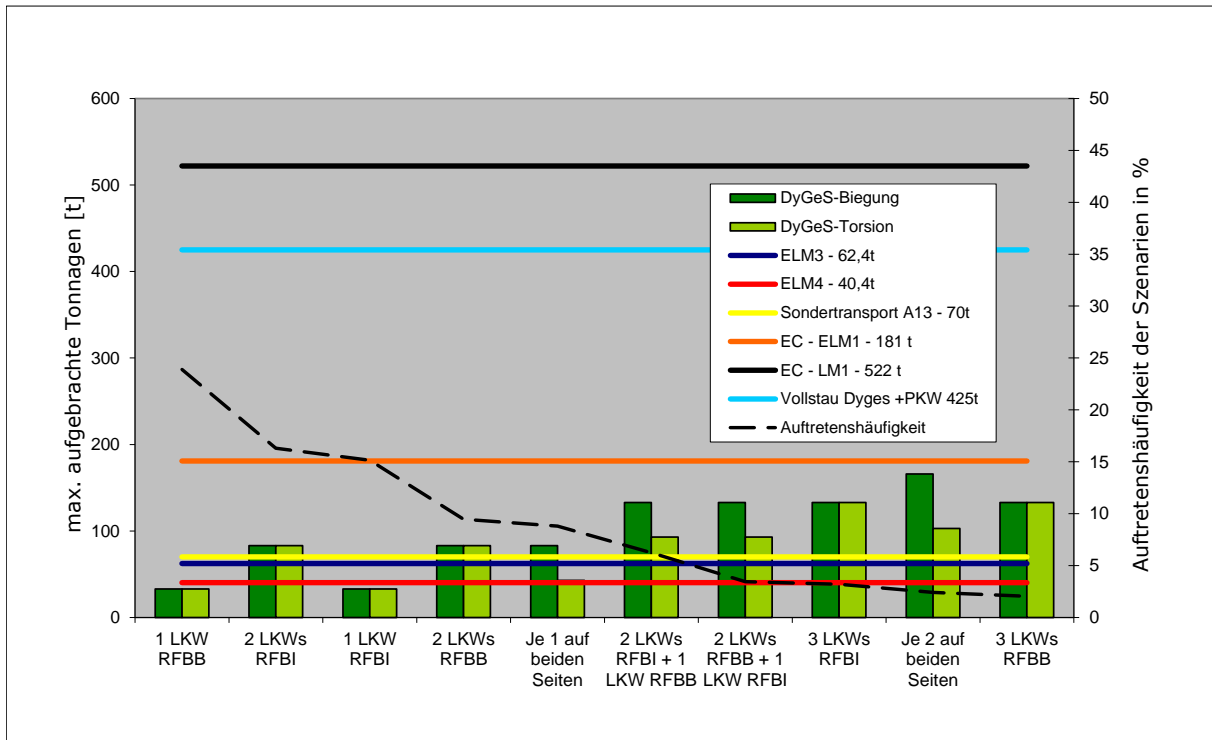


Bild 212: Vollständiger Vergleich - Lastfälle Ermüdung, Tragfähigkeit, messungsbasiertes Vollstauszenario, der auf der A13 genehmigungsfreie Sondertransport (70t) und DYGES - resultierende, maximale Tonnagen im Randfeld Schönberg

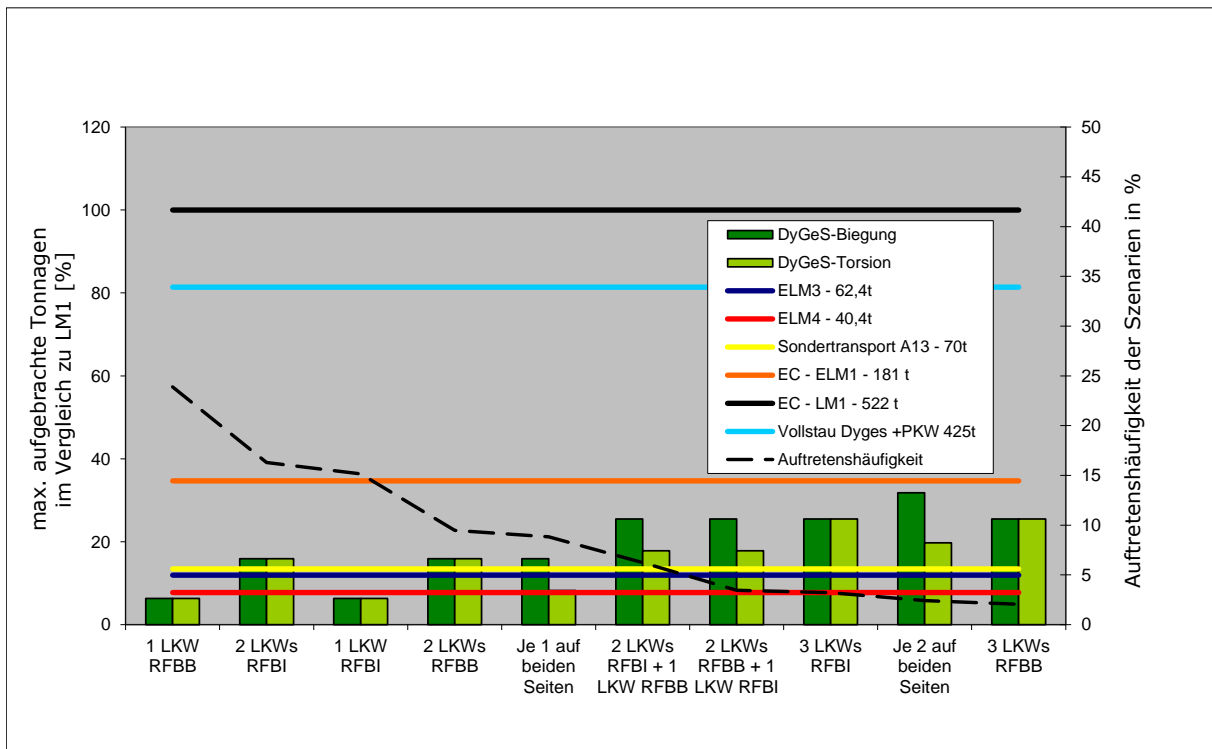


Bild 213: α - Wert äquivalenter, vollständiger Vergleich: Anteile der aus den Lastfällen Ermüdung, Tragfähigkeit, Vollstau, Sondertransport (70t) und DYGES resultierenden, maximalen Tonnagen im Vergleich zum ELM1 [%]

17.3 Abschließende, zusammenfassende Gedanken zur vorliegenden Gegenüberstellung

- Mit Hilfe einer Dauermessung und ergänzender Sondermessungen wurde ein Lastmodell für die Europabrücke entwickelt, dessen Ansatz sich stark von dem der herkömmlichen Lastmodelle der Normen unterscheidet. Methodisch liegen die Prioritäten dabei überwiegend auf Seiten von Messwerten und echten Zählungen als auf Annahmen und Schätzungen.

- Das Monitoring-basierte Dynamische Gewichtserfassungssystem stellt dabei das Herzstück dieser Dissertation dar. Anhand der zugehörigen Langzeitmessreihe an der Europabrücke konnten eine hinreichend genaue Charakterisierung der auftretenden Tonnagen in einzelne Gewichtskategorien und eine resultierende Häufigkeitsverteilung erstellt werden. Dadurch liegen im Kontext mit dem verbindlichen Inkrafttreten des Eurocode nun für etwaige statische Nachrechnungen die realen Tonnagen der einzelnen Schwerverkehrseinheiten vor.

- Der ASFINAG Alpenstraßen GmbH wird damit eine maßgebliche Erweiterung der offiziellen, bisher durch die Mautzählungen vorliegenden Verkehrsvolumina (als Funktion der gezählten LKW-Einheiten samt zugehöriger Anzahl der Achsen) bereitgestellt. Von Seiten des EC standen in diesem Zusammenhang bis dato die standardisierten Lastkraftwagen (Ermüdungslastmodelle 2 bis 4) zur Verfügung.

- Im gleichen Zusammenhang stehen die mittels Videoaufzeichnung ausführlich analysierten und kategorisierten Belastungsanordnungen mit entsprechender Häufigkeitsverteilung für Überlegungen der feldweisen, resultierenden Belastung am Brückentragwerk zur Verfügung. Fragestellungen für detaillierte Nachrechnungen, welche Laststellungen überhaupt auftreten bzw. welche Anzahl an Schwerfahrzeugen sich gleichzeitig am Brückenfeld befindet, werden dadurch gleichermaßen beantwortet.

- Durch die besagte Videoanalyse wurden Belastungsszenarien auf dem beobachteten Randfeld V dokumentiert und gezählt. Diese Zählungen wurden dann auf das "Regel-Jahr 2007" hochgerechnet. Kombinatorische Überlegungen zur jeweils ungünstigsten Form innerhalb aller Anordnungs- und Tonnagen-Variante pro Last-Bild waren die Grundlage für eine adaptierte Form der Schadensakkumulations-Hypothese nach Palmgren und Miner, bei welcher Schädigungsäquivalente für Torsions- und Biegebeanspruchung errechnet und entsprechend der Auftretens-Häufigkeiten der einzelnen Belastungsszenarien akkumuliert wurden. In einem nächsten Schritt wurden vergleichbare Ermüdungslastmodelle aus der Norm ausgewählt und mit dem entwickelten Modell hinsichtlich resultierender Belastung und Alterung verglichen.

- Die Zusammenführung der gemessenen Belastungsanordnungen, Auftretens-Häufigkeiten und Lastintensitäten (Tonnagen-Klassierung samt zugehöriger Häufigkeiten) unter Verwendung mechanischer sowie mathematisch-kombinatorischer Überlegungen liefert ein konsistentes Lastmodell. Dieses wird den im EC1-2 enthaltenen Ansätzen gegenübergestellt, wobei im vorliegenden Fall zunächst eine Auseinandersetzung mit den existierenden Lastmodellen für die Ermüdungsberechnung von Straßenbrücken erfolgte. Diese Fragestellung war in all den Jahren der begleitenden Monitoring-Aktivitäten auch von Seite des Brückenbetreibers das vordergründig relevante Thema.

17.3.1 Zum α – Wert als herangezogene Vergleichsgröße

Eine stellvertretend vorgenommene, α -Wert äquivalente Gegenüberstellung mit externen Untersuchungen – denen eine sehr ähnliche Charakteristik der Schwerverkehrseinwirkung zugrunde liegt - zeigt folgende, bestätigende Parallelen:

- Der aus der **Tabelle 58** bzw. dem **Bild 213** ersichtliche, **maximale α -Wert von 0,814** (aus dem mit realen Schwerverkehrseinheiten modellierten Vollstauszenario) korrespondiert sehr gut mit dem unter bestimmten Umständen als zulässig anzusetzenden **α -Wert von 0,80**. Dieser ist in Österreich (siehe [53]) wie auch in Deutschland mittlerweile in Vorschriften bzw. Arbeitsanweisungen zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken im Zusammenhang mit dem Grenzzustand der Tragfähigkeit verankert.

- In einer für den Schweizer Raum relevanten, aktuellen Studie von Meystre und Hirt [42] aus dem Jahr 2006 wird ebenfalls eine realitätsnähere Analyse des realen Schwerverkehrs vorgenommen und den gültigen Belastungsnormen gegenübergestellt. Dabei wurden aktualisierte Lastmodelle erstellt, welche die Bewertung der Tragsicherheit bestehender Brücken unterstützen sollten. Die Messdaten zum Verkehr kamen in diesem Fall aus Weigh-in-Motion (WIM) „Wiegestationen“, die über das Schweizer Straßennetz verteilt sind. Mit Hilfe der entnommenen Schwerverkehrscharakteristik (Achslasten) wurden umfassende Simulationen für verschiedene Brückentypen durchgeführt. Die dabei erhaltenen Schnittgrößen wurden in einem weiteren Schritt mit resultierenden Bemessungswerten infolge der für Straßenbrücken anzusetzenden Lasten aus den Schweizer Normen verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die realitätsnäheren, den Simulationen entnommenen **Schnittkräfte um bis zu 50% geringer** sind, als die nach der Norm berechneten Schnittkräfte. Es wurde daher vorgeschlagen, die auf Basis von Messungen ermittelten Anpassungsfaktoren für die Verkehrslasten (α -Werte) in der Schweizer Norm SIA 261 entsprechend zu adaptieren.

- Das in dieser Dissertation entwickelte Modell unterscheidet sich von der Schweizer Studie zunächst dadurch, dass hier keine α -Werte für bestehende Lastmodelle geschaffen werden, sondern ein eigenständiges Lastmodell entwickelt wurde, das aber dennoch einen α -Wert äquivalenten Gesamtvergleich für Tragfähigkeit und Ermüdung ermöglicht. Obwohl in dieser Doktorarbeit das Thema Bauwerksermüdung tendenziell stärker behandelt wird, zeigen sich auch unter Berücksichtigung des Grenzzustands der Tragfähigkeit deutliche numerische Parallelen zur Schweizer Studie - im Sinne der tatsächlich abgeminderten Belastungsintensität (**Kapitel 17.2.2**) - was umso bemerkenswerter erscheint, als von vollkommen unterschiedlichen methodischen Voraussetzungen ausgegangen wurde. Die in der Dissertation gewählte Vorgehensweise stützt sich auf folgende fundamentale Eckpunkte:

- Es werden keine Simulationen bestehender Lastmodelle mit gemessenen Tonnagen durchgeführt, das vom Autor stammende Monitoring-basierte Lastmodell liefert auch neue Lastkonfigurationen.
- Weiters wurden keine Simulationen von fahrendem Verkehr durchgeführt, das reale Verkehrsgeschehen wurde anhand einer Verknüpfung von Zählungen am Brückentragwerk bzw. am Mautportal mit Video-basierten Lastbildern abgebildet.
- Stark probabilistisch basierte Überlegungen, wie sie letztlich in [42] einfließen, spielen bekanntlich eher dann eine Rolle, wenn lediglich kurze Messzeiträume bzw. generell wenig Kenntnis über bestimmte Kenngrößen vorliegen. Im Falle der in der Dissertation entwickelten Methodik braucht daher auch das Schwerverfahrzeugs-Gewicht nicht zwingend einer statistischen Häufigkeitsverteilung unterworfen werden, da es direkt aus der gemessenen Langzeitreihe 07/2004 bis 12/2007 entnommen werden kann.

- Letztlich soll mit der durch die Doktorarbeit geschaffenen Alternative für die Einwirkungsseite und der dabei aufbereiteten, α -Wert äquivalenten Darstellung der Messergebnisse vor allem die Größenordnung der Auswirkung auf die rechnerischen Zustandsgrößen aufgezeigt werden.

Wie bereits eingangs festgehalten, ist natürlich im Rahmen einer statisch-konstruktiven Nachrechnung des Bestandstragwerkes ein detaillierter Nachweis für die jeweils maßgebliche Schnittgröße an den kritischen Querschnitten mit den nun neu geschaffenen Einwirkungsgrößen noch ausständig. Die zu erwartende Konsequenz bei deren Anwendung wird hier aber im Sinne einer übergeordneten Aussage zum realen Belastungsniveau bereits aufgezeigt.

17.3.2 Zur isolierten Betrachtung des Randfeldes Schönberg

- Das Lastmodell wurde anhand des Randfeldes V der Europabrücke ausgearbeitet. Wie aus **Kapitel 10** hervorgeht, wurden im Rahmen einer zunächst durchgeführten Schwachstellenanalyse die Brückenrandbereiche - infolge der evidenten, dynamischen Vergrößerung der Schwerverkehrseinwirkung - als beeinträchtigte Zonen identifiziert und für die weiteren Betrachtungen herausisoliert. Die geschaffenen Parameter des Lastmodells müssten bei Übertragung der Überlegungen auf andere Brückenfelder grundsätzlich neu generiert werden. Die Charakteristik des Monitoring-basierten Lastkollektivs würde sich natürlich für die längeren Brückenfelder der Europabrücke verändern, da durch die größere Spannweite zwischen den Pfeilern mehr Schwerfahrzeuge Platz finden und somit andere Belastungsanordnungen (Szenarien) bedingen. Diesem Umstand ist aber gleichzeitig entgegenzuhalten, dass den längeren Brückenfeldern der Europabrücke - allen voran dem Hauptfeld mit der größten Spannweite und Bauhöhe – ein deutlich größerer globaler Tragwiderstand für die gleiche Schwerverkehrsbelastung zur Verfügung steht. Weiters liegen für das Hauptfeld - im Gegensatz zum Randfeld mit seinen überproportionalen, induzierten Stoßbelastungen infolge Schwerverkehr - als quasi statisch anzusehende, fahrende LKW-Lasten vor. Auch tritt die Torsionsbelastung, die für die Diagonalstreben am bedeutendsten ist, in diesen Feldern in den Hintergrund, da sich durch eine größere gleichzeitige Anzahl an Fahrzeugen in den beiden Fahrtrichtungen auf dem Feld tendenziell vermehrt Biegebelastung einstellt. Diese wird jedoch vom massiveren primären Tragsystem der Brücke abgetragen, sodass der Verdrehungswiderstand (u.a. die Torsionsstreben) weniger aktiviert und daher weniger auf Ermüdung beansprucht wird (deckt sich mit dem Schadensbild, welches in **Bild 121**, **Bild 122** und **Tabelle 38** zusammengefasst wird).

- Alle aus der gemessenen Schwerfahrzeug-Kategorisierung (DYGES) heraus entstandenen Analysen zum Lastmodell wurden bekanntlich aufgrund der bisherigen Vorarbeit (Messungen, Reichweite und Überschaubarkeit der gewählten Videobeobachtung) nur für das Randfeld Schönberg vorgenommen. Dazu wurde in den **Kapiteln 17.1.6** bzw. **Kapitel 17.2** bereits festgehalten, warum sich der vorliegende, methodische Ansatz der isolierten Einzelfeldbetrachtung für Überlegungen zur Tragwerks-Ermüdung als sehr geeignet herausgestellt hat (ELM3 & ELM 4 sind im weitesten Sinne Einzelfahrzeugmodelle bzw. liegt eine untergeordnete Bedeutung der gleichzeitigen Anwesenheit von mehreren Schwerfahrzeugen vor). Wie nachfolgend beschrieben wird, stellt das vorliegende Vorgehen im Kontext mit Laststellungen zur Tragsicherheitsbewertung ohne Brückenfeld-übergreifende Einflussflächen für Torsionsbeanspruchung eine dennoch hinreichend genaue und für Biegebeanspruchung eine ausreichend gute Näherung dar. Die Referenzierung zu den als stark konservativ konzipierten Lastmodellen LM1 & LM2 bzw. ELM 1 & ELM2 im Zusammenhang mit dem

Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgte aber ohnehin vor allem wegen dem für α -Wert-äquivalente Vergleichsbetrachtungen am meisten geeigneten Fall der messungs-basierten, fallweise denkbaren Vollstau-Szenarien.

- Das im Zuge der isolierten Randfeldbetrachtung erfolgte Referenzieren auf die maßgeblichen Lastbilder bzw. die zugehörigen, realen Gewichtbelastungen wird aus baustatischer Sicht wie folgt erörtert:

- Für Betrachtungen der Torsionsbeanspruchung am geschlossenen, dünnwandigen Hohlkasten-Querschnitt liegt durch die vorliegende Brückenlagerung und das statische System keine nennenswerte Interaktion mit der Nachbarfeldern in Form von Schnittgrößen-Fortleitung vor. Der hier eingebrachte, unmittelbare Vergleich des Dissertations-basierten Lastmodells mit jenem des Eurocode ist daher für diesen Bereich ohne weiteres zulässig.
- Für Betrachtungen der Biege- bzw. der Querkraftbeanspruchung (unter dem Gesichtspunkt des Grenzzustandes der Tragfähigkeit) am geschlossenen, dünnwandigen Hohlkasten-Querschnitt zeigt sich bei Betrachtung der Wanderlast am Durchlaufträger infolge der nach Einflusslinie ebenfalls denkbaren Belastungsanordnungen in den anderen Feldern mit verstärkendem Beitrag eine sehr schnelle Abklingrate der fortgeleiteten Zustandsgrößen. Für das Brückenrandfeld Schönberg wäre daher nur ein geringfügig verstärkender Beitrag gegeben. Gleichzeitig wurde ja bis dato nur eine Maximalbeanspruchung hinsichtlich Tragfähigkeit und Ermüdung im Randfeld Schönberg selbst verglichen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wirkung aus dem unmittelbaren Nachbarfeld, welche sowohl für das reale Lastmodell wie für das Eurocode-Lastmodell gleichermaßen unterdrückt wurde, in deren Beitrag von sehr ähnlicher Größenordnung ist, wodurch auch hier kein wesentlicher Aspekt ausgeklammert blieb (=> stünde v.a. für den die amplitudische Beanspruchung vervollständigenden „Negativbeitrag“ bei Ermüdungsberechnungen).

17.3.3 Zur rechnerischen Auswirkung auf die Nutzungsdauer ausgewählter Bauteile

- Der Vergleich hinsichtlich Ermüdung zwischen der ÖNORM B 1991-2 und DYGES-Modell erfolgt grundsätzlich im Sinne eines akkumulierenden Schadens (aus $\Delta\sigma_i^m$ und n_i). Ein Fokussieren auf Prognosen zur Alterung konkreter Bauteile infolge Betriebsbeanspruchung bleibt an dieser Stelle aus, da noch kein Detailnachweis für einen Kerbfall geführt wird, sondern vielmehr das dafür notwendige, übergeordnete Lastmodell geschaffen werden sollte. Eine solche Fragestellung könnte im Zuge der Entwicklung eines Lastmodells gar nicht beantwortet werden, da für jede Nachweisstelle eine andere Kombination aus der Laststellung / Auftretens-Intensität / Auftretens-Häufigkeit maßgebend ist. Es sei allerdings auf die ergänzend vorgenommenen Berechnungen und Nachweise an ausgewählten, maßgeblichen Kerbdetails hingewiesen, welche die rechnerische Auswirkung der in dieser Dissertation geschaffenen Grundlagen für neue Last-Eingangsgrößen zum Gegenstand haben ([58]). Dort werden Lebensdauer-Berechnungen an zwei maßgeblichen Bauteilen – den Querverbänden bzw. den Kragarmen – durchgeführt. In beiden Fällen wird die reale, im Feldversuch ermittelte Einwirkung in entsprechende Rechenmodelle implementiert, bevor weiterführend die Auswirkungen der realen Betriebsbeanspruchung auf die jeweilige Bauteilalterung analysiert werden.

17.3.4 Fazit

Das bisher detailliert ausgearbeitete Vorgehen legt die Vermutung nahe, es wäre ein ausschließlich für diese Brücke “maßgeschneidertes” Lastmodell geschaffen worden. Abschließend sei allerdings hervorgehoben, dass das entstandene Lastmodell und dessen Kernaussagen und Erkenntnisse hinsichtlich Bauwerksalterung & Belastungsintensität grundsätzlich nicht nur für das Tragwerk Europabrücke von Bedeutung sind, sondern nach einigen adaptierenden Überlegungen im Wesentlichen für die gesamte A13 Brennerautobahn Gültigkeit besitzen. Dieser Umstand ist dadurch zu begründen, dass alle großen Brücken auf diesem Autobahnabschnitt derselben Bauwerksgeneration angehören, ähnliche geometrische Verhältnisse (Feldlängen & Bauhöhen) und daher eine gleichartige Bemessung sowie insbesondere auch dieselbe Belastungsgeschichte aufweisen.

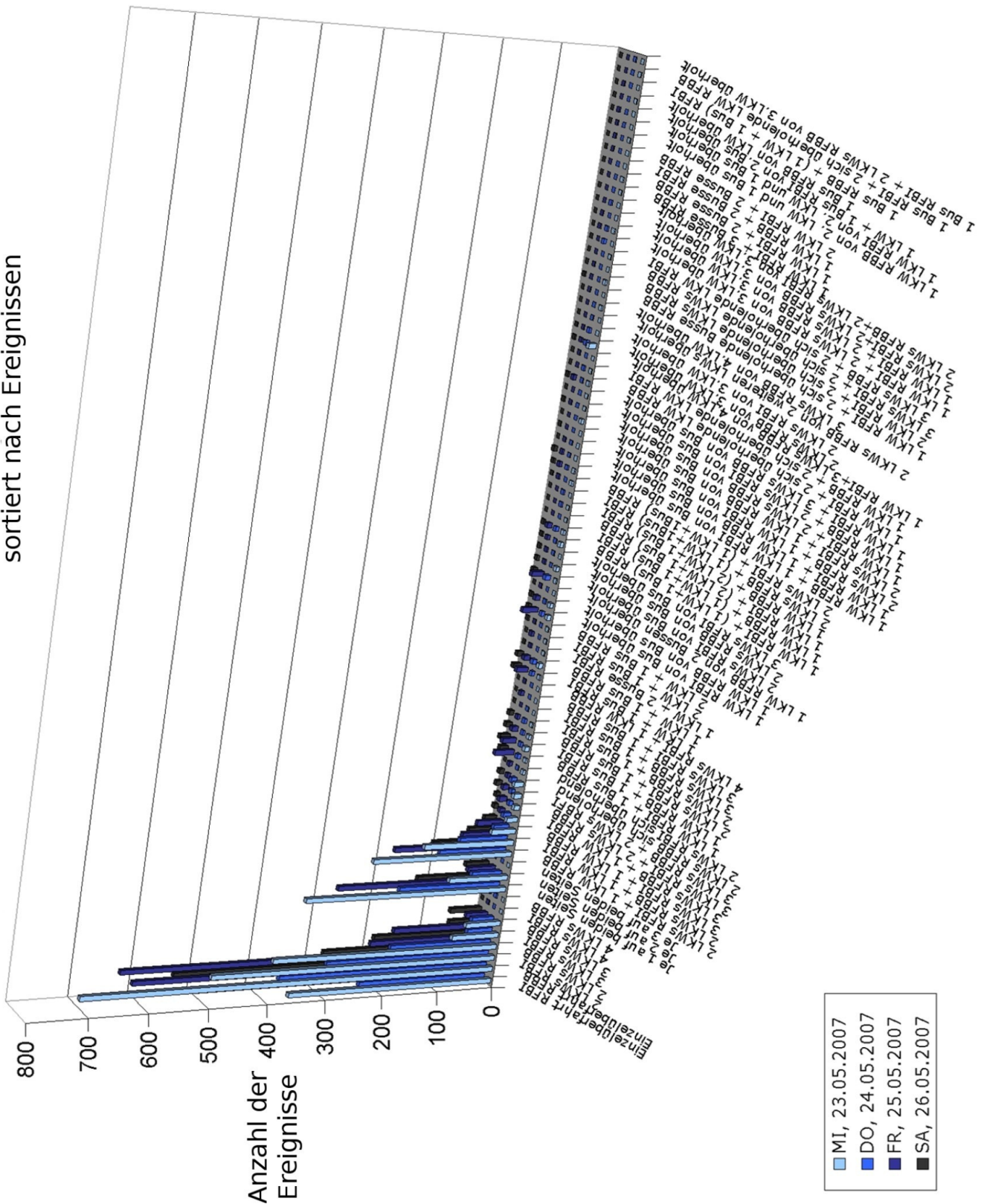
18 ANHANG 10: ZÄHLUNG UND KATEGORISIERUNG DER AUTRETENDEN LASTBILDER (BELASTUNGSSZENARIEN)

- **BELASTUNGSSZENARIEN EUROPABRÜCKE FELD V (EINZELTAGE)**
- **VERGLEICH DER HÄUFIGKEITEN ALLER VIDEOANALYSERTEN BELASTUNGSSZENARIEN**
- **ASFINAG MAUTDATEN FÜR DIE WOCHE DER SONDERMESSUNG**
- **BELASTUNGSSZENARIEN EUROPABRÜCKE FELD V (GESAMTSUMME & TAGESSUMMEN)**
- **HOCHRECHNUNG DER SZENARIEN AUF EINE „REGEL-WOCHE“**

Belastungsszenarien Europabrücke - Feld V

Summe aller gezählten Szenarien = 1756										
Nr.	Szenarien	DONNERSTAG, 24.05.2007						Summe		
		15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	total	nachmittags	abends
1	Einzelüberfahrt RFBI	34	37	51	23	40	43	228	71	157
2	Einzelüberfahrt RFBB	64	62	64	59	64	58	371	126	245
3	2 LKWs RFBI	41	49	49	47	52	53	291	90	201
4	2 LKWs RFBB	28	35	35	38	21	24	181	63	118
5	3 LKWs RFBI	7	12	6	7	6	7	45	19	26
6	3 LKWs RFBB	5	11	1	12	6	5	40	16	24
7	4 LKWs RFBI	0	0	0	1	0	0	1	0	1
8	4 LKWs RFBB	2	0	0	0	1	0	3	2	1
9	Je 1 auf beiden Seiten	31	31	29	37	32	21	181	62	119
10	Je 2 auf beiden Seiten	7	10	8	9	13	7	54	17	37
11	Je 3 auf beiden Seiten	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	22	18	21	23	21	14	119	40	79
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	14	18	14	18	15	7	86	32	54
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	4	2	6	10	4	2	28	6	22
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	2	3	2	4	1	2	14	5	9
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB	2	2	1	2	0	0	7	4	3
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI	0	2	0	1	3	0	6	2	4
18	2 LKWs RFBB sich überholend	1	3	0	2	2	2	10	4	6
19	2 LKWs RFBI sich überholend	1	0	0	0	0	0	1	1	0
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB	0	1	2	0	2	1	6	1	5
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI	2	0	1	0	1	0	4	2	2
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	1	1	0	1	0	0	3	2	1
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	1	1	0	2	0	0	4	2	2
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	0	0	0	1	0	0	1	0	1
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	1 LKW + 1 Bus RFBI	1	0	1	2	1	0	5	1	4
28	1 LKW + 1 Bus RFBB	3	0	3	1	0	0	7	3	4
29	1 LKW + 2 Busse RFBI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	2 LKW + 1 Bus RFBI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	2 LKW + 1 Bus RFBB	0	0	0	1	0	0	1	0	1
32	1 LKW RFBI von Bus überholt	3	0	0	1	1	0	5	3	2
33	1 LKW RFBB von Bus überholt	0	1	0	1	0	0	2	1	1
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt	1	0	0	4	4	0	9	1	8
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt	0	1	0	0	0	0	1	1	0
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt	0	1	0	0	0	0	1	1	0
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB	0	0	1	0	0	0	1	0	1
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI	2	1	1	1	0	0	5	3	2
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI	0	0	0	0	0	2	2	0	2
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1Bus) RFBI	0	0	0	0	2	0	2	0	2
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1Bus) RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0	0	1	0	1	0	2	0	2
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0	0	0	0	1	0	1	0	1
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0	0	0	1	0	0	1	0	1
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt	1	0	0	0	0	0	1	1	0
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBB	0	0	0	0	1	0	1	0	1
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	0	0	1	0	0	1	2	0	2
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0	3	0	1	1	1	6	3	3
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	1	0	1	0	2	0	4	1	3
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt	0	0	0	1	0	0	1	0	1
57	3 LKWs RFBB von 4. LKW überholt	0	0	0	0	1	0	1	0	1
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKWs RFBI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	1	1	0	1	0	1	4	2	2
63	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	0	0	0	0	1	1	2	0	2
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	0	0	0	1	1	0	2	0	2
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt	0	0	0	0	1	0	1	0	1
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73	1 Bus RFBB von LKW überholt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBB	0	0	0	1	0	0	1	0	1
76	1 Bus RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0	0	0	0	1	0	1	0	1

Häufigkeitenvergleich aller videoanalyisierten Belastungsszenarien
 sortiert nach Ereignissen



Mautdaten für die Woche der Sondermessung

ASFINAG - MAUTDATEN

Kalendertag	21.05.2007 - 27.05.2007	MONTAG		DIENSTAG			MITTWOCH			DONNERSTAG			FREITAG			SAMSTAG			SONNTAG		
Claim, Fahrzeugkat.	2, 3 und 4+ Achsen	MITTEL 0-5 Uhr	MITTEL 5-22 Uhr	MITTEL 22-5 Uhr	MITTEL 5-22 Uhr	MITTEL 22-5 Uhr	MITTEL 5-22 Uhr	MITTEL 22-5 Uhr	MITTEL 5-22 Uhr	MITTEL 22-5 Uhr	MITTEL 5-22 Uhr	MITTEL 22-5 Uhr	MITTEL 5-22 Uhr	MITTEL 22-5 Uhr	MITTEL 5-16 Uhr	MITTEL 22-5 Uhr	MITTEL 5-22 Uhr	MITTEL 22-0 Uhr			
Location Station ID	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal, Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	24	263	18	272	23	288	22	263	26	187	37	202	14	41	130					
															MITTEL 16-22 Uhr						
															41						

Autobahn-ID	Location Station ID	Kalendertag	Anzahl 2 Achsen	Anzahl 3 Achsen	Anzahl 4+ Achsen	Anzahl Ergebnis	Anzahl 2 Achsen	Anzahl 3 Achsen	Anzahl 4+ Achsen	Anzahl Ergebnis	Anzahl 2 Achsen	Anzahl 3 Achsen	Anzahl 4+ Achsen	Anzahl Ergebnis	Anzahl 2 Achsen	Anzahl 3 Achsen	Anzahl 4+ Achsen	Anzahl Ergebnis	Anzahl 2 Achsen	Anzahl 3 Achsen	Anzahl 4+ Achsen	Anzahl Ergebnis	Anzahl 2 Achsen	Anzahl 3 Achsen	Anzahl 4+ Achsen	Anzahl Ergebnis	Anzahl 2 Achsen	Anzahl 3 Achsen	Anzahl 4+ Achsen	Anzahl Ergebnis	Gesamtergebnis	
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	00	7	2	16	25	5	1	11	17	8	2	9	19	6	17	23	4	2	8	14	27	11	8	46	6	1	3	10	154	
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	01	9	1	12	22	4	1	8	13	7	2	11	18	12	14	26	13	2	6	21	26	14	8	48	4	1	9	14	162	
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	02	2	4	12	18	3	2	16	21	6	1	7	14	7	9	16	5	2	9	16	23	9	2	34	6	1	8	15	194	
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	03	5	5	7	17	1	1	11	13	6	1	15	21	5	1	15	21	10	3	17	30	13	11	10	34	5	6	4	151	
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	04	11	5	21	37	6	2	10	18	10	5	19	34	8	3	12	23	7	7	18	32	10	7	11	28	6	3	3	12	184
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	05	15	5	481	501	15	5	165	185	16	5	232	253	17	7	226	250	15	4	194	213	14	10	104	128	5	2	20	27	1.557
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	06	17	7	393	417	18	18	262	298	20	11	287	318	22	12	324	358	18	7	209	234	24	9	137	170	7	4	11	22	1.817
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	07	33	19	254	306	28	14	258	300	23	9	291	323	35	9	303	347	30	13	183	226	21	4	146	171	16	5	13	34	1.707
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	08	45	20	214	279	41	16	229	286	44	14	287	345	41	14	290	305	42	20	168	230	33	7	167	207	15	4	18	37	1.689
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	09	33	16	160	209	34	14	224	272	29	7	280	316	36	12	243	291	29	13	169	211	24	11	183	218	19	3	33	55	1.572
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	10	27	22	150	199	35	9	217	261	29	15	202	246	30	14	203	247	31	15	146	192	24	5	211	240	12	3	23	38	1.423
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	11	45	17	118	180	28	15	199	242	22	5	259	286	31	12	219	262	34	12	121	167	20	6	193	219	12	2	26	40	1.396
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	12	36	18	96	150	21	11	238	270	17	14	247	278	20	7	189	216	30	11	127	168	24	5	231	260	11	1	26	38	1.380
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	13	30	21	122	173	25	17	259	301	27	12	255	294	28	21	194	243	19	13	136	168	20	5	243	268	16	3	34	53	1.500
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	14	43	20	178	241	23	7	258	288	21	4	239	268	32	8	231	271	39	18	154	211	23	6	211	240	25	4	24	53	1.572
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	15	33	29	202	284	22	15	288	325	26	18	254	298	14	10	204	229	40	12	124	176	24	1	81	106	18	6	28	52	1.449
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	16	44	24	276	344	20	14	297	331	24	10	310	344	18	19	280	297	24	13	137	174	23	7	34	64	28	5	23	56	1.610
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	17	42	16	250	308	22	9	234	265	30	7	272	309	21	6	217	244	30	8	157	195	16	5	13	34	11	4	26	41	1.396
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	18	42	4	260	306	12	7	218	237	19	8	287	314	24	12	279	315	30	6	146	182	14	6	25	45	21	3	24	48	1.447
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	19	22	7	236	265	18	7	251	276	16	4	293	313	18	6	245	269	41	12	140	193	20	5	35	60	25	1	14	40	1.416
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	20	10	3	195	208	20	2	289	311	16	2	206	224	21	7	163	191	27	5	133	165	11	1	18	29	17	2	15	34	1.162
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	21	6	6	115	127	10	4	168	182	22	4	148	174	15	4	125	144	9	2	70	81	1	1	11	12	11	2	21	32	752
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	22	4	2	20	26	10	4	24	34	8	1	14	23	14	1	25	40	20	4	14	38	10	3	3	16	12	2	134	148	325
A13	253	Igls Patsch - Schönberg Stubaatal	23	7	1	12	20	6	1	13	20	5	7	14	19	12	2	14	29	18	6	10	34	6	5	8	19	8	4	39	111	251
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	00	2	2	9	11	3	1	16	20	2	2	18	22	4	2	20	26	5	2	20	27	4	2	15	21	6	2	5	13	140
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	01	4	8	12	3	2	2	22	27	4	1	19	23	2	1	19	22	9	1	12	21	10	1	12	22	5	1	2	8	135
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	02	4	3	3	10	1	10	11	1	1	15	15	6	1	13	19	7	1	8	16	4	1	13	18	4	4	2	10	99	
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	03	5	3	8	11	1	9	11	2	1	9	11	1	1	11	12	5	1	6	12	3	1	10	13	8	2	10	8	7	111
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	04	3	3	8	12	5	1	7	13	7	2	8	17	4	1	7	11	8	2	12	22	6	1	24	31	4	1	5	1	111
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	05	19	8	340	367	9	5	203	217	12	6	234	252	14	5	264	283	8	4	253	265	11	4	336	351	5	7	11	23	1.758
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	06	17	8	188	213	16	11	227	254	13	15	245	273	22	12	237	271	21	10	233	264	16	1	264	281	8	5	14	27	1.583
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	07	22	10	184	216	33	15	252	300	30	9	273	312	34	10	251	295	28	11	238	277	15	10	280	305	6	2	19	27	1.732
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	08	13	6	210	240	23	15	255	293	24	6	300	330	19	11	298	328	25	12	180	210	18	4	304	328	17	3	9	29	1.732
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	09	19	10	173	202	33	18	248	299	22	5	288	315	20	13	314	347	34	17	262	313	20	11	272	303	18	3	16	37	1.816
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	10	33	17	141	191	26	18	201	245	22	10	236	268	39	20	241	300	50	16	198	264	32	9	265	306	29	6	19	54	1.628
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	11	19	16	105	140	18	10	200	226	19	13	219	251	34	20	211	265	45	21	146	212	15	9	267	291	14	7	18	39	1.426
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	12	33	11	82	126	18	17	172	207	17	11	159	187	23	22	157	202	21	10	169	200	17	7	172	196	13	2	16	31	1.149
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	13	27	15	116	158	37	10	163	210	17	12	168	197	25	14	165	204	37	12	156	205	25	7	149	181	15	2	21	38	1.193
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	14	31	15	105	151	24	17	183	224	23	10	214	247	27	13	164	204	28	17	168	213	16	5	61	82	13	5	20	38	1.159
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	15	27	14	131	172	18	9	265	292	34	10	251	295	27	9	209	245	38	14	214	266	20	5	32	57	14	6	24	44	1.371
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	16	28	14	161	203	30	9	242	281	25	6	263	294	21	10	229	260	28	9	288	325	15	7	22	44	10	1	31	42	1.449
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	17	27	6	166	199	24	10	242	276	30	9	280	319	23	4	229	256	16	7	287	310	10	3	17	30	12	6	18	36	1.426
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	18	21	13	181	215	22	4	254	280	27	8	274	309	29	10	233	272	29	6	282	317	23	5	24	52	21	2	21	44	1.469
A13	646	Schönberg Stubaatal - Igls Patsch	19	13	12	197	222	23	4	242	269	13	3	223	239	21	13	248	282	22	8	268	298	10	3	41	54	8	2	13	23	1.387
A13	646																															

Belastungsszenarien Europabrücke - Feld V

Insgesamt gezählte Szenarien = 9969

Die Summe aller in 4 Tagen beobachteten Belastungsszenarien
NACH HÄUFIGKEIT geordnet

Nr.	Belastungsszenario	Summe total	Anteil an		
			GesamtΣ in %		
2	Einzelüberfahrt RFBB	2229	22,36	91,0	
3	2 LKWs RFBI	1700	17,05		
1	Einzelüberfahrt RFBI	1399	14,03		
4	2 LKWs RFBB	973	9,76		
9	Je 1 auf beiden Seiten	942	9,45		
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	663	6,65		
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	363	3,64		
5	3 LKWs RFBI	352	3,53		
10	Je 2 auf beiden Seiten	252	2,53		
6	3 LKWs RFBB	198	1,99	94,9	
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	139	1,4		
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB	59	0,6		
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI	55	0,6		
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	50	0,5		
32	1 LKW RFBI von Bus überholt	45	0,5		
27	1 LKW + 1 Bus RFBI	43	0,4	98,0	
18	2 LKWs RFBB sich überholend	41	0,4		
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI	40	0,4		
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt	40	0,4		
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB	37	0,4		
28	1 LKW + 1 Bus RFBB	37	0,4		
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	29	0,3		
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	23	0,2		
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	19	0,2		
33	1 LKW RFBB von Bus überholt	19	0,2		
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI	19	0,2		100,0
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt	13	0,1		
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB	13	0,1		
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	13	0,1		
19	2 LKWs RFBI sich überholend	11	0,1		
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	11	0,1		
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBB	11	0,1		
8	4 LKWs RFBB	9	0,1		
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	7	0,1		
30	2 LKW + 1 Bus RFBI	7	0,1		
31	2 LKW + 1 Bus RFBB	7	0,1		
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt	7	0,1		
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBB	7	0,1		
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt	6	0,1		
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1Bus) RFBB	6	0,1		
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	6	0,1		
63	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	6	0,1		
29	1 LKW + 2 Busse RFBI	5	0,1		
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt	4	0,0		
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	4	0,0		
11	Je 3 auf beiden Seiten	3	0,0		
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI	3	0,0		
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	3	0,0		
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	3	0,0		
57	3 LKWs RFBB von 4. LKW überholt	3	0,0		
7	4 LKWs RFBI	2	0,0		
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	2	0,0		
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1Bus) RFBI	2	0,0		
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	2	0,0		
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	2	0,0		
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt	2	0,0		
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt	2	0,0		
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt	2	0,0		
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBB	2	0,0		
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	1	0,0		
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt	1	0,0		
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB	1	0,0		
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	1	0,0		
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt	1	0,0		
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	1	0,0		
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt	1	0,0		
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBB	1	0,0		
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBB	1	0,0		
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKWs RFBI	1	0,0		
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	1	0,0		
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB	1	0,0		
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI	1	0,0		
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	1	0,0		
73	1 Bus RFBB von LKW überholt	1	0,0		
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI	1	0,0		
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	1	0,0		

Die 10 häufigsten nach TAGEN aufgesplittet
gezählte Stunden:

Nr.	10 6 12 12			
	MI	DO	FR	SA
2	714	371	611	533
3	499	291	633	277
1	362	228	502	307
4	397	181	206	189
9	355	181	279	127
12	247	119	188	109
13	160	86	70	47
5	84	45	167	56
10	106	54	50	42
6	62	40	39	57

Die 10 häufigsten Szenarien in STUNDENMITTELWERTEN
nach TAGEN aufgesplittet

Nr.	MI	DO	FR	SAvor16	SA ab16	SAtotal
2	71,4	61,8	50,9	58,9	24,2	44,4
3	49,9	48,5	52,8	36,6	4,2	23,1
1	36,2	38,0	41,8	30,1	19,2	25,6
4	39,7	30,2	17,2	26,1	1,2	15,8
9	35,5	30,2	23,3	17,7	0,6	10,6
12	24,7	19,8	15,7	15,6	0	9,1
13	16,0	14,3	5,8	6,7	0	3,9
5	8,4	7,5	13,9	8,0	0	4,7
10	10,6	9,0	4,2	6,0	0	3,5
6	6,2	6,7	3,3	8,1	0	4,8

Hochrechnung der Szenarien auf eine "Regel-Woche"

		MONTAG - ergänzt		NACHT - ergänzt	
		ASFİNAG: Summe LKW / h	460	ASFİNAG: Summe LKW / h	39
		errechneter Anteil (56,46%)		errechneter Anteil (64,5%)	
		an Szenarien / h (5-22 Uhr):	260	an Szenarien / h (22-5 Uhr):	25
Nr.	Szenarien	mittlerer Anteil Szenario in %		mittlerer Anteil Szenario in %	
		werktags	Verteilung Szenarien / h	Wochenende=Nacht	Verteilung Szenarien / h
1	Einzelüberfahrt RFBI	13,3	34,5	37,2	9,4
2	Einzelüberfahrt RFBB	21,9	57,0	46,9	11,8
3	2 LKWs RFBI	17,0	44,1	8,1	2,0
4	2 LKWs RFBB	10,1	26,2	2,3	0,6
5	3 LKWs RFBI	3,5	9,1	0,0	0,0
6	3 LKWs RFBB	2,2	5,8	0,0	0,0
7	4 LKWs RFBI	0,0	0,1	0,0	0,0
8	4 LKWs RFBB	0,1	0,3	0,0	0,0
9	Je 1 auf beiden Seiten	9,5	24,6	1,2	0,3
10	Je 2 auf beiden Seiten	2,6	6,8	0,0	0,0
11	Je 3 auf beiden Seiten	0,0	0,1	0,0	0,0
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	6,8	17,6	0,0	0,0
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	3,7	9,7	0,0	0,0
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	1,4	3,7	0,0	0,0
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	0,5	1,4	0,0	0,0
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB	0,4	1,0	0,0	0,0
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI	0,4	1,1	0,0	0,0
18	2 LKWs RFBB sich überholend	0,4	1,2	0,0	0,0
19	2 LKWs RFBI sich überholend	0,1	0,2	0,0	0,0
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB	0,6	1,5	1,2	0,3
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI	0,6	1,5	0,0	0,0
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	0,3	0,8	0,0	0,0
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	0,2	0,6	0,0	0,0
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	0,0	0,1	0,0	0,0
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	0,1	0,2	0,0	0,0
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	0,0	0,0	0,0	0,0
27	1 LKW + 1 Bus RFBI	0,4	1,1	1,6	0,4
28	1 LKW + 1 Bus RFBB	0,4	1,0	0,8	0,2
29	1 LKW + 2 Busse RFBI	0,0	0,1	0,0	0,0
30	2 LKW + 1 Bus RFBI	0,1	0,1	0,0	0,0
31	2 LKW + 1 Bus RFBB	0,1	0,2	0,0	0,0
32	1 LKW RFBI von Bus überholt	0,4	1,1	0,0	0,0
33	1 LKW RFBB von Bus überholt	0,2	0,5	0,4	0,1
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt	0,4	1,1	0,0	0,0
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt	0,1	0,4	0,0	0,0
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt	0,1	0,2	0,0	0,0
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB	0,1	0,3	0,0	0,0
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI	0,2	0,5	0,4	0,1
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB	0,0	0,0	0,0	0,0
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI	0,0	0,1	0,0	0,0
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI	0,0	0,1	0,0	0,0
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB	0,1	0,1	0,0	0,0
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0,1	0,4	0,0	0,0
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0,1	0,4	0,0	0,0
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0,0	0,1	0,0	0,0
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt	0,0	0,1	0,0	0,0
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt	0,1	0,2	0,0	0,0
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI	0,1	0,3	0,0	0,0
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	0,0	0,1	0,0	0,0
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,2	0,6	0,0	0,0
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	0,1	0,2	0,0	0,0
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
57	3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	0,0	0,1	0,0	0,0
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBI	0,0	0,0	0,0	0,0
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI	0,1	0,2	0,0	0,0
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI	0,0	0,0	0,0	0,0
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	0,0	0,0	0,0	0,0
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,1	0,1	0,0	0,0
63	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,1	0,2	0,0	0,0
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	0,0	0,1	0,0	0,0
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB	0,0	0,0	0,0	0,0
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	0,0	0,0	0,0	0,0
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI	0,0	0,0	0,0	0,0
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	0,0	0,0	0,0	0,0
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt	0,0	0,1	0,0	0,0
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
73	1 Bus RFBB von LKW überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI	0,0	0,0	0,0	0,0
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI	0,0	0,1	0,0	0,0
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0	0,0	0,0	0,0
Summen		Tagsüber 17 h	4415	Nacht 7 h	176

Hochrechnung der Szenarien auf eine "Regel-Woche"

		DIENSTAG - ergänzt		NACHT - ergänzt	
		ASFINAG: Summe LKW / h	521	ASFINAG: Summe LKW / h	44
		errechneter Anteil (56,46%)		errechneter Anteil (64,5%)	
		an Szenarien / h (5-22 Uhr):	294	an Szenarien / h (22-5 Uhr):	28
Nr.	Szenarien	Verteilung Szenarien / h		Verteilung Szenarien / h	
1	Einzelüberfahrt RFBI	39,1		10,6	
2	Einzelüberfahrt RFBB	64,5		13,3	
3	2 LKWs RFBI	50,0		2,3	
4	2 LKWs RFBB	29,6		0,7	
5	3 LKWs RFBI	10,3		0,0	
6	3 LKWs RFBB	6,5		0,0	
7	4 LKWs RFBI	0,1		0,0	
8	4 LKWs RFBB	0,3		0,0	
9	Je 1 auf beiden Seiten	27,8		0,3	
10	Je 2 auf beiden Seiten	7,7		0,0	
11	Je 3 auf beiden Seiten	0,1		0,0	
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	19,9		0,0	
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	11,0		0,0	
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	4,2		0,0	
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	1,6		0,0	
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB	1,2		0,0	
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI	1,3		0,0	
18	2 LKWs RFBB sich überholend	1,3		0,0	
19	2 LKWs RFBI sich überholend	0,3		0,0	
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB	1,7		0,3	
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI	1,7		0,0	
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	1,0		0,0	
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	0,7		0,0	
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	0,1		0,0	
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	0,2		0,0	
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	0,0		0,0	
27	1 LKW + 1 Bus RFBI	1,2		0,4	
28	1 LKW + 1 Bus RFBB	1,1		0,2	
29	1 LKW + 2 Busse RFBI	0,1		0,0	
30	2 LKW + 1 Bus RFBI	0,2		0,0	
31	2 LKW + 1 Bus RFBB	0,2		0,0	
32	1 LKW RFBI von Bus überholt	1,3		0,0	
33	1 LKW RFBB von Bus überholt	0,5		0,1	
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt	0,0		0,0	
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt	1,3		0,0	
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt	0,4		0,0	
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt	0,2		0,0	
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB	0,4		0,0	
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI	0,6		0,1	
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB	0,0		0,0	
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI	0,1		0,0	
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1Bus) RFBI	0,1		0,0	
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1Bus) RFBB	0,2		0,0	
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0,4		0,0	
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0,4		0,0	
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0,1		0,0	
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0,0		0,0	
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt	0,1		0,0	
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt	0,2		0,0	
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt	0,0		0,0	
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI	0,3		0,0	
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	0,1		0,0	
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	0,0		0,0	
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,7		0,0	
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	0,2		0,0	
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt	0,0		0,0	
57	3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	0,1		0,0	
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBI	0,0		0,0	
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI	0,2		0,0	
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI	0,0		0,0	
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	0,0		0,0	
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,2		0,0	
63	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,2		0,0	
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0		0,0	
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	0,1		0,0	
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB	0,0		0,0	
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	0,0		0,0	
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI	0,0		0,0	
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	0,0		0,0	
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt	0,0		0,0	
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt	0,1		0,0	
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt	0,0		0,0	
73	1 Bus RFBB von LKW überholt	0,0		0,0	
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI	0,0		0,0	
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI	0,1		0,0	
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0		0,0	
	Summen	Tagsüber 17 h	5001	Nacht 7 h	199

Hochrechnung der Szenarien auf eine "Regel-Woche"

		MITTWOCH		NACHT – ergänzt	
		ASFİNAG: Summe LKW / h	550	ASFİNAG: Summe LKW / h	44
		gezählte Szenarien / h	320	errechneter Anteil (64,5%) an Szenarien / h (22-5 Uhr):	28
Nr.	Szenarien	auch gemittelte Anteile verwendet!	Verteilung Szenarien / h	Verteilung Szenarien / h	
1	Einzelüberfahrt RFBI		42,5		10,6
2	Einzelüberfahrt RFBB		70,2		13,3
3	2 LKWs RFBI		54,4		2,3
4	2 LKWs RFBB		32,2		0,7
5	3 LKWs RFBI		11,2		0,0
6	3 LKWs RFBB		7,1		0,0
7	4 LKWs RFBI		0,1		0,0
8	4 LKWs RFBB		0,4		0,0
9	Je 1 auf beiden Seiten		30,3		0,3
10	Je 2 auf beiden Seiten		8,4		0,0
11	Je 3 auf beiden Seiten		0,1		0,0
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		21,7		0,0
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI		12,0		0,0
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		4,6		0,0
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI		1,7		0,0
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB		1,3		0,0
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI		1,4		0,0
18	2 LKWs RFBB sich überholend		1,4		0,0
19	2 LKWs RFBI sich überholend		0,3		0,0
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB		1,8		0,3
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI		1,9		0,0
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB		1,0		0,0
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI		0,7		0,0
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI		0,1		0,0
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB		0,2		0,0
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		0,0		0,0
27	1 LKW + 1 Bus RFBI		1,3		0,4
28	1 LKW + 1 Bus RFBB		1,2		0,2
29	1 LKW + 2 Busse RFBI		0,1		0,0
30	2 LKW + 1 Bus RFBI		0,2		0,0
31	2 LKW + 1 Bus RFBB		0,3		0,0
32	1 LKW RFBI von Bus überholt		1,4		0,0
33	1 LKW RFBB von Bus überholt		0,6		0,1
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt		0,0		0,0
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt		1,4		0,0
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt		0,5		0,0
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt		0,2		0,0
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB		0,4		0,0
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI		0,6		0,1
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB		0,0		0,0
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI		0,1		0,0
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI		0,1		0,0
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB		0,2		0,0
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt		0,5		0,0
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt		0,4		0,0
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt		0,1		0,0
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt		0,0		0,0
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt		0,1		0,0
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt		0,3		0,0
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt		0,0		0,0
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI		0,4		0,0
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBB		0,1		0,0
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt		0,0		0,0
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,7		0,0
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt		0,3		0,0
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt		0,0		0,0
57	3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt		0,1		0,0
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBI		0,0		0,0
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI		0,2		0,0
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBB		0,0		0,0
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI		0,0		0,0
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,2		0,0
63	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,2		0,0
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,0		0,0
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt		0,1		0,0
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB		0,0		0,0
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB		0,1		0,0
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI		0,0		0,0
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB		0,0		0,0
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt		0,1		0,0
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt		0,1		0,0
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt		0,1		0,0
73	1 Bus RFBB von LKW überholt		0,0		0,0
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI		0,0		0,0
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI		0,1		0,0
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,0		0,0
	Summen	Tagsüber 17 h	5440	Nacht 7 h	199

Hochrechnung der Szenarien auf eine "Regel-Woche"

		DONNERSTAG		NACHT – ergänzt	
		ASFINAG: Summe LKW / h	520	ASFINAG: Summe LKW / h	48
		gezählte Szenarien / h	293	errechneter Anteil (64,5%) an Szenarien / h (22-5 Uhr):	31
Nr.	Szenarien	auch gemittelte Anteile verwendet!	Verteilung Szenarien / h	Verteilung Szenarien / h	
1	Einzelüberfahrt RFBI		38,9		11,5
2	Einzelüberfahrt RFBB		64,2		14,5
3	2 LKWs RFBI		49,7		2,5
4	2 LKWs RFBB		29,5		0,7
5	3 LKWs RFBI		10,2		0,0
6	3 LKWs RFBB		6,5		0,0
7	4 LKWs RFBI		0,1		0,0
8	4 LKWs RFBB		0,3		0,0
9	Je 1 auf beiden Seiten		27,7		0,4
10	Je 2 auf beiden Seiten		7,7		0,0
11	Je 3 auf beiden Seiten		0,1		0,0
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		19,8		0,0
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI		11,0		0,0
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		4,2		0,0
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI		1,6		0,0
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB		1,2		0,0
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI		1,3		0,0
18	2 LKWs RFBB sich überholend		1,3		0,0
19	2 LKWs RFBI sich überholend		0,3		0,0
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB		1,7		0,4
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI		1,7		0,0
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB		1,0		0,0
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI		0,7		0,0
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI		0,1		0,0
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB		0,2		0,0
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		0,0		0,0
27	1 LKW + 1 Bus RFBI		1,2		0,5
28	1 LKW + 1 Bus RFBB		1,1		0,2
29	1 LKW + 2 Busse RFBI		0,1		0,0
30	2 LKW + 1 Bus RFBI		0,2		0,0
31	2 LKW + 1 Bus RFBB		0,2		0,0
32	1 LKW RFBI von Bus überholt		1,3		0,0
33	1 LKW RFBB von Bus überholt		0,5		0,1
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt		0,0		0,0
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt		1,3		0,0
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt		0,4		0,0
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt		0,2		0,0
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB		0,4		0,0
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI		0,6		0,1
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB		0,0		0,0
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI		0,1		0,0
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1Bus) RFBI		0,1		0,0
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1Bus) RFBB		0,2		0,0
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt		0,4		0,0
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt		0,4		0,0
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt		0,1		0,0
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt		0,0		0,0
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt		0,1		0,0
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt		0,2		0,0
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt		0,0		0,0
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI		0,3		0,0
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI		0,1		0,0
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt		0,0		0,0
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,7		0,0
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt		0,2		0,0
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt		0,0		0,0
57	3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt		0,1		0,0
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBI		0,0		0,0
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI		0,2		0,0
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI		0,0		0,0
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI		0,0		0,0
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,2		0,0
63	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,2		0,0
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,0		0,0
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt		0,1		0,0
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB		0,0		0,0
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB		0,0		0,0
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI		0,0		0,0
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB		0,0		0,0
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt		0,0		0,0
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt		0,1		0,0
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt		0,0		0,0
73	1 Bus RFBB von LKW überholt		0,0		0,0
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI		0,0		0,0
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI		0,1		0,0
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,0		0,0
	Summen	Tagsüber 17 h	4975	Nacht 7 h	217

Hochrechnung der Szenarien auf eine "Regel-Woche"

		FREITAG		NACHT – ergänzt	
		ASFINAG: Summe LKW / h	446	ASFINAG: Summe LKW / h	62
		gezählte Szenarien / h	256	errechneter Anteil (64,5%) an Szenarien / h (22-5 Uhr):	40
Nr.	Szenarien	<i>auch gemittelte Anteile verwendet!</i>	Verteilung Szenarien / h		Verteilung Szenarien / h
1	Einzelüberfahrt RFBI		34,0		14,9
2	Einzelüberfahrt RFBB		56,2		18,8
3	2 LKWs RFBI		43,5		3,3
4	2 LKWs RFBB		25,8		0,9
5	3 LKWs RFBI		8,9		0,0
6	3 LKWs RFBB		5,7		0,0
7	4 LKWs RFBI		0,1		0,0
8	4 LKWs RFBB		0,3		0,0
9	Je 1 auf beiden Seiten		24,2		0,5
10	Je 2 auf beiden Seiten		6,7		0,0
11	Je 3 auf beiden Seiten		0,1		0,0
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		17,3		0,0
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI		9,6		0,0
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		3,7		0,0
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI		1,4		0,0
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB		1,0		0,0
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI		1,1		0,0
18	2 LKWs RFBB sich überholend		1,2		0,0
19	2 LKWs RFBI sich überholend		0,2		0,0
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB		1,5		0,5
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI		1,5		0,0
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB		0,8		0,0
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI		0,6		0,0
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI		0,1		0,0
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB		0,2		0,0
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		0,0		0,0
27	1 LKW + 1 Bus RFBI		1,1		0,6
28	1 LKW + 1 Bus RFBB		1,0		0,3
29	1 LKW + 2 Busse RFBI		0,1		0,0
30	2 LKW + 1 Bus RFBI		0,1		0,0
31	2 LKW + 1 Bus RFBB		0,2		0,0
32	1 LKW RFBI von Bus überholt		1,1		0,0
33	1 LKW RFBB von Bus überholt		0,5		0,2
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt		0,0		0,0
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt		1,1		0,0
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt		0,4		0,0
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt		0,2		0,0
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB		0,3		0,0
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI		0,5		0,2
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB		0,0		0,0
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI		0,1		0,0
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1Bus) RFBI		0,1		0,0
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1Bus) RFBB		0,1		0,0
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt		0,4		0,0
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt		0,3		0,0
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt		0,1		0,0
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt		0,0		0,0
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt		0,1		0,0
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt		0,2		0,0
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt		0,0		0,0
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI		0,3		0,0
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI		0,1		0,0
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt		0,0		0,0
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,6		0,0
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt		0,2		0,0
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt		0,0		0,0
57	3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt		0,1		0,0
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBI		0,0		0,0
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI		0,2		0,0
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI		0,0		0,0
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI		0,0		0,0
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,1		0,0
63	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,2		0,0
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,0		0,0
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt		0,1		0,0
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB		0,0		0,0
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB		0,0		0,0
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI		0,0		0,0
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB		0,0		0,0
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt		0,0		0,0
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt		0,1		0,0
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt		0,0		0,0
73	1 Bus RFBB von LKW überholt		0,0		0,0
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI		0,0		0,0
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI		0,1		0,0
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,0		0,0
	Summen	Tagsüber 17 h	4351	Nacht 7 h	280

Hochrechnung der Szenarien auf eine "Regel-Woche"

		SAMSTAG bis 16 Uhr		SAMSTAG ab 16 Uhr	
		ASFINAG: Summe LKW / h		ASFINAG: Summe LKW / h	
		446		80	
		gezählte Szenarien / h		gezählte Szenarien / h	
		241		52	
Nr.	Szenarien	auch gemittelte Anteile verwendet!	Verteilung Szenarien / h	mittlerer Anteil Szenario in % Wochenende	Verteilung Szenarien / h
1	Einzelüberfahrt RFBI		32,0	37,2	19,2
2	Einzelüberfahrt RFBB		52,9	46,9	24,2
3	2 LKWs RFBI		41,0	8,1	4,2
4	2 LKWs RFBB		24,3	2,3	1,2
5	3 LKWs RFBI		8,4	0,0	0,0
6	3 LKWs RFBB		5,3	0,0	0,0
7	4 LKWs RFBI		0,1	0,0	0,0
8	4 LKWs RFBB		0,3	0,0	0,0
9	Je 1 auf beiden Seiten		22,8	1,2	0,6
10	Je 2 auf beiden Seiten		6,3	0,0	0,0
11	Je 3 auf beiden Seiten		0,1	0,0	0,0
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		16,3	0,0	0,0
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI		9,0	0,0	0,0
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		3,5	0,0	0,0
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI		1,3	0,0	0,0
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB		1,0	0,0	0,0
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI		1,0	0,0	0,0
18	2 LKWs RFBB sich überholend		1,1	0,0	0,0
19	2 LKWs RFBI sich überholend		0,2	0,0	0,0
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB		1,4	1,2	0,6
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI		1,4	0,0	0,0
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB		0,8	0,0	0,0
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI		0,6	0,0	0,0
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI		0,1	0,0	0,0
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB		0,2	0,0	0,0
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB		0,0	0,0	0,0
27	1 LKW + 1 Bus RFBI		1,0	1,6	0,8
28	1 LKW + 1 Bus RFBB		0,9	0,8	0,4
29	1 LKW + 2 Busse RFBI		0,1	0,0	0,0
30	2 LKW + 1 Bus RFBI		0,1	0,0	0,0
31	2 LKW + 1 Bus RFBB		0,2	0,0	0,0
32	1 LKW RFBI von Bus überholt		1,0	0,0	0,0
33	1 LKW RFBB von Bus überholt		0,4	0,4	0,2
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt		0,0	0,0	0,0
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt		1,0	0,0	0,0
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt		0,3	0,0	0,0
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt		0,2	0,0	0,0
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB		0,3	0,0	0,0
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI		0,5	0,4	0,2
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB		0,0	0,0	0,0
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI		0,1	0,0	0,0
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1Bus) RFBI		0,1	0,0	0,0
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1Bus) RFBB		0,1	0,0	0,0
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt		0,3	0,0	0,0
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt		0,3	0,0	0,0
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt		0,1	0,0	0,0
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt		0,0	0,0	0,0
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt		0,1	0,0	0,0
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt		0,2	0,0	0,0
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt		0,0	0,0	0,0
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI		0,3	0,0	0,0
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBB		0,1	0,0	0,0
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt		0,0	0,0	0,0
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,6	0,0	0,0
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt		0,2	0,0	0,0
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt		0,0	0,0	0,0
57	3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt		0,1	0,0	0,0
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBI		0,0	0,0	0,0
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI		0,2	0,0	0,0
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBB		0,0	0,0	0,0
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI		0,0	0,0	0,0
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,1	0,0	0,0
63	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,1	0,0	0,0
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,0	0,0	0,0
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt		0,1	0,0	0,0
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB		0,0	0,0	0,0
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB		0,0	0,0	0,0
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI		0,0	0,0	0,0
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB		0,0	0,0	0,0
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt		0,0	0,0	0,0
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt		0,1	0,0	0,0
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt		0,0	0,0	0,0
73	1 Bus RFBB von LKW überholt		0,0	0,0	0,0
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI		0,0	0,0	0,0
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI		0,1	0,0	0,0
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt		0,0	0,0	0,0
	Summen	Tagsüber 11 h	2653	Tagsüber 6 h	310

Hochrechnung der Szenarien auf eine "Regel-Woche"

		SA-NACHT - ergänzt		SONNTAG - ergänzt	
		ASFINAG: Summe LKW / h	24	ASFINAG: Summe LKW / h	76
		errechneter Anteil (29,5%)		errechneter Anteil (64,5%)	
		an Szenarien / h (22-5 Uhr):	7	an Szenarien / h (5-22 Uhr):	49
Nr.	Szenarien	mittlerer Anteil Szenario in % Verteilung Szenarien / h		mittlerer Anteil Szenario in % Verteilung Szenarien / h	
		Wochenende-Nacht		Wochenende	
1	Einzelüberfahrt RFBI	37,2	2,6		18,2
2	Einzelüberfahrt RFBB	46,9	3,3		23,0
3	2 LKWs RFBI	8,1	0,6		4,0
4	2 LKWs RFBB	2,3	0,2		1,1
5	3 LKWs RFBI	0,0	0,0		0,0
6	3 LKWs RFBB	0,0	0,0		0,0
7	4 LKWs RFBI	0,0	0,0		0,0
8	4 LKWs RFBB	0,0	0,0		0,0
9	Je 1 auf beiden Seiten	1,2	0,1		0,6
10	Je 2 auf beiden Seiten	0,0	0,0		0,0
11	Je 3 auf beiden Seiten	0,0	0,0		0,0
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	0,0	0,0		0,0
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	0,0	0,0		0,0
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	0,0	0,0		0,0
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	0,0	0,0		0,0
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB	0,0	0,0		0,0
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI	0,0	0,0		0,0
18	2 LKWs RFBB sich überholend	0,0	0,0		0,0
19	2 LKWs RFBI sich überholend	0,0	0,0		0,0
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB	1,2	0,1		0,6
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI	0,0	0,0		0,0
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	0,0	0,0		0,0
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	0,0	0,0		0,0
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	0,0	0,0		0,0
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	0,0	0,0		0,0
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	0,0	0,0		0,0
27	1 LKW + 1 Bus RFBI	1,6	0,1		0,8
28	1 LKW + 1 Bus RFBB	0,8	0,1		0,4
29	1 LKW + 2 Busse RFBI	0,0	0,0		0,0
30	2 LKW + 1 Bus RFBI	0,0	0,0		0,0
31	2 LKW + 1 Bus RFBB	0,0	0,0		0,0
32	1 LKW RFBI von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
33	1 LKW RFBB von Bus überholt	0,4	0,0		0,2
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt	0,0	0,0		0,0
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB	0,0	0,0		0,0
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI	0,4	0,0		0,2
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB	0,0	0,0		0,0
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI	0,0	0,0		0,0
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1Bus) RFBI	0,0	0,0		0,0
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1Bus) RFBB	0,0	0,0		0,0
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt	0,0	0,0		0,0
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI	0,0	0,0		0,0
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	0,0	0,0		0,0
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt	0,0	0,0		0,0
57	3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBI	0,0	0,0		0,0
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI	0,0	0,0		0,0
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI	0,0	0,0		0,0
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	0,0	0,0		0,0
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
63	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB	0,0	0,0		0,0
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	0,0	0,0		0,0
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI	0,0	0,0		0,0
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	0,0	0,0		0,0
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt	0,0	0,0		0,0
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt	0,0	0,0		0,0
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt	0,0	0,0		0,0
73	1 Bus RFBB von LKW überholt	0,0	0,0		0,0
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI	0,0	0,0		0,0
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBI	0,0	0,0		0,0
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	0,0	0,0		0,0
	Summen	Nacht 7 h	49	Tagsüber 17 h	833

Hochrechnung der Szenarien auf eine "Regel-Woche"

Nr.	Szenarien	Szenarien		Szenarien		SUMME TOTAL 1 WOCHEN	hochge- rechnet auf 1 JAHR (x52)	% Anteil	
		Tagesverkehr (17h) Werktags	Nachtverkehr (7h) Werktags	Tagesverkehr (17h) Wochenende	Nachtverkehr (7h) Wochenende			Szenario an Summe	Total
1	Einzelüberfahrt RFBI	3566	398	425	18	4408	229213	15,15	
2	Einzelüberfahrt RFBB	5888	502	536	23	6949	361363	23,88	
3	2 LKWs RFBI	4559	87	93	4	4744	246662	16,30	
4	2 LKWs RFBB	2702	25	27	1	2755	143246	9,47	
5	3 LKWs RFBI	936	0	0	0	936	48652	3,22	
6	3 LKWs RFBB	595	0	0	0	595	30924	2,04	
7	4 LKWs RFBI	6	0	0	0	6	312	0,02	
8	4 LKWs RFBB	30	0	0	0	30	1557	0,10	
9	Je 1 auf beiden Seiten	2539	12	13	1	2565	133393	8,82	
10	Je 2 auf beiden Seiten	705	0	0	0	705	36657	2,42	
11	Je 3 auf beiden Seiten	10	0	0	0	10	527	0,03	
12	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	1817	0	0	0	1817	94482	6,24	
13	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	1004	0	0	0	1004	52214	3,45	
14	3 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	385	0	0	0	385	20028	1,32	
15	3 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI	145	0	0	0	145	7531	0,50	
16	3 LKWs RFBI + 2 LKWs RFBB	106	0	0	0	106	5503	0,36	
17	3 LKWs RFBB + 2 LKWs RFBI	116	0	0	0	116	6020	0,40	
18	2 LKWs RFBB sich überholend	121	0	0	0	121	6275	0,41	
19	2 LKWs RFBI sich überholend	25	0	0	0	25	1317	0,09	
20	1 LKW RFBI + 1 Bus RFBB	153	12	13	1	180	9343	0,62	
21	1 LKW RFBB + 1 Bus RFBI	158	0	0	0	158	8228	0,54	
22	2 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	88	0	0	0	88	4555	0,30	
23	2 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	62	0	0	0	62	3234	0,21	
24	3 LKWs RFBB + 1 Bus RFBI	8	0	0	0	8	405	0,03	
25	3 LKWs RFBI + 1 Bus RFBB	17	0	0	0	17	888	0,06	
26	4 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	2	0	0	0	2	114	0,01	
27	1 LKW + 1 Bus RFBI	113	17	18	1	148	7690	0,51	
28	1 LKW + 1 Bus RFBB	103	8	9	0	121	6285	0,42	
29	1 LKW + 2 Busse RFBI	13	0	0	0	13	652	0,04	
30	2 LKW + 1 Bus RFBI	15	0	0	0	15	786	0,05	
31	2 LKW + 1 Bus RFBB	22	0	0	0	22	1151	0,08	
32	1 LKW RFBI von Bus überholt	117	0	0	0	117	6064	0,40	
33	1 LKW RFBB von Bus überholt	48	4	4	0	56	2928	0,19	
34	1 LKW RFBB von 2 Bussen überholt	2	0	0	0	2	114	0,01	
35	2 LKWs RFBI von Bus überholt	116	0	0	0	116	6045	0,40	
36	2 LKWs RFBB von Bus überholt	39	0	0	0	39	2005	0,13	
37	3 LKWs RFBI von Bus überholt	20	0	0	0	20	1046	0,07	
38	1 LKW RFBI + (1 LKW+1 Bus) RFBB	33	0	0	0	33	1726	0,11	
39	1 LKW RFBB + (1 LKW+1 Bus) RFBI	51	4	4	0	60	3099	0,20	
40	1 LKW RFBI + (2 LKW+1 Bus) RFBB	2	0	0	0	2	109	0,01	
41	1 LKW RFBB + (2 LKW+1 Bus) RFBI	10	0	0	0	10	506	0,03	
42	2 LKWs RFBB + (1 LKW+1Bus) RFBI	8	0	0	0	8	397	0,03	
43	2 LKWs RFBI + (1 LKW+1Bus) RFBB	15	0	0	0	15	761	0,05	
44	1 LKW RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	39	0	0	0	39	2010	0,13	
45	1 LKW RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	36	0	0	0	36	1889	0,12	
46	2 LKWs RFBB + 1 LKW RFBI von Bus überholt	8	0	0	0	8	421	0,03	
47	2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB von Bus überholt	4	0	0	0	4	207	0,01	
48	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von Bus überholt	8	0	0	0	8	437	0,03	
49	1 LKW RFBB + 2 LKWs RFBI von Bus überholt	22	0	0	0	22	1155	0,08	
50	1 LKW RFBI + 3 LKWs RFBB von Bus überholt	2	0	0	0	2	109	0,01	
51	1 LKW RFBI + 2 sich überholende LKW RFBB	31	0	0	0	31	1605	0,11	
52	1 LKW RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	10	0	0	0	10	506	0,03	
53	1 LKW RFBI+3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	2	0	0	0	2	114	0,01	
54	2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	63	0	0	0	63	3251	0,21	
55	2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	21	0	0	0	21	1115	0,07	
56	2 LKWs RFBB von 2 weiteren LKWs überholt	4	0	0	0	4	199	0,01	
57	3 LKWs RFBB von 4.LKW überholt	8	0	0	0	8	417	0,03	
58	1 LKW RFBI + 2 sich überholende Busse RFBI	2	0	0	0	2	114	0,01	
59	2 LKW RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBI	20	0	0	0	20	1061	0,07	
60	3 LKWs RFBI + 2 sich überholende LKWs RFBB	2	0	0	0	2	114	0,01	
61	3 LKWs RFBB + 2 sich überholende LKW RFBI	2	0	0	0	2	109	0,01	
62	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	15	0	0	0	15	795	0,05	
63	1 LKW RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	16	0	0	0	16	843	0,06	
64	2 LKWs RFBI+2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	2	0	0	0	2	114	0,01	
65	2 LKWs RFBB+2 LKWs RFBI von 3.LKW überholt	8	0	0	0	8	397	0,03	
66	1 LKW RFBI + 3 Busse RFBB	2	0	0	0	2	109	0,01	
67	1 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	4	0	0	0	4	218	0,01	
68	1 LKW RFBB + 2 Busse RFBI	2	0	0	0	2	114	0,01	
69	2 LKW RFBI + 2 Busse RFBB	2	0	0	0	2	114	0,01	
70	1 LKW RFBB von 2. LKW und 1 Bus überholt	4	0	0	0	4	223	0,01	
71	1 LKW RFBI von 2. LKW und 1 Bus überholt	6	0	0	0	6	312	0,02	
72	1 LKW + 1 Bus RFBI von 2.Bus überholt	4	0	0	0	4	227	0,02	
73	1 Bus RFBB von LKW überholt	2	0	0	0	2	109	0,01	
74	1 Bus RFBB + (1 LKW + 1 Bus) RFBI	2	0	0	0	2	114	0,01	
75	1 Bus RFBI + 2 sich überholende LKW RFBB	6	0	0	0	6	308	0,02	
76	1 Bus RFBI + 2 LKWs RFBB von 3.LKW überholt	4	0	0	0	4	199	0,01	
	Summen					29097	1513032	100	

19 ANHANG 11: TABELLIERTE KOMBINATORIK DER SCHÄDIGUNGSÄQUVALENTE ALS NEU FORMULIERTER ANSATZ ZUR BAUWERKSALTERUNG

- **BERECHNUNG DER SCHÄDIGUNGSÄQUVALENTE DER EUROCODE-MODELLE UND KOMBINATORIK FÜR DIE VARIANTEN DES DYGES-MODELLS MIT 1 LKW**
- **KOMBINATORIK-TABELLEN FÜR ALLE VARIANTEN MIT 2 LKWS**
- **KOMBINATORIK-TABELLEN FÜR ALLE VARIANTEN MIT 3 LKWS**
- **KOMBINATORIK-TABELLEN FÜR ALLE VARIANTEN MIT 4 LKWS**

Vergleich Lastmodelle - EC1

Theoretisch: Lastmodell	Schädigungsbeitrag Aufretensintensität $\Delta\sigma$			$\Delta\sigma$ [m "m=3"	Excentrität [m]		Schädigungsbeitrag Aufretenshäufigkeit ni		Schädigungsäquivalente			
	Fahrzeuge [t]	Aufretens- gewichtung [%]			Fahrstreifen1	Fahrstreifen2	Nobs/ Jahr Fahrstreifen1	Fahrstreifen2	Fahrstr.1 = T1	Fahrstr.2 = T2	Beitrag Biegung [Mill.t]	Beitrag Torsion [Mill.t.m]
LM 3	48 14,4	100 100										
SUMME	62,4	100	62,4*3	9,05	5,55	2*10 ⁶	2*10 ⁵	(62,4)*3*(2*10 ⁶)	(62,4)*3*(2*10 ⁵)	T1+T2	T1*9,05 + T2*5,55	
LM 4	20 31 49 39 45	20 5 50 15 10										
SUMME	40,4	100	40,4*3	9,05	5,55	2*10 ⁶	2*10 ⁵	(40,4)*3*(2*10 ⁶)	(40,4)*3*(2*10 ⁵)	T1+T2	T1*9,05 + T2*5,55	

In Zahlen:

EC 1 - Lastmodell	Schädigungsbeitrag Aufretensintensität $\Delta\sigma$			$\Delta\sigma$ [m "m=3"	Excentrität [m]		Schädigungsbeitrag Aufretenshäufigkeit ni		Schädigungsäquivalent			
	Fahrzeuge [t]	Aufretens- gewichtung [%]			Fahrstr1	Fahrstr2	Nobs/ Jahr Fahrstr1	Fahrstr2	Fahrstr1 = T1	Fahrstr2 = T2	Beitrag Biegung [Mill.t]	Beitrag Torsion [Mill.t.m]
LM 3	48 14,4	100 100										
SUMME	62,4	100	242970,6	9,05	5,55	2000000	200000	485,941248	48,6	534,5	4667,5	
LM 4	20 31 49 39 45	20 5 50 15 10										
SUMME	40,4	100	65939,3	9,05	5,55	2000000	200000	131,9	13,2	145,1	1266,7	
ELM 3 vs. ELM 4	0,65		0,27			1,00	1,00			0,27	0,27	

ELM4 setzt nur ca. zwei Drittel der Lasten von ELM3 an.

Die Schädigungsäquivalente von ELM4 betragen knapp 30% der von ELM 3

Berechnung der DyGeS-Modell - Szenarien

DYGES-Modell Szenario	Schädigungsbeitrag Aufretensintensität $\Delta\sigma$			$\Delta\sigma$ [m "m=3"	Excentrität [m]		Schädigungsbeitrag Aufretenshäufigkeit ni			Schädigungsäquivalent	
	Fahrzeuge OG - [t]	Aufretens- gewichtung [%]			Fahrstreifen 1		LKWs/Jahr ASFINAG 07	Häufigkeit Szenario [%]	LKWs/ Szenario	Beitrag Biegung [Mill.t]	Beitrag Torsion [Mill.t.m]
1 LKW RFBB	50 42,8 35 30 25 20 15 10	38,3 9,9 5,9 5,6 5,9 6,5 7,3 20,4									
SUMME	33,0	100	36043,7	9,05		1.192.829	23,9	284888	10,3	92,9	
1 LKW RFBI	50 42,8 35 30 25 20 15 10	38,3 9,9 5,9 5,6 5,9 6,5 7,3 20,4									
SUMME	33,0	100	36043,7	9,05		1.218.374	15,1	184574	6,7	60,2	

Maximalwert

VCE-Modell Szenario	Schädigungsbeitrag Auftretensintensität $\Delta\sigma$				$\Delta\sigma^*m$ "m=3"	Excentrität [m] Fahrstreifen1	Schädigungsbeitrag Auftretenshäufigkeit ni			Schädigungäquivalent	
	1. LKW OG [t]	Auftretens- gewichtung [%]	2.LKW OG [t]	Auftretens- gewichtung [%]			LKWs/Jahr ASFINAG 07	Häufigkeit Szenario [%]	LKWs pro Szenario	Biegung [Mill.t]	Torsion [Mill.t.m]
2 LKWs RFBI	50	38,3	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	219133,8	9,05	1.218.374	16,3	198626	43,5	393,9
	42,8	9,9	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	43250,7	9,05	1.218.374	16,3	198626	8,6	77,7
	35	5,9	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	18517,8	9,05	1.218.374	16,3	198626	3,7	33,3
	30	5,6	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	13960,5	9,05	1.218.374	16,3	198626	2,8	25,1
	25	5,9	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	11581,5	9,05	1.218.374	16,3	198626	2,3	20,8
	20	6,5	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	9677,2	9,05	1.218.374	16,3	198626	1,9	17,4
	15	7,3	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	8101,9	9,05	1.218.374	16,3	198626	1,6	14,6
	10	20,4	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	16270,5	9,05	1.218.374	16,3	198626	3,2	29,2
SUMME				33,0						67,6	612,1

VCE-Modell Szenario	Schädigungsbeitrag Auftretensintensität $\Delta\sigma$				$\Delta\sigma^*m$ "m=3"	Excentrität [m] Fahrstreifen1	Schädigungsbeitrag Auftretenshäufigkeit ni			Schädigungäquivalent	
	1. LKW OG [t]	Auftretens- gewichtung [%]	2.LKW OG [t]	Auftretens- gewichtung [%]			LKWs/Jahr ASFINAG 07	Häufigkeit Szenario [%]	LKWs pro Szenario	Biegung [Mill.t]	Torsion [Mill.tm]
2 LKWs RFBB	50	38,3	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	219133,8	9,05	1.192.829	9,5	112931	24,7	224,0
	42,8	9,9	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	43250,7	9,05	1.192.829	9,5	112931	4,9	44,2
	35	5,9	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	18517,8	9,05	1.192.829	9,5	112931	2,1	18,9
	30	5,6	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	13960,5	9,05	1.192.829	9,5	112931	1,6	14,3
	25	5,9	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	11581,5	9,05	1.192.829	9,5	112931	1,3	11,8
	20	6,5	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	9677,2	9,05	1.192.829	9,5	112931	1,1	9,9
	15	7,3	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	8101,9	9,05	1.192.829	9,5	112931	0,9	8,3
	10	20,4	50	38,3							
			42,8	9,9							
			35	5,9							
			30	5,6							
			25	5,9							
			20	6,5							
			15	7,3							
			10	20,4							
Zw-SUMME				33,0	16270,5	9,05	1.192.829	9,5	112931	1,8	16,6
SUMME				33,0						38,5	348,0

VCE-Modell Szenario	Schätzungsbeitrag Auftragsintensität für				LKW's-Jahr ASFRAG 07 RFBI	LKW's-Jahr ASFRAG 07 RFBB	Häufigkeit Szenario [%]	LKW's-Szenario		Schätzungsäquivalente									
	LKW RFBI	Auftrags- OG [t]	1.LKW RFBI	Auftrags- OG [t]				RFBI	RFBB	RFBI	RFBB	Biegung [Mill.]	Torsion [Mill.]						
2 LKWs RFBI + 1 LKW RFBB	50	38,3	50	38,3															
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	47649,0	219133,8	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	16,7	3,6	20,2	118,6
	50	9,9	42,8	9,9	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	12297,5	43250,7	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	3,3	0,9	4,2	21,4
	50	5,9	35	5,9	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	7351,0	18517,8	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	1,4	0,5	2,0	7,8
	50	5,6	30	5,6	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	6968,1	13960,5	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	1,1	0,5	1,6	4,9
	50	5,9	25	5,9	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	7407,3	11581,5	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	0,9	0,6	1,4	3,0
	50	6,5	20	6,5	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	8110,1	9677,2	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	0,7	0,6	1,3	1,2
	50	7,3	15	7,3	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	9138,8	8101,9	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	0,6	0,7	1,3	0,6
	50	20,4	10	20,4	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	1110,1	9677,2	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	0,7	0,6	1,3	1,2
	50	20,4	10	20,4	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	50,0						33,0	9138,8	8101,9	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	0,6	0,7	1,3	0,6
SUMME	50,0						33,0	25522,1	16270,5	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	1,2	1,9	3,1	6,0
	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5													
					15	7,3													
					10	20,4													
Zw-SUMME	42,8						33,0	30011,9	219133,8	9,1	1218374	1192829	6,2	76082	74487	16,7	2,2	16,9	130,7
	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3													
					42,8	9,9													
					35	5,9													
					30	5,6													
					25	5,9													
					20	6,5				</									

VCE-Modell Szenario	Schätzungsbetrag Auftragsintensität für				LKW RFB	LKW RFB	LKW RFB	LKW RFB	LKW's-Jahr ASFRAG 07		Häufigkeit Szenario [%]	LKW's-Szenario		Schädigungskategorie																			
	LKW RFB OG [t]	Auftrags- gewichtung [%]	LKW RFB OG [t]	Auftrags- gewichtung [%]					RFB	RFB		RFB	RFB	RFB	RFB	Beigung [MILL]	Torsion [MILL]																
2 LKW's RFB + 1 LKW RFB	50	38,3	50	38,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	4769,0	21913,8	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	2,0	9,0	11,0	63,4
Zw-SUMME	50,0	9,9	42,8	9,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	12297,5	43250,7	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,5	1,8	2,3	11,4
Zw-SUMME	50,0	5,9	35	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	7351,0	18517,8	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,3	0,8	1,1	4,1
Zw-SUMME	50,0	5,6	30	5,6	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	6968,1	13960,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,3	0,6	0,9	2,5
Zw-SUMME	50,0	5,9	25	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	7407,3	11581,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,3	0,5	0,8	1,5
Zw-SUMME	50,0	6,5	20	6,5	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	8110,1	9677,2	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,3	0,4	0,7	0,5
Zw-SUMME	50,0	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	9138,8	8101,9	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,4	0,3	0,7	0,5
Zw-SUMME	50,0	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	25522,1	16270,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	1,1	0,7	1,7	3,7
SUMME	50,0	38,3	50	38,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	30011,9	21913,8	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	1,3	9,0	10,3	70,2
Zw-SUMME	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	7778,0	43250,7	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,3	1,8	2,1	13,2
Zw-SUMME	42,8	5,9	35	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	4610,7	18517,8	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,2	0,8	1,0	5,1
Zw-SUMME	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	4370,6	13960,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,2	0,6	0,8	3,5
Zw-SUMME	42,8	5,9	25	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	4646,0	11581,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,2	0,5	0,7	2,5
Zw-SUMME	42,8	6,5	20	6,5	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	5086,9	9677,2	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,2	0,4	0,6	1,7
Zw-SUMME	42,8	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	5732,1	8101,9	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,2	0,3	0,6	0,8
Zw-SUMME	42,8	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	16008,0	16270,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,7	0,7	1,3	0,0
SUMME	42,8				50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	16008,0	16270,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,7	0,7	1,3	0,0

19,3 87,8

	15	38,3	50	38,3	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		15,0					33,0	1291,9	219133,8	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,1	9,0	9,1	81,1		
	15	9,9	42,8	9,9	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		15,0					33,0	334,7	43250,7	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	1,8	1,8	16,0		
	15	5,9	35	5,9	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		15,0					33,0	198,5	18517,8	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	0,8	0,8	6,8		
	15	5,6	30	5,6	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		15,0					33,0	188,1	13960,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	0,6	0,6	5,1		
	15	5,9	25	5,9	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		15,0					33,0	200,0	11581,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	0,5	0,5	4,2		
	15	6,5	20	6,5	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		15,0					33,0	218,0	9677,2	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	0,4	0,4	3,5		
	15	7,3	15	7,3	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		15,0					33,0	246,7	8101,9	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	0,3	0,3	2,9		
	15	20,4	10	20,4	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		15,0					33,0	200,0	11581,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	0,5	0,5	4,2		
SUMME	10	38,3	50	38,3	50	38,3		689,1	16270,5	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	0,7	0,7	5,8	14,2	125,6
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		10,0					33,0	382,8	219133,8	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	9,0	9,0	81,5		
	10	9,9	42,8	9,9	50	38,3															
					42,8	9,9															
					35	5,9															
					30	5,6															
					25	5,9															
					20	6,5															
					15	7,3															
					10	20,4															
Zw-SUMME		10,0					33,0	99,2	43250,7	9,1	1218374	1192829	3,5	42045	41164	0,0	1,8	1,8	16,1		
	10	5,9	35	5,9																	

VCE-Modell Szenario	Schädigungsbeitrag Auftretensintensität für				3 LKW RFBFI OG [l]	Auftritts- gewichtung [%]	Zw- RFBFI	Exzentrizität [m] Fahrstreifen	Schädigungsbeitrag Auftretenshäufigkeit für			Schädigungsäquivalente			
	1 LKW RFBFI OG [l]	Auftretens- gewichtung [%]	2 LKW RFBFI OG [l]	Auftretens- gewichtung [%]					LKWs/Jahr ASFNAAG 07	Häufigkeit Szenario [%]	LKWs pro Szenario	Biegung [Mit./l]	Torsion [Mit./l]		
3 RFBFI	50	38,3	50	38,3	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		901233,6	9,1	1218374	3,2	39177	35,3	319,5		
	50	9,9	42,8	9,9	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		197607,6	9,1	1218374	3,2	39177	7,7	70,1		
	50	5,9	35	5,9	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		99703,7	9,1	1218374	3,2	39177	3,8	34,3		
	50	5,6	30	5,6	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		80503,8	9,1	1218374	3,2	39177	3,2	28,5		
	50	5,9	25	5,9	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		74716,0	9,1	1218374	3,2	39177	2,9	26,5		
	50	6,5	20	6,5	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		70964,7	9,1	1218374	3,2	39177	2,8	25,2		
	50	7,3	15	7,3	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		68879,8	9,1	1218374	3,2	39177	2,7	24,4		
	50	20,4	10	20,4	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		164434,1	9,1	1218374	3,2	39177	6,4	58,3	64,8	596,8
SUMME	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		762680,8	9,1	1218374	3,2	39177	29,9	270,4		
	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		165591,0	9,1	1218374	3,2	39177	6,5	58,7		
	42,8	5,9	35	5,9	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		80064,4	9,1	1218374	3,2	39177	3,1	28,4		
	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		66079,1	9,1	1218374	3,2	39177	2,6	23,4		
	42,8	5,9	25	5,9	50	38,3									
					42,8	9,9									
					35	5,9									
					30	5,6									
					25	5,9									
					20	6,5									
					15	7,3									
					10	20,4									
Zw-SUMME					33,0		60750,8	9,1	1218374	3,2	39177	2,4	21,5		
	42,8	6,5	20	6,5	50	38,3									

	35	38,3	50	38,3	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	629461,6	9,1	1218374	3,2	39177	24,7	223,2				
	35	9,9	42,8	9,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	135029,1	9,1	1218374	3,2	39177	5,9	47,9				
	35	5,9	35	5,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	64322,2	9,1	1218374	3,2	39177	2,5	22,8				
	35	5,6	30	5,6	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	52519,1	9,1	1218374	3,2	39177	2,1	18,6				
	35	5,9	25	5,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	47714,9	9,1	1218374	3,2	39177	1,9	16,9				
	35	6,5	20	6,5	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	44263,9	9,1	1218374	3,2	39177	1,7	15,7				
	35	7,3	15	7,3	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	41853,0	9,1	1218374	3,2	39177	1,6	14,6				
	35	20,4	10	20,4	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
SUMME							33,0	97014,3	9,1	1218374	3,2	39177	3,8	34,4	43,6	394,3		
	30	38,3	50	38,3	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	552908,2	9,1	1218374	3,2	39177	21,7	196,0				
	30	9,9	42,8	9,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	117568,4	9,1	1218374	3,2	39177	4,6	41,7				
	30	5,9	35	5,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	55405,0	9,1	1218374	3,2	39177	3,2	19,6				
	30	5,6	30	5,6	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												

	25	38,3	50	38,3	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	46245,0	9,1	1218374	3,2	39177	18,9	171,1				
	25	9,9	42,8	9,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	101678,1	9,1	1218374	3,2	39177	4,0	36,1				
	25	5,9	35	5,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	47352,5	9,1	1218374	3,2	39177	1,9	16,8				
	25	5,6	30	5,6	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	38030,9	9,1	1218374	3,2	39177	1,5	13,5				
	25	5,9	25	5,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	33923,1	9,1	1218374	3,2	39177	1,3	12,0				
	25	6,5	20	6,5	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	30628,1	9,1	1218374	3,2	39177	1,2	10,9				
	25	7,3	15	7,3	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	28479,4	9,1	1218374	3,2	39177	1,1	10,1				
	25	20,4	10	20,4	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
SUMME							33,0	64292,3	9,1	1218374	3,2	39177	2,5	22,8	32,4	293,3		
	20	38,3	50	38,3	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	418685,0	9,1	1218374	3,2	39177	16,4	148,4				
	20	9,9	42,8	9,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	87290,0	9,1	1218374	3,2	39177	3,4	30,9				
	20	5,9	35	5,9	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												
					10	20,4												
Zw-SUMME							33,0	40120,6	9,1	1218374	3,2	39177	1,6	14,2				
	20	5,6	30	5,6	50	38,3												
					42,8	9,9												
					35	5,9												
					30	5,6												
					25	5,9												
					20	6,5												
					15	7,3												

VCE-Modell Szenario	Schadungsbeitrag Auftretenshäufigkeit für				3 LKWs RFBB	Auftritts- gewichtung [%]	30*1 RFBB	Exzentrizität [m] Fahrschleifen	Schadungsbeitrag Auftretenshäufigkeit für			Schadungsbeiträge		
	LKW RFBB OG [t]	Auftretens- gewichtung [%]	2 LKW RFBB OG [t]	Auftretens- gewichtung [%]					LKWs/Jahr ASFNAAG 07	Häufigkeit Szenario [%]	LKWs pro Szenario	T-Biegung [Milli.ton]	T-Torsion [Milli.ton]	
3 RFBB	50	38,3	50	38,3	50	38,3								
			42,8	9,9	42,8	9,9								
			35	5,9	35	5,9								
			30	5,6	30	5,6								
			25	5,9	25	5,9								
			20	6,5	20	6,5								
			15	7,3	15	7,3								
			10	20,4	10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	901233,6	9,1	1192829	2,0	24379	22,0	198,8	
	50	9,9	42,8	9,9	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	197607,6	9,1	1192829	2,0	24379	4,8	43,6	
	50	5,9	35	5,9	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	96703,7	9,1	1192829	2,0	24379	2,4	21,3	
	50	5,6	30	5,6	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	80503,8	9,1	1192829	2,0	24379	2,0	17,8	
	50	5,9	25	5,9	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	74716,0	9,1	1192829	2,0	24379	1,8	16,5	
	50	6,5	20	6,5	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	70964,7	9,1	1192829	2,0	24379	1,7	15,7	
	50	7,3	15	7,3	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	68879,8	9,1	1192829	2,0	24379	1,7	15,2	
	50	20,4	10	20,4	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
SUMME						33,0	164404,1	9,1	1192829	2,0	24379	4,0	36,3	40,3
	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	76280,8	9,1	1192829	2,0	24379	18,6	168,3	
	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	165591,0	9,1	1192829	2,0	24379	4,0	36,5	
	42,8	5,9	35	5,9	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	80064,4	9,1	1192829	2,0	24379	2,0	17,7	
	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	66079,1	9,1	1192829	2,0	24379	1,6	14,6	
	42,8	5,9	25	5,9	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								
					15	7,3								
					10	20,4								
Zw-SUMME						33,0	60750,8	9,1	1192829	2,0	24379	1,5	13,4	
	42,8	6,5	20	6,5	50	38,3								
					42,8	9,9								
					35	5,9								
					30	5,6								
					25	5,9								
					20	6,5								

VZ-Mobilität Szenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I										An"m"m"2 FFBI	excentriert [H] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II				Schadungsbeitrag		Torsion [M.km]		
	1.LKW FFBI		2.LKW FFBI		1.LKW FFBI		2.LKW FFBI		1.LKW FFBI				2.LKW FFBI		FFBI	FFBI	FFBI	FFBI		Bspung [M.km]	Torsion [M.km]
	OG II	Aufwands- gew.kühung [%]	OG II	Aufwands- gew.kühung [%]	OG II	Aufwands- gew.kühung [%]	OG II	Aufwands- gew.kühung [%]	OG II	Aufwands- gew.kühung [%]			OG II	Aufwands- gew.kühung [%]							
2x2-Staff beiden Seiten	50	38,3	50	38,3	50	38,3	50	38,3	50	38,3	33,0										
Zw-SUMME	50	9,9	50	9,9	42,8	9,9	50	38,3	382792,0	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	11,3	6,3	17,8	44,3	
Zw-SUMME	50	9,9	50	9,9	42,8	9,9	50	38,3	33,0	99180,0	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,9	1,2	4,5	15,2
Zw-SUMME	50	5,6	50	5,6	30	5,6	50	38,3	33,0	58998,0	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,7	0,5	2,3	10,3
Zw-SUMME	50	5,9	50	5,9	25	5,9	50	38,3	33,0	50744,8	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,6	0,4	2,0	11,2
Zw-SUMME	50	6,5	50	6,5	20	6,5	50	38,3	33,0	59298,2	11981,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,7	0,3	2,1	12,3
Zw-SUMME	50	7,3	50	7,3	15	7,3	50	38,3	33,0	64881,1	9677,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,8	0,3	2,2	14,3
Zw-SUMME	50	20,4	50	20,4	10	20,4	50	38,3	33,0	72110,5	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,2	0,2	2,4	17,4
SUMME	50	38,3	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3	33,0	204177,0	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	6,0	0,5	6,0	50,3
Zw-SUMME	50	9,9	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3	33,0	306919,3	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	9,0	6,3	13,4	24,4
Zw-SUMME	50	5,9	42,8	5,9	35	5,9	50	38,3	33,0	79262,8	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,3	1,2	3,6	9,3
Zw-SUMME	50	5,6	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3	33,0	49998,1	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,4	0,5	1,9	7,7
Zw-SUMME	50	5,9	42,8	5,9	25	5,9	50	38,3	33,0	44950,1	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,8	0,4	1,7	8,2
Zw-SUMME	50	6,5	42,8	6,5	20	6,5	50	38,3	33,0	47957,9	11981,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,4	0,3	1,7	9,0
Zw-SUMME	50	7,3	42,8	7,3	15	7,3	50	38,3	33,0	51851,6	9677,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,5	0,3	1,8	11,3
Zw-SUMME	50	20,4	42,8	20,4	10	20,4	50	38,3	33,0	58428,4	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,7	0,2	2,0	13,5
SUMME	50	38,3	35	38,3	50	38,3	50	38,3	33,0	163173,9	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	4,8	0,5	5,3	39,3
Zw-SUMME	50	9,9	35	9,9	42,8	9,9	50	38,3	33,0	239262,2	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	6,9	6,3	13,3	5,0
Zw-SUMME	50	5,9	35	5,9	35	5,9	50	38,3	33,0	60908,9	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,8	1,2	3,0	5,0
Zw-SUMME	50	5,6	35	5,6	30	5,6	50	38,3	33,0	38115,5	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,1	0,5	1,6	4,8
Zw-SUMME	50	5,9	35	5,9	25	5,9	50	38,3	33,0	34234,3	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,0	0,4	1,4	5,5

VCE-Mobilität Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I								An"m"m"3 RFBI	Excenter"32 [H] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II				Schadungsbeitrag		Torsion [M.km]				
	1.LKW RFBI		2.LKW RFBI		1.LKW RFBI		2.LKW RFBI				LKW-Jahr ASP/FCO2		LKW-Scenario		RFBI	RFBI					
	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]			RFBI	RFBI	Scenario [%]	RFBI				RFBI			
	50	38,3	20	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME									131297,7	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	3,9	6,3	10,2	222	
	50	9,9	20	9,9	42,8	9,9	50	38,3													
Zw-SUMME									34018,7	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,0	1,2	2,3	22	
	50	5,9	20	5,9	35	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME									20171,2	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,5	1,1	0,3	
	50	5,6	20	5,6	30	5,6	50	38,3													
Zw-SUMME									19130,5	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,4	1,0	1,4	
	50	5,9	20	5,9	25	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME									20256,8	11981,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,3	0,9	2,1	
	50	6,5	20	6,5	20	6,5	50	38,3													
Zw-SUMME									22254,2	9577,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,3	0,8	3,4	
	50	7,3	20	7,3	15	7,3	50	38,3													
Zw-SUMME									29076,9	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,2	1,0	4,8	
SUMME									330	70027,7	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,1	0,5	2,5	14,3
	50	38,3	15	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME									106124,3	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	3,1	6,3	9,4	292	
	50	9,9	15	9,9	42,8	9,9	50	38,3													
Zw-SUMME									37297,3	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,8	1,2	2,1	4,0	
	50	5,9	15	5,9	35	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME									16150,2	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,5	1,0	0,3	
	50	5,6	15	5,6	30	5,6	50	38,3													
Zw-SUMME									13268,9	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,4	0,9	0,4	
	50	5,9	15	5,9	25	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME									16279,8	11981,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,3	0,8	1,3	
	50	6,5	15	6,5	20	6,5	50	38,3													
Zw-SUMME									17818,0	9577,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,3	0,8	2,2	
	50	7,3	15	7,3	15	7,3	50	38,3													
Zw-SUMME									20078,0	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,2	0,8	3,2	
	50	20,4	15	20,4	10	20,4	50	38,3													
SUMME									330	56072,1	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,7	0,5	2,1	10,7
	50	38,3	10	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME									82683,1	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,4	6,3	8,8	352	
	50	9,9	10	9,9	42,8	9,9	50	38,3													
Zw-SUMME									21422,9	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,6	1,2	1,9	5,0	
	50	5,9	10	5,9	35	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME									12702,5	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,5	0,9	1,4	
	50	5,6	10	5,6	30	5,6	50	38,3													
Zw-SUMME									12040,9	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,4	0,8	0,4	

VCE-Mobiel Scenario	Schadungsbeitrag Auftragskostenanteil für										An"m"m"3 RFBI	Excentrisität [H] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Auftragskostenanteil für				Schadungsbeiträge		Torsion [M.km]																			
	1.LKW RFBI		Auftrags- gew.kchung [%]		2.LKW RFBI		Auftrags- gew.kchung [%]		1.LKW RFBI				Auftrags- gew.kchung [%]		2.LKW RFBI		Auftrags- gew.kchung [%]			RFBI	RFBI																	
	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]			OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]	OG [t]																				
	50	5,9	10	5,9	25	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	12799,8	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,7	0,4			
Zw-SUMME	50	6,5	10	6,5	20	6,5	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0															
Zw-SUMME	50	7,3	10	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	14014,3	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,7	1,2			
Zw-SUMME	50	20,4	10	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	15791,9	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,2	0,7	0,1	0,1		
SUMME																								33,0	44102,2	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,3	0,5	1,8	7,4	16,2	53,9
	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	33,0	44102,2	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,3	0,5	1,8	7,4		
Zw-SUMME	42,8	9,9	50	9,9	42,8	9,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	305919,3	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	9,0	6,3	15,4	24,3			
Zw-SUMME	42,8	5,9	50	5,9	35	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	73052,8	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	2,3	1,2	3,6	9,3			
Zw-SUMME	42,8	5,6	50	5,6	30	5,6	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	46998,1	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,4	0,5	1,9	7,2			
Zw-SUMME	42,8	5,9	50	5,9	25	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	44650,1	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,3	0,4	1,7	6,2			
Zw-SUMME	42,8	6,5	50	6,5	20	6,5	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	47267,9	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,4	0,3	1,7	9,8			
Zw-SUMME	42,8	7,3	50	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	51851,6	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,5	0,3	1,8	11,3			
Zw-SUMME	42,8	20,4	50	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	54528,4	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,7	0,2	2,0	13,1			
SUMME	42,8	38,3	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	163173,9	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	4,8	0,5	5,3	39,0	39,4	124,9	
Zw-SUMME	42,8	9,9	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	24095,6	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	7,1	6,3	13,4	6,8			
Zw-SUMME	42,8	5,9	42,8	5,9	35	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	62207,9	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,8	1,2	3,1	5,3			
Zw-SUMME	42,8	5,6	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	36985,7	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,1	0,5	1,6	5,0			
Zw-SUMME	42,8	5,9	42,8	5,9	25	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	34564,4	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,0	0,4	1,4	5,7			
Zw-SUMME	42,8	6,5	42,8	6,5	20	6,5	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	37168,0	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,1	0,5	1,4	6,0			
Zw-SUMME	42,8	7,3	42,8	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	40694,8	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,2	0,3	1,5	6,3			
Zw-SUMME	42,8	20,4	42,8	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,0	45856,5	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,4	0,2	1,6	10,1			
SUMME																								33,0	128264,3	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	3,8	0,5	4,3	30,0	39,3	78,9

VDE-Mobiel Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I								An"m"m"z RFBI	Excentriert [H] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II				Schadungsbeitrag		Torsion [M.km]				
	1.LKW RFBI		2.LKW RFBI		1.LKW RFBI		2.LKW RFBI				LKW-Jahr ASP/FCI of RFBI		LKW-Scenario		RFBI	RFBI					
	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]			RFBI	RFBI	Scenario [%]	RFBI				RFBI			
	42,8	38,3	35	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	9,9	35	9,9	42,8	9,9	50	38,3	180281,0	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	5,3	6,3	11,7	92	
	42,8	9,9	35	9,9	42,8	9,9	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	5,9	35	5,9	35	5,9	50	38,3	46705,0	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,4	1,2	2,6	12	
	42,8	5,9	35	5,9	30	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	5,6	35	5,6	30	5,6	50	38,3	27693,3	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,8	0,5	1,4	23	
	42,8	5,9	35	5,9	25	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	5,9	35	5,9	25	5,9	50	38,3	26250,9	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,8	0,4	1,2	34	
	42,8	6,5	35	6,5	20	6,5	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	6,5	35	6,5	20	6,5	50	38,3	27905,3	11561,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,8	0,3	1,2	43	
	42,8	7,3	35	7,3	15	7,3	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	7,3	35	7,3	15	7,3	50	38,3	30553,2	9677,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,9	0,3	1,2	53	
	42,8	20,4	35	20,4	10	20,4	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	20,4	35	20,4	10	20,4	50	38,3	34426,5	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,0	0,2	1,9	71	
SUMME									330	96149,2	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,8	0,5	9,3	214
	42,8	38,3	30	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	9,9	30	9,9	42,8	9,9	50	38,3	147892,0	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	4,4	6,3	10,7	173	
	42,8	5,9	30	5,9	35	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	5,9	30	5,9	35	5,9	50	38,3	38266,5	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,1	1,2	2,4	11	
	42,8	5,6	30	5,6	30	5,6	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	5,6	30	5,6	30	5,6	50	38,3	22589,9	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,5	1,2	12	
	42,8	5,9	30	5,9	25	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	5,9	30	5,9	25	5,9	50	38,3	21258,0	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,4	1,0	21	
	42,8	6,5	30	6,5	20	6,5	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	6,5	30	6,5	20	6,5	50	38,3	22863,5	11561,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,3	1,0	31	
	42,8	7,3	30	7,3	15	7,3	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	7,3	30	7,3	15	7,3	50	38,3	25033,0	9677,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,3	1,0	42	
	42,8	20,4	30	20,4	10	20,4	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	20,4	30	20,4	10	20,4	50	38,3	28208,1	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,9	0,2	1,1	54	
SUMME									330	78777,3	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,3	0,5	2,8	163
	42,8	9,9	25	9,9	42,8	9,9	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	9,9	25	9,9	42,8	9,9	50	38,3	119303,2	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	3,5	6,3	9,9	263	
	42,8	5,9	25	5,9	35	5,9	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	5,9	25	5,9	35	5,9	50	38,3	30911,0	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,9	1,2	2,2	31	
	42,8	5,6	25	5,6	30	5,6	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	5,6	25	5,6	30	5,6	50	38,3	18358,4	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,5	1,1	01	
	42,8	7,3	25	7,3	15	7,3	50	38,3													
Zw-SUMME	42,8	7,3	25	7,3	15	7,3	50	38,3	17373,8	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,4	0,9	10	

VDE-Mobiel Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I						Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II						Schadungsbeitrag											
	1.LKW FFBB		2.LKW FFBB		1.LKW FFBB		2.LKW FFBB		1.LKW FFBB		2.LKW FFBB		FFBI	FFBS	FFBI	FFBS								
	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]												
	35	38,3	25	38,3	50	38,3	50	38,3	35	38,3	25	38,3	62681,1	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,4	6,3	8,8	35,2
Zw-SUMME	35	9,9	25	9,9	42,8	9,9	50	38,3	35	38,3	25	38,3	21422,9	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,6	1,2	1,9	5,8
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	12790,5	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,5	0,9	1,4
Zw-SUMME	35	5,9	25	5,9	35	5,9	50	38,3	35	38,3	25	38,3	12040,8	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,4	0,8	0,4
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	12799,8	11981,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,7	0,4
Zw-SUMME	35	6,5	25	6,5	20	6,5	50	38,3	35	38,3	25	38,3	14014,3	9577,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,7	1,2
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	15791,9	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,2	0,7	2,1
Zw-SUMME	35	20,4	25	20,4	10	20,4	50	38,3	35	38,3	25	38,3	44102,2	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,3	0,5	1,8	7,3
SUMME	35	38,3	20	38,3	50	38,3	50	38,3	35	38,3	25	38,3	62681,1	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,3	0,5	1,8	7,3
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	62681,1	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,9	6,3	8,2	40,3
Zw-SUMME	35	9,9	20	9,9	42,8	9,9	50	38,3	35	38,3	25	38,3	16501,1	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	1,2	1,7	6,3
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	9784,2	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,5	0,8	2,2
Zw-SUMME	35	5,9	20	5,9	35	5,9	50	38,3	35	38,3	25	38,3	9074,6	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,4	0,7	1,2
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	8659,1	11981,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,3	0,6	0,4
Zw-SUMME	35	6,5	20	6,5	20	6,5	50	38,3	35	38,3	25	38,3	10784,6	9577,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,3	0,6	0,4
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	12163,8	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,2	0,6	1,1
Zw-SUMME	35	20,4	20	20,4	10	20,4	50	38,3	35	38,3	25	38,3	33869,9	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,0	0,5	1,5	4,8
SUMME	35	38,3	15	38,3	50	38,3	50	38,3	35	38,3	25	38,3	62681,1	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,4	6,3	7,7	44,3
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	12397,5	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	1,2	1,6	8,0
Zw-SUMME	35	5,9	15	5,9	35	5,9	50	38,3	35	38,3	25	38,3	7351,0	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,5	0,8	2,3
	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	50	38,3	35	38,3	6968,1	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,4	0,6	1,3
Zw-SUMME	35	5,9	15	5,9	35	5,9	50	38,3	35	38,3	25	38,3	6968,1	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,4	0,6	1,3

VDE-Mobiel Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I						An'm m ² FFBI	excentrisch [H] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II			Schadungsbeitrag		Bewertung [MUT]	Torsion [M.km]						
	1.LKW FFBI		2.LKW FFBI		1.LKW FFBI				1.LKW FFBI		FFBI										
	OG [I]	Aufwands- gew.khung [%]	OG [I]	Aufwands- gew.khung [%]	OG [I]	Aufwands- gew.khung [%]			OG [I]	Aufwands- gew.khung [%]	FFBI	FFBI	FFBI			FFBI					
	30	38,3	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME	30	9,9	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3	147892,0	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	4,4	6,3	10,7	17,9	
Zw-SUMME	30	5,9	42,8	5,9	35	5,9	50	38,3	38296,5	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,1	1,2	2,4	1,1	
Zw-SUMME	30	5,6	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3	22689,8	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,5	1,2	1,2	
Zw-SUMME	30	5,9	42,8	5,9	25	5,9	50	38,3	21508,0	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,4	1,0	2,1	
Zw-SUMME	30	6,5	42,8	6,5	20	6,5	50	38,3	22863,5	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,3	1,0	3,1	
Zw-SUMME	30	7,3	42,8	7,3	15	7,3	50	38,3	25039,0	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,3	1,0	4,2	
Zw-SUMME	30	20,4	42,8	20,4	10	20,4	50	38,3	28206,1	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,8	0,2	1,1	5,4	
SUMME	30	38,3	35	38,3	50	38,3	50	38,3	330	78777,3	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	2,3	0,5	2,8	16,8
Zw-SUMME	30	9,9	35	9,9	42,8	9,9	50	38,3	106124,3	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	3,1	6,3	9,4	29,2	
Zw-SUMME	30	5,9	35	5,9	35	5,9	50	38,3	37297,3	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,8	1,2	2,1	4,0	
Zw-SUMME	30	5,6	35	5,6	30	5,6	50	38,3	16150,2	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,5	1,0	0,5	
Zw-SUMME	30	5,9	35	5,9	25	5,9	50	38,3	19208,9	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,4	0,9	0,4	
Zw-SUMME	30	6,5	35	6,5	20	6,5	50	38,3	16279,8	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,3	0,8	1,3	
Zw-SUMME	30	7,3	35	7,3	15	7,3	50	38,3	17818,0	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,3	0,8	2,2	
Zw-SUMME	30	20,4	35	20,4	10	20,4	50	38,3	20078,0	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,2	0,8	3,2	
SUMME	30	38,3	30	38,3	50	38,3	50	38,3	330	56072,1	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,7	0,5	2,1	10,7
Zw-SUMME	30	9,9	30	9,9	42,8	9,9	50	38,3	82683,1	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	2,4	6,3	8,8	36,2	
Zw-SUMME	30	5,9	30	5,9	35	5,9	50	38,3	21422,9	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,6	1,2	1,9	5,0	
Zw-SUMME	30	5,6	30	5,6	30	5,6	50	38,3	12702,5	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,5	0,9	1,4	
Zw-SUMME	30	5,9	30	5,9	25	5,9	50	38,3	12040,9	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,4	0,8	0,4	

VCE-Mobilität Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I						An"m"m"3 FFBI	Excentrifal [H] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II				Schadungsbeiträge		Torsion [M.km]							
	1.LKW FFBI		2.LKW FFBI		1.LKW FFBI				1.LKW FFBI		FFBI		FFBI	FFBI		FFBI	FFBI					
	OG II	Aufwands- gew.khtung [%]	OG II	Aufwands- gew.khtung [%]	OG II	Aufwands- gew.khtung [%]			OG II	Aufwands- gew.khtung [%]	FFBI	FFBI						FFBI	FFBI			
	30	38,3	15	38,3	50	38,3	50	38,3														
Zw-SUMME	30	9,9	15	9,9	42,8	9,9	50	38,3	34881,9	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,0	6,3	7,4	482		
Zw-SUMME	30	5,9	15	5,9	35	5,9	50	38,3	9037,8	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	1,2	1,5	83		
Zw-SUMME	30	5,6	15	5,6	30	5,6	50	38,3	5358,9	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,5	0,7	34		
Zw-SUMME	30	5,9	15	5,9	25	5,9	50	38,3	5079,8	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,4	0,6	23		
Zw-SUMME	30	6,5	15	6,5	20	6,5	50	38,3	5399,9	11581,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,3	0,5	18		
Zw-SUMME	30	7,3	15	7,3	15	7,3	50	38,3	5912,3	9577,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,3	0,5	12		
Zw-SUMME	30	20,4	15	20,4	10	20,4	50	38,3	9862,2	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,2	0,4	03		
SUMME	30	38,3	10	38,3	50	38,3	50	38,3	18926,8	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,5	1,0	07	12,4	86,2
Zw-SUMME	30	9,9	10	9,9	42,8	9,9	50	38,3	24498,7	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	6,3	7,1	503		
Zw-SUMME	30	5,9	10	5,9	35	5,9	50	38,3	6347,5	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	1,2	1,4	93		
Zw-SUMME	30	5,6	10	5,6	30	5,6	50	38,3	3763,7	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,6	33		
Zw-SUMME	30	5,9	10	5,9	25	5,9	50	38,3	3567,7	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,4	0,5	22		
Zw-SUMME	30	6,5	10	6,5	20	6,5	50	38,3	3762,5	11581,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	20		
Zw-SUMME	30	7,3	10	7,3	15	7,3	50	38,3	4152,4	9577,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	14		
Zw-SUMME	30	20,4	10	20,4	10	20,4	50	38,3	4679,1	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,2	0,4	03		
SUMME	25	38,3	50	38,3	50	38,3	50	38,3	13067,3	16270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,5	0,9	09	11,7	72,0
Zw-SUMME	25	9,9	50	9,9	42,8	9,9	50	38,3	161490,4	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	4,8	6,3	11,1	142		
Zw-SUMME	25	5,9	50	5,9	35	5,9	50	38,3	41841,6	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,2	1,2	2,0	01		
Zw-SUMME	25	5,6	50	5,6	30	5,6	50	38,3	24009,6	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,5	1,3	18		
Zw-SUMME	25	7,3	50	7,3	15	7,3	50	38,3	23517,4	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,4	1,1	25		

VDE-Mobilität Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I						An"m"m"3			Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II			Schadungsbeiträge		Torsion [M.km]					
	1.LKW FFBB		2.LKW FFBB		1.LKW FFBB		2.LKW FFBB		Exzentrität [H] Fahrstrafen	LKW-Jahr ASP/PC/OT		LKW-Scenario		Risiko						
	OG [t]	Aufwands-gew.ichtung [%]	OG [t]	Aufwands-gew.ichtung [%]	OG [t]	Aufwands-gew.ichtung [%]	OG [t]	Aufwands-gew.ichtung [%]		FFBB	FFBB	Scenario [%]	FFBB			FFBB				
	25	5,9	50	5,9	25	5,9	50	5,9												
Zw-SUMME									24999,8	11981,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,3	1,1	37
	25	6,5	50	6,5	20	6,5	50	6,5												
Zw-SUMME									27271,7	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,8	0,5	1,1	48
	25	7,3	50	7,3	15	7,3	50	7,3												
Zw-SUMME									30843,5	8191,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,9	0,5	1,1	61
	25	20,4	50	20,4	10	20,4	50	20,4												
SUMME									86137,2	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	2,5	0,5	3,0	162
	25	38,3	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3												
Zw-SUMME									119203,2	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	3,5	0,3	9,9	252
	25	9,9	42,8	9,9	42,8	9,9	50	9,9												
Zw-SUMME									30911,0	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,9	1,2	2,2	31
	25	5,9	42,8	5,9	35	5,9	50	5,9												
Zw-SUMME									19284,4	19517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,5	1,1	01
	25	5,6	42,8	5,6	30	5,6	50	5,6												
Zw-SUMME									17279,8	13950,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,4	0,9	10
	25	5,9	42,8	5,9	25	5,9	50	5,9												
Zw-SUMME									18468,8	11981,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,3	0,9	13
	25	6,5	42,8	6,5	20	6,5	50	6,5												
Zw-SUMME									20221,2	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,3	0,9	28
	25	7,3	42,8	7,3	15	7,3	50	7,3												
Zw-SUMME									22786,0	8191,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,7	0,2	0,9	40
	25	20,4	42,8	20,4	10	20,4	50	20,4												
SUMME									63635,0	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,9	0,5	2,3	127
	25	38,3	35	38,3	50	38,3	50	38,3												
Zw-SUMME									82893,1	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	2,4	0,3	8,8	352
	25	9,9	35	9,9	42,8	9,9	50	9,9												
Zw-SUMME									21422,9	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,6	1,2	1,9	52
	25	5,9	35	5,9	35	5,9	50	5,9												
Zw-SUMME									12702,5	19517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,5	0,9	12
	25	5,6	35	5,6	30	5,6	50	5,6												
Zw-SUMME									12040,3	13950,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,4	0,8	04
	25	5,9	35	5,9	25	5,9	50	5,9												
Zw-SUMME									12798,8	11981,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,7	04
	25	6,5	35	6,5	20	6,5	50	6,5												
Zw-SUMME									14014,3	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,7	12
	25	7,3	35	7,3	15	7,3	50	7,3												
Zw-SUMME									15791,9	8191,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,2	0,7	21
	25	20,4	35	20,4	10	20,4	50	20,4												
SUMME									44102,2	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,9	0,5	1,8	72

VCE-Mobilität Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I										Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II				Schadungsbeiträge		Torsion [M.ton]			
	1.LKW FFB		2.LKW FFB		1.LKW FFB		2.LKW FFB		An"m"m"3		Exzentrie [°]		LKW-Jahr ASP/FCO2		LKW-Scenario					
	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	FFBI	FFBS	Fahrstrafen	FFBI	FFBS	Scenario [%]	FFBI	FFBS		Bremsung		
	25	38,3	30	38,3	50	38,3	50	38,3												
Zw-SUMME									6387,0	21933,8	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	1,9	6,3	8,2	403
	25	9,9	30	9,9	42,8	9,9	50	38,3												
Zw-SUMME									16201,1	43250,7	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,5	1,2	1,7	63
	25	5,9	30	5,9	35	5,9	50	38,3												
Zw-SUMME									9784,2	18517,8	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,3	0,5	0,8	22
	25	5,6	30	5,6	30	5,6	50	38,3												
Zw-SUMME									9274,6	13960,5	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,3	0,4	0,7	12
	25	5,9	30	5,9	25	5,9	50	38,3												
Zw-SUMME									8859,1	11581,5	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,3	0,3	0,6	04
	25	6,5	30	6,5	20	6,5	50	38,3												
Zw-SUMME									10784,6	9577,2	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,3	0,3	0,6	04
	25	7,3	30	7,3	15	7,3	50	38,3												
Zw-SUMME									12163,8	8101,9	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,4	0,2	0,6	11
	25	20,4	30	20,4	10	20,4	50	38,3												
Zw-SUMME									33969,9	16270,5	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	1,0	0,5	1,0	48
SUMME	25	38,3	25	38,3	50	38,3	50	38,3												
Zw-SUMME									47848,0	21933,8	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	1,4	6,3	7,7	443
	25	9,9	25	9,9	42,8	9,9	50	38,3												
Zw-SUMME									12397,5	43250,7	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,4	1,2	1,6	80
	25	5,9	25	5,9	35	5,9	50	38,3												
Zw-SUMME									7251,0	18517,8	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,2	0,5	0,8	23
	25	5,6	25	5,6	30	5,6	50	38,3												
Zw-SUMME									6865,1	13960,5	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,2	0,4	0,6	18
	25	5,9	25	5,9	25	5,9	50	38,3												
Zw-SUMME									7427,3	11581,5	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,2	0,3	0,6	11
	25	6,5	25	6,5	20	6,5	50	38,3												
Zw-SUMME									8110,1	9577,2	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,2	0,3	0,6	04
	25	7,3	25	7,3	15	7,3	50	38,3												
Zw-SUMME									9138,8	8101,9	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,3	0,2	0,6	03
	25	20,4	25	20,4	10	20,4	50	38,3												
Zw-SUMME									2552,1	16270,5	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,8	0,5	1,3	28
SUMME	25	38,3	20	38,3	50	38,3	50	38,3												
Zw-SUMME									34881,9	21933,8	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	1,9	6,3	7,4	480
	25	9,9	20	9,9	42,8	9,9	50	38,3												
Zw-SUMME									9037,8	43250,7	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,3	1,2	1,6	63
	25	5,9	20	5,9	35	5,9	50	38,3												
Zw-SUMME									5358,9	18517,8	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,2	0,5	0,7	34
	25	5,6	20	5,6	30	5,6	50	38,3												
Zw-SUMME									5079,8	13960,5	9,1	121874	119292	2,4	29518	28899	0,1	0,4	0,6	23

VCE-Mobilität Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I						An'y'm m ³ RFBI	excentrifal [t] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II				Schadungsbeiträge		Torsion [M.km]						
	1.LKW RFBI		2.LKW RFBI		1.LKW RFBI				RFBI		RFBI		RFBI	RFBI							
	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]	OG II	Aufwands- gew.khung [%]			RFBI	RFBI	RFBI	RFBI									
	20	38,3	20	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME	20	9,9	20	9,9	42,8	9,9	50	38,3	24496,7	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,7	6,3	7,1	50,3	
Zw-SUMME	20	5,9	20	5,9	35	5,9	50	38,3	6347,5	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	1,2	1,4	9,5	
Zw-SUMME	20	5,6	20	5,6	30	5,6	50	38,3	3763,7	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,6	9,8	
Zw-SUMME	20	5,9	20	5,9	25	5,9	50	38,3	3567,7	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,4	0,6	2,2	
Zw-SUMME	20	6,5	20	6,5	20	6,5	50	38,3	3792,5	11581,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	2,0	
Zw-SUMME	20	7,3	20	7,3	15	7,3	50	38,3	4152,4	9577,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	1,4	
Zw-SUMME	20	20,4	20	20,4	10	20,4	50	38,3	4679,1	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,2	0,4	0,9	
SUMME									33,0	13067,3	15270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,5	0,9	0,8
Zw-SUMME	20	38,3	15	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME	20	9,9	15	9,9	42,8	9,9	50	38,3	16412,2	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	6,3	8,8	52,3	
Zw-SUMME	20	5,9	15	5,9	35	5,9	50	38,3	4252,3	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	1,2	1,4	10,2	
Zw-SUMME	20	5,6	15	5,6	30	5,6	50	38,3	2521,4	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,6	4,2	
Zw-SUMME	20	5,9	15	5,9	25	5,9	50	38,3	2280,1	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,4	0,5	3,0	
Zw-SUMME	20	6,5	15	6,5	20	6,5	50	38,3	2540,7	11581,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	2,4	
Zw-SUMME	20	7,3	15	7,3	15	7,3	50	38,3	2781,8	9577,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	1,8	
Zw-SUMME	20	20,4	15	20,4	10	20,4	50	38,3	9134,6	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,2	0,3	1,3	
SUMME									33,0	8754,1	15270,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,5	0,7	1,9
Zw-SUMME	20	9,9	10	9,9	42,8	9,9	50	38,3	10255,4	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	6,3	8,6	54,0	
Zw-SUMME	20	5,9	10	5,9	35	5,9	50	38,3	2677,9	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	1,2	1,3	10,0	
Zw-SUMME	20	5,6	10	5,6	30	5,6	50	38,3	1587,8	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,5	0,6	4,4	
Zw-SUMME	20								33,0	1505,1	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,4	0,4	3,5

VDE-Mobiel Scenario	Schadungsbeitrag Auftragswertanteil für								An"m"m"3 RFBI	Excentrifal [H Fahrstrafen]	Schadungsbeitrag Auftragswertanteil für				Schadungsbeitrag		Torsion [M.km]						
	1.LKW RFBI		2.LKW RFBI		1.LKW RFBI		2.LKW RFBI				LKW-Jahr ASP/FCO2		LKW-Scenario		RFBI	RFBI		RFBI	RFBI				
	OG II	Auftrags- gew. chngung [%]	OG II	Auftrags- gew. chngung [%]	OG II	Auftrags- gew. chngung [%]	OG II	Auftrags- gew. chngung [%]			RFBI	RFBI	Scenario [%]	RFBI						RFBI			
	20	5,9	10	5,9	25	5,9	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										1600,0	11581,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,4	23		
	20	6,5	10	6,5	20	6,5	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										1751,8	9677,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,3	21		
	20	7,3	10	7,3	15	7,3	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										1974,0	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,2	0,3	18		
	20	20,4	10	20,4	10	20,4	50	38,3	33,0														
SUMME										5613,8	16270,6	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,5	0,6	28	10,6	51,9
	15	38,3	50	38,3	50	38,3	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										105124,3	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	3,1	6,3	9,4	29,2		
	15	9,9	50	9,9	42,8	9,9	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										27237,3	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,8	1,2	2,1	4,2		
	15	5,9	50	5,9	35	5,9	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										18150,2	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,5	1,0	0,8		
	15	5,6	50	5,6	30	5,6	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										15368,9	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,4	0,9	0,4		
	15	5,9	50	5,9	25	5,9	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										16279,8	11581,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,3	0,8	1,3		
	15	6,5	50	6,5	20	6,5	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										17818,0	9677,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,3	0,8	2,2		
	15	7,3	50	7,3	15	7,3	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										20078,0	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,6	0,2	0,8	3,2		
	15	20,4	50	20,4	10	20,4	50	38,3	33,0														
SUMME										58072,1	16270,6	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,7	0,5	2,1	10,0	17,9	51,7
	15	38,3	42,8	38,3	50	38,3	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										73917,4	219133,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	2,2	6,3	8,0	37,1		
	15	9,9	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										19151,7	43250,7	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,8	1,2	1,8	6,2		
	15	5,9	42,8	5,9	35	5,9	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										11395,9	18517,8	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,5	0,8	1,8		
	15	5,6	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										10764,4	13960,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,4	0,7	0,8		
	15	5,9	42,8	5,9	25	5,9	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										11442,8	11581,5	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,5	0,7	0,8		
	15	6,5	42,8	6,5	20	6,5	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										12528,6	9677,2	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,6	0,8		
	15	7,3	42,8	7,3	15	7,3	50	38,3	33,0														
Zw-SUMME										14117,7	8101,9	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,2	0,7	1,7		
	15	20,4	42,8	20,4	10	20,4	50	38,3	33,0														
SUMME										39426,7	16270,6	9,1	1218374	1192929	2,4	29518	28899	1,2	0,5	1,6	6,3	15,5	55,1

VCE-Mobilität Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I						An'fm m ³ RFBI	excentrifal [H] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II				Schadungsbeiträge		Torsion [M.km]									
	1.LKW RFBI		2.LKW RFBI		1.LKW RFBI				RFBI		RFBI		Brennstoff	LKW-Scenario		RFBI	RFBI							
	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]			RFBI	RFBI	Scenario [%]	RFBI						RFBI						
	15	38,3	35	38,3	50	38,3	50	38,3																
Zw-SUMME	15	9,9	35	9,9	42,8	9,9	50	38,3	4749,0	21913,8		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,4	6,3	7,7	44,5			
Zw-SUMME	15	5,9	35	5,9	35	5,9	50	38,3	12597,5	43250,7		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	1,2	1,6	8,0			
Zw-SUMME	15	5,6	35	5,6	30	5,6	50	38,3	7361,0	18517,8		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,5	0,8	2,0			
Zw-SUMME	15	5,9	35	5,9	25	5,9	50	38,3	6968,1	13960,5		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,4	0,6	1,8			
Zw-SUMME	15	6,5	35	6,5	20	6,5	50	38,3	7407,3	11561,5		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,3	0,6	1,1			
Zw-SUMME	15	7,3	35	7,3	15	7,3	50	38,3	8110,1	9577,2		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,3	0,5	0,4			
Zw-SUMME	15	20,4	35	20,4	10	20,4	50	38,3	9156,8	8101,9		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,2	0,5	0,3			
SUMME									33,0	25221,1	16270,5		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,8	0,5	1,2	2,8	19,9	61,6
Zw-SUMME	15	38,3	30	38,3	50	38,3	50	38,3	34881,9	21913,8		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,0	6,3	7,4	46,0			
Zw-SUMME	15	9,9	30	9,9	35	9,9	50	38,3	9037,8	43250,7		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,3	1,2	1,5	8,0			
Zw-SUMME	15	5,9	30	5,9	35	5,9	50	38,3	5258,9	18517,8		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,5	0,7	3,4			
Zw-SUMME	15	5,6	30	5,6	30	5,6	50	38,3	5079,8	13960,5		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,4	0,6	2,0			
Zw-SUMME	15	5,9	30	5,9	25	5,9	50	38,3	5399,9	11561,5		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,3	0,5	1,0			
Zw-SUMME	15	7,3	30	7,3	15	7,3	50	38,3	5912,3	9577,2		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,3	0,5	1,0			
Zw-SUMME	15	20,4	30	20,4	10	20,4	50	38,3	6662,2	8101,9		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,2	0,4	0,3			
SUMME									33,0	18556,6	16270,5		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,5	1,0	5,7	12,9	66,2
Zw-SUMME	15	9,9	25	9,9	42,8	9,9	50	38,3	24266,7	21913,8		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,7	6,3	7,1	50,0			
Zw-SUMME	15	5,9	25	5,9	35	5,9	50	38,3	6547,5	43250,7		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	1,2	1,4	9,0			
Zw-SUMME	15	5,6	25	5,6	30	5,6	50	38,3	3763,7	18517,8		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,6	3,8			
Zw-SUMME	15								33,0	3567,7	13960,5		9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,4	0,5	2,7		

VCE-Mobilität Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I						Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II						Schadungsbeitrag		Torsion [M.km]						
	1.LKW FFBB		2.LKW FFBB		1.LKW FFBB		2.LKW FFBB		1.LKW FFBB		2.LKW FFBB		FFBB	FFBB							
	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]	OG II	Aufwands- gewichtung [%]									
	15	38,3	10	38,3	50	38,3	50	38,3	50	38,3	50	38,3									
Zw-SUMME	15	9,9	10	9,9	42,8	9,9	50	38,3	5961,1	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	6,3	6,5	55,7	
Zw-SUMME	15	5,9	10	5,9	35	5,9	50	38,3	1549,7	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	1,2	1,3	10,9	
Zw-SUMME	15	5,6	10	5,6	30	5,6	50	38,3	918,9	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,5	0,6	4,8	
Zw-SUMME	15	5,9	10	5,9	25	5,9	50	38,3	871,0	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,4	0,4	3,4	
Zw-SUMME	15	6,5	10	6,5	20	6,5	50	38,3	925,9	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,4	2,8	
Zw-SUMME	15	7,3	10	7,3	15	7,3	50	38,3	1013,8	9577,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,3	2,3	
Zw-SUMME	15	20,4	10	20,4	10	20,4	50	38,3	1142,4	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,2	0,3	1,8	
SUMME									33,0	8190,3	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,6	3,4
Zw-SUMME	10	38,3	50	38,3	50	38,3	50	38,3	62883,1	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	2,4	6,3	8,8	35,2	
Zw-SUMME	10	9,9	50	9,9	35	9,9	50	38,3	21422,9	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,6	1,2	1,9	5,8	
Zw-SUMME	10	5,6	50	5,6	30	5,6	50	38,3	12702,5	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,5	0,9	1,4	
Zw-SUMME	10	5,9	50	5,9	25	5,9	50	38,3	13040,9	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,4	0,8	0,8	
Zw-SUMME	10	6,5	50	6,5	20	6,5	50	38,3	12799,8	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,7	0,4	
Zw-SUMME	10	7,3	50	7,3	15	7,3	50	38,3	14014,3	9577,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	0,3	0,7	1,2	
Zw-SUMME	10	20,4	50	20,4	10	20,4	50	38,3	15791,9	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	0,2	0,7	2,1	
SUMME									33,0	44102,2	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,3	0,5	1,8	7,9
Zw-SUMME	10	9,9	42,8	9,9	42,8	9,9	50	38,3	56346,2	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	1,7	6,3	8,0	42,8	
Zw-SUMME	10	5,9	42,8	5,9	35	5,9	50	38,3	14599,1	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,4	1,2	1,7	7,4	
Zw-SUMME	10	5,6	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3	8656,4	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,5	0,8	2,5	
Zw-SUMME	10	5,6	42,8	5,6	30	5,6	50	38,3	8205,5	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,4	0,6	1,5	

FCE-Mobility Scenario	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie I						A ² m ² d ² RFBI	excentrifal [H] Fahrstrafen	Schadungsbeitrag Aufwandskategorie II				Schadungsbeitrag		Torsion [M.km]						
	1.LKW RFBI		2.LKW RFBI		1.LKW RFBI				RFBI		RFBI		RFBI	RFBI							
	OG [t]	Aufwands- gewichtung [%]	OG [t]	Aufwands- gewichtung [%]	OG [t]	Aufwands- gewichtung [%]			RFBI	RFBI	RFBI	RFBI									
	10	38,3	25	38,3	50	38,3	50	38,3													
Zw-SUMME	10	9,9	25	9,9	42,8	9,9	50	38,3	16412,2	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,5	6,3	6,8	52,3	
Zw-SUMME	10	5,9	25	5,9	35	5,9	50	38,3	4252,3	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	1,2	1,4	10,2	
Zw-SUMME	10	5,6	25	5,6	30	5,6	50	38,3	2521,4	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,6	4,2	
Zw-SUMME	10	5,9	25	5,9	25	5,9	50	38,3	2990,1	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,4	5,6	3,0	
Zw-SUMME	10	6,5	25	6,5	20	6,5	50	38,3	2540,7	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	2,3	
Zw-SUMME	10	7,3	25	7,3	15	7,3	50	38,3	2781,8	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	1,8	
Zw-SUMME	10	20,4	25	20,4	10	20,4	50	38,3	9134,6	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,2	0,3	1,3	
SUMME							33,0	8754,1	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,3	0,5	0,7	1,9	11,1	77,6
Zw-SUMME	10	9,9	20	9,9	42,8	9,9	50	38,3	10355,4	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,3	6,3	6,6	54,0	
Zw-SUMME	10	5,9	20	5,9	35	5,9	50	38,3	2677,9	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	1,2	1,3	10,8	
Zw-SUMME	10	5,6	20	5,6	30	5,6	50	38,3	1567,8	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,5	0,6	4,4	
Zw-SUMME	10	5,9	20	5,9	25	5,9	50	38,3	1525,1	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,4	0,4	3,2	
Zw-SUMME	10	6,5	20	6,5	20	6,5	50	38,3	1660,0	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,4	2,0	
Zw-SUMME	10	7,3	20	7,3	15	7,3	50	38,3	1751,8	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,3	2,1	
Zw-SUMME	10	20,4	20	20,4	10	20,4	50	38,3	1974,0	8101,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,2	0,3	1,5	
SUMME	10	38,3	15	38,3	50	38,3	33,0	5512,8	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	0,5	0,6	2,8	10,6	81,9
Zw-SUMME	10	9,9	15	9,9	42,8	9,9	50	38,3	6981,1	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,2	6,3	6,5	55,7	
Zw-SUMME	10	5,9	15	5,9	35	5,9	50	38,3	1549,7	43250,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	1,0	1,0	10,0	
Zw-SUMME	10	5,6	15	5,6	30	5,6	50	38,3	918,9	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,5	0,6	4,6	
Zw-SUMME	10						33,0	871,0	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,4	0,4	3,4		

FZK-Mobilität Szenario	Schlagungsbewertung Auftragsintensität für										An"m"m² RFBI	RFBB	Exzentrie [°] Fahrstrafen	Schlagungsbewertung Auftragsaufwand für				Schlagungsbewertung																		
	1.LKW RFBB		Auftrags-		2.LKW RFBB		Auftrags-		1.LKW RFBB					Auftrags-		2.LKW RFBB		Auftrags-		LKW-Jahr ASP/FW/GF	RFBI	RFBB	RFBI	RFBB	Bspung [MM]²	Torsion [MM]²										
	OG [t]	gew.chtung [%]	OG [t]	gew.chtung [%]	OG [t]	gew.chtung [%]	OG [t]	gew.chtung [%]	OG [t]	gew.chtung [%]				OG [t]	gew.chtung [%]	OG [t]	gew.chtung [%]	OG [t]	gew.chtung [%]								OG [t]	gew.chtung [%]	OG [t]	gew.chtung [%]						
	10	5,9	15	5,9	25	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	302,9	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,4	23	
Zw-SUMME	10	6,5	15	6,5	20	6,5	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	302,9	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,4	23	
	10	7,3	15	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	1013,8	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,3	23	
Zw-SUMME	10	7,3	15	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	1013,8	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,3	23	
	10	20,4	15	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	1142,4	8161,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,2	0,3	18	
Zw-SUMME	10	20,4	15	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	1142,4	8161,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,2	0,3	18	
SUMME	10	38,3	10	38,3	50	38,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	3180,3	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,6	34	
Zw-SUMME	10	38,3	10	38,3	50	38,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	3180,3	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,5	0,6	34	
	10	9,9	10	9,9	42,8	9,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	3062,3	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	56,5	
Zw-SUMME	10	9,9	10	9,9	42,8	9,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	3062,3	219133,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,1	0,3	0,4	56,5	
	10	5,9	10	5,9	35	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	793,4	43290,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	1,2	1,3	11,1	
Zw-SUMME	10	5,9	10	5,9	35	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	793,4	43290,7	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	1,2	1,3	11,1	
	10	5,6	10	5,6	30	5,6	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	470,5	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,5	0,5	42	
Zw-SUMME	10	5,6	10	5,6	30	5,6	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	470,5	18517,8	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,5	0,5	42	
	10	5,9	10	5,9	25	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	446,0	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,4	0,4	33	
Zw-SUMME	10	5,9	10	5,9	25	5,9	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	446,0	13960,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,4	0,4	33	
	10	6,5	10	6,5	20	6,5	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	474,1	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,3	23	
Zw-SUMME	10	6,5	10	6,5	20	6,5	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	474,1	11581,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,3	23	
	10	7,3	10	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	519,0	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,3	24	
Zw-SUMME	10	7,3	10	7,3	15	7,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	519,0	9677,2	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,3	0,3	24	
	10	20,4	10	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	554,9	8161,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,2	0,3	22	
Zw-SUMME	10	20,4	10	20,4	10	20,4	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	554,9	8161,9	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,2	0,3	22	
SUMME	10	38,3	10	38,3	50	38,3	50	38,3	42,8	9,9	35	5,9	30	5,6	25	5,9	20	6,5	15	7,3	10	20,4	33,9	1638,4	16270,5	9,1	121874	1192929	2,4	29518	28899	0,0	0,5	0,5	38	
																																		16,1	88,9	
																																			39,3	177,5