



Doctoral Thesis

ANALYSIS OF THE FATIGUE BEHAVIOUR OF THE SCSC PLATE

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

ANALYSE DES ERMÜDUNGSVERHALTENS DER SCSC-PLATTE

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

Dipl.-Ing. Patrik Takács
Matrikelnummer 1127216
Leibnizgasse 20/15, 1100 Wien, Österreich

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink
Institut für Tragkonstruktionen -
Forschungsbereich für Stahlbau, TU Wien
Karlsplatz 13/212, 1040 Wien, Österreich

Gutachter: O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. Johann Kollegger
Institut für Tragkonstruktionen -
Forschungsbereich für Stahlbau, TU Wien
Karlsplatz 13/212, 1040 Wien, Österreich

Gutachter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterweger
Institut für Stahlbau, TU Graz
Lessingstraße 25/III, 8010 Graz, Österreich

Wien, Juli 2018

.....

Für meine Frau Dóra
und meine Tochter Emily.

Kurzfassung

An der *Technischen Universität Wien* am *Institut für Tragkonstruktionen* im Forschungsbereich für *Stahlbau* wird eine neue, extrem schlanke *Steel-Concrete-Steel-Composite* (SCSC) Platte untersucht, mit der wesentliche Randbedingungen (niedrige Bauhöhe, Reduktion Lärmemission durch Schotteroberbau) bei Ersatzneubauten von Eisenbahnbrücken älterer Bauart befriedigt werden. Der mehrschichtige Aufbau der Platte besteht aus zwei außenliegenden Stahlblechen mit unbewehrtem Betonkern, daher der Name Sandwichplatte. Lochdübelleisten, wechselweise nur am oberen und nur am unteren Blech angeschweißt, dienen der Schubübertragung zwischen den äußeren Blechen durch die Aktivierung von diagonal liegenden, horizontalen Betondruckstreben zwischen benachbarten Dübelleisten. Zusätzlich zur Weiterleitung der Vertikallasten in Querrichtung zu den Hauptträgern wirkt die SCSC-Platte als Untergurt der Brückenhauptträger. Untersuchungen zur Tragfähigkeit ohne Ermüdung sowie die Erläuterung des Tragmechanismus der SCSC-Platte erfolgten in [1, 2, 3]. Der nächste Schritt zur Anwendbarkeit der SCSC-Platte als Fahrbahndeck für Eisenbahnbrücken war die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens dieses Bauteils. Die rechnerische Beurteilung des Tragverhaltens bei Ermüdungsbeanspruchungen wird in dieser Arbeit vorgestellt, wobei der Fokus auf das Ermüdungsverhalten der Lochdübelleiste als Konstruktionselement mit Schlüsselfunktion (Schubübertragung durch Betondruckstreben) für die Tragwirkung der SCSC-Platte gerichtet ist. Die Ermüdungsanalysen wurden anhand nichtlinearer, dreidimensionaler Finite-Elemente-Modelle als Grundlage für die Lebensdauerberechnung mithilfe der Kerbdehnungsmethode durchgeführt. Ziel war es, die Beziehung zwischen dem Niveau der Verkehrslast (*Lastmodell 71* [4]) und der ertragbaren Anzahl der Schwingspiele bis Rissbildung in den Dübelleisten entsteht, zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, bei denen sowohl der Einfluss vieler Modellierungsparameter auf die Lebensdauer, als auch reale Einflüsse wie Stahlsorte, Betongüte und Schotterbetthöhe, die während der Planung und der Realisierung eines Brückenprojektes variiert werden können, untersucht wurden. Schließlich wurden die Wöhlerlinien in Analogie zu den im *Eurocode 3* [5] angegebenen Kerbfallklassen nach Linearisierung ihrer nichtlinearen Funktionsverläufe nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch die Wöhlerlinienneigung m und der ertragbare Verkehrslastschwingbreite ΔP bei zwei Millionen Lastwechseln definiert.

Abstract

At Vienna University of Technology, Institute of Structural Engineering, Research Centre of Steel Structures, a new, extremely slender steel-concrete-steel composite (SCSC) plate is under investigation to meet the requirements of today's standards related to the geometric conditions and noise emission in the substitution of old railway bridges. The multi-layer structure of the plate consists of two steel cover plates with an unreinforced concrete core, hence the name of sandwich plate. Perforated shear connectors, welded alternately to only one of the outer steel plates, work together to ensure the transmission of the shear flow between the outer plates, by the activation of diagonal, horizontal concrete compression struts between neighboring dowel bars. In addition to the distribution of the vertical loads in cross direction to the main girders, the SCSC deck slab also acts as main girder bottom flanges. Investigations on the static load-bearing capacity as well as an explanation of the load-carrying mechanism of the SCSC plate were made in [1, 2, 3]. The next step towards the application of the SCSC plate as a deck slab for railway bridges was to investigate the fatigue behaviour of this structural element. Evaluation of the fatigue behaviour of the SCSC plate is presented in this work, focusing on the fatigue life of shear connectors. In the course of research nonlinear, three-dimensional finite element models served as basis for the lifetime calculations using the local strain-life method. The aim was to investigate the relation between the range of traffic load (*Load Model 71* [4]) and the bearable number of load cycles of the SCSC plate till crack initiation in the shear connectors. For this purpose, extensive parameter studies were carried out, which examined the influence of many modeling parameters on the lifetime, as well as real influences such as steel grade, concrete grade and ballast bed height, which can be varied during the planning and realization of a bridge project. Finally, the Wöhler curves were defined analogously to the fatigue strength categories specified in Eurocode 3 [5]: After linearization of their nonlinear functions using the least squares method they were defined by the slope m and the sustainable traffic load range ΔP at two million cycles.

Keywords:

SCSC-Platte, Eisenbahnbrücke, Lochdübelreihe, Ermüdung, Kerbdehnungskonzept

SCSC plate, railway bridges, shear connectors, fatigue, strain-life method

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Kurzfassung | iii |
| Abstract | v |
| Inhaltsverzeichnis | vii |
| Nomenklatur, Symbole und Variable | xi |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangsituation und Zielsetzung | 1 |
| 1.2 Aufbau der Arbeit | 2 |
| 2 Forschung und Entwicklung | 5 |
| 2.1 Prinzipieller Tragmechanismus der SCSC-Sandwich Platte | 5 |
| 2.2 Tragverhalten der SCSC-Platte unter vorwiegend ruhender Beanspruchung..... | 6 |
| 2.3 Tragverhalten der SCSC-Platte unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung..... | 8 |
| 2.4 Forschung zum Ermüdungsverhalten von Dübelleisten | 9 |
| 2.5 Wesentliche Festlegungen zu der vorliegenden Arbeit..... | 10 |
| 3 Theoretische Grundlagen der Betriebsfestigkeitsberechnung | 13 |
| 3.1 Einleitung | 13 |
| 3.2 Grundlagen zur Ermüdungsbeanspruchung | 13 |
| 3.3 Kerbwirkung | 15 |
| 3.4 Grundlagen zur Ermüdungsfestigkeit | 16 |
| 3.5 Einflüsse auf die Schwingfestigkeit | 18 |
| 3.6 Überblick über die Nachweiskonzepte | 20 |
| 3.7 Grundlagen der Kerbdehnungskonzeptes..... | 22 |
| 4 Numerische Untersuchungen | 35 |
| 4.1 Einleitung | 35 |
| 4.2 Angestrebte Ergebnisse..... | 36 |
| 4.3 Modellbeschreibung | 36 |
| 4.3.1 Bestandteile der SCSC-Platte | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3.2 | Berechnungsalgorithmus, Elementwahl, Kontaktdefinitionen, Diskretisierung..... | 38 |
| 4.3.3 | Eingabewerte der Materialmodelle..... | 42 |
| 4.3.4 | Lagerungsbedingungen der Platte..... | 49 |
| 4.4 | Belastung der SCSC-Platte..... | 50 |
| 4.4.1 | Einleitung..... | 50 |
| 4.4.2 | Ständige Belastungen..... | 52 |
| 4.4.3 | Lastmodell 71..... | 53 |
| 4.4.4 | Negative Plattenmomente..... | 59 |
| 4.5 | Kritische Bereiche der SCSC-Platte für die Lebensdauerberechnung..... | 59 |
| 4.6 | Berechnungsergebnisse..... | 65 |
| 4.6.1 | Ausgabedaten zur Verifikation der Berechnungsergebnisse..... | 67 |
| 4.6.2 | Eingangswerte für die Lebensdauerberechnung..... | 69 |
| 4.6.3 | Resultierende Dübelbeanspruchung..... | 72 |
| 4.6.4 | Minimale Hauptdruckspannungen im Beton..... | 75 |
| 4.6.5 | Schädigung des Betons..... | 78 |
| 4.6.6 | Zum Thema der mitwirkenden Plattenbreite..... | 79 |
| 4.6.7 | Richtung der Hauptzugspannungen in der Lochdübelleiste..... | 80 |
| 5 | Lebensdauerberechnung | 81 |
| 5.1 | Ausgangssituation und Zielsetzung..... | 81 |
| 5.2 | Definierung einzelner Schwingspiele..... | 82 |
| 5.3 | Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes für die Lochdübelleiste der SCSC-Platte..... | 84 |
| 5.3.1 | Einleitung und Problemdarstellung..... | 84 |
| 5.3.2 | Auswahl der zu verwendenden Arbeitslinie..... | 84 |
| 5.3.3 | Methodik zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsfläche..... | 85 |
| 5.3.4 | Ansätze der Lebensdauerberechnung..... | 85 |
| 5.4 | Ermittlung der zutreffenden Hystereseschleife..... | 87 |
| 5.4.1 | Einleitung..... | 87 |
| 5.4.2 | Beschreibung der Vorgehensweise für ein kritisches Element..... | 91 |
| 5.4.3 | Ergebnisdarstellung anhand des Modells <i>TYP 10</i> | 102 |
| 5.5 | Schädigungsbewertung..... | 111 |
| 5.6 | Auswahl des maßgebenden Elementes pro Laststufe..... | 113 |
| 5.7 | Wöhlerlinien für das Konstruktionselement Lochdübel der SCSC-Platte..... | 114 |
| 5.8 | Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit..... | 119 |
| 5.9 | Anpassung des Sicherheitsniveaus..... | 121 |
| 5.10 | Berücksichtigung des widerstandsseitigen Teilsicherheitsbeiwertes..... | 126 |
| 5.11 | Linearisierung der Bauteil-Wöhlerlinien..... | 130 |

| | |
|--|------------|
| 6 Parameterstudien | 139 |
| 6.1 Einleitung..... | 139 |
| 6.2 Parameterstudie I: Modellierungsparameter..... | 141 |
| 6.2.1 Einfluss der Netzfeinheit..... | 141 |
| 6.2.2 Maßgebende Dübelleiste für Ermüdungsbeanspruchung..... | 158 |
| 6.2.3 Einfluss der Schweißnahtmodellierung..... | 163 |
| 6.2.4 Einfluss des Betonmodells..... | 167 |
| 6.2.5 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit..... | 171 |
| 6.3 Parameterstudie II: Reale Einflüsse..... | 173 |
| 6.3.1 Einfluss der Stahlsorte und der Betongüte..... | 173 |
| 6.3.2 Einfluss der Schotterbetthöhe..... | 177 |
| 7 Ergebnisanalyse, Zusammenfassung und Ausblick | 181 |
| 7.1 Ergebnisanalyse..... | 181 |
| 7.1.1 Vergleich der Schädigungsbewertung auf Basis der Haupt- bzw. Vergleichsspannungen..... | 181 |
| 7.1.2 Relevante Lebensdauerwerte..... | 183 |
| 7.1.3 Beispiel zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit Lochdübelleiste..... | 184 |
| 7.2 Zusammenfassung..... | 187 |
| 7.3 Ausblick..... | 189 |
| Literaturverzeichnis | i |
| Anhang A - ABAQUS | i |
| A.1 Werkstoffmodelle..... | i |
| A.1.1 Baustahl S355..... | i |
| A.1.2 Baustahl S235..... | ii |
| A.1.3 Beton C40/50..... | iii |
| A.1.4 Beton C25/30..... | v |
| A.2 Kritische Elemente..... | vii |
| A.3 Meshvarianten..... | x |
| Anhang B - R-FEM | i |
| B.1 Schnittgrößenverläufe..... | i |
| Anhang C - Excel-Tabellen | i |
| C.1 Belastungen der SCSC-Platte..... | i |
| C.1.1 Abmessungen, Belastungsflächen..... | i |
| C.1.2 Teilsicherheitsbeiwerte und andere Faktoren..... | i |

| | |
|--|----------|
| C.1.3 Ständige Belastungen..... | ii |
| C.1.4 Verkehrslast | iii |
| C.1.5 Summe der Belastungen | iii |
| C.1.6 Angesetzte Belastungen | iii |
| C.1.7 Belastungsgeschwindigkeit..... | iii |
| C.2 Beispiel für die Lebensdauerberechnung (Modell <i>TYP 10</i>) | iv |
| C.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des Modells <i>TYP 10</i> | xvii |
| Anhang D - Wöhlerlinien | i |

Nomenklatur, Symbole und Variable

Abkürzungen

| | |
|-----------------|--|
| <i>ALLIE</i> | Verzerrungsenergie in <i>ABAQUS</i> |
| <i>ALLKE</i> | kinetische Energie in <i>ABAQUS</i> |
| bzw. | beziehungsweise |
| CDP | <i>Concrete Damage Plasticity</i> (Materialmodell für Beton in <i>ABAQUS</i>) |
| CMP | <i>Classic Metal Plasticity</i> (Materialmodell für Stahl in <i>ABAQUS</i>) |
| FE | Finite Elemente |
| FKM | Forschungskuratorium für Maschinenbau |
| FLS | <i>Fatigue Limit State</i> (Grenzzustand der Ermüdung) |
| Gl. | Gleichung |
| IIW | International Institute of Welding |
| inf. | infolge |
| <i>LM71</i> | <i>Lastmodell 71</i> |
| <i>LM71</i> ☐☑ | <i>Lastmodell 71</i> ohne Längswirkung, mit Beiwerte |
| <i>LM71</i> ☑☑ | <i>Lastmodell 71</i> mit Längswirkung, mit Beiwerte |
| <i>LM71</i> ☐☐ | <i>Lastmodell 71</i> ohne Längswirkung, ohne Beiwerte |
| <i>LM71</i> ☑☐ | <i>Lastmodell 71</i> mit Längswirkung, ohne Beiwerte |
| Nr. | Nummer |
| ÖBB | <i>Österreichischen Bundesbahnen</i> |
| s. | siehe |
| SCSC | <i>Steel-Concrete-Steel-Composite</i> (Sandwichkonstruktion aus Stahl und Beton) |
| stä. Bel. | ständige Belastung |
| TU WIEN | Technische Universität Wien |
| <i>TYP 1-13</i> | Bezeichnungen der FE-Modelle der Parameterstudie I |
| <i>TYP A-E</i> | Bezeichnungen der FE-Modelle der Parameterstudie II |
| ULS | <i>Ultimate Limit State</i> (Grenzzustand der Tragfähigkeit) |
| vgl. | vergleich |

Lateinische Kleinbuchstaben

| | |
|--------------------------|---|
| b | zyklischer Spannungs-Exponent des Werkstoffs |
| c | zyklischer Dehnungs-Exponent des Werkstoffs |
| d | Probengröße |
| d_c | Druckschädigungsparameter des Betons |
| d_{max} | Größtkorndurchmesser des Betons |
| d_t | Zugschädigungsparameter des Betons |
| e | Lastexzentrizität des <i>Lastmodells 71</i> |
| f_{b0}/f_{c0} | Verhältnis der zweiaxialen zur einaxialen Druckfestigkeit des Betons |
| $f_{c,min}$ | minimale Hauptdruckspannung im Beton |
| f_{ck} | charakteristischer Wert der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit des Betons |
| f_{cm} | Mittelwert der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit des Betons |
| f_{ctm} | Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons |
| f_{cu1} | Spannung des Betons unter Wirkung der Bruchdehnung ε_{cu1} |
| f_u | Zugfestigkeit des Baustahls |
| f_y | Fließgrenze des Baustahls |
| f_{yk} | charakteristischer Wert der Fließgrenze des Baustahls |
| f_{yd} | Bemessungswert der Fließgrenze des Baustahls |
| $g_{k,Ausbau}$ | charakteristischer Wert des Eigengewichts der Ausbaulasten |
| $g_{k,Platte}$ | charakteristischer Wert des Eigengewichts der SCSC-Platte |
| k | Neigungskennzahl der Wöhlerlinie |
| m_y | Biegemoment in der SCSC-Platte |
| $m_{\Delta P, \sigma 1}$ | Neigung der Wöhlerlinie $\Delta P-N_{PSWT, \kappa, Pü97.5, \gamma Mf, \sigma 1}$ |
| $m_{\Delta P, \sigma V}$ | Neigung der Wöhlerlinie $\Delta P-N_{PSWT, \kappa, Pü97.5, \gamma Mf, \sigma V}$ |
| $m_{\Delta \sigma 1}$ | Neigung der Wöhlerlinie $\Delta \sigma_1-N_{PSWT, \kappa, Pü97.5, \gamma Mf, \sigma 1}$ |
| $m_{\Delta \sigma V}$ | Neigung der Wöhlerlinie $\Delta \sigma_V-N_{PSWT, \kappa, Pü97.5, \gamma Mf, \sigma V}$ |
| n' | zyklischer Verfestigungs-Exponent |
| $q_{äqu}$ | äquivalente Flächenlast |
| $q_{v,k}$ | charakteristischer Wert der Verkehrslast |
| s | Standardabweichung |
| u | standardisierte normalverteilte Zufallsvariable der u-Verteilung |
| u | Durchbiegung |
| $u_{stä}$ | ständiger Anteil der Durchbiegung |
| u_t^{ck} | Rissöffnung des Betons |
| u_{zyk} | zyklischer Anteil der Durchbiegung |
| v_y | Querkraft in der SCSC-Platte |

Lateinische Großbuchstaben

| | |
|---|---|
| A_{netto} | Nettoquerschnitt |
| E | Elastizitätsmodul |
| E_{cm} | mittlerer Elastizitätsmodul des Betons |
| $E_{d,FLS}$ | Bemessungswert der Einwirkungen in Grenzzustand der Ermüdung |
| G | ständiger Belastung |
| G_f | Bruchenergie des Betons unter Druckbeanspruchung |
| K_c | Formfaktor des Betonmodells in <i>ABAQUS</i> |
| K' | zyklischer Festigkeits-Koeffizient |
| L_{Φ} | bezogene Länge |
| M_y | Stabmoment um die Y-Achse |
| N | Lastspielzahl |
| N_D | Lastspielzahl bei Dauerfestigkeit |
| $N_{PSWT,\sigma 1}$ | Anrisslebensdauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und der Normalspannungshypothese nach <i>Rankine</i> |
| $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$ | Anrisslebensdauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und der Normalspannungshypothese nach <i>Rankine</i> unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit |
| $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\sigma 1}$ | Anrisslebensdauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und der Normalspannungshypothese nach <i>Rankine</i> unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit und der erhöhten Überlebenswahrscheinlichkeit |
| $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ | Anrisslebensdauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und der Normalspannungshypothese nach <i>Rankine</i> unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit, der erhöhten Überlebenswahrscheinlichkeit und des widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwertes |
| $N_{PSWT,\sigma V}$ | Anrisslebensdauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und der Gestaltänderungsenergiehypothese nach <i>von Mises</i> |
| $N_{PSWT,\kappa,\sigma V}$ | Anrisslebensdauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und der Gestaltänderungsenergiehypothese nach <i>von Mises</i> unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit |

| | |
|---|--|
| $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\sigma V}$ | Anrisslebensddauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und der Gestaltänderungsenergiehypothese nach <i>von Mises</i> unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit und der erhöhten Überlebenswahrscheinlichkeit |
| $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ | Anrisslebensddauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und der Gestaltänderungsenergiehypothese nach <i>von Mises</i> unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit, der erhöhten Überlebenswahrscheinlichkeit und des widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwertes |
| $N_{\sigma 1}$ | Anrisslebensddauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Dehnungs-Wöhlerlinien und der Normalspannungshypothese nach <i>Rankine</i> |
| $N_{\sigma V}$ | Anrisslebensddauer nach dem Kerbdehnungskonzept auf Basis von Dehnungs-Wöhlerlinien und der Gestaltänderungsenergiehypothese nach <i>von Mises</i> |
| $N_{\square\square}$ | Lastspielzahl unter <i>Lastmodell 71</i> ohne Längswirkung, mit Beiwerte |
| $N_{\square\square}$ | Lastspielzahl unter <i>Lastmodell 71</i> mit Längswirkung, mit Beiwerte |
| $N_{\square\square}$ | Lastspielzahl unter <i>Lastmodell 71</i> ohne Längswirkung, ohne Beiwerte |
| $N_{\square\square}$ | Lastspielzahl unter <i>Lastmodell 71</i> mit Längswirkung, ohne Beiwerte |
| P | Kraft |
| P_a | Lastamplitude |
| $P_{Dübel,i}$ | Schubkräfte der einzelnen Dübeln |
| P_m | Mittellast |
| P_o | Oberlast |
| $P_{stä}$ | ständiger Anteil der Belastung |
| P_{SWT} | Schädigungsparameter-Wöhlerlinie nach <i>Smith, Topper</i> und <i>Watson</i> |
| P_{SWT} | Schädigung nach <i>Smith, Topper</i> und <i>Watson</i> |
| $P_{SWT,\kappa}$ | Schädigungsparameter-Wöhlerlinie nach <i>Smith, Topper</i> und <i>Watson</i> unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit |
| $P_{SWT,\kappa,Pü97.5}$ | Schädigungsparameter-Wöhlerlinie nach <i>Smith, Topper</i> und <i>Watson</i> unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit und der erhöhten Überlebenswahrscheinlichkeit |
| $P_{SWT,\sigma 1}$ | Schädigung nach <i>Smith, Topper</i> und <i>Watson</i> auf Basis der Normalspannungshypothese nach <i>Rankine</i> |
| $P_{SWT,\sigma V}$ | Schädigung nach <i>Smith, Topper</i> und <i>Watson</i> auf Basis der Gestaltänderungsenergiehypothese nach <i>von Mises</i> |
| P_u | Unterlast |

| | |
|----------------|---|
| $P_{\ddot{u}}$ | Überlebenswahrscheinlichkeit |
| P_{zyk} | zyklischer Anteil der Belastung |
| Q_k | charakteristischer Wert der veränderlichen Belastung |
| R | Spannungsverhältnis |
| R_m | statische Zugfestigkeit des Baustahls |
| R_t | maximale Rauftiefe |
| R_z | gemittelte Rauftiefe |
| T | Temperatur |
| T_N | Streuspanne der Schwingspielzahl |
| $T_{P97.5\%}$ | Faktor zur Berücksichtigung der erhöhten Überlebenswahrscheinlichkeit |

Griechische Buchstaben

| | |
|-------------------------------|---|
| α | Lastklassenbeiwert |
| α | Neigungswinkel der Wöhlerlinie zur Vertikalen |
| α | Parameter der Arbeitslinie des Beton im Druckbereich |
| α_k | Kerbformzahl |
| γ_{Ff} | Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungslasten |
| γ_G | Einwirkungsseitiger Teilsicherheitsbeiwert |
| γ_{Mf} | Widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert |
| γ_R | Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit |
| Δ | Differenz |
| $\Delta LM71$ | Belastung unter der alleinige Wirkung von <i>Lastmodell 71</i> |
| ΔP | Lastschwingbreite |
| ΔP_{Ed} | einwirkende Lastschwingbreite |
| $\Delta P_{Ed,2M}$ | einwirkende Lastschwingbreite bei zwei Millionen Lastspielzahl |
| ΔP_{Rd} | Bemessungswert der Dübeltragfähigkeit |
| $\Delta P_{Rd,2M}$ | Bemessungswert der Dübeltragfähigkeit bei zwei Millionen Lastspielzahl |
| $\Delta P_{\gamma_{Mf}}$ | Verkehrslastschwingbreite unter Berücksichtigung des widerstandsseitigen Teilsicherheitsbeiwertes |
| $\Delta \varepsilon$ | Dehnungsschwingbreite |
| $\Delta \varepsilon_{el}$ | elastischer Anteil der Dehnungsschwingbreite |
| $\Delta \varepsilon_{pl}$ | plastischer Anteil der Dehnungsschwingbreite |
| $\Delta \sigma$ | Normalspannungsschwingbreite |
| $\Delta \sigma_R$ | Ermüdungsfestigkeit |
| $\Delta \sigma_{\gamma_{Mf}}$ | Spannungsschwingbreite unter Berücksichtigung des widerstandsseitigen Teilsicherheitsbeiwertes |
| $\Delta \tau$ | Schubspannungsschwingbreite |
| ε | Dehnung |
| ε_1 | Hauptzugverzerrung nach <i>Rankine</i> |
| $\varepsilon_{1,a}$ | Hauptzugverzerrungsamplitude nach <i>Rankine</i> |
| $\varepsilon_{1,stä}$ | ständiger Anteil der Hauptzugverzerrung nach <i>Rankine</i> |
| $\varepsilon_{1,zyk}$ | zyklischer Anteil der Hauptzugverzerrung nach <i>Rankine</i> |
| ε_a | Dehnungsamplitude |
| $\varepsilon_{a,el}$ | elastischer Anteil der Dehnungsamplitude |
| $\varepsilon_{a,pl}$ | plastischer Anteil der Dehnungsamplitude |
| ε_c | Betondruckdehnung |

| | |
|-----------------------|--|
| ε_{c1} | Betondehnung unter Wirkung der Maximalspannung (Zylinderdruckfestigkeit) f_{cm} |
| ε_c^{in} | inelastische Dehnung des Betons |
| ε_{cu1} | Bruchdehnung des Betons |
| ε_m | Mitteldehnung |
| ε_o | Oberdehnung |
| ε_p | plastische Dehnung |
| ε_u | Untersdehnung |
| ε_V | Vergleichsdehnung nach <i>Mises</i> |
| $\varepsilon_{V,a}$ | Vergleichsdehnungsamplitude nach <i>Mises</i> |
| $\varepsilon_{V,stä}$ | ständiger Anteil der Vergleichsdehnung nach <i>Mises</i> |
| $\varepsilon_{V,zyk}$ | zyklischer Anteil der Vergleichsdehnung nach <i>Mises</i> |
| ε'_f | zyklischer Dehnungs-Koeffizient des Werkstoffs |
| κ | Oberflächenfaktor |
| λ | Schadenäquivalenzfaktor |
| λ_1 | Spannweitenfaktor |
| λ_2 | Verkehrsstärkenfaktor |
| λ_3 | Lebensdauerfaktor |
| λ_4 | Spurfaktor |
| λ_{max} | Obergrenze des Schadenäquivalenzfaktors zur Berücksichtigung der Dauerfestigkeit |
| μ | Reibungskoeffizient |
| ρ | Dichte |
| σ | Spannung |
| σ_1 | Hauptzugspannung nach <i>Rankine</i> |
| $\sigma_{1,a}$ | Hauptzugspannungsamplitude nach <i>Rankine</i> |
| $\sigma_{1,m}$ | Mittelspannung nach <i>Rankine</i> |
| $\sigma_{1,stä}$ | ständiger Anteil der Hauptzugspannung nach <i>Rankine</i> |
| $\sigma_{1,stä,max}$ | maximale Hauptzugspannung in der Lochdübelreihe unter der ständigen Belastung |
| $\sigma_{1,zyk}$ | zyklischer Anteil der Hauptzugspannung nach <i>Rankine</i> |
| $\sigma_{1,zyk,max}$ | maximale Hauptzugspannung in der Lochdübelreihe unter der alleinigen Wirkung von Verkehrslast |
| σ_a | Spannungsamplitude |
| σ_D | Dauerfestigkeit |
| σ_C | Betondruckspannung |

| | |
|-----------------------------|--|
| $\sigma_{k,max}$ | maximale Spannung infolge Kerbwirkung |
| σ_m | Mittelspannung |
| σ_n | Nennspannung |
| σ_o | Oberspannung |
| σ_R | Restspannung |
| σ_t | Zugspannung des Betons |
| σ_u | Unterspannung |
| σ_V | Vergleichsspannung nach <i>von Mises</i> |
| $\sigma_{V,a}$ | Vergleichsspannungsamplitude nach <i>von Mises</i> |
| $\sigma_{V,m}$ | Mittelspannung nach <i>von Mises</i> |
| $\sigma_{V,st\ddot{a}}$ | ständiger Anteil der Vergleichsspannung nach <i>von Mises</i> |
| $\sigma_{V,st\ddot{a},max}$ | maximale Vergleichsspannung in der Lochdübelleiste unter der ständigen |
| $\sigma_{V,zyk}$ | zyklischer Anteil der Vergleichsspannung nach <i>von Mises</i> |
| $\sigma_{V,zyk,max}$ | maximale Vergleichsspannung in der Lochdübelleiste unter der alleinige Wirkung von Verkehrslast |
| σ_x | Membranspannung in der Platte |
| σ_z | Zugfestigkeit des Baustahls |
| σ'_f | zyklischer Spannungs-Koeffizient des Werkstoffs |
| τ | Schubspannung |
| ν | Querdehnzahl |
| ψ | Parameter zur Beschreibung des zyklischen Baustahlverhaltens |
| ψ_c | Dilatationswinkel des Betonmodells |
| Φ_2 | dynamischer Beiwert oder schädigungsäquivalenter Schwingbeiwert |
| ϵ | Exzentrizität des Betonmodells in <i>ABAQUS</i> |

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Am *Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau* der *TU Wien* wurde eine eingleisige Trogbücke mit einem Fahrbahndeck als 120 mm dicke Grobblechplatte entwickelt, siehe Abbildung 1.1, links. Dieser Querschnitt führt zu einer extrem minimierten Bauhöhe zwischen Tragwerksunterkante und Schwellenoberkante und repräsentiert somit eine aktuelle Bauart bei den Ersatzneubauten (mit Schotteroberbau) von alten Bestandtragwerken mit offener Fahrbahn, die von den *Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB)* angewendet wird. Obwohl dieser Querschnittstyp die Anforderung nach extrem niedriger Bauhöhe erfüllt, birgt er dennoch auch Nachteile wie die begrenzte Verfügbarkeit der dicken Grobbleche bei niedriger Bestelltonnage und die technologisch anspruchsvolle Herstellung der Schweißstöße der Fahrbahnplatte. Um diese Probleme zu vermeiden, wurde eine neue Variante zur Grobblechplatte mit einer sogenannten SCSC-Platte (steel-concrete-steel-composite) als Fahrbahnkonstruktion entwickelt (siehe Abbildung 1.1, rechts).

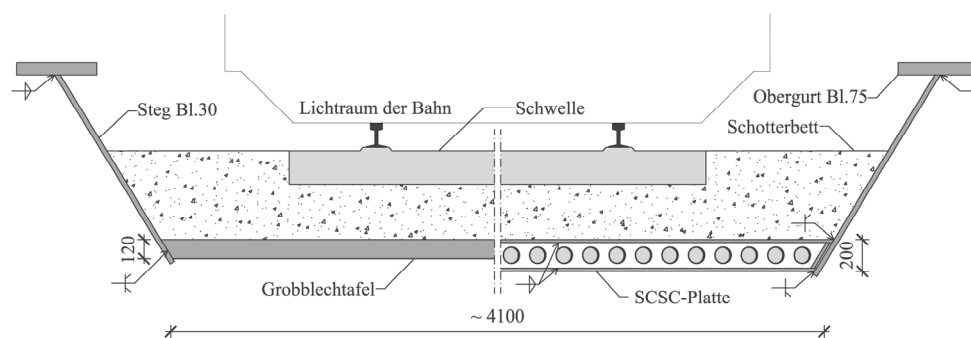


Abbildung 1.1: Vergleich der beiden Trogbückenquerschnitte mit Schotterbett; links: Fahrbahndeck als 120 mm dickes Grobblech; rechts: Fahrbahndeck als 200 mm dicke SCSC-Platte [1, 2, 6]. Abmessungen in [mm]

Umfangreiche Untersuchungen zum Tragverhalten der SCSC-Platte im Grenzzustand der Tragfähigkeit wurde von *Hermann* in [1] und von *Steurer* in [6] durchgeführt. Als Zusammenfassung der bisherigen Forschungsergebnisse kann man feststellen, dass die SCSC-Platte die wesentlichen Kriterien im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ohne Ermüdung) vollständig erfüllt. In Anbetracht, dass bei stählernen Eisenbahnbrücken Ermüdung fast immer die maßgebende Beanspruchungsart für die Bemessung ist, ist als nächster Schritt die Anwendbarkeit der SCSC-Platte als Fahrbahndeck für Eisenbahnbrücken im Grenzzustand der Ermüdung zu untersuchen. Im Einzelnen sind dabei folgende Teilaufgaben zu lösen:

- Die hinsichtlich Ermüdung gefährdeten Stellen der SCSC-Platte sind zu identifizieren.
- Ein rechnerisches Nachweisverfahren zur Bestimmung der Sicherheit gegen Ermüdungsversagen dieser Stellen ist zu ermitteln.
- Die ermittelten Ergebnisse sind in Analogie zu den im *Eurocode 3* [5] angegebenen Kerbfallklassen für einen späteren Anwender greifbar zu machen.
- In Form einer Parameterstudie sind die Wirkung unterschiedlicher Einflussfaktoren auf die Kerbbeanspruchungen in der maßgebenden Kerbe des Verbundbauteils zu untersuchen.

1.2 Aufbau der Arbeit

- **Forschung und Entwicklung**

Hier wird der Stand der Technik zum Tragverhalten der SCSC-Platte unter vorwiegend ruhender und nichtruhender Beanspruchung sowie zum Ermüdungsverhalten von Dübelleisten vorgestellt.

- **Theoretische Grundlagen der Betriebsfestigkeitsberechnung**

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der für die Lebensdauerberechnung eingesetzten Verfahren erläutert.

- **Numerische Untersuchungen**

Hier wird die Modellierung der Konstruktion mit dem nichtlinearen FE-Programm *ABAQUS* dargestellt und nach Identifizierung der kritischen Kerbstellen werden die Eingangsdaten zu der Lebensdauerberechnung ermittelt. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Ermüdungsbeurteilung der Lochdübelleiste.

- **Lebensdauerberechnung**

Mithilfe des Örtlichen Konzepts werden hier die „Anrisszeitpunkte“ der maßgebenden Kerbstellen ermittelt und in Form von Wöhlerdiagrammen dargestellt.

- **Parameterstudien**

Hier werden die Einflüsse unterschiedlicher Faktoren auf die Lebensdauer untersucht.

- **Analyse der Ergebnisse**

Schlussendlich werden aus den Ergebnissen der Forschungsarbeit Schlussfolgerungen gezogen.

Kapitel 2

Forschung und Entwicklung

2.1 Prinzipieller Tragmechanismus der SCSC-Sandwichplatte

Die Hauptkomponenten der SCSC-Platte sind die außen liegenden Stahlbleche, die Lochdübelleisten, die in einem Achsabstand von 500 mm wechselweise am oberen und unteren Blech angeschweißt sind, und der unbewehrte Betonkern, mit dem die gesamte Konstruktion ausgefüllt ist. Abbildung 2.1 veranschaulicht die einzelnen Produktionsschritte.

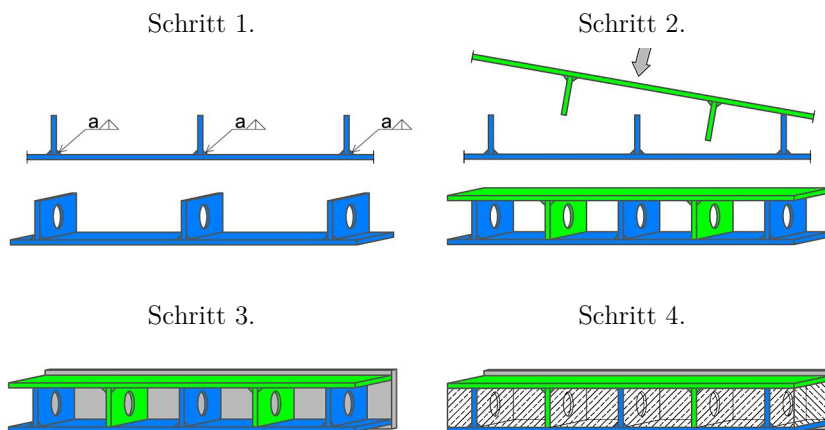


Abbildung 2.1: Produktionsschritte der SCSC-Platte [1]

Die Funktionsweise der SCSC-Platte beruht im Wesentlichen auf der Schubübertragung im Sandwichquerschnitt durch Ausbildung von horizontal liegenden Druckdiagonalen zwischen benachbarten Dübelleisten im Betonkörper, siehe rote Pfeile in Abbildung 2.2. Die sich so ausbildende schubfeste Verbindung zwischen den außen liegenden Stahlblechen ersetzt sozusagen die aus Gründen mangelnder Zugänglichkeit nicht ausführbare zweite Halskehlnaht der Dübelleisten, und aktiviert somit die „Steiner-Anteile“ der Stahlbleche [1].

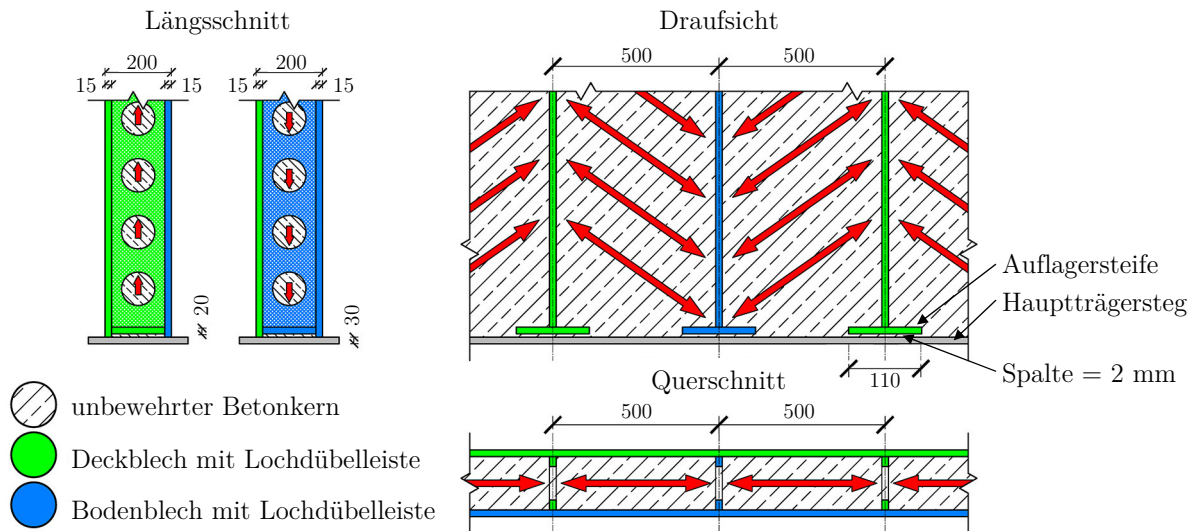


Abbildung 2.2: Prinzipielle Tragmechanismus der SCSC-Platte [1]

2.2 Tragverhalten der SCSC-Platte unter vorwiegend ruhender Beanspruchung

Untersuchungen zur Tragfunktionsanalyse von Plattenkonstruktionen mit Kronen- bzw. Lochdübelleisten mit dem Anspruch einer ingenieurmäßigen Modellbildung zur Beschreibung der Tragfunktion wurden von *Herrmann* in seiner Dissertation [1] durchgeführt. Die Forschungen umfassten numerische Untersuchungen und begleitende experimentelle Untersuchungen von SCSC-Platten mit reduzierter Stützweite von 2.520 mm und unterschiedlichen Dübelleistengeometrien. Die äußere Blechdicke betrug bei allen Versuchskörpern 20 mm, die Blechdicke der Dübelleisten wurden mit 20 mm bestimmt und die Gesamtplattenhöhe war 200 mm. Wesentliche Erkenntnisse seiner Arbeit ist die Identifizierung der Lochdübelleiste *TYP C* (s. Abbildung 2.3) gegenüber den anderen Arten von Dübelleisten als diejenige, die die günstigste Eigenschaften bezüglich ihrer Tragfähigkeit und Duktilität aufweist.

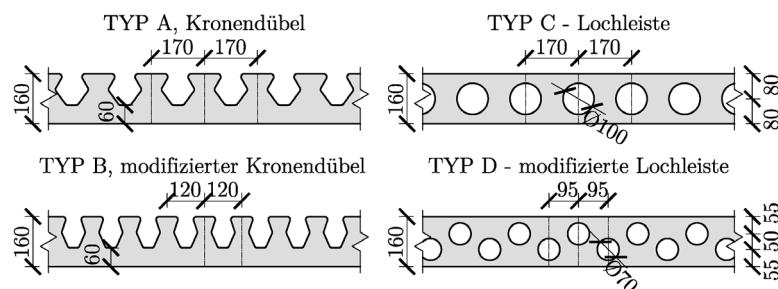


Abbildung 2.3: Vergleich der von *Herrmann* in [1] untersuchten Dübelleistengeometrien

Zur Verbesserung der Parameterkombination der Eingabewerte für den Werkstoff Beton im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse und somit die bestmögliche Anpassung der rechnerischen zur versuchstechnisch ermittelten Arbeitslinie wurden von *Steurer* [6] umfangreiche Vorversuche an speziellen Push-Out-Versuchskörpern durchgeführt. Anschließende Hauptversuche (s. Abbildung 2.4) an Sandwichplatten mit 4.080 mm Stützweite und 3 m Plattenbreite stellten den wesentlichen Schwerpunkt ihrer Forschungsarbeit dar, wobei der Fokus auf die Bestimmung des Tragverhaltens ohne Ermüdung lag. Im Zuge der Versuchsreihen wurden zwei Serien von je drei baugleichen Versuchskörpern (*TYP 1* mit äquidistanter Austeilung der Dübelleisten und *TYP 2* mit eng benachbart liegenden Dübelleistenpaaren, s. Abbildung 2.5) getestet. Die äußere Blechdicke wurde im Vergleich zu den vorherigen Untersuchungen auf 15 mm reduziert, die Blechdicke der Dübelleiste mit 20 mm und die Gesamtplattenhöhe mit 200 mm wurden unverändert gelassen.

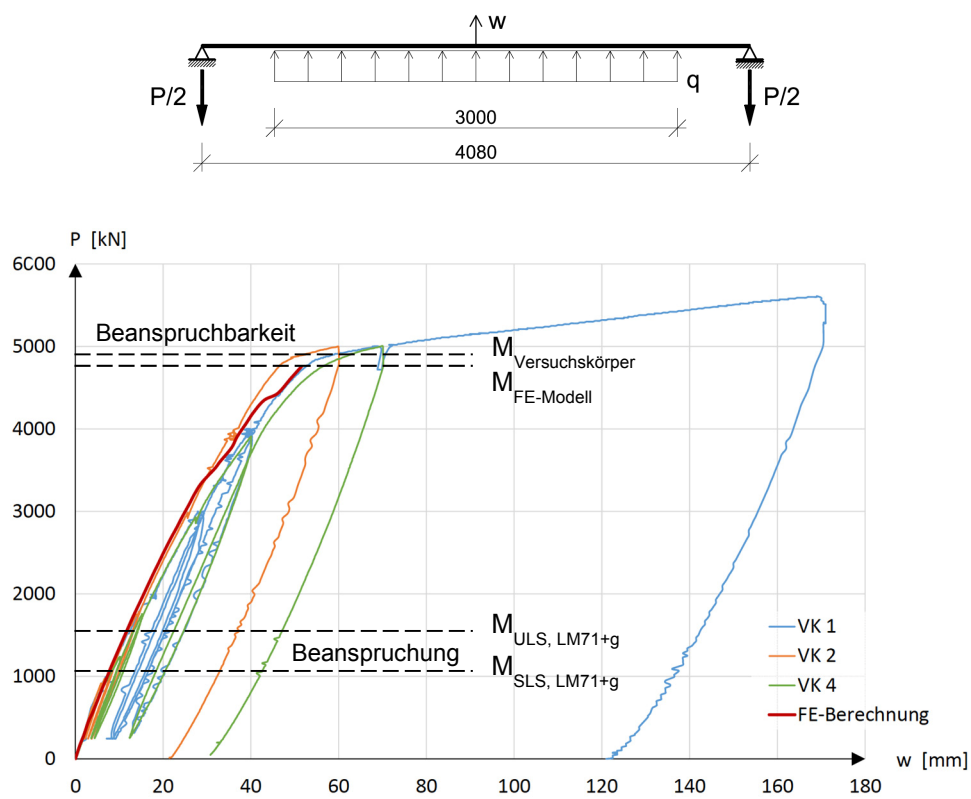


Abbildung 2.4: Teilbild oben: Versuchskonfiguration des SCSC-Platte
Teilbild unten: Resultierendes Kraft-Verschiebungs-Diagramm [6]

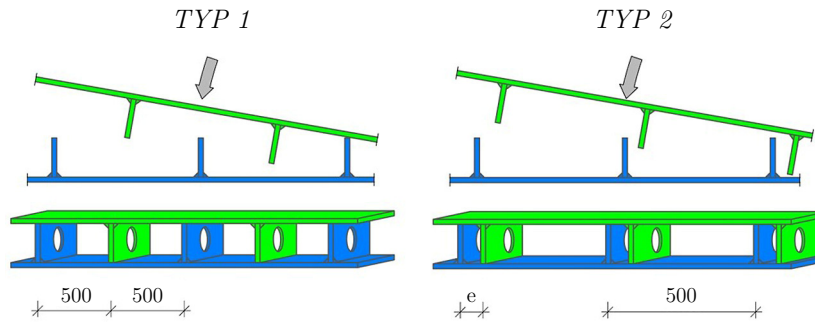


Abbildung 2.5: Vergleich der von *Steurer* in [6] untersuchten Dübelleistenkonfigurationen

Als wesentliche Erkenntnisse ihrer Arbeit sind die folgenden Punkte zu nennen:

- Die SCSC-Platte mit äquidistant verteilten Dübelleisten (*TYP 1*) zeigt ein günstigeres Tragverhalten gegenüber der Variante mit benachbart liegenden Dübelleistenpaaren.
- Die Sandwichplatte weist eine ausgesprochen hohe Duktilität auf:
Durchbiegung *TYP 1* in Feldmitte ≈ 170 mm (s. Abbildung 2.4 unten).
- Die SCSC-Platte besitzt unter statischer Belastung im baupraktisch interessanten Bereich bis über das ULS-Lastniveau hinaus eine ausgesprochen hohe Biegesteifigkeit.
- Die Platte weist eine enorme Traglast auf:
Traglast *TYP 1* $\cong 2,7 \cdot$ ULS Lastniveau (Eigengewicht + Verkehrslast *LM71*).
- Der globale Versagensmechanismus der Variante *TYP 1* erfolgt durch das Plastizieren des gezogenen äußeren Bleches mit anschließender Ausbildung von Fließzonen.
- Ein vollständiges Abscheren eines Betondübels erfolgte im Rahmen der Vorversuche unter einem Lastniveau von zirka 450 kN pro Dübel.
- Dieses Versagensmuster (vollständiges Abscheren eines Betondübels) im Zuge der Hauptversuche konnte nur im Fall der Platte mit Querschnitt *TYP 2* beobachtet werden.
- Im Fall der Platte mit Querschnitt *TYP 1* waren im Beton unter Traglastniveau nur Biegezugrisse und Risse zufolge der Betondruckstrebenwirkung zu erkennen.

2.3 Tragverhalten der SCSC-Platte unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung

Die ersten Untersuchungen im Thema Ermüdungssicherheit der SCSC-Platte wurden ebenso von *Herrmann* in [1] durchgeführt. Da der Fokus seiner Arbeit vor allem auf der Analyse des Tragverhaltens im Grenzzustand der Tragfähigkeit lag, hat er nur die an den Stellen der Halskehlnähte zwischen den äußeren Blechen und den Stahldübelleisten auftretenden Spannungsschwingbreiten unter Ermüdungslastniveau nachgewiesen. Jedoch zeigen die Ergebnisse seiner numerischen Untersuchungen, dass die maximalen Spannungen und somit der zu erwartende Anriss entlang des Randes der Dübelleistenfreischnitte auftreten wird. Damit lassen seine Er-

kenntnisse darauf schließen, dass diese Stellen für die Ermüdungsfestigkeit maßgebend werden. Um die vollständige rechnerische Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit von SCSC-Platten zu ermöglichen, wird die vorliegende Arbeit den Fokus auf die Dübelleistenfreischnitte richten.

2.4 Forschung zum Ermüdungsverhalten von Dübelleisten

- **Untersuchungen von *Song* [7, 8]**

Im Zuge der Forschungstätigkeiten wurden fünf Abscherversuche an Push-Out-Versuchskörpern mit Perfobondleisten unter zyklischer Beanspruchung durchgeführt. Die rechnerischen Lebensdauerwerte wurden mit Hilfe des Kerbdehnungskonzeptes (s. Kapitel 3.4) ermittelt. Für die Erfassung von Einflüssen aus Mittelspannungen und Oberflächenrauigkeiten kam dabei der Schädigungsparameter P_{SWT} nach *Smith, Topper* und *Watson* (s. Kapitel 3.5.3) zur Anwendung. Die wesentlichen Erkenntnisse in Bezug auf die vorliegende Arbeit können als Folgende zusammengefasst werden:

- „Es kann festgestellt werden, dass unter den Schwingbeanspruchungen mit einer Oberlast von $2/3$ der statischen Tragfähigkeit bis zu 500.000 Schwingspielen das Betonversagen ausgeschlossen werden kann.“ [8]
- „Durch die Gegenüberstellung von experimentellen und rechnerischen Ergebnissen wurde gezeigt, dass die Schädigungsbewertung mit σ_V und ε_V eine zu niedrige Lebensdauer liefert und die Hauptspannung σ_1 und die zugehörige Hauptdehnung ε_1 zur Schädigungsbewertung für das Bauteil Stahlleiste die geeigneten Parametergrößen sind.“ [8]

- **Untersuchungen von *Juen* [9]**

Juen beschäftigte sich mit dem Ermüdungsverhalten der Kronendübelleiste. Die Forschungen umfassten umfangreiche numerische Untersuchungen in Form von Parameterstudien und begleitende experimentelle Untersuchungen. Zur rechnerischen Bestimmung der Lebensdauer kamen dabei das Kerbspannungs- und das Kerbdehnungskonzept zur Anwendung. Die beste Übereinstimmung der Versuchs- und Berechnungsergebnisse konnte mit dem Kerbdehnungskonzept unter Berücksichtigung von Oberflächenrauigkeiten, jedoch unter Vernachlässigung von Mittelspannungseinflüssen erreicht werden. Die mit dem Kerbspannungskonzept ermittelten Ergebnisse lagen weitgehend auf der sicheren Seite.

- **Untersuchungen an der *Universität der Bundeswehr München* [10, 11, 12]**

An der *Universität der Bundeswehr München* wurden zahlreiche Forschungen zum Thema Tragverhalten von Betondübeln unter vorwiegend ruhender und nichtruhender Beanspru-

chung durchgeführt. In den Forschungsarbeiten von *Burger* [10] wurde die Ermüdungsfestigkeit des Betons durch eine Begrenzung der zulässigen zyklischen Oberlast gewährleistet. Der Nachweis des Baustahles erfolgt mittels einer Berechnung des Anrisses im Stahlzahn auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes (auch Örtliches Konzept, Kerbgrundkonzept genannt). Dabei wurden die Einflüsse aus Mittelspannungen und Oberflächenrauigkeiten berücksichtigt. Durch die Gegenüberstellung von experimentellen und rechnerischen Resultaten wurde die Schädigungsbewertung basierend auf dem Versagenskriterium nach *Rankine* als das relevante Kriterium identifiziert. In einer Veröffentlichung von *Mangerig et al.* [12] wurde ein Bemessungskonzept für die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von Betondübeln dargestellt, siehe Abbildung 2.6.

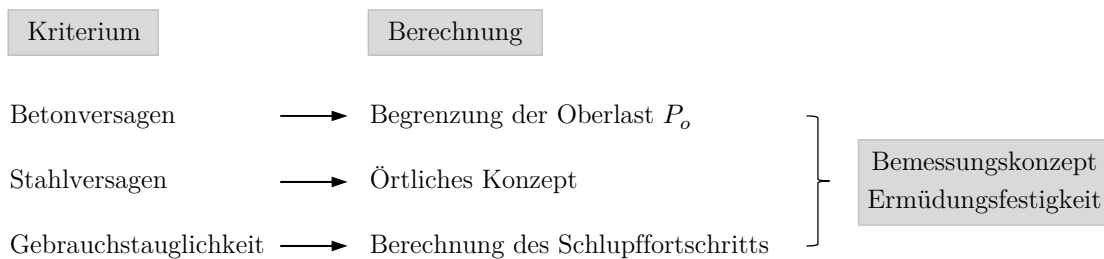


Abbildung 2.6: Nachweiskonzept für Betondübel unter nichtruhender Belastung nach [12]

2.5 Wesentliche Festlegungen zu der vorliegenden Arbeit

Folgende Festlegungen wurden getroffen

- Beschränkung der Forschung auf die Stahlermüdung der Lochdübelleiste:
Die Lochdübelleiste ist ein Schubverbinder für Verbundkonstruktionen aus Stahl und Beton. Es müssen somit im Prinzip beide der beteiligten Werkstoffe auf Ermüdung nachgewiesen werden. Eine Kernaussage der vorgestellten wissenschaftlichen Arbeiten ist aber der Ausschluss des Betonversagens infolge zyklischer Beanspruchungen durch Limitierung der maximalen Oberlast auf etwa 60% der quasistatischen Dübeltragfähigkeit. Aus diesem Grund wird der Fokus der vorliegenden Arbeit in erster Linie auf die rechnerische Erfassung des Stahlversagens gerichtet - und hier auf das Ermüdungsversagens der Lochdübelleiste.
- Beschränkung der Forschung auf die Ermittlung der Anrisslebensdauer:
Da ein Riss im Inneren der SCSC-Platte nicht detektierbar bzw. ein Risswachstum nicht kontrollierbar ist, wird der Anrisszeitpunkt der Lochdübelleiste als Ermüdungsversagen angesehen. Aus diesem Grund bildet die Ermittlung der Anrisslebensdauer der Lochdübelleiste den Schwerpunkt dieser Arbeit.

- Festlegung der Dübelleistengeometrie:
Die Forschungen von *Hermann* [1] zeigten, dass die SCSC-Platte mit Dübelleistenausformung Lochleiste das günstigste Tragverhalten aufweist. Infolge des großen Ausrundungsradius mit 100 mm und der damit verbundenen niedrigeren Kerbwirkung als andere Dübelformen scheint aus Sicht des Autors diese Geometrie in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit die optimalste Variante zu sein. Es wird somit nur diese Variante untersucht.
- Festlegung der Dübelleistenanordnung:
Da die SCSC-Platte mit äquidistant verteilten Dübelleisten ein günstigeres Tragverhalten gegenüber die Variante mit benachbart liegenden Dübelleistenpaaren im Rahmen der Untersuchungen von *Steuere* [6] zeigten, wird nur an dieser Dübelleistenanordnung weitergeforcht.
- Reduzierung der Plattendicke des Deck- und Bodenblechs:
Die Forschungsarbeiten von *Steuere* [6] zeigten, dass die SCSC-Platte mit der reduzierten Dicke der außen liegenden Stahlbleche eine ausgesprochen hohe Duktilität, Biegesteifigkeit und eine enorm hohe Traglast aufweist. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit die Untersuchungen mit der von 20 mm auf 15 mm reduzierten Blechdicke durchgeführt.
- Festlegung des zu verwendenden Konzeptes:
Die Publikationen deuten darauf hin, dass die Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen zu treffsicheren Ergebnissen führt. Die Untersuchungen von *Juen* [9] zeigten aber, dass die mit dem Kerbspannungskonzept ermittelten Ergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen nach dem Kerbdehnungskonzept deutlich auf der sicheren Seite liegen. Die Anwendung des Kerbspannungskonzeptes in der Forschungsphase wäre somit kontraproduktiv und daher wird nur das Kerbdehnungskonzept verwendet.

Kapitel 3

Theoretische Grundlagen der Betriebsfestigkeitsberechnung

3.1 Einleitung

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über den für diese Arbeit relevanten Stand der Wissenschaft in Bezug auf Stahlermüdung. Den Ausgangspunkt bilden dabei die Kennwerte zur Ermüdungsbeanspruchung und die Grundlagen zur Ermüdungsfestigkeit. Darauf folgt ein Überblick über die zur Lebensdauerberechnung zur Auswahl stehenden Konzepte. Anschließend wird das ausgewählte Konzept, nämlich das Kerbdehnungskonzept, detailliert vorgestellt. Weiterführende Informationen sind der einschlägigen Literatur zu entnehmen [13, 14, 15, 16, 17].

3.2 Grundlagen zur Ermüdungsbeanspruchung

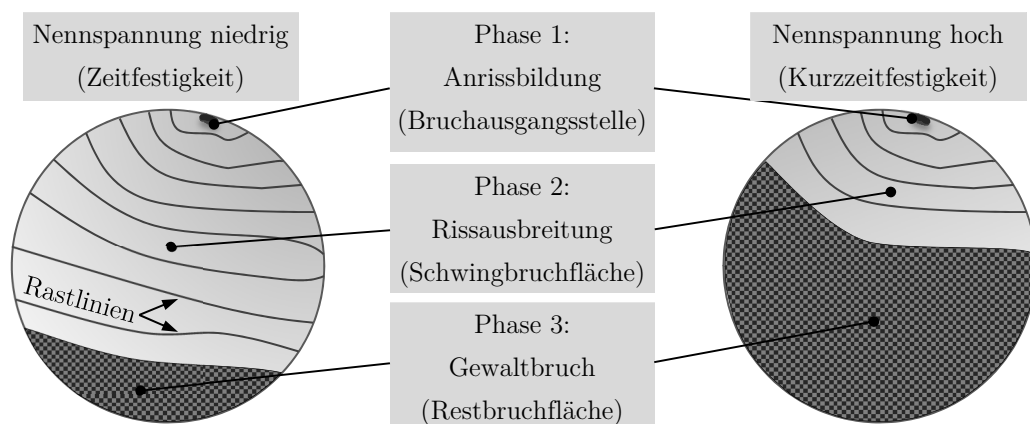


Abbildung 3.1: Typische Ausbildung einer Schwingbruchfläche; Teilbild links: infolge niedriger Belastung; Teilbild rechts: infolge hoher Belastung [17]

Das Phänomen Ermüdung ist ein im Verlauf der Zeit unter häufig wiederholter (schwingender) Beanspruchung auftretendes Materialversagen, das deutlich unterhalb der statischen Tragfähigkeit erfolgen kann. Eine typische Schwingbruchfläche (s. Abbildung 3.1) entsteht in drei Phasen: Nach Anrissbildung an der Bruchausgangsstelle (Phase 1) erfolgt eine fortschreitende Rissausbreitung an der Schwingbruchfläche (Phase 2). Diese Fläche kennzeichnet sich durch Rastlinien bzw. Rissfortschrittsbändern aus. Der Bruch des Restquerschnitts erfolgt plötzlich in Phase 3 ohne Vorankündigung [15, 18].

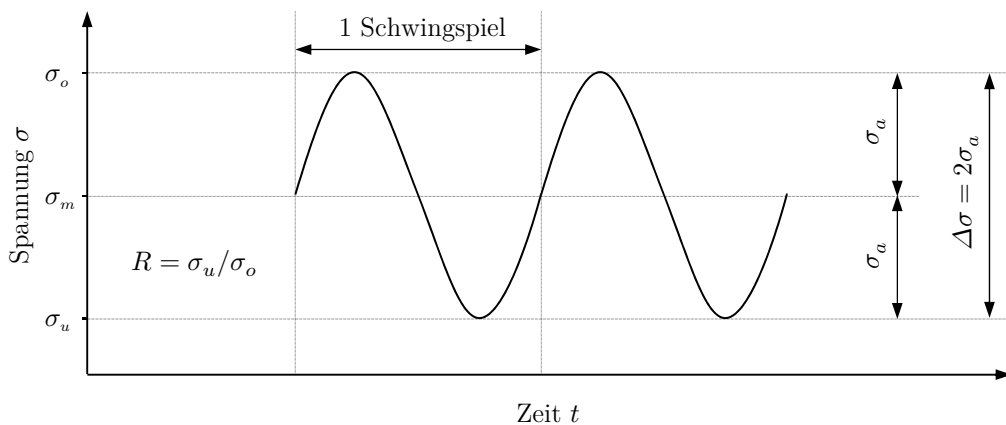


Abbildung 3.2: Beanspruchungskennwerte im Dauerschwingversuch [17]

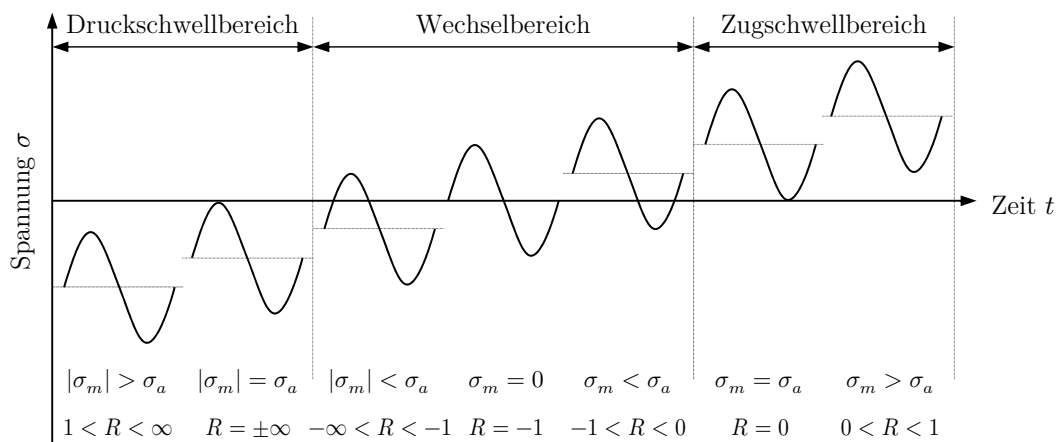


Abbildung 3.3: Beanspruchungsbereiche im Dauerschwingversuch [17]

Ein Schwingenspiel kann über die Unterspannung σ_u , Mittelspannung σ_m und Oberspannung σ_o charakterisiert werden. Die weiteren Größen, wie die Spannungsamplitude σ_a , die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ und das Spannungsverhältnis R lassen sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_o - \sigma_u) = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad 3.1$$

$$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u = 2\sigma_a \quad 3.2$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_o + \sigma_u) \quad 3.3$$

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad 3.4$$

Bei periodisch wiederholter Beanspruchung (in Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 sinusförmig dargestellt) wird zwischen den Bereichen der Druckschwell-, Wechsel- und Zugschwellbeanspruchung unterschieden (s. Abbildung 3.3). Einige in der Praxis häufig auftreten Fälle sind die reine Druckschwellbeanspruchung ($\sigma_o = 0$, $R = \pm\infty$), die reine Wechselbeanspruchung ($\sigma_m = 0$, $R = -1$) und die reine Zugschwellbeanspruchung ($\sigma_u = 0$, $R = 0$).

3.3 Kerbwirkung

Die Kerbwirkung ist für die Lebensdauerberechnung eine entscheidende Größe. Unter Kerbwirkung versteht man eine örtliche Spannungserhöhung, die durch Formkerben, Werkstoffkerben, Belastungskerbent oder gleichzeitig durch mehrere Kerbartent entstehen kann. [17]

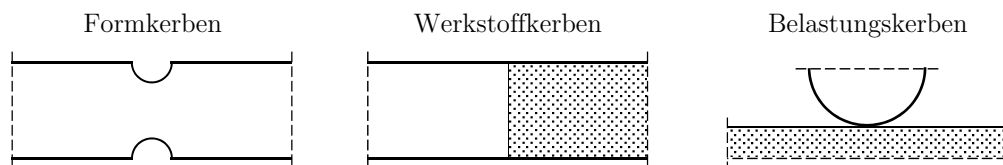


Abbildung 3.4: Kerbartent nach *Radaj* [17]

Formkerben umfassen alle Unstetigkeiten (Diskontinuitäten) der Geometrie, wie Einkerbungen, Querschnittsübergänge, Löcher und Bohrungen. Als Werkstoffkerben bezeichnet man materielle Inhomogenitäten in einem sonst homogenen Werkstoff, wie lokale Steifigkeits-, Elastizitäts- oder Fließgrenzenänderungen. Belastungskerbent entstehen durch lokale Lasteinleitungen [17].

Die Kerbwirkung wird durch die Kerbformzahl α_k beschrieben. Sie ist als Verhältnis von Kerbspannungshöchstwert $\sigma_{k,max}$ zur Nennspannung σ_n definiert [17], siehe Abbildung 3.5 (obere Hälfte).

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{k,max}}{\sigma_n} = \frac{\sigma_{k,max}}{\frac{P}{A_{netto}}} \quad 3.5$$

Wenn die Fließgrenze im Kerbgrund lokal überschritten wird, lagern sich die Spannungen durch örtliches Plastizieren um, siehe Abbildung 3.5 (untere Hälfte) [18]. Die Kerbspannungen steigen unterproportional und die Kerbdehnungen überproportional (Makrostützwirkung) [17]. Da die Entlastung rein elastisch erfolgt, verbleibt ein Restspannungszustand σ_R im Kerbgrund. Am Rand des Querschnittes verbleiben Druckspannungen im inneren Bereich Zugspannungen. Bei einer weiteren Zugbelastung wird die Randspannung durch die verbleibende Druckspannung verringert. Tritt eine Lastumkehr ein (Druckbelastung), so wird die Plastizierung verstärkt und es tritt ein frühzeitiger Anriss ein [13].

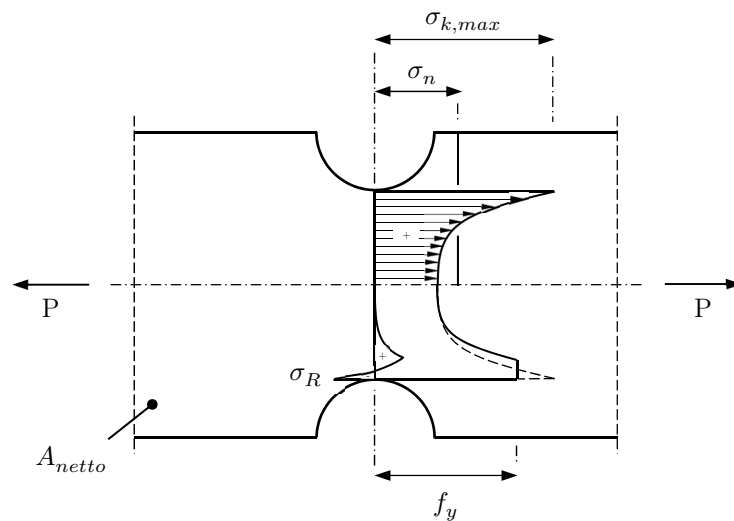


Abbildung 3.5: Spannungskonzentration infolge Kerbwirkung [13]

3.4 Grundlagen zur Ermüdungsfestigkeit

Der Widerstand eines Materials gegen Ermüdungsbeanspruchungen ist als Ermüdungsfestigkeit definiert. Diese Bezeichnung verwendet man als Oberbegriff zu Schwingfestigkeit und Betriebsfestigkeit. Erstere bezeichnet die Ermüdungsfestigkeit bei periodisch wiederholter Belastung, letztere bei zufallsartiger Belastung (Betriebsbelastung) [17].

Die Ermüdungsfestigkeit kann in Form eines Wöhlerdiagramms dargestellt werden (s. Abbildung 3.6). Dieses Schaubild ist benannt nach *August Wöhler* [19], der dieses Phänomen – Ermüdung – in den 1860er Jahren erforscht und den grundlegenden technischen Ermüdungsfestigkeitsversuch entwickelt hat.

Die Kennwerte eines Wöhlerdiagramms sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Auf der Abszisse (logarithmischer Maßstab) wird die Lebensdauer aufgetragen. Abhängig von dem gewählten Konzept (s. Kapitel 3.6) wird die Lebensdauer als die bis Anriss oder Bruch ertragbare Schwingspielzahl N bezeichnet [15]. Auf der Ordinate (logarithmischer Maßstab) wird übli-

cherweise die einwirkende Spannungsamplitude σ_a oder Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ aufgetragen.

Die Wöhlerlinie kann in drei charakteristische Abschnitte unterteilt werden. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich (engl.: *low cycle fatigue*) überwiegen die elastisch-plastischen Verformungen, im Zeitfestigkeitsbereich (engl.: *high cycle fatigue*) die elastischen Verformungen [17]. Die Dauerfestigkeit ist jene Spannungsamplitude σ_a oder Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$, die beliebig häufig ertragbar ist [18]. Nach *Radaj* [17] befindet sich der Übergang von der Kurzzeit- zur Zeitfestigkeit für unlegierte Baustähle bei etwa $N = 10^4$ Lastwechsel. Die Dauerfestigkeit beginnt je nach Kerbdetail und Beanspruchungsart bei etwa $N = 10^6 - 10^8$ Lastwechsel.

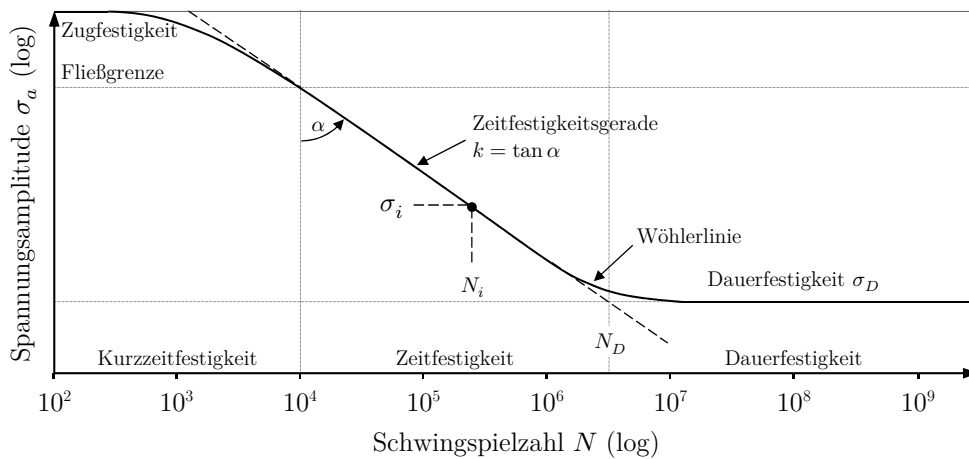


Abbildung 3.6: Kennwerte eines Wöhlerdiagramms und Abgrenzung der Bereiche der Kurzzeitfestigkeit, der Zeitfestigkeit und der Dauerfestigkeit; nach *Haibach* [15], Lebensdauerwerte nach *Radaj* [17]

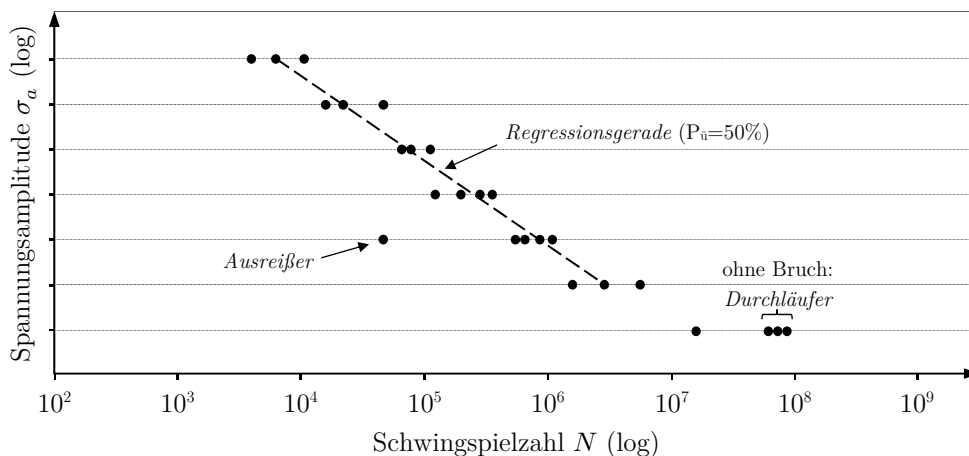


Abbildung 3.7: Typische Versuchsergebnisse eines Wöhlerversuches aufgetragen in ein Wöhlerdiagramm und Regressionsgerade mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_u = 50\%$; nach *Haibach* (modifiziert) [15]

Beim Wöhlerversuch werden ungekerbte (polierte) oder gekerbte Proben periodisch wiederholten konstanten Lastamplituden mit sinusförmiger Beanspruchungs-Zeit-Funktion unterworfen (Einstufenversuch) [17]. Nach Wiederholung der Versuchsreihe mit unterschiedlich hohen Lastamplituden (Mehrstufenversuch) werden die ermittelten Schwingspielzahlen N horizontal neben den jeweiligen Lastamplituden in einem Wöhlerdiagramm doppellogarithmisch aufgetragen, siehe Abbildung 3.7. Proben, die bis zu einer definierten Grenzschnwingspielzahl nicht versagen, werden als *Durchläufer* bezeichnet. Proben, deren Ergebnisse auffällig höher oder niedriger als die übrigen Messwerte liegen, können als Ausreißer deklariert und gesondert bewertet werden. Wird eine Regressionsgerade durch die im Zeitfestigkeitsbereich liegenden Datenpunkte gelegt, so erhält man die Zeitfestigkeitsgerade [17].

Basquin [20] hat die Wöhlerlinie für den Zeitfestigkeitsbereich mit den Bezeichnungen nach Abbildung 3.6 in der folgenden Form beschrieben:

$$\sigma_i = \sigma_D \left(\frac{N_D}{N_i} \right)^{1/k} \quad (R = \text{konst.}) \quad 3.6$$

oder:

$$N_i = N_D \left(\frac{\sigma_D}{\sigma_i} \right)^k \quad 3.7$$

In Gl. 3.6 und Gl. 3.7 kann anstelle der Dauerfestigkeit σ_D und der Grenzschnwingspielzahl zur Dauerfestigkeit N_D jedes andere Wertepaar (σ_j, N_j) auf der Zeitfestigkeitsgerade als Bezugsgröße verwendet werden [17]. Die Neigungskennzahl k lässt sich nach Gl. 3.8 berechnen. Sie hängt vom Werkstoff und der Kerbwirkung ab. Je größer diese Zahl ist, desto flacher wird der Verlauf der Zeitfestigkeitslinie [15]. Die Neigung beträgt nach *Haibach* [15] für ungekerbte Proben aus geglühtem oder vergütetem Stahl $k = 15$ und für kerbte Proben $k = 5$. Für Schweißverbindungen wird im Allgemeinen ein Wert von $k = 3$ verwendet.

$$k = \frac{\Delta \log N_i}{\Delta \log \sigma_i} = \tan \alpha \quad 3.8$$

3.5 Einflüsse auf die Schwingfestigkeit

Die signifikanten Einflussfaktoren auf das Ermüdungsverhalten von Stahl sind die Mikro- und Makrokerben, die Formunstetigkeiten, sowie die Oberflächen- und Umgebungseinflüsse, wie Rauigkeit, Korrosion und Temperatur. Daneben haben noch viele weitere konstruktions-, werkstoff- und fertigungsbedingte Faktoren einen Einfluss auf den Ermüdungsvorgang. Die Anzahl der Parameter hat eine große Streuung der Festigkeitswerte zur Folge [17]. In Abbildung 3.8 sind die wesentlichen Parameter auf die Schwingfestigkeit schematisch dargestellt.

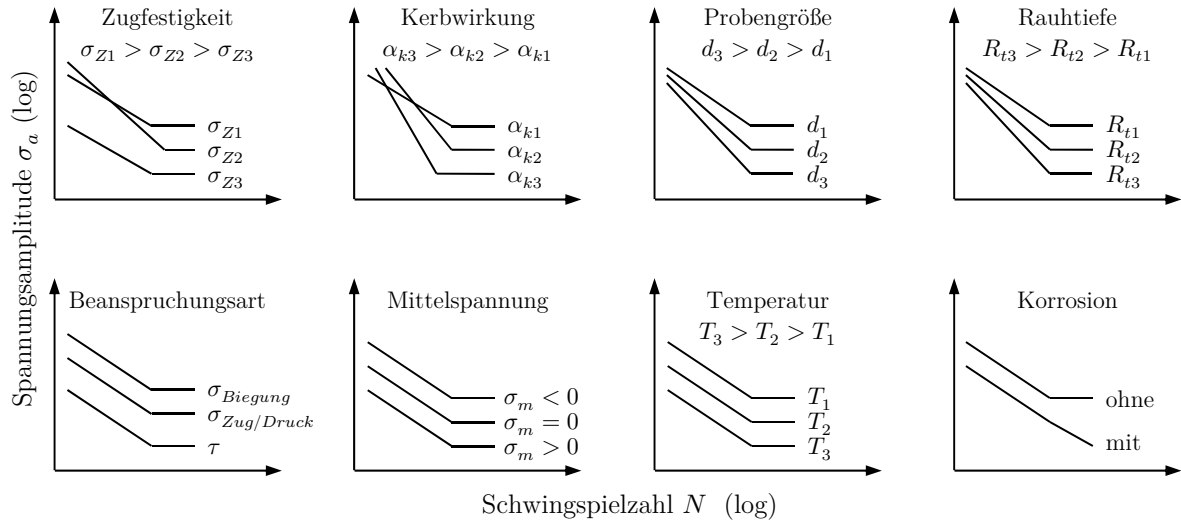


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der Einflussparameter zur Schwingfestigkeit von Proben oder Bauteilen im Wöhler-Versuch nach Gudehus u. Zenner [14]

Der Einfluss der Mittelspannung lässt sich auch in Form eines Dauer- und Zeitfestigkeitsschaubildes darstellen. Während in der Darstellungsweise nach Haigh [21] die ertragbare Spannungsamplitude σ_a als primäre Einflussgröße über die Mittelspannung σ_m aufgetragen wird, stellt Smith [22] die ertragbare Ober- und Unterspannung (σ_o , σ_u) über der Mittelspannung σ_m dar.

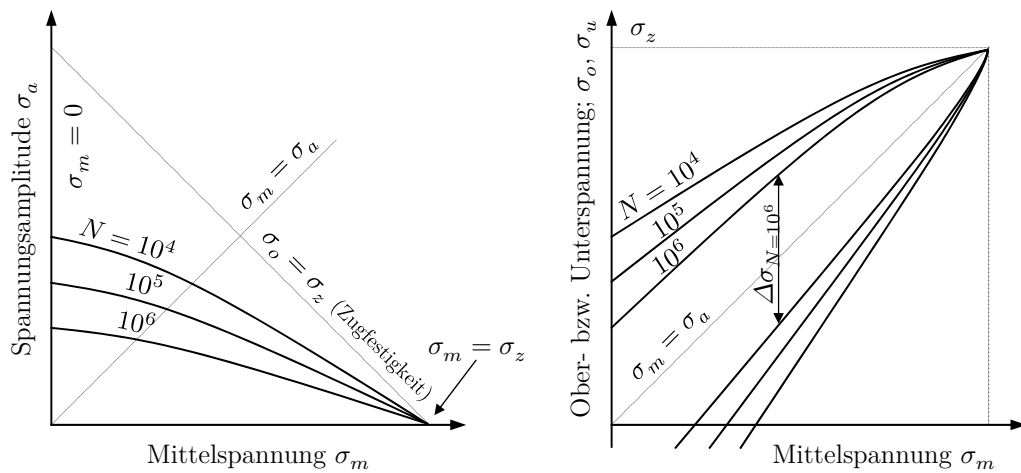


Abbildung 3.9: Dauer und Zeitfestigkeitsschaubild nach Haigh [21] (links) und nach Smith [22] (rechts)

Der Einfluss der Zugfestigkeit wird in der vorliegenden Arbeit anhand einer Parameterstudie untersucht. Die Berücksichtigung von Mittelspannung- und Mehrachsigkeitseinflüssen, sowie Einflüssen der Oberflächenrauigkeit werden im Rahmen der Schädigungsbewertung in der vorliegenden Arbeit erfasst (s. Kapitel 5.5 und 5.8).

3.6 Überblick über die Nachweiskonzepte

Im Grunde genommen sind zwei Methoden bzw. deren Kombination zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit möglich [15]:

- experimenteller Nachweis der Ermüdungsfestigkeit von Originalbauteilen oder
- Bestimmung der Lebensdauer mit rechnerischen Nachweisverfahren.

Beim experimentellen Nachweis werden Bauteile unter realitätsnahen Umgebungs- und Lastbedingungen bis zum Versagen geprüft [23]. Diese Art des Nachweises wird vornehmlich bei seriengefertigten Bauteilen verwendet, wie z.B. im Kraftfahrzeugbau und Flugzeugbau, bei denen besondere Anforderungen an die Schwingbruchsicherheit bestehen [15].

Der Weg des rechnerischen Nachweises kommt insbesondere für große und teure Bauteile der Einzelfertigung zum Einsatz, wie z.B. im Brückenbau und Anlagenbau, bei denen experimentelle Untersuchungen aus wirtschaftlichen Gründen nicht zweckmäßig sind [15].

Abbildung 3.10 gibt eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Nachweisverfahren. Das Grundprinzip ist, dass jede in einem Bauteil auftretende spannungserhöhende Kerbwirkung entweder auf der Einwirkungsseite oder auf der Widerstandsseite erfasst werden muss.

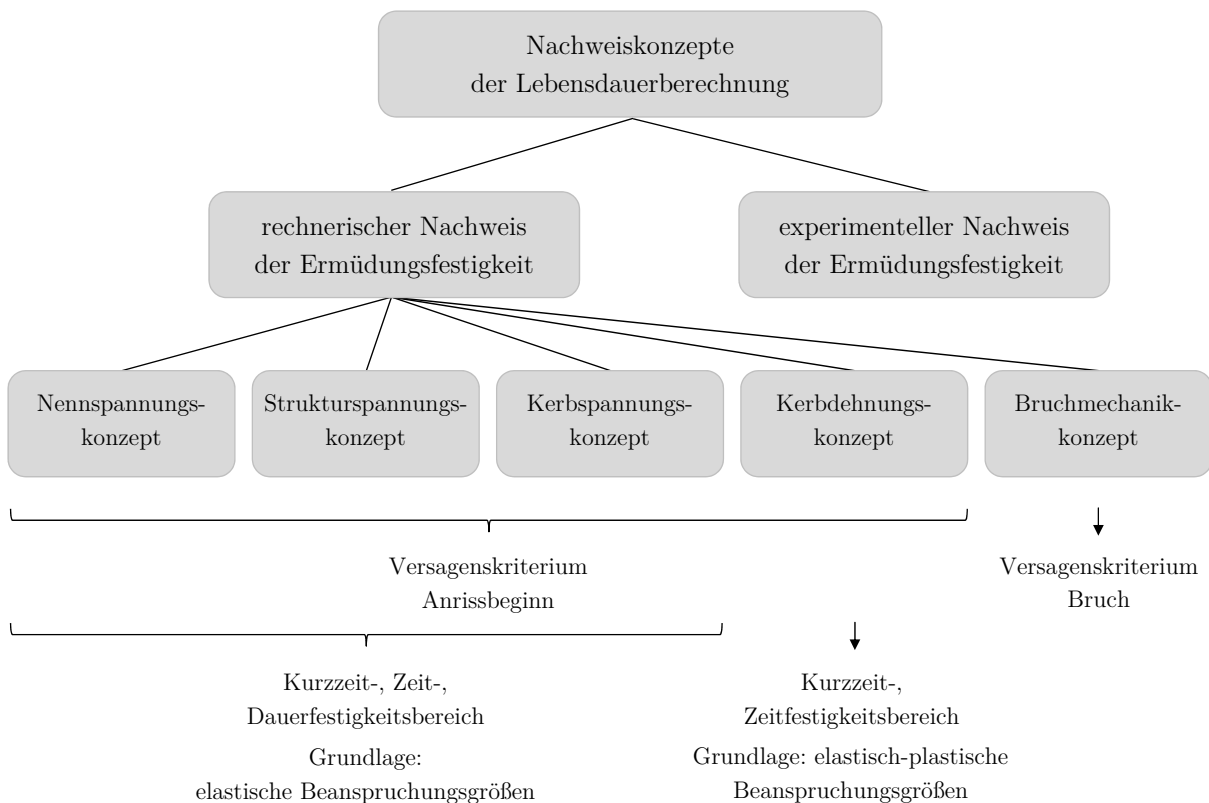


Abbildung 3.10: Übersicht der Nachweiskonzepte der Lebensdauerberechnung [9, 17]

Das Nennspannungskonzept stellt das gebräuchlichste Nachweiskonzept dar. Nennspannungen werden im betrachteten Querschnitt aus den maßgebenden globalen Schnittgrößen auf Basis der technischen Biegelehre unter Zugrundelegung von linear-elastischem Materialverhalten berechnet [9]. Da der resultierende Spannungsverlauf weitgehend vereinfacht ist, werden alle spannungserhöhenden Einflüsse, wie die örtliche Kerbe, durch die Wöhlerlinie erfasst. Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahren ist das Vorhandensein einer entsprechenden Wöhlerlinie. In den gängigen Normen und Richtlinien (*Eurocode 3* [5], FKM-Richtlinie [24], IIW-Richtlinie [25]) sind Nennspannungs-Wöhlerlinien für häufig vorkommenden Konstruktionsdetails angegeben. Da die Nennspannung im Bereich der Lochdübelleiste nicht definiert ist, ist die Anwendung des Konzeptes für das in der vorliegenden Arbeit untersuchte Detail (Lochdübel) nicht möglich.

Das Strukturspannungskonzept wurde für geschweißte Konstruktionen entwickelt. Die Anwendung dieser Methode ist damit wiederum nicht möglich (keine Schweißnaht entlang des Lochdübels). Auf der Einwirkungsseite werden alle spannungserhöhenden Einflüsse mit Ausnahme der Schweißnaht selbst berücksichtigt. Als Strukturspannungen werden die Oberflächenspannungen unmittelbar vor der Schweißnahtkerbe bezeichnet [17].

Das Kerbspannungskonzept basiert auf einem linear-elastischen Materialverhalten. Die Kerbspannung ist als die Spitzenspannung direkt an der Schweißnahtwurzel oder am Kerbdetail definiert [17]. Sie lassen sich mit Hilfe einer FE-Analyse berechnen oder messtechnisch ermitteln. Die Untersuchungen von *Juen* [9] zeigten, dass die Ergebnisse nach dem Kerbspannungskonzept im Vergleich zu den Ergebnissen nach dem Kerbdehnungskonzept deutlich auf der sicheren Seite liegen. Als Resultat könnte somit bei Anwendung dieser Methode (Kerbspannungskonzept) ein wesentlicher Teil der Lebensdauer nicht ausgenutzt werden.

Das Kerbdehnungskonzept beschäftigt sich mit der Anrisslebensdauer (Rissinitiierungsphase). Das Konzept wurde in der einschlägigen Literatur [10, 11, 26] mehrmals zur Analyse des Ermüdungsverhaltens von Verbunddübelleisten verwendet. Auch *Juen* [9] hat gezeigt, dass die versuchstechnisch ermittelte Lebensdauer der Kronendübelleiste sehr gut mit Hilfe des Kerbdehnungskonzeptes prognostiziert werden kann, sodass eine Anwendung in der vorliegenden Arbeit zur Ermittlung der Anrisslebensdauer der Lochdübelleiste naheliegend war. Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen dieser Methode beschrieben. Der genaue Berechnungsablauf wird in Kapitel 5 anhand der Lochdübelleiste vorgestellt.

Das Bruchmechanikkonzept beschäftigt sich mit der Ausbreitung eines im Bauteil vorhandenen Risses (Rissfortschrittsphase). Es wird für die Ermittlung der Restlebensdauer schwingbeanspruchte Bauteile verwendet und unterscheidet sich damit gänzlich von den anderen Verfahren [17].

3.7 Grundlagen der Kerbdehnungskonzeptes

Das Kerbdehnungskonzept – auch Kerbgrundkonzept genannt – ist ein örtliches (lokales) Konzept, welches zur Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit von zyklisch belasteten, geschweißten oder nicht geschweißten Bauteilen herangezogen wird. *Radaj* [17] bezeichnet das Konzept als die Erweiterung des Kerbspannungsnachweises von der Dauerfestigkeit auf den Zeit- und Kurzzeitfestigkeitsbereich, wobei anstelle der elastischen Kerbspannungen die elastisch-plastischen Kerbdehnungen die wichtigsten Beanspruchungskenngrößen sind. Das Konzept basiert auf der Idee, dass sich der Werkstoff im Kerbgrund hinsichtlich Verformung und Anrisszeitpunkt ähnlich verhält wie eine dort gedachte (miniaturisierte) einachsrig beanspruchte ungekerbte Probe, siehe Abbildung 3.11 [17].

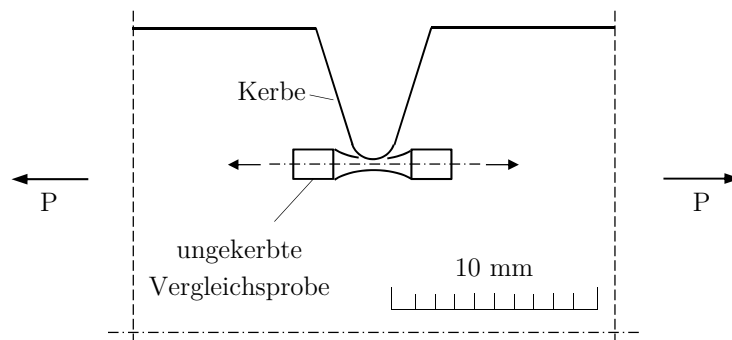


Abbildung 3.11: Ungekerbte Probe im Kerbgrund zur Simulation des Ermüdungsverhaltens nach *Radaj* [17]

Die Besonderheit der Methode liegt darin, dass im Gegensatz zu anderen Konzepten (Nennspannungs-, Strukturspannungs-, Kerbspannungskonzept), bei denen eine vorhandene Bauteilwöhlerlinien vorausgesetzt wird, die Bauteilwöhlerlinien mit dem Kerbdehnungskonzept berechnet werden können [27].

- **Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleife**

Bei Beanspruchungen nahe der Dauerfestigkeit besteht in den kritischen Bauteilbereichen oder an Kerben ein weitgehend linearer Zusammenhang zwischen den örtlichen Spannungen und Dehnungen in Form von (aus den statischen Zugversuchen bekannten) zügigen Arbeitslinien. Bei höheren Beanspruchungen (Kurz- und Zeitfestigkeitsbereich) treten jedoch elastisch-plastische Verformungen auf, da sich der Stahl ent- oder verfestigt [17]. Dieses Verhalten stellt die zyklische Spannungs-Dehnungshysterese dar (s. Abbildung 3.12).

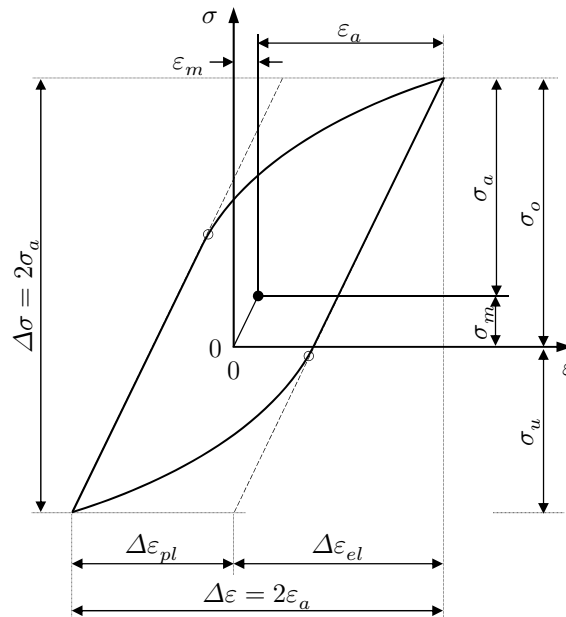


Abbildung 3.12: Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleife bei zyklischer Beanspruchung [17]

Die charakteristischen Werte zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleife sind die Spannungs- und Dehnungsamplitude σ_a bzw. ϵ_a , die entsprechende Schwingbreite $\Delta\sigma$ und $\Delta\epsilon$. Die (Gesamt-)Dehnungsschwingbreite setzt sich gemäß Abbildung 3.12 aus einem elastischen und plastischen Anteil, $\Delta\epsilon_{el}$ bzw. $\Delta\epsilon_{pl}$, zusammen.

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_{el} + \Delta\epsilon_{pl} \quad 3.9$$

- **Zyklische Spannungs-Dehnungskurve**

Der Zusammenhang zwischen der Gesamtdehnungsschwingbreite $\Delta\epsilon$ bzw. der entsprechenden Dehnungsamplitude ϵ_a und der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ bzw. der Spannungsamplitude σ_a kann durch die im stabilisierten Schwingversuch ermittelte zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve beschrieben werden [17]. Die Kurve entsteht durch Verbindung der Extremwerte der stabilisierten Hystereseschleifen von unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus, siehe Abbildung 3.13.

Abbildung 3.14 stellt die zyklische und die linear-elastische ideal-plastische (zügige) Spannungs-Dehnungs-Kurve am Beispiel eines Baustahls S355 gegenüber.

Die richtungsweisenden Arbeiten von *Coffin* [28], *Manson* [29] und *Morrow* [30] zeigen, dass die elastischen und plastischen Dehnungsamplituden bei doppellogarithmischem Maßstab in guter Näherung als Geraden dargestellt werden können (vgl. Abbildung 3.15 und Abbildung 3.16).

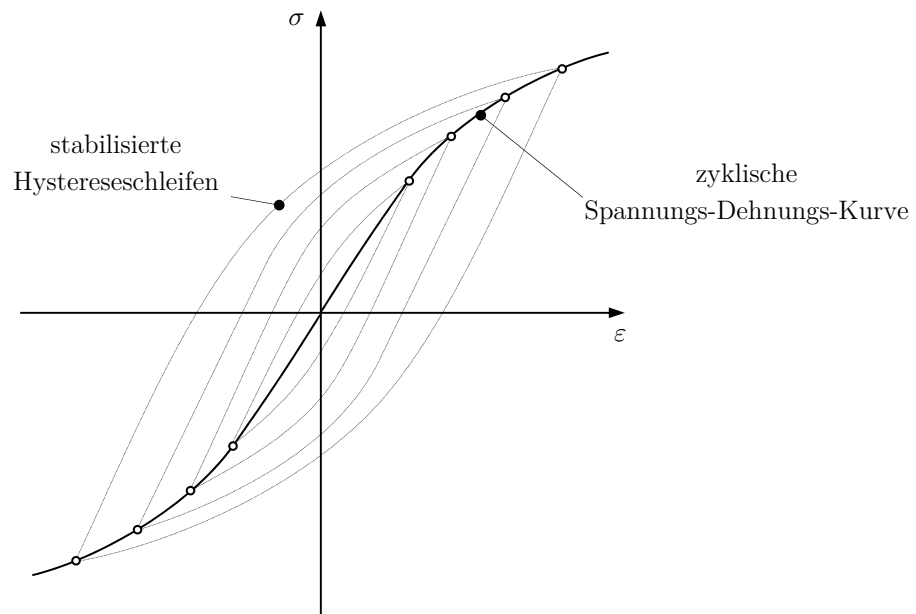
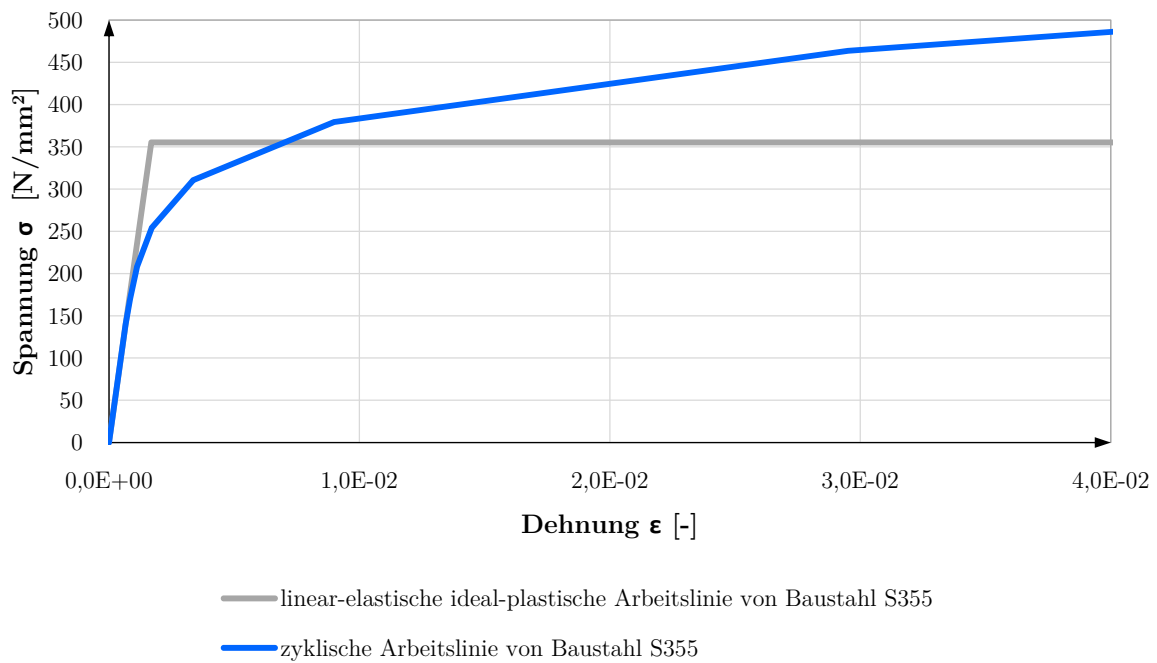


Abbildung 3.13: Ermittlung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve [17]

Abbildung 3.14: Vergleich der zyklischen und der linear-elastischen ideal-plastischen Arbeitslinie von Baustahl *S355*

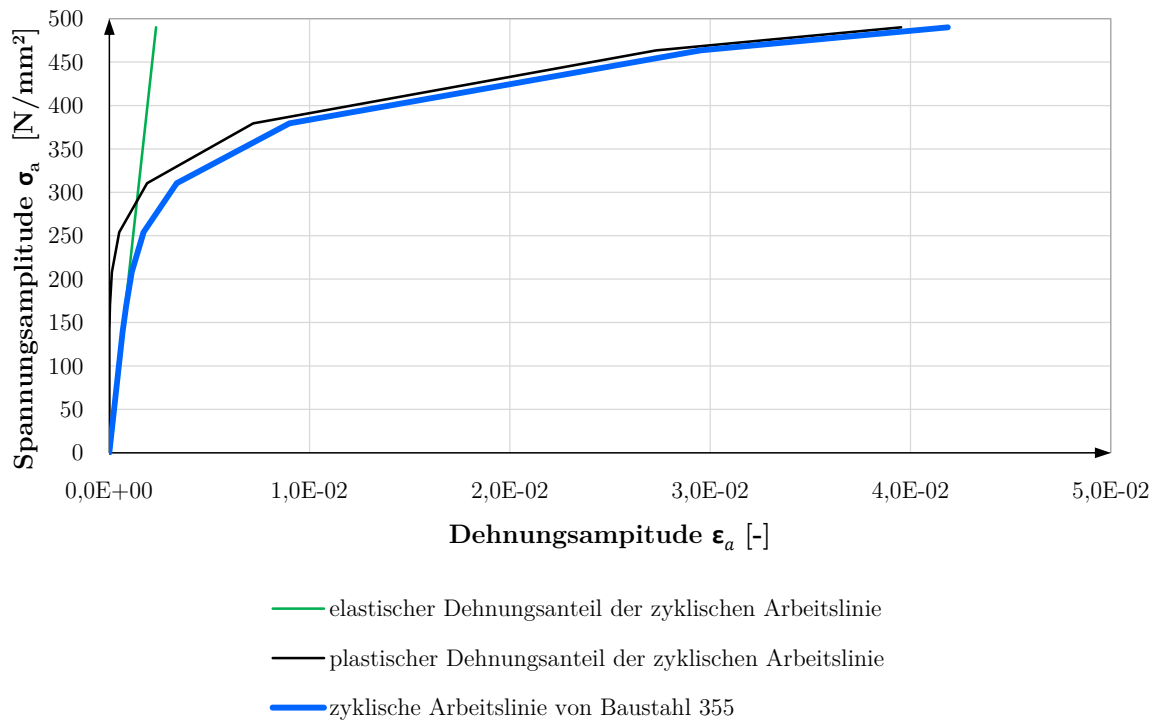


Abbildung 3.15: Elastischer und plastischer Dehnungsanteil der zyklischen Arbeitslinie von Baustahl S355

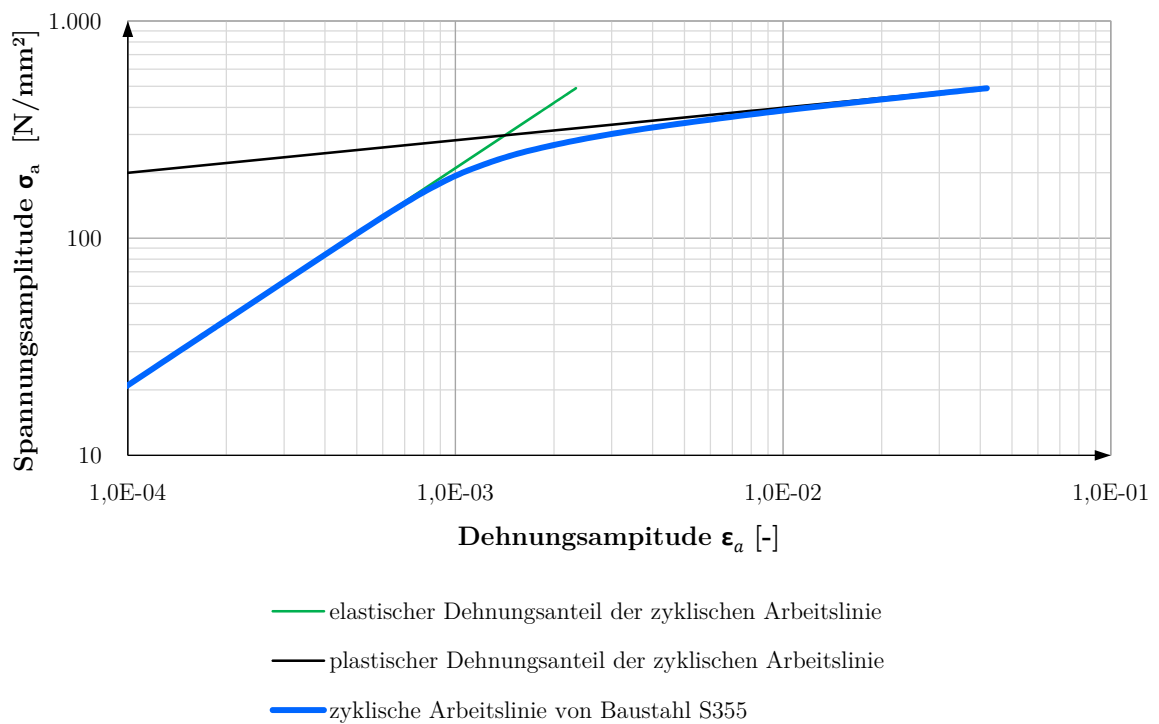


Abbildung 3.16: Elastischer und plastischer Dehnungsanteil der zyklischen Arbeitslinie von Baustahl S355 im logarithmischen Maßstab

Die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve kann nach dem Dreiparameteransatz von *Ramberg* und *Osgood* [31] gemäß Gl. 3.10 ausgedrückt werden.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'} \quad 3.10$$

mit
$$K' = \sigma'_f \varepsilon'_f{}^{-n'} \quad 3.11$$

und
$$n' = b/c \quad 3.12$$

Der elastische Dehnungsanteil der Kurve ist durch das Hookesche Gesetz (Elastizitätsmodul E) bestimmt. Der plastische Dehnungsanteil wird mit den Werkstoffkennwerten zyklische Verfestigungskoeffizient K' und zyklischer Verfestigungsexponent n' beschrieben, die über eine Regressionsanalyse der im *Incremental-Step-Test* [32] gemessenen Daten ermittelt werden können [17].

- **Zyklische Werkstoffkennwerte**

In dieser Arbeit werden die zyklischen Werkstoffkennwerte, die anhand des Uniform Material Law nach *Bäumel* und *Seeger* [33] bestimmt werden, verwendet. Die Besonderheit dieser Kennwerte liegt darin, dass für unlegierte und niedrig legierte Stähle sie nur vom E-Modul und der (statischen) Zugfestigkeit R_m abhängen [34].

Tabelle 3.1 Uniform Material Law für unlegierte und niedrig legierte Stähle [33, 15, 17, 35]

| | | |
|---|--------------------|---|
| zyklischer Spannungs-Koeffizient des Werkstoffs | $\sigma'_f =$ | $1,50 R_m$ ¹⁾ |
| zyklischer Spannungs-Exponent des Werkstoffs | $b =$ | $-0,087$ |
| zyklischer Dehnungs-Koeffizient des Werkstoffs | $\varepsilon'_f =$ | $0,59 \Psi$ |
| zyklischer Dehnungs-Exponent des Werkstoffs | $c =$ | $-0,58$ |
| zyklischer Festigkeits-Koeffizient | $K' =$ | $1,65 R_m$ |
| zyklischer Verfestigungs-Exponent | $n' =$ | $b/c = 0,15$ |
| Parameter | $\Psi =$ | $\begin{matrix} 1,0 & \text{wenn } R_m/E \leq 3 \cdot 10^{-3} \\ 1,375 - 125 R_m/E & \text{wenn } R_m/E > 3 \cdot 10^{-3} \end{matrix}$ ²⁾ |

¹⁾ $R_m = f_u$ (Zugfestigkeit); (Baustahl S355: $f_u = 490 \text{ N/mm}^2$, Baustahl S235: $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$)

²⁾ $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$

- **Einfluss der Mittelspannung und Mitteldehnung**

Wie aus Gleichung 3.10 ersichtlich ist, wird die Form der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve als weitgehend unabhängig von Mittelspannung und Mitteldehnung angesehen. [17] Die ertragbare Schwingspielzahl wird jedoch durch Erhöhung der Mittellast verringert: Nach Haibach kann dieser Einfluss mit dem Schädigungsparameter nach *Smith, Watson und Topper* [36] (s. Gl. 3.22 am Ende dieses Kapitels) berücksichtigt werden [15].

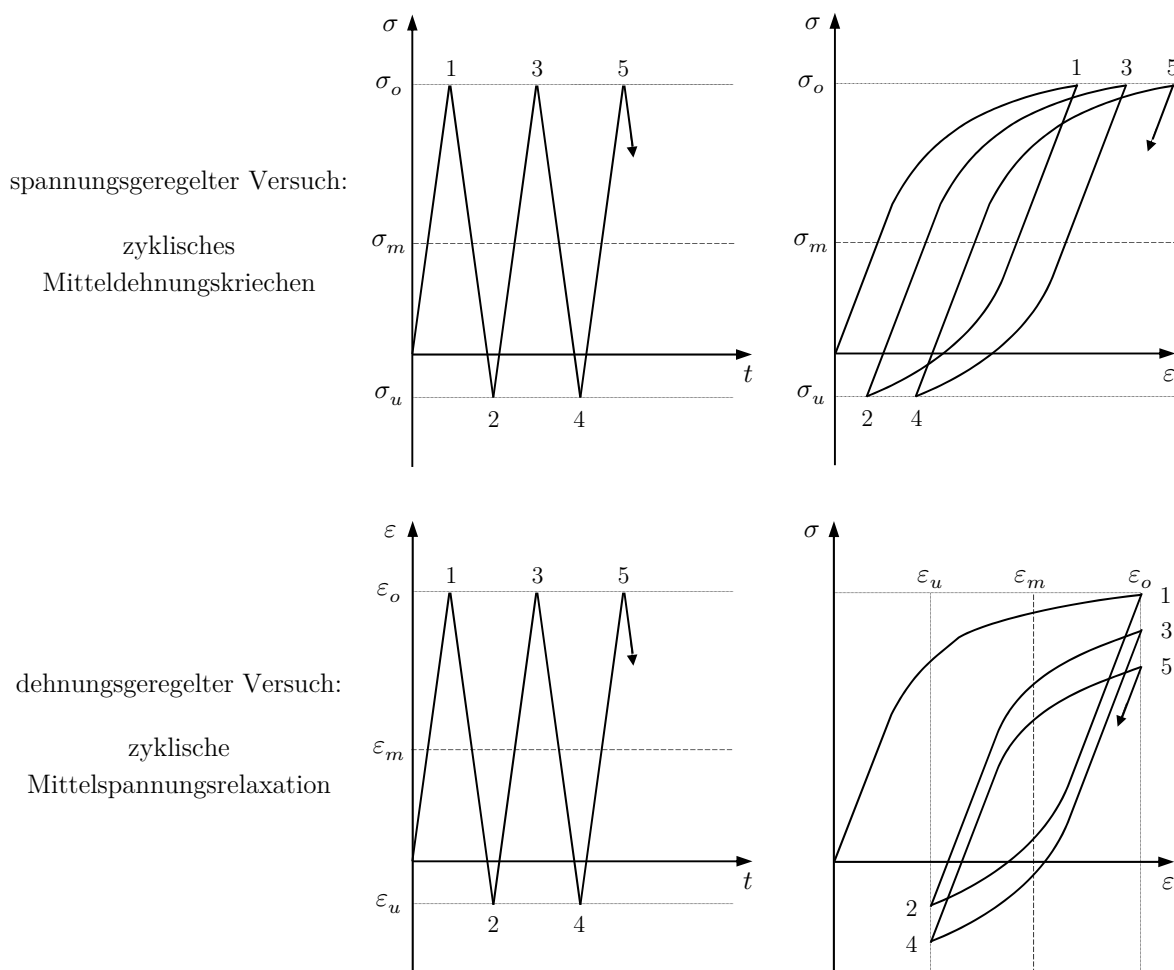


Abbildung 3.17: Zyklusabhängiges Mitteldehnungskriechen (oben) und zyklusabhängige Mittelspannungsrelaxation (unten) [15]

Bei Dauerschwingversuchen unter reiner Wechselbeanspruchung kann durch mikrostrukturelle Veränderung im Werkstoff eine zyklische Ent- oder Verfestigung auftreten [37]. Bei Schwingversuchen mit von Null verschiedenen Mittellasten äußern sich diese Vorgänge in einer zyklischen Mitteldehnungsrelaxation bzw. einem Mittelspannungskriechen. Je nachdem, ob der Versuch spannungs- oder dehnungsgeregelt ist, herrschen unterschiedliche Effekte vor (s. Abbildung 3.17). Bei spannungsgeregelten Versuchen tritt ein zyklusabhängiges Mitteldehnungs-

kriechen und bei dehnungsgeregelten Versuchen eine zyklenabhängige Mittelspannungsrelaxation auf. Diese Verhalten sind besonders bei hoher Mittelspannung bzw. erhöhter Temperatur erkennbar, und das Einbeziehen dieser Vorgänge ist ohne große Auswirkung auf den rechnerischen Lebensdauerwert [15]. Sie werden daher im Zuge der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

- **Zyklische Werkstoffgesetze**

Die analytische Formulierung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve wurde in Gl. 3.10 in Form der *Ramberg-Osgood*-Beziehung [31] angegeben. Die Schädigung, die infolge einer Schwingbeanspruchung mit von Null verschiedener Mittellast entsteht, wird auf Basis von Spannungs-Dehnungs-Hysteresen ermittelt. Die Form einer Hystereseschleife kann in ausreichender Genauigkeit mit Hilfe der *Masing-Hypothese* [38] beschrieben werden, die besagt, dass die Hystereseurve der in Spannungen und Dehnungen verdoppelten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve folgt [15].

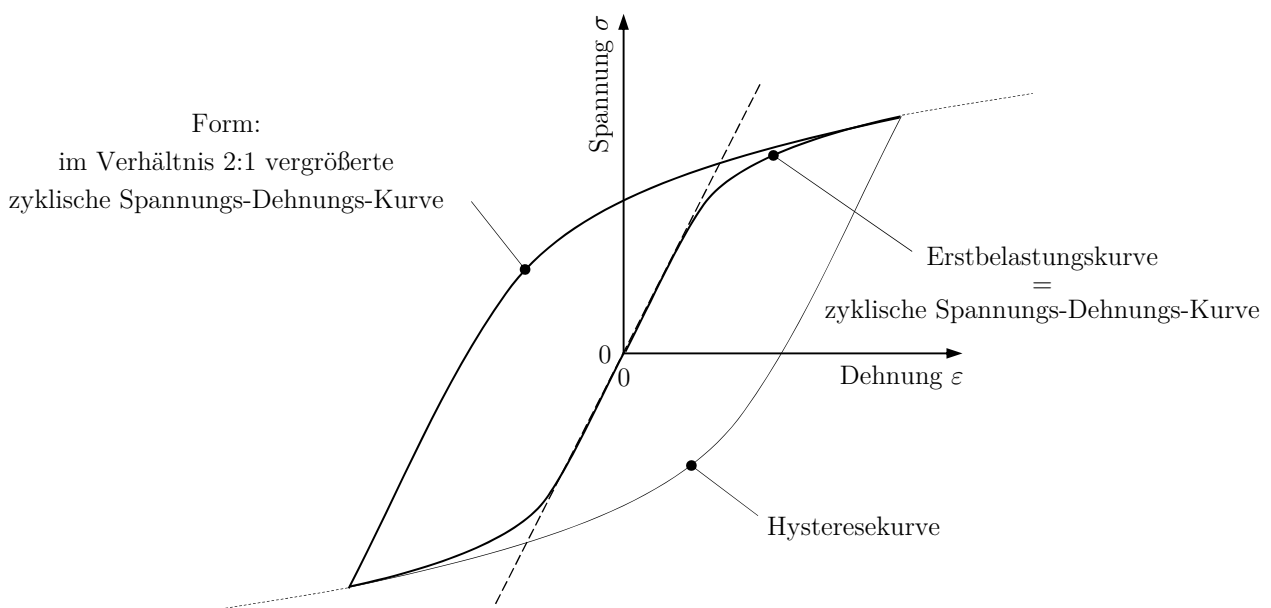


Abbildung 3.18: *Masing-Hypothese* [38]

Aus diesem Grundgedanken resultiert die analytische Formulierung der *Masing-Hypothese* gemäß Gl. 3.13 nach *Seeger* [39].

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{el} + \Delta\varepsilon_{pl} = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad 3.13$$

Um die Kerbgrundbeanspruchungen bei einer Schwingbeanspruchung mit veränderlichen Amplituden ermitteln zu können, sind zusätzlich noch vier Gesetze des Werkstoffgedächtnisses (*Memory-Verhalten*) zu berücksichtigen. Diese sind nach *Clorman* und *Seeger* [40]:

- Der Erstbelastungspfad folgt der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve (Pfad 0-1).
- Nach Schließen einer Hystereseschleife, die auf der Erstbelastungskurve begonnen hat (Pfad 1-2-1), verläuft der Spannungs-Dehnungspfad weiter auf der Erstbelastungskurve (Pfad 1-3).
- Am Ende einer vollständigen Hystereseschleife, die auf einem Hystereseast begonnen hat (Pfad 4-5-4), wird der ursprüngliche Hystereseast fortgesetzt (Pfad 3-4-6).
- Ein auf der zyklischen Arbeitslinie (Erstbelastungskurve) begonnener Hystereseast (Pfad 3-4-6) endet, wenn er die zyklische Spannungs-Dehnung-Kurve im gegenüberliegenden Quadranten schneidet (Punkt 6); danach folgt anschließend der Verlauf wieder dem zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve (Pfad 6-7).

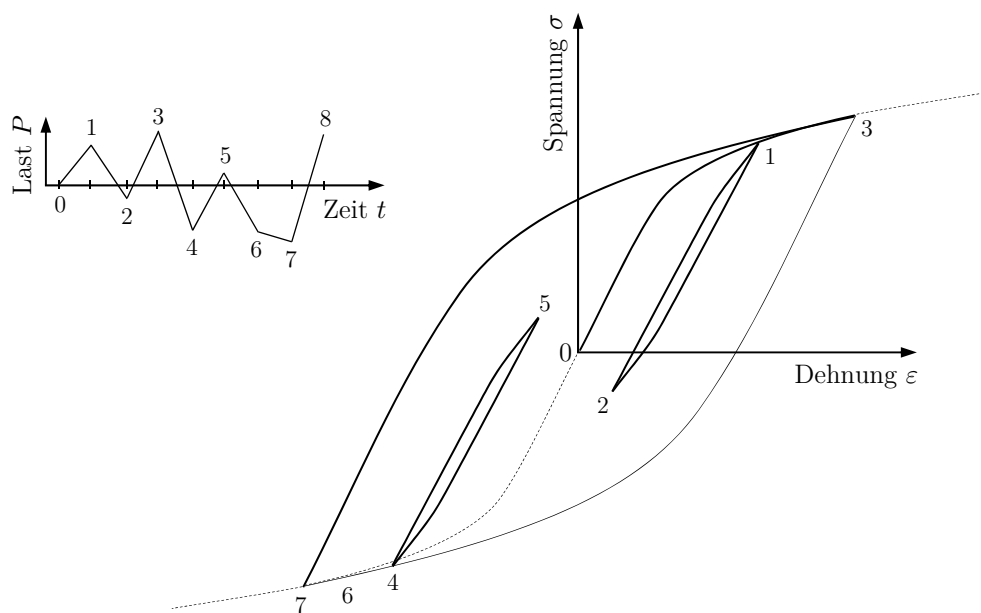


Abbildung 3.19: *Memory-Verhalten* [40]

- **Dehnungs-Wöhlerlinie**

Die sogenannte Dehnungs-Wöhlerlinie stellt den Zusammenhang der Anzahl N der ertragbaren Dehnungsspiele (Schwingspiele) bis zum technisch erfassbaren Oberflächenanriss (etwa 0,5 mm Tiefe und 2 mm Oberflächenlänge nach *Radaj* [17]) zur Dehnungsamplitude ε_a her. Dieser Zusammenhang wurde von *Coffin* [28], *Manson* [29] und *Morrow* [30] formuliert, siehe Gl. 3.14.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad 3.14$$

mit
$$\varepsilon_{a,el} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b \quad 3.15$$

und
$$\varepsilon_{a,pl} = \varepsilon'_f (2N)^c \quad 3.16$$

Wenn nun für eine betrachtete Kerbstelle die Spannungsamplitude σ_a und die Dehnungsamplitude ε_a bekannt sind (z.B. aus einer FE-Berechnung) lässt sich mit ε_a die Schwingspielzahl N durch Auflösung der Gl. 3.14 nach N ermitteln.

Eine andere Methode zur Ermittlung der Schwingspielzahl N besteht darin (in der vorliegenden Arbeit angewendet), nur den Zusammenhang von elastischer Dehnungsamplitude und Schwingspielzahl N wie folgt zu nutzen:

$$\varepsilon_{a,el} = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b \quad 3.17$$

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N)^b \quad 3.18$$

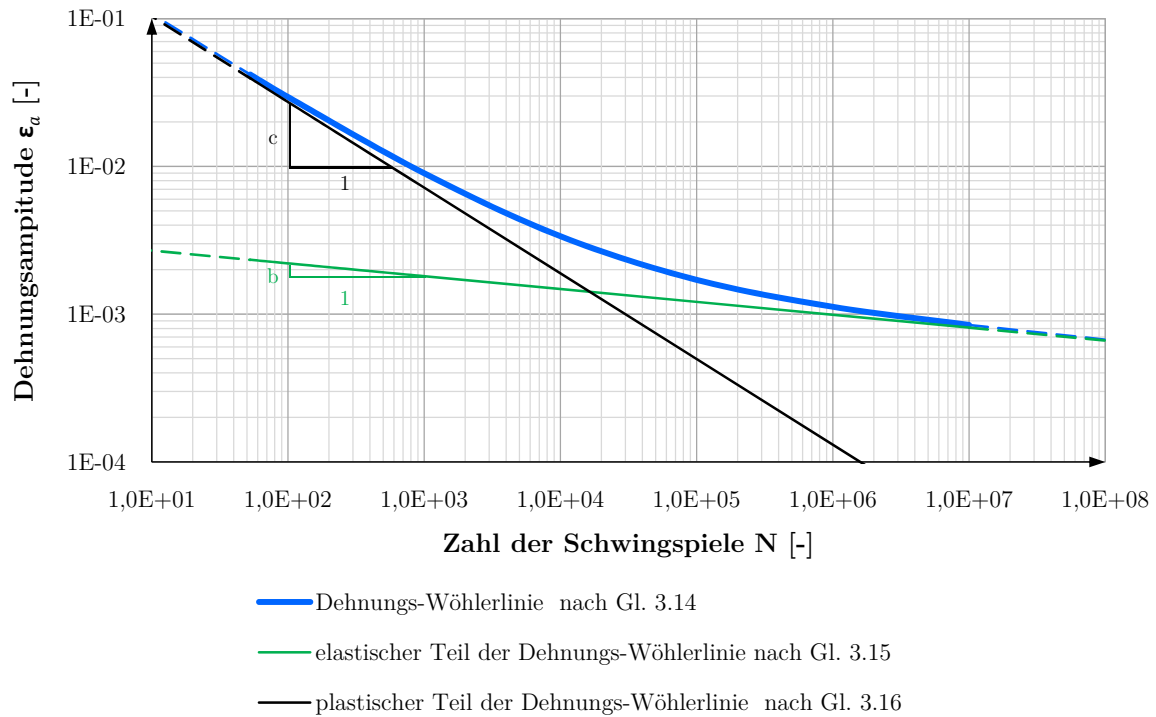
$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f} \right)^{1/b} \quad 3.19$$

Abhängig von den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Versagenshypothesen (Gestaltänderungshypothese nach *von Mises*, Hauptnormalspannungshypothese nach *Rankine*) ergeben sich die Anrisschwingspielzahlen N_{σ_1} bzw. N_{σ_V} nach Gl. 3.20 und Gl. 3.21.

$$N_{\sigma_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{1,a}}{\sigma'_f} \right)^{1/b} \quad 3.20$$

$$N_{\sigma_V} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{V,a}}{\sigma'_f} \right)^{1/b} \quad 3.21$$

Abbildung 3.20 stellt die Dehnungs-Wöhlerlinie von Baustahl S355 im doppellogarithmischen Maßstab dar. Es ist erkennbar, dass die Grundform der Dehnungs-Wöhlerlinie weder einen horizontalen Auslauf nach Erreichen der Zugfestigkeit (Baustahl S355: $\sigma_{a,max} = 490 [N/mm^2]$ $\rightarrow \varepsilon_a = 0,042 [-]$ $\rightarrow N = 53 [-]$) noch einen Knickpunkt zur horizontalen Dauerfestigkeit (bei $N_d = 10^6 - 10^8$) aufweist [17].

Abbildung 3.20: Dehnungs-Wöhlerlinie von Baustahl *S355*

- **Schädigungsbewertung**

Die in Abbildung 3.20 dargestellte Dehnungs-Wöhlerlinie beschreibt das Materialverhalten einer ungekerbten Werkstoffprobe unter reiner Wechselbeanspruchung (Spannungsverhältnis ($R = -1$), Mittelspannung $\sigma_m = 0$). Da metallische Werkstoffe (speziell jene mit hoher Zugfestigkeit) in Bezug auf das Ermüdungsverhalten mittelspannungsempfindlich sind, werden sogenannte Schädigungsparameter und zugehörige Schädigungsparameter-Wöhlerlinien formuliert. Schädigungsparameter erlauben daher die Umrechnung einer mittelspannungsbehafteten Hysterese auf schädigungsgleiche, jedoch mittelspannungsfreie Hysteresen. [9] Ein in der Fachliteratur weit verbreiteter Schädigungsparameter wurde von *Smith, Watson* und *Topper* [36] eingeführt. Dabei wird die Schädigung über das Produkt aus Oberspannung σ_o und Dehnungsamplitude ε_a berücksichtigt. Der Elastizitätsmodul E wird nur als zusätzliche (schädigungsirrelevante) Größe mitgeführt [17].

$$P_{SWT} = \sqrt{(\sigma_o + \sigma_m)\varepsilon_a E} = \sqrt{\sigma_o \varepsilon_a E} \quad 3.22$$

In der vorliegenden Arbeit wird die Schädigung auf Basis von Hauptzugspannungen (nach *Rankine*) und Vergleichsspannungen (nach *von Mises*) ermittelt. Daher ergeben sich die folgenden Gleichungen:

nach *Rankine*:
$$P_{SWT,\sigma I} = \sqrt{(\sigma_{1,a} + \sigma_{1,m})\varepsilon_{1,a}E} \quad 3.23$$

nach *von Mises*:
$$P_{SWT,\sigma V} = \sqrt{(\sigma_{V,a} + \sigma_{V,m})\varepsilon_{V,a}E} \quad 3.24$$

Durch Anwendung des Parameters auf die Dehnungs-Wöhlerlinie (Gl. 3.14) mit $\sigma_m = 0$ ($R = -1$) erhält man die für beliebige Mittelspannung und Mitteldehnung gültige Schädigungsparameter-Wöhler-Linie [17].

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma'_f{}^2(2N)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f(2N)^{b+c}E} \quad 3.25$$

Zusätzlich zum Mittelspannungseinfluss wird in der vorliegenden Arbeit der Einfluss der Oberflächenrauigkeit (Faktor κ) berücksichtigt und anschließend die Überlebenswahrscheinlichkeit auf 97,5% erhöht, da den Materialkennwerten des *Uniform Material Law* (Tabelle 3.1) eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50% zugrunde liegt. Dies wird jeweils in Kapitel 5.8 und 5.9 erläutert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die entsprechenden Schädigungsparameter-Wöhlerlinien und ihre Daten hier dargestellt, siehe Abbildung 3.21 und Tabelle 3.2.

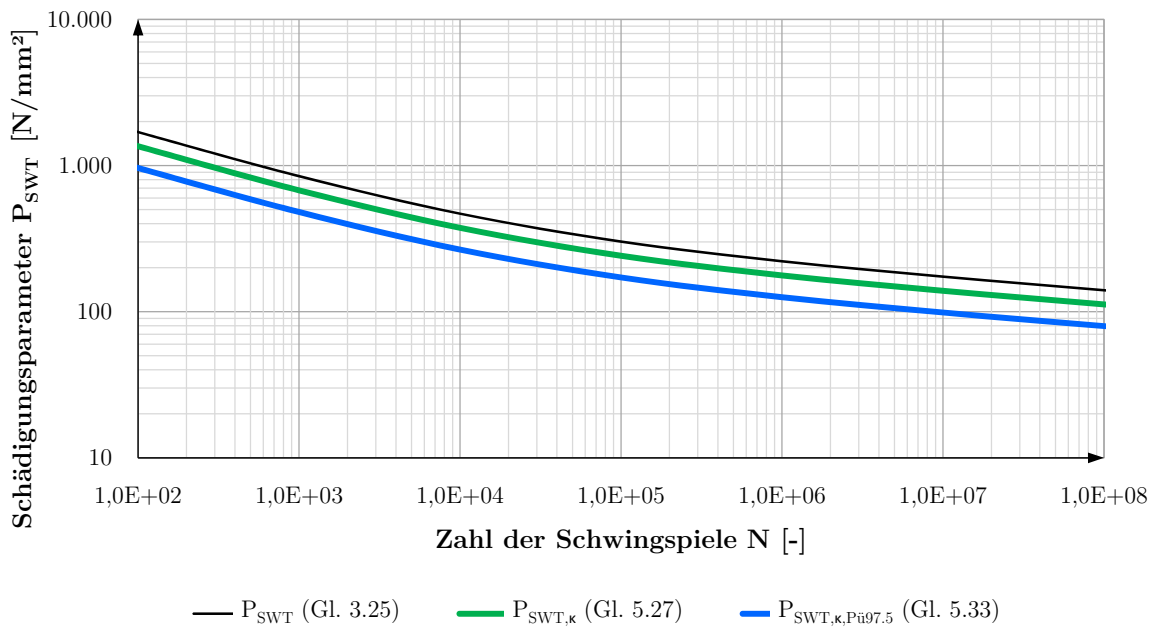


Abbildung 3.21: Schädigungsparameter-Wöhlerlinien von Baustahl *S355*

Tabelle 3.2 Daten der zyklischen Spannung-Dehnungs-Kurve und der Schädigungsparameter-Wöhlerlinien von Baustahl S355

| Lastspiele N [-] | elastische Dehnung $\varepsilon_{a,el}$ [-] | plastische Dehnung $\varepsilon_{a,pl}$ [-] | gesamt Dehnung ε_a [-] | Spannungs- amplitude σ_a [N/mm ²] | Schädigungsparameter | | |
|--------------------------|--|--|---|---|-----------------------------------|--|---|
| | | | | | P_{SWT} [N/mm ²] | $P_{SWT,\kappa}$ [N/mm ²] | $P_{SWT,\kappa,Pü97.5}$ [N/mm ²] |
| 1,0E+00 | 0,00330 | 0,39469 | 0,39798 | 692 | 7605 | 6084 | 4320 |
| 5,3E+01 | 0,00233 | 0,03953 | 0,04186 | 490 | 2075 | 1660 | 1179 |
| 1,0E+02 | 0,00221 | 0,02731 | 0,02951 | 464 | 1695 | 1356 | 963 |
| 1,0E+03 | 0,00181 | 0,00718 | 0,00899 | 379 | 846 | 677 | 481 |
| 1,0E+04 | 0,00148 | 0,00189 | 0,00337 | 311 | 469 | 375 | 266 |
| 1,0E+05 | 0,00121 | 0,00050 | 0,00171 | 254 | 302 | 241 | 171 |
| 1,0E+06 | 0,00099 | 0,00013 | 0,00112 | 208 | 221 | 177 | 126 |
| 1,0E+07 | 0,00081 | 0,00003 | 0,00085 | 170 | 174 | 139 | 99 |
| 1,0E+08 | 0,00066 | 0,00001 | 0,00067 | 139 | 140 | 112 | 80 |
| Grundlage: | | | | | Gl. 3.25 | Gl. 5.27 | Gl. 5.33 |

Kapitel 4

Numerische Untersuchungen

4.1 Einleitung

Im vorliegenden Kapitel wird die Modellierung, Berechnung und Auswertung der Finite-Elemente- (im Folgenden: FE-) Untersuchungen der SCSC-Platte beschrieben. Die numerische Simulation der SCSC-Platte wurde mit Hilfe des FE-Programms *ABAQUS CAE/6.12* [41] durchgeführt. In den letzten Jahren wurden am Institut für Tragkonstruktionen - Fachbereich Stahlbau an der Technischen Universität Wien umfangreiche FE-Untersuchungen zur SCSC-Platte mit Hilfe *ABAQUS* durchgeführt. *Herrmann* [1] hat im Rahmen seiner Dissertation die Tragfunktion der Platte analysiert und beschäftigte sich mit der ingenieurmäßigen Modellbildung zum Tragverhalten von SCSC-Platten als Fahrbahnplatten für eingleisige Eisenbahnbrücken unter statischer Beanspruchung. *Steurer* [6] hat eine umfangreiche Parameterstudie zur Verbesserung des Materialmodells für Beton unter hohen mehraxialen Spannungszuständen durchgeführt. Ihre FE-Analysen erfolgten begleitend zu experimentellen Versuchen, deren Ziel war die Ermittlung der Tragfähigkeit der SCSC-Platte unter statischer Flächenlast. Als Fortsetzung der bisherigen Forschungen fokussiert diese Arbeit auf die Analyse des Ermüdungsverhaltens der SCSC-Platte, wozu das FE-Programm *ABAQUS* hervorragend geeignet ist. Es handelt sich dabei um ein sehr leistungsfähiges Programmpaket, das erlaubt, die räumliche Modellierung komplexer Kontaktprobleme und die Berücksichtigung von dem nichtlinearen, elastisch-plastischen Materialverhalten der beteiligten Werkstoffe abzubilden. Die Beschreibung des FE-Programms und der Methode der finiten Elemente wird in der vorliegenden Arbeit kurzgehalten und beschränkt sich nur auf jene Teile, die zum Verständnis der Modellierung und der durchgeführten Parameterstudien essenziell sind.

Die Forschungen umfassten im Rahmen der Parameterstudie insgesamt achtzehn SCSC-Plattenmodelle, wovon in diesem Kapitel die Modellierung des Grundmodells *TYP 10* detailliert dargestellt wird.

4.2 Angestrebte Ergebnisse

Die maßgebenden Eingangsgrößen für die Bestimmung der Anrisslebensdauer nach dem Korbdehnungskonzept sind die sogenannten Bauteilfließkurven. Sie geben den Zusammenhang zwischen der äußeren Belastung und den örtlichen Beanspruchungen in der maßgebenden Kerbe wieder [9]. Aus diesem Grund ist die primäre Zielsetzung der numerischen Berechnungen die möglichst realitätsnahe Erfassung der Spannungs- und Verzerrungszustände der SCSC-Platte als Grundlage für die Lebensdauerberechnung.

4.3 Modellbeschreibung

Abbildung 4.1 zeigt die Modellierung einer 20 Meter langen Trogbrücke mit dem FE-Programm *RFEM* [42] inklusive des tatsächlich in *ABAQUS* modellierten Bereichs der SCSC-Platte. Aus Gründen der Symmetrie wurde nur eine Hälfte der Platte (halbe Spannweite), wie in der Abbildung 4.1 dargestellt, modelliert. Die „Länge“ des Plattenmodells (in Brückenlängsrichtung) beträgt 1 m, somit liegt die mittlere Dübelleiste (grün in Abbildung 4.2) außerhalb des Störbereiches der im FE-Modell definierten Randbedingungen. Dieser kommt eine besondere Bedeutung zu, da erwartungsgemäß die maßgebenden Korbbeanspruchungen in diesem Bereich auftreten werden.

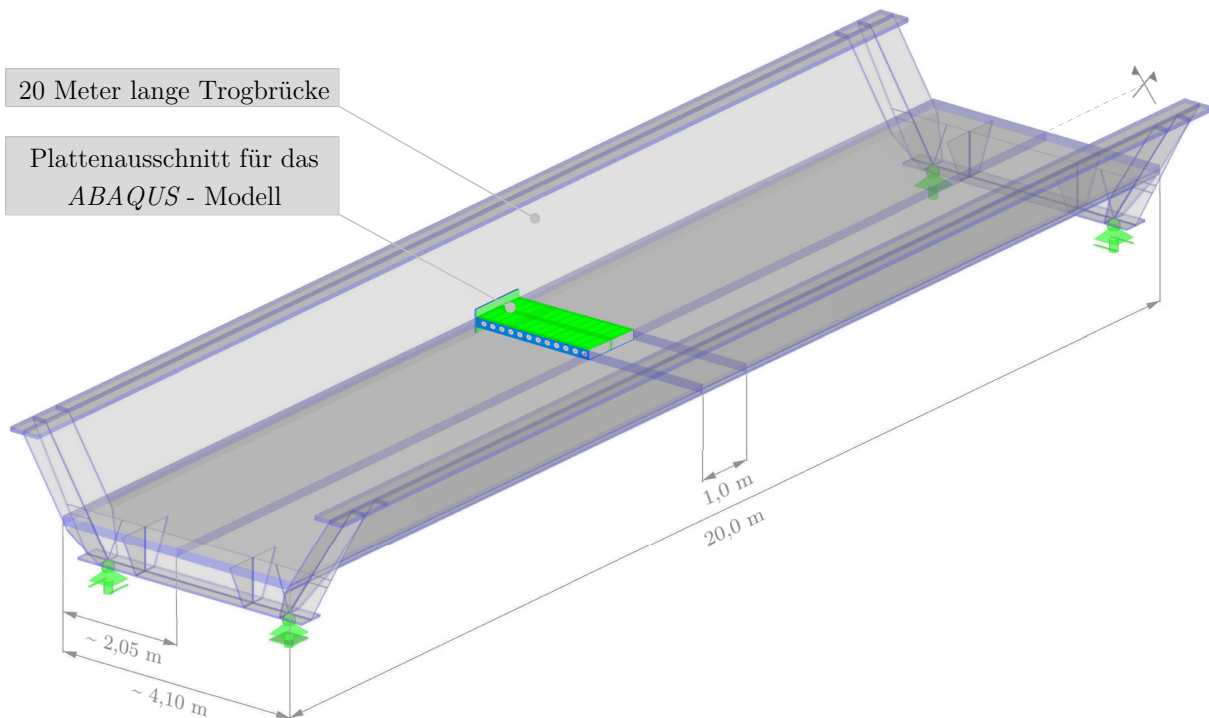


Abbildung 4.1: Betrachteter Plattenausschnitt für die *ABAQUS* - Modellierung

4.3.1 Bestandteile der SCSC-Platte

Der Hauptträgersteg der Brücke wird durch eine Endplatte ersetzt und vereinfacht in vertikaler Lage modelliert. Die SCSC-Platte besteht somit aus vier Hauptteilen: Unterteil, Betonkern, Oberteil und Endplatte. Sie setzen sich insgesamt aus vierzehn *Parts* zusammen. Den Aufbau des Gesamtmodells kann von Abbildung 4.2 bis Abbildung 4.9 verfolgt werden.

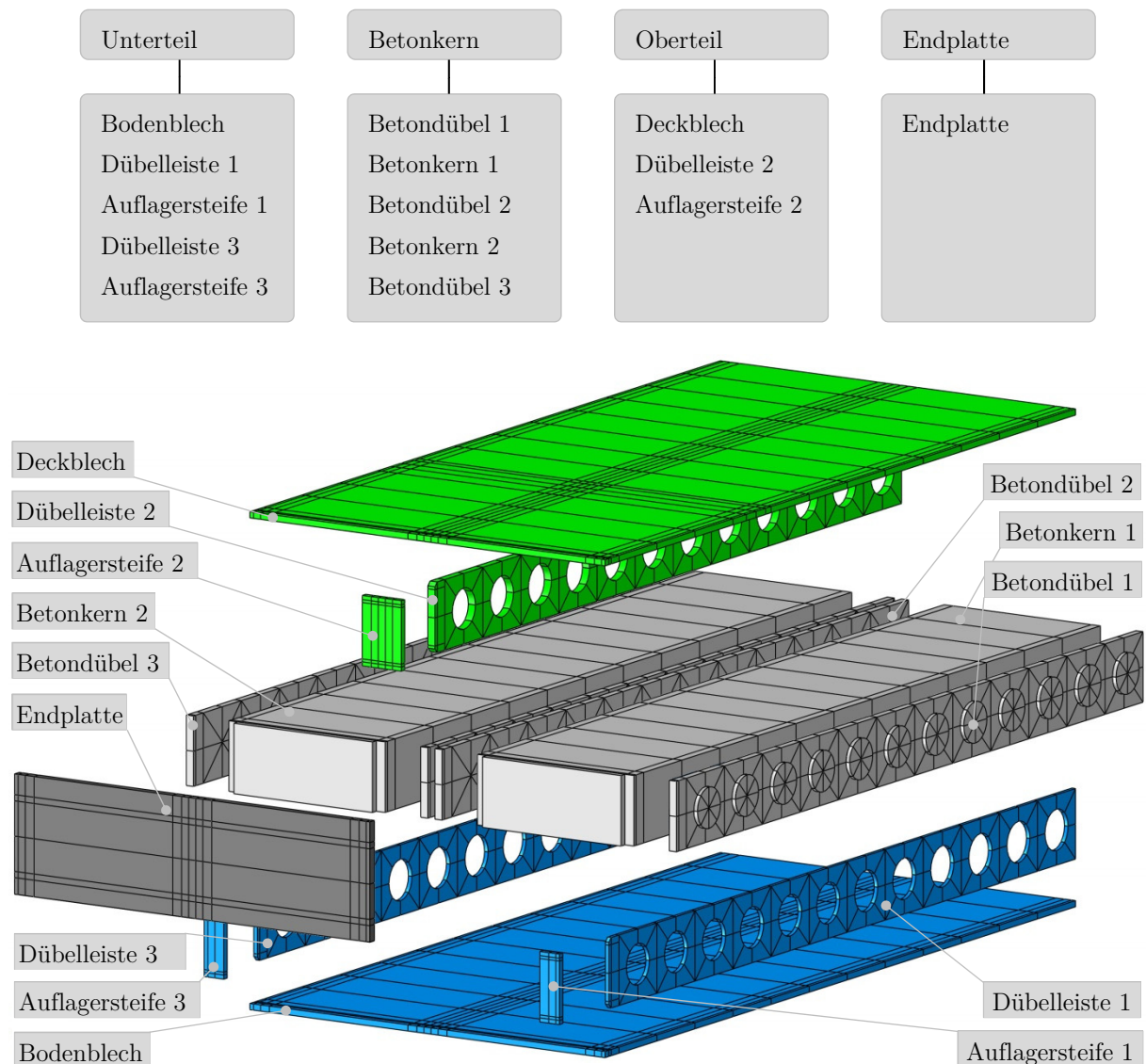


Abbildung 4.2: *Parts* des Plattenmodells *TYP 10*

Die Auflagersteifen sind mit der Dübelleisten starr verbunden. Weiters sind einseitige starre Kopplungen zwischen den Auflagersteifen und dem Deck- oder Bodenblech, s. Abbildung 4.3. Zwischen der Endplatte (Hauptträgersteg) und den Auflagersteifen befindet sich eine 2 mm breite Spalte.

4.3.2 Berechnungsalgorithmus, Elementwahl, Kontaktdefinitionen, Diskretisierung

Die numerische Simulation wurde mit dem Berechnungsalgorithmus *dynamic, explicit* durchgeführt, da dieses sich besonders für die Berücksichtigung nichtlinearer Werkstoffmodelle und komplexer Kontaktprobleme eignet [9]. Als Elementtyp wurden acht Knoten Hexaederelemente mit linearen Verschiebungsansätzen und einem Integrationspunkt pro Element (*C3D8R*, Algorithmus *reduced integration*) verwendet. Nach Empfehlung von *Herrmann* [1] wurde die Option *Element deletion* aktiviert, sonst wurden überall die Standardeinstellungen übernommen,

Wie aus Abbildung 4.5 ersichtlich ist, wurde die Betonfüllung aus Gründen der Diskretisierung für die FE-Modellbildung in fünf Teile aufgeteilt, nämlich auf zwei Betonkerne und drei Betondübel. Die starre Verbindung zwischen den Betonteilen wurde ebenso wie die Schweißnahtmodellierung zwischen den zusammengehörigen Stahlteilen über den Befehl *Tie* im Modul *Constraints* erstellt, siehe Abbildung 4.3, Abbildung 4.5, Abbildung 4.7 und Abbildung 4.10.

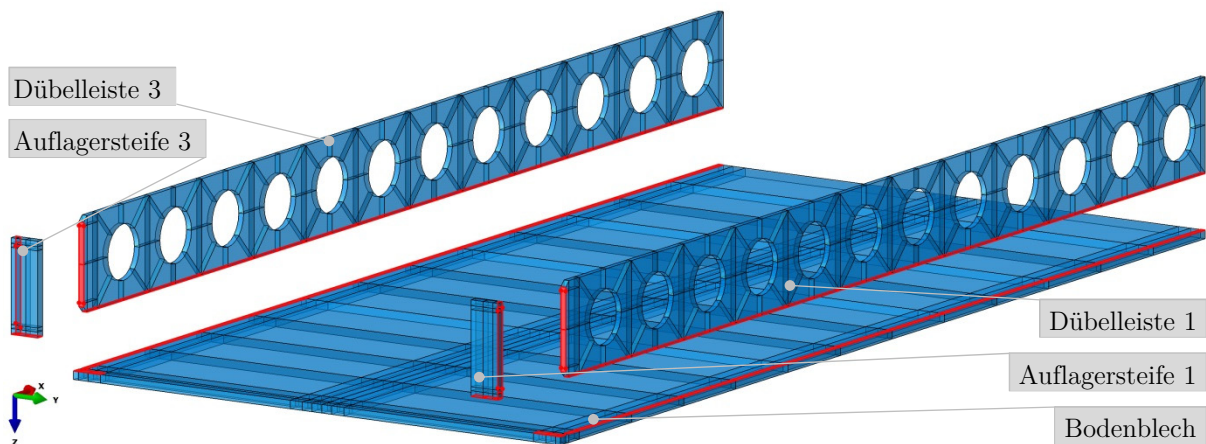


Abbildung 4.3: Starre Kopplung (*Tie*) des Unterteils

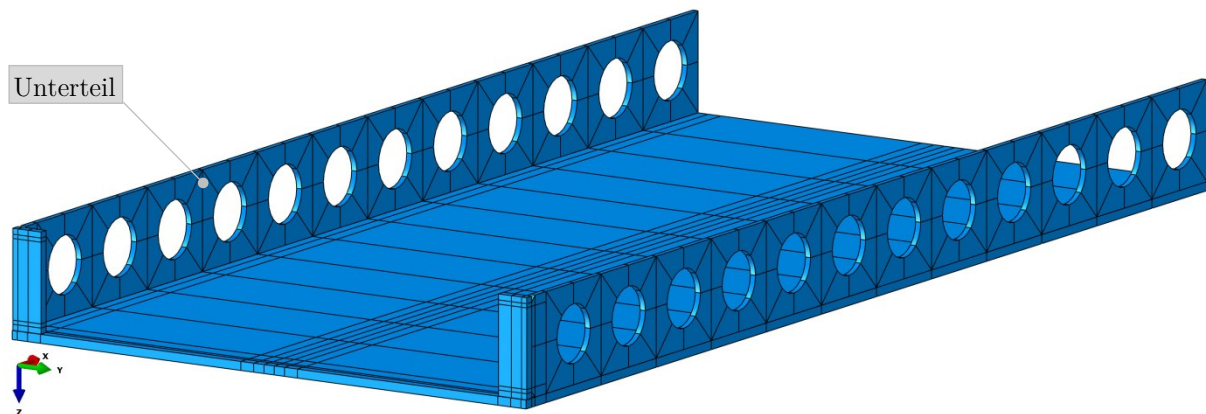


Abbildung 4.4: Zusammengesetzter Unterteil

Der Reibungskoeffizient μ in der Fuge zwischen Stahl und Beton bei allen Stirnflächen der Lochdübelfreischnitte (Betondübel) wurde mit $\mu = 0,3$ definiert. Alle restlichen Kontaktflächen von Stahl und Beton sind im Modul Interactions reibungsfrei modelliert mittels *surface-to-surface / penalty contact method*.

Die Diskretisierung des Modells erfolgte im Regelfall mit dem Vernetzungsalgorithmus *structured meshing* im Modul Mesh. Im Bereich komplexer Geometrie, nämlich im Dübelbereich, wurde der Vernetzungsalgorithmus *sweep* angewendet. Die Vernetzungen wurden überall manuell mittels Partitionierung und *seeds* präzise angepasst um einen gleichmäßigen Übergang des Netzes auf den Kontaktflächen zu gewährleisten. Die minimale Elementkantenlänge des Modells befindet sich im Bereich der Lochdübelleiste und beträgt 3 mm in allen drei Dimensionen. Die maximale Elementkantenlänge wurde auf rund 40 mm festgelegt. Eine genaue Beschreibung der Untersuchungen zur Anpassung des verwendeten Netzes wird im Kapitel 6.1.1, im Rahmen der Parameterstudie, diskutiert. Die Anzahl der finiten Elemente im Grundmodell beträgt etwa eine halbe Million. Die genauen und vollständigen Angaben aller untersuchten Modelle sind in Anhang A.3 enthalten.

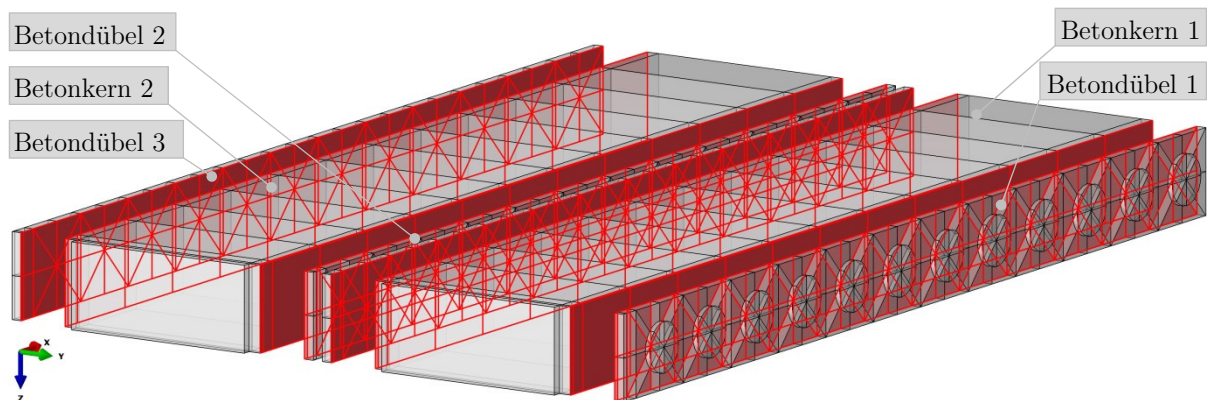


Abbildung 4.5: Starre Kopplungen (*Tie*) des Betonkerns

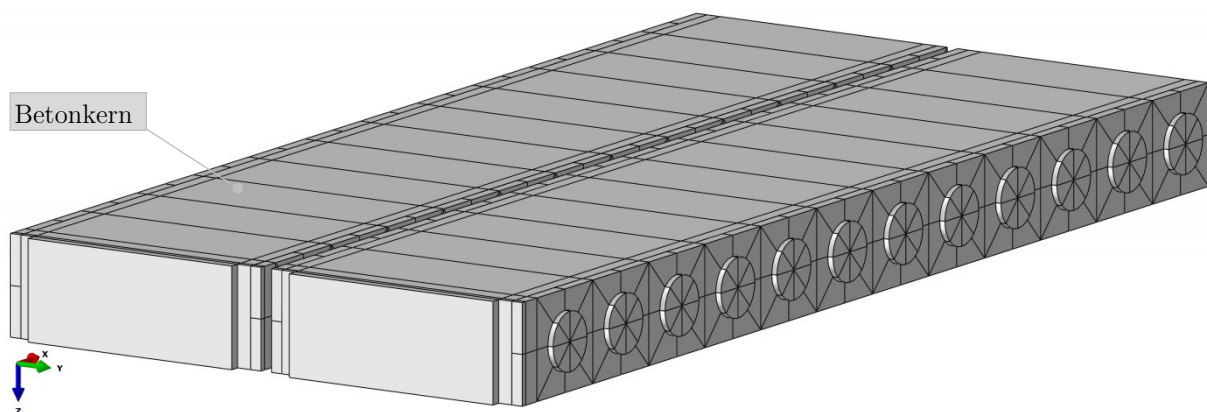


Abbildung 4.6: Zusammengesetzter Betonkern

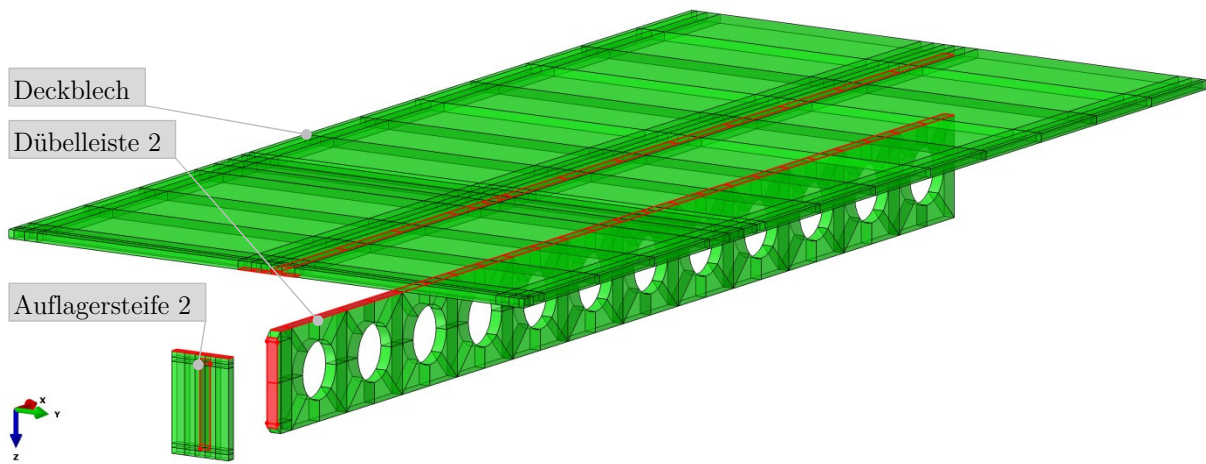
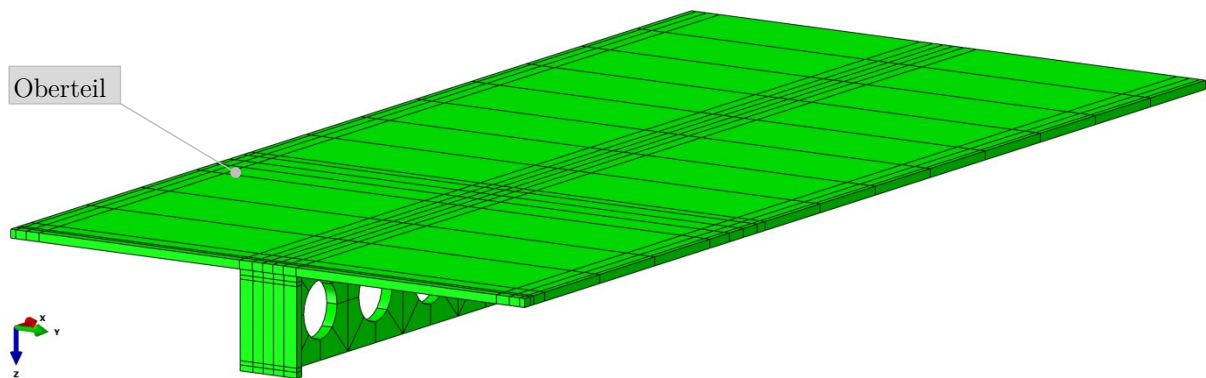
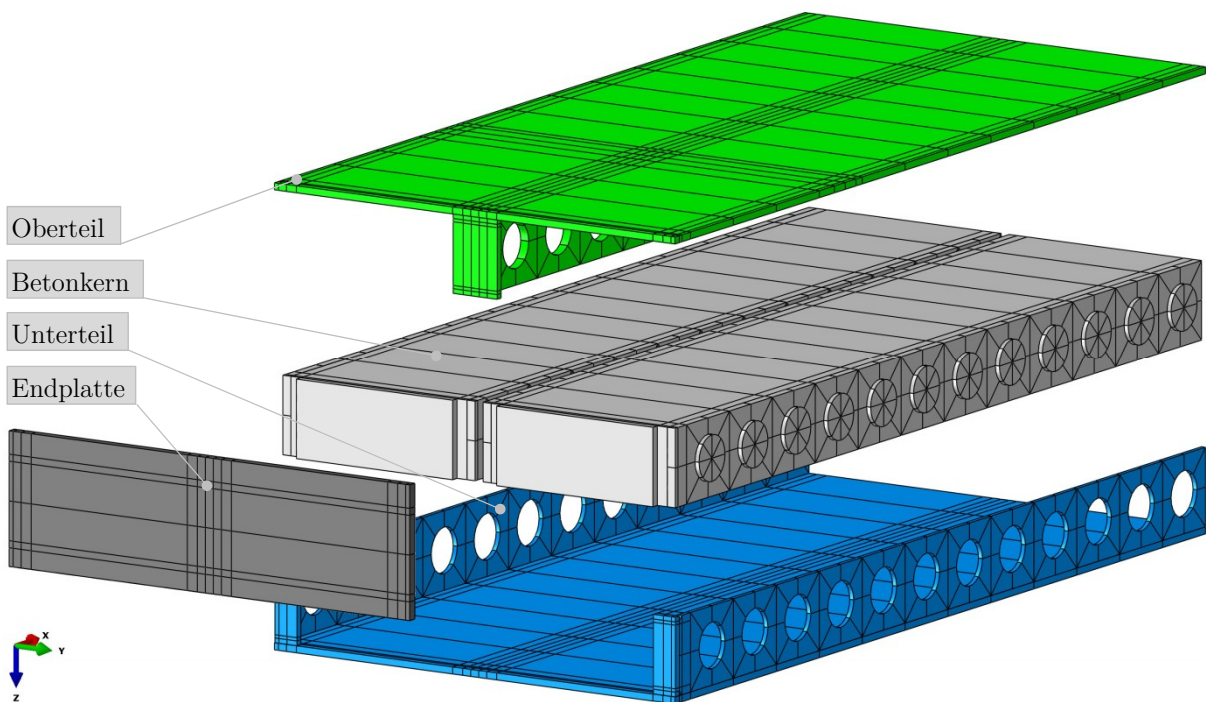
Abbildung 4.7: Starre Kopplungen (*Tie*) des Oberteils

Abbildung 4.8: Zusammengesetzter Oberteil

Abbildung 4.9: Vier Hauptteile des Plattenmodells *TYP 10*

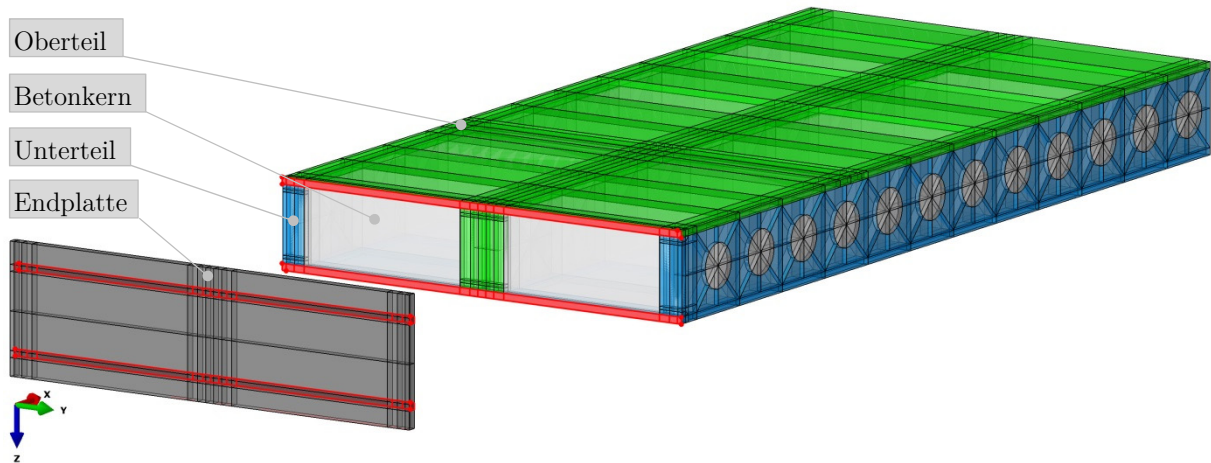


Abbildung 4.10: Starre Kopplungen (*Tie*) der Endplatte

Die einzelnen *Parts* wurden im *Assembly* zum Gesamtmodell zusammengesetzt, siehe Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12

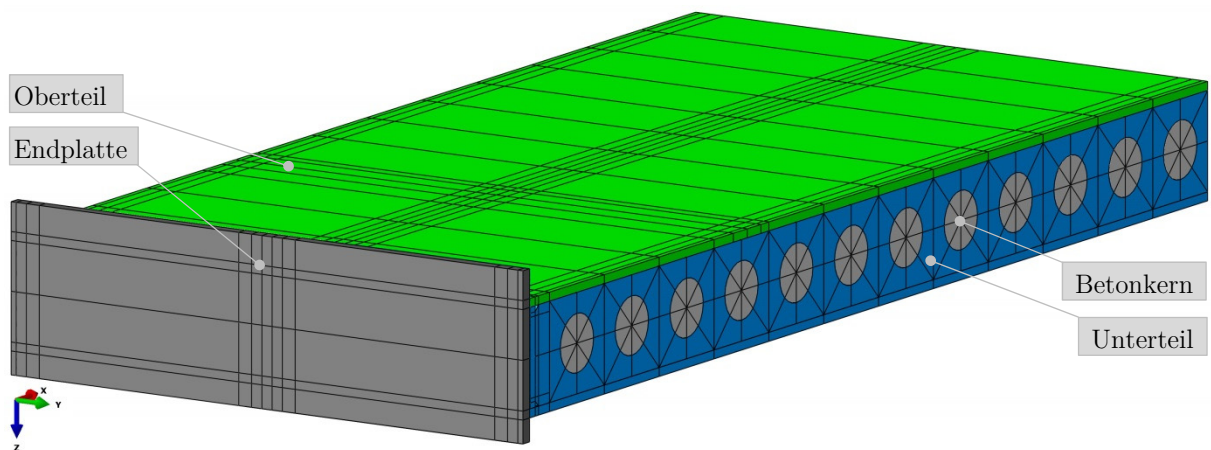


Abbildung 4.11: Zusammengesetzte SCSC-Platte, Ansicht außen

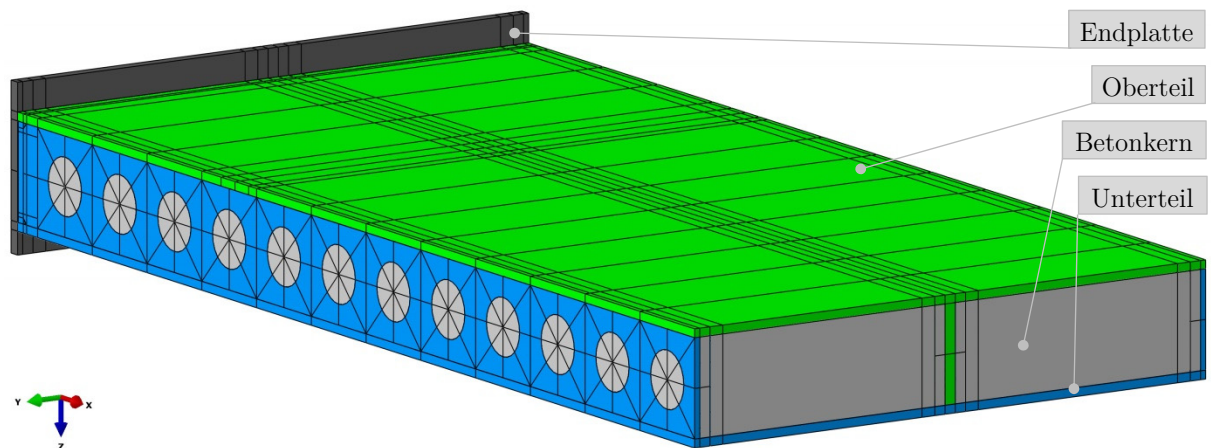


Abbildung 4.12: Zusammengesetzte SCSC-Platte, Ansicht innen

4.3.3 Eingabewerte der Materialmodelle

- **Stahl:**

Als Materialmodell für Stahl wurde das in *ABAQUS* vorhandene *Classic Metal Plasticity* im Modul *Property/Materials* verwendet. In den bisherigen Forschungen [1], [6] konnte seine Eignung für die Modellierung der Stahlteile der SCSC-Platte verifiziert werden. Die angegebene, nichtlineare Arbeitslinie für das Modell basiert auf dem zyklischen Spannungs-Dehnungsgesetz nach dem Kerbdehnungskonzept, s. Abbildung 4.13. Die theoretische Grundlage zur Formulierung dieser Arbeitslinie wurde bereits in Kapitel 3.7 beschrieben.

Zur Definition des elastischen, isotropen Verhaltens benötigt *ABAQUS* die Eingabe des Elastizitätsmoduls E und der Querdehnzahl ν . Da es sich bei der Verwendung des Berechnungsalgorithmus *dynamic, explicit* um ein dynamisches Verfahren handelt, war zusätzlich die Eingabe der Dichte ρ erforderlich.

Tabelle 4.1 Eingabewerte für den elastischen Bereich von Baustahl

| | | | | | |
|-------------------|--------|---|----------------------|-----------------------|------------------|
| Elastizitätsmodul | E | = | 210000 | [N/mm ²] | EN 1993-1-1 [43] |
| Querdehnzahl | ν | = | 0,30 | [-] | EN 1993-1-1 [43] |
| Dichte | ρ | = | $7,85 \cdot 10^{-6}$ | [kg/mm ³] | |

Tabelle 4.2 Eingabewerte der zyklischen Arbeitslinie von Baustahl

| plastische Dehnung | Spannung | |
|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | $S235$ | $S355$ |
| ε_p | σ | σ |
| [-] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 0 | 102,38 | 139,35 |
| $3,438 \cdot 10^{-5}$ | 125,08 | 170,25 |
| $1,307 \cdot 10^{-4}$ | 152,83 | 208,02 |
| $4,969 \cdot 10^{-4}$ | 186,73 | 254,15 |
| $1,889 \cdot 10^{-3}$ | 228,14 | 310,53 |
| $7,182 \cdot 10^{-3}$ | 278,74 | 379,40 |
| $2,731 \cdot 10^{-2}$ | 340,57 | 463,55 |
| $3,953 \cdot 10^{-2}$ | 360,00 | 490,00 |

Das plastische Verhalten ist durch die Eingabe von plastischen Dehnungswerten ε_p und der jeweils zugehörigen Spannung σ definiert. Die Wertepaare können anhand der *Ramberg-Osgood-Beziehung* (Gl. 3.10) ermittelt werden. Abbildung 4.13 veranschaulicht, die in der Tabelle 4.2 angegebenen Werte.

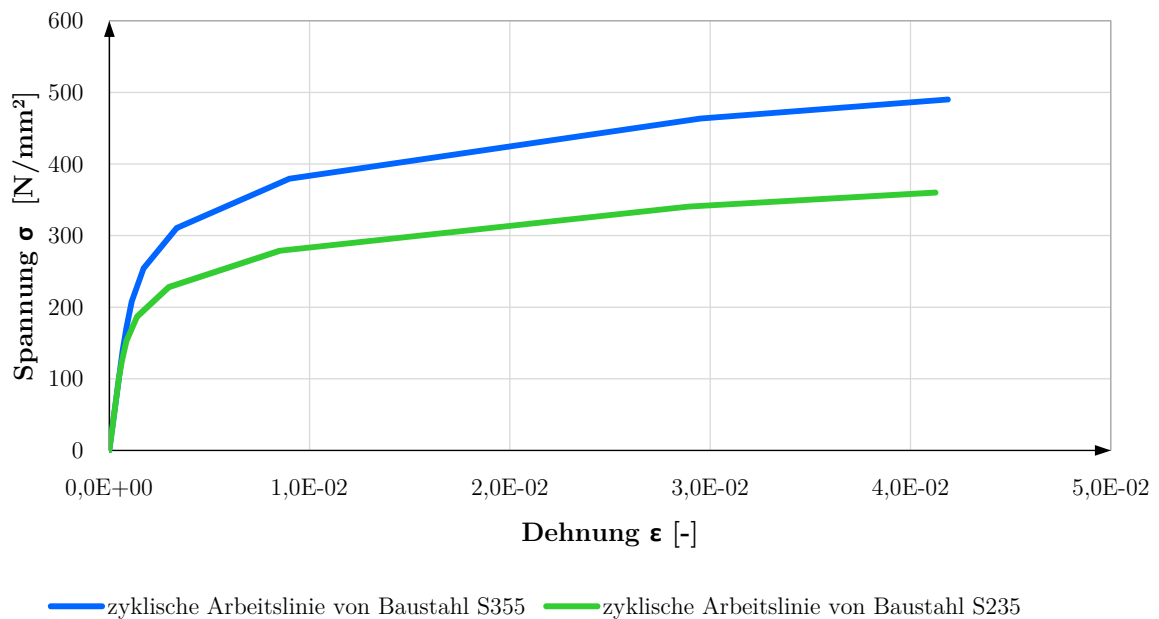


Abbildung 4.13: Zyklische Arbeitslinie von Baustahl *S355/S235*

- **Beton:**

Das nichtlineare Verhalten für Beton wurde über das Materialmodell *Concrete Damage Plasticity (CDP)* berücksichtigt. Die notwendigen Basisparameter zur Anwendung des Modells sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Tabelle 4.3 Basiswerte für den elastischen Bereich von Beton

| | | | | | |
|---------------------|-----------------|---|----------------------|-----------------------|---|
| Querdehnzahl | ν | = | 0,20 | [-] | <i>EN 1992-1-1</i> [44] |
| Dichte | ρ | = | $2,40 \cdot 10^{-6}$ | [kg/mm ³] | |
| Dilatationswinkel | ψ_c | = | 36 | [°] | |
| Exzentrizität | ϵ | = | 0,1 | [-] | <i>ABAQUS</i> Standard- einstellung |
| Spannungsverhältnis | f_{t0}/f_{c0} | = | 1,16 | [-] | |
| Formfaktor | K_c | = | 0,667 | [-] | |

Zusätzlich sind einige von der Betongüte abhängige Eingabewerte einzugeben. Der Elastizitätsmodul E_{cm} wurde in Übereinstimmung mit *EN 1992-1-1* [44] gemäß Tabelle 4.5 festgelegt. Die Arbeitslinie von Beton unter einaxialer Druckbeanspruchung wurde basierend auf den Empfehlungen von [6] und [45] vollständig, mit absteigendem Bereich angegeben, siehe Abbildung 4.14. Der Anfang des Verlaufs (zwischen Punkt A und D) wurde nach [44], Kapitel 3.1.5 in Abhängigkeit der Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} ermittelt.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad \text{für:} \quad 0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}| \quad 4.1$$

wobei: $\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$ und $k = 1,1 E_{cm} \frac{|\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$

Die Verlängerung der Arbeitslinie (zwischen Punkt D und F) ebenso wie der komplette Verlauf der Druckschädigungsparameter wurde nach der in [45] beschriebenen Methode definiert. Da das Materialmodell *CDP* in *ABAQUS* durch die inelastischen Dehnungen ε_c^{in} – beschrieben in [46] – definiert ist, wird sie im nächsten Schritt nach Gl. 4.2 ermittelt.

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_{cm}} \quad 4.2$$

Das Materialverhalten unter Zugbeanspruchung kann durch eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung, oder durch eine Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung beschrieben werden. Bei Letzterer werden die Verformungen in der Ebene als Rissöffnung eines nicht vorhandenen, fiktiven Risses interpretiert [47]. Der Verlauf dieser Beziehung wird durch die Betonzugfestigkeit f_{ctm} und die Bruchenergie G_f gesteuert. Die Bruchenergie gibt die Fläche unter der Kurve an und beschreibt damit die Energie, die zur Bildung eines spannungsfreien Risses notwendig ist [48]. Die Formulierung der Arbeitslinie im Zugbereich als Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung bietet den Vorteil, dass die Menge der von einem Element aufgenommenen Energie nicht von seiner Größe abhängt und der Ansatz somit weitgehend netzunabhängig ist [49]. Deren Anwendbarkeit wurden z.B. in [50, 51, 48] bestätigt. Aus diesem Grund wird diese Vorgehensweise zur Beschreibung des Zugtragverhaltens gewählt.

Für die Formulierung des Verlaufes $\sigma_t(u_t^{ck})$ steht eine Vielzahl von Varianten zur Verfügung. Deren Verläufe sind in Abbildung 4.16 dargestellt. Im Rahmen der Parameterstudie wurden mehrere Varianten untersucht, siehe Kapitel 6.2.4. In der vorliegenden Arbeit wurde die Variante $d_{max} = 32$ mm nach *CEB-FIP Model Code 1990* [52] für das Basismodell *TYP 10* gewählt.

Die Eingabewerte zur Beschreibung des einaxialen Spannungs-Dehnungsverhaltens, sowie der Steifigkeitsabminderung im Nachbruchbereich sind in Tabelle 4.4 für Beton *C40/50* angegeben. Die Daten für Beton *C25/30* sind in Anhang A.1.4 enthalten.

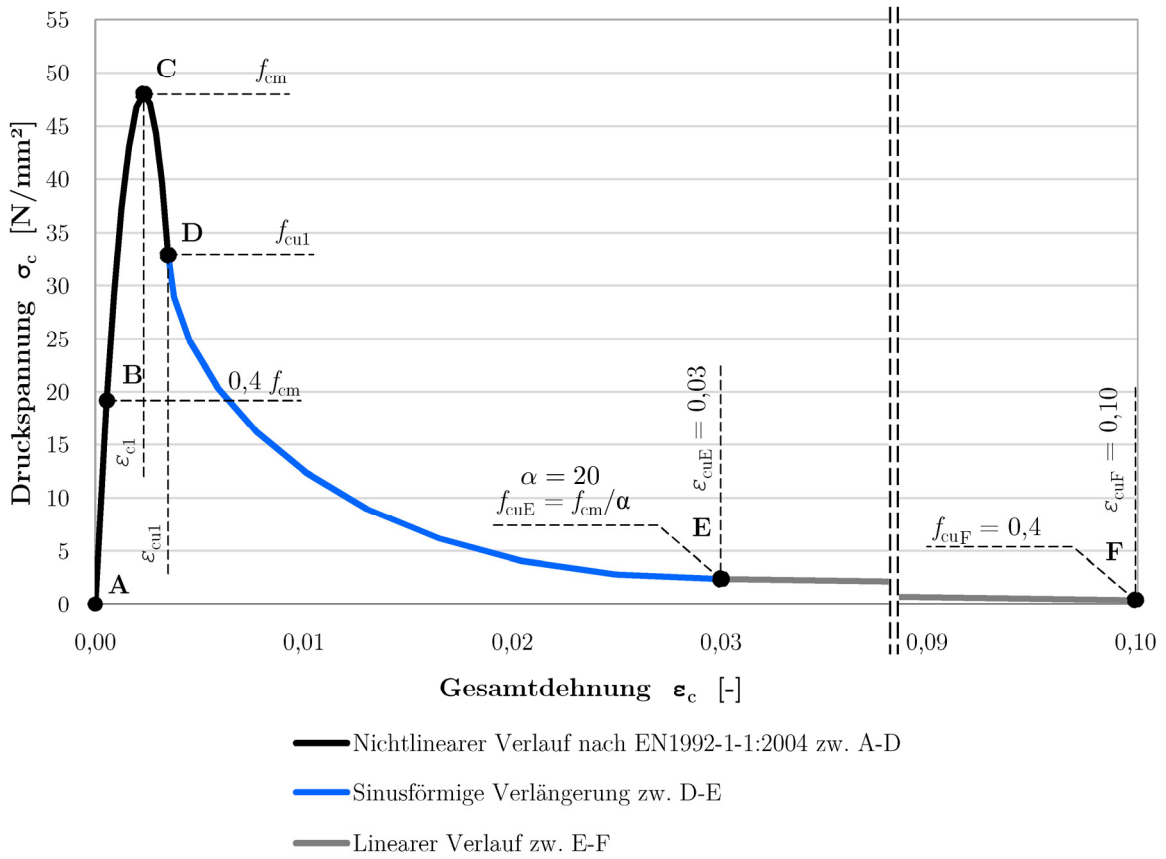


Abbildung 4.14: Nichtlineare Arbeitslinie des Betons C40/50 im Druckbereich

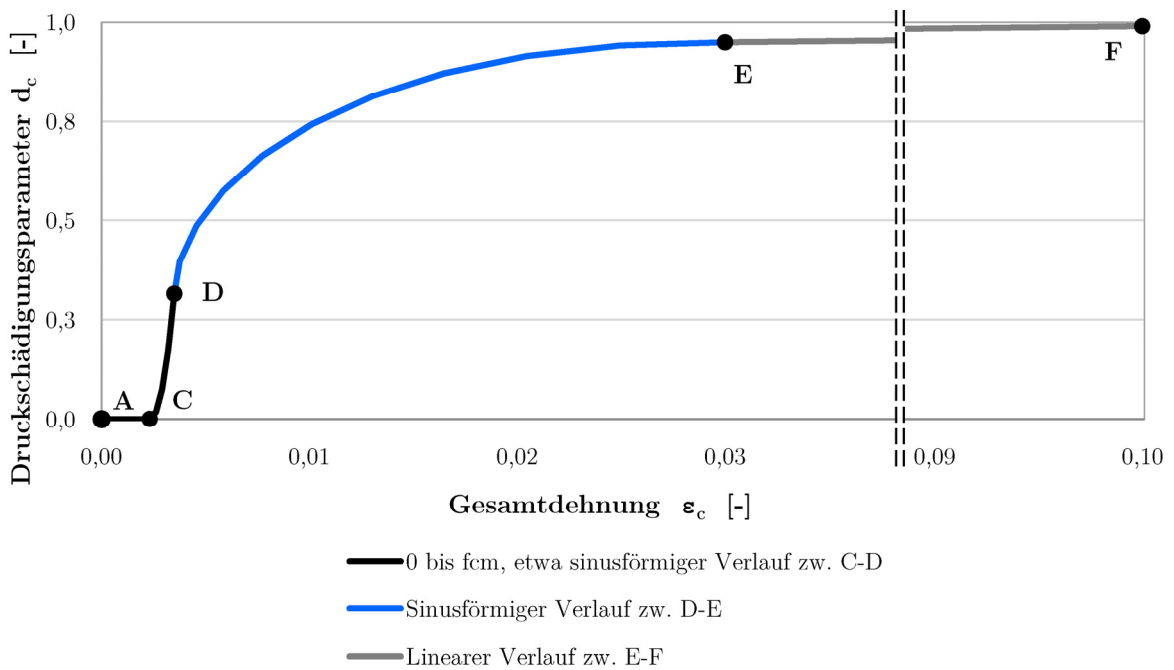


Abbildung 4.15: Druckschädigungsparameter des Betons C40/50

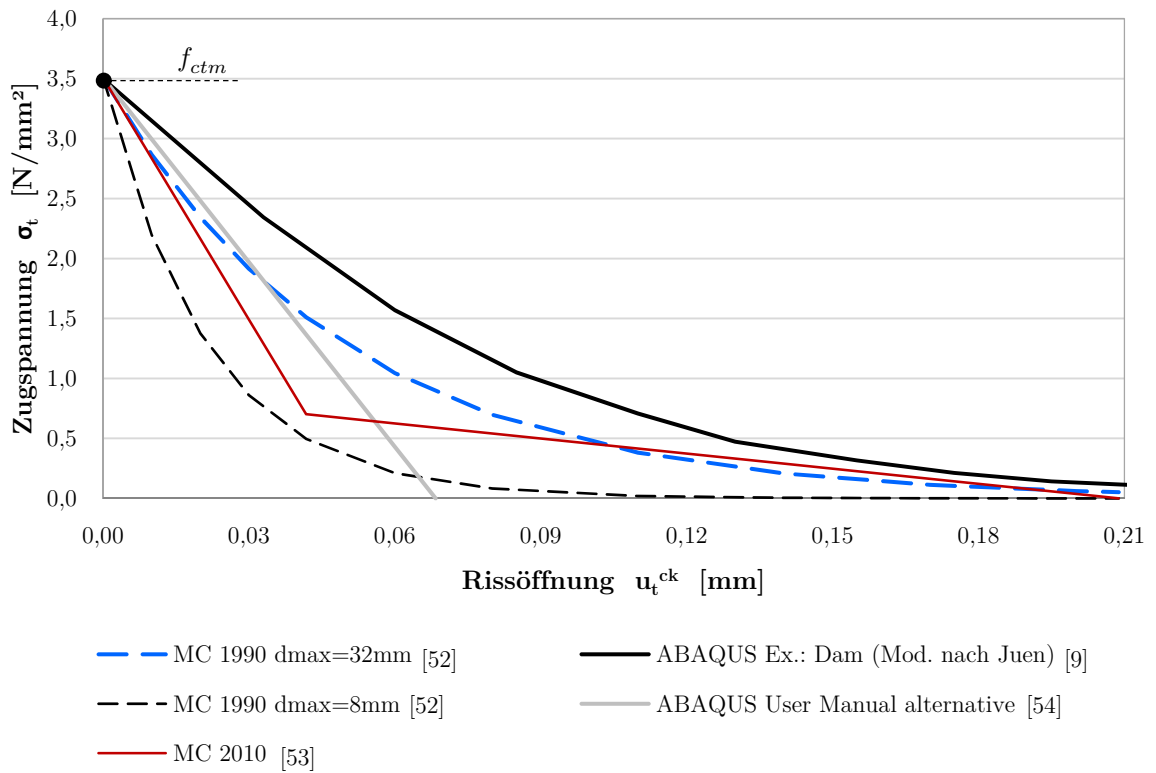
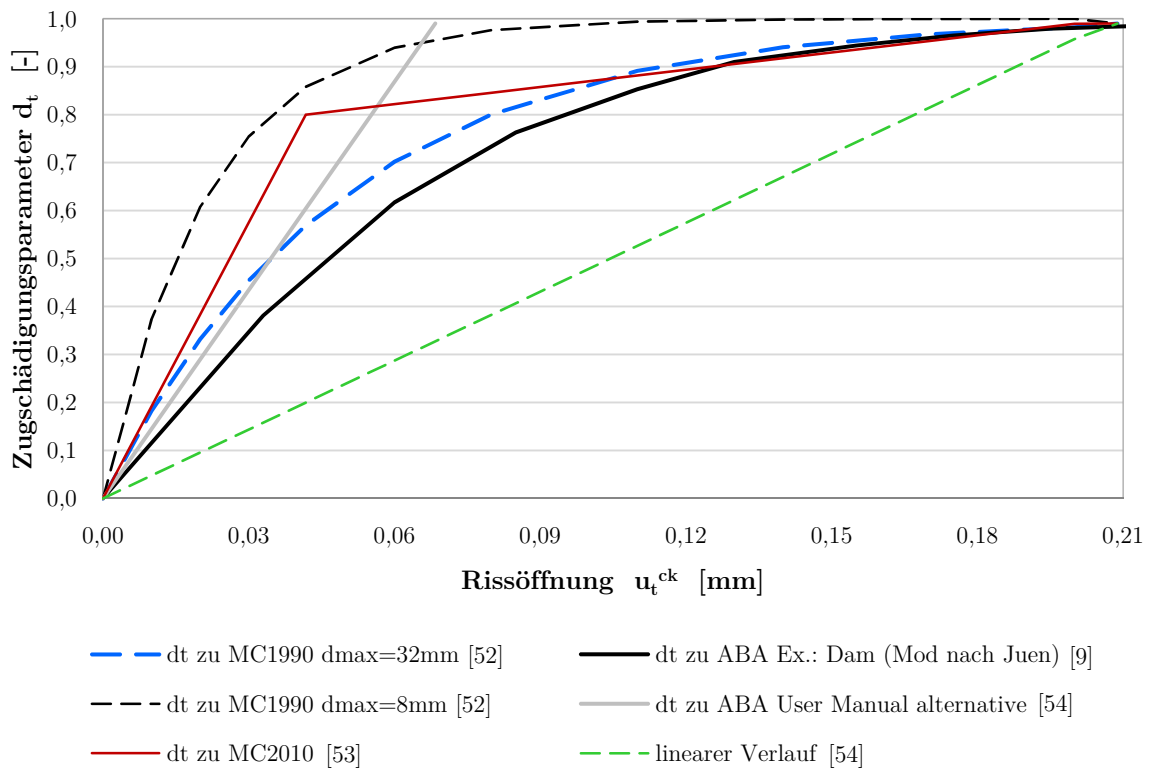
Abbildung 4.16: Nichtlineare Arbeitslinie des Betons $C40/50$ im Zugbereich [52, 53, 54, 9]Abbildung 4.17: Zugschädigungsparameter des Betons $C40/50$

Tabelle 4.4 Eingabewerte für Beton *C40/50*

| Verhalten im Druckbereich | | | Verhalten im Zugbereich | | |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|---------------------------|
| Spannung | inelastische Dehnung | Schädigungs- parameter | Spannung | Rissöffnung | Schädigungs- parameter |
| σ_c | $\varepsilon_{c,in}$ | d_c | σ_t | $u_{t,ck}$ | d_t |
| [N/mm ²] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [mm] | [-] |
| 19,20 | 0 | 0 | 3,509 | 0 | 0 |
| 29,09 | $7,498 \cdot 10^{-5}$ | 0,000 | 2,868 | 0,010 | 0,183 |
| 37,15 | $2,021 \cdot 10^{-4}$ | 0,000 | 2,344 | 0,020 | 0,332 |
| 43,08 | $3,896 \cdot 10^{-4}$ | 0,000 | 1,915 | 0,030 | 0,454 |
| 46,74 | $6,413 \cdot 10^{-4}$ | 0,000 | 1,511 | 0,042 | 0,569 |
| 48,00 | $9,614 \cdot 10^{-4}$ | 0,000 | 1,046 | 0,060 | 0,702 |
| 47,11 | $1,281 \cdot 10^{-3}$ | 0,019 | 0,698 | 0,080 | 0,801 |
| 44,36 | $1,653 \cdot 10^{-3}$ | 0,076 | 0,381 | 0,110 | 0,891 |
| 39,66 | $2,080 \cdot 10^{-3}$ | 0,174 | 0,208 | 0,140 | 0,941 |
| 32,90 | $2,566 \cdot 10^{-3}$ | 0,315 | 0,114 | 0,170 | 0,968 |
| 29,02 | $2,941 \cdot 10^{-3}$ | 0,395 | 0,062 | 0,200 | 0,982 |
| 24,70 | $3,859 \cdot 10^{-3}$ | 0,485 | 0,052 | 0,209 | 0,990 |
| 20,36 | $5,307 \cdot 10^{-3}$ | 0,576 | | | |
| 16,18 | $7,281 \cdot 10^{-3}$ | 0,663 | | | |
| 12,34 | $9,775 \cdot 10^{-3}$ | 0,743 | | | |
| 8,95 | $1,279 \cdot 10^{-2}$ | 0,813 | | | |
| 6,16 | $1,631 \cdot 10^{-2}$ | 0,872 | | | |
| 4,08 | $2,034 \cdot 10^{-2}$ | 0,915 | | | |
| 2,80 | $2,489 \cdot 10^{-2}$ | 0,942 | | | |
| 2,40 | $2,993 \cdot 10^{-2}$ | 0,950 | | | |
| 0,40 | $9,999 \cdot 10^{-2}$ | 0,990 | | | |

Tabelle 4.5 Eingabewerte Elastizitätsmodul E_{cm}

| Betongüte | Elastizitätsmodul E_{cm} |
|-----------|----------------------------|
| C20/25 | 31500 [N/mm ²] |
| C40/50 | 35200 [N/mm ²] |

4.3.4 Lagerungsbedingungen der Platte

Die vertikale Lagerung der SCSC-Platte einer Brücke erfolgt durch die Hauptträger, welche im Rahmen der *ABAQUS*-Modellierung durch die Endplatte ersetzt wurden. Auf die Unterkante der Endplatte wurde ein *Analytical Rigid*, genannt als Auflagerrigid, mit dem Befehl *Tie* im Modul *Constraints* zugewiesen. Als *Discretization method* wurde dazu *Surface-to-surface* gewählt. Die vertikale Lagerung des Modells wurde im Modul *boundary conditions* durch Festhaltung dieses Auflagerrigids in z-Richtung (U3*) modelliert. Die Festhalterung wurde im Referenzpunkt Auflagerrigid angeordnet. Neben dem Freiheitsgrad U3 wurden noch in diesem Punkt der translatorische Freiheitsgrad U2 in Brückenlängsrichtung und die rotatorischen Freiheitsgrade UR1/UR3 fixiert. Dies bedeutet freie Verdrehung der Platte am Anschluss zum Hauptträger sowie freie Horizontalverschiebung in Brückenquerrichtung (keine Membrankräfte).

Abbildung 4.18 zeigt die Symmetrieebenen X, Y1 und Y2 des SCSC-Plattenmodells. Um das globale Gleichgewicht am herausgeschnittenen Plattenmodell sicherstellen zu können, werden die jeweiligen translatorischen Freiheitsgrade in diesen Ebenen ebenso fixiert. Dies bedeutet die Abbildung eines ebenen Dehnungszustandes (Symmetrieebene X: $\varepsilon = 0$ in Brückenquerrichtung, Symmetrieebene Y1 und Y2: $\varepsilon = 0$ in Brückenlängsrichtung)

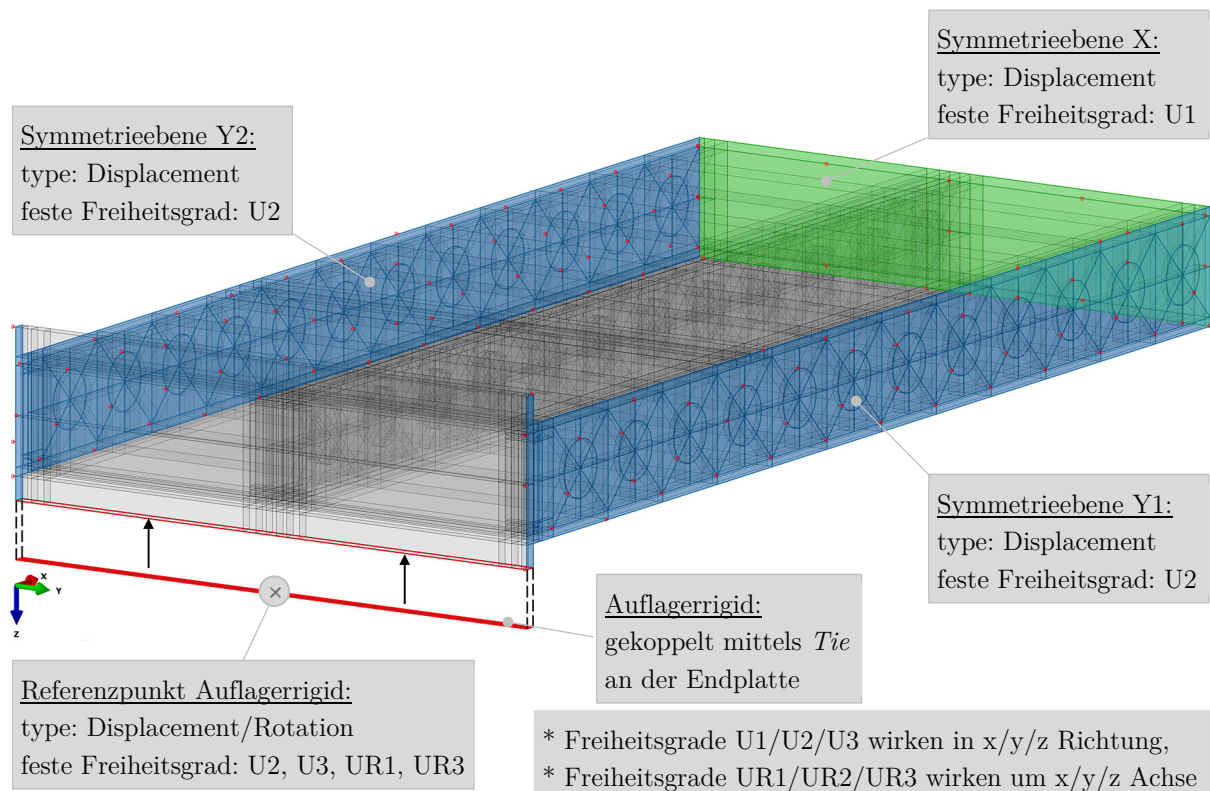


Abbildung 4.18: Darstellung der Symmetrieebenen und Definition der gewählten Lagerungsbedingungen

4.4 Belastung der SCSC-Platte

4.4.1 Einleitung

Im Rahmen der Ermüdungsnachweise nach dem Nennspannungskonzept, beschrieben in *EN 1993-1-9* [5], wird die Spannungsschwingbreite nur aus den veränderlichen Einwirkungen ohne Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses (mit der Ausnahme von reduzierten Spannungsschwingbreiten bei nicht geschweißten oder spannungsarm geglühten Konstruktionsdetails) ermittelt. Im Gegensatz dazu werden bei den Ermüdungsnachweisen nach dem Kerbdehnungskonzept auch die Einflüsse aus der Mittelspannung berücksichtigt, somit sollen auch die ständigen Einwirkungen in Betracht gezogen werden. Diese Einwirkungen setzen sich aus dem Eigengewicht der Platte und aus den Ausbaulasten wie Schotterbett, Stahlbetonschwellen, Schienen usw. zusammen.

Als Verkehrslastmodell zur Erfassung der Ermüdungsbeanspruchung der SCSC -Platte wurde *Lastmodell 71* nach *EN 1991-2* [4] gewählt. Es wurden nur vertikale Eisenbahnlasten behandelt, da diese Lasten in der Regel bemessungsdominant sind. Da es sich beim *Lastmodell 71* um ein theoretisches Verkehrslastmodell handelt, entspricht es keinesfalls der Ermüdungswirkungen infolge der realen Betriebslasten [55]. Daher ist eine Anpassung mittels diverser Faktoren notwendig:

- Der Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungslasten beträgt nach *EN 1993-2* [56] $\gamma_{Ff} = 1,0$. Im Nationalen Anhang [57] wird der empfohlene Wert übernommen.
- Durch Multiplikation des statischen *Lastmodells 71* mit dem dynamischen Beiwert Φ_2 kann die ungünstigste dynamische Verkehrslastwirkung aus den Betriebslasten erfasst werden [58]. Sein Wert hängt von der bezogenen Länge L_Φ ab und er lässt sich nach Abschnitt 6.4.5.2 in *EN 1991-2* [4] gemäß Gl. 4.3 berechnen. Nach 4.2.3.2.1 in [59] ist bei den ÖBB der Fall „sorgfältig instand gehaltene Gleise“ anzuwenden. Für die Ermittlung des Wertes L_Φ wurde der Fall 4.1 der Tabelle 6.2 aus [4] (Fahrbahnplatte aus Beton bei Trogbrücken mit Schotterbett, Tragwirkung rechtwinklig zu den Hauptträgern) gewählt.

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,82 = \frac{1,44}{\sqrt{11,154} - 0,2} + 0,82 = 1,279 \quad 4.3$$

$$L_\Phi = 2 \cdot \text{Plattenstützweite} + 3 \text{ m} = 2 \cdot 4,077 + 3 = 11,154 \text{ m} \quad 4.4$$

Der Ermüdungsnachweis wird unter Verwendung von schadensäquivalenten Beanspruchungsgrößen (Einstufenkollektiv) geführt, die einer Lastspielzahl von zwei Millionen Lastwechseln zugeordnet sind. Dies geschieht in *EN 1993-1-9* [5] durch Multiplikation der

einwirkenden Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_k)$ bzw. $\Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)$ mit einem Schadensäquivalenzfaktor λ . In der vorliegenden Arbeit wird der Schadensäquivalenzfaktor λ aus Gründen der Übersicht und wegen der Verwendung einer konzeptspezifischen Arbeitslinie (unter Annahme eines näherungsweise linearen Zusammenhangs zwischen der einwirkenden Belastung und der resultierenden Spannungsschwingbreite) zu der Verkehrslast *LM71* zugeordnet.

- Bei Eisenbahnbrücken ist der Schadensäquivalenzfaktor λ ein Produkt aus verschiedenen Teilfaktoren λ_i , mit denen das Verkehrsvolumen, das statische System, die Nutzungsdauer und mehrere gleichzeitig wirkende Züge bei mehrgleisigen Brücken berücksichtigt werden können [55], siehe Gl. 4.5, wobei die Obergrenze des Schadenäquivalenzfaktors für Eisenbahnbrücken $\lambda_{max} = 1,4$ beträgt.

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \leq \lambda_{max} \quad 4.5$$

Nach Abschnitt 4.8.4.2 in *ÖNORM-B 1993-2* [57] sind für Eisenbahnbrücken im Bereich der *ÖBB* die Spannweitenfaktoren λ_1 für „Schienenverkehr mit 25-t-Achsen“ anzuwenden. Der Wert λ_1 hängt von Typ und Länge der Einflusslinie des betrachteten Bauteils ab. Hermann [1] hat die Länge der Einflusslinie in Anlehnung an die querorientierte orthotrope Platte wie folgt abgeschätzt:

$$L = 2 \cdot \text{Querrippenabstand} + 3 \text{ m} = 2 \cdot 0,5 \text{ m} + 3 \text{ m} = 4 \text{ m} \quad 4.6$$

Somit ergibt sich nach *EN 1993-2* [56], Tabelle 9.4 ein Spannweitenfaktor λ_1 von 1,16.

Für Eisenbahnbrücken mit einem jährlichen Verkehrsaufkommen von $25 \cdot 10^6$ t/Gleis beträgt der Verkehrsstärkenfaktor $\lambda_2 = 1$. Der Lebensdauerfaktor λ_3 für eine geplante Nutzungsdauer von 100 Jahren und der Spurfaktor λ_4 bei eingleisigen Eisenbahnbrücken betragen ebenso 1,0.

- Der Lastklassenbeiwert α passt die Lasten aus *Lastmodell 71* an die tatsächlich zu erwartenden Eisenbahnlasten an. Dieser ist beim Ermüdungsnachweis von Eisenbahnbrücken nach Anhang D in *EN 1991-2* [59] nicht zu berücksichtigen ($\alpha = 1$).

Somit ergibt sich für den betrachteten Fall ein Schadenäquivalenzfaktor von $\lambda = 1,16 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,16 \leq \lambda_{max} = 1,4$.

Somit ergibt sich insgesamt ein Faktor von $\gamma_{Ff} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda = 1,0 \cdot 1,279 \cdot 1,16 = 1,48$, mit dem die charakteristischen Werte des *Lastmodells 71* zu multiplizieren sind. Die berücksichtigten Lastbeiwerte und Faktoren sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

Tabelle 4.6 Einwirkungsseitige Beiwerte und Faktoren

| | | |
|---|--|-------------|
| Teilsicherheitsbeiwert für die ständiger Lasten | γ_G | 1,00 |
| Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungslasten | γ_{Ff} | 1,00 |
| dynamischer Beiwert | Φ_2 | 1,28 |
| Schadensäquivalenzfaktor | λ | 1,16 |
| Alle Beiwerte für die Ermüdungslasten: | $\gamma_{Ff} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda =$ | 1,48 |

Die entstehende Einwirkungskombination $E_{d,FLS}$ setzt sich aus drei Teilen zusammen (Eigengewicht, Aufbaulast, Verkehrslast) und ist in Gl. 4.6 angegeben.

$$E_{d,FLS} = \gamma_G \cdot g_{k,Platte} + \gamma_G \cdot g_{k,Ausbau} + \gamma_{Ff} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda \cdot q_{v,k} \quad 4.7$$

4.4.2 Ständige Belastungen

Die genaue Berechnung des Eigengewichts der SCSC-Platte und der Aufbaulasten sind im Anhang C.1.3. detailliert beschrieben. Bei der Bemessung von Tragwerken nach *Eurocode* ist die Schotterbetthöhe in einem Streubereich von $\pm 30\%$ zu variieren. Es wurden somit drei unterschiedliche Fälle untersucht:

- Nennschotterbetthöhe von 550 mm;
- Schotterbetthöhe von $550 \cdot 0,7 = 385$ mm;
- Schotterbetthöhe von $550 \cdot 1,3 = 715$ mm.

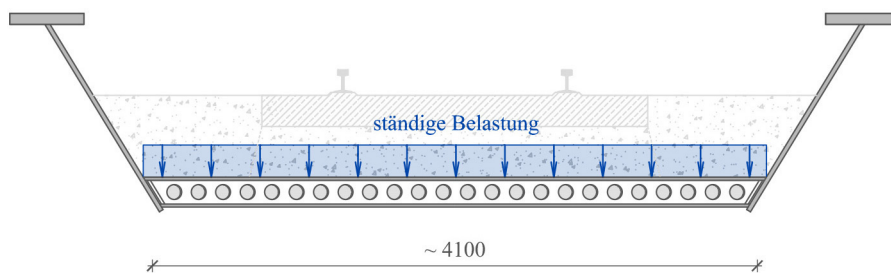


Abbildung 4.19: Ständige Belastung auf der Brücke

In *ABAQUS* wurde die gesamte ständige Belastung gleichmäßig auf das Deckblech der Platte verteilt (siehe Abbildung 4.19 und Abbildung 4.20) und sie wurde linear während der ersten 5 frames in *Step 1*, mit dem Befehl *Load: Pressure, Distribution: Uniform* aufgebracht.

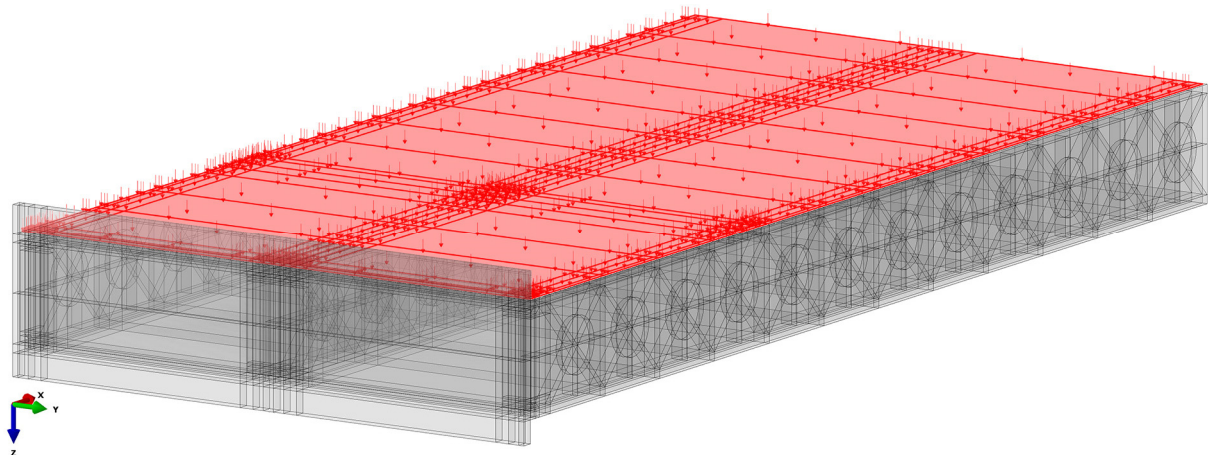


Abbildung 4.20: Belastungsfläche ständige Belastung auf dem *ABAQUS*-Modell

4.4.3 Lastmodell 71

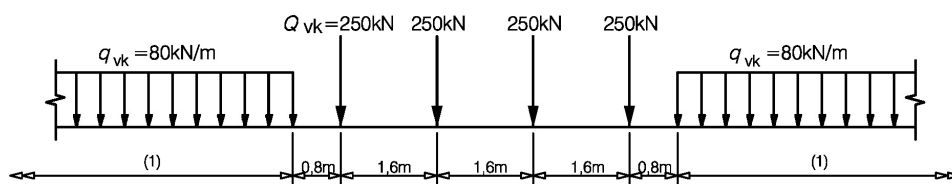


Abbildung 4.21: *Lastmodell 71* [4]

Abbildung 4.21 stellt das in *EN 1991-2* [4] beschriebenen *Lastmodell 71* dar. Die Lastexzentrizität von $e = 83,3$ mm und die in dem österreichischen Anwendungsdokument [59] festgelegte Lagetoleranz des Gleises wurden nicht berücksichtigt, da diese durch Verringerung des in der Platte entstehenden maximalen Biegemomentes m_y (s. Abbildung 4.26) einen günstigen Einfluss auf die Quertragwirkung haben würden. Der sehr geringe Einfluss auf die Querkraft v_y (s. Abbildung 4.27) wird vernachlässigt. Zur Ermittlung jener Belastung, die direkt an der Deckblech - Oberkante der SCSC-Platte angreift, werden die Vertikallasten in Längsrichtung und in Querrichtung durch den Schotteroberbau verteilt. Die Verteilung über die Schienen wurde nach Abschnitt 6.3.6.1 in [4] durchgeführt. Zur Berücksichtigung der Lastausbreitung durch die Schwellen und das Schotterbett wurde in Anlehnung an [4] ein Lastausbreitungswinkel von 1:4 angenommen. Abbildung 4.22 (unten) stellt die nach der Verteilung der Vertikallasten entstehenden Linienlasten dar, welche in Querrichtung in Abhängigkeit der jeweiligen Schotterbett Höhe noch verteilt werden, siehe Abbildung 4.23.

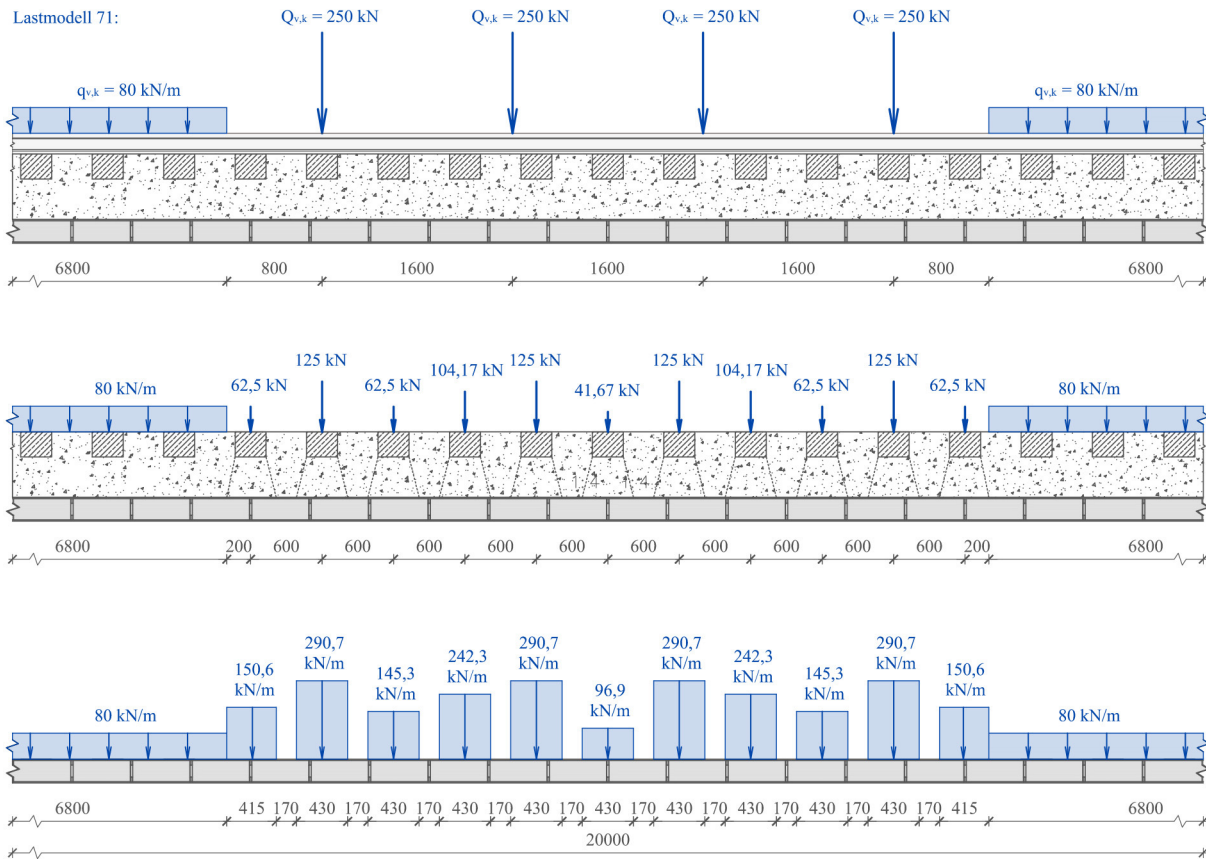


Abbildung 4.22: Teilbild oben: Achslasten des Lastmodells *LM71* auf einer SCSC-Platte; Teilbild mittlen: Verteilung der Achslasten in Längsrichtung durch Schiene; Teilbild unten: Verteilung der Achslasten in Längsrichtung durch Schiene, Schwelle und Schotterbett (Lastgebirge)

Als nächstes wurde der Einfluss der Längstragwirkung der Brücke auf die entstehenden Biegemomente und Querkräfte der Platte untersucht. Im Wesentlichen waren damit zwei Ziele verbunden:

- da in *ABAQUS* nur ein 1.000 mm breiter Plattenstreifen berechnet wurde, sollte das mehrteilige *Lastmodell 71* mit einer äquivalenten Gleichlast ersetzt werden, die dieselben Schnittgrößen verursacht;
- es sollte aber auch berücksichtigt werden, dass das *ABAQUS*-Modell mit äquivalentem Plattenstreifen und ebenen Dehnungszustand (Abbildung 4.25), welcher sich nur in Querrichtung durchbiegen kann, sich anders verhält, als das gesamte Trogbrückenmodell unter derselben Belastung.

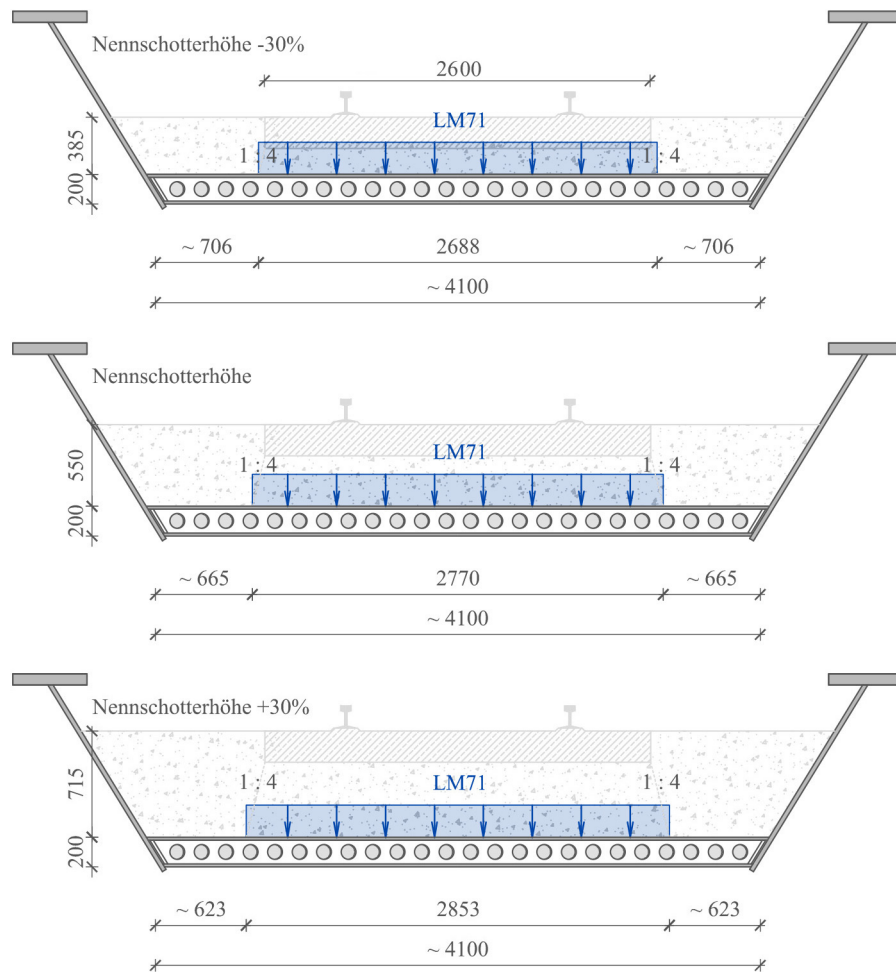


Abbildung 4.23: Verteilung der vertikalen Lasten in Querrichtung ohne Exzentrizität durch den Schotteroberbau; Teilbild oben: Nennschotterbetthöhe -30%; Teilbild mitten: Nennschotterbetthöhe; Teilbild unten: Nennschotterbetthöhe +30%

Dazu wurde zunächst eine 20 Meter lange Trogbücke samt Verkehrslast infolge Lastmodells 71 als Lastgebirge nach Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 (Fall Nennschotterbetthöhe) in dem FE-Programm RFEM [42] modelliert, siehe Abbildung 4.24. Diese dient als Modellierung einer echten Brücke. Alle Angaben der Modellierung einschließlich der Lagerbedingungen, der Form des Endquerträgers und die Plattendicken wurden aus [60] entnommen. Die SCSC-Platte selbst wurde durch ein Flächenelement (Material: Stahl, Steifigkeit: orthotrop) ersetzt, dessen Biegesteifigkeit sich mithilfe von unterschiedlichen wirksamen Dicken in Quer- und Längsrichtung einstellen lässt. Als wirksame Dicke in Querrichtung wurde 145,6 mm, in Längsrichtung 115,6 mm gewählt, welche einer Biegesteifigkeit um die x -Achse von 54.023 kNm² (dies entspricht der Biegesteifigkeit des Boden- und Deckblechs gerechnet als Zweipunkt-Querschnitt) und einer Biegesteifigkeit um die y -Achse von 27.011 kNm² entsprechen. Im Modell wurde einheitlich eine Netzverdichtung von 10 · 10 cm verwendet.

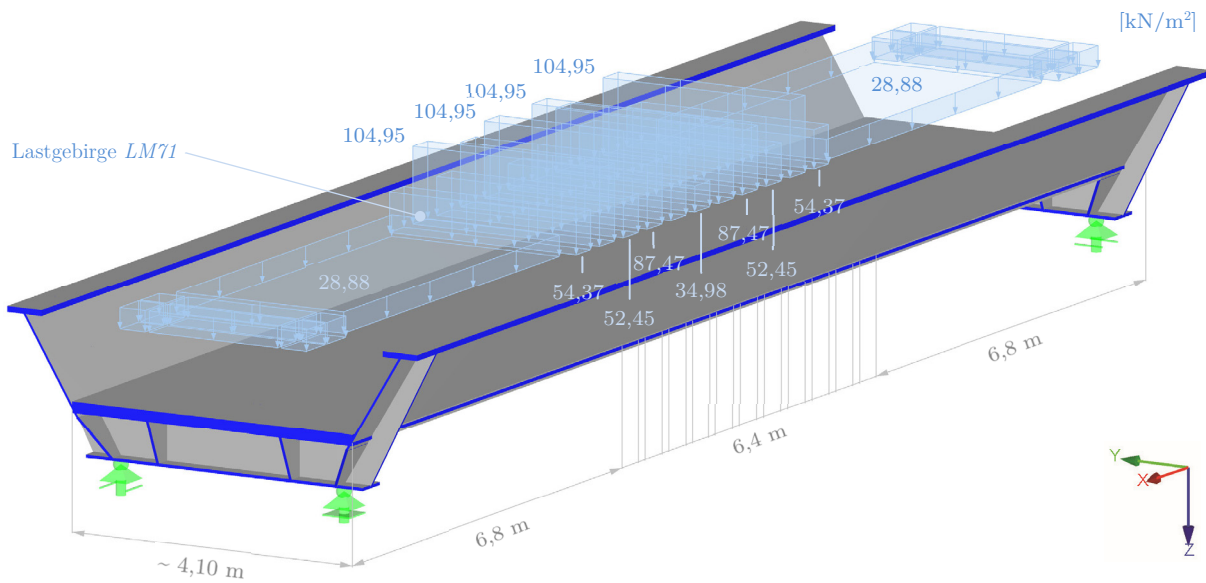


Abbildung 4.24: *RFEM* [42] Modell einer 20 m langen Trogbücke belastet mit Lastgebirge infolge *Lastmodell 71*

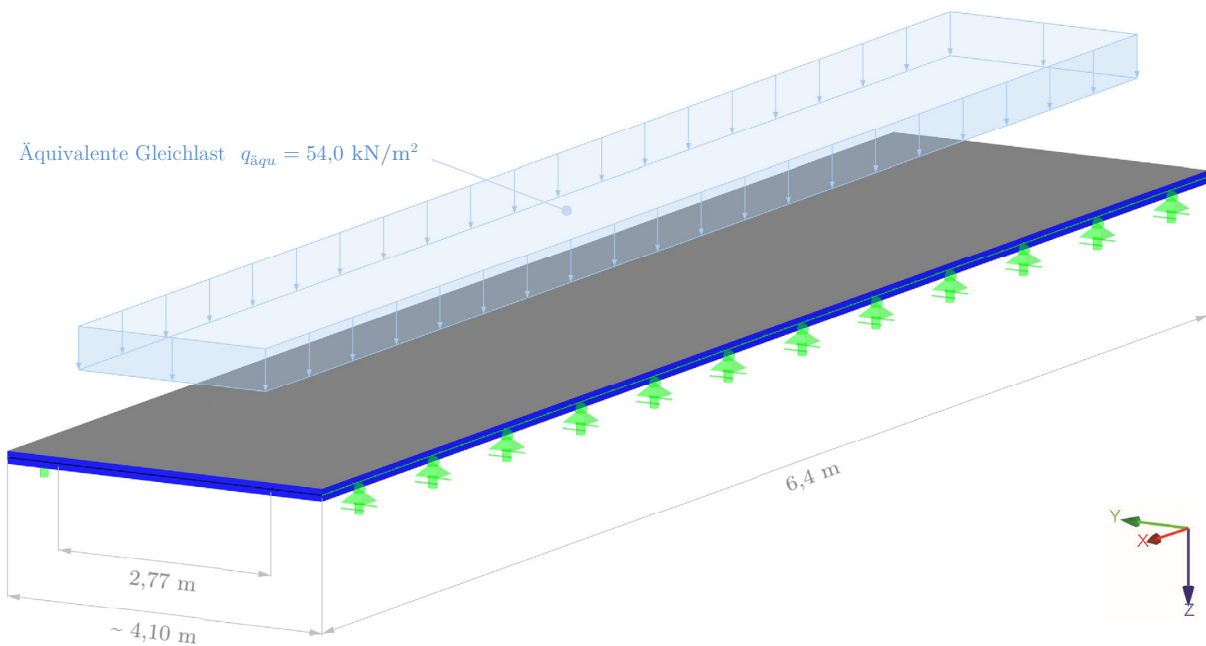


Abbildung 4.25: Plattenstreifen mit äquivalenter Gleichlast von $q_{\text{äqu}} = 54 \text{ kN/m}^2$

Des Weiteren wurde ein 20 Meter langer Plattenstreifen modelliert, siehe Abbildung 4.25. Dieses Modell ist äquivalent mit dem *ABAQUS*-Modell in Abbildung 4.24 in dem Sinn, dass aufgrund der ähnlichen Lagerbedingungen beide sich nur in Querrichtung durchbiegen können. Als letzter Schritt wurde eine äquivalente Verkehrslast gesucht, welche mit $q_{\text{äqu}} = 54 \text{ kN/m}^2$ bestimmt wurde. Diese äquivalente und somit vereinfachte Modellbildung der Belastung als Grundlage für die weiterführenden FE-Analysen wurde mit dem Kriterium einer guten Über-

einstimmung der Biegemomente m_y und Querkräfte v_y für die Quertragwirkung der beiden Platten ermittelt, siehe Abbildung 4.26, Abbildung 4.27 bzw. Anhang B1. „Bei der Anzeige der Flächenmomente ist darauf zu achten, dass ein grundsätzlicher Unterschied beim Verständnis von Flächen- und Stabschnittgrößen besteht: Während ein Stabmoment M_y um die lokale Stabachse y "dreht", wirkt ein Flächenmoment m_y in Richtung der lokalen Flächenachse y , also um die Achse x dieser Fläche [61]“. Die Membranspannungen σ_x in der Trogbücke sind so gering, dass sie am Streifenmodell vernachlässigt werden könnten.

m_y [kNm/m]

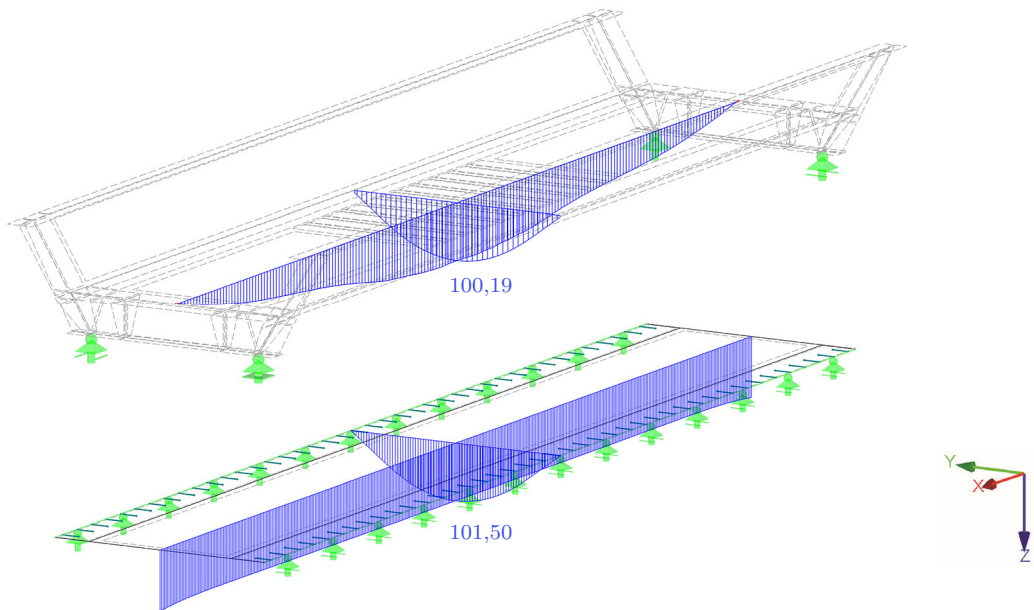


Abbildung 4.26: Biegemomentverläufe der Platten im Trogbückenmodell (oben) und im Plattenstreifenmodell (unten) infolge *Lastmodell 71* bzw. äquivalenter Gleichlast

v_y [kN/m]

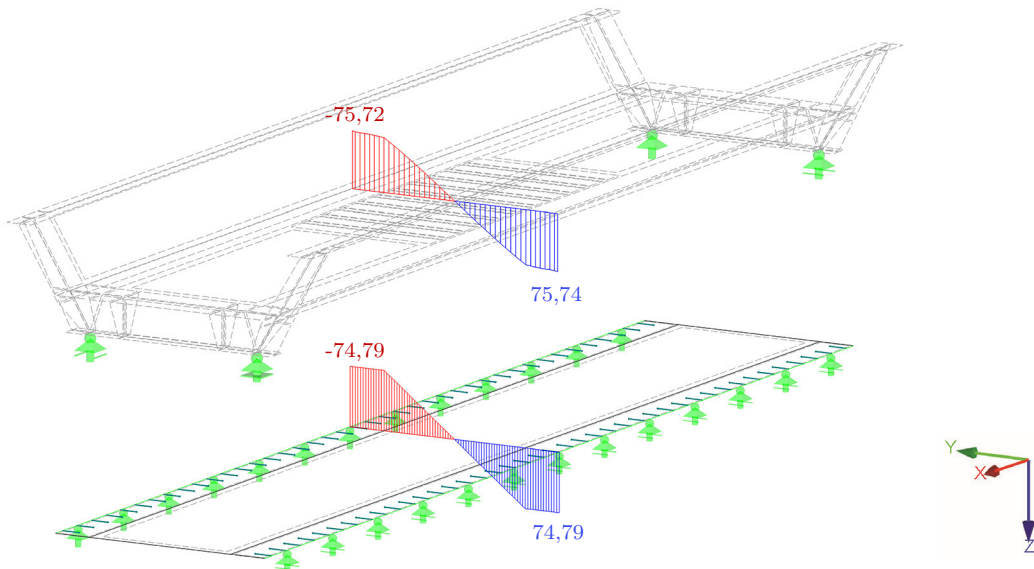


Abbildung 4.27: Querkraftverläufe der Platten im Trogbückenmodell (oben) und im Plattenstreifenmodell (unten) infolge *Lastmodell 71* bzw. äquivalenter Gleichlast

Tabelle 4.7 enthält die resultierenden vier Verkehrslaststufen mit bzw. ohne Berücksichtigung der Längswirkung sowie mit bzw. ohne Berücksichtigung der Beiwerte für die Ermüdungslasten. Um die Interpretation der in der vorliegenden Arbeit dargestellten Diagramme zu erleichtern, werden diese vier Laststufen einheitlich auf den Diagrammen erscheinen, siehe als Beispiel Abbildung 4.38 im folgenden Kapitel.

Tabelle 4.7 Belastungsniveaus der Verkehrslast

| <i>Lastmodell 71</i> | Abkürzung | [kN/m ²] | [kN/m] |
|---|---|---|-----------------------------|
| Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> | <i>LM71</i> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> | 83,69 | 231,82 ²⁾ |
| Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> | <i>LM71</i> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> | 80,12 | 221,92 ³⁾ |
| Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input type="checkbox"/> | <i>LM71</i> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | 56,41 | 156,25 ⁴⁾ |
| Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input type="checkbox"/> | <i>LM71</i> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | $q_{\text{äqu}} = 54$ | 149,58 ⁵⁾ |

¹⁾ Beiwerte für die Ermüdungslasten: $\gamma_{F,f} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda = 1,48$

²⁾ $\gamma_{F,f} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda \cdot 156,25 \text{ [kN/m]} = 1,48 \cdot 156,25 \text{ [kN/m]} = 231,82 \text{ [kN/m]}$

³⁾ $\gamma_{F,f} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda \cdot 149,58 \text{ [kN/m]} = 1,48 \cdot 156,25 \text{ [kN/m]} = 221,92 \text{ [kN/m]}$

⁴⁾ $4 \cdot 250 \text{ [kN]} / 6,40 \text{ [m]} = \mathbf{156,25 \text{ [kN/m]}}$ (Basiswert *ohne* Längswirkung)

⁵⁾ $\mathbf{54 \text{ [kN/m}^2]} \cdot 2,77 \text{ [m]} = 149,58 \text{ [kN/m]}$ (Basiswert *mit* Längswirkung)

Gemäß Tabelle 4.7 kann für den gezeigten Fall der Trogbrücke der Einfluss der Längstragwirkung der Brücke infolge Plattenwirkung (*LM71*=149.58 kN/m) (siehe symbolhafte Darstellung in Tabelle 4.7) gegenüber der Verteilung der 4 Achslasten auf eine Länge von 6.4 m auf einer endlosen Plattenstreifen (*LM71*=156.25 kN/m) als eher gering eingestuft werden. Die wesentliche Kernaussage ist daher, dass eine vereinfachte und somit praxisrelevante Ermittlung des Verkehrslastniveaus geringfügig auf der konservativen Seite liegt. In *ABAQUS* wurde der fünffache Wert des *Lastmodells 71* auf das Deckblech der Platte (siehe Abbildung 4.28) linear über 50 *frames* in *Step 2* aufgebracht.

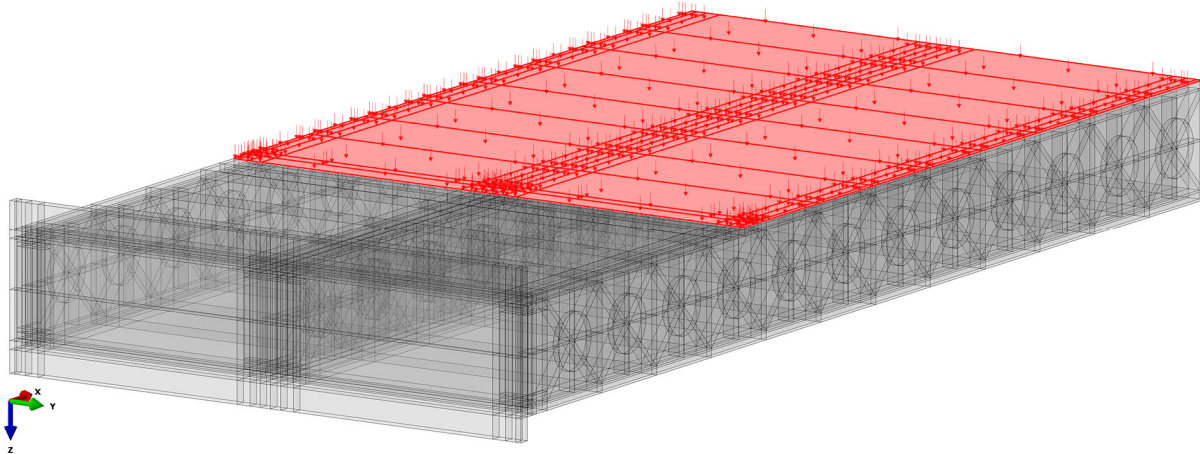


Abbildung 4.28: Belastungsfläche Verkehrslast (Fall Nennschotterbetthöhe) auf dem *ABAQUS*-Modell

4.4.4 Negative Plattenmomente

An dieser Stelle der Arbeit stellt sich die Frage, ob die Unterspannungswerte der Hysterese tatsächlich unter der ständigen Belastung entstehen, oder ob während einer Zugüberfahrt ein negatives Plattenmoment in Brückenquerrichtung in der Mitte der Platte entstehen kann. Um diese Fragestellung beantworten zu können, wurde das Brückenmodell mit dem Lastgebirge (siehe Abbildung 4.24) aus $LM71$ kontinuierlich – wie bei einer Zugüberfahrt – belastet. Abbildung 4.29 zeigt das größte negative Plattenmoment, welches mit dieser Vorgehensweise erzeugt werden konnte. Dies entsteht jedoch nicht in der Mitte der Platte, damit: Unterlast = ständige Belastung.

Belastung:

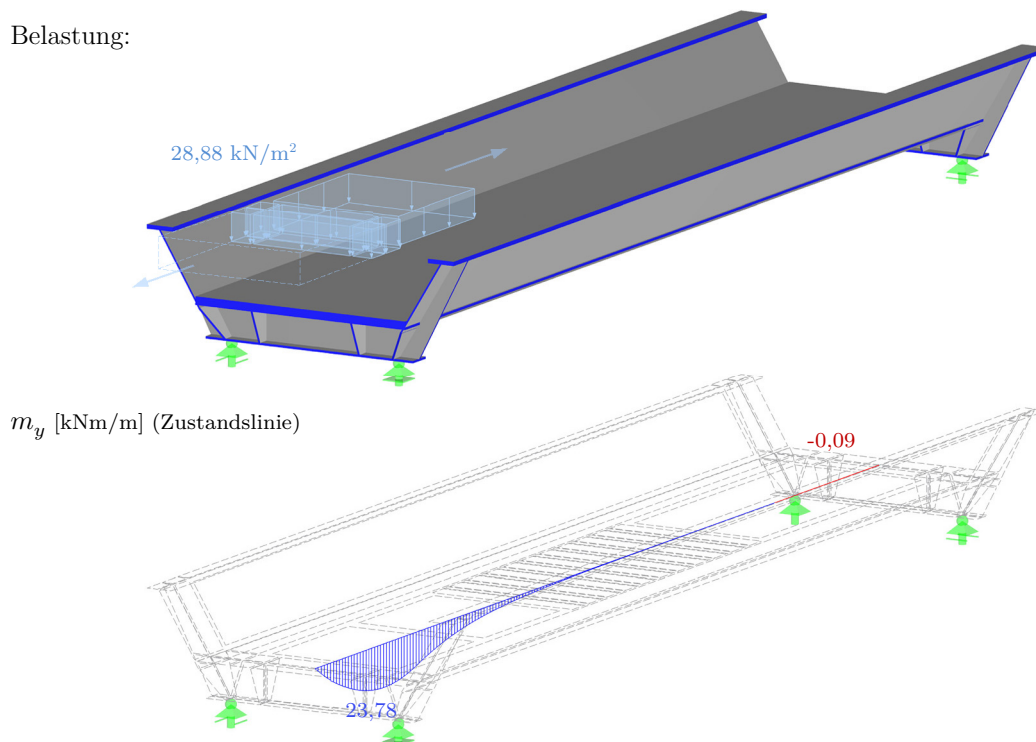


Abbildung 4.29: Negatives Plattenmoment in Brückenquerrichtung in der Platte infolge einer Zugüberfahrt

4.5 Kritische Bereiche der SCSC-Platte für die Lebensdauerberechnung

Es wurden grundsätzlich zwei Bereiche der SCSC-Platte als kritischer Bereich für die Lebensdauerberechnung identifiziert. Die höchsten Spannungen sind einerseits im Bereich der Lochdübelleiste zu erkennen, siehe Abbildung 4.30 und Abbildung 4.31, andererseits im Auflagerbereich, siehe Abbildung 4.32.

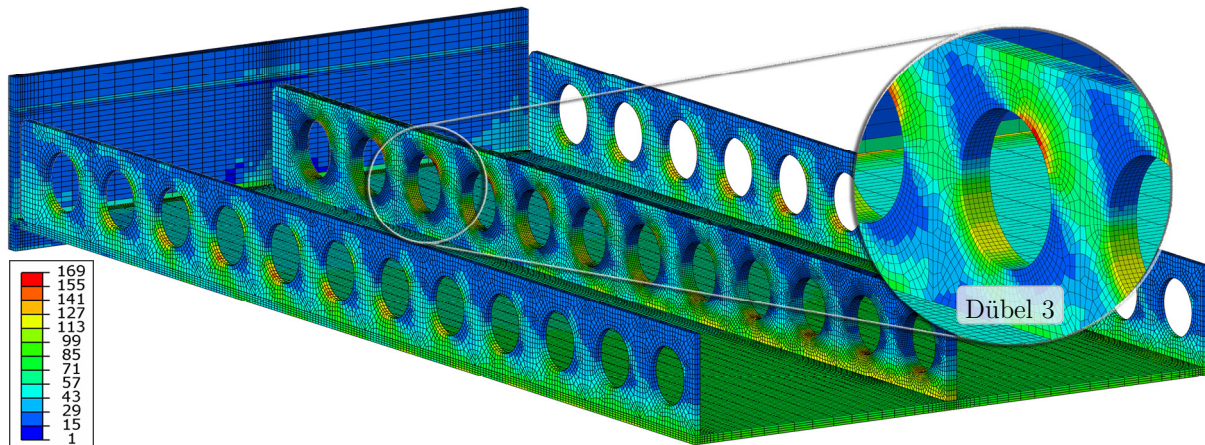


Abbildung 4.30: Maximale Hauptzugspannungen in den Stahlelementen der Platte unter $1 \cdot LM7I \square \square$ (Modell *TYP 4*, averaging off, undeformed shape)

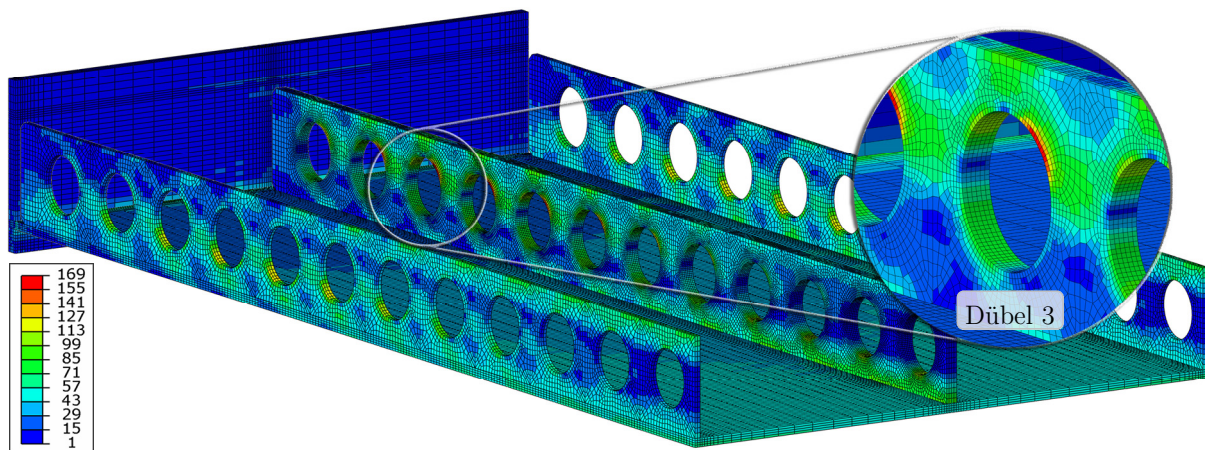


Abbildung 4.31: Maximale Vergleichsspannungen in den Stahlelementen der Platte unter $1 \cdot LM7I \square \square$ (Modell *TYP 4*, averaging off, undeformed shape)

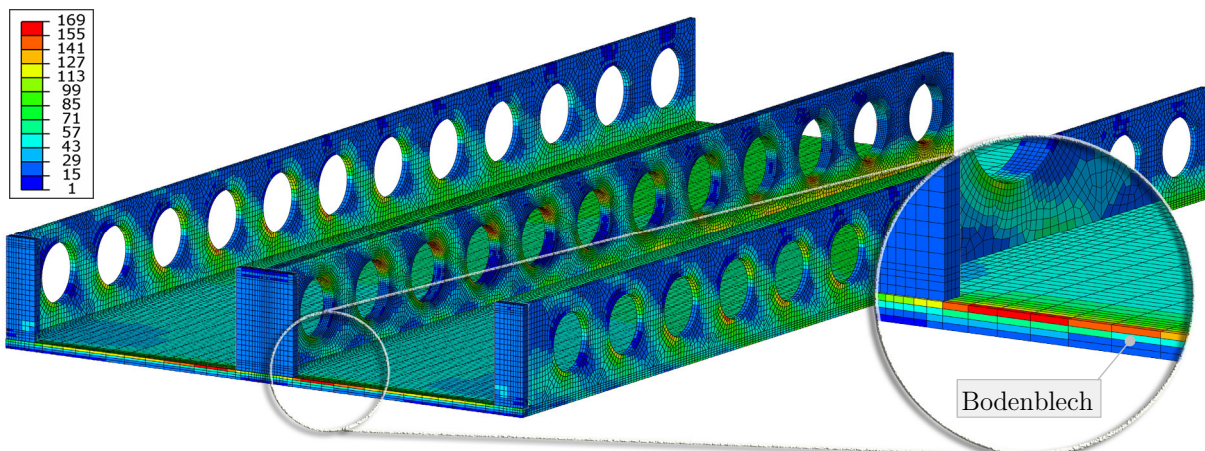


Abbildung 4.32: Maximale Hauptzugspannungen im Auflagerbereich der Platte unter $2 \cdot LM7I \square \square$ (Modell *TYP 4*, averaging off, undeformed shape)

Nach einer ausführlichen Analysis der Ergebnisse konnte aber festgestellt werden, dass im Bereich praktisch auftretender Schwingbeanspruchungen vor allem das Ermüdungsversagen der Stahldübelreihe von Bedeutung ist. Die gegenständliche Forschungsarbeit ist deswegen auf die Ermittlung der Lebensdauer dieses Elements fokussiert, da der Auflagerbereich ggf. konstruktiv noch verändert bzw. optimiert werden kann und die Geometrie der Stahldübelreihe als unveränderbar unterstellt wurde.

Tabelle 4.8 Lage der kritischen Elemente in der oben angeschweißten Stahldübelreihe im Verlauf der Laststeigerung unter der alleinigen Wirkung von ständiger Belastung ($\sigma_{stä,max}$) oder Verkehrslast ($\sigma_{zyk,max}$) (Modell *TYP 4*)

| <i>Step</i> | <i>Frame</i> | Belastung: ständiger Belastung | Lage $\sigma_{1,stä,max}$ | Lage $\sigma_{V,stä,max}$ | |
|-------------|--------------|--|---------------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | 0,2 * ständige Belastung | Dübel 2 | Dübel 2 | |
| | 2 | 0,4 * ständige Belastung | | | |
| | 3 | 0,6 * ständige Belastung | | | |
| | 4 | 0,8 * ständige Belastung | | | |
| | 5 | 1,0 * ständige Belastung | | | |
| <i>Step</i> | <i>Frame</i> | Belastungsdifferenz infolge Verkehrslast | Lage $\sigma_{1,zyk,max}$ | Lage $\sigma_{V,zyk,max}$ | |
| 2 | 1 | $\Delta 0,1 \cdot LM71 \square \square$ | Dübel 3 | Dübel 3 | |
| | 2 | $\Delta 0,2 \cdot LM71 \square \square$ | | Dübel 2 | |
| | 3 | $\Delta 0,3 \cdot LM71 \square \square$ | | Dübel 3 | Dübel 3 |
| | 4 | $\Delta 0,4 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 5 | $\Delta 0,5 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 6 | $\Delta 0,6 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 7 | $\Delta 0,7 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 8 | $\Delta 0,8 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 9 | $\Delta 0,9 \cdot LM71 \square \square$ $\approx LM71$: Längsw. <input checked="" type="checkbox"/> , Beiw. <input type="checkbox"/> | | | |
| | 10 | $\Delta 1,0 \cdot LM71 \square \square$ $= LM71$: Längsw. <input type="checkbox"/> , Beiw. <input type="checkbox"/> | | | |
| | 11 | $\Delta 1,1 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 12 | $\Delta 1,2 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 13 | $\Delta 1,3 \cdot LM71 \square \square$ | Dübel 4 | Dübel 4 | |
| | 14 | $\Delta 1,4 \cdot LM71 \square \square$ $\approx LM71$: Längsw. <input checked="" type="checkbox"/> , Beiw. <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| | 15 | $\Delta 1,5 \cdot LM71 \square \square$ $\approx LM71$: Längsw. <input type="checkbox"/> , Beiw. <input checked="" type="checkbox"/> | | | |
| | 16 | $\Delta 1,6 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 17 | $\Delta 1,7 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 18 | $\Delta 1,8 \cdot LM71 \square \square$ | Dübel 12 | Dübel 4 | |
| | 19 | $\Delta 1,9 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | 20 | $\Delta 2,0 \cdot LM71 \square \square$ | | | |
| | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | |

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben wurde, sind die Stahldübelleisten in einem definierten, wiederkehrenden Achsabstand wechselweise am oberen und unteren Blech angeschweißt. Aufgrund einer Auswertung extremer Spannungs- und Dehnungsgrößen (Hauptspannungen, Vergleichsspannungen, etc.) wurde die am oberen Blech angeschweißte Lochdübelleiste (Abbildung 4.7, mittlere Leiste) als die maßgebende kritische Lochdübelleiste identifiziert. Die Lage des maßgebenden kritischen finiten Elements ändert sich jedoch während der Laststeigerung, siehe Tabelle 4.8. Beispielweise liegen die kritischen Elemente bezüglich $\sigma_{1,zyk,max}$ und $\sigma_{V,zyk,max}$ für die Laststufe $1,0 \cdot LM71□□$ im Dübel 3. Weitere Informationen diesbezüglich sind Anhang A.2 zu entnehmen.

Da es sich beim Ermüdungsnachweis um einen punktuellen Nachweis handelt (Stelle der maximalen Spannung oder Dehnung), wird an dieser Stelle der Arbeit festgelegt, für wie viele finite Elemente („Punkte“) der Ermüdungsnachweis durchgeführt wird. Die Anzahl der Elemente ist dadurch beschränkt, dass die Durchführung des Nachweises nach dem Kerbdehnungskonzept ein sehr berechnungsintensives Nachweisformat ist.

Abbildung 4.33 und Abbildung 4.34 zeigen die kritischen Lochdübel für den untersuchten Bereich des Lastniveaus (Lastfallsteigerung von ständiger Belastung bis zusätzlich zum 5-fachen Lastniveau des *Lastmodels* $71□□$, siehe Abkürzung in Tabelle 4.7). Im Zuge der Identifikation des maßgebenden kritischen finiten Elementes je Laststufe wurde erkannt, dass nur fünf finite Elemente entlang des Lochrandes (siehe Abbildung 4.33 und Abbildung 4.34) innerhalb der als kritisch identifizierten Lochdübel zu betrachten sind, um den Spannungs-Dehnungsverlauf bezüglich Hauptspannungen ($\sigma_{1-\varepsilon_1}$) bzw. Vergleichsspannungen ($\sigma_{V-\varepsilon_V}$) mit ausreichender Genauigkeit als Grundlage für das Kerbdehnungskonzept zu bestimmen.

Für die Spannungsberechnungen an diesen zehn kritischen finiten Elementen (fünf nach *Rankine*, $\sigma_{1,zyk,max}$, und fünf nach *von Mises*, $\sigma_{V,zyk,max}$) wurde jeweils der Spannungs-Dehnungsverlauf ($\sigma_{1-\varepsilon_1}$, $\sigma_{V-\varepsilon_V}$) in Abhängigkeit vom Lastniveau ermittelt und mit der in Kapitel 5.6 beschriebenen Methode die „Einhüllenden“ ($\sigma_{1-\varepsilon_1}$, $\sigma_{V-\varepsilon_V}$) gebildet, siehe als Beispiel Abbildung 4.40 im nachfolgenden Kapitel. In dieser Weise wurde das Spannungs-Dehnungsverhalten quasi für alle kritischen Stellen der Stahldübelleiste erfasst. Da die Lagen der kritischen Elemente in den verschiedenen Modellen der Parameterstudie unterschiedlich sind, wurden sie bei jedem Modell einzeln identifiziert. Die Angabe dieser Elemente ist ebenso im Anhang A.2 enthalten.

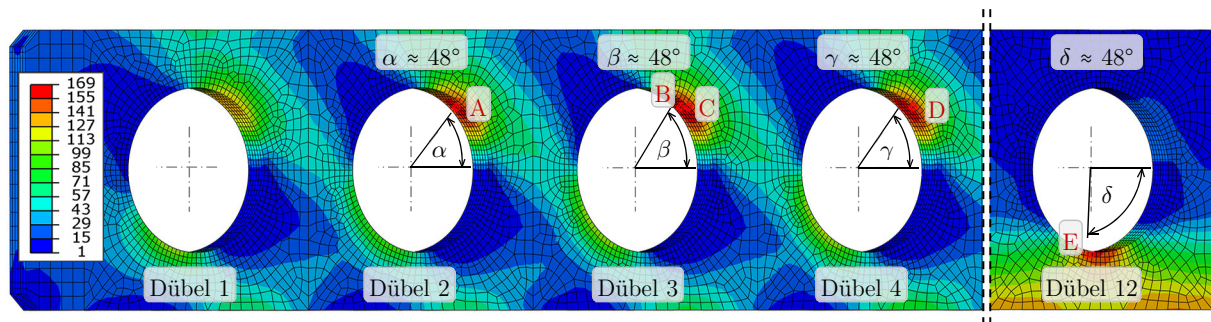


Abbildung 4.33: Maximale Hauptzugspannungen in der oben angeschweißten Stahldübelleiste für die kritischen vier Dübel (Dübel 2, 3, 4, 12) und die kritischen fünf finiten Elemente (Teilbild links unter Lastniveau 1 · LM71□□, Teilbild rechts unter Lastniveau 2 · LM71□□) (Modell TYP 4, averaging on, undeformed shape)

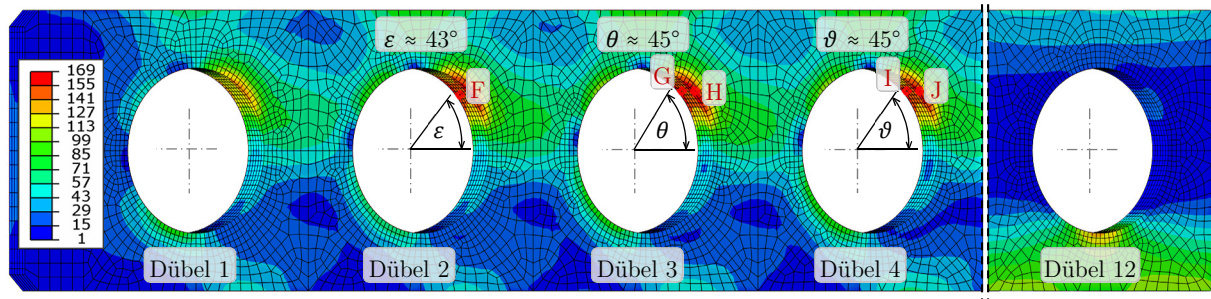


Abbildung 4.34: Maximale Vergleichsspannungen in der oben angeschweißten Stahldübelleiste für die kritischen drei Dübel (Dübel 2, 3, 4) und die kritischen fünf finiten Elemente (Teilbild links unter Lastniveau 1 · LM71□□, Teilbild rechts unter Lastniveau 2 · LM71□□) (Modell TYP 4, averaging on, undeformed shape)

Für die Ablesung der fünf kritischen Elemente in *ABAQUS* wurden 5 Belastungsniveaus (0, 1, 2, 3, 4) definiert, siehe Abbildung 4.35. *Belastungsniveau 0* stimmt mit dem Lastniveau der ständigen Belastung überein. *Belastungsniveau 4* – das eigentlich eine Belastungsdifferenz ist – entspricht dem zweifachen Wert des Basiswertes der Verkehrslast ($2,0 \cdot LM71 \square \square$). Die restlichen Belastungsniveaus wurden zwischen den zwei Randwerten gleichmäßig verteilt.

Die Spannungs- und Dehnungswerte, die unter der Verkehrslast entstehen (genannt als $\sigma_{1,zyk}$ und $\varepsilon_{1,zyk}$ bzw. $\sigma_{V,zyk}$ und $\varepsilon_{V,zyk}$), liegen in der Ergebnisdatenbank von *ABAQUS* nicht vor. Um das maximal beanspruchte Element pro Belastungsniveau identifizieren zu können, wurden zuerst die vier Belastungsdifferenzen in der *ABAQUS* Ergebnisdatei mit dem Befehl *Tools/Create Filed Output/From Fields* erstellt (Beispiel: *Belastungsniveau 2 = Step 2 Frame 10 – Step 1 Frame 5*).

Die Bezeichnungen der Elemente sind in Tabelle 4.9 aufgelistet.

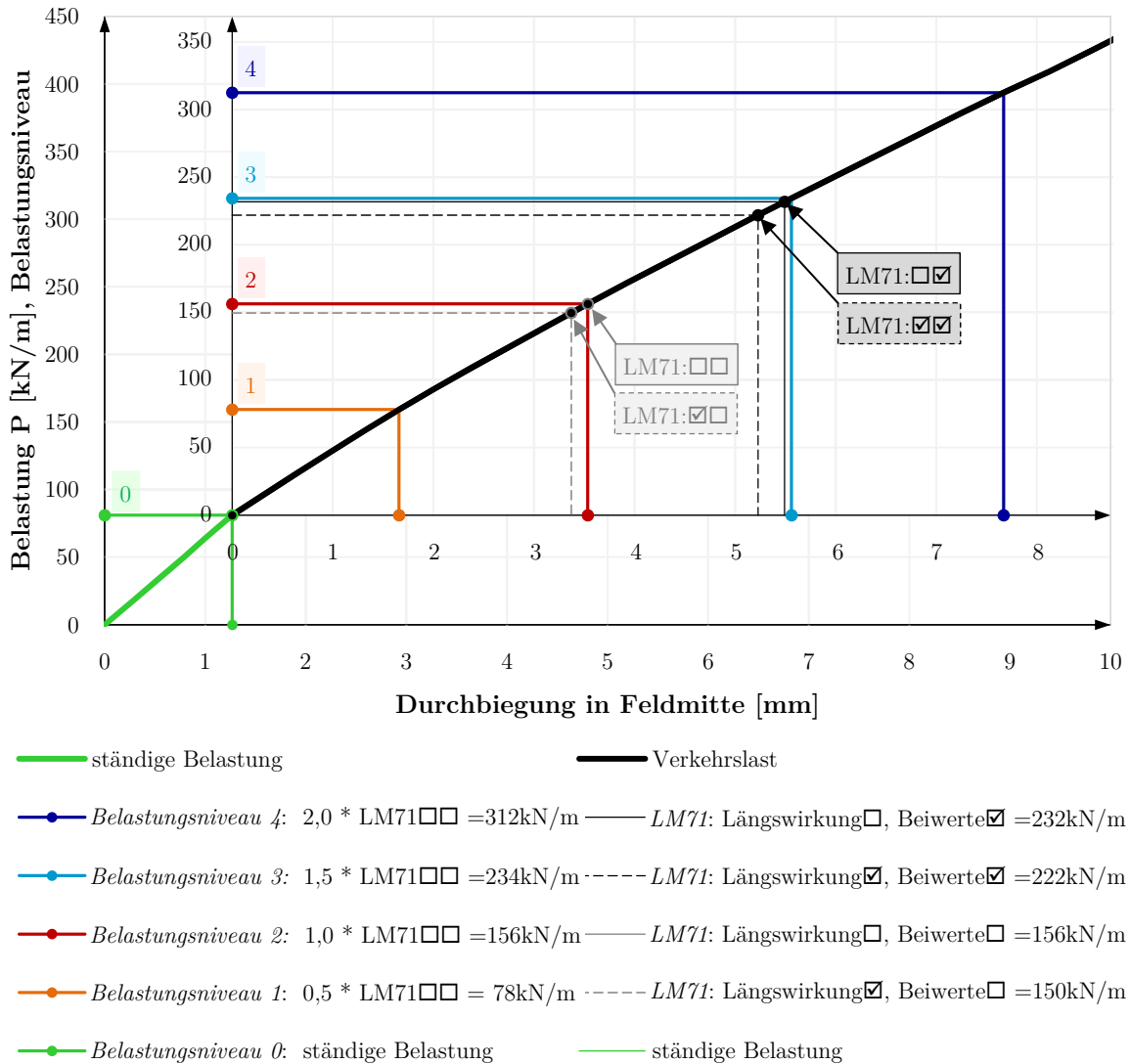


Abbildung 4.35: Belastungsniveau 0/1/2/3/4 zur Ablese der kritischen Spannungs- und Dehnungswerte

Tabelle 4.9 Bezeichnungen der kritischen Elemente

| Lastniveau | kritische Elemente nach Rankine | kritische Elemente nach von Mises |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Belastungsniveau 0 | A | F |
| Belastungsniveau 1 | B | G |
| Belastungsniveau 2 | C | H |
| Belastungsniveau 3 | D | I |
| Belastungsniveau 4 | E | J |

Anm.: Lage der kritischen Elemente siehe Abbildung 4.33 und Abbildung 4.34

Es gibt zwei wesentliche Unterschiede zwischen den Lagen der kritischen Elemente nach *Rankine* bzw. nach *von Mises*:

- In Tabelle 4.8 ist zu erkennen, dass die maximalen Vergleichsspannungen $\sigma_{V,zyk,max}$ im Verlauf der Laststeigerung durchgehend in den Dübel 2/3/4 auftreten. Das bedeutet im Wesentlichen, dass die Dübel 2/3/4 die meist beanspruchten Bereiche infolge des Schubtragmechanismus der SCSC-Platte – Schubübertragung im Sandwichquerschnitt durch die Ausbildung von horizontal liegenden Druckdiagonalen zwischen benachbarten Dübelleisten im Betonkörper – sind. Im Gegensatz dazu liegen die maximalen Hauptzugspannungen $\sigma_{1,zyk,max}$ nur bis einem Lastniveau von $1,7 \cdot LM71 \square \square$ in diesem Bereich. Danach sind sie im Dübel 12 (in der Mitte der Platte) erkennbar. Grund dafür ist die Biegeträgerwirkung des T-Querschnittes (bestehend aus dem Deckblech und der oben angeschweißten Lochdübelleiste) bzw. die daraus resultierenden Biegezugspannungen im unteren Bereich des Querschnittes.
- Aus dem Vergleich von Abbildung 4.33 und Abbildung 4.34 ist ersichtlich, dass die maximalen Hauptzugspannungen – mit roter Farbe hervorgehoben – sich in der Mittelachse der Kehlen der Lochdübelleisten (Stirnflächen der runden Ausschnitte der Dübelleisten) befinden. Im Unterschied dazu treten die maximalen Vergleichsspannungen an der Kante der Dübel auf.

4.6 Berechnungsergebnisse

Die Ergebnisdatenbank eines *ABAQUS*-Modells enthält die Verformungen, Spannungen, Schnittkräfte, Lagerreaktionen, etc. und umfasst grob zwei Gigabyte Daten. Zur Veranschaulichung der erhaltenen Daten wurden die gewünschten Ergebnisse in das Tabellenkalkulationsprogramm *Microsoft Excel* exportiert, und damit wurden zahlreiche Diagramme für alle Modellvarianten der Parameterstudie – beschrieben in Kapitel 6 – erstellt. Im Folgenden werden hier die ausgewerteten Berechnungsergebnisse des Modells *TYP 10* grafisch dargestellt und analysiert. Dabei ist die angegebene Belastung P als eine Gleichstreckenlast bezogen auf die Gleichsachse, wie beim *Lastmodell 71*, zu verstehen. (Die Belastung in FE-Modell jedoch als Flächenlast modelliert.)

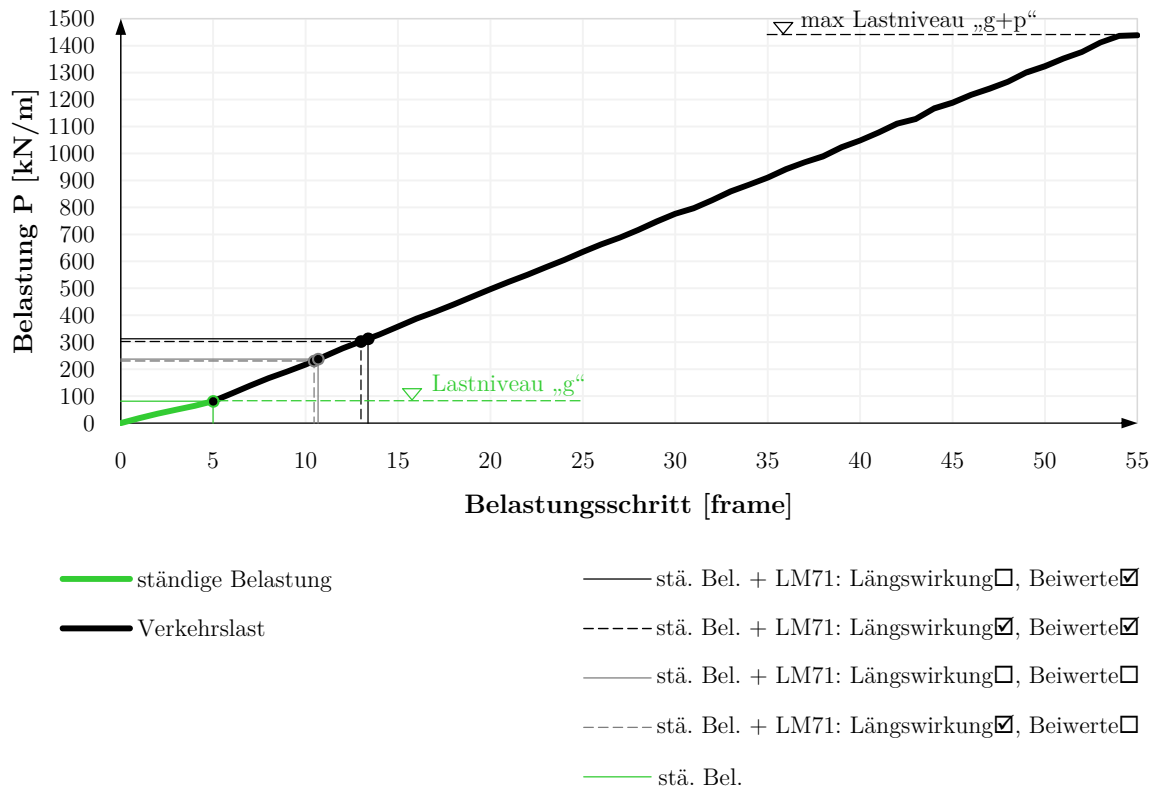
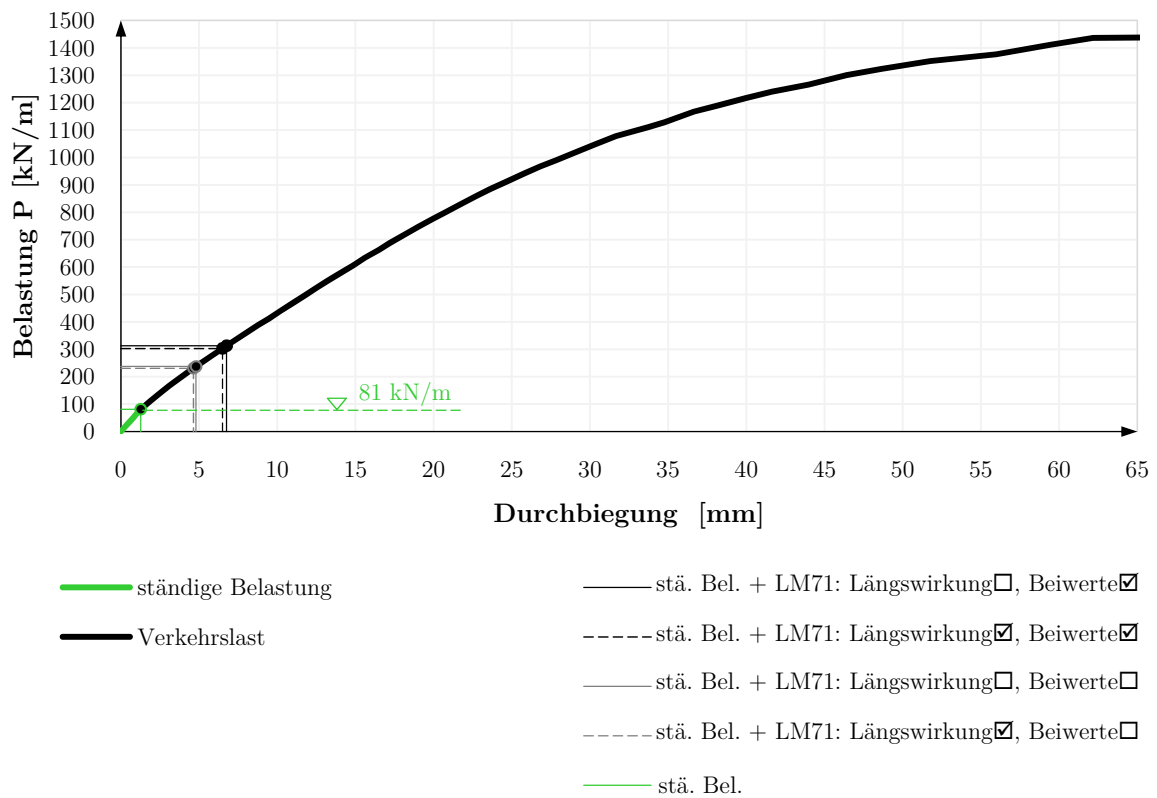
Abbildung 4.36: Belastungsschritt - Belastungsdiagramm, Modell *TYP 10*Abbildung 4.37: Last - Verschiebungsdiagramm, Modell *TYP 10*

Abbildung 4.36 stellt die aufgebrachte Belastung über die „Berechnungsdauer“ (Belastungsschritte = frame) dar. Die angegebenen Belastungswerte sind als Linienlast auf der SCSC-Platte, wie bei *Lastmodell 71*, zu verstehen. Es ist erkennbar, dass die Platte während *step 1* (Dauer: 5 *frame*) mit der ständigen Belastung belastet wurde. Anschließend wurde im Fall des Modells *TYP 10* etwa der 8-fache Wert des *Lastmodells 71* (bei alle anderen Modellen jedoch der 5-fache Wert), linear in *step 2* (Dauer: 50 *frame*) aufgebracht.

Abbildung 4.37 stellt die Tragwerksantwort dar. Unter Verschiebung u ist die Durchbiegung in der Mitte der Platte zu verstehen. Der Knick in der Kraft-Verformungslinie bei Erreichen des Lastniveaus aus ständiger Belastung (81 kN/m) ist auf die unterschiedlichen Belastungsflächen von ständiger Belastung und Verkehrslast zurückzuführen. Es ist erkennbar, dass die Platte sich bis zu einer Durchbiegung von etwa 15 mm näherungsweise linear elastisch verhält.

4.6.1 Ausgabedaten zur Verifikation der Berechnungsergebnisse

- Entwicklung der kinetischen Energie (*ALLKE*) und der gesamten Verzerrungsenergie (*ALLIE*)

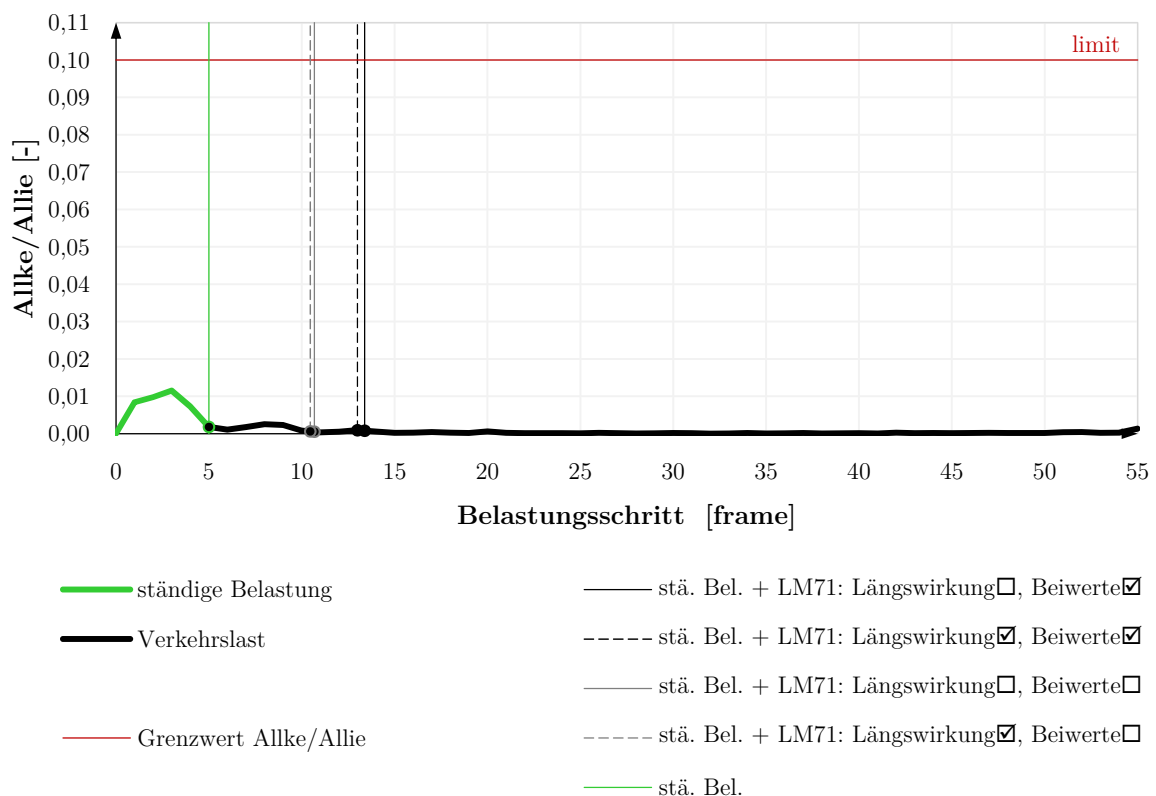


Abbildung 4.38: Verlauf des Energiequotienten *ALLKE/ALLIE* über die Berechnungsdauer Modell *TYP 10*

Wie in Kapitel 4.3.2 erwähnt, wurden die Berechnungen in *ABAQUS* mit dynamic, explicit Berechnungsalgorithmus durchgeführt. Laut *ABAQUS*-Benutzerhandbuch [46] ist zur Ergebniskontrolle von FE-Rechnungen, die mit expliziten Integrationsalgorithmen gelöst werden, eine Kontrolle des Anteils der kinetischen Energie an der gesamten internen Energie (*ALLKE/ALLIE*) notwendig. Abbildung 4.38 zeigt den Verlauf dieses Energiequotienten über die gesamte Berechnungsdauer. Der größte Wert tritt in den ersten Integrationsschritten auf und beträgt 0,012 und liegt damit deutlich unter dem angegebenen Grenzwert von 0,1.

- **Kontrolle der Konvergenz anhand Vergleichsspannungs-Vergleichsdehnungs-Beziehungen**

Der entstehende Vergleichsspannungs-Vergleichsdehnungsverlauf im maßgebenden Kerbelement muss näherungsweise der eingegebenen Arbeitslinie folgen. Bei Betrachtung von Abbildung 4.39 ist erkennbar, dass die Konvergenz bis etwa FLS-Lastniveau plausibel scheint.

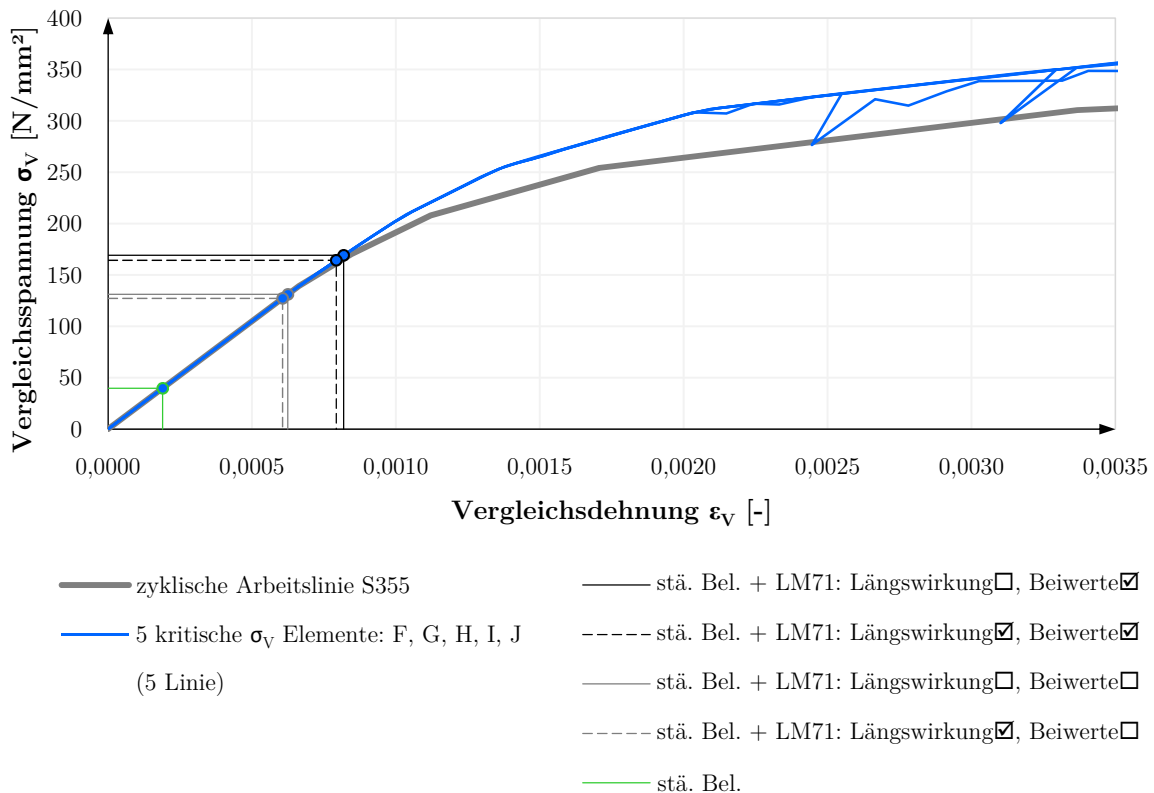


Abbildung 4.39: Plausibilisierung Konvergenz
Modell *TYP 10*

4.6.2 Eingangswerte für die Lebensdauerberechnung

Die Ermittlung der Lebensdauer nach dem Kerbdehnungskonzept für ein bestimmtes Belastungsniveau P beruht in erster Linie auf der Ermittlung der im Verlauf der Laststeigerung auftretenden Last-Kerbspannungsbeziehungen (Abbildung 4.40 und Abbildung 4.41) und der Last-Kerbdehnungsbeziehungen (Abbildung 4.42 und Abbildung 4.43). In Abhängigkeit von der verwendeten Versagenshypothese werden die folgenden Beanspruchungsgrößen benötigt:

- Versagenshypothese nach *Rankine*:
äußere Last P - Hauptzugspannung σ_1 - Hauptzugverzerrung ε_1
- Versagenshypothese nach *Mises*:
äußere Last P - Vergleichsspannung σ_V - Vergleichsdehnung ε_V

Auf Abbildung 4.40 bis Abbildung 4.43 sind jeweils 5 Verläufe für die 5 kritischen Elemente (ausgewählt anhand der maximalen Spannungswerte, siehe Kapitel 4.5, Abbildung 4.35) und eine zusätzliche Kurve, benannt als „maximale P_{SWT} Element pro Laststufe“, dargestellt. Diese zusätzliche Kurve stellt das Maximum jener Werte dar, die an den 5 kritischen Elementen die maximale Schädigung nach *Smith, Watson und Topper* [36] (s. Abschnitt 3.7, Gl. 3.23 und Gl. 3.24) pro Laststufe errechnet. Anders gesagt: Die Kurve zeigt, welches Element aus den 5 kritischen Elementen für die Lebensdauerberechnung maßgebend ist. Auf diesem Pfad ist ein merkwürdiger Sprung bei 480 [kN/m] (etwa dem dreifachen Wert des *Lastmodells 71*) zu erkennen. Dieser Sprung kann fast an allen Modellen der Parameterstudie beobachtet werden. Die Ursache dafür liegt vor allem in der Methode, wie diese Einhüllende aus den höchst geschädigten Elementen gebildet wurde (für die genaue Beschreibung des Kriteriums für die Auswahl dieses Elementes siehe Kapitel 5.6). Dieser Sprung bedeutet, dass davon das kritische Element B (Lage: Dübel 3), danach aber das Element E (Lage: Dübel 12 in der Mitte der Platte) maßgebend ist. Letzteres weist schon ab zirka 270 [kN/m] eine höhere Oberspannung als das vorherige Element auf, ist aber aufgrund seiner niedrigeren Dehnungsamplitude (unterste Linie in Abbildung 4.42 bei einem Lastniveau von 240 [kN/m]) bis zu dem Sprung nicht maßgebend.

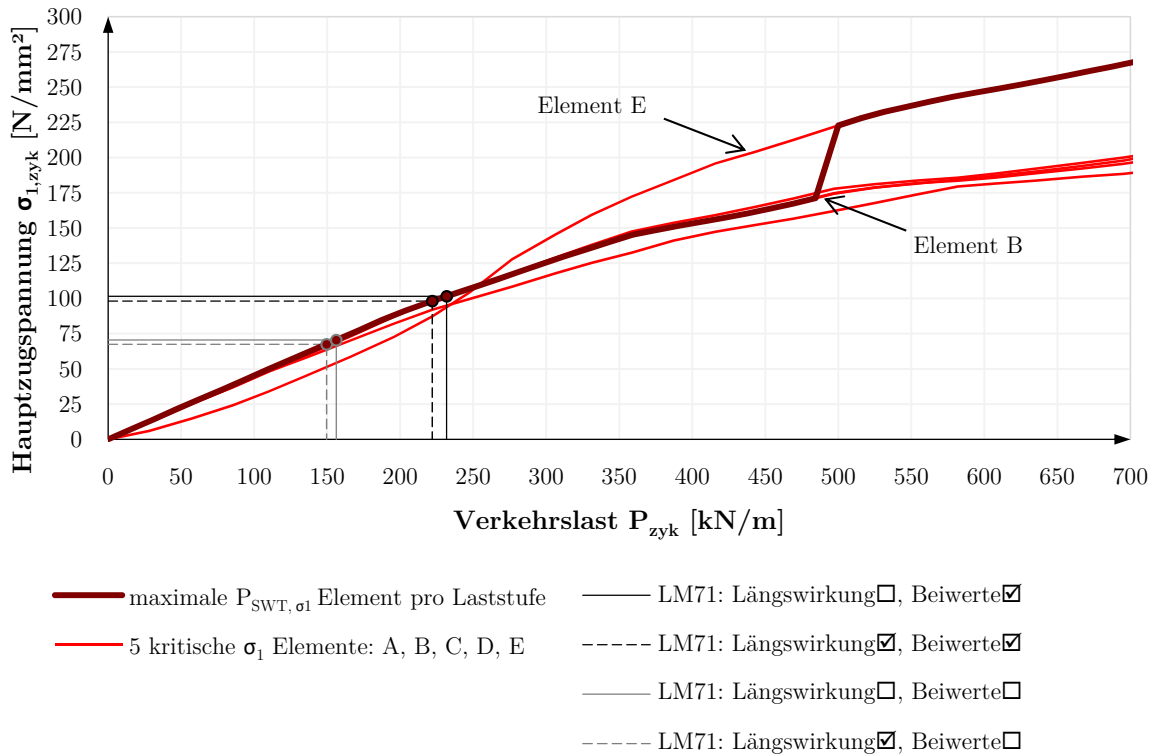


Abbildung 4.40: Last - Kerbspannungsbeziehung (P_{zyk} - $\sigma_{1,zyk}$ -Pfad) der 5 kritischen σ_1 Elemente unter Verkehrslast und das maximale $P_{SWT,1}$ Element pro Laststufe, M. TYP 10

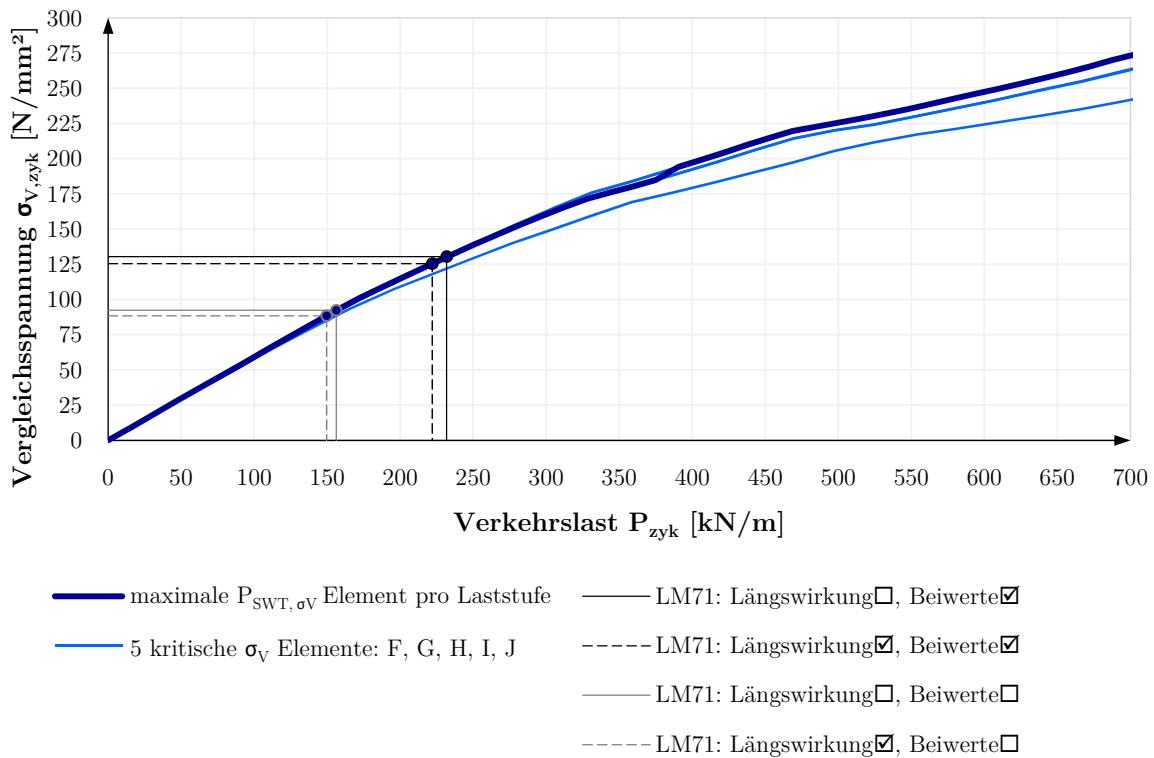


Abbildung 4.41: Last - Kerbspannungsbeziehung (P_{zyk} - $\sigma_{V,zyk}$ -Pfad) der 5 kritischen σ_V Elemente unter Verkehrslast und das maximale $P_{SWT,V}$ Element pro Laststufe, M. TYP 10

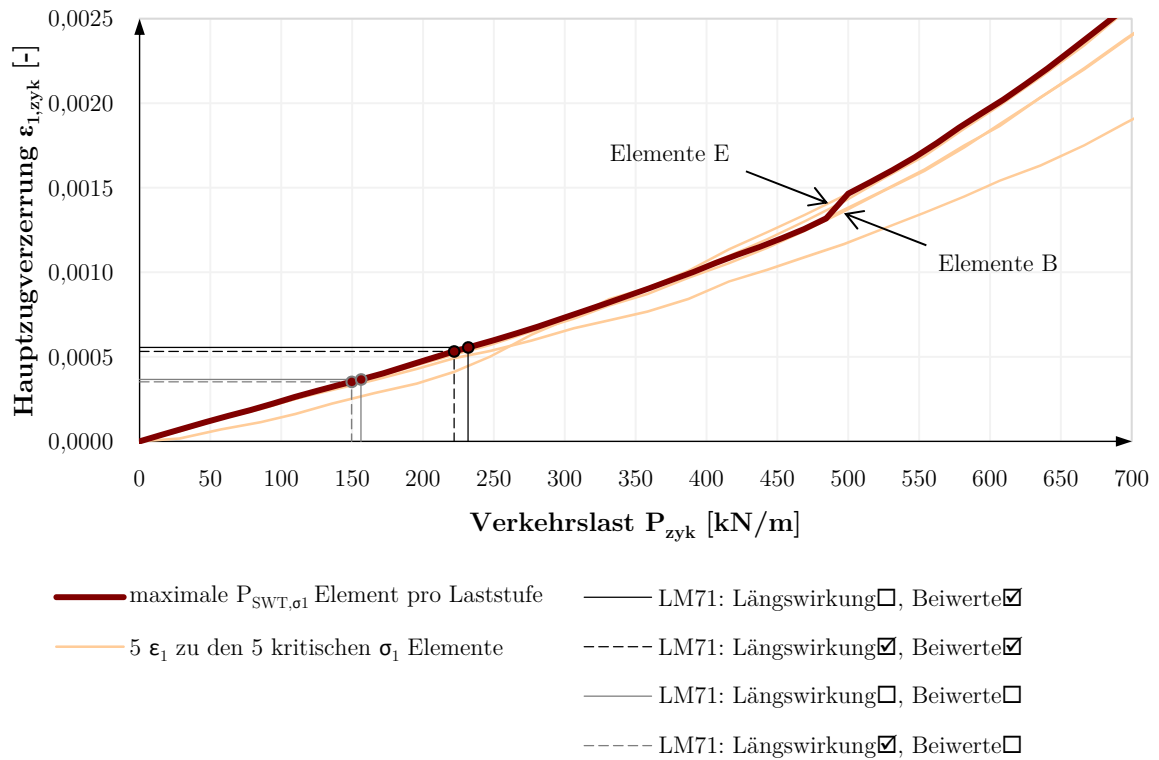


Abbildung 4.42: Bauteilfließkurve ($P_{zyk}-\varepsilon_{1,zyk}$ -Pfad) der 5 kritischen σ_1 Elemente unter Verkehrslast und das maximale $P_{SWT,1}$ Element pro Laststufe, Modell *TYP 10*

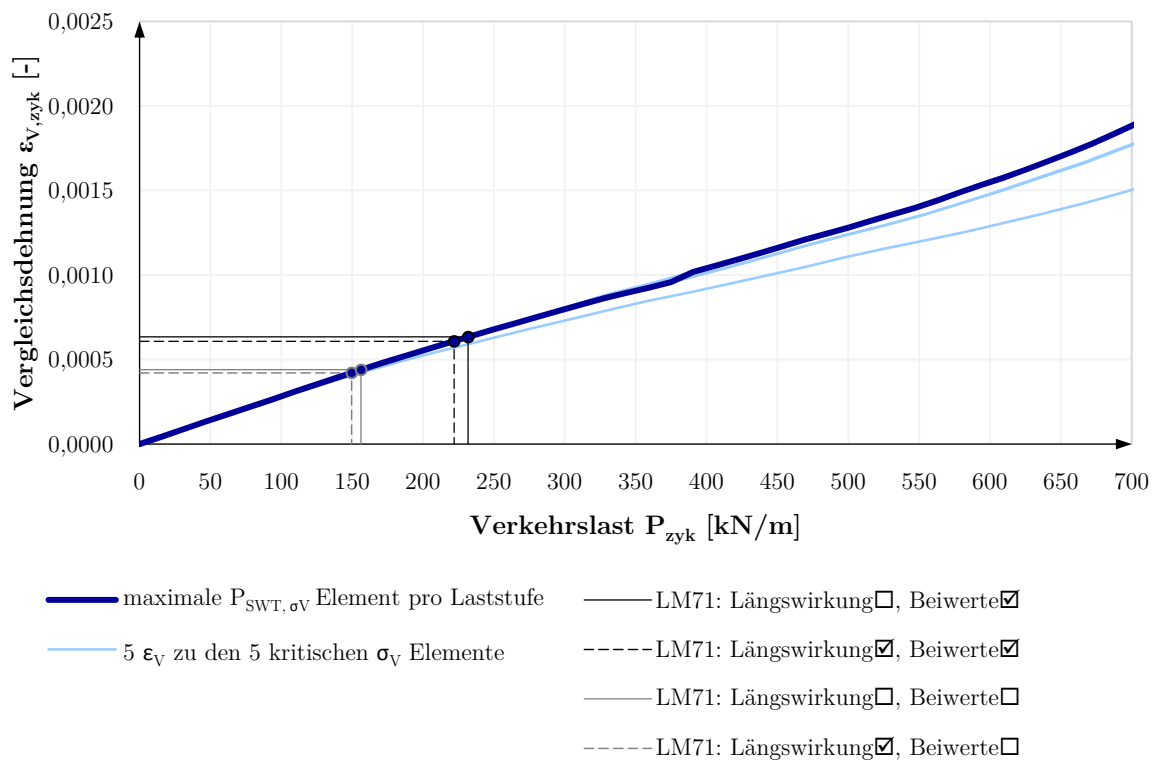


Abbildung 4.43: Bauteilfließkurve ($P_{zyk}-\varepsilon_{V,zyk}$ -Pfad) der 5 kritischen σ_V Elemente unter Verkehrslast und das maximale $P_{SWT,V}$ Element pro Laststufe, Modell *TYP 10*

4.6.3 Resultierende Dübelbeanspruchung

Die resultierende Dübelbeanspruchung in der mittleren Dübelleiste (nach Abbildung 4.7) ist für die im Rahmen der zukünftigen Forschungsarbeiten durchzuführenden experimentellen Untersuchungen von Bedeutung. Mit der resultierenden Dübelbeanspruchung sind die von den Dübeln übertragenen Schubkräfte $P_{Dübel,i}$ (s. Abbildung 4.44) gemeint.

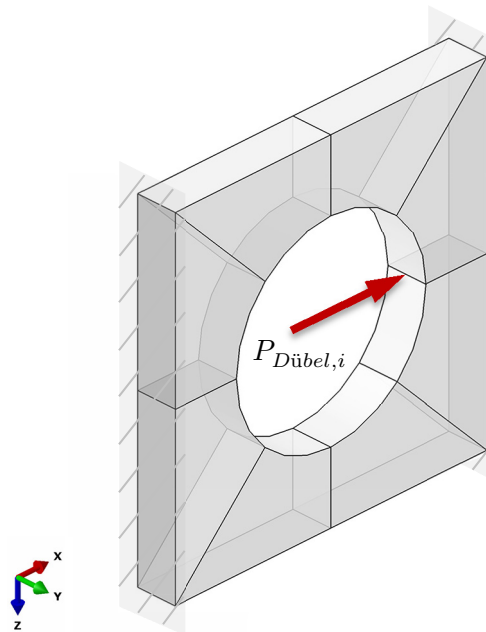


Abbildung 4.44: Schubkraft $P_{Dübel,i}$

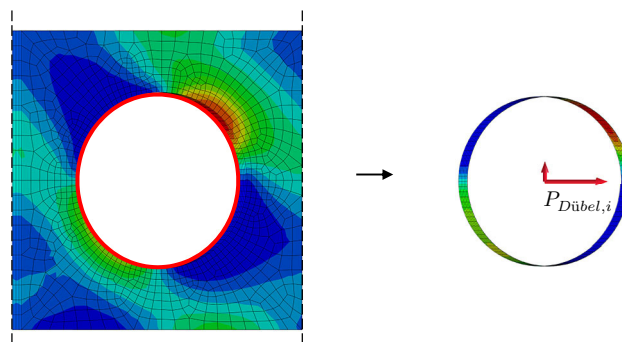


Abbildung 4.45: Resultierende Kraft $P_{Dübel,i}$ auf den frei gewählten Schnitt (roter Kreis)

Für die Ermittlung der Schubkraft $P_{Dübel,i}$ gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten:

- mit Hilfe des Befehls *Create Cut / Shape: Cylinder* lassen sich die auf einem frei gewählten Schnitt wirkenden inneren Kräfte im *ABAQUS* Ergebnisfile direkt darstellen, siehe Abbildung 4.45 (Integration der Betonpressungen entlang des Umfanges);
- durch Aufintegrieren des entlang der Halskehlnaht wirkenden Schubspannungsverlaufes τ_{ZX} (*S31*) (für die Bezeichnung der einzelnen Spannungstensoren siehe Abbildung 4.46).

Zur Verifikation der Ergebnisse wurden beide Varianten durchgeführt.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Ermittlung des Schubspannungsverlaufes τ_{zx} ($S31$) beschrieben. Mit Hilfe des Befehls *Create Path* im *ABAQUS*-Modell lassen sich die einzelnen Spannungskomponenten entlang eines frei gewählten Pfades ermitteln. Nach Ermittlung der Verläufe entlang der 7 Elementkanten der mittleren Dübelleiste wurde mit der in Abbildung 4.47 dargestellten Methode ein Mittelwert in Querrichtung berechnet. Die so resultierenden Normal- und Schubspannungsverläufe sind in Abbildung 4.48 dargestellt. Nach Kenntnis der Spannungen wurde die Schubkraft $P_{Dübel,i}$ nach Formel 4.8 berechnet. Die Ergebnisse beider Methoden werden in Abbildung 4.49 verglichen. Es ist erkennbar, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden besteht. Der maximal beanspruchte Dübel ist Dübel 3 und die maximale Dübelbeanspruchung beträgt etwa 74 kN.

$$P_{Dübel,i} = t_{Dübelleiste} \cdot \int_{x_i}^{x_{i+1}} \tau_{zx} dx \quad 4.8$$

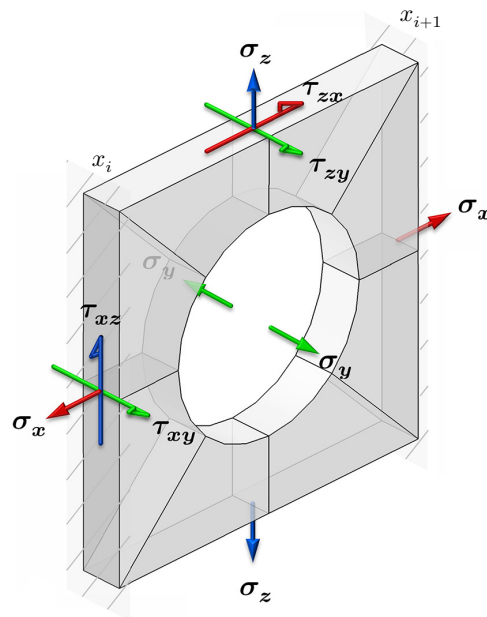


Abbildung 4.46: Spannungstensoren

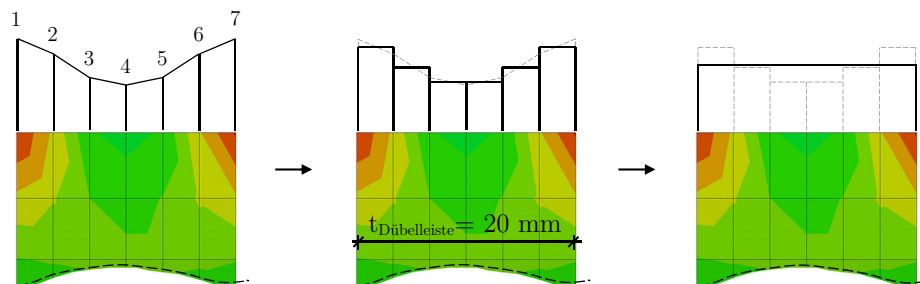


Abbildung 4.47: Mittelung der Spannungsverläufe in Querrichtung entlang den Elementkanten

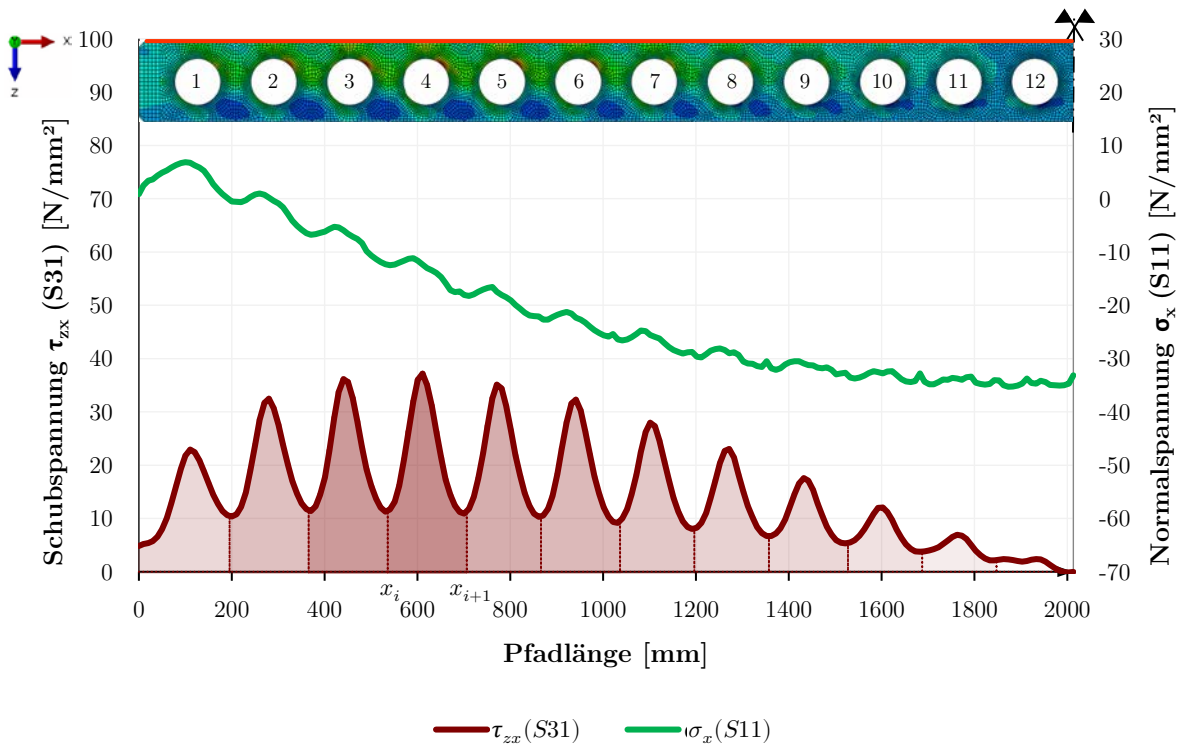


Abbildung 4.48: Spannungsverläufe σ_X (S11) und τ_{ZX} (S31) entlang der Oberkante der oben angeschweißten Dübelleiste
Modell *TYP 10*, Lastniveau: $\Delta LM71 \square \boxtimes$

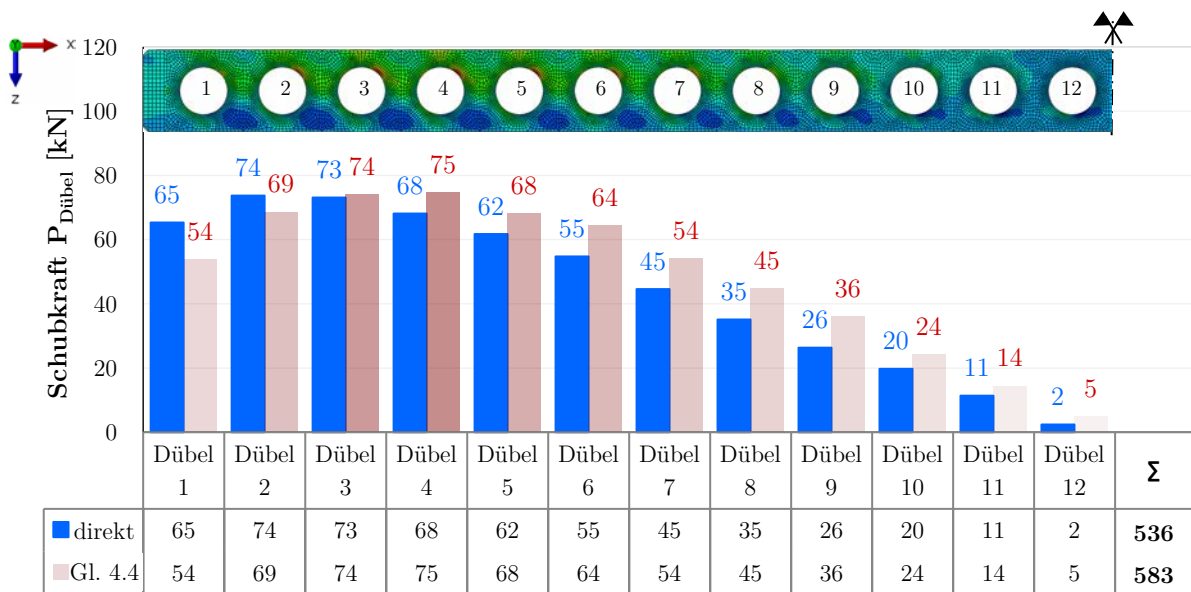


Abbildung 4.49: Schubkraft $P_{Dübel}$ in den einzelnen Dübeln
(blau: direkt aus *ABAQUS*, rot: durch Aufintegrieren der entlang der Halskehlnaht wirkenden Schubspannungsverläufe τ_{ZX})
Modell *TYP 10*, Lastniveau: $\Delta LM71 \square \boxtimes$

4.6.4 Minimale Hauptdruckspannungen im Beton

Laut *ABAQUS* Benutzermanual [46] ist das Materialmodell *CDP* (siehe Kapitel 4.3.3) nicht dazu geeignet, dreiaxiale Spannungszustände zu beschreiben, bei denen der fünffache Wert der einachsialen Druckfestigkeit ($f_{c,min} < -5 \cdot f_{cm}$) überschritten wird. Zunächst wird kontrolliert, ob diese Beschränkung eingehalten werden kann. Darüber hinaus wird dargestellt, wo sich die maximal beanspruchten Elemente befinden und in welche Richtungen die minimalen Hauptdruckspannungstrajektorien zeigen. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Druckspannungen im Beton unter Ermüdungslastniveau.

- Betondübel im Bereich der oben angeschweißten Dübelleiste:

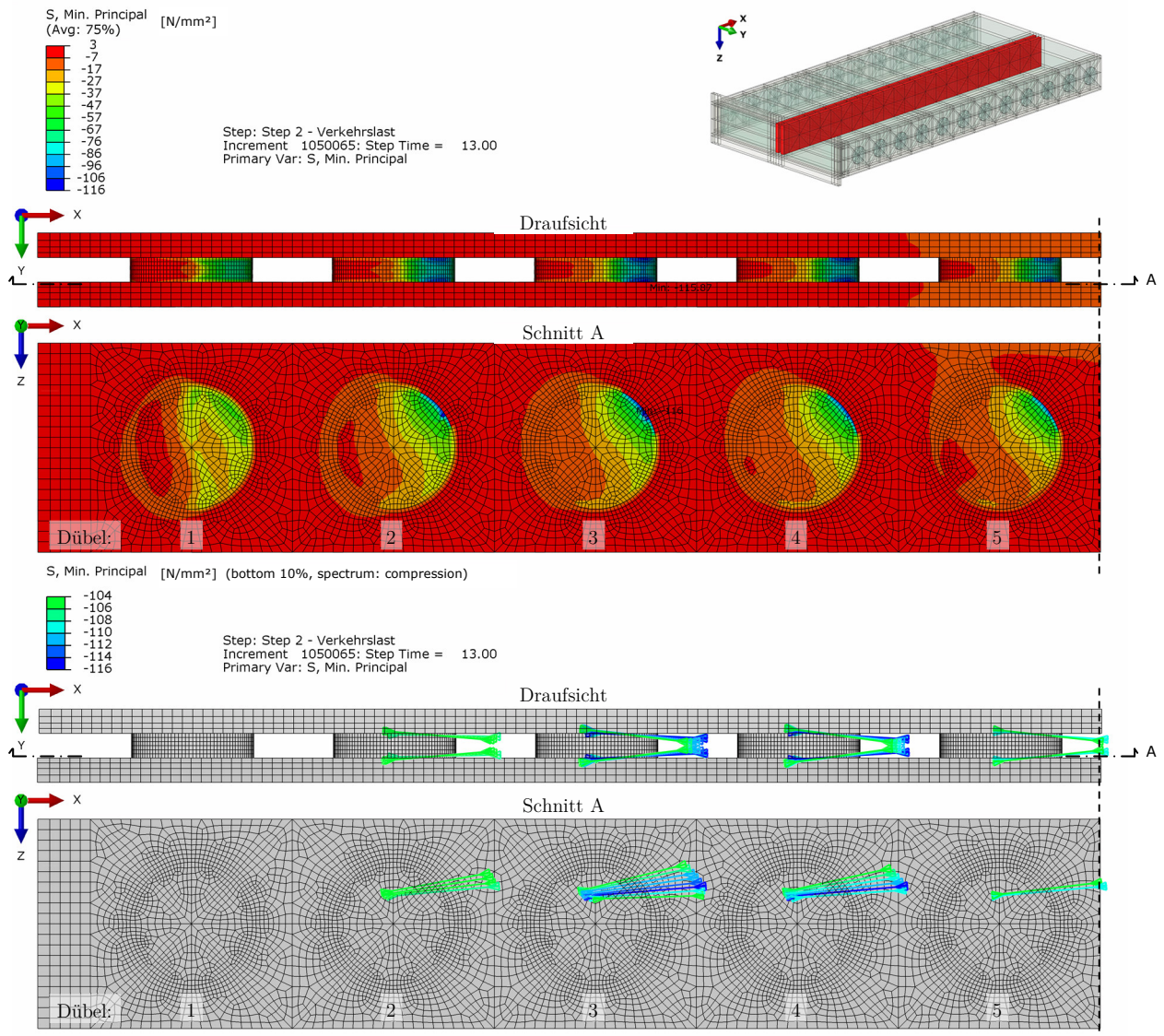


Abbildung 4.50: Hauptdruckspannungen im Betondübel,
 Teilbild oben: Qualitative Darstellung, Teilbild unten: Spitzenwerte der Druckspannungen,
 Modell *TYP 10*, Lastniveau: \approx ständige Belastung + *LM71*☑

- Betonkern Horizontalschnitte:

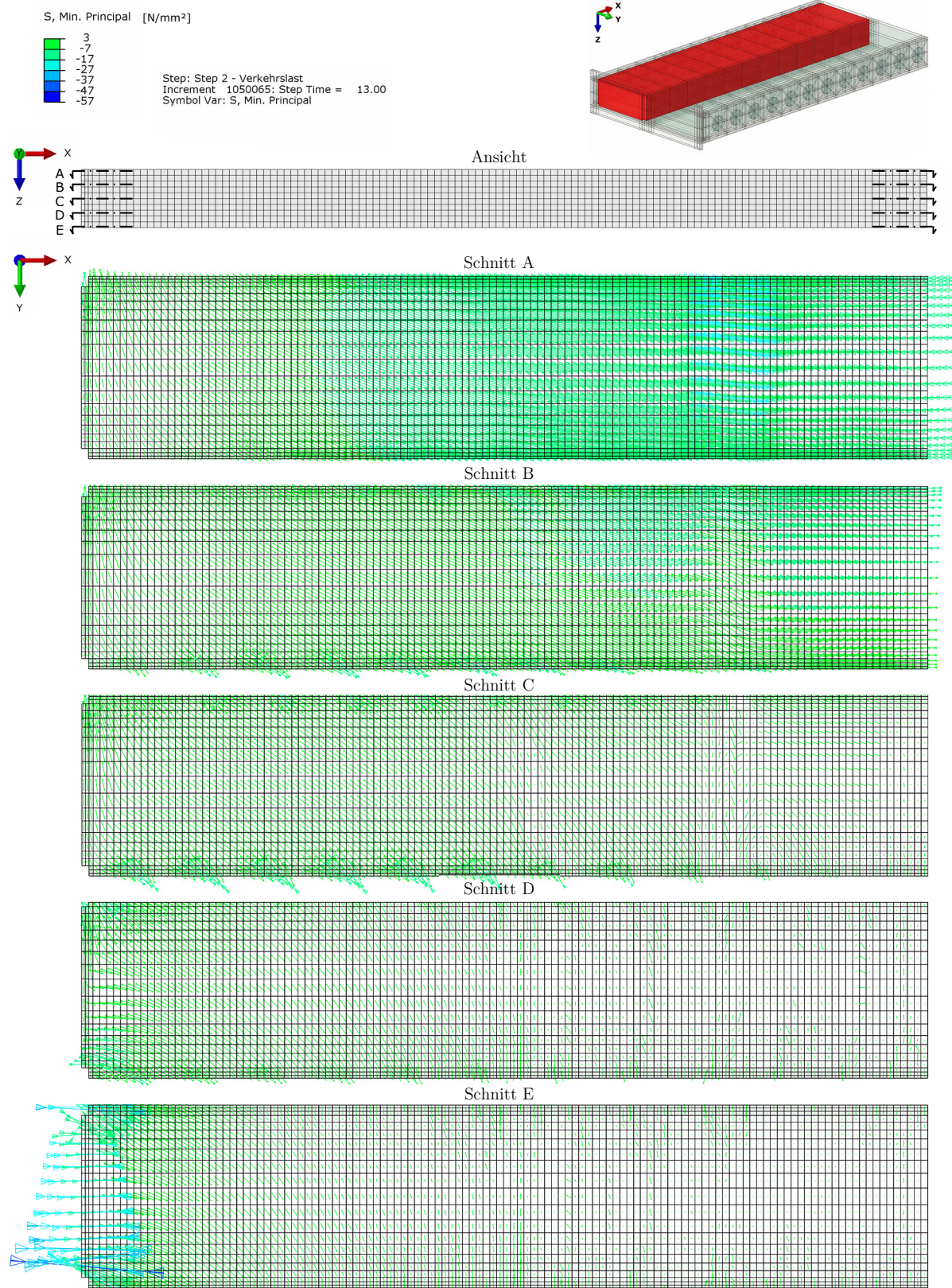


Abbildung 4.51: Hauptdruckspannungen im Betonkern: Horizontalschnitte, Modell *TYP 10*, Lastniveau: \approx ständige Belastung + LM71☐☑

- Betonkern Vertikalschnitte:

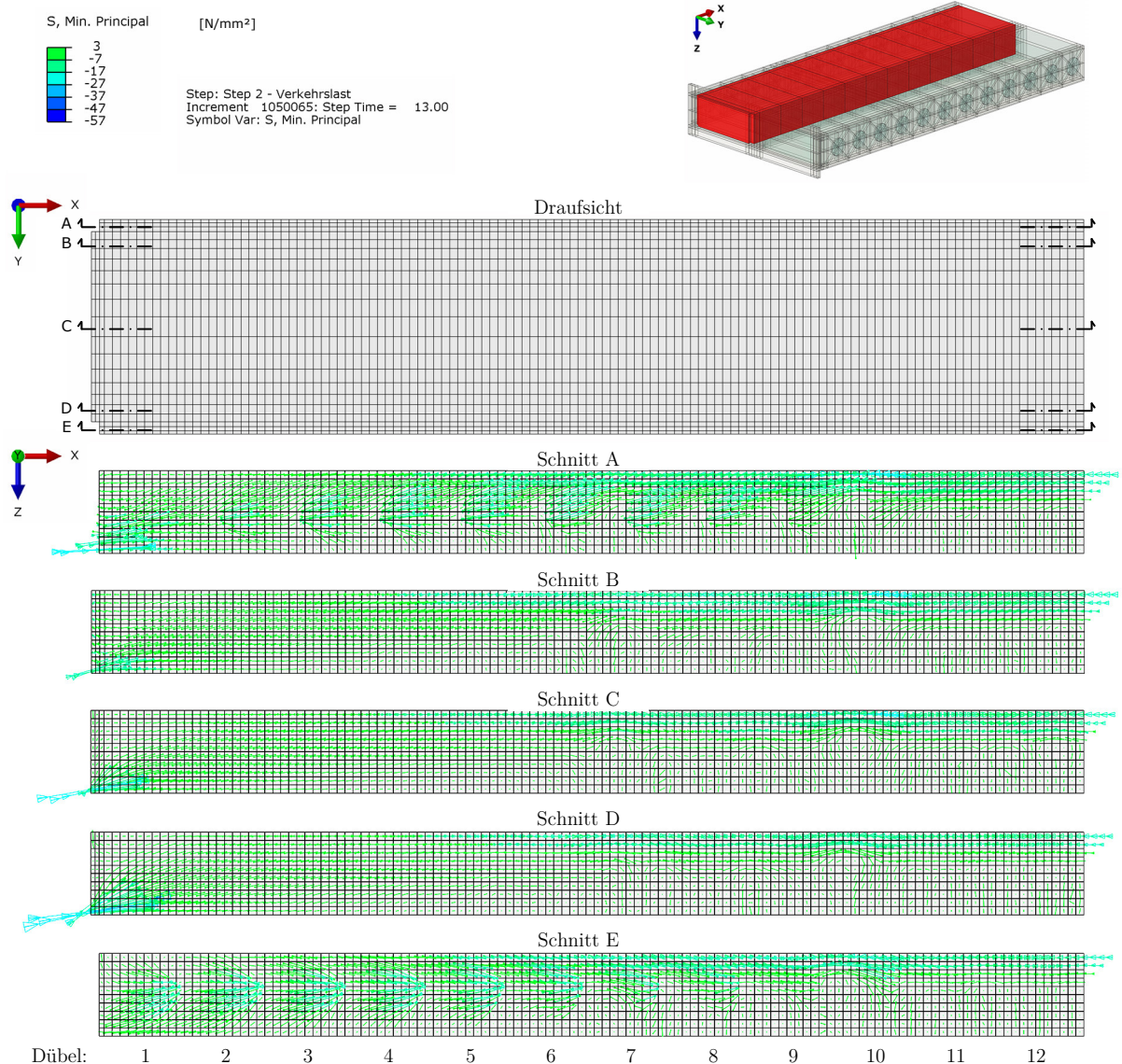


Abbildung 4.52: Hauptdruckspannungen im Betonkern: Vertikalschnitte, Modell *TYP 10*, Lastniveau: \approx ständige Belastung + *LM71*☐☑

Nach Abbildung 4.50 befindet sich die minimale Hauptdruckspannung im dritten Dübel des Betondübels und beträgt $f_{c,min} = -116 \text{ N/mm}^2$. Im Vergleich dazu beträgt der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons *C40/50* $f_{cm} = -48 \text{ N/mm}^2$. Somit kann die grundlegende Bedingung zur Anwendbarkeit des Betonmodells *CDP* weitestgehend als erfüllt angesehen werden ($-116 \gg 5 \cdot -48 = -240$).

Es ist erkennbar, dass die Lage der maximal beanspruchten Stelle im Beton in einem Dübel mit der Lage der maximalbeanspruchte Stelle der Stahldübelleiste übereinstimmen, siehe Abbildung 4.33.

4.6.5 Schädigung des Betons

- Druckschädigung des Betondübel für die oben angeschweißte Dübelleiste:

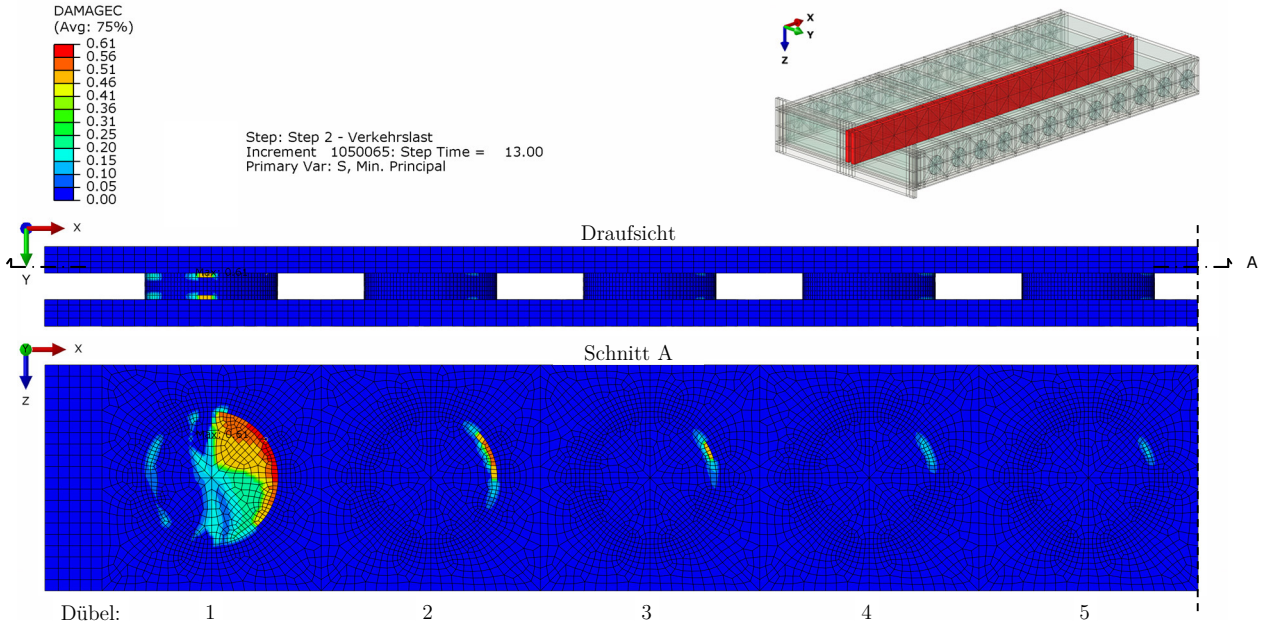


Abbildung 4.53: Druckschädigung des Betondübel, Modell *TYP 10*, Lastniveau: \approx ständige Belastung + *LM71*☐☑

Nach Abbildung 4.53 befindet sich die maximale Betondruckschädigung im ersten Dübel des Betondübel und beträgt $d_{c,max} = 0,61$. Die Druckschädigung in Dübel 3, wo sich die größten Druckspannungen ausbilden, ist sehr schwach ausgeprägt.

- Zugschädigung des Betondübel für die oben angeschweißte Dübelleiste:

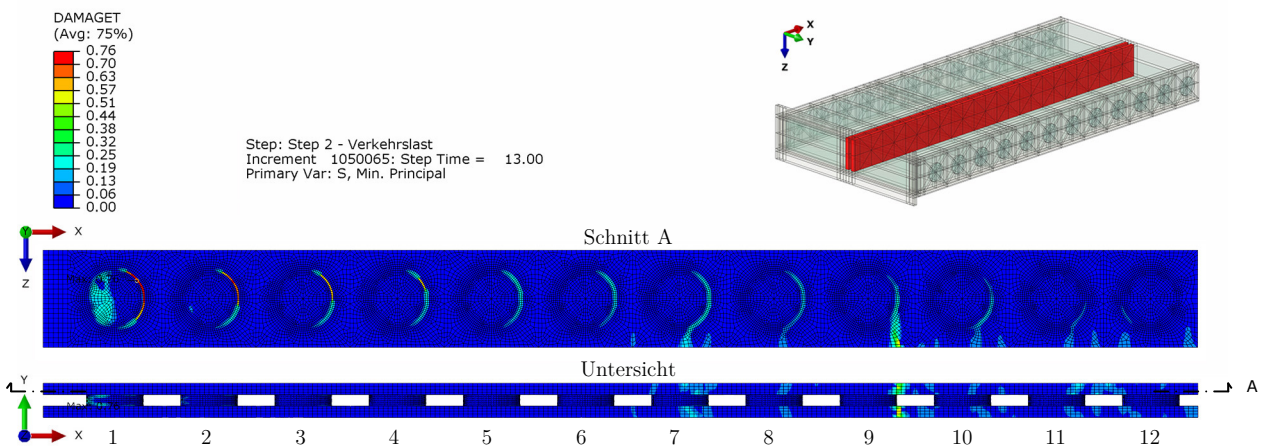


Abbildung 4.54: Zugschädigung des Betondübel, Modell *TYP 10*, Lastniveau: \approx ständige Belastung + *LM71*☐☑

Die größte Zugschädigung des Betondübel mit $d_{t,max} = 0,76$ infolge der primär Tragwirkung Schubübertragung ist wiederum im Dübel 1 zu erkennen (s. Abbildung 4.54). Weitere Schädigung

gungen sind beim unteren Bereich des Betondübel zwischen Dübel 7-12 infolge der Biegewirkung erkennbar.

- Zugschädigung des Betonkerns:

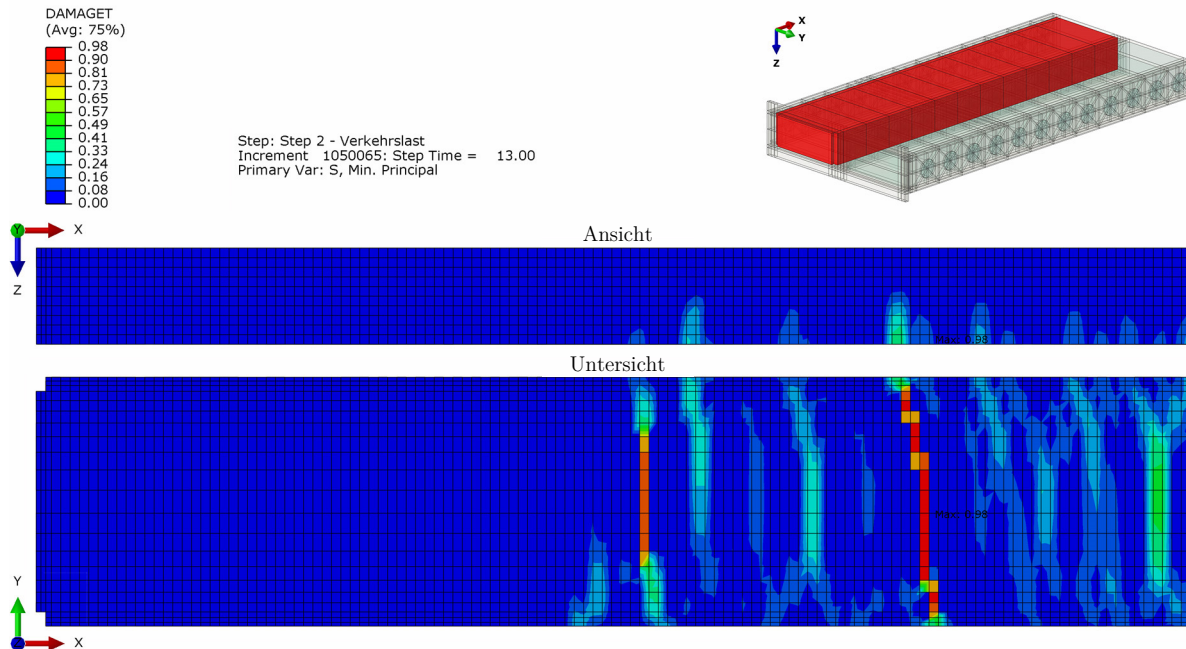


Abbildung 4.55: Zugschädigung des Betonkerns,
Modell *TYP 10*, Lastniveau: \approx ständige Belastung + *LM71*

Die Zugschädigung des Betonkerns ist ähnlich, wie die Zugschädigung des Betondübel, jedoch etwas mehr ausgeprägt. Die Druckschädigung des Betonkerns wurde nicht dargestellt, da dieser unter FLS-Lastniveau komplett unbeschädigt ist.

4.6.6 Zum Thema der mitwirkenden Plattenbreite

Ohne eine konkrete Ermittlung der mitwirkenden Plattenbreite für die Stahlbleche zwischen den Querrippen wird hier der Einfluss der bei Trägern mit breiten Gurten vorkommenden Schubverzerrungen gezeigt, der zu einer veränderlichen Normalspannungsverteilung führt. In Abbildung 4.56 kann die in den ausgewählten Randelementen des Boden- und Deckbleches wirkende qualitative Normalspannungsverteilung in Längsrichtung der Platte (X) – ident zu Querrichtung der Brücke – beobachtet werden. Man kann erkennen, dass die längslaufenden Spannungen in Querrichtung der Platte (Y) fast konstant verteilt sind, somit kann die gesamte Plattenbreite gut ausgenutzt werden.

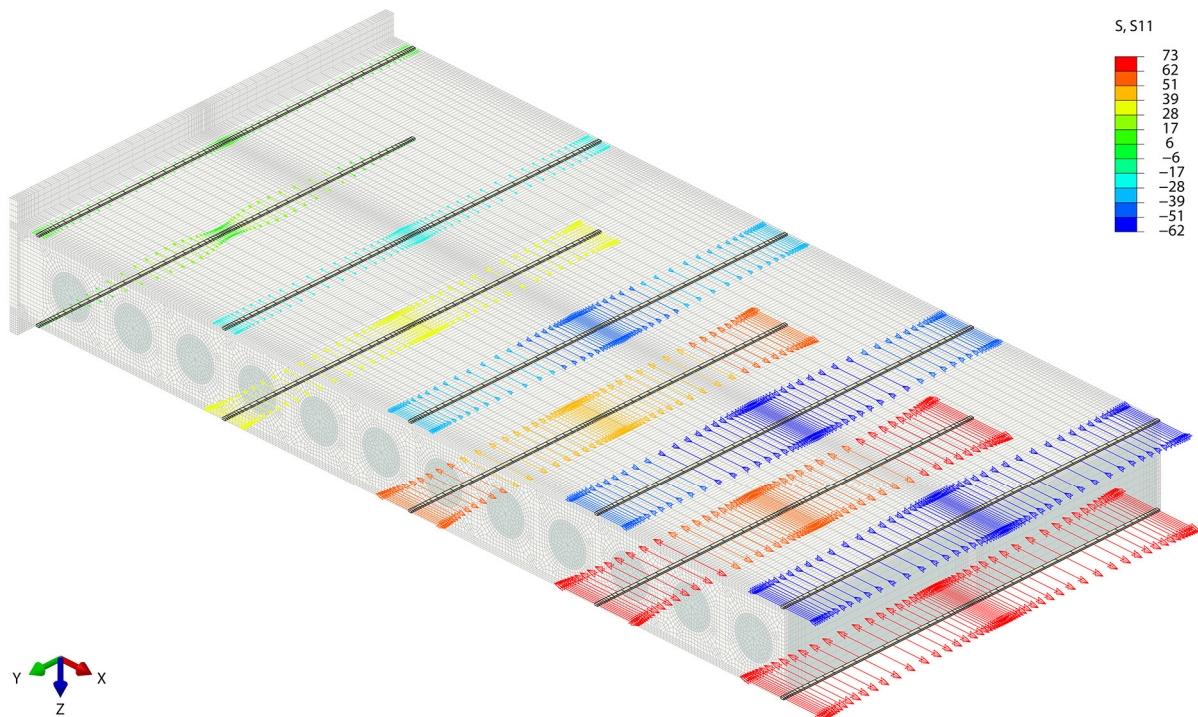


Abbildung 4.56: Qualitative Normalspannungsverteilung in Deck- und Bodenblech der Platte in Querrichtung der Brücke (Richtung X)
Modell *TYP 4*, Lastniveau: $\Delta LM71 \square \square$

4.6.7 Richtung der Hauptzugspannungen in der Lochdübelleiste

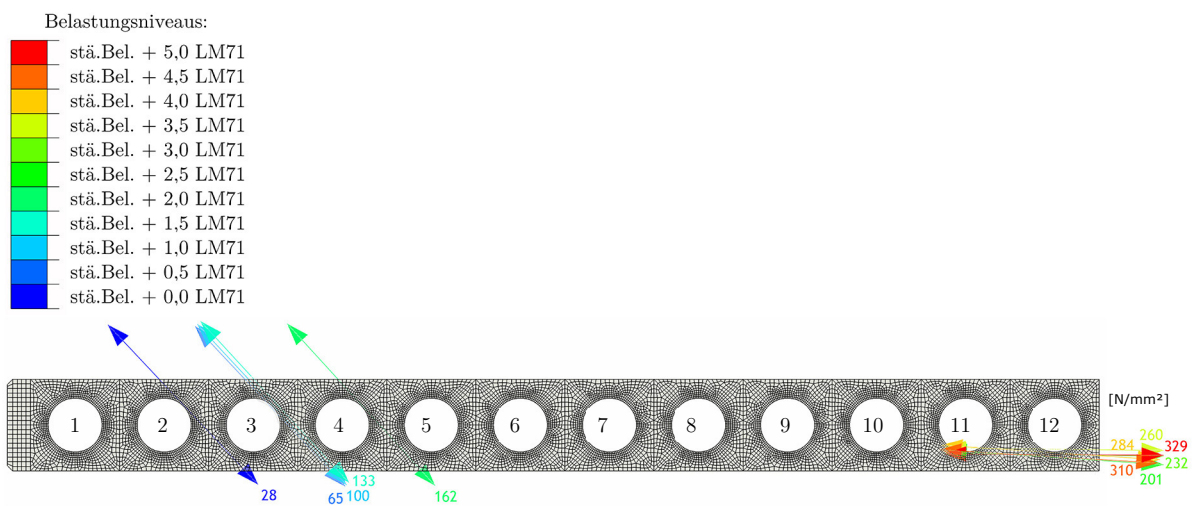


Abbildung 4.57: Richtung der Hauptzugspannungen in der Lochdübelleiste
Modell *TYP 4*, Unterschiedliche Lastniveaus

Die wesentliche Aussage gemäß Abbildung 4.57 ist, dass sich die Richtung der Hauptzugspannungen in der Lochdübelleiste im Verlauf der Laststeigerung bis zu einem Lastniveau von ständiger Belastung + $2 \cdot LM71 \square \square$ nicht ändert und etwa 45° beträgt.

Kapitel 5

Lebensdauerberechnung

5.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Die notwendige Ergebnisdatenbank für die Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes wurde innerhalb der numerischen Untersuchungen in Kapitel 4 ermittelt. Es kann nun mit der Lebensdauerberechnung begonnen werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Bestimmung von Bauteil-Wöhlerkurven. Diese stellen den Zusammenhang zwischen einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ und der Lebensdauer N her, wobei immer ein Einstufenkollektiv unterstellt wird. Das in [5] definierte Nennspannungskonzept beruht auf der Anwendung eines Kerbfallkataloges. In Analogie zu dieser Vorgangsweise des Ermüdungsnachweises werden in Ermangelung eines Kerbdetails für die Lochdübelleiste als Konstruktionselement innerhalb der SCSC-Platte der Ermüdungswiderstand ΔP infolge *Lastmodell 71* rechnerisch mit Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes ermittelt und in Form von Bauteil-Wöhlerlinien dargestellt. Der Grundgedanke des Ermüdungsnachweises für die Lochdübelleiste mit dem Anspruch einer einfach anwendbaren Ingenieurmethode besteht darin, nicht auf Spannungsebene den Nachweis zu führen, sondern - wegen der komplexen strukturellen Zusammenhänge, die sich mit der Ermittlung der kritischen Spannungen und Kerbstellen ergeben - auf Lastebene in Form einer Gegenüberstellung gemäß Gl. 5.1 von einwirkendem und widerstehendem Lastniveau, auf Basis des *Lastmodells 71* [34].

$$\Delta P_{Ed} \leq \Delta P_{Rd} \tag{5.1}$$

Dieser Grundgedanke resultiert in Bauteil-Wöhlerlinien als funktionaler Zusammenhang von Lastschwingbreiten ΔP infolge des *Lastmodells 71* und Anrisslebensdauer, ausgedrückt in Form einer Schwingenspielzahl N bis zum Anriss.

5.2 Definierung einzelner Schwingspiele

Vor der eigentlichen Lebensdauerberechnung müssen eine Vielzahl von Schwingspielen mit unterschiedlicher Belastungsschwingbreite definiert werden. Die Schwingspiele werden zuerst als reine Wechselbeanspruchung ($R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = -1$) festgelegt, siehe Tabelle 5.1. Deren Kennwerte sind die Belastungsamplitude P_a , die Belastungsschwingbreite $\Delta P = P_a \cdot 2$ bzw. die Unterlast P_u , Mittellast P_m und Oberlast P_o . Die Form einer Hystereseschleife bei reiner Wechselbeanspruchung ist in Abbildung 5.10 unten, Teilbild links dargestellt.

Tabelle 5.1 Definierung einzelner Schwingspiele ohne Berücksichtigung der Mittellast, reine Wechselbeanspruchung ($R = -1$, $P_m = 0$)

| Nr. | Belastungs- niveau | Belastungs- amplitude P_a [kN/m] | Belastungs- schwingbreite ΔP [kN/m] | Unterlast P_u [kN/m] | Mittellast P_m [kN/m] | Oberlast P_o [kN/m] |
|-----|-----------------------|---|--|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0,0 · LM71□□ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,1 · LM71□□ | 8 | 16 | -8 | 0 | 8 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 10 | 1,0 · LM71□□ | 78 | 156 | -78 | 0 | 78 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 20 | 2,0 · LM71□□ | 156 | 313 | -156 | 0 | 156 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 30 | 3,0 · LM71□□ | 234 | 469 | -234 | 0 | 234 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 40 | 4,0 · LM71□□ | 313 | 625 | -313 | 0 | 313 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 50 | 5,0 · LM71□□ | 391 | 781 | -391 | 0 | 391 |

Um die Einflüsse aus der Mittelspannung berücksichtigen zu können, werden vorerst die zuvor definierten Schwingspiele als reine Schwellbeanspruchung (mit der Berücksichtigung der Mittellast alleine infolge Verkehrslast) definiert, siehe Tabelle 5.2. In diesem Fall $R = 0$, da die Unterlast bei allen Schwingspielen Null beträgt. Die Form einer Hystereseschleife ist in Abbildung 5.10 unten, Teilbild Mitte erkennbar.

Als nächster Schritt wird die Erhöhung der Mittellast infolge ständiger Belastung berücksichtigt, siehe Abbildung 5.10 unten, Teilbild rechts, bzw. Tabelle 5.3.

Tabelle 5.2 Definierung einzelner Schwingspiele mit Berücksichtigung der Mittellast aus der Verkehrslast

| Nr. | Belastungs- niveau | Belastungs- amplitude P_a [kN/m] | Belastungs- schwingbreite ΔP [kN/m] | Unterlast P_u [kN/m] | Mittellast P_m [kN/m] | Oberlast P_o [kN/m] |
|-----|-----------------------|---|--|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0,0 · LM71□□ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,1 · LM71□□ | 8 | 16 | 0 | 8 | 16 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 10 | 1,0 · LM71□□ | 78 | 156 | 0 | 78 | 156 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 20 | 2,0 · LM71□□ | 156 | 313 | 0 | 156 | 313 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 30 | 3,0 · LM71□□ | 234 | 469 | 0 | 234 | 469 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 40 | 4,0 · LM71□□ | 313 | 625 | 0 | 313 | 625 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 50 | 5,0 · LM71□□ | 391 | 781 | 0 | 391 | 781 |

Tabelle 5.3 Definierung einzelner Schwingspiele mit Berücksichtigung der Mittellast aus der ständigen Belastung und der Verkehrslast

| Nr. | Belastungs- niveau | Belastungs- amplitude P_a [kN/m] | Belastungs- schwingbreite ΔP [kN/m] | Unterlast P_u [kN/m] | Mittellast P_m [kN/m] | Oberlast P_o [kN/m] |
|-----|-----------------------|---|--|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0,0 · LM71□□ | 0 | 0 | 81 | 81 | 81 |
| 1 | 0,1 · LM71□□ | 8 | 16 | 81 | 89 | 97 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 10 | 1,0 · LM71□□ | 78 | 156 | 81 | 159 | 237 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 20 | 2,0 · LM71□□ | 156 | 313 | 81 | 237 | 394 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 30 | 3,0 · LM71□□ | 234 | 469 | 81 | 315 | 550 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 40 | 4,0 · LM71□□ | 313 | 625 | 81 | 394 | 706 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 50 | 5,0 · LM71□□ | 391 | 781 | 81 | 472 | 862 |

5.3 Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes für die Lochdübelleiste der SCSC-Platte

5.3.1 Einleitung und Problemdarstellung

Lit.: [34]

Die Erstbelastungspfade und Hystereseschleifen infolge ermüdungswirksamer (zyklischer) Lasten sind nach dem Kerbdehnungskonzept unter Anwendung der zyklischen Arbeitslinie von Stahl zu bestimmen. Die Einwirkungen auf die SCSC-Platte einer Eisenbahnbrücke setzen sich jedoch aus der zyklischen Verkehrslast und aus der ständigen Belastung infolge Eigengewicht der Konstruktion und des Schotteroberbaus zusammen. Die Modellbildung des Spannungs-Dehnungsverhaltens aufgrund dieser beiden Lastwirkungen unterscheidet sich zunächst grundsätzlich hinsichtlich der jeweils anzuwendenden Arbeitslinien, da für die ständige Belastung die statische und für die Verkehrslast (*LM71*) die zyklische Arbeitslinie zugrunde gelegt wird. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal bei der Modellierung des Tragverhaltens aufgrund ständiger und zyklischer Belastung ergibt sich aus der Lastverteilung: Während die ständige Belastung quasi auf der gesamten Plattenoberseite angreift, wirkt die zyklische Verkehrslast nur auf einer reduzierten Verteilbreite, die sich aus der Lastverteilung durch den Schotteroberbau ergibt (siehe Kapitel 4.4.2 Abbildung 4.23). Im Folgenden sollen diese Diskrepanzen gelöst werden.

5.3.2 Auswahl der zu verwendenden Arbeitslinie

Lit.: [34]

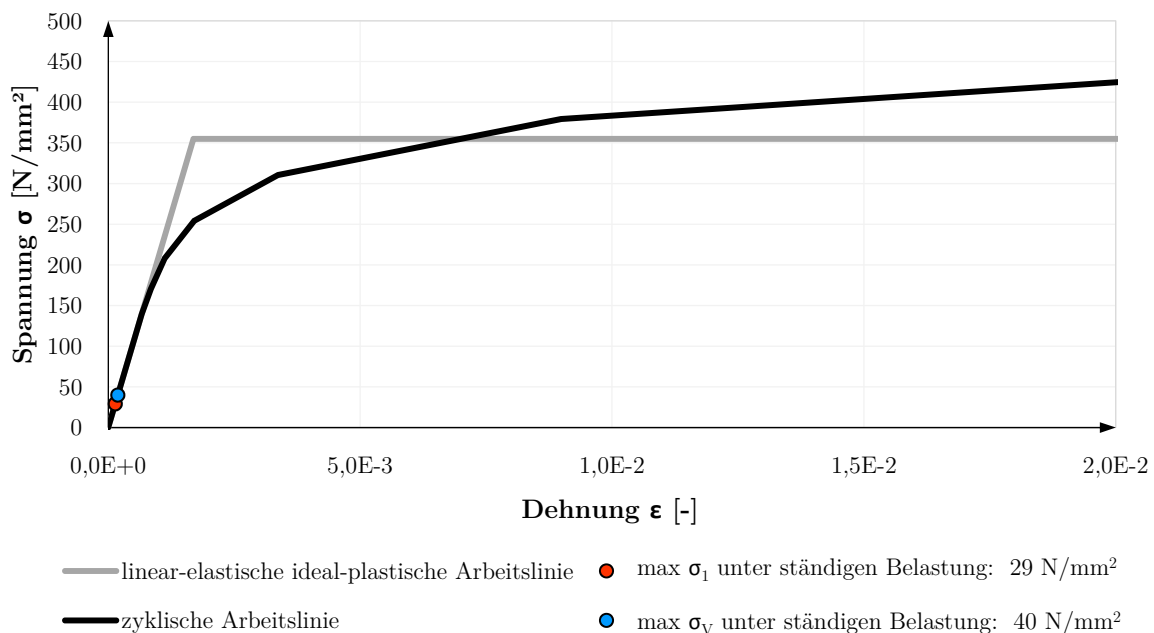


Abbildung 5.1: Vergleich der zyklischen und der statischen Arbeitslinie von Baustahl *S355*, Spannungsniveau in der Lochdübelleiste unter ständiger Belastung, Modell: *TYP 10*

Eine Auswertung des Spannungs-Dehnungsverlaufes für die maximal beanspruchte Stelle – maximale Hauptzug- und Vergleichsspannung, σ_1 bzw. σ_V (kritische Elemente A und F in Dübel 2) – der Lochdübelleiste infolge ständiger Belastung hat ergeben, dass die jeweiligen Spannungen im linear-elastischen Bereich der beiden Arbeitslinien liegen, siehe Abbildung 5.1. Dies bedeutet, dass sowohl für die zyklische als auch für die ständige Belastung eine einheitliche Arbeitslinie, nämlich die zyklische, verwendet werden kann.

5.3.3 Methodik zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsfläche

Lit.: [34]

Aus dem Grund der unterschiedlichen Belastungsfläche von ständiger bzw. zyklischer Belastung ist die Tragwirkung unter der jeweiligen Belastung und damit die Lage der höchstbeanspruchten Stelle auch anders. Um den Zusammenhang zwischen der äußerlich aufgebrachten zyklischen Belastung und der maßgebenden Kerbbeanspruchung bestimmen zu können, werden die Erstbelastungskurven (P - ε , σ - ε) für die jeweiligen Belastungen (ständiger bzw. zyklischer Teil) aufgeteilt, siehe Kapitel 5.4, Abbildung 5.2. Nach Ermittlung der Hystereseschleife anhand der Daten des zyklischen Teils, müssen die zwei Teile zusammengeführt, und auf diese Weise die Eingangsdaten für die nachfolgende Schädigungsberechnung ermittelt werden.

5.3.4 Ansätze der Lebensdauerberechnung

Lit.: [34]

Die rechnerische Lebensdauer eines Bauteils wird von einigen Parametern beeinflusst. Die wesentlichen Einflussgrößen nach Gl. 3.3 bis 3.6 sind zunächst die Spannungsamplitude σ_a , die Dehnungsamplitude ε_a und die Mittelspannung σ_m , sowie die Oberflächenrauigkeit κ . In dieser Arbeit werden die Einflüsse mehrachsiger Spannungs- und Dehnungszustände zur Beschreibung der Anstrengung des Materials über zwei Anstrengungshypothesen [15] berücksichtigt: Die zuvor definierten Einflussgrößen werden nicht nur auf Basis des Versagenskriteriums nach *Rankine*, gemäß der maximalen Hauptspannung σ_1 , sondern auch basierend auf dem Versagenskriterium nach *von Mises*, gemäß der Vergleichsspannung σ_V , das für Ermüdungsuntersuchungen begründbar angewendet werden kann [17], ermittelt. Tabelle 5.4 zeigt fünf unterschiedliche Betrachtungsniveaus (Methode M1 bis Methode M5), jeweils für die beiden Anstrengungshypothesen, für die Berechnung der Schwingspielzahl bis zum Anriss.

Tabelle 5.4 Ansätze der Lebensdauerberechnung

| Ansätze | | Versagenshypothese nach <i>Rankine</i> | Versagenshypothese nach <i>von Mises</i> |
|-------------------|--|---|---|
| <i>Methode M1</i> | reine Wechselbelastung ($R = -1$) | $N_{\sigma 1}$ | $N_{\sigma V}$ |
| <i>Methode M2</i> | + Mittelspannungseinfluss | $N_{PSWT, \sigma 1}$ | $N_{PSWT, \sigma V}$ |
| <i>Methode M3</i> | + Oberflächenrauigkeit | $N_{PSWT, \kappa, \sigma 1}$ | $N_{PSWT, \kappa, \sigma V}$ |
| <i>Methode M4</i> | + Überlebenswahrscheinlichkeit | $N_{PSWT, \kappa, P_{\ddot{u}}97.5, \sigma 1}$ | $N_{PSWT, \kappa, P_{\ddot{u}}97.5, \sigma V}$ |
| <i>Methode M5</i> | + widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert | $N_{PSWT, \kappa, P_{\ddot{u}}97.5, \gamma_{Mf}, \sigma 1}$ | $N_{PSWT, \kappa, P_{\ddot{u}}97.5, \gamma_{Mf}, \sigma V}$ |

Zuerst werden die Verkehrslastzyklen als reine Wechselbeanspruchung ($R = -1$) ohne Berücksichtigung des Einflusses der Mittelspannung σ_m betrachtet (*Methode M1*). Diese Methode führt zu der in Abbildung 5.24, oben rechts liegenden Wöhlerlinie $\Delta P - N_{\sigma 1}$. Die Schar der beiden darunterliegenden Wöhlerlinien berücksichtigen zusätzlich der Reihe nach folgende Effekte: Einfluss der Mittelspannung σ_m auf Basis des Schädigungsparameters P_{SWT} nach Gl. 3.3 bis 3.6 (*Methode M2*, Verlauf $\Delta P - N_{PSWT, \sigma 1}$), zusätzlicher Einfluss der Oberflächenrauigkeit κ (*Methode M3*, Verlauf $\Delta P - N_{PSWT, \kappa, \sigma 1}$) [34]. Mit den beiden nachfolgenden Kurvenscharen wird zusätzlich die Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}} = 97,5\%$ (*Methode M4*, Verlauf $\Delta P - N_{PSWT, \kappa, P_{\ddot{u}}97.5, \sigma 1}$) sowie der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mf} = 1,35$ (*Methode M5*, Verlauf $\Delta P - N_{PSWT, \kappa, P_{\ddot{u}}97.5, \gamma_{Mf}, \sigma 1}$) berücksichtigt. Da die zyklischen Materialkennwerte des *Uniform Material Law* [15] nach Tabelle 3.1 auf der Grundlage von Mittelwerten definiert wurden, entsteht der Bedarf nach Umrechnung dieser Daten nach [15] für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\ddot{u}} = 97,5\%$ über den Faktor $T_{P97.5\%}$. Letztlich ist zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der widerstandsseitige Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} noch zu berücksichtigen. Tabelle 5.5 enthält die angewendeten Faktoren. Die genaue Beschreibung der einzelnen Vorgehensweisen erfolgt in Kapitel 5.5, 5.8, 5.9 und 5.10.

Tabelle 5.5 Widerstandsseitige Faktoren für die Methode M4 und M5

| | | |
|--|---------------|--------------------|
| Oberflächenfaktor | κ | 0.80 ¹⁾ |
| Faktor für $P_{\ddot{u}} = 97,5\%$ | $T_{P97.5\%}$ | 0.71 |
| widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert | γ_{Mf} | 1.35 ²⁾ |

¹⁾ für Baustahl S355

²⁾ Konzept der sicheren Lebensdauer (Betondübel nicht inspizierbar) mit hoher Schadensfolge nach Tabelle 5.19 in Kapitel 5.10

5.4 Ermittlung der zutreffenden Hystereseschleife

5.4.1 Einleitung

Die Lebensdauerberechnung der SCSC-Platte nach dem Kerbdehnungskonzept soll zunächst schrittweise und nachvollziehbar beschrieben werden. Die Erklärung wird beispielsweise für ein Lastniveau von $1,0 \cdot LM71 \square \square$ durchgeführt, wofür anhand Tabelle 5.2 die Belastungsschwingbreite $\Delta P = 156 [kN/m]$ und die Belastungsamplitude $P_a = 78 [kN/m]$ betragen.

Grundlegend ist die *Masing-Hypothese*, die besagt, dass die Form des Hysterese-Astes sich aus der im Verhältnis 2:1 vergrößerten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve ergibt [15] (vgl. Kapitel 3.7, Abbildung 3.18). Mathematisch ausgedrückt: Skalierung der Funktion $y = f(x)$ mit dem Faktor 2, die zum Ausdruck $y = 2 f\left(\frac{x}{2}\right)$ führt. Die Anwendung der Vorgehensweise auf die Erstbelastungskurve $P - \varepsilon$ resultiert in Gl. 5.3:

$$\varepsilon = f(P) \quad \xrightarrow[\text{Faktor } 2]{\text{Skalierung}} \quad \Delta\varepsilon = 2 f\left(\frac{\Delta P}{2}\right) \quad 5.2$$

$$\text{da} \quad \frac{\Delta P}{2} = P_a \quad \rightarrow \quad \Delta\varepsilon = 2 f(P_a) \quad 5.3$$

Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung: Es wird jene Dehnungsamplitude ε_a benötigt, die der Kraftamplitude $P_a = \frac{\Delta P}{2}$ zuzuordnen ist, da die Verdopplung dieser Dehnungsamplitude ε_a in einer Dehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon$ resultiert, die innerhalb eines Schwingspiels mit einer Lastschwingbreite ΔP auftritt.

Die angeführten Analogien gelten auch für die Beziehung $\sigma - P$:

$$\sigma = f(P) \quad \xrightarrow[\text{Faktor } 2]{\text{Skalierung}} \quad \Delta\sigma = 2 f\left(\frac{\Delta P}{2}\right) \quad 5.4$$

$$\text{da} \quad \frac{\Delta P}{2} = P_a \quad \rightarrow \quad \Delta\sigma = 2 f(P_a) \quad 5.5$$

In den nachfolgenden Abbildungen wird die Vorgehensweise veranschaulicht.

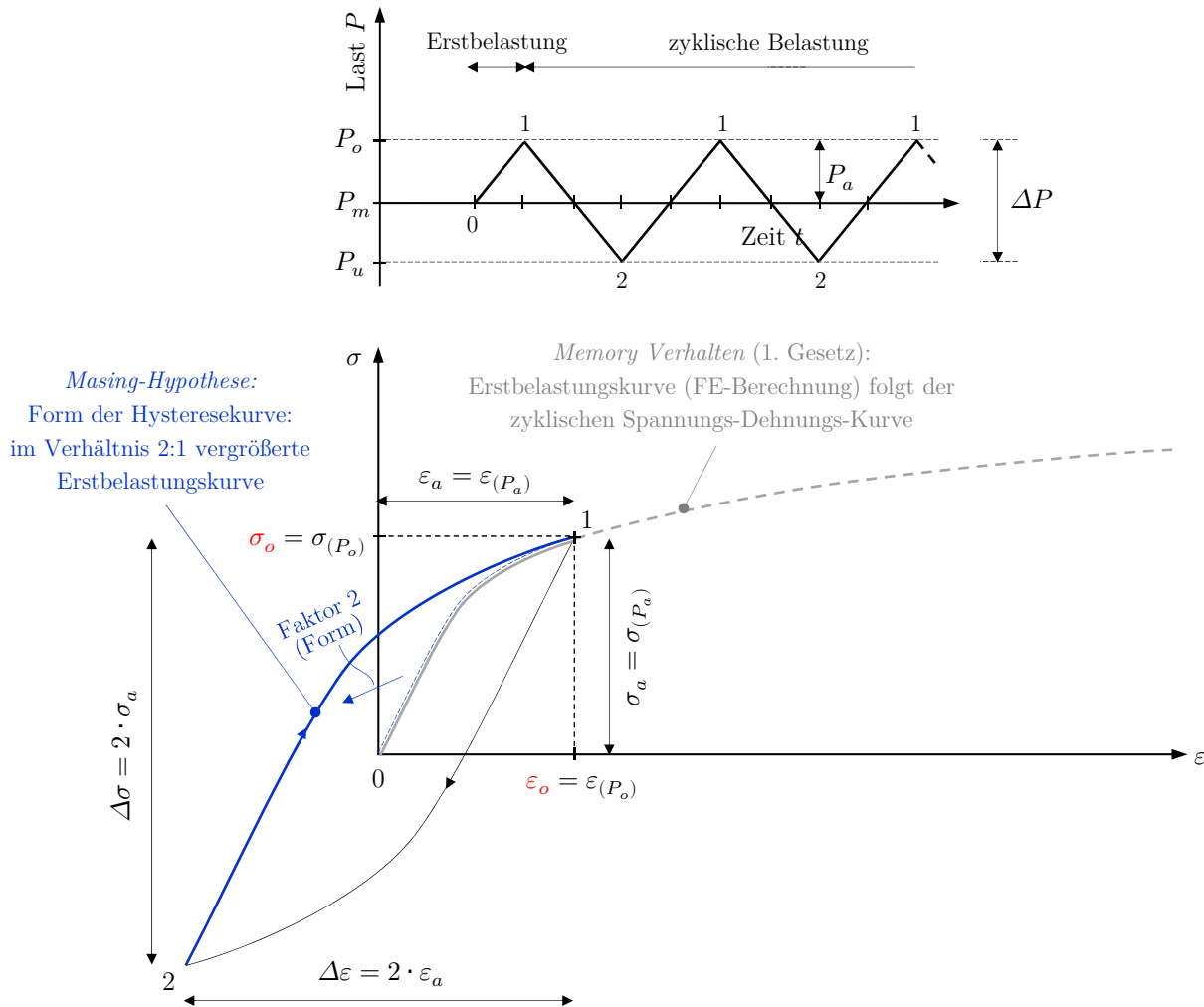


Abbildung 5.2: Anwendung der *Masing-Hypothese* [38] und des *Memory Verhaltens* [40] bei reiner Wechselbeanspruchung ($R = -1, P_m = 0$); Teilbild oben: Zeit-Last-Verlauf $t - P$, Teilbild unten: Spannungs-Dehnungs-Diagramm $\sigma - \epsilon$

Abbildung 5.2 stellt die Vorgehensweise bei reiner Wechselbeanspruchung ($R = -1, P_m = 0$) dar. Das Ergebnis der FE-Berechnung ist die Erstbelastungskurve (grauer Verlauf). Der Verlauf der Kurve ist im Fall des Vergleichsspannungs-Vergleichsdehnungs-Diagrammes $\sigma_V - \epsilon_V$ identisch mit der in *ABAQUS* als Materialgesetz angegebenen zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve. Nach dem ersten Gesetz des *Memory-Verhaltens* (s. Abbildung 3.19) folgt die Erstbelastung (Pfad 0-1) der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve bis zur Oberlast P_o . Bei anschließender Belastungsumkehr verläuft der Spannungs-Dehnungs-Pfad nach der *Masing-Hypothese* (s. Abbildung 3.18) weiter auf der in Spannungen und Dehnungen verdoppelten Erstbelastungskurve (Pfad 1-2, Pfad 2-1, Pfad 1-2 usw.). Der mit blauer Farbe hervorgehobene Teil der Erstbelastungskurve (Pfad 0-1) wird zur Ermittlung des blauen Hystereseastes (Pfad 2-1) verdoppelt. Der schwarze Hystereseast (Pfad 1-2) ergibt sich durch Drehung des blauen Hystereseastes (Pfad 2-1) um 180 Grad um den Nullpunkt.

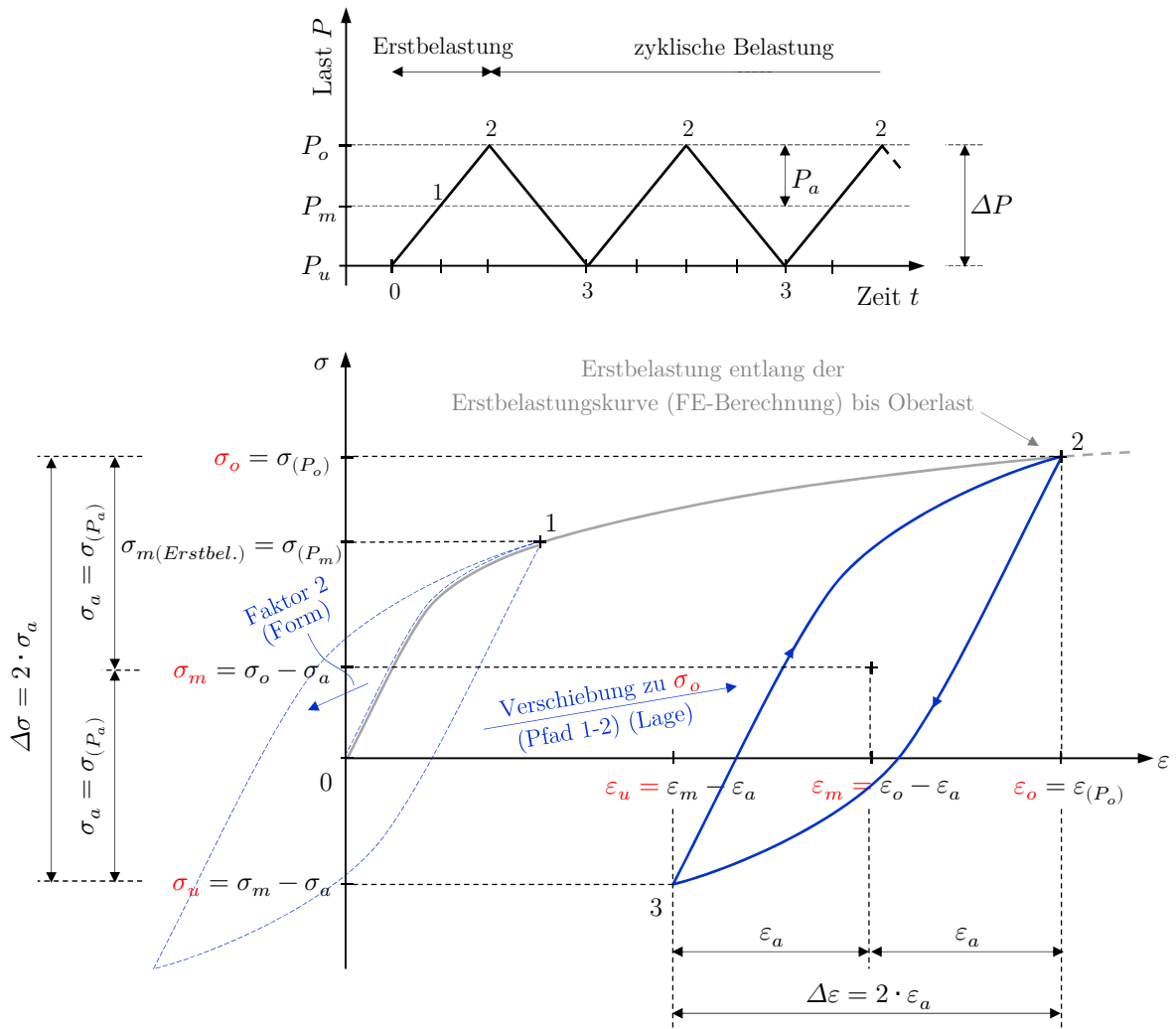


Abbildung 5.3: Anwendung der *Masing-Hypothese* [38] und des *Memory Verhaltens* [40] bei reiner Schwellbeanspruchung ($R = 0, P_m = P_a$);
 Teilbild oben: Zeit-Last-Verlauf $t - P$,
 Teilbild unten: Spannungs-Dehnungs-Diagramm $\sigma - \varepsilon$

Abbildung 5.3 veranschaulicht die Vorgehensweise bei reiner Schwellbeanspruchung ($R = 0, P_m = P_a$). Die Erstbelastung (Pfad 0-1-2) folgt nach dem ersten Gesetz des *Memory-Verhaltens* (s. Abbildung 3.19) wieder der Erstbelastungskurve bis zur Oberlast P_o . Die Form der Hystereseschleife ändert sich nicht durch die Berücksichtigung der Mittellast P_m , sondern nur ihre Lage. Sie erhält man nach Verschiebung der (vorher) ermittelten Hysteresekurve (auf Basis des Pfades 0-1 der Erstbelastungskurve durch „Verdopplung“) entlang des Erstbelastungspfades bis σ_o (Pfad 1-2). Bei Entlastung verläuft dann der Spannungs-Dehnungs-Pfad auf dem anschließenden (unteren) Hystereseseast zu Punkt 3 und bei Wiederbelastung verläuft der Spannungs-Dehnungs-Pfad zurück zu Punkt 2. Nach Ermittlung der Lage der Hysteresekurve können die Mittelspannung σ_m und die Mitteldehnung ε_m bzw. die Unterspannung σ_u und die Unterdehnung ε_u abgelesen werden.

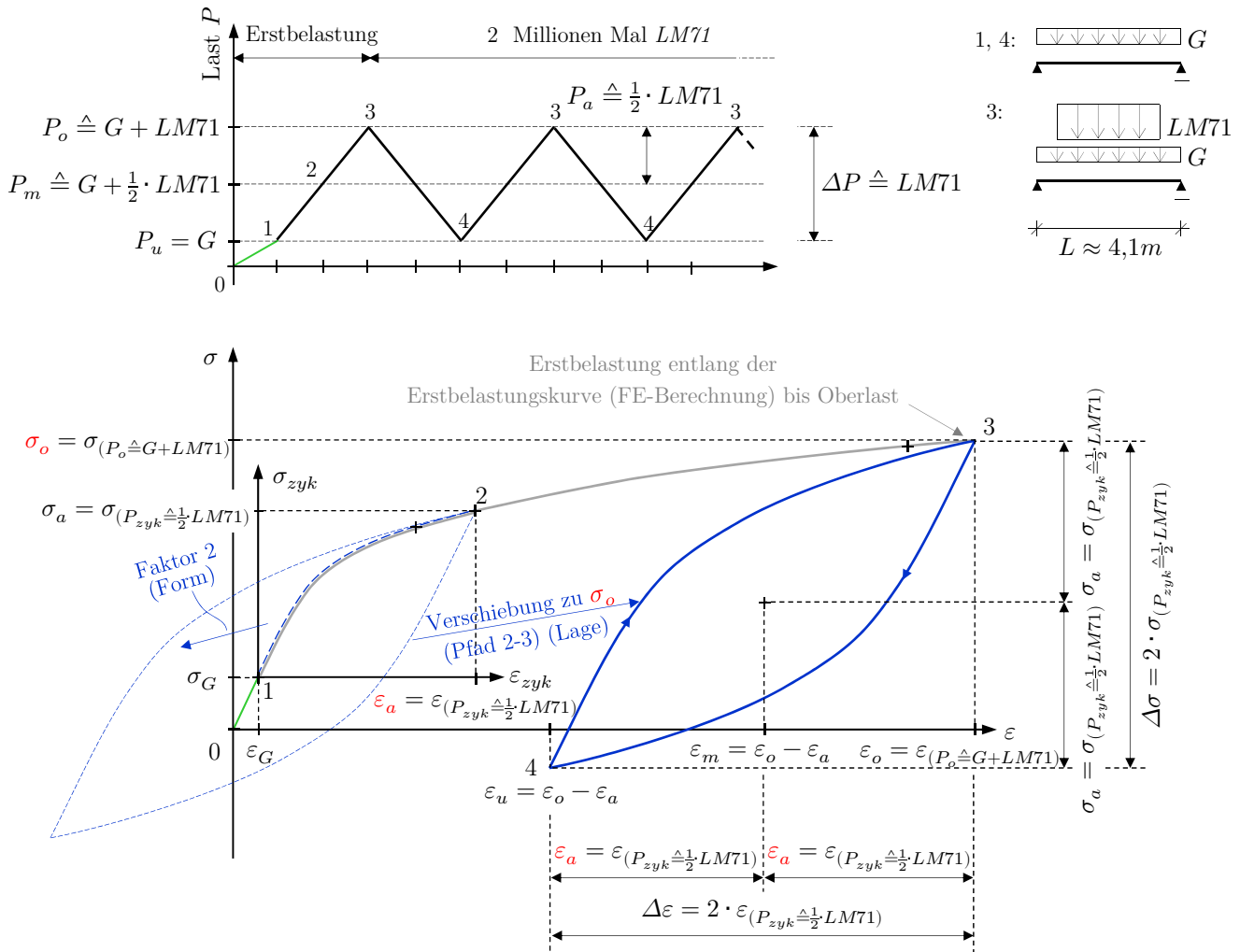


Abbildung 5.4: Anwendung der *Masing-Hypothese* [38] und des *Memory Verhaltens* [40] für die SCSC-Platte mit ständiger Belastung G und Verkehrslast $LM71$ ($0 < R < 1, P_m = G + \frac{1}{2} LM71$);
 Teilbild oben: Zeit-Last-Verlauf $t - P$,
 Teilbild unten: Spannungs-Dehnungs-Diagramm $\sigma - \epsilon$

Abbildung 5.4 zeigt die Vorgehensweise für den konkreten Fall der SCSC-Platte mit ständiger Belastung G und Verkehrslast $LM71$ ($0 < R < 1, P_m \triangleq G + \frac{1}{2} LM71$). Für die Erstbelastung (Pfad 0-1-2-3) gilt wieder die Erstbelastungskurve bis zur Oberlast $P_o \triangleq G + LM71$. Die Form der Hystereseschleife ergibt sich durch Verdopplung des Pfades 1-2 der Erstbelastungskurve. Durch Verschiebung der so erhaltenen Hysteresekurve entlang des Erstbelastungspfad bis σ_o (Pfad 2-3) erhält man ihre Lage. Bei nachfolgender Entlastung folgt der Spannungs-Dehnungs-Pfad dem anschließenden (unteren) Hystereseseast zu Punkt 4 und bei Wiederbelastung läuft der Pfad zurück zu Punkt 3. Die mit roter Farbe hervorgehobene Oberspannung σ_o und Dehnungsamplitude ϵ_a sind die für die Lebensdauerberechnung relevanten Werte. Sie sind die Eingangsgrößen der Schädigungsbewertung nach *Smith, Watson und Topper* [36], siehe Gl. 3.22.

5.4.2 Beschreibung der Vorgehensweise für ein kritisches Element

Zunächst werden aus den in Kapitel 5.3.3 beschriebenen Gründen (unterschiedliche Lastwirkung aus Eigengewicht und Verkehrslast) die Erstbelastungspfade für ein kritisches Element aufgeteilt, siehe Abbildung 5.5.

Schritt 1: Aufteilung der vier Erstbelastungspfade ($P - \varepsilon_1$, $P - \varepsilon_V$ bzw. $\sigma_1 - \varepsilon_1$, $\sigma_V - \varepsilon_V$) in ständige und zyklische Teile

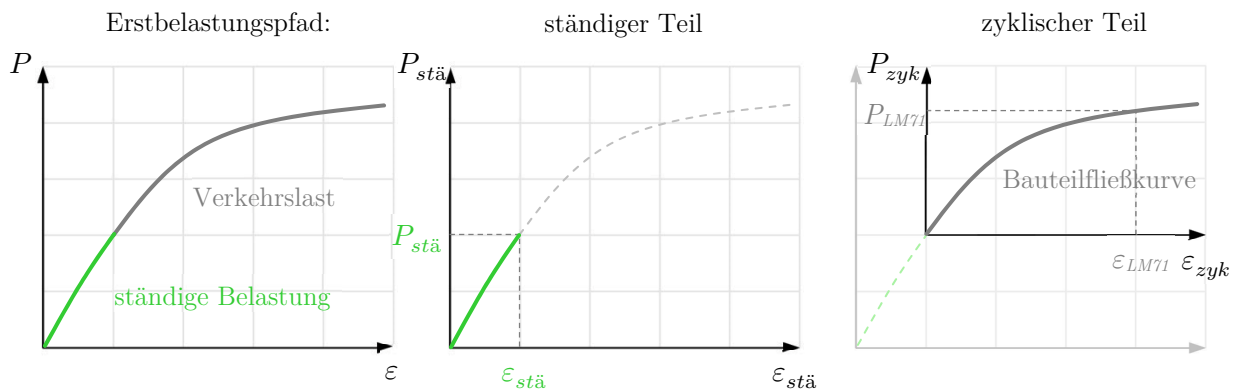


Abbildung 5.5: Aufteilung der Erstbelastungspfade

Die in Abbildung 5.5 angeführten Bezeichnungen sind nicht speziell für Hauptzugdehnungen oder Vergleichsdehnungen spezifiziert, sie gelten aber sinngemäß für beides. Es wurde nur der Zusammenhang $P - \varepsilon$ dargestellt, analoges gilt für die Verläufe $\sigma - \varepsilon$.

Die vorliegenden Ergebnisdaten nach der Aufteilung sind in Tabelle 5.6 und Tabelle 5.7 schematisch dargestellt.

Tabelle 5.6 Erhaltene Ergebnisdaten des Erstbelastungspfades - ständiger Teil

| Berechnungs- schritt im <i>ABAQUS</i> | Ständige Belastung $P_{stä}$ [kN/m ²] | Hauptzug- dehnung $\varepsilon_{1,stä}$ [-] | Hauptzug- spannung $\sigma_{1,stä}$ [N/mm ²] | Vergleichs- dehnung $\varepsilon_{V,stä}$ [-] | Vergleichs- spannung $\sigma_{V,stä}$ [N/mm ²] |
|---|--|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| : | : | : | : | : | : |
| i | $P_{stä\ i}$ | $\varepsilon_{1,stä\ i}$ | $\sigma_{1,stä\ i}$ | $\varepsilon_{V,stä\ i}$ | $\sigma_{V,stä\ i}$ |
| i+1 | $P_{stä\ i+1}$ | $\varepsilon_{1,stä\ i+1}$ | $\sigma_{1,stä\ i+1}$ | $\varepsilon_{V,stä\ i+1}$ | $\sigma_{V,stä\ i+1}$ |
| | | : | : | : | : |
| | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>Rankine</i> : A, B, C, D, E | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>von Mises</i> : F, G, H, I, J | |

Tabelle 5.7 Erhaltene Ergebnisdaten des Erstbelastungspfades - zyklischer Teil

| Berechnungs- schritt im <i>ABAQUS</i> | Verkehrslast P_{zyk} [kN/m ²] | Hauptzug- dehnung $\varepsilon_{1,zyk}$ [-] | Hauptzug- spannung $\sigma_{1,zyk}$ [N/mm ²] | Vergleichs- dehnung $\varepsilon_{V,zyk}$ [-] | Vergleichs- spannung $\sigma_{V,zyk}$ [N/mm ²] |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| : | : | : | : | : | : |
| i | $P_{zyk\ i}$ | $\varepsilon_{1,zyk\ i}$ | $\sigma_{1,zyk\ i}$ | $\varepsilon_{V,zyk\ i}$ | $\sigma_{V,zyk\ i}$ |
| i+1 | $P_{zyk\ i+1}$ | $\varepsilon_{1,zyk\ i+1}$ | $\sigma_{1,zyk\ i+1}$ | $\varepsilon_{V,zyk\ i+1}$ | $\sigma_{V,zyk\ i+1}$ |
| | | : | : | : | : |
| | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>Rankine</i> : A, B, C, D, E | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>von Mises</i> : F, G, H, I, J | |

Schritt 2: Ermittlung der Dehnungsamplituden $\varepsilon_{1,a}$, $\varepsilon_{V,a}$ und der Spannungsamplituden $\sigma_{1,a}$, $\sigma_{V,a}$

Prinzipiell stehen hier zwei Methoden zur Verfügung [9]:

- Numerische Auswertung der Dehnungs- und Spannungsamplituden direkt aus den FE-Ergebnissen (siehe Abbildung 5.6);
- Numerische Auswertung der Spannungsamplituden und analytische Auswertung der Dehnungsamplituden anhand der zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (siehe Gl. 3.10 in Abschnitt 3.7; aus Gründen der Übersicht in Gl. 5.6 erneut angegeben)

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'} \quad 5.6$$

Die analytische Auswertung ist grundsätzlich nur für Vergleichsgrößen oder für Konstruktionsteile, die nur einaxialer Beanspruchung ausgesetzt werden, zielführend. Die numerische Auswertung ermöglicht aber die Ermittlung der Spannungs-Dehnungspfade sämtlicher Tensorkomponenten. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an [9] nur die numerische Auswertung verwendet.

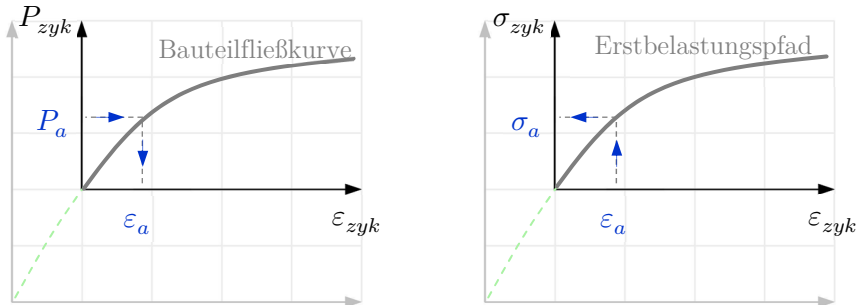


Abbildung 5.6: Ermittlung der Dehnungsamplituden ε_a auf Basis der Bauteilfließkurve (zyklischer Teil des Erstbelastungspfades $P_{zyk}-\varepsilon_{zyk}$) und der Spannungsamplitude σ_a mit Hilfe des zyklischen Erstbelastungspfades $\sigma_{zyk}-\varepsilon_{zyk}$.

Die genauen Werte bei den gesuchten Belastungsniveaus liegen nicht vor. Aus diesem Grund werden sie durch lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Lastniveaus der Erstbelastungskurve $P_{zyk\ i}$ und $P_{zyk\ i+1}$ gemäß Gl. 5.7 und Gl. 5.8 ermittelt. Diese Vorgehensweise ist für die Ermittlung von ε_a in Abbildung 5.7 dargestellt. Analoges gilt für die Ermittlung von σ_a .

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{zyk\ i} + \frac{\varepsilon_{zyk\ i+1} - \varepsilon_{zyk\ i}}{P_{zyk\ i+1} - P_{zyk\ i}} (P_a - P_{zyk\ i}) \quad 5.7$$

$$\sigma_a = \sigma_{zyk\ i} + \frac{\sigma_{zyk\ i+1} - \sigma_{zyk\ i}}{\varepsilon_{zyk\ i+1} - \varepsilon_{zyk\ i}} (\varepsilon_a - \varepsilon_{zyk\ i}) \quad 5.8$$

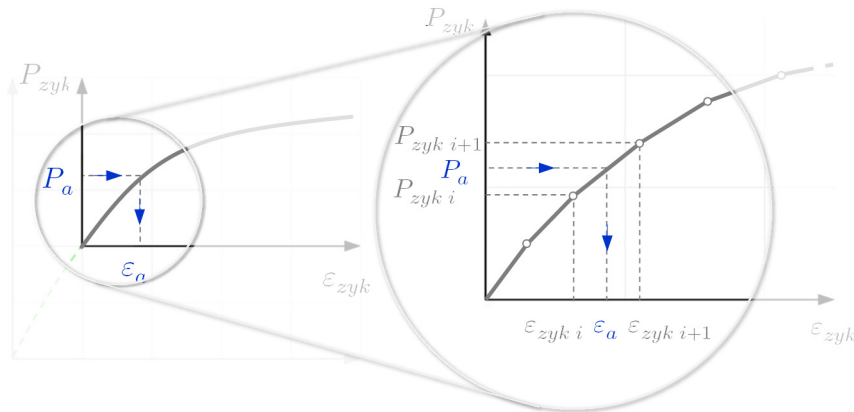


Abbildung 5.7: Ermittlung der Dehnungsamplitude ϵ_a auf Basis der Bauteilfließkurve, vergrößerte Darstellung

Schritt 3: Ermittlung der Form (nicht der Lage) eines Hystereseastes und Berechnung der Dehnungsschwingbreite $\Delta\epsilon_1, \Delta\epsilon_V$ und der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_V$

Aus den früher erwähnten Gründen (*Masing-Hypothese*, s. Gl. 5.7 in Kapitel 3.7 und Kapitel 5.4.1) ergeben sich die gesuchte Dehnungs- und Spannungsschwingbreite sofort mit der Verdopplung der Amplitudenwerte nach Gl. 5.9 und 5.10. Abbildung 5.8 veranschaulicht die Vorgehensweise anhand der Dehnungsschwingbreite $\Delta\epsilon$.

$$\Delta\epsilon = 2 \epsilon_a \tag{5.9}$$

$$\Delta\sigma = 2 \sigma_a \tag{5.10}$$

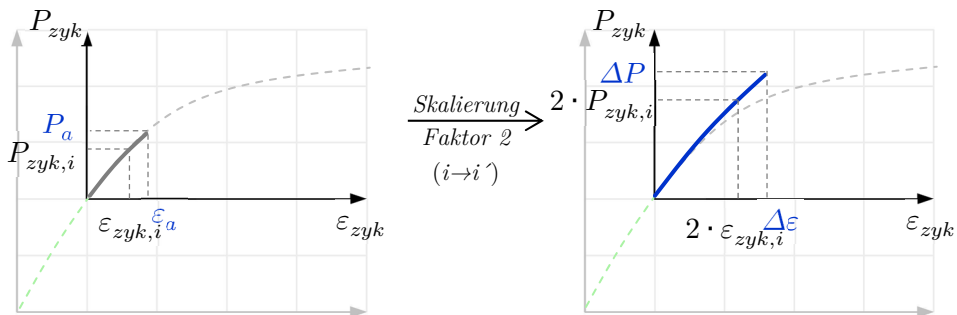


Abbildung 5.8: Ermittlung der Form eines Hystereseastes und Berechnung der Dehnungsschwingbreite $\Delta\epsilon$

Tabelle 5.8 Ermittlung des örtlichen Hauptzugdehnungs-Hauptzugspannungspfades

| Nr. | Belastungs- schwingbreite inf. Verkehrs-last LM71 ΔP [kN/m ²] | lin. Interp. | | | |
|-----|---|---|---|--|--|
| | | Hauptzug- dehnungs- amplitude $\varepsilon_{1,a}$ [-] | Hauptzug- dehnungs- schwingbreite $\Delta\varepsilon_1$ [-] | Hauptzug- spannungs- amplitude $\sigma_{1,a}$ [N/mm ²] | Hauptzug- spannungs- schwingbreite $\Delta\sigma_1$ [N/mm ²] |
| 0 | 0,0 · LM71□□ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 10 | 1,0 · LM71□□ | $\varepsilon_{1,a} 10$ | $\Delta\varepsilon_1 10$ | $\sigma_{1,a} 10$ | $\Delta\sigma_1 10$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 50 | 5,0 · LM71□□ | $\varepsilon_{1,a} 50$ | $\Delta\varepsilon_1 50$ | $\sigma_{1,a} 50$ | $\Delta\sigma_1 50$ |
| | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>Rankine</i> : A, B, C, D, E | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>von Mises</i> : F, G, H, I, J | |

Tabelle 5.9 Ermittlung des örtlichen Vergleichsdehnungs-Vergleichsspannungspfades

| Nr. | Belastungs- schwingbreite inf. Verkehrslast LM71 ΔP [kN/m ²] | lin. Interp. | | | |
|-----|--|---|---|--|--|
| | | Vergleichs- dehnungs- amplitude $\varepsilon_{V,a}$ [-] | Vergleichs- dehnungs- schwingbreite $\Delta\varepsilon_V$ [-] | Vergleichs- spannungs- amplitude $\sigma_{V,a}$ [N/mm ²] | Vergleichs- spannungs- schwingbreite $\Delta\sigma_V$ [N/mm ²] |
| 0 | 0,0 · LM71□□ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 10 | 1,0 · LM71□□ | $\varepsilon_{V,a} 10$ | $\Delta\varepsilon_V 10$ | $\sigma_{V,a} 10$ | $\Delta\sigma_V 10$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 50 | 5,0 · LM71□□ | $\varepsilon_{V,a} 50$ | $\Delta\varepsilon_V 50$ | $\sigma_{V,a} 50$ | $\Delta\sigma_V 50$ |
| | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>Rankine</i> : A, B, C, D, E | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>von Mises</i> : F, G, H, I, J | |

Nun liegen alle Angaben, die für eine mittelspannungsunabhängige Lebensdauerberechnung benötigt werden, für diskrete Belastungsschwingbreiten ΔP , vor. Sie sind in Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9 zusammengefasst. Jeder ausgewerteten Belastungsschwingbreite ΔP kann auf Basis der gewonnenen Daten die ertragbare Schwingspielzahl nach Gl. 3.20 bzw. Gl. 3.21 zugeordnet werden. Bevor mit der eigentlichen Lebensdauerberechnung nach dem Kerbdehnungskonzept begonnen wird, werden die Grundlagen für die Berücksichtigung der Einflüsse aus der Mittelspannung erläutert.

Schritt 4: Ermittlung der Lage der Last-Kerbdehnungshysteresen $P - \varepsilon_I$ und $P - \varepsilon_V$ bzw. der örtlichen Spannungs-Dehnungshysteresen $\sigma_I - \varepsilon_I$ und $\sigma_V - \varepsilon_V$.

Im Folgenden wird nun die Vorgehensweise zur Ermittlung der Lage Hystereseschleife detailliert beschrieben. Es sei darauf hingewiesen, dass die genauen Verläufe der Hystereseschleifen für die Lebensdauerberechnung nicht unbedingt bekannt sein müssen. Notwendig sind nur deren Kennwerte (Unter-, Mittel-, Oberwert der Dehnungen bzw. der Spannungen) - anders ausgedrückt: die Lage ihrer Umkehrpunkte auf den Diagrammen. Der Vollständigkeit halber und zum Zwecke der Veranschaulichung der Berechnungsmethode und die daraus resultierenden Ergebnisse, werden im Zuge dieser Arbeit die Verläufe der Schleifen vollständig ermittelt.

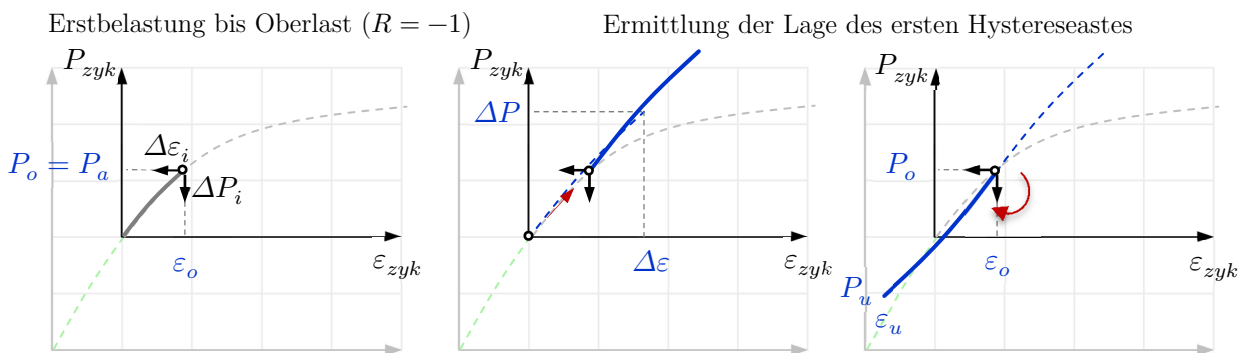


Abbildung 5.9: Ermittlung der Lage des ersten Hystereseastes

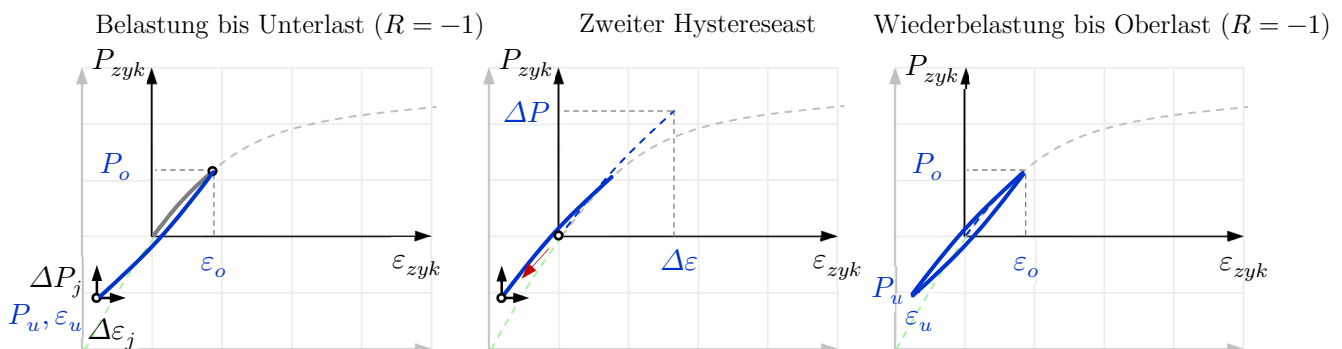


Abbildung 5.10: Ermittlung der Lage des zweiten Hystereseastes

Aufgrund der *Masing-Hypothese* folgt jeder Hystereseast dem in Spannungen und Dehnungen verdoppelten Erstbelastungspfad. Die Formen der Hystereseäste werden somit mit der Verdopplung der Erstbelastungspfade aus dem vorherigen Schritt ermittelt.

Die Beanspruchung wird zuerst, wie früher erwähnt, als reine Wechselbeanspruchung ($R = -1$) betrachtet. Anhand Tabelle 5.2 betragen in diesem Fall die Unterlast $P_u = -78 \text{ [kN/m]}$ und die Oberlast $P_o = 78 \text{ [kN/m]}$. Die Belastung erfolgt zunächst entlang der Erstbelastungskurve bis zur Oberlast (s. Abbildung 5.9, Teilbild links), wo eine Belastungsumkehr stattfindet. In diesem Umkehrpunkt wird mit einem neuen $\Delta\sigma_i - \Delta\varepsilon_i$ -Koordinatensystem begonnen. Der bereits ermittelte Hystereseast muss also zum Umkehrpunkt verschoben (Teilbild Mitte) und um 180 Grad gedreht werden (Teilbild rechts). Dieser endet bei Erreichen der Unterlast P_u / Unterdehnung ε_u / Unterspannung σ_u . Die Wiederbelastung erfolgt ausgehend vom $\Delta\sigma_j - \Delta\varepsilon_j$ -Koordinatensystem (s. Abbildung 5.10, Teilbild links) und läuft entlang eines verschobenen Hystereseastes (Teilbild Mitte und rechts). Es wurde wieder nur der Zusammenhang $P - \varepsilon$ dargestellt, analoges gilt für die Hystereseschleife $\sigma - \varepsilon$ (sowohl nach *Rankine* bzw. nach *von Mises*).

Schritt 5: Berücksichtigung der Mittellast infolge zyklischer Belastung

Nach Ermittlung der Form der Hystereseschleifen anhand des Beispiels einer Wechselbeanspruchung ist als nächster Schritt der Mittelspannungseinfluss zu berücksichtigen. Mit anderen Worten sind die Mitteldehnung ε_m und die Mittelspannung σ_m zu ermitteln. Dabei ist die folgende Vorgehensweise zu beachten. Da die Erstbelastung in jedem Fall entlang der Erstbelastungskurve bis Oberlast erfolgt, sind zuerst die Oberwerte (Oberdehnung ε_o und Oberspannung σ_o) zu ermitteln, siehe Abbildung 5.11, Teilbild Mitte. Dies geschieht abermals durch lineare Interpolation gemäß Abbildung 5.7. Die gesuchten Werte erhält man nach Abzug der Dehnungsamplitude ε_a bzw. der Spannungsamplitude σ_a von der Oberdehnung ε_o bzw. Oberspannung σ_o , siehe Gl. 5.11 bis 5.14. Die so berechneten Dehnungswerte sind in Tabelle 5.10 und Tabelle 5.11 zusammengefasst. Die dargestellten Prinzipien gelten auch für die Ermittlung der Spannungs-Dehnungshysterese ($R = 0$). Die Form der Hystereseschleife ändert sich durch die Berücksichtigung der Mittellast nicht, nur ihre Lage, siehe Abbildung 5.11, Teilbild rechts.

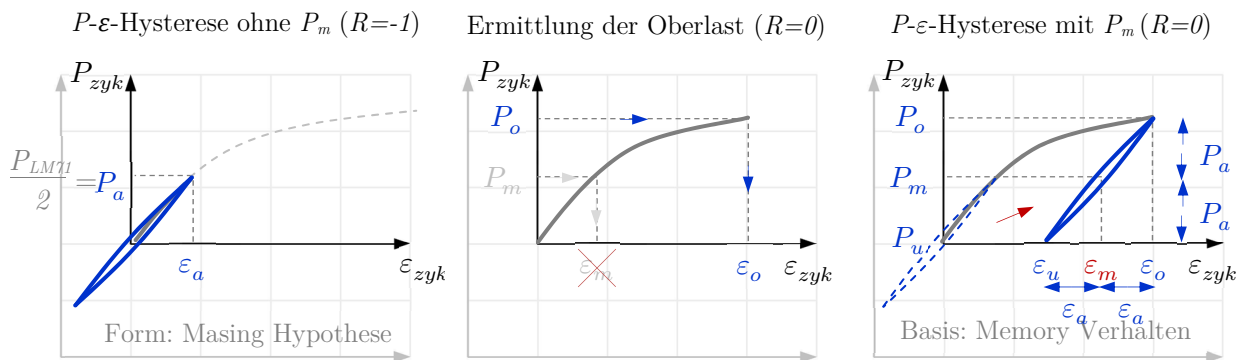


Abbildung 5.11: Berücksichtigung der Mittellast infolge zyklischer Belastung

$$\varepsilon_m (R=0) = \varepsilon_o (R=0) - \varepsilon_a (R=0) \quad 5.11$$

$$\varepsilon_u (R=0) = \varepsilon_m (R=0) - \varepsilon_a (R=0) \quad 5.12$$

$$\sigma_m (R=0) = \sigma_o (R=0) - \sigma_a (R=0) \quad 5.13$$

$$\sigma_u (R=0) = \sigma_m (R=0) - \sigma_a (R=0) \quad 5.14$$

Tabelle 5.10 Kennwerte der P - ε_1 -Hysterese (R=0)

| Nr. | Belastungsschwingbreite inf. Verkehrslast LM71 ΔP [kN/m ²] | Hauptzugdehnungsamplitude $\varepsilon_{1,a}$ [-] | Hauptzugdehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon_1$ [-] | lin. Interp. | | |
|-----|--|---|---|--|---|---|
| | | | | Unterdehnung $\varepsilon_{1,u}$ [-] | Mitteldehnung $\varepsilon_{1,m}$ [-] | Oberdehnung $\varepsilon_{1,o}$ [-] |
| 0 | $0,0 \cdot LM71 \square \square$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 10 | $1,0 \cdot LM71 \square \square$ | $\varepsilon_{1,a \ 10}$ | $\Delta\varepsilon_{1 \ 10}$ | $\varepsilon_{1,u \ 10}$ | $\varepsilon_{1,m \ 10}$ | $\varepsilon_{1,o \ 10}$ |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 50 | $5,0 \cdot LM71 \square \square$ | $\varepsilon_{1,a \ 50}$ | $\Delta\varepsilon_{1 \ 50}$ | $\varepsilon_{1,u \ 50}$ | $\varepsilon_{1,m \ 50}$ | $\varepsilon_{1,o \ 50}$ |

für alle 5 kritische Elemente nach *Rankine*: A, B, C, D, E

Tabelle 5.11 Kennwerte der P - ε_V -Hysterese (R=0)

| Nr. | Belastungsschwingbreite inf. Verkehrslast LM71 ΔP [kN/m ²] | Vergleichsdehnungsamplitude $\varepsilon_{V,a}$ [-] | Vergleichsdehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon_V$ [-] | lin. Interp. | | |
|-----|--|---|---|--|---|---|
| | | | | Unterdehnung $\varepsilon_{V,u}$ [-] | Mitteldehnung $\varepsilon_{V,m}$ [-] | Oberdehnung $\varepsilon_{V,o}$ [-] |
| 0 | $0,0 \cdot LM71 \square \square$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 10 | $1,0 \cdot LM71 \square \square$ | $\varepsilon_{V,a \ 10}$ | $\Delta\varepsilon_{V \ 10}$ | $\varepsilon_{V,u \ 10}$ | $\varepsilon_{V,m \ 10}$ | $\varepsilon_{V,o \ 10}$ |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 50 | $5,0 \cdot LM71 \square \square$ | $\varepsilon_{V,a \ 50}$ | $\Delta\varepsilon_{V \ 50}$ | $\varepsilon_{V,u \ 50}$ | $\varepsilon_{V,m \ 50}$ | $\varepsilon_{V,o \ 50}$ |

für alle 5 kritische Elemente nach *von Mises*: F, G, H, I, J

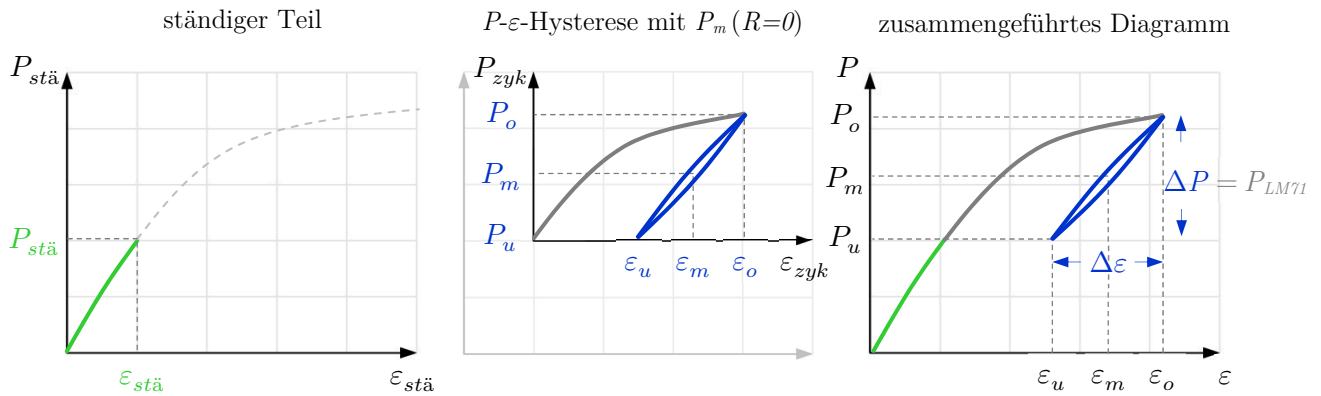
Schritt 6: Berücksichtigung der Mittellast infolge ständiger Belastung

Abbildung 5.12: Berücksichtigung der Mittellast infolge ständiger Belastung

$$P_o = P_{st\ddot{a}} + P_o (R=0) \quad 5.15$$

$$P_m = P_{st\ddot{a}} + P_m (R=0) \quad 5.16$$

$$P_u = P_{st\ddot{a}} + P_u (R=0) \quad 5.17$$

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{st\ddot{a}} + \varepsilon_o (R=0) \quad 5.18$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{st\ddot{a}} + \varepsilon_m (R=0) \quad 5.19$$

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{st\ddot{a}} + \varepsilon_u (R=0) \quad 5.20$$

$$\sigma_o = \sigma_{st\ddot{a}} + \sigma_o (R=0) \quad 5.21$$

$$\sigma_m = \sigma_{st\ddot{a}} + \sigma_m (R=0) \quad 5.22$$

$$\sigma_u = \sigma_{st\ddot{a}} + \sigma_u (R=0) \quad 5.23$$

Um den Anteil der ständigen Belastung zu berücksichtigen, müssen nun die einzelnen Diagrammteile zusammengeführt werden, siehe Abbildung 5.12. So erhält man alle notwendigen Eingangsgrößen zu einer mittelspannungsabhängigen Lebensdauerberechnung nach dem Kerbdehnungskonzept (siehe Abschnitt 3.7, Gl. 3.25).

Zusammenfassung der Vorgehensweise zur Ermittlung der Hystereseschleifen und der Eingangswerte zur Schädigungsbewertung eines kritischen Elementes [34]:

Aus dem Grund unterschiedlicher Belastungsflächen von ständigen bzw. zyklischen Belastung werden die Pfade der Bauteilarbeitslinien (P - ε , σ - ε) für die jeweiligen Belastungen aufgeteilt, siehe Abbildung 5.13 oben (hier nur der Zusammenhang P - ε dargestellt, analoges gilt für den Verlauf σ - ε , sowohl nach *Rankine* bzw. nach *von Mises*).

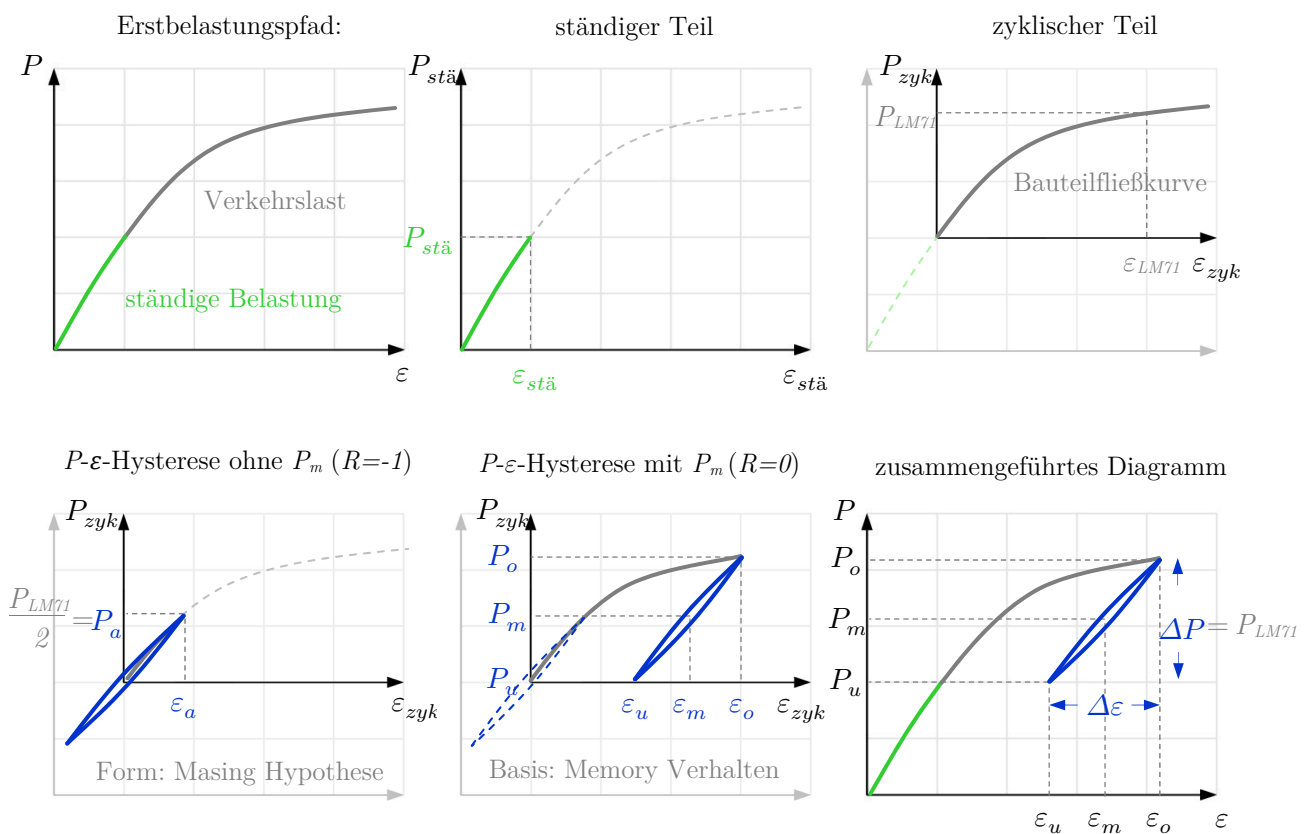


Abbildung 5.13: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Ermittlung der Hystereseschleife und der Eingangsdaten σ_a (P_a), ε_a , und σ_m (P_m) für die Lebensdauerberechnung für ein kritisches Element

Anhand der Bauteilfließkurve (zyklischer Anteil des P - ε -Pfades, nach Abbildung 5.13 oben, Teilbild rechts) wird für einen Belastungszyklus ($LM71$) die Hystereseschleife mit den beiden Eingangsdaten σ_a (P_a) und ε_a für die Schädigungsparameter P_{SWT} nach Gl. 3.7 bestimmt, siehe Abbildung 5.13, unten, Teilbild links. Die Mittelspannung σ_m (P_m) wird nach Transformation der Hystereseschleife in den Last-Dehnungs-Verlauf (P - ε), resultierend aus ständiger Belastung und zyklischer Verkehrslast ($LM71$), ermittelt, siehe Abbildung 5.13 unten, Teilbild rechts [34].

5.4.3 Ergebnisdarstellung anhand des Modells *TYP 10*

Die in der folgenden Diagrammen (Abbildung 5.14 - Abbildung 5.23) dargestellten Funktionsverläufe entsprechen den in Kapitel 5.6 erläuterten, aus den meist geschädigten Elementen (Elemente mit höchsten P_{SWT,σ_1} bzw. P_{SWT,σ_V} Wert pro Lastniveau) gebildeten Einhüllenden ($P-\varepsilon_1$ und $\sigma_1-\varepsilon_1$ bzw. $P-\varepsilon_V$ und $\sigma_V-\varepsilon_V$), die somit alle kritischen Kerbstellen der Lochdübelleiste umfassen.

Abbildung 5.14 stellt die im Verlauf der Laststeigerung in der maßgebenden Bauteilkerbe auftretende einhüllende Bauteilfließkurve ($P_{zyk}-\varepsilon_{1,zyk}$ -Pfad) und den örtlichen Hauptzugspannungs-Dehnungspfad ($\sigma_{1,zyk}-\varepsilon_{1,zyk}$ -Pfad) dar. Sie entsprechen den zyklischen Teilen der Erstbelastungskurven, beschrieben im Schritt 1 nach Kapitel 5.4.2. Abbildung 5.15 veranschaulicht die dazu analogen Verläufe, jedoch mit den Vergleichswerten nach *von Mises*. In den Abbildungen sind die Lastamplitudenwerte der vier Belastungsniveaus infolge Verkehrslast (siehe Tabelle 4.8 in Kapitel 4.4.2) gekennzeichnet, die im Schritt 2 nach Kapitel 5.4.2 ermittelt wurden. Die Hystereseschleifen ergeben sich durch Skalierung der Abszissenwerte und Ordinatenwerte um den Faktor 2 gemäß Schritt 3 nach Kapitel 5.4.2 (s. Abbildung 5.8).

Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17 stellen nochmals die zyklischen Teile der Erstbelastungskurven dar, jedoch mit der Kennzeichnung der Lastschwingbreite ΔP , der Dehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon$ und der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$. Die angegebenen Werte entsprechen den in Schritt 5 nach Kapitel 5.4.2 ermittelten Oberwerten ($R = 0$), wohin die Hystereseschleifen zu verschieben sind.

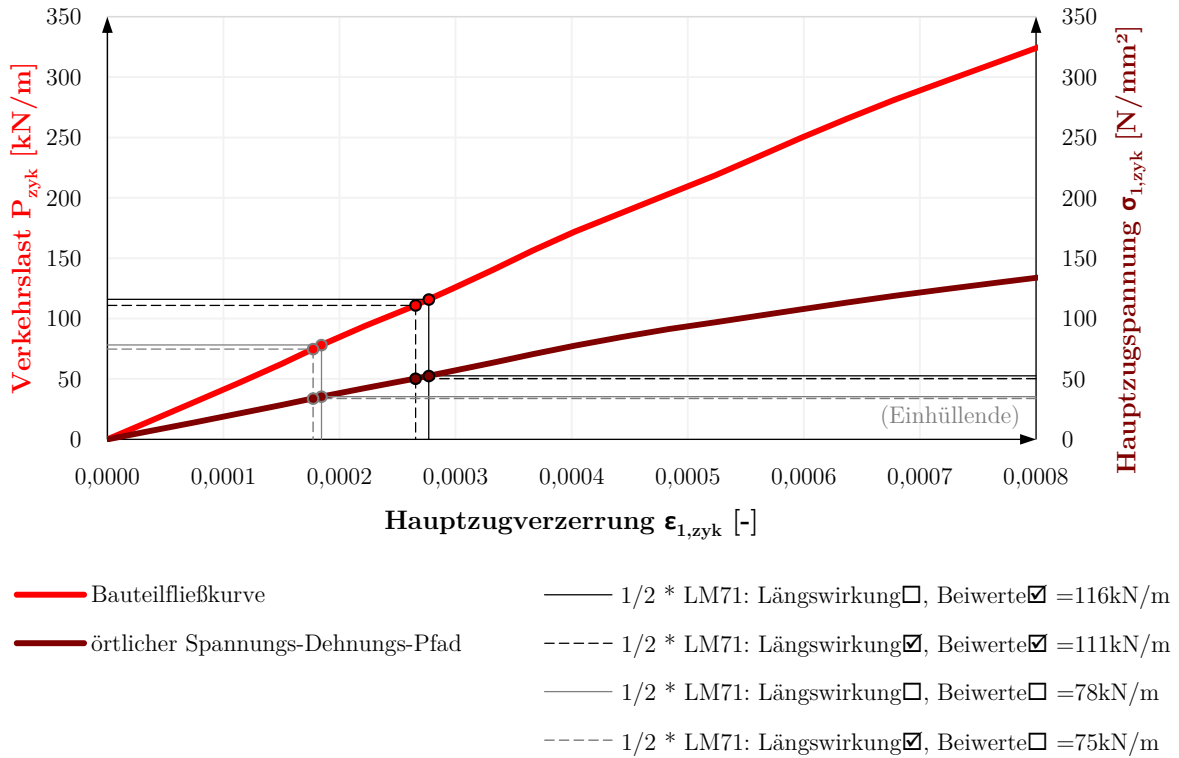


Abbildung 5.14: Lastamplitude P_a infolge $\frac{1}{2}$ LM71 auf der Bauteilfließkurve ($P_{zyk}-\epsilon_{1,zyk}$ -Pfad) und auf dem örtlichen Spannungs-Dehnungspfad ($\sigma_{1,zyk}-\epsilon_{1,zyk}$ -Pfad), Modell TYP 10

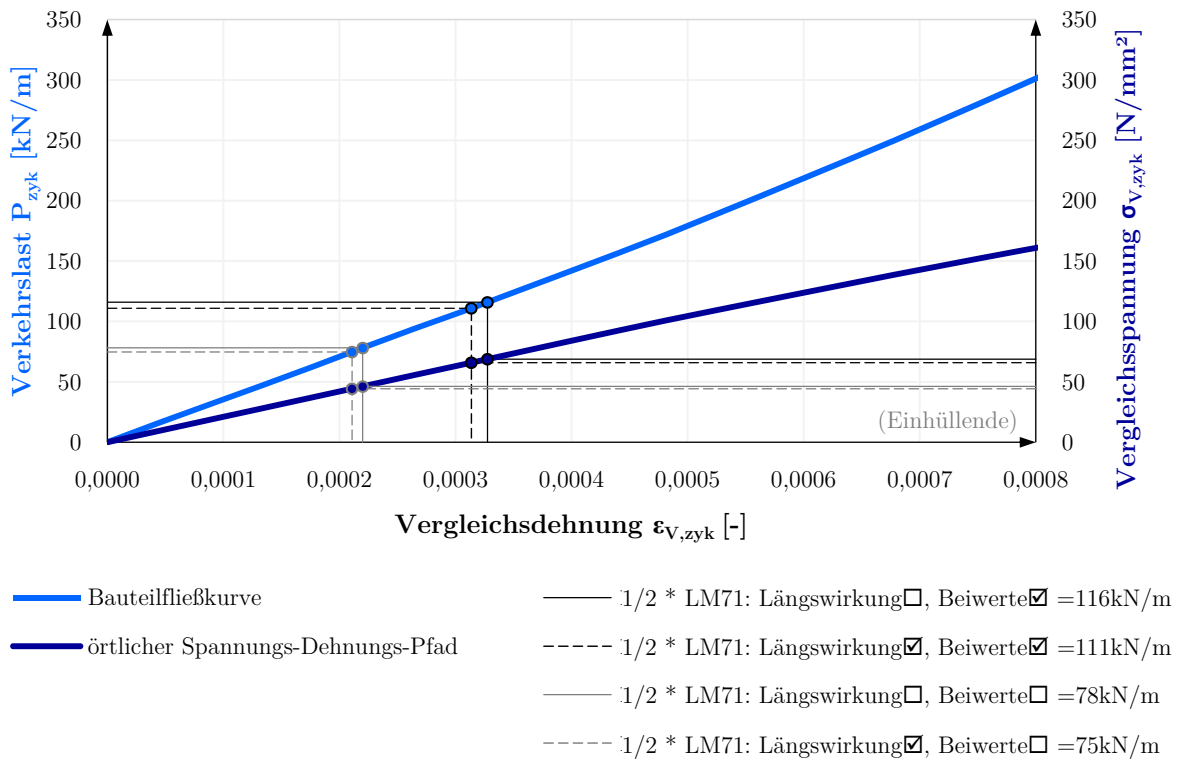


Abbildung 5.15: Lastamplitude P_a infolge $\frac{1}{2}$ LM71 auf der Bauteilfließkurve ($P_{zyk}-\epsilon_{V,zyk}$ -Pfad) und auf dem örtlichen Spannungs-Dehnungspfad ($\sigma_{V,zyk}-\epsilon_{V,zyk}$ -Pfad), M. TYP 10

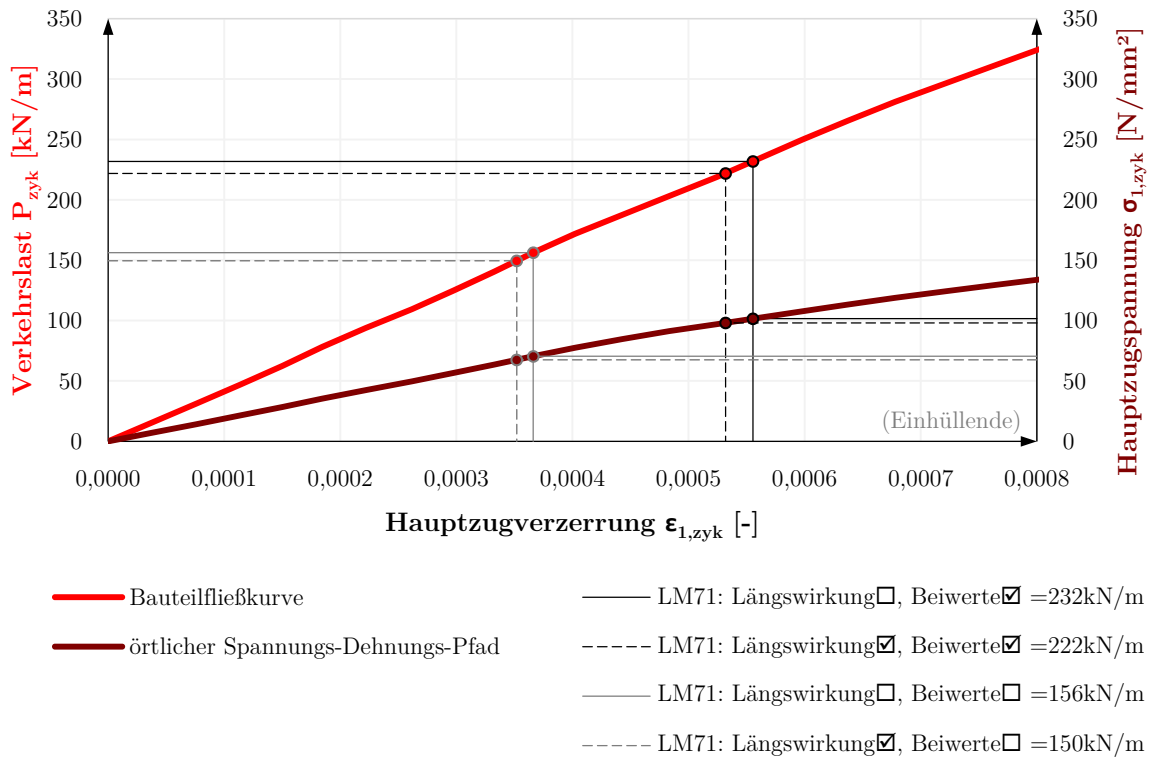


Abbildung 5.16: Lastschwingbreite ΔP infolge LM71 auf der Bauteilfließkurve ($P_{zyk}-\epsilon_{1,zyk}$ -Pfad) und auf dem örtlichen Spannungs-Dehnungspfad ($\sigma_{1,zyk}-\epsilon_{1,zyk}$ -Pfad), Modell TYP 10

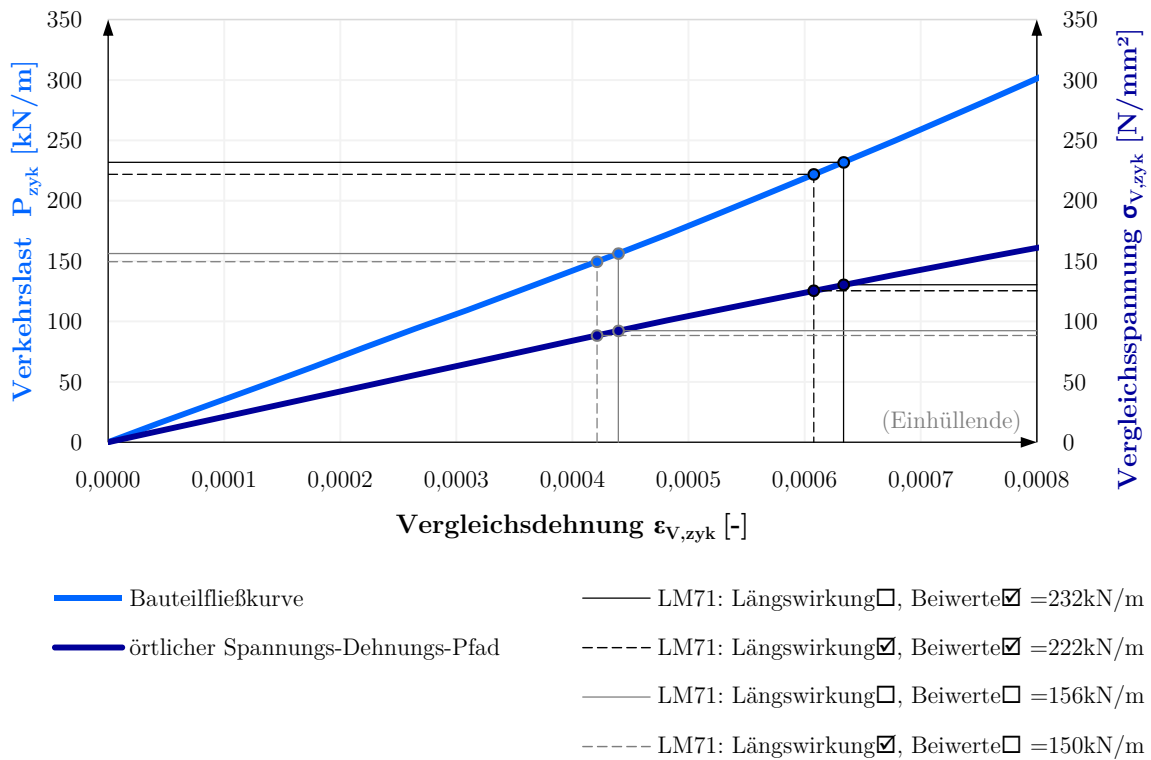


Abbildung 5.17: Lastschwingbreite ΔP inf. LM71 auf der Bauteilfließkurve ($P_{zyk}-\epsilon_{V,zyk}$ -Pfad) und auf dem örtlichen Spannungs-Dehnungspfad ($\sigma_{V,zyk}-\epsilon_{V,zyk}$ -Pfad), M. TYP 10

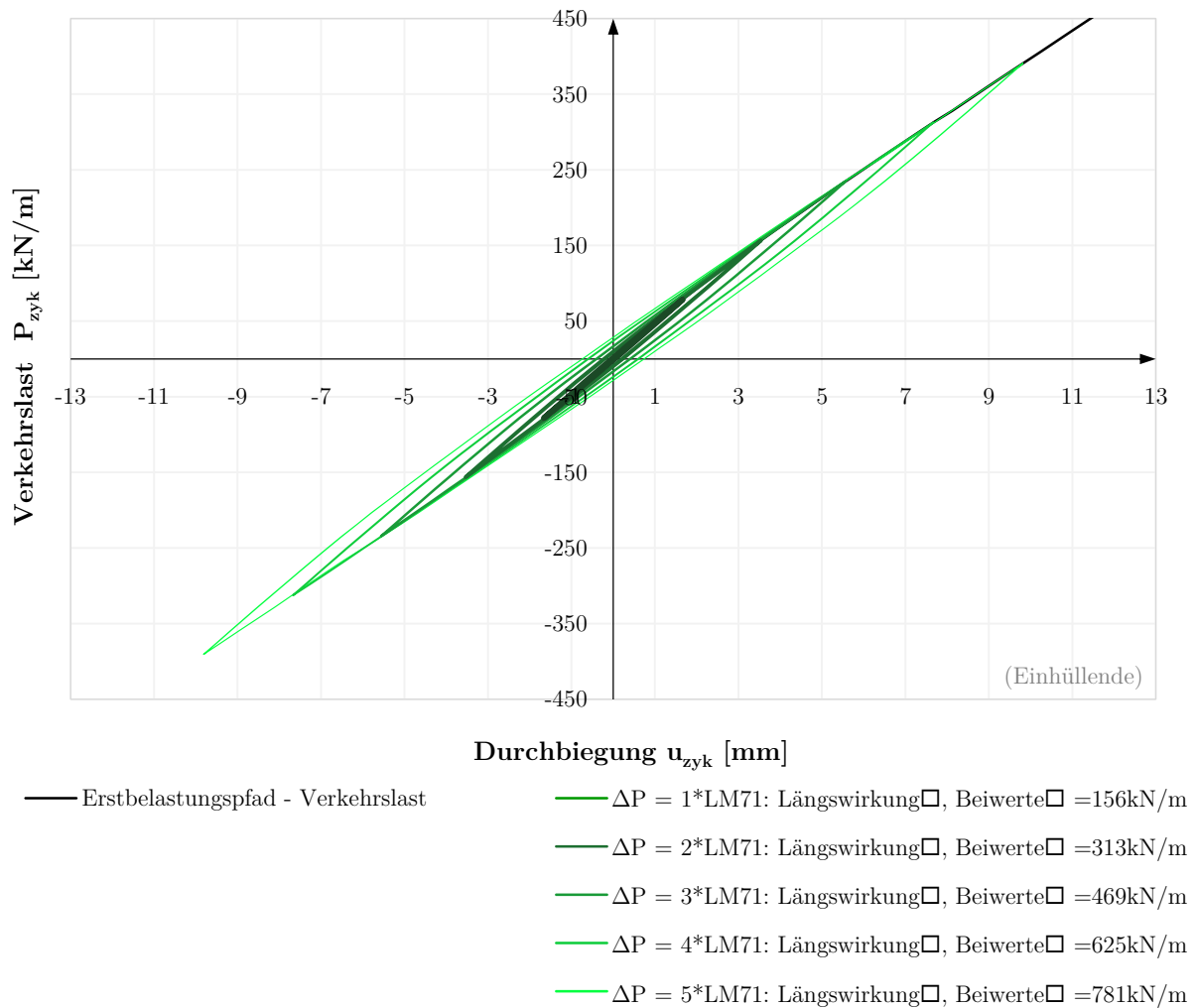


Abbildung 5.18: Last-Verschiebungs-Hysterese ($P_{zyk}-u_{zyk}$) als reine Wechselbeanspruchung aus Verkehrslast ($R = -1$), Modell *TYP 10*

In dem vorherigen Kapitel wurden die Last-Kerbdehnungshysteresen $P - \varepsilon_1$ und $P - \varepsilon_V$ ermittelt. Um Informationen über die Verformung der Platte zu geben, wurde in Abbildung 5.18 statt der Last-Dehnungs- die Last-Verschiebungs-Hysterese dargestellt, wobei unter Verschiebung die Durchbiegung in der Mitte der Platte zu verstehen ist. Eine weitere Ergänzung ist, dass statt der bisher üblichen vier Verkehrslastniveaus fünf andere (höhere) Lastniveaus berechnet wurden. So sind die einzelnen Hystereseschleifen einfacher zu identifizieren, da je höher das Lastniveau, desto höher ist die plastische Dehnung. Abbildung 5.19 stellt den Verlauf mit Berücksichtigung der Mittellast aus der ständigen Belastung und der Verkehrslast dar.

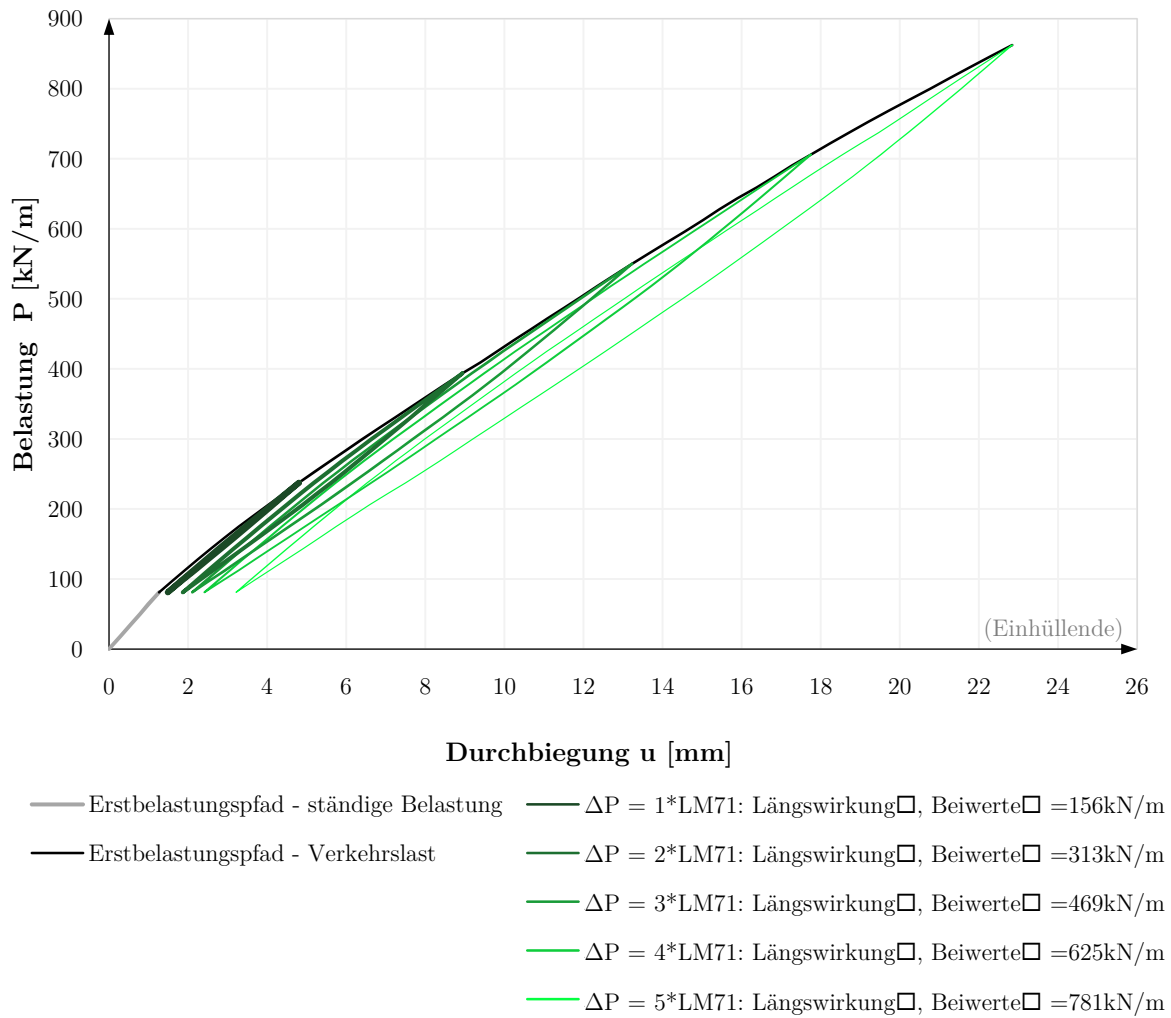


Abbildung 5.19: Last-Verschiebungs-Hysterese (P - u) mit Berücksichtigung der Mittellast aus ständiger Belastung und Verkehrslast, Modell *TYP 10*

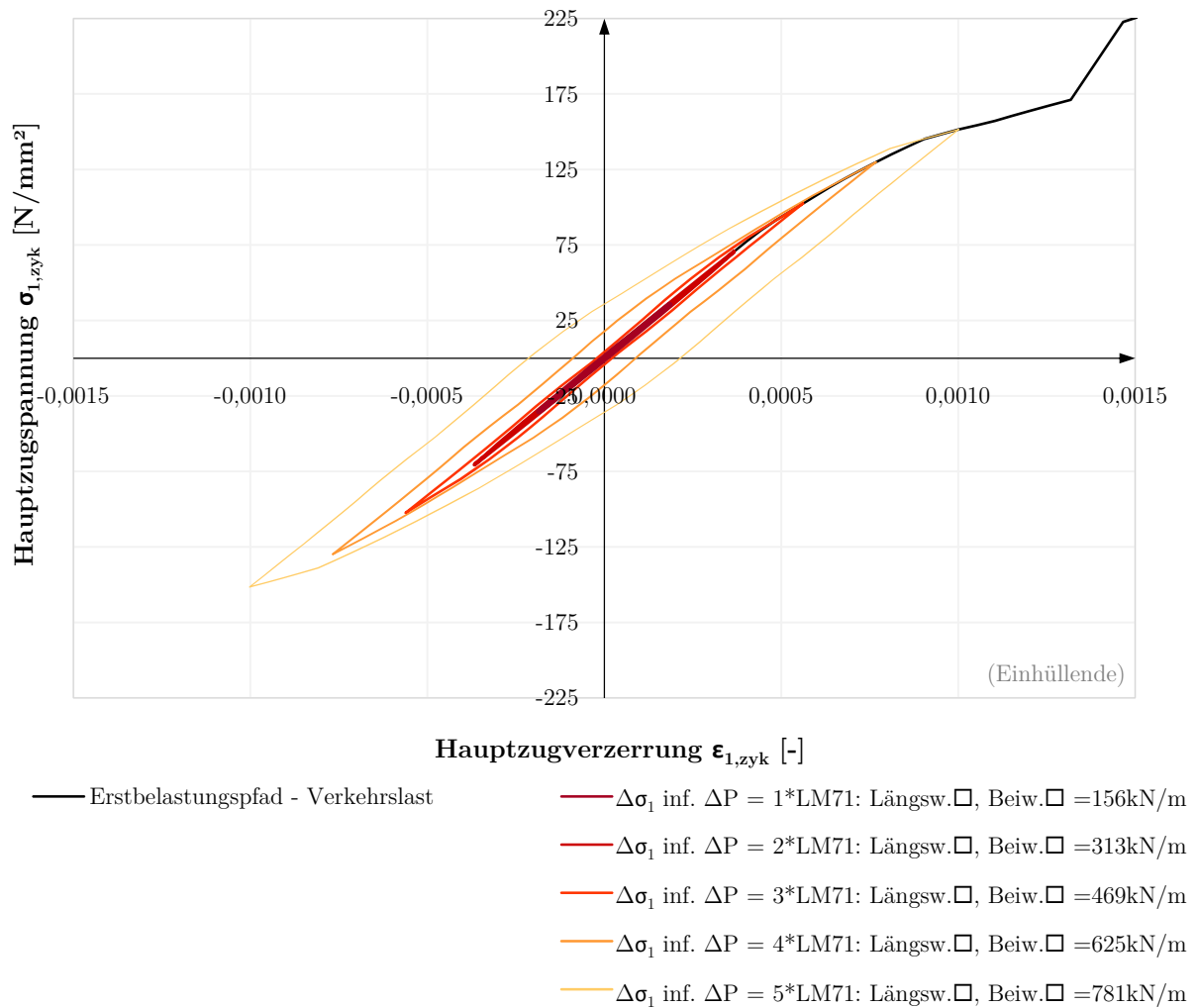


Abbildung 5.20: Spannungs-Dehnungs-Hysteresese ($\sigma_{1,zyk} - \varepsilon_{1,zyk}$) als reine Wechselbeanspruchung aus Verkehrslast ($R = -1$), Modell *TYP 10*

Abbildung 5.20 und Abbildung 5.22 veranschaulichen die örtlichen Spannungs-Dehnungshysteresen $\sigma_1 - \varepsilon_1$ und $\sigma_V - \varepsilon_V$. Abbildung 5.21 und Abbildung 5.23 stellen die Verläufe mit Berücksichtigung der Mittellast aus der ständigen Belastung und der Verkehrslast dar.

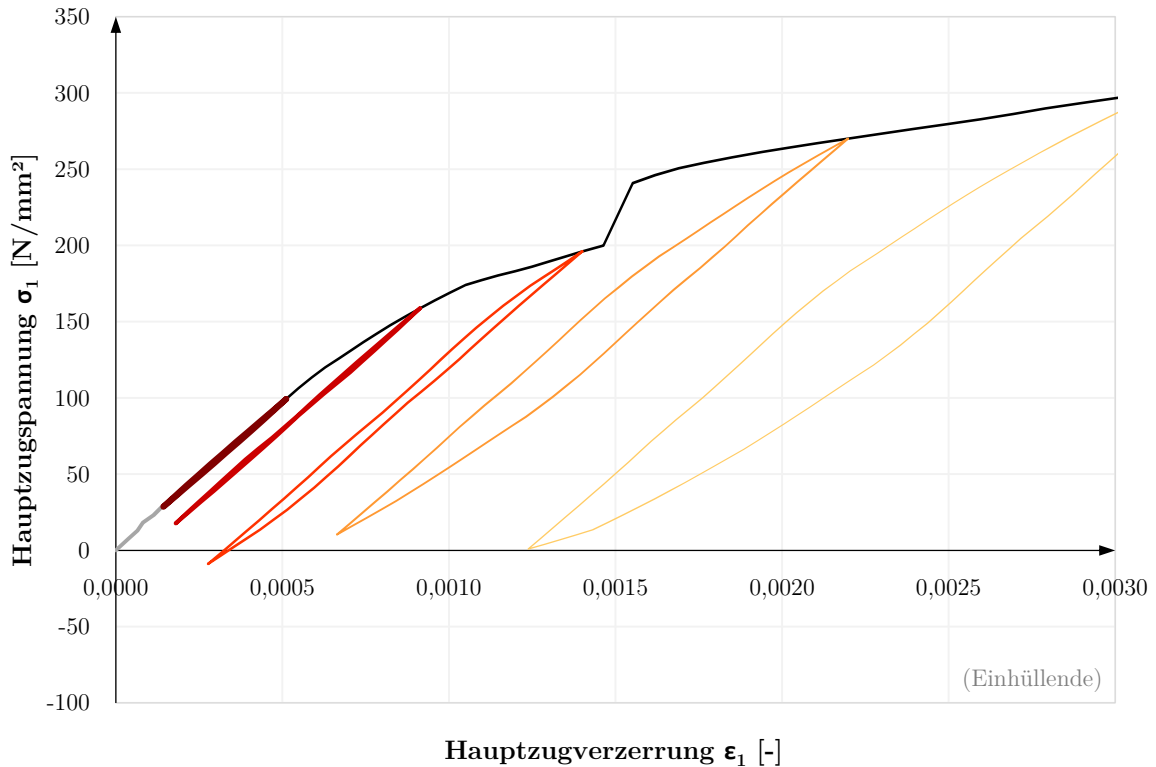
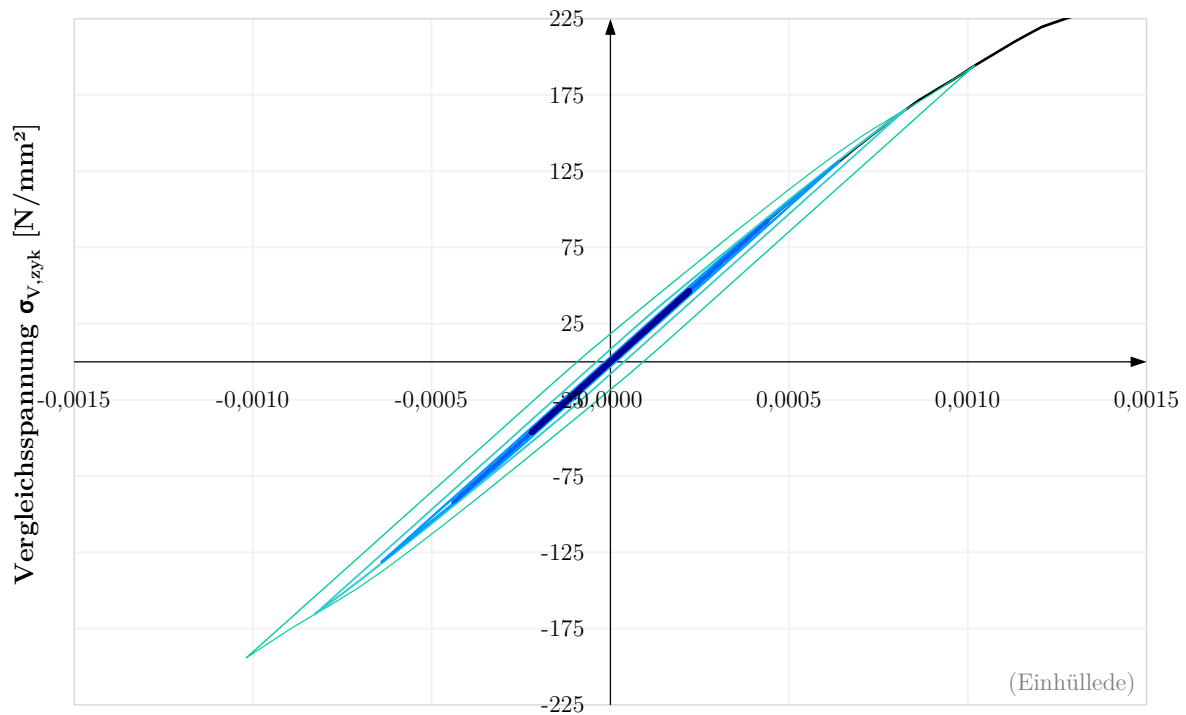


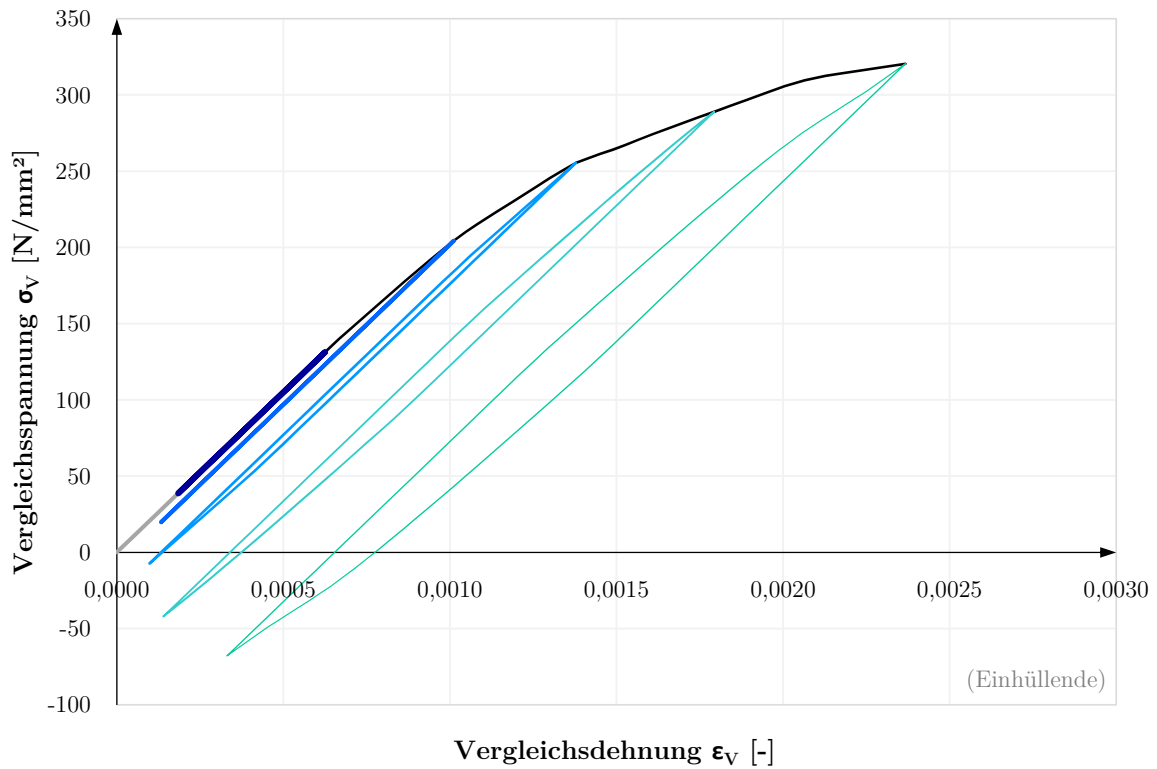
Abbildung 5.21: Spannungs-Dehnungs-Hysterese (σ_1 - ϵ_1) mit Berücksichtigung der Mittelspannung aus ständiger Belastung und Verkehrslast, Modell *TYP 10*

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Hystereseschleife σ_1 - ϵ_1 unter einem Lastniveau von $2,0 \cdot LM71$ □□ noch linienförmig ist.



- Vergleichsdehnung $\epsilon_{V,zyk}$ [-]**
- Erstbelastungspfad - Verkehrslast
 - $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 1*LM71$: Längsw.□, Beiw.□ =156kN/m
 - $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 2*LM71$: Längsw.□, Beiw.□ =313N/m
 - $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 3*LM71$: Längsw.□, Beiw.□ =469kN/m
 - $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 4*LM71$: Längsw.□, Beiw.□ =625kN/m
 - $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 5*LM71$: Längsw.□, Beiw.□ =781kN/m

Abbildung 5.22: Spannungs-Dehnungs-Hysterese ($\sigma_{V,zyk}$ - $\epsilon_{V,zyk}$) als reine Wechselbeanspruchung aus Verkehrslast ($R = -1$), Modell *TYP 10*



- | | |
|---|--|
| — Erstbelastungspfad - ständige Belastung | — $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 1 \cdot LM71$: Längsw.□, Beiw.□ = 156kN/m |
| — Erstbelastungspfad - Verkehrslast | — $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 2 \cdot LM71$: Längsw.□, Beiw.□ = 313kN/m |
| | — $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 3 \cdot LM71$: Längsw.□, Beiw.□ = 469kN/m |
| | — $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 4 \cdot LM71$: Längsw.□, Beiw.□ = 625kN/m |
| | — $\Delta\sigma_V$ inf. $\Delta P = 5 \cdot LM71$: Längsw.□, Beiw.□ = 781kN/m |

Abbildung 5.23: Spannungs-Dehnungs-Hysterese (σ_V - ϵ_V) mit Berücksichtigung der Mittelspannung aus ständiger Belastung und Verkehrslast, Modell *TYP 10*

Die Hystereseschleife σ_V - ϵ_V unter dem Lastniveau $2,0 \cdot LM71$ □□ ist ebenso noch linienförmig.

5.5 Schädigungsbewertung

Den in dem vorherigen Kapitel ermittelten mittelspannungsunabhängigen Hystereseschleifen kann, anhand der Dehnungs-Wöhlerlinien, unmittelbar eine Lebensdauer $N_{\sigma 1}$ bzw. $N_{\sigma V}$ nach Gl. 3.20 bzw. Gl. 3.21 zugeordnet werden. Tabelle 5.12 stellt die resultierenden Ergebnisse dar (Methode M1).

Tabelle 5.12 Lebensdauerberechnung ohne Berücksichtigung der Mittellast P_m

| Nr. | Belastungs- schwingbreite inf. Verkehrslast LM71 ΔP [kN/m ²] | Anrisschwingspielzahl | |
|-----|--|--|--|
| | | $N_{\sigma 1}$ [-] | $N_{\sigma V}$ [-] |
| 0 | $0,0 \cdot LM71 \square \square$ | 0 | 0 |
| : | : | : | : |
| 10 | $1,0 \cdot LM71 \square \square$ | $N_{\sigma 1 \ 10}$ | $N_{\sigma V \ 10}$ |
| : | : | : | : |
| 50 | $5,0 \cdot LM71 \square \square$ | $N_{\sigma 1 \ 50}$ | $N_{\sigma V \ 50}$ |
| | | ⏟ | ⏟ |
| | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>Rankine</i> : A, B, C, D, E | für alle 5 kritische Elemente nach <i>von Mises</i> : F, G, H, I, J |
| | Grundlage: | Gl. 3.20 | Gl. 3.21 |

Die Lebensdauer $N_{PSWT,\sigma 1}$ und $N_{PSWT,\sigma V}$ der Hystereseschleifen, die die Einflüsse von zusätzlichen Mittelspannungen beinhalten, werden mit Hilfe vom Schädigungsparameter P_{SWT} und zugehörigen Schädigungsparameter-Wöhlerlinien bestimmt. Diese wurden bereits in Kapitel 3.7 beschrieben. Da eine analytische Auflösung der Gleichung der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie nicht möglich ist, wurde in der vorliegenden Arbeit die in [9] beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der Lebensdauer gewählt. Dies geschieht wieder durch eine lineare Interpolation zwischen bekannten Wertepaaren der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die zugrunde liegende abschnittsweise Linearität nur im doppellogarithmischen Maßstab zutreffend ist. Aus diesem Grund ist zwischen den logarithmischen Werten zu interpolieren. Abbildung 5.24 veranschaulicht die Vorgehensweise. Mit Gl. 5.25 kann jedem Schädigungsparameter $P_{SWT,\sigma 1}$ bzw. $P_{SWT,\sigma V}$ eine Anrisschwingspielzahl $N_{PSWT,\sigma 1}$ bzw. $N_{PSWT,\sigma V}$ zugeordnet werden (Methode 2).

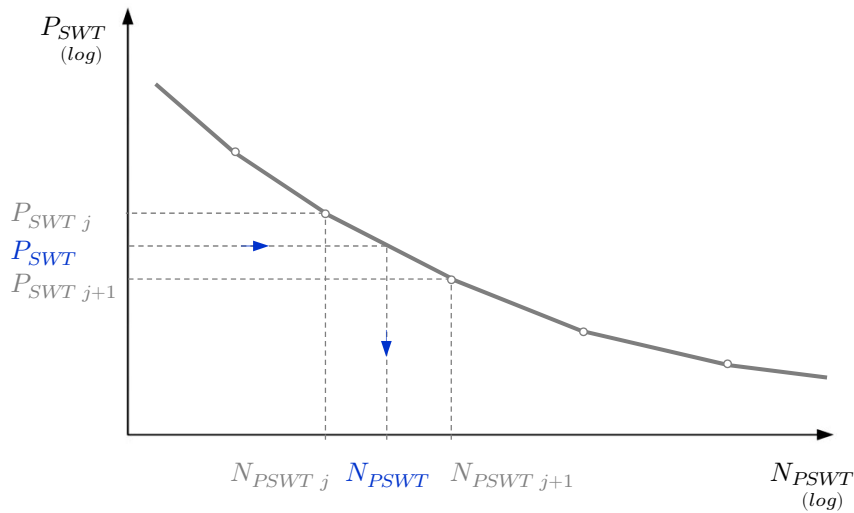


Abbildung 5.24: Ermittlung der mittelspannungsabhängigen Lebensdauer N_{PSWT} auf Basis der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie

$$\log N_{PSWT} = \log N_{PSWT_j} + \frac{\log N_{PSWT_{j+1}} - \log N_{PSWT_j}}{\log P_{SWT_{j+1}} - \log P_{SWT_j}} (\log P_{SWT} - \log P_{SWT_j}) \quad 5.24$$

$$N_{PSWT} = 10^{\log N_{PSWT_j} + \frac{\log N_{PSWT_{j+1}} - \log N_{PSWT_j}}{\log P_{SWT_{j+1}} - \log P_{SWT_j}} (\log P_{SWT} - \log P_{SWT_j})} \quad 5.25$$

Tabelle 5.13 Lebensdauerberechnung mit Berücksichtigung der Mittellast P_m (Methode M2)

| Nr. | Belastungsschwingbreite inf. Verkehrslast LM71 | Schädigungsparameter | Anrisschwingspielzahl | Schädigungsparameter | Anrisschwingspielzahl |
|-----|--|---|----------------------------|---|----------------------------|
| | ΔP [kN/m ²] | $P_{SWT \sigma 1}$ [-] | $N_{PSWT \sigma 1}$ [-] | $P_{SWT \sigma V}$ [-] | $N_{PSWT \sigma V}$ [-] |
| 0 | 0,0 · LM71□□ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 10 | 1,0 · LM71□□ | $P_{SWT \sigma 1 10}$ | $N_{PSWT \sigma 1 10}$ | $P_{SWT \sigma V 10}$ | $N_{PSWT \sigma V 10}$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 50 | 5,0 · LM71□□ | $P_{SWT \sigma 1 50}$ | $N_{PSWT \sigma 1 50}$ | $P_{SWT \sigma V 50}$ | $N_{PSWT \sigma V 50}$ |
| | | ⏟ | | ⏟ | |
| | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>Rankine</i> : A, B, C, D, E | | für alle 5 kritische Elemente nach <i>von Mises</i> : F, G, H, I, J | |
| | Grundlage: | Gl. 3.23 | Gl. 3.25 | Gl. 3.24 | Gl. 3.25 |

5.6 Auswahl des maßgebenden Elementes pro Laststufe

An dieser Stelle der vorliegenden Arbeit soll die Vorgehensweise zur gleichzeitigen Berücksichtigung aller 5 kritischen Elemente mit einer Wöhlerlinie, die somit alle kritischen Kerbstellen der Lochdübelleiste umfassen, erläutert werden. Dazu muss folgende Frage beantwortet werden: Welches der 5 Elemente ist für die Ermittlung eines bestimmten Punktes ($\Delta P - N$) oder ($\Delta P - N_{PSWT}$) (abhängig vom gewählten Methode) auf der Wöhlerlinie maßgebend? Das Kriterium für die Auswahl des maßgebenden Elementes unter Berücksichtigung von Mittelspannungseinflüssen für das Lastniveau ΔP ist dadurch definiert, welches kritische Element den höchsten Wert des Schädigungsparameters P_{SWT} ergibt. Nach einer Analyse der Formel des Schädigungsparameters P_{SWT} (siehe Gl. 5.26) ist ersichtlich, dass die Eingangsdaten für die Lebensdauerberechnung N_{PSWT} unter Berücksichtigung von Mittelspannungseinflüssen die Spannungsamplitude σ_a , die Mittelspannung σ_m und die Dehnungsamplitude ε_a sind. Die Addition der Spannungsamplitude σ_a und der Mittelspannung σ_m ergibt die Oberspannung σ_o . Damit bleiben eigentlich nur zwei Eingangsdaten für die Ermittlung eines Punktes ($\Delta P - N_{PSWT}$) auf einer Wöhlerkurve für ein bestimmtes Lastniveau ΔP übrig: σ_o und ε_a . Dies bedeutet aber, dass dieser Punkt aus Ergebnissen zweier unterschiedlicher Lastniveaus (Oberlast P_o und Lastamplitude P_a) der Erstbelastungskurve resultiert. Abbildung 5.25 veranschaulicht diesen Gedankenweg.

$$P_{SWT} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\varepsilon_a E} = \sqrt{\sigma_o \varepsilon_a E} \quad 5.26$$

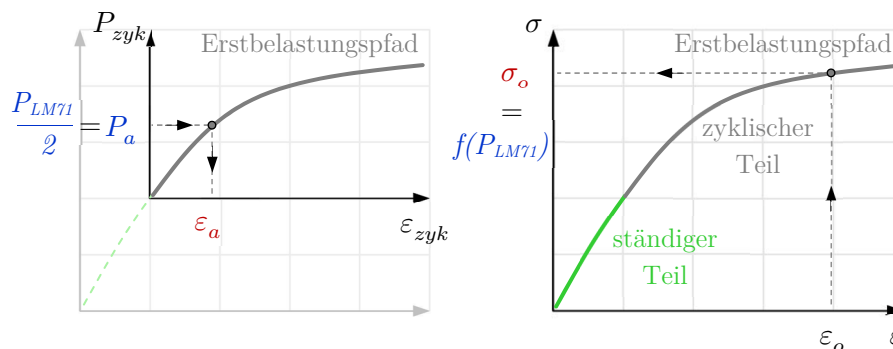


Abbildung 5.25: Eingangsdaten zur Formel des Schädigungsparameters P_{SWT}

Daraus folgt, dass für die Ermittlung einer Wöhlerlinie, die alle kritischen Kerbstellen der Lochdübelleiste umfasst, zuerst die Schädigungsparameter P_{SWT} für alle fünf kritischen Elemente ermittelt werden müssen, um feststellen zu können, welches den höchsten Wert der Schädigung liefert. Anders ausgedrückt, die Wöhlerlinien aller fünf kritischen Elemente werden zuerst vollständig ermittelt, und von denen wird für jede Lastschwingbreite ΔP der Minimal-

wert der Schwingspielzahl N oder N_{PSWT} (abhängig vom gewählten Methode) aller Elemente genommen („untere Einhüllende“).

Die schlussendlich erhaltenen Ergebnisdaten sind in Tabelle 5.14 schematisch dargestellt. Nach Auftragung der Lastschwingbreite ΔP auf der Ordinate und der zugehörigen Anrisschwingspielzahl N auf der Abszisse erhält man die Bauteil-Wöhlerkurve.

Tabelle 5.14 Maßgebende Lebensdauerwerte für maßgebende Wöhlerlinie

| Nr. | Belastungsschwingbreite inf. Verkehrslast LM71 ΔP [kN/m ²] | Anrisschwingspielzahl | | | |
|-----|--|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| | | N_{σ_1} [-] | $N_{PSWT \sigma_1 \min}$ [-] | N_{σ_V} [-] | $N_{PSWT \sigma_V \min}$ [-] |
| 0 | $0,0 \cdot LM71 \square \square$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 10 | $1,0 \cdot LM71 \square \square$ | $N_{\sigma_1 \ 10 \ min}$ | $N_{PSWT \ \sigma_1 \ 10 \ min}$ | $N_{\sigma_V \ 10 \ min}$ | $N_{PSWT \ \sigma_V \ 10 \ min}$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 50 | $5,0 \cdot LM71 \square \square$ | $N_{\sigma_1 \ 50 \ min}$ | $N_{PSWT \ \sigma_1 \ 50 \ min}$ | $N_{\sigma_V \ 50 \ min}$ | $N_{PSWT \ \sigma_V \ 50 \ min}$ |

5.7 Wöhlerlinien für das Konstruktionselement Lochdübel der SCSC-Platte

In der vorliegenden Arbeit werden für jedes Modell der Parameterstudien vier Arten von Wöhlerlinien-Darstellungen bestimmt, siehe Abbildung 5.26 bis Abbildung 5.29:

- Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_1$ – Schwingspielzahl bis zum Anriss N_{σ_1} ;
- Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl bis zum Anriss N_{σ_1} ;
- Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_V$ – Schwingspielzahl bis zum Anriss N_{σ_V} ;
- Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl bis zum Anriss N_{σ_V} .

Alle Wöhlerliniendiagramme enthalten fünf Linien für die fünf Ansätze (*Methode M1 - bis M5*) der Lebensdauerberechnung. Diese fünf Ansätze wurden bereits in Kapitel 5.3.4 zusammengefasst. Die Vorgehensweisen zur Ermittlung der ersten zwei Wöhlerlinien wurden in Kapitel 5.4 und 5.5 erläutert. Die genaue Beschreibung der weiteren Kurvenscharen erfolgt in Kapitel 5.8 bis 5.10. Beispielhaft zeigt Abbildung 5.27 die Bauteil-Wöhlerlinien $\Delta P - N_{\sigma_1}$ als funktionalen Zusammenhang von Lastniveau (aus Lastmodell *LM71*, definiert als Streckenlast) und Schwingspielzahl für die fünf unterschiedlichen Betrachtungsweisen. Die in Kapitel 4.4.2 ermittelten vier Laststufen sind einheitlich auf allen Wöhlerliniendiagrammen hervorgehoben.

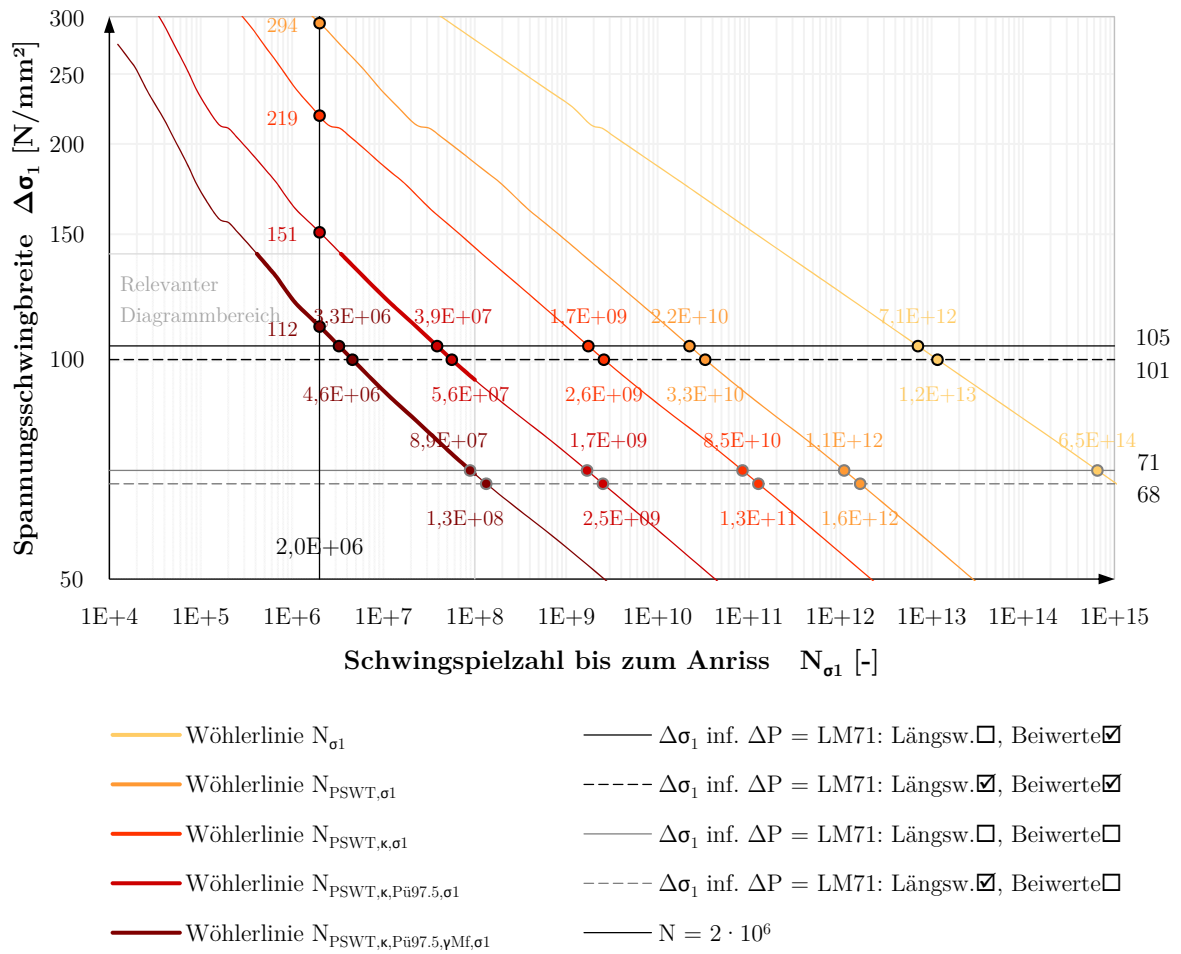


Abbildung 5.26: Wöhlerlinien:
Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_1$ – Schwingspielzahl N_{σ_1}
Modell *TYP 10*

Um die Interpretation der Diagramme zu erleichtern, wurde überall der relevante Anwendungsbereich dargestellt. Wöhlerliniendiagramme für alle anderen Modelle der Parameterstudie sind dem Anhang D zu entnehmen.

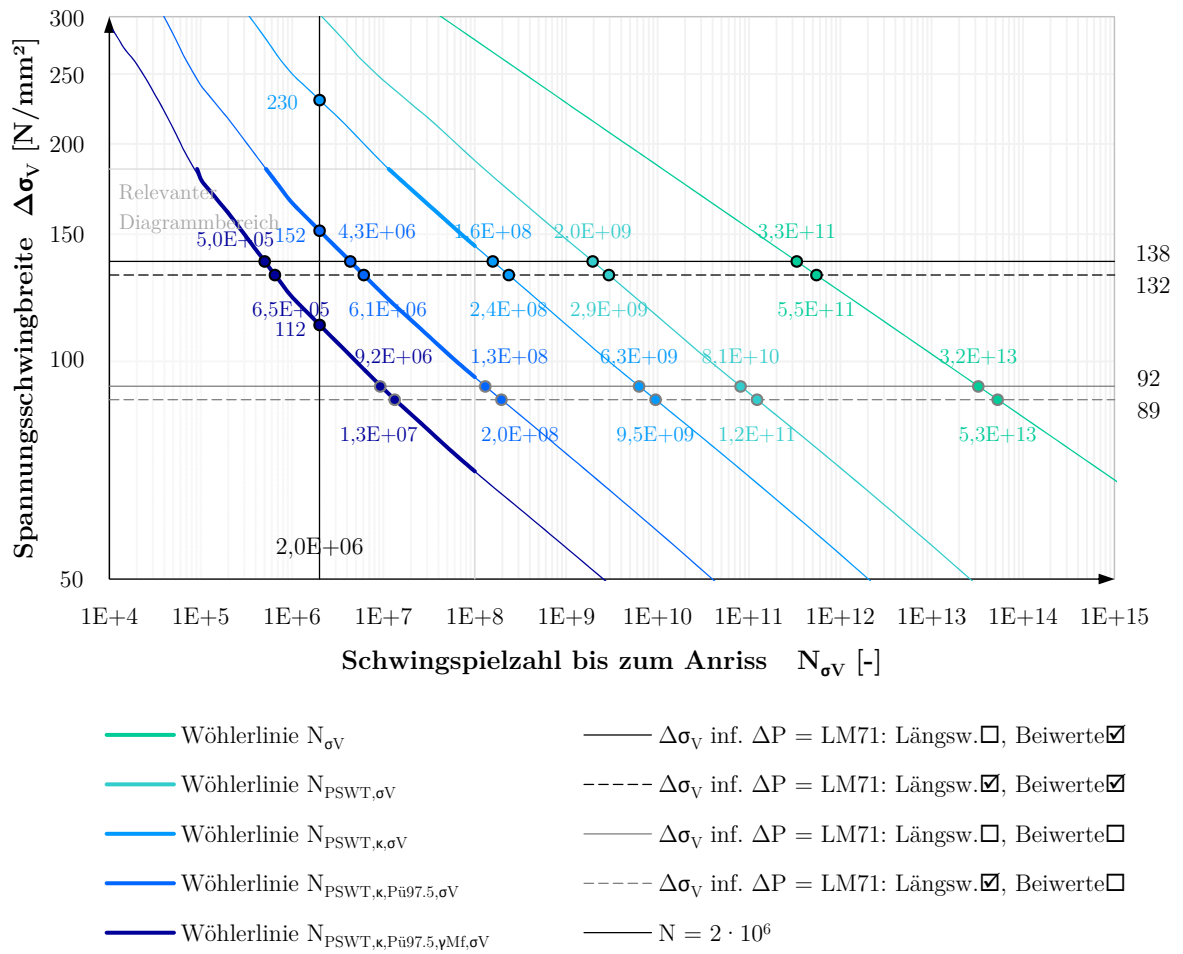


Abbildung 5.28: Wöhlerlinien:
Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_V$ – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell *TYP 10*

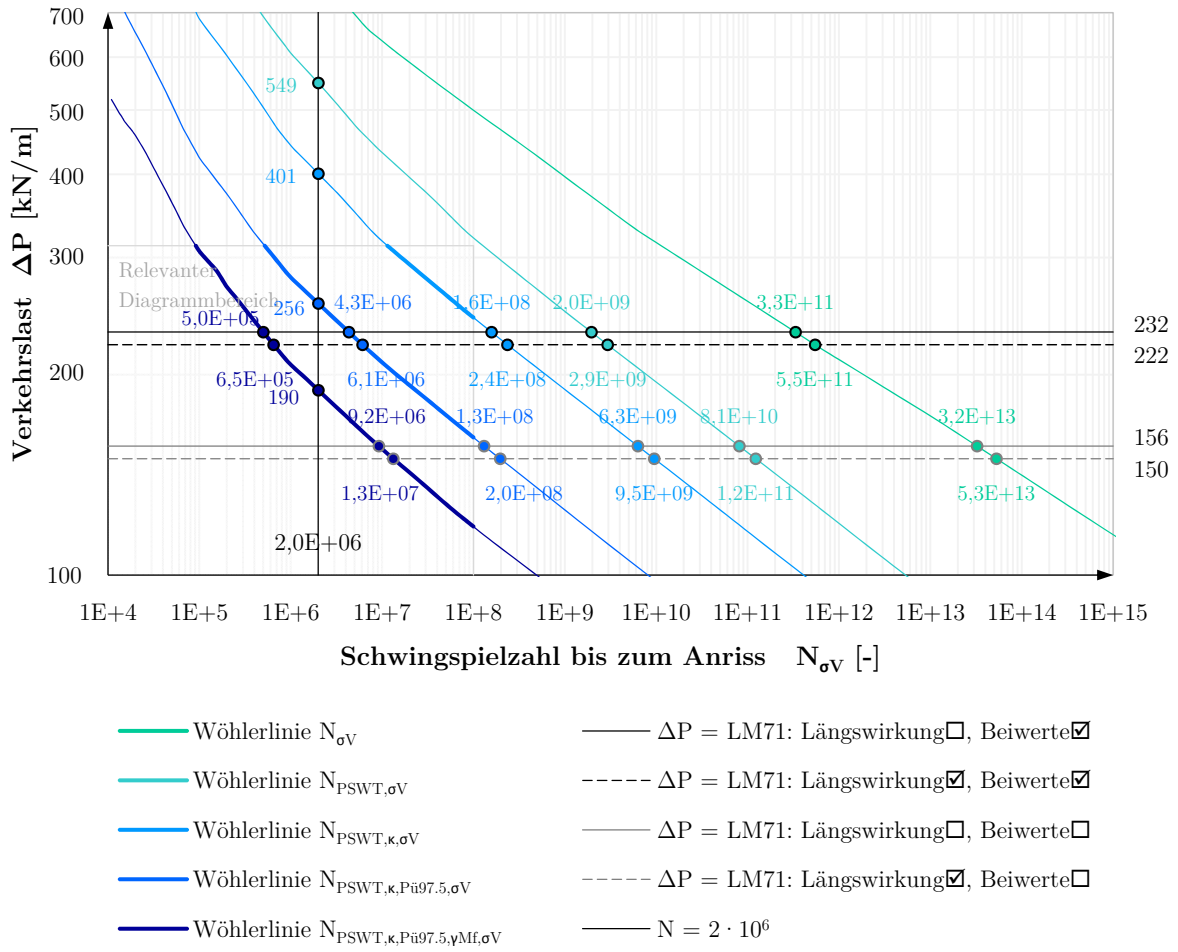


Abbildung 5.29: Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell *TYP 10*

5.8 Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit

Neben den Materialeigenschaften haben auch aus der Fertigung resultierende Einflüsse Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit des Bauteils. Dabei sind die wesentlichen Faktoren die Rautiefe, Randschichtverfestigungen und Eigenspannungen.

Die zusätzliche Berücksichtigung der herstellungsbedingten Oberflächenrauigkeit (*Methode M3*) kann durch Multiplikation der mittelspannungsabhängigen Schädigungsparameter-Wöhlerlinie mit einem Oberflächenfaktor κ – in der einschlägigen Literatur auch als γ_R [24] oder $b_{o\sigma}$ [62] bezeichnet und auch als Abminderungsfaktor [24] benannt – erfolgen, siehe Gl. 5.27 [15]. Der Rauigkeitsfaktor wird experimentell aus den Dauerfestigkeiten ungekerbter Proben mit und ohne Oberflächenrauigkeit abgeleitet und in Abhängigkeit von der gemittelten Rautiefe R_z und der Zugfestigkeit R_m des Werkstoffs dargestellt. Für eine polierte Oberfläche hat er den Wert 1,0 [15, 9].

$$P_{SWT,\kappa} = \kappa \sqrt{\sigma'_f{}^2 (2N)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N)^{b+c} E} \quad 5.27$$

Die Lochdübelleisten werden aus derzeitiger Sicht durch Brennschneiden aus einem warmgewalzten Blech hergestellt. Der Rautiefe eines thermischen Schnittes ist in der EN ISO 9013 [63] geregelt, und beträgt etwa $R_z = 100 \text{ } [\mu\text{m}]$ (Blechdicke: $20 \text{ } [mm]$, Ausführungsklasse *EXC3* nach [64]). Im Vergleich dazu beträgt die Rautiefe der Walzhaut gemäß Abbildung 5.30 $R_z = 160 \text{ } [\mu\text{m}]$ und ist damit maßgebend für den Ermüdungsanriss. Für Baustahl S355 ($f_u = 490 \text{ } N/mm^2$) liefert das Diagramm einen Rauigkeitsfaktor von $\kappa \approx 0,8$.

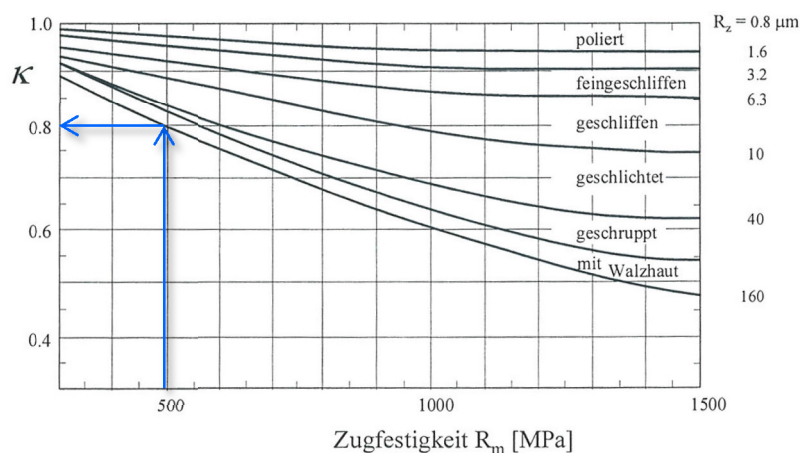


Abbildung 5.30: Oberflächenfaktor κ der Dauerfestigkeit von Stahl als Funktion der Zugfestigkeit R_m , für gemittelte Rautiefe R_z nach Siebel u. Gaier [62]

Ein dazu entsprechendes Diagramm in der *FKM*-Richtlinie [24] ist in Abbildung 5.31 dargestellt. Im Gegensatz zu den vorherigen Methoden ist hier der Abminderungsfaktor in Abhängigkeit der maximalen Rautiefe R_t angegeben, der für Stähle mit Walzhaut einen Wert von $R_t = 200 [\mu m]$ aufweist. Diese Methode liefert für Baustahl S355 ebenfalls einen Abminderungsfaktor von $\gamma_R \approx 0,8$.

In den amerikanischen Quellen [65, 17] sind die Einflüsse von Oberflächenrauigkeit üblicherweise mit der in Abbildung 5.32 dargestellte Methode erfasst. Für Baustahl S355 liefert diese Methode einen Abminderungsfaktor von etwa $\gamma_R \approx 0,67$.

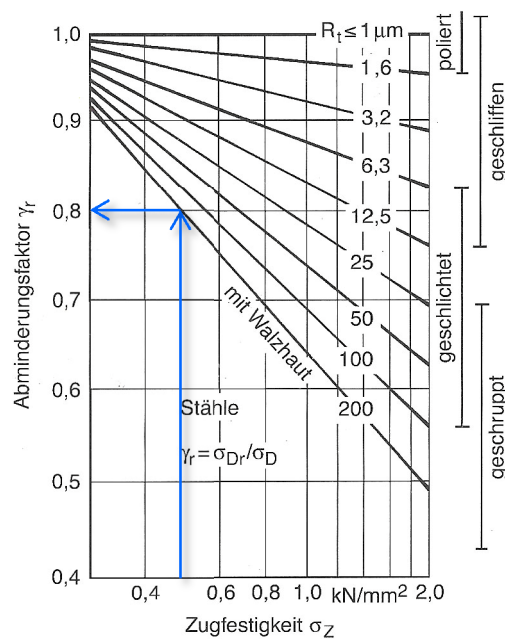


Abbildung 5.31: Abminderungsfaktor der Dauerfestigkeit von Stahl als Funktion der Zugfestigkeit R_m für maximale Rautiefe R_t nach *FKM*-Richtlinie [24] (umgezeichnet in [17])

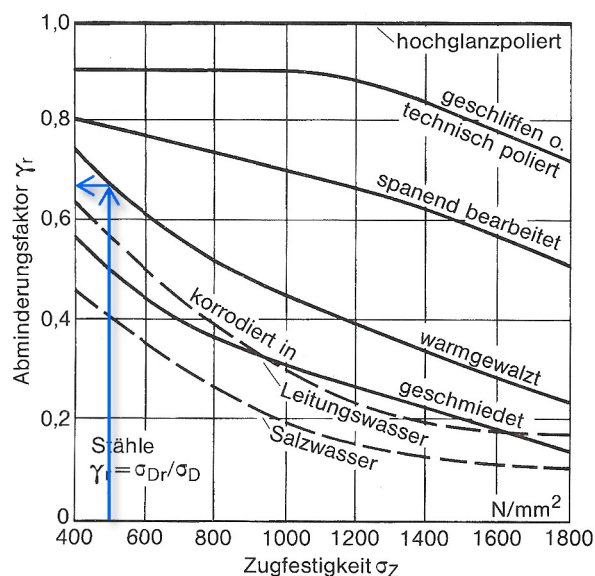


Abbildung 5.32: Abminderungsfaktor der Dauerfestigkeit von Stahl als Funktion der Zugfestigkeit für unterschiedliche Oberflächenzustände nach *Juvinall* [65, 17]

In der vorliegenden Arbeit werden in Anlehnung an [9] die in Tabelle 5.15 zusammengefassten Werte verwendet.

Tabelle 5.15 Gewählte Abminderungsfaktoren für die Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit

| Stahlsorte | S235 | S355 |
|-----------------------------|------|------|
| Abminderungsfaktor κ | 0,85 | 0,80 |

5.9 Anpassung des Sicherheitsniveaus

Die Ergebnisse der dehnungsbasierten Wöhler-Versuche, als Basis des Kerbdehnungskonzeptes, weisen Streuungen auf. Die Gleichungen der Dehnungs-Wöhlerlinie (s. Abschnitt 3.7) und der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve beruhen genau genommen auf Mittelwerten der streuenden Versuchsergebnisse. Sie sind also als Gleichungen für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\ddot{u}} = 50\%$ zu verstehen. Da die in *EN 1993-1-9* [5] angegebenen Wöhlerkurven näherungsweise auf einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\ddot{u}} = 97,5\%$ basieren [55], ist eine Angleichung des Sicherheitsniveaus notwendig.

Als Maß für die Streuung kann die Standardabweichung s dienen. Unter der Voraussetzung, dass die elastischen und plastischen Dehnungsamplituden für eine konstante Schwingspielzahl nach einer Gauß'schen Normalverteilung im doppellogarithmischen Maßstab streuen, und dass die Streubreite über den gesamten Schwingspielzahlbereich gleich bleibt, kann der Zusammen-

hang zwischen der Streuspanne der Schwingspielzahl T_N und der Standardabweichung s mit Gl. 5.28 ausgedrückt werden [15],

$$s = \frac{1}{2,56} \log \left(\frac{1}{T_N} \right) \quad 5.28$$

wobei $1/T_N$ das Verhältnis der Schwingspielzahl für 10% und 90% Überlebenswahrscheinlichkeit bezeichnet:

$$\frac{1}{T_N} = \frac{N_{10\%}}{N_{90\%}} \quad 5.29$$

Nach Haibach beträgt die Streuspanne bei den Schädigungsparameter-Wöhlerlinien $T_N = 1,55$, somit ergibt sich nach Gl. 5.28 eine Standardabweichung von $s = 7,435 \cdot 10^{-2}$. Mit der Kenntnis der Standardabweichung lässt sich die Streuspanne für beliebige Überlebenswahrscheinlichkeiten gemäß Gl. 5.30 umrechnen, wobei die Zufallsvariable u aus Tabelle 5.1-1 in [15] in Abhängigkeit der Überlebenswahrscheinlichkeit entnommen werden kann (Tabelle 5.16). Für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% ergibt sich eine Zufallsvariable von $u = 1,96$ und gemäß Gl. 5.31 ein Abminderungsfaktor von 0,71.

$$s = \frac{1}{2 \cdot u} \log \left(\frac{1}{T_{(\text{Überlebensw.}\%)}} \right) \quad \text{bzw.} \quad T_{(\text{Überlebensw.}\%)} = 10^{-u \cdot s} \quad 5.30$$

Tabelle 5.16 Abminderungsfaktoren für die Anpassung des Sicherheitsniveaus der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie mit $T_N = 1,55$ [15].

| Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}}$ | 50% | 90% | 97,5% |
|---|------|------|-------|
| Zufallsvariable u | 0,00 | 1,28 | 1,96 |
| Abminderungsfaktor $T_{P\dots\%}$ | 1,00 | 0,80 | 0,71 |

$$T_{P97,5\%} = 10^{-1,96 \cdot 7,435 \cdot 10^{-2}} = 0,71 \quad 5.31$$

Somit ergibt sich:

$$N_{i,P97,5\%} = T_{P97,5\%} \cdot N_{i,P50\%} = 0,71 \cdot N_{i,P50\%} \quad 5.32$$

Mit der Erhöhung der Überlebenswahrscheinlichkeit auf $P_{\ddot{u}} = 97,5\%$ unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit resultiert die folgende Gleichung der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie (Methode M4):

$$P_{SWT,\kappa,Pi97.5} = T_{P97.5\%} \kappa \sqrt{\sigma'_f{}^2 (2N)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N)^{b+c} E} \quad 5.33$$

Abbildung 5.33 veranschaulicht die abgeminderte Schädigungsparameter -Wöhlerlinien und in Tabelle 5.17 und Tabelle 5.18 sind die resultierenden Ergebnissen schematisch dargestellt.

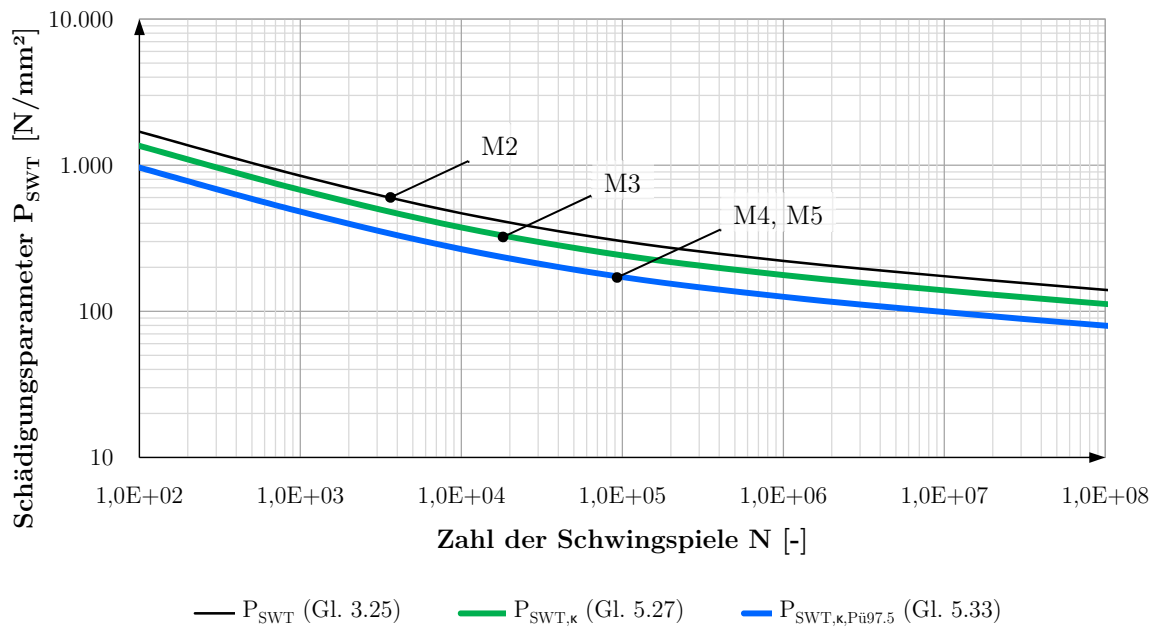


Abbildung 5.33: Schädigungsparameter-Wöhlerlinien von Baustahl *S355*

Tabelle 5.17 Resultierende Lebensdauerwerte nach *Rankine* (Hauptspannungen, Methode M4)

| Nr. | Belastungs- schwingbreite inf. Verkehrslast LM71 ΔP [kN/m ²] | Anrisschwingspielzahl | | | |
|-----|--|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|--|
| | | $N_{\sigma 1}$ [-] | $N_{PSWT,\sigma 1}$ [-] | $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$ [-] | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\sigma 1}$ [-] |
| 0 | $0,0 \cdot LM71 \square \square$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| : | : | : | : | : | : |
| 10 | $1,0 \cdot LM71 \square \square$ | $N_{\sigma 1 \ 10}$ | $N_{PSWT,\sigma 1 \ 10}$ | $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1 \ 10}$ | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\sigma 1 \ 10}$ |
| : | : | : | : | : | : |
| 50 | $5,0 \cdot LM71 \square \square$ | $N_{\sigma 1 \ 50}$ | $N_{PSWT,\sigma 1 \ 50}$ | $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1 \ 50}$ | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\sigma 1 \ 50}$ |
| | Grundlage: | Gl. 3.20 | Gl. 3.23 + | Gl. 3.23 + | Gl. 3.23 + |
| | | | Gl. 3.25 | Gl. 5.27 | Gl. 5.33 |

Tabelle 5.18 Resultierende Lebensdauerwerte nach *von Mises* (Vergleichsspannungen, Methode M4)

| Nr. | Belastungs- schwingbreite inf. Verkehrslast LM71 ΔP [kN/m ²] | Anrisschwingspielzahl | | | |
|-----|--|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|--|
| | | $N_{\sigma V}$ [-] | $N_{PSWT,\sigma V}$ [-] | $N_{PSWT,\kappa,\sigma V}$ [-] | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\sigma V}$ [-] |
| 0 | $0,0 \cdot LM71 \square \square$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| : | : | : | : | : | : |
| 10 | $1,0 \cdot LM71 \square \square$ | $N_{\sigma V \ 10}$ | $N_{PSWT,\sigma V \ 10}$ | $N_{PSWT,\kappa,\sigma V \ 10}$ | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\sigma V \ 10}$ |
| : | : | : | : | : | : |
| 50 | $5,0 \cdot LM71 \square \square$ | $N_{\sigma V \ 50}$ | $N_{PSWT,\sigma V \ 50}$ | $N_{PSWT,\kappa,\sigma V \ 50}$ | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\sigma V \ 50}$ |
| | Grundlage: | Gl. 3.21 | Gl. 3.24 + | Gl. 3.24 + | Gl. 3.24 + |
| | | | Gl. 3.25 | Gl. 5.27 | Gl. 5.33 |

Abbildung 5.34 veranschaulicht die Reduktionen der Lebensdauer bei gleichbleibender Spannungsschwingbreite. Diese Reduktionen können als horizontale Verschiebungen der Wöhlerkurve interpretiert werden.

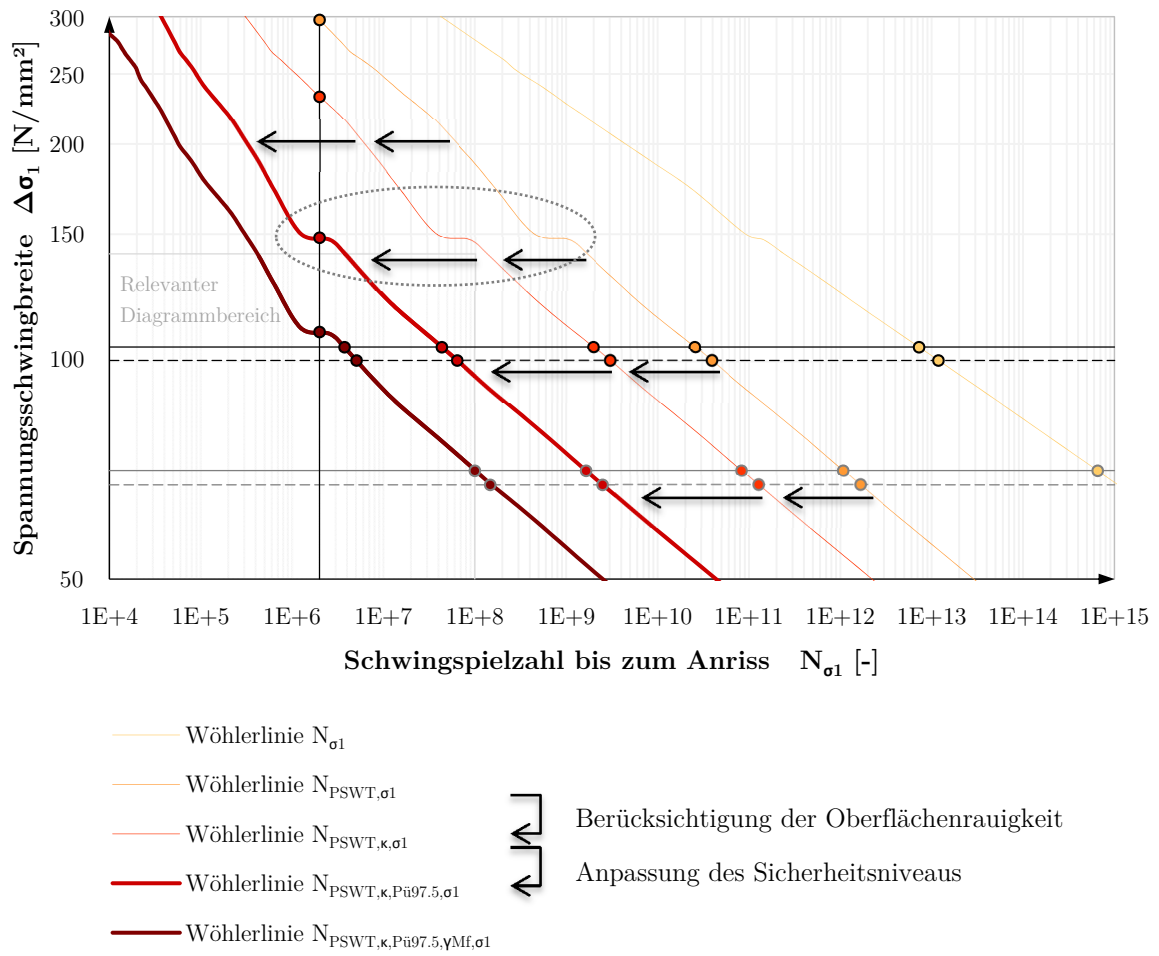


Abbildung 5.34: Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit und Anpassung des Sicherheitsniveaus (Methode M3, M4), schematische Darstellung

Die gleiche Vorgehensweise gilt sinngemäß für die Wöhlerliniendiagramme $\Delta P - N$, siehe Abbildung 5.27 und Abbildung 5.29.

5.10 Berücksichtigung des widerstandsseitigen Teilsicherheitsbeiwertes

Der Ermüdungswiderstand kann durch Besonderheiten des Tragwerks (z.B. Redundanz im Bauwerk, regelmäßige Inspektionen) sowie der Betriebssicherheit des Bauwerks und der Schadensfolge im Versagensfall entsprechend angepasst werden [55]. Diese Streuungen bei der Bestimmung des Widerstandes werden mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} abgedeckt. *ÖNORM EN 1993-1-9* [5] gibt in Tabelle 3.1 ein Entscheidungsraster mit Werten für γ_{Mf} von 1,0 bis 1,35 an (vgl. Tabelle 5.19).

Tabelle 5.19 γ_{Mf} -Werte entsprechend dem Bemessungskonzept (aus [5])

| Bemessungskonzept | Schadensfolge | |
|--|---------------|------|
| | niedrig | hoch |
| Schadenstoleranz (Schadenserkenung und Schadensbehebung frühzeitig möglich) | 1,0 | 1,15 |
| Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung (Schadenserkenung und Schadensbehebung kaum möglich) | 1,15 | 1,35 |

In der vorliegenden Arbeit wird – auf der sicheren Seite liegend – der Maximalwert 1,35 (Konzept der sicheren Lebensdauer mit hoher Schadensfolge) verwendet.

Im Falle des Nennspannungskonzeptes, bei dem die einwirkende Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ mit dem in den Kerbfalltabellen angegebenen Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ verglichen wird, ist der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} zu dividieren.

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma \leq \frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{Mf}} \quad 5.34$$

Um diese Reduktion des Spannungswiderstandes bei gleichbleibender Lebensdauer zu veranschaulichen, wird auf Abbildung 5.35 verwiesen. Die Reduktion auf Basis γ_{Mf} kann als vertikale Verschiebung der Wöhlerlinie interpretiert werden.

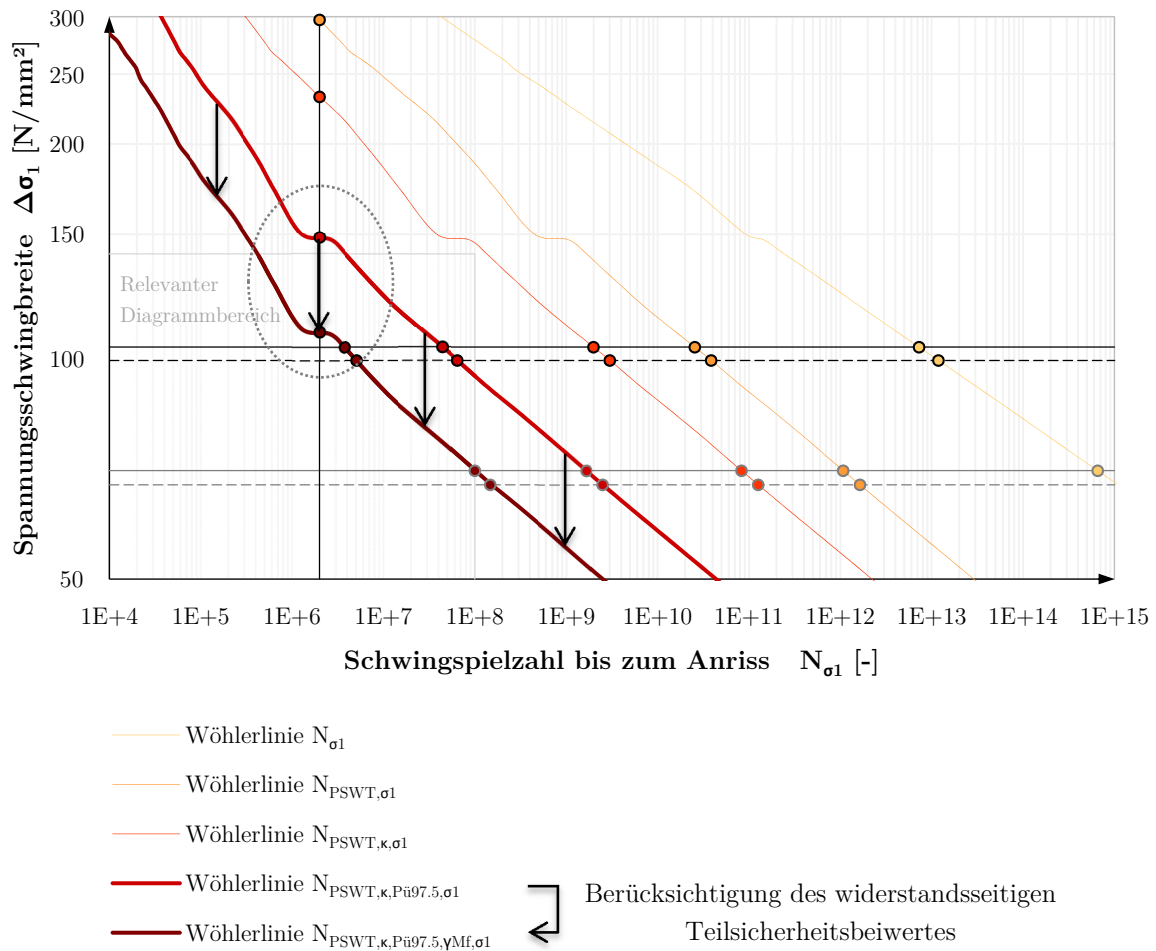


Abbildung 5.35: Berücksichtigung des widerstandsseitigen Teilsicherheitsbeiwertes für die Wöhlerdiagramme $\Delta\sigma - N$ (Methode M5), schematische Darstellung

Es stellt sich die Frage: Wie kann man diese Reduktion in die Wöhlerkurve $N_{PSWT,\kappa,P_{\bar{u}97.5},\gamma_{Mf}}$ - ΔP einfließen lassen? Im Grunde genommen kommen zwei mögliche Vorgehensweisen in Frage:

- **Methodik A: Zuordnung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_{Mf} zu der Verkehrlastschwingbreiten ΔP_i**

$$\Delta P_{\gamma_{Mf},i} = \frac{\Delta P_i}{\gamma_{Mf}} \quad 5.35$$

Falls ein linearer Zusammenhang zwischen der Verkehrslast ΔP und den entstehenden Kerbspannungen $\Delta\sigma$ bestehen würde, würde diese Methodik direkt zum Ziel führen. Im Falle einer überproportionalen Spannungserhöhung, welche teilweise auch auftritt, liefert diese Methodik ein auf der unsicheren Seite liegendes Ergebnis. Obwohl die Ungenauigkeit der Methode aufgrund des fast linearen Belastung-Kerbspannung-Verlaufs der SCSC-Platte sehr gering ist,

wurde eine neue Methodik zur Berücksichtigung des widerstandseitigen Teilsicherheitsbeiwertes entwickelt - nämlich Methodik B.

- **Methodik B:** Die Zuordnung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_{Mf} erfolgt zum Spannungswiderstand $\Delta\sigma_i$ - wie im Eurocode [5]

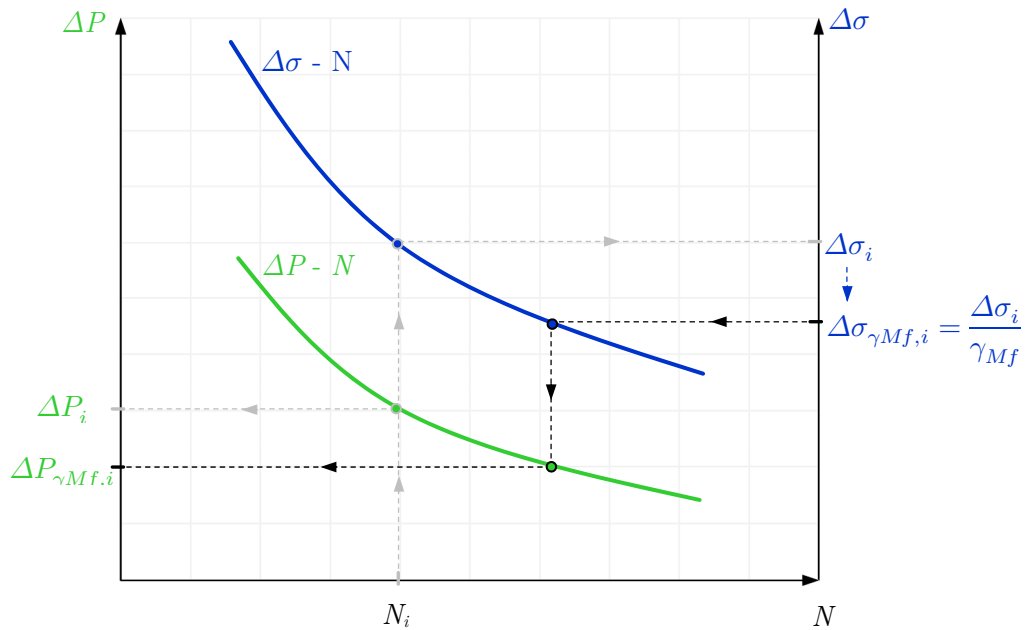


Abbildung 5.36 Methodik B zur Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_{Mf}

Diese Methode hat den Vorteil, dass im Falle eines in Abbildung 5.36 dargestellten, in dieser Weise gekrümmten $\Delta P - N$ bzw. $\Delta\sigma - N$ Verlaufes, eine genaue ertragbare Belastungsschwingbreite $\Delta P_{\gamma_{Mf},i}$ berechnet werden kann. Nach einer genauen Analyse der Methodik wurde aber festgestellt, dass im Falle der berechneten Wöhlerlinien, welche sich wechselweise in „beide“ Richtungen krümmen, diese Methode in bestimmten Fällen ein unzulässiges d.h. unsicheres Ergebnis liefern kann. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 5.37. Das Problem wird noch dadurch erschwert, dass die Eingangsdaten der Lebensdauerberechnung aus unterschiedlichen Lastniveaus resultieren, siehe Kapitel 5.6.

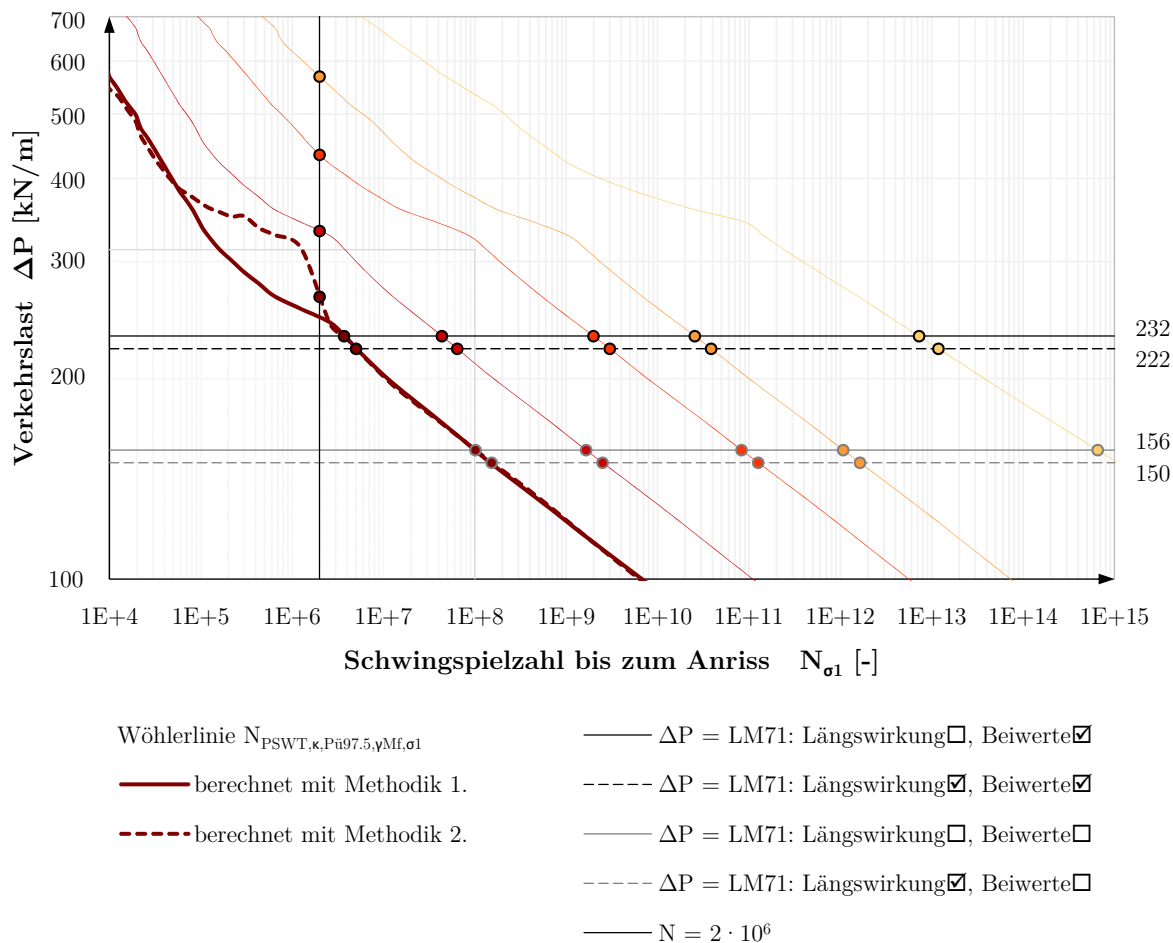


Abbildung 5.37: Methodik A und B zur Ermittlung der Wöhlerlinie $\Delta P - N_{PSWT, \kappa, P \ddot{u} 97.5, \gamma M f}$, Modell *TYP 11*

Anhand Abbildung 5.37 lässt sich erkennen, dass teilweise beide Methodiken maßgebend sein können. Aus diesem Grund wurde bei jedem Lastniveau der Minimalwert aus den Ergebnissen (Methodik A, Methodik B) ermittelt. Die in dieser Weise gebildeten Verläufe wurden bei allen in der vorliegenden Arbeit vorkommenden Wöhlerliniendiagrammen dargestellt. Diese Vorgehensweise – dargestellt in Tabelle 5.20 – kann geringfügig auf der sicheren Seite liegen, aber keinesfalls ein Ergebnis auf der unsicheren Seite erzielen.

Tabelle 5.20 Ermittlung der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\gamma Mf}$ und der Belastungsschwingbreite $\Delta P_{\gamma Mf}$ bei gleichbleibender Lebensdauer (Methode M5)

$$\frac{\min\{\text{Methodik 1; Methodik 2}\}}{\gamma_{Mf}} =$$

| Nr | Belastungsschwingbreite inf. Verkehrslast LM71 ΔP [kN/m ²] | Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²] | Anriss- schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5}$ [-] | Belastungsschwingbreite inf. Verkehrslast LM71 $\Delta P_{\gamma Mf}$ [kN/m ²] | Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\gamma Mf}$ [N/mm ²] | Anriss- schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\gamma Mf}$ [-] |
|----|---|--|--|---|--|--|
| 0 | $0,0 \cdot LM71 \square \square$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 10 | $1,0 \cdot LM71 \square \square$ | $\Delta\sigma_{10}$ | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5 \ 10}$ | $\Delta P_{\gamma Mf \ 10}$ | $\Delta\sigma_{\gamma Mf \ 10}$ | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\gamma Mf \ 10}$ |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 50 | $5,0 \cdot LM71 \square \square$ | $\Delta\sigma_{50}$ | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5 \ 50}$ | $\Delta P_{\gamma Mf \ 50}$ | $\Delta\sigma_{\gamma Mf \ 50}$ | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\gamma Mf \ 50}$ |

Die in Tabelle 5.20 angeführten Bezeichnungen sind nicht speziell für Hauptzugwerte oder Vergleichswerte spezifiziert, sie gelten aber sinngemäß für beides. Es ist allerdings zu beachten, dass aus dem gleichen Belastungsniveau ΔP die entstehenden Belastungsschwingbreiten $\Delta P_{\gamma Mf}$ der zwei Versagenshypthesen nicht gleich sind. Aus diesem Grund sind sie mit der Bezeichnung $\Delta P_{\gamma Mf,\sigma 1}$ und $\Delta P_{\gamma Mf,\sigma V}$ unterschieden.

5.11 Linearisierung der Bauteil-Wöhlerlinien

Der letzte Schritt zur Bestimmung der Lebensdauer der Lochdübelreihe, mit dem Anspruch auf eine einfach anwendbare Ingenieurmethode, ist die Linearisierung der zuvor berechneten nicht-linearen Wöhlerlinien. Die einzelnen Kurven werden durch Regressionsgeraden im doppellogarithmischen Maßstab ersetzt. Die Aufgabe liegt darin, die Wöhlerlinienneigung m und ein beliebiges Wertepaar ($\Delta\sigma_i \mid N_i$ bzw. $\Delta P_i \mid N_i$) nach der Methode der kleinsten Quadrate zu bestimmen. Die dafür benötigten mathematischen Zusammenhänge sind in [9] detailliert beschrieben.

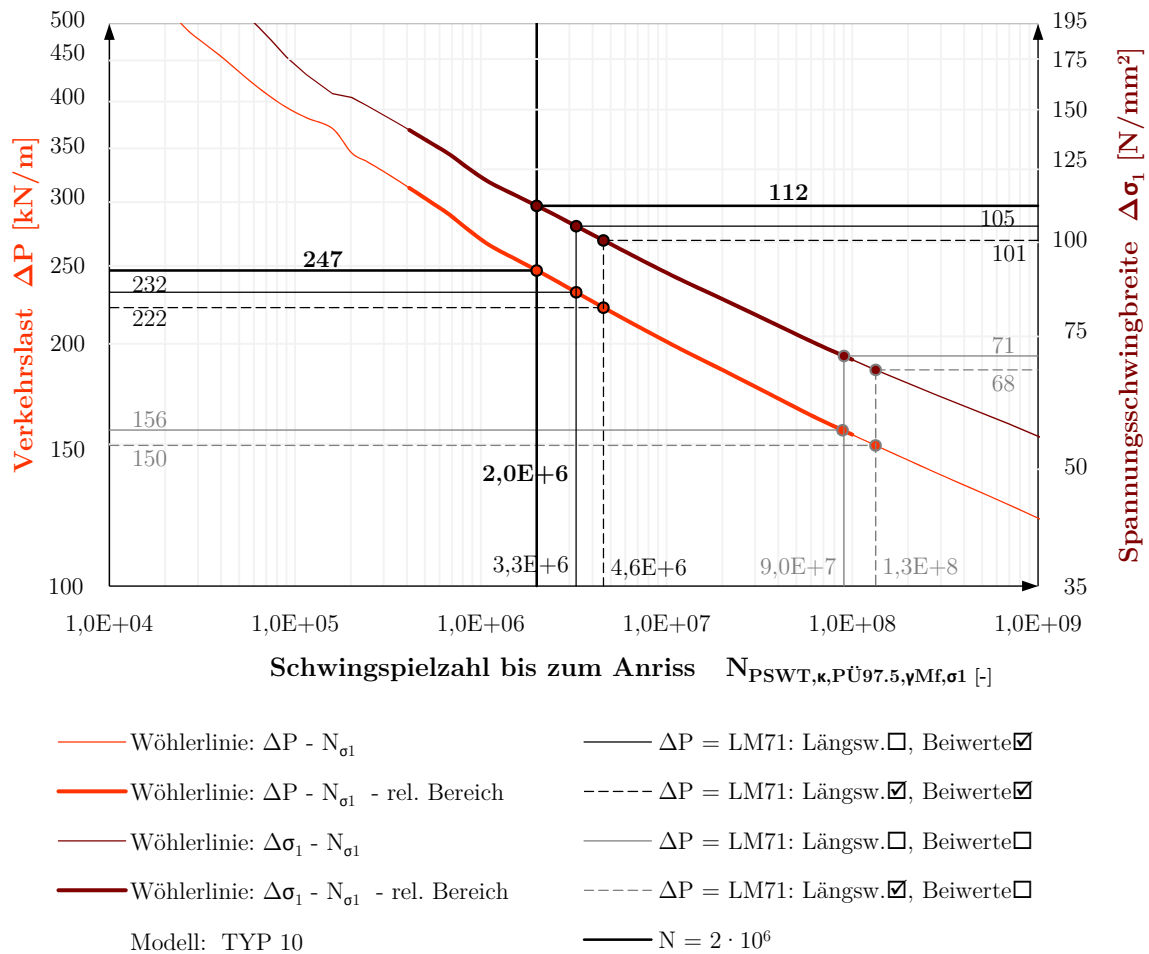


Abbildung 5.38: Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP - Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_1$ - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma_1}$

Als Beispiel für die Linearisierung werden die Wöhlerlinien $\Delta P - N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma_1}$ nach *Rankine* (s. Abbildung 5.38, untere Linie) und $\Delta P - N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma_V}$ nach *von Mises* (s. Abbildung 5.39, untere Linie) herangezogen. Die beiden nichtlinearen Verläufe wurden nach der strengsten Methode (M5) gemäß Tabelle 5.4 in Kapitel 5.3.4 ermittelt, somit sind alle in der vorliegenden Arbeit berücksichtigten Einflüsse auf die Lebensdauer enthalten.

Für Vergleichszwecke zeigen die beiden Abbildungen auch die widerstandsseitige Spannungsschwingbreite (Wöhlerlinien $\Delta \sigma_1 - N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma_1}$ und $\Delta \sigma_V - N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma_V}$). Es ist erkennbar, dass eine eindeutige Zuordnung von ΔP zu $\Delta \sigma$ bei gleicher Schwingspielzahl gegeben ist, z.B.: Bei Betrachtung eines Lastniveaus von $\Delta P = 232 \text{ kN/m}$ nach Abbildung 5.38 ergibt sich eine Spannungsschwingbreite von $\Delta \sigma_1 = 105 \text{ N/mm}^2$ bei einer Lebensdauer von 3,3 Millionen Lastspielen.

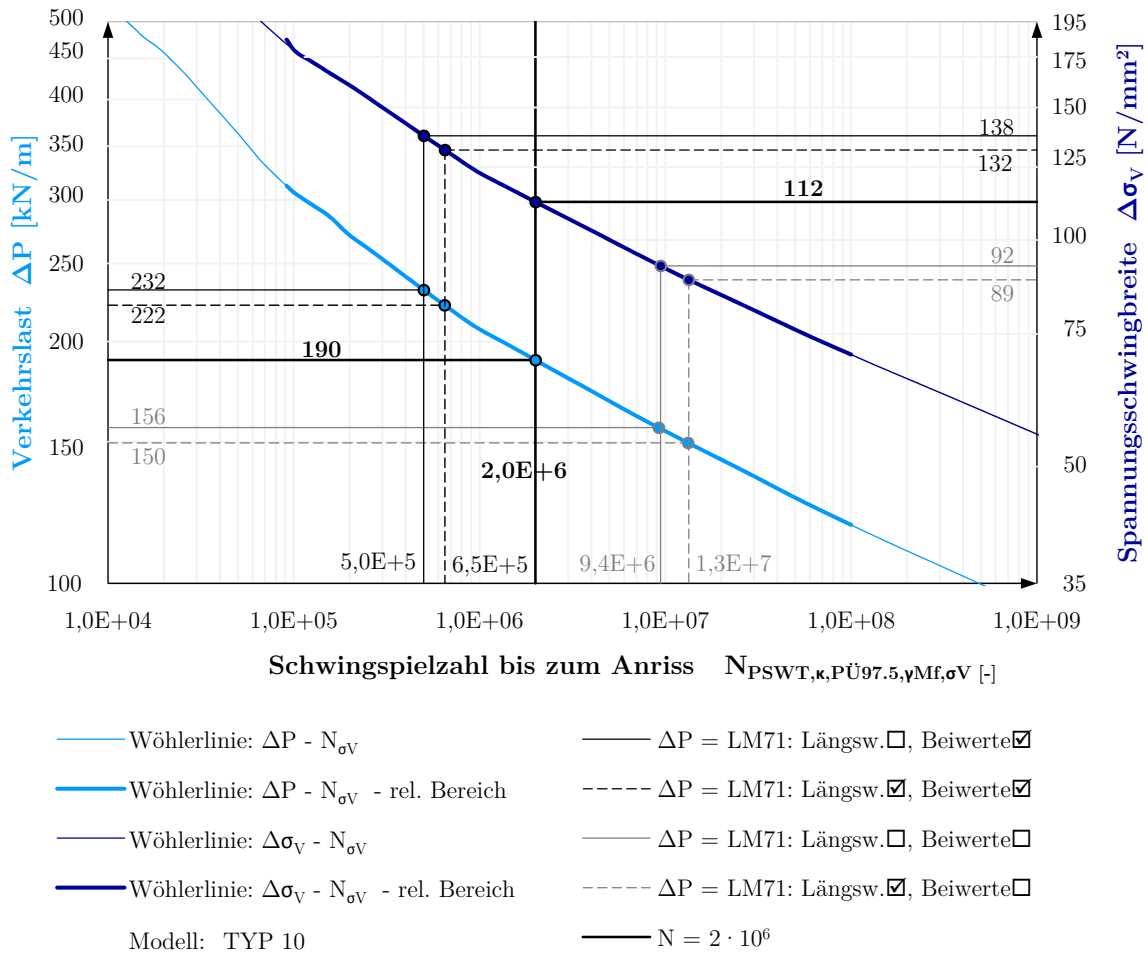


Abbildung 5.39: Wöhlerlinien:
 Belastungsschwingbreite ΔP - Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_V$ - Schwingspielzahl
 $N_{PSWT, \kappa, P\ddot{U}97.5, \gamma Mf, \sigma V}$

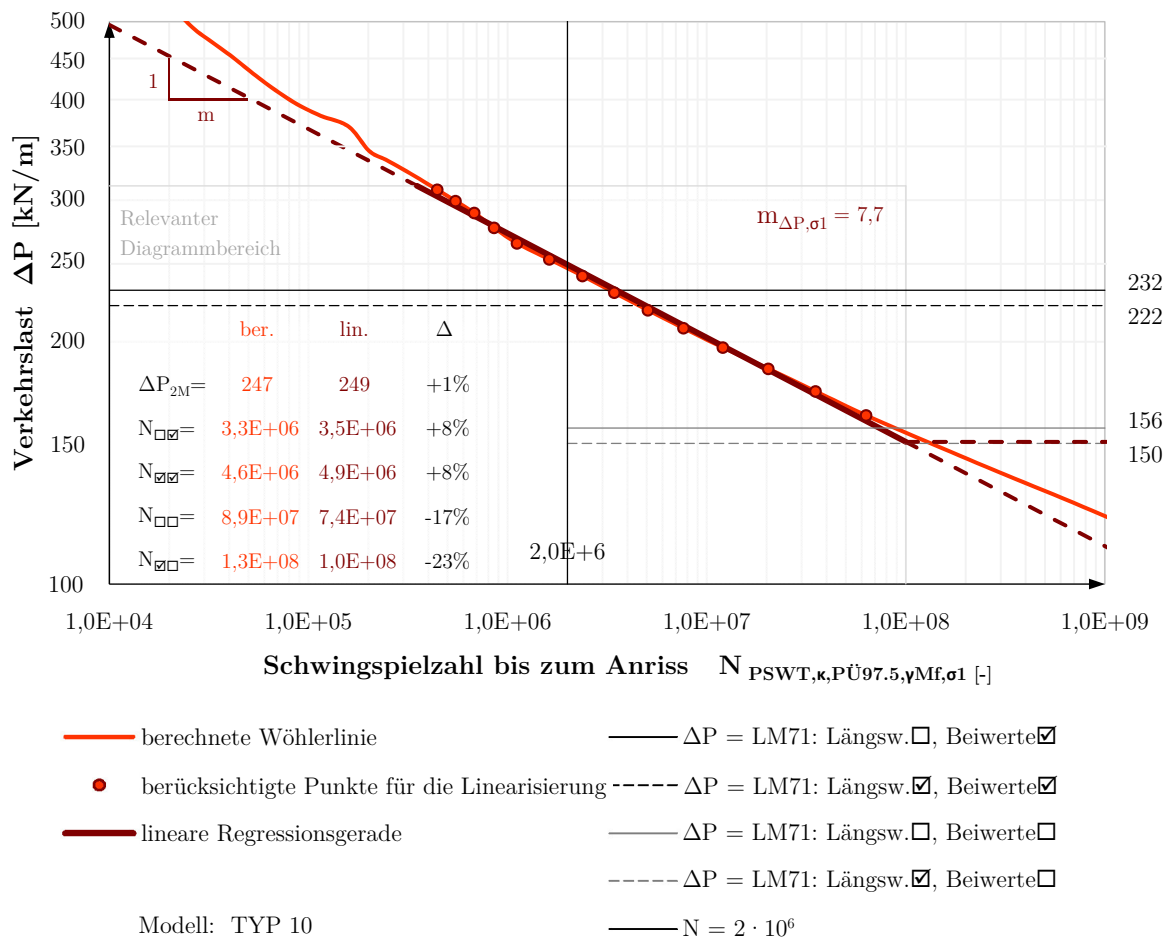


Abbildung 5.40: Linearisierung der Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,PÜ97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$

Abbildung 5.40 und Abbildung 5.41 zeigen die Ergebnisse der linearen Regression anhand des Modells *TYP 10*. Die Darstellungen enthalten jeweils die ursprüngliche, sowie die linearisierte Bauteil-Wöhlerlinie. Die zuvor ermittelten, nichtlinearen Funktionsverläufe wurden für die Ermittlung der Ausgleichsgeraden wie folgt abgegrenzt:

- $\Delta P \leq 2,0 \cdot LM71 \square\square$
- $10^4 \leq N \leq 10^8$

Die untere Grenze der berücksichtigten Lebensdauerwerte (10^4) entspricht der Grenzschwingspielzahl zwischen dem Kurzzeit- und Zeitfestigkeitsbereich, die oberen Grenze (10^8) stimmt mit der Schwingspielzahl bei dem Schwellenwert $\Delta\sigma_L$ der Ermüdungsfestigkeit nach *Eurocode 3* [5] zusammen. Nur solche Wertepaare wurden für die Linearisierung berücksichtigt, die in diesen Bereich – genannt als *relevanter Diagrammbereich* – fallen. Es ist erkennbar, dass etwa 15 Wertepaare für die Linearisierung herangezogen werden. Die Anzahl der Punkte ist somit für die Linearisierung weitgehend ausreichend.

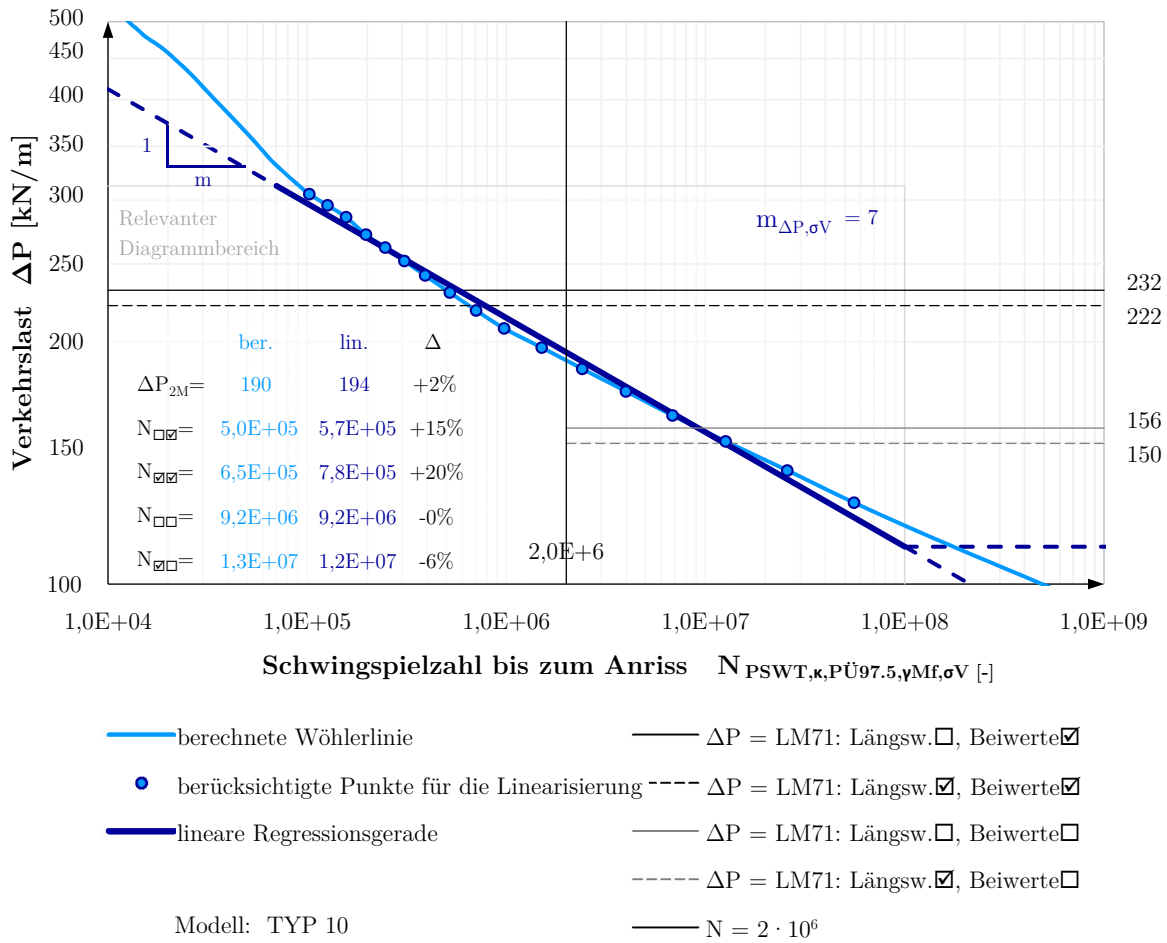


Abbildung 5.41: Linearisierung der Wöhlerlinien:
 Belastungsschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,PÜ97.5,\gamma Mf,\sigma V}$

Wie aus den Diagrammen ersichtlich ist, zeigen die resultierenden Regressionsgeraden eine gute Übereinstimmung mit den zuvor berechneten nichtlinearen Verläufen. Die prozentualen Differenzen bei den vier Verkehrslastniveaus und bei einer Lastspielzahl von $N = 2$ Millionen sind auf den Abbildungen tabellarisch dargestellt (Beispiel: $\frac{194}{190} - 1 = 0,02$ in Prozent ausgedrückt ist dies +2%).

Im Falle der Lebensdauerberechnung auf Basis der Hauptzugbeanspruchung nach *Rankine* ergibt sich eine Neigung von $m_{\Delta P,\sigma 1} = 7,7$ und eine ertragbare Belastungsschwingbreite bei zwei Millionen Lastwechseln von $\Delta P_{\sigma 1,2M} = 249 \text{ kN/m}$. Wird stattdessen das Versagenskriterium nach *von Mises* in Betracht gezogen, so resultiert eine Wöhlerlinienneigung von $m_{\Delta P,\sigma V} = 7,0$ und eine Belastungsschwingbreite von $\Delta P_{\sigma V,2M} = 194 \text{ kN/m}$ (s. Abbildung 5.41).

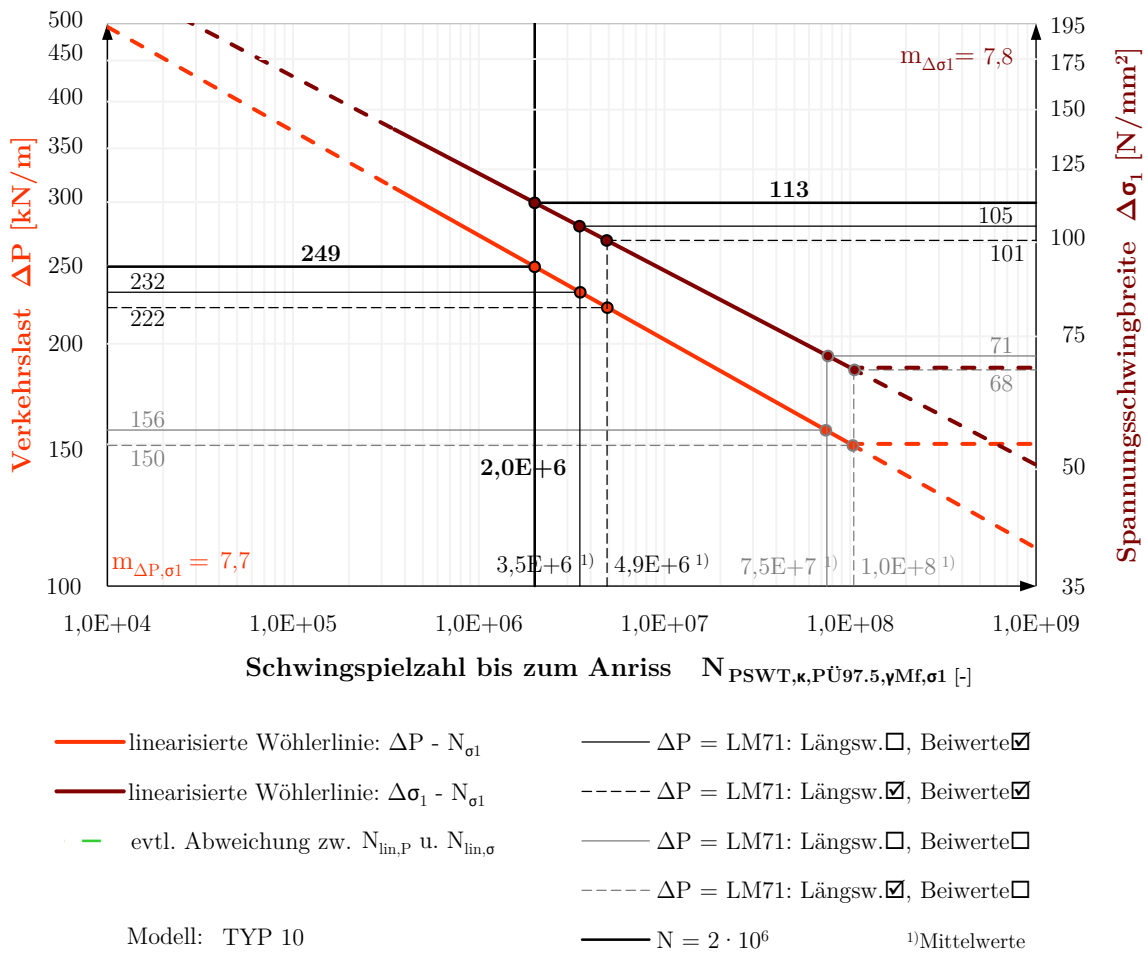


Abbildung 5.42: Linearisierte Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP - Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_1$ - Schwingspielzahl
 $N_{PSWT,\kappa,PÜ97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$

Die linearisierten Wöhlerlinien $\Delta \sigma_1 - N_{PSWT,\kappa,PÜ97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ nach *Rankine* (s. Abbildung 5.42, obere Linie) und $\Delta \sigma_V - N_{PSWT,\kappa,PÜ97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ nach *von Mises* (s. Abbildung 5.43, obere Linie) wurden nach der gleichen Vorgehensweise ermittelt.

Zur Zuordnung von ΔP zu $\Delta \sigma$ bei gleicher Schwingspielzahl auf Basis der linearisierten Wöhlerlinien: Es ist aufgrund der jeweiligen Linearisierungen keine eindeutige Zuordnung möglich. Infolgedessen sind die in Abbildung 5.42 und Abbildung 5.43 (nur in dieser zwei Abbildungen in der vorliegenden Arbeit) angegebenen Lebensdauerwerte ($3,5 \cdot 10^6$; $4,9 \cdot 10^6$; $7,5 \cdot 10^7$; $1,0 \cdot 10^8$) jeweils als gerundete Mittelwerte aus den beiden Linearisierungen ermittelt. Die Abweichungen zu den jeweiligen genauen Lastspielzahlen sind jedoch sehr gering, siehe Abbildung 5.44 und Tabelle 5.21. Diese stellen die Abweichungen zwischen den Lebensdauerwerten

infolge $LM71 \square \boxtimes$, aufgrund der beiden Linearisierungen (Wöhlerlinien ΔP - $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ bzw. $\Delta \sigma_1$ - $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$), vergrößert dar.

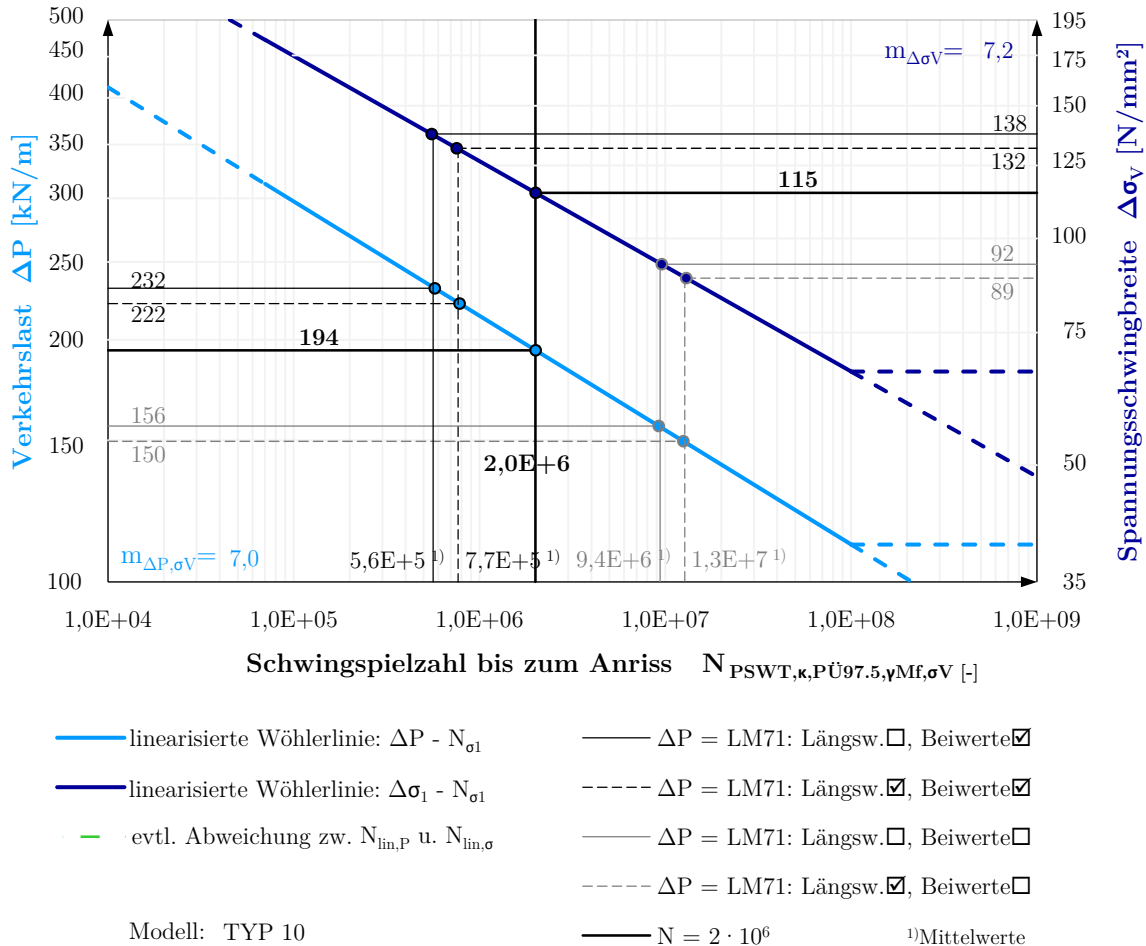
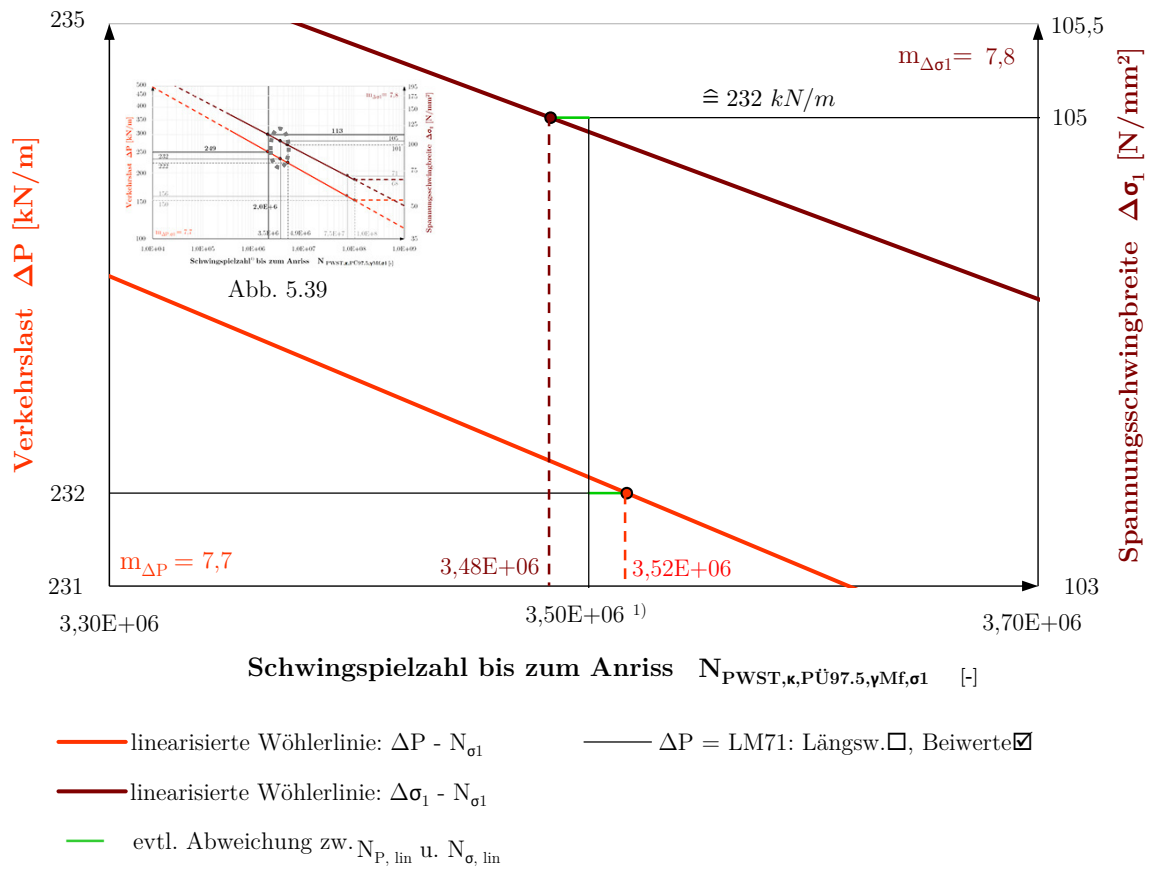


Abbildung 5.43: Linearisierte Wöhlerlinien:
 Belastungsschwingbreite ΔP - Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_V$ - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$

Bei Betrachtung eines Lastniveaus von $\Delta P = 232 \text{ kN/m}$ ($LM71 \square \boxtimes$) ergibt sich anhand der Wöhlerlinie ΔP - $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ eine Lebensdauer von $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1} = 3,52 \cdot 10^6$. Die Belastungsschwingbreite $\Delta \sigma_1 = 105 \text{ N/mm}^2$ – die unter $LM71 \square \boxtimes$ entsteht – entspricht nach der Wöhlerlinie $\Delta \sigma_1$ - $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ einer Lebensdauer von $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1} = 3,48 \cdot 10^6$. Die prozentuale Differenz zwischen beiden Werten beträgt $\frac{3,52}{3,48} - 1 = 0,011$, dies entspricht 1,1% und ist somit vernachlässigbar.



Modell: TYP 10

¹⁾Mittelwert

Abbildung 5.44: Linearisierte Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP - Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_1$ - Schwingspielzahl
 $N_{PWS,T,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ - vergrößerte Darstellung

Tabelle 5.21 Vergleich der Lebensdauerwerte mit und ohne Linearisierung

| Lastniveau | ohne Linearisierung | Linearisierung von ΔP - $N_{PWS,T,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ | Linearisierung von $\Delta \sigma_1$ - $N_{PWS,T,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ | Mittelwerte aus den beiden Linearisierungen |
|------------------------|---------------------|--|---|---|
| $LM71 \square \square$ | $3,26 \cdot 10^6$ | $3,48 \cdot 10^6$ | $3,52 \cdot 10^6$ | $3,50 \cdot 10^6$ |
| $LM71 \square \square$ | $4,57 \cdot 10^6$ | $4,88 \cdot 10^6$ | $4,92 \cdot 10^6$ | $4,90 \cdot 10^6$ |
| $LM71 \square \square$ | $8,87 \cdot 10^7$ | $7,58 \cdot 10^7$ | $7,38 \cdot 10^7$ | $7,48 \cdot 10^7$ |
| $LM71 \square \square$ | $1,33 \cdot 10^8$ | $1,05 \cdot 10^8$ | $1,03 \cdot 10^8$ | $1,04 \cdot 10^8$ |

Kapitel 6

Parameterstudien

6.1 Einleitung

Die Parameterstudien werden anhand des SCSC-Plattenmodells durchgeführt. Innerhalb der Studien werden die Einflüsse mehrerer Parameter auf den Berechnungsaufwand bzw. die Berechnungszeit und die Kerbbeanspruchungen in der maßgebenden Kerbe analysiert. Tabelle 6.1 zeigt einen Überblick über die untersuchten Einflussfaktoren und Tabelle 6.2 gibt eine detaillierte Übersicht über die Berechnungsmodelle, deren Auswertung im Folgenden vorgestellt wird. Die Modellbezeichnungen resultieren aus den zugrunde liegenden Modellparametern. Die untersuchten Parameter können in zwei Gruppen geteilt werden. Die Stahlsorte, die Betongüte und die Schotterbetthöhe sind reale Einflüsse, die während der Planung und der Realisierung eines Brückenprojektes variiert werden können. Die restlichen sind Modellierungsparameter, mit denen die Plausibilität, d.h. die Treffsicherheit der Berechnungsergebnisse erhöht bzw. der Berechnungsablauf optimiert werden kann.

Tabelle 6.1 Überblick über die untersuchten Parameter

| | Parameter | Einfluss auf die maximalen Spannungs- und Dehnungswerte | Einfluss auf die Treffsicherheit und die Berechnungszeit |
|------------------------|------------------------------------|---|--|
| reale Einflüsse | Stahlsorte | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Betongüte | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Schotterbetthöhe | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Modellierungsparameter | Netzdichte - Dübelbereich | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Netzdichte - Global | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Dübelreihe oben/unten angeschweißt | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Schweißnahtmodell Endplatte | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Betonmodell | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Belastungsgeschwindigkeit | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

Tabelle 6.2 Berechnungsmodelle der Parameterstudie

| Nr. | Modell | Stahl- sorte | Beton- güte | Schotter- betthöhe | Netzdicke Dübel | Netzdicke Global | Dübelste Schweiß- naht | Schweiß- naht- modell Endpl. | Beton- modell | Belastungs- geschwindigkeit |
|-----|--|-----------------|----------------|-----------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------|----------------------------------|
| 1 | TYP 1 S355.C40/50.N.grob.grob.oben.voll.d1z1.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | grob | grob | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 2 | TYP 2 S355.C40/50.N.mittel.grob.oben.voll.d1z1.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | grob | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 3 | TYP 3 S355.C40/50.N.fein.grob.oben.voll.d1z1.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | fein | grob | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 4 | TYP 4 S355.C40/50.N.mittel.mittel.oben.voll.d1z1.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 5 | TYP 5 S355.C40/50.N.fein.mittel.oben.voll.d1z1.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | fein | mittel | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 6 | TYP 6 S355.C40/50.N.mittel.mittel.unten.voll.d1z1.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | unten | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 7 | TYP 7 S355.C40/50.N.mittel.mittel.oben.halb.d1z1.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | halb | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 8 | TYP 8 S355.C40/50.N.mittel.mittel.oben.halb.d2z1.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | halb | d2z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 9 | TYP 9 S355.C40/50.N.mittel.mittel.oben.halb.d2z2.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | halb | d2z2 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 10 | TYP 10 S355.C40/50.N.mittel.mittel.oben.halb.d2z3.z | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | halb | d2z3 | 10 [kN/m²/fr.] |
| 11 | TYP 11 S355.C40/50.N.mittel.mittel.oben.halb.d2z4.x | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | halb | d2z4 | 6 [kN/m ² /frame] |
| 12 | TYP 12 S355.C40/50.N.mittel.mittel.oben.voll.d1z1.y | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | voll | d1z1 | 8 [kN/m²/fr.] |
| 13 | TYP 13 S355.C40/50.N.mittel.mittel.oben.voll.d1z1.z | S355 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | voll | d1z1 | 10 [kN/m²/fr.] |
| A | TYP A S235.C40/50.N.mittel.mittel.oben.voll.d1z1.x | S235 | C40/50 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| B | TYP B S355.C25/30.N.mittel.mittel.oben.voll.d1z1.x | S355 | C25/30 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| C | TYP C S235.C25/30.N.mittel.mittel.oben.voll.d1z1.x | S235 | C25/30 | Nennhöhe | mittel | mittel | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| D | TYP D S355.C40/50.-30.mittel.mittel.oben.voll.d1z1.x | S355 | C40/50 | -30% | mittel | mittel | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |
| E | TYP E S355.C40/50.+30.mittel.mittel.oben.voll.d1z1.x | S355 | C40/50 | +30% | mittel | mittel | oben | voll | d1z1 | 6 [kN/m ² /frame] |

Erläuterungen zu Tabelle 6.2 erfolgen in den nachfolgenden Abschnitten.

Zu Beginn der Untersuchungen werden die Einflüsse der unterschiedlichen Modellierungsparameter untersucht. Anhand des optimalsten und plausibelsten Modells werden anschließend die realen Einflüsse untersucht.

6.2 Parameterstudie I: Modellierungsparameter

6.2.1 Einfluss der Netzfeinheit

Als erstes wird bei Parameterstudie I der Einfluss der Netzfeinheit untersucht. Das Grundprinzip ist bei der Diskretisierung das Folgende: Je feiner die Vernetzung eines Finite-Elemente-Modells ist, desto höher ist die Genauigkeit der Simulation und zwangsläufig desto größer ist der Berechnungsaufwand (Zunahme an Freiheitsgraden im System). Das Ziel kann also mit dem Einfachheitsprinzip ausgedrückt sein, das allen Ingenieuren bekannt ist: „Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!“

Der einfachste Weg, um die Netzqualität zu erhöhen, ist die Verwendung unterschiedlicher Netzdichten. Die Vernetzung sollte also an solchen Stellen des Bauteils verfeinert werden, an denen hohe Spannungsgradienten vorliegen. Um das optimale Verhältnis zwischen der feinen und der groben Diskretisierung zu finden, wurden 5 Modelle mit unterschiedlichen Vernetzungen konstruiert. Es wurde dabei sowohl die *globale* Netzdichte (*grob* bzw. *mittel*) als auch die *lokale* Netzdichte (*grob*, *mittel*, *fein*) variiert, siehe Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3 Netzdichte der Modelle *TYP 1 - TYP 5*

| | <i>lokale</i> Netzdichte im Dübelbereich | <i>globale</i> Netzdichte außerhalb des Dübelbereichs | Anzahl der Finiten- Elemente |
|--------------|---|--|---------------------------------|
| <i>TYP 1</i> | <i>grob</i> | <i>grob</i> | 142.037 |
| <i>TYP 2</i> | <i>mittel</i> | | 257.538 |
| <i>TYP 3</i> | <i>fein</i> | | 445.032 |
| <i>TYP 4</i> | <i>mittel</i> | <i>mittel</i> | 497.364 |
| <i>TYP 5</i> | <i>fein</i> | | 716.763 |

Die Netzgeometrien wurden durch unterschiedliche Vorgaben der Anzahl der Elemente pro Elementkante definiert. Mit dieser Methode konnte sichergestellt werden, dass bei Kontaktflächen die beiden angrenzenden Kanten auf gleiche Art und Weise diskretisiert werden. Dieser Methode kommt bei den angrenzenden Stahl- und Betonflächen im Dübelbereich, wo die maß-

gebenden örtliche Beanspruchungen auftreten, eine besondere Bedeutung zu. Tabelle 6.4 fasst die charakteristischen Elementkantenlängen der maßgebenden Bauteile zusammen. Die Aufweitungen bzw. Verdichtungen des FE-Netzes wurden durch Definition von *edge seeds* mit Hilfe der Funktion *bias* realisiert. Die genauen FE-Netzdaten (Elementkantenlänge, Anzahl der Elemente, Verdichtung) der gesamten SCSC-Platte sind dem Anhang A.3 zu entnehmen.

Tabelle 6.4 Charakteristische Elementkantenlänge der Modelle *TYP 1 - TYP 5*

| | <i>lokale</i> Kantenlänge im Dübelbereich [mm] | | <i>globale</i> Kantenlänge außerhalb des Dübelbereichs [mm] | |
|--------------|---|------------|--|------------|
| | Dübeltiefe | Dübelkante | Stahlteile | Betonteile |
| <i>TYP 1</i> | 5,0 | 5,0 | ~ 5-56 | ~ 10-56 |
| <i>TYP 2</i> | 3,3 | 3,1 | | |
| <i>TYP 3</i> | 2,5 | 2,2 | | |
| <i>TYP 4</i> | 3,3 | 3,1 | ~ 4-41 | ~ 8-41 |
| <i>TYP 5</i> | 2,5 | 2,2 | | |

In Abbildung 6.1 bis Abbildung 6.6 werden die resultierenden Netzvarianten verglichen.

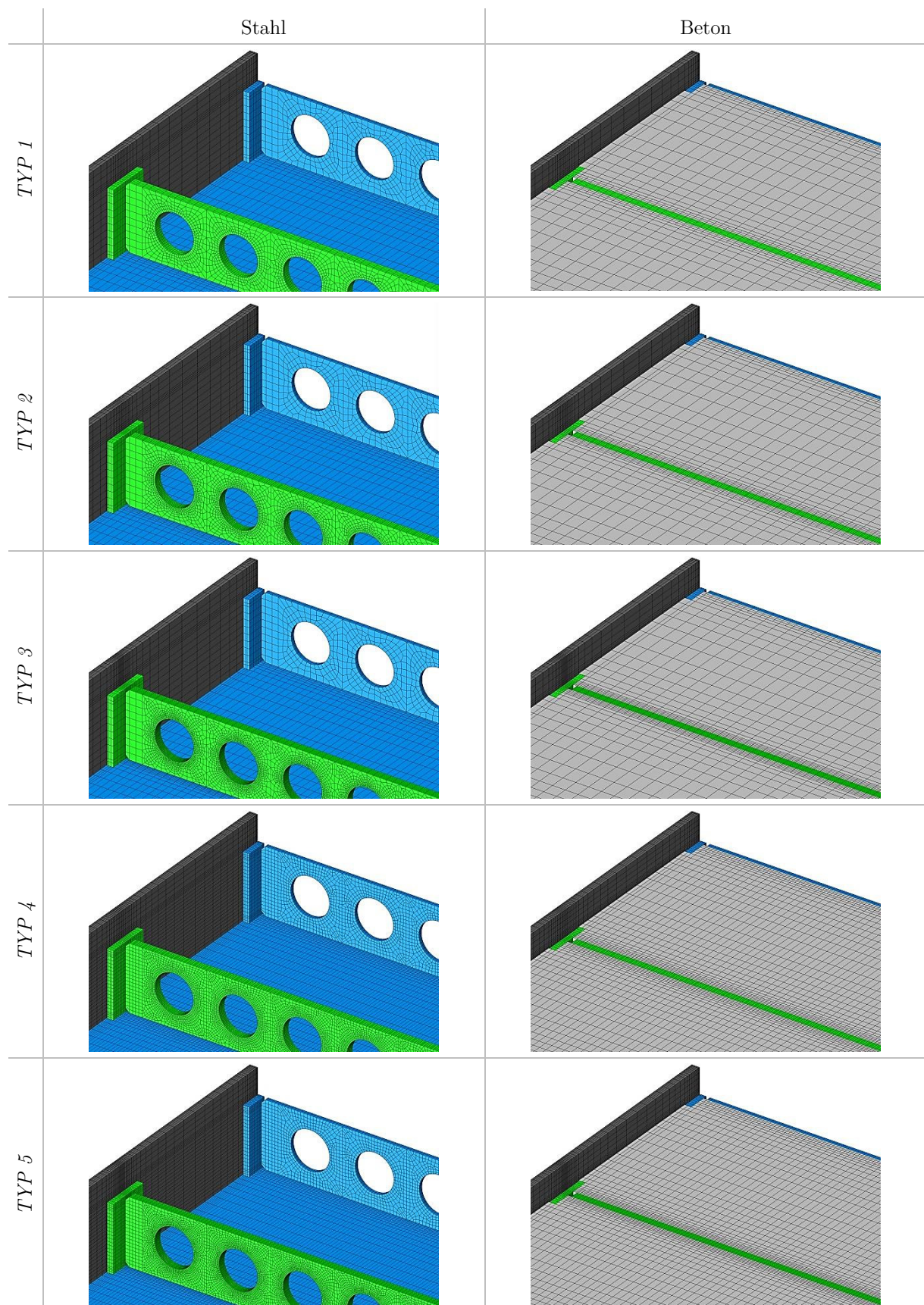


Abbildung 6.1: Meshvarianten der Modelle TYP 1 - TYP 5 - globale Ansicht

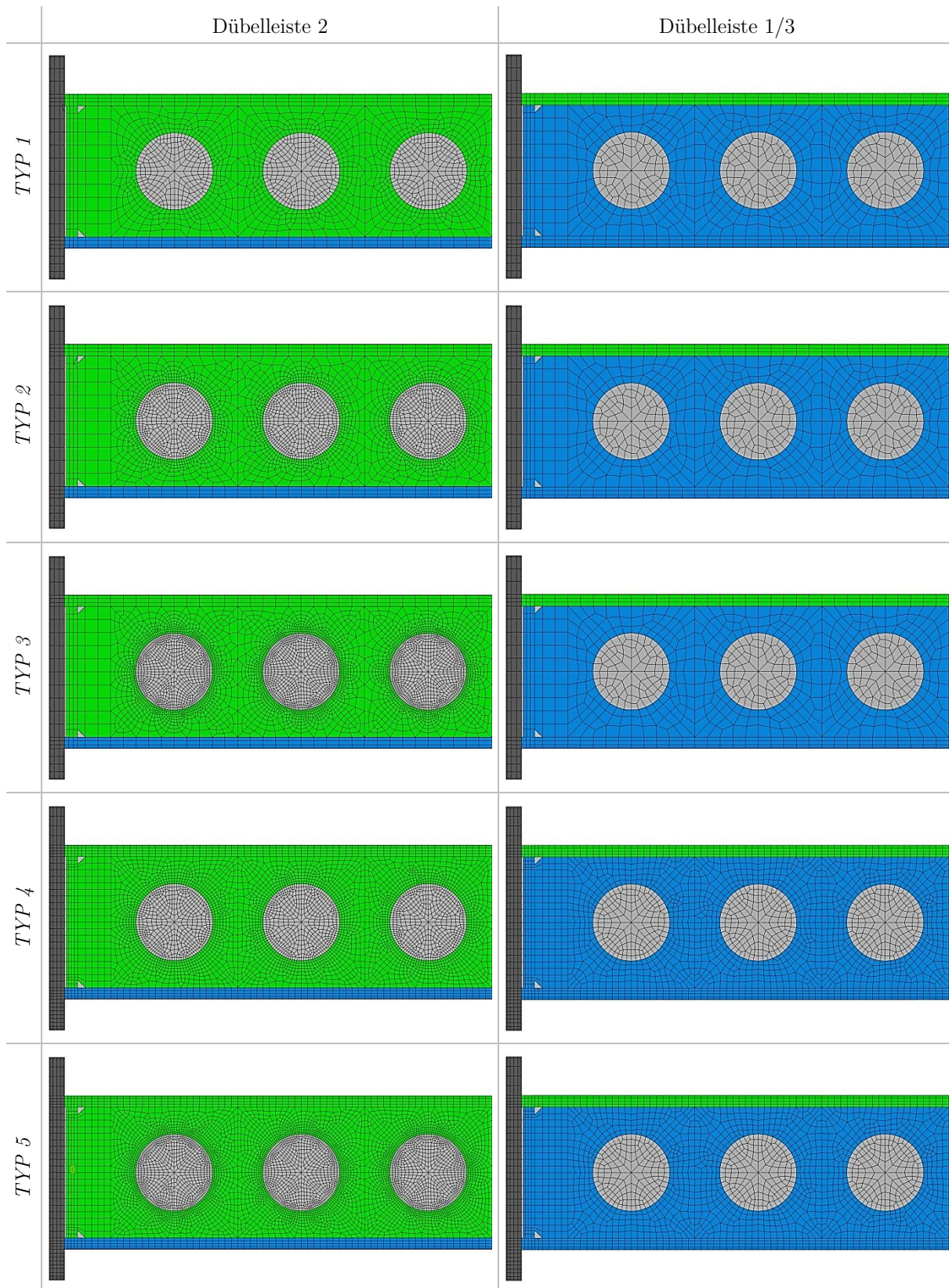


Abbildung 6.2: Meshvarianten der Modelle *TYP 1 - TYP 5* - Brückenquerschnitt

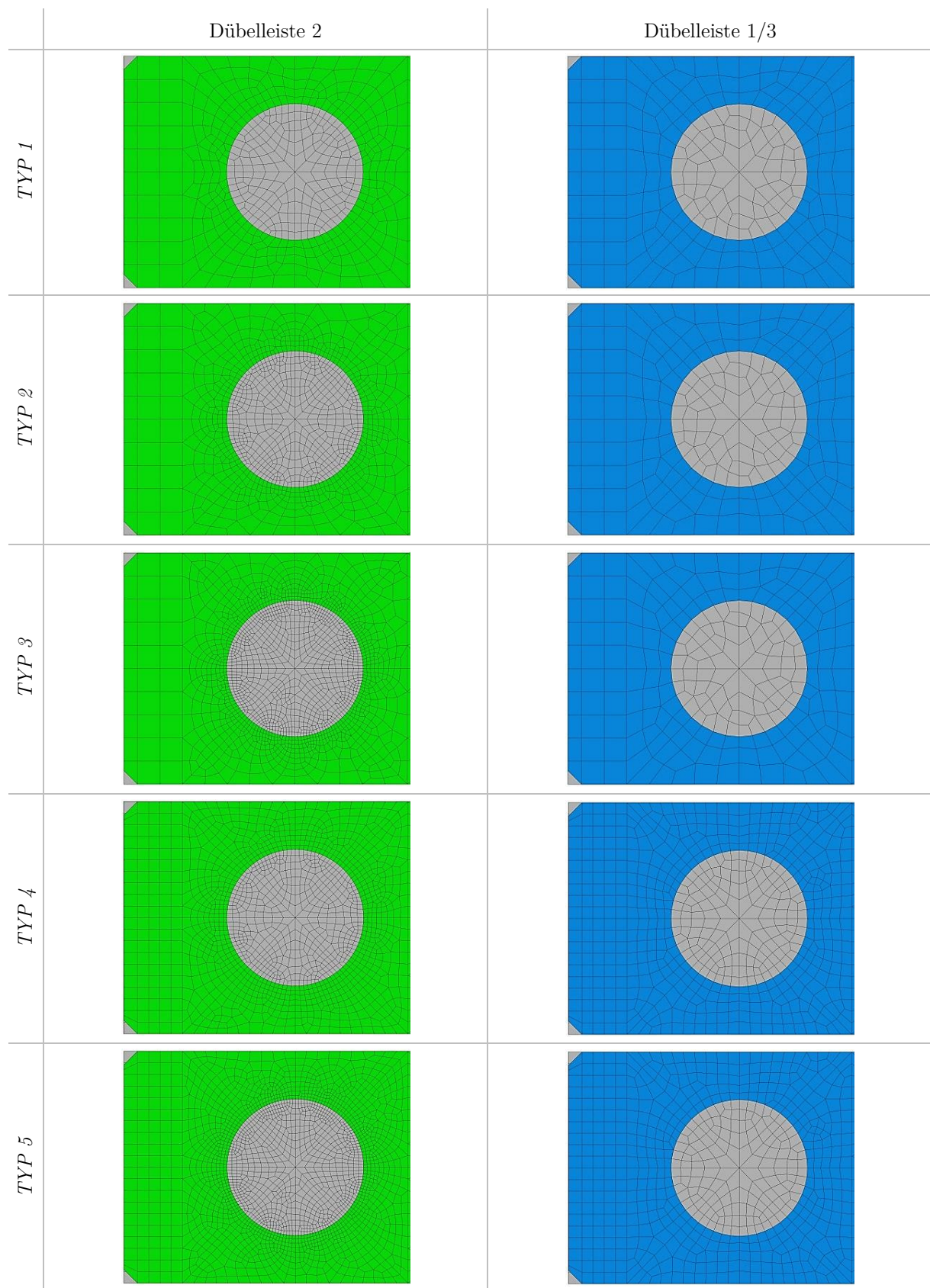


Abbildung 6.3: Meshvarianten der Modelle TYP 1 - TYP 5 - Dübelbereich

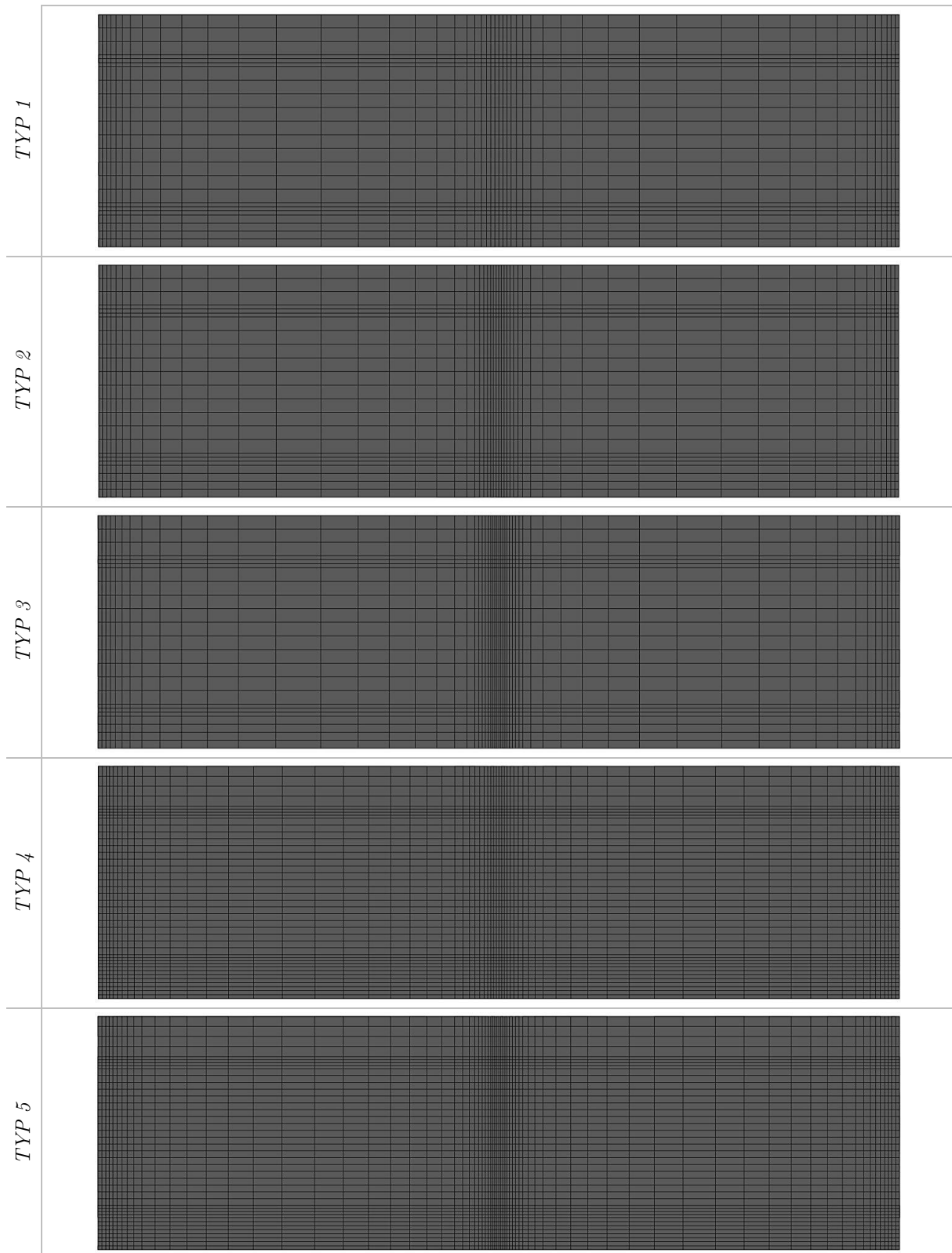


Abbildung 6.4: *Mesh*varianten der Modelle *TYP 1* - *TYP 5* - Ansicht Endplatte

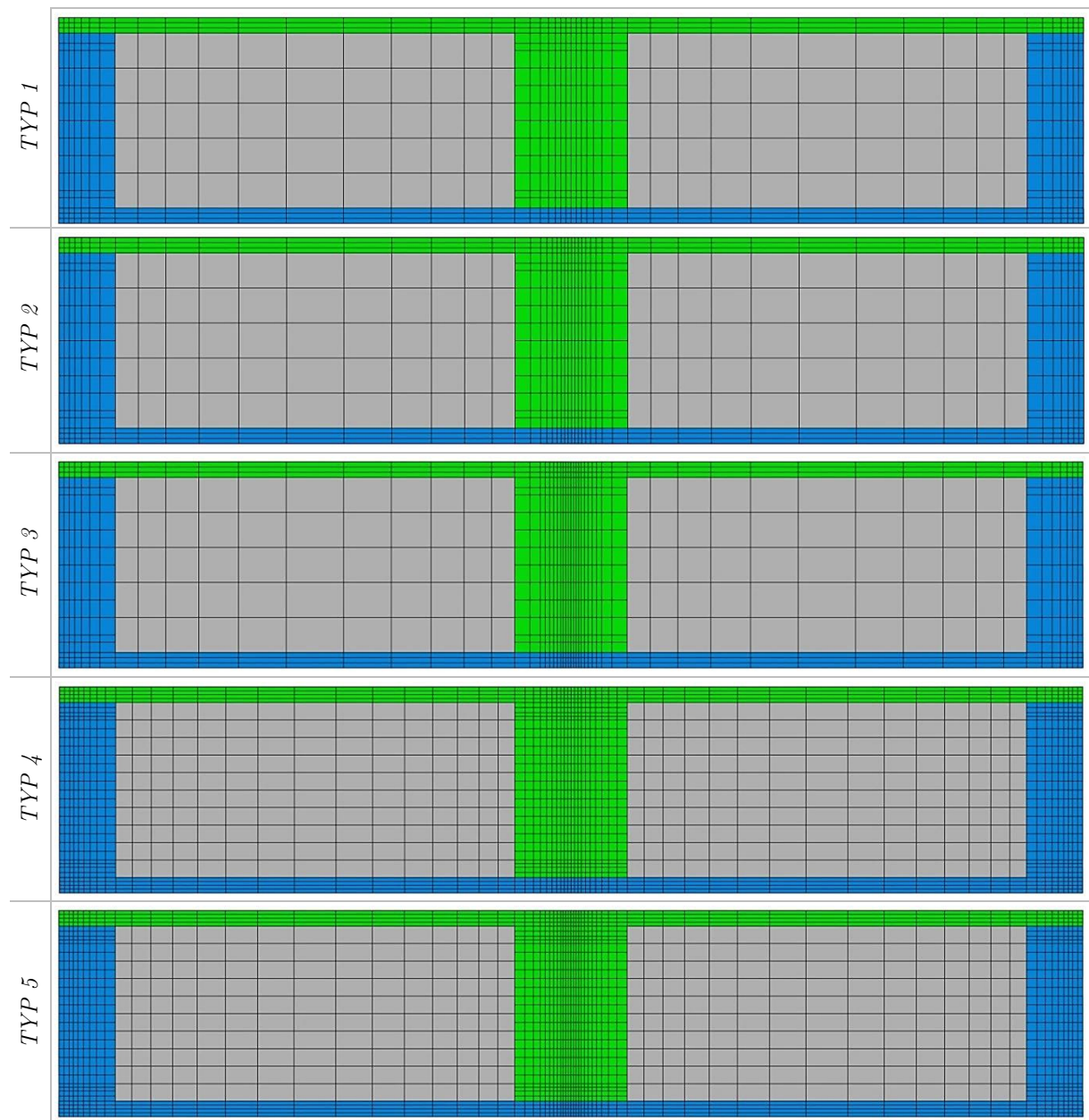


Abbildung 6.5: *Mesh*varianten der Modelle *TYP 1* - *TYP 5* - Brückenlängsschnitt bei Auflagersteifen

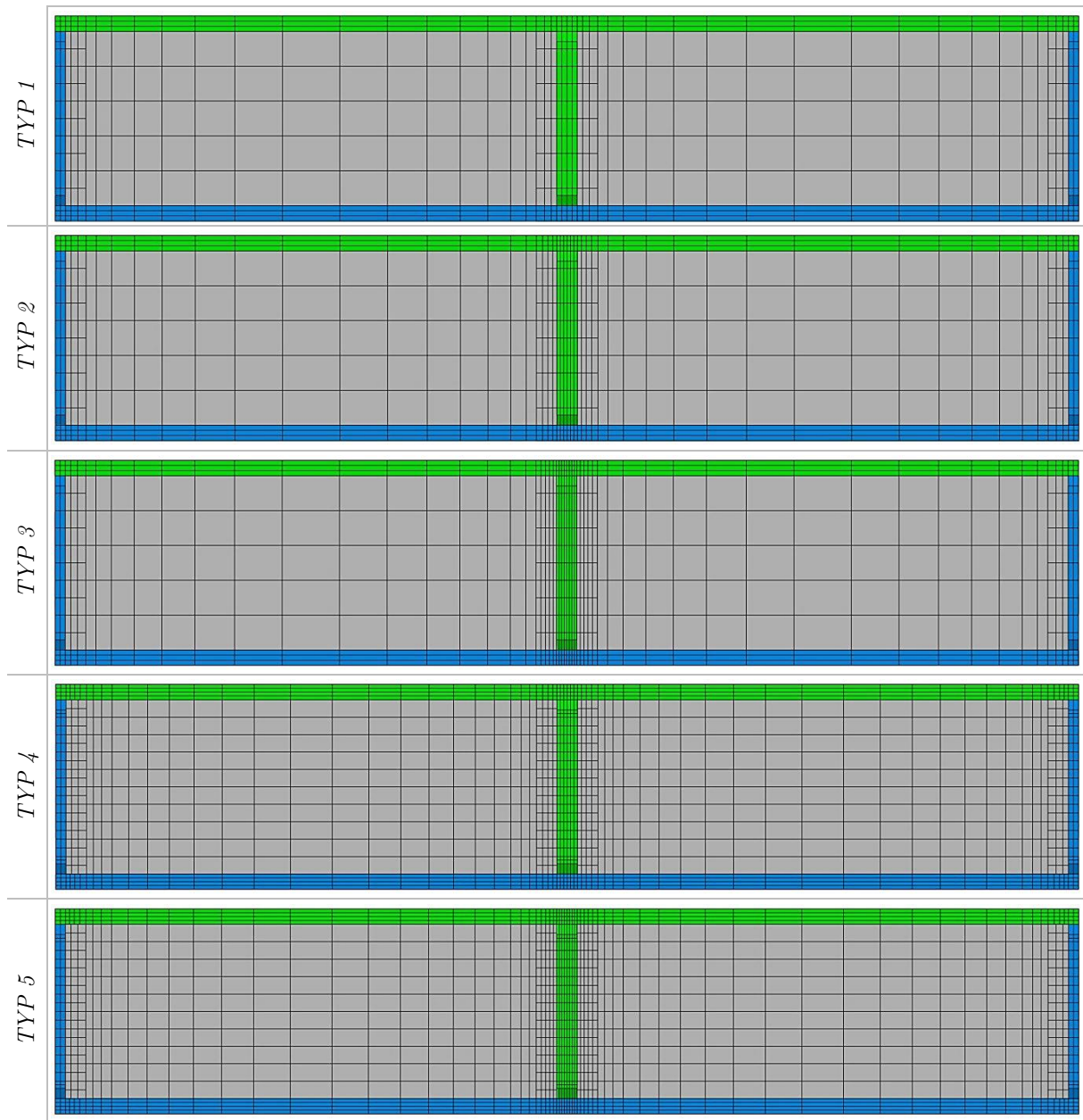


Abbildung 6.6: *Mesh*varianten der Modelle *TYP 1 - TYP 5* - Brückenlängsschnitt

- **Einfluss der Netzfeinheit auf die Berechnungszeit**

Wie vorher beschrieben, hat die Variierung der Netzfeinheit einen besonderen Einfluss auf die Anzahl der Finite-Elemente und so indirekt auf die Berechnungszeit. Um die Rechenzeiten zu verkürzen, wurden die FE-Analysen an dem so genannten *CAE-Cluster* der *TU Wien* parallel auf acht CPU-Kernen durchgeführt. Abbildung 6.7 enthält die Gegenüberstellung der Ergebnisse aller Modelle der Parameterstudie, die mit unterschiedlicher Netzfeinheit konstruiert wurden.

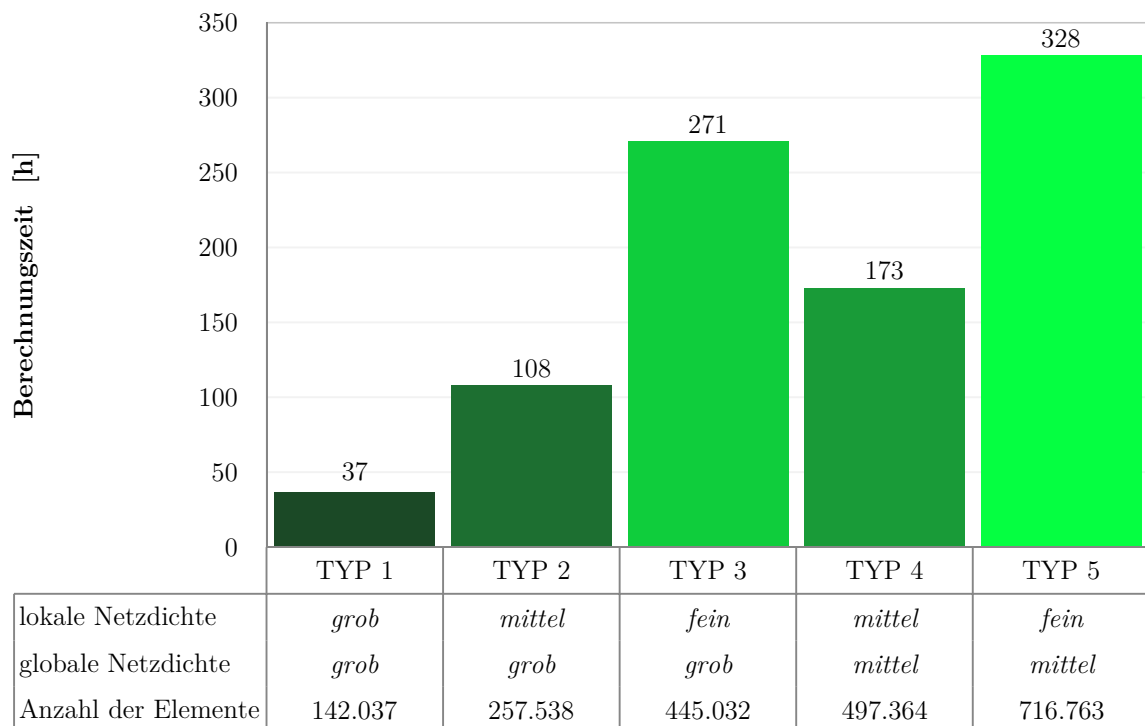


Abbildung 6.7: Vergleich der Berechnungszeiten in Abhängigkeit der Netzdichte

Zum Vergleich der Modelle *TYP 1/2/3*: Eine *lokale* Erhöhung der Netzdichte im Dübelbereich führt zu einer signifikanten Erhöhung der Berechnungszeit. Im Fall des Modells *TYP 3*, welches mit *feiner* Netzdichte im Dübelbereich diskretisiert wurde, war die Berechnungsstabilität kritisch: Die Berechnung hat mehrmals ohne Fehlermeldung von *ABAQUS* aufgehört. Aus diesen Gründen wird die Netzfeinheit *mittel* (Modelle *TYP 2* und *TYP 4*) für die Diskretisierung des Dübelbereichs gewählt.

Zum Vergleich der Modelle *TYP 2/4*: Eine Erhöhung der *globalen* Netzdichte führt im Vergleich zu einer Verfeinerung der Diskretisierung im Dübelbereich zu einer moderaten Erhöhung der Berechnungszeit. Als *globale* Netzfeinheit wird daher auch die Netzdichte *mittel* gewählt.

Aus den oben beschriebenen Gründen wird für die weiteren Modelle der Parameterstudie die Netzfeinheit *mittel, mittel* (Modell *TYP 4*) gewählt.

- **Einfluss der Netzfeinheit auf den Spannungsverlauf im Dübelfreisschnitt**

Zur Untersuchung des Einflusses der Netzfeinheit im Gesamtmodell auf die resultierenden Spannungen werden in Abbildung 6.8 bis Abbildung 6.16 drei Modelle der Parameterstudie gegenübergestellt:

- *TYP 1* mit Netzdichte *grob* im Dübelbereich
- *TYP 2* mit Netzdichte *mittel* im Dübelbereich
- *TYP 3* mit Netzdichte *fein* im Dübelbereich

Die *globale* Vernetzung der drei Modelle wurde gleichermaßen mit der Variante *grob* durchgeführt, das heißt, bei dieser Untersuchung handelt es sich um eine alleinige *lokale* Verdichtung der Diskretisierung.

Abbildung 6.8, Abbildung 6.11 und Abbildung 6.14 zeigen jeweils die unterschiedlichen Elementaufteilungen der oben angeschweißten Dübelleiste in Dickenrichtung. Im Fall des Modells *TYP 1* wurde die 20 mm Blechdicke auf 4 Elemente aufgeteilt. Somit ergäbe sich eine maximale Elementkantenlänge der meistbeanspruchten Elemente von 5 mm. Im Fall der Modelle *TYP 2* bzw. *TYP 3* resultierte die Aufteilung der Blechdicke auf 6 bzw. auf 8 Elemente in maximalen Elementkantenlängen von 3,3 bzw. 2,5 mm (vgl. Tabelle 6.4, Dübeltiefe).

In den nachfolgenden Abbildungen werden jeweils die resultierenden Hauptzug- bzw. Vergleichsspannungsverläufe σ_1 bzw. σ_V im Freisschnitt des Dübels 4 für unterschiedliche Lastniveaus dargestellt.

Zum Vergleich der resultierenden Spannungen in den Randelementen mit den Spannungen in den mittleren Elementen (vgl. Abbildung 6.9 bzw. 6.10 mit Abbildung 6.12 bzw. 6.13 und Abbildung 6.15 bzw. 6.16): Es ist erkennbar, dass eine *lokale* Verfeinerung der Netzdichte (nur im Dübelbereich) keinen besonderen Einfluss auf den relativen Spannungsverlauf hat.

Zum Vergleich der maximalen Spannungswerte (vgl. oben erwähnte Abbildungen): Das Ergebnis ist sehr eindeutig. Je feiner die *lokale* Vernetzung ist, desto höher sind die maximalen Spannungswerte. Dieses Verhalten ist sowohl im Fall der Hauptzugspannungen nach *Rankine*, als auch im Fall der Vergleichsspannungen nach *von Mises* erkennbar. Zur Untersuchung des Einflusses dieses Verhaltens auf die Lebensdauer werden als nächstes die entsprechenden Wöhlerlinien dargestellt.

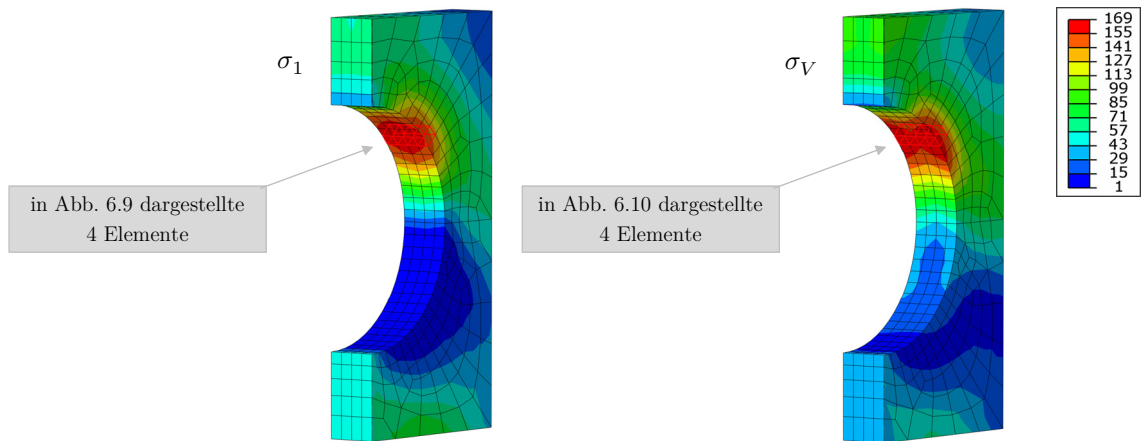


Abbildung 6.8: Spannungsbild im Freischnitt des Dübels 4 - Übersicht - Modell *TYP 1*

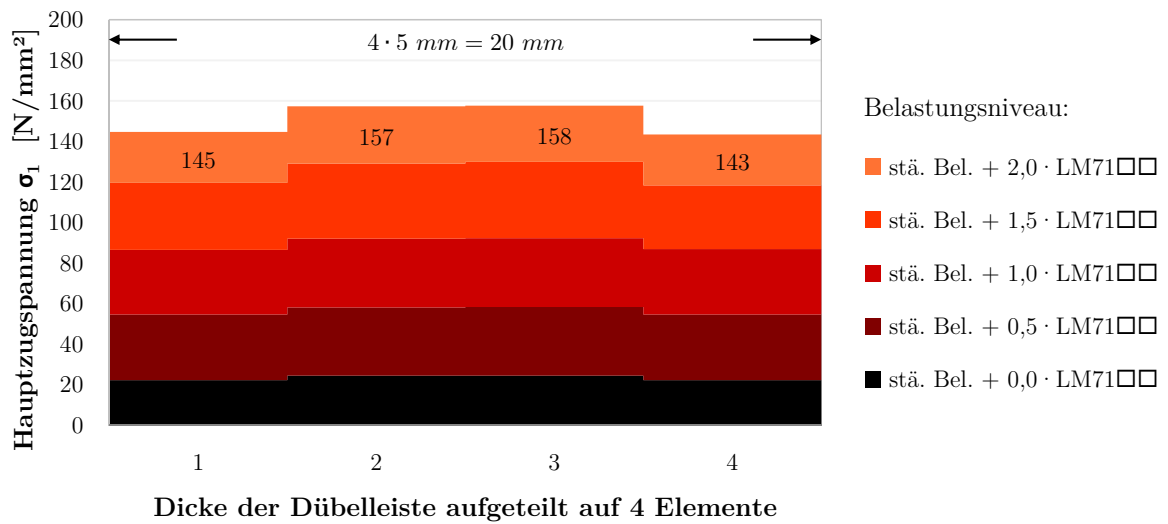


Abbildung 6.9: Hauptzugspannungsverlauf σ_1 im Dübelfreischnitt - Modell *TYP 1*

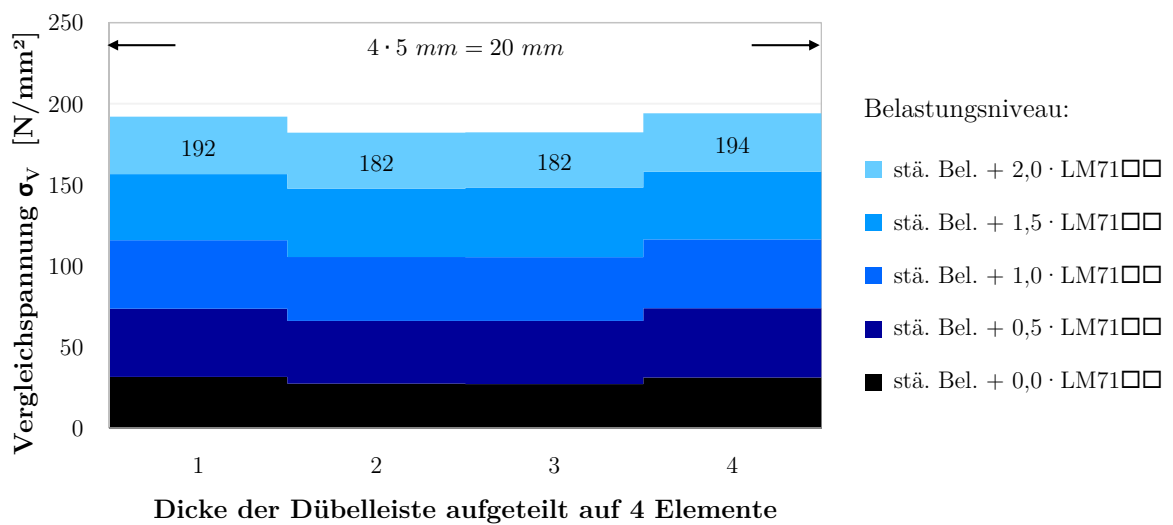


Abbildung 6.10: Hauptzugspannungsverlauf σ_V im Dübelfreischnitt - Modell *TYP 1*

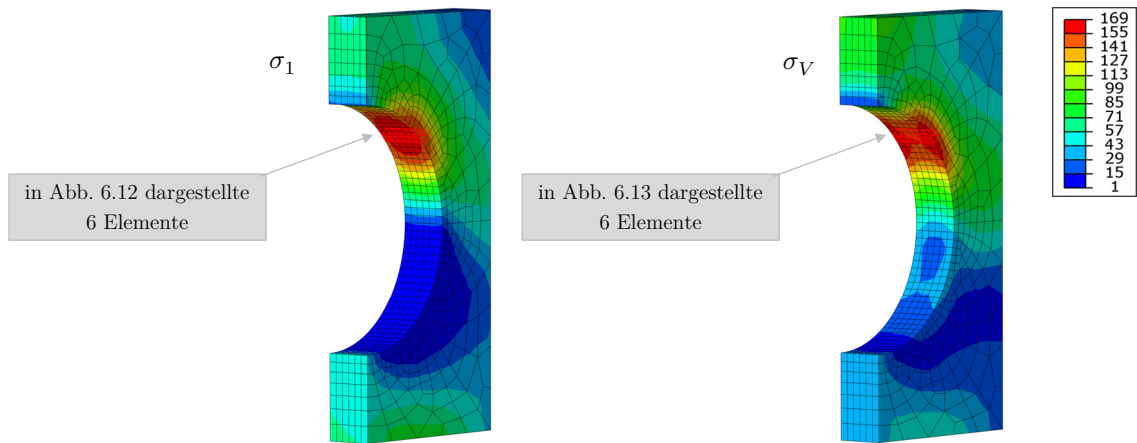


Abbildung 6.11: Spannungsbild im Freischnitt des Dübels 4 - Übersicht - Modell *TYP 2*

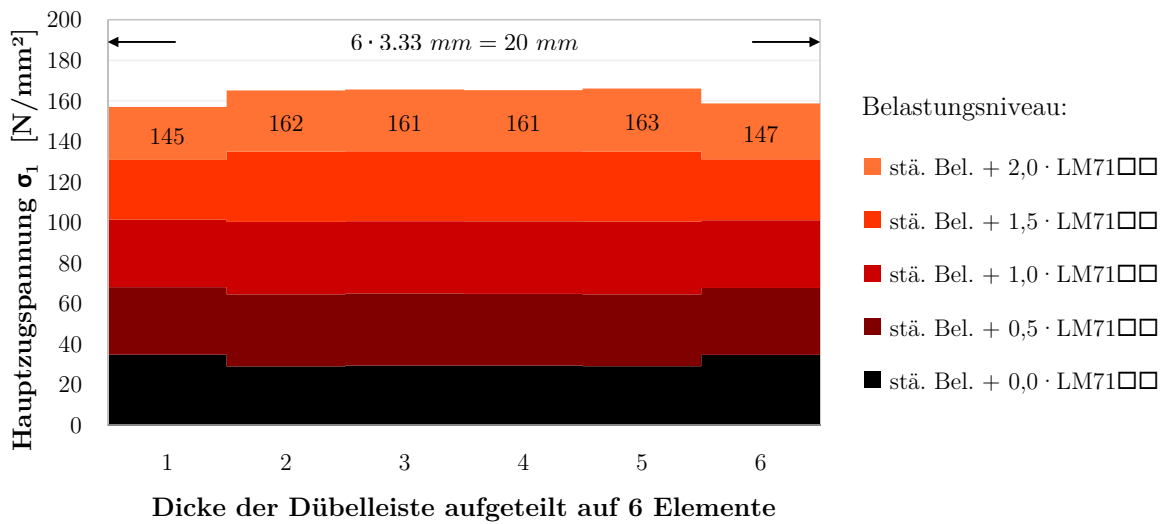


Abbildung 6.12: Hauptzugspannungsverlauf σ_1 im Dübelfreischnitt - Modell *TYP 2*

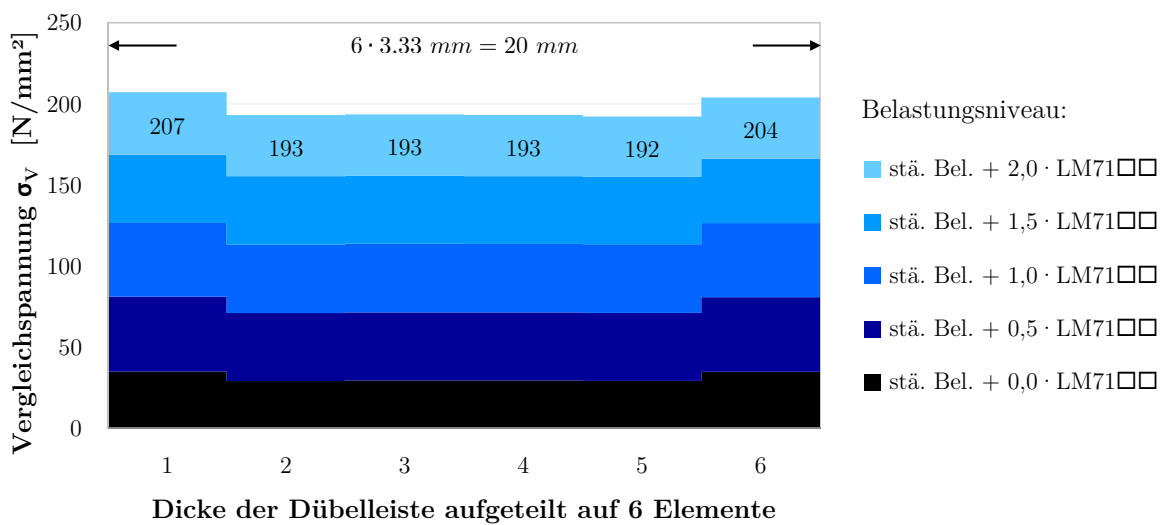


Abbildung 6.13: Vergleichsspannungsverlauf σ_v im Dübelfreischnitt - Modell *TYP 2*

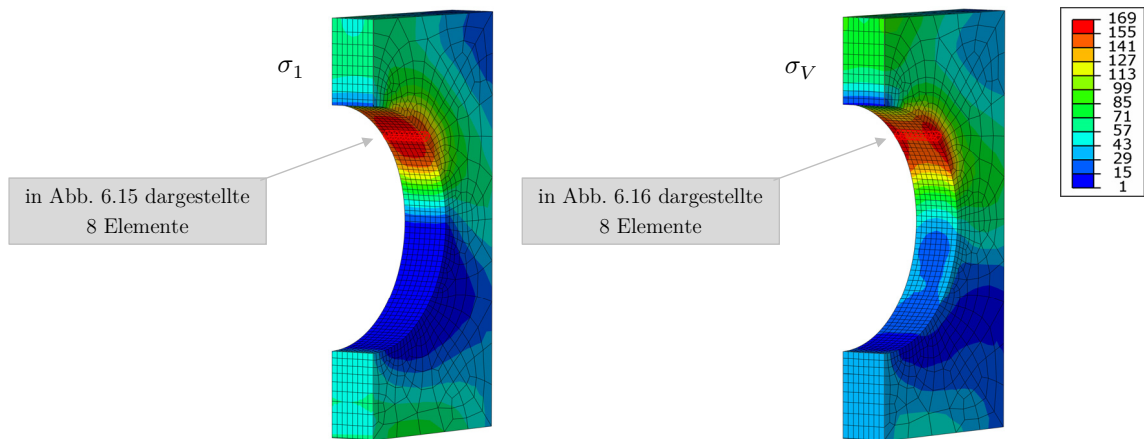


Abbildung 6.14: Spannungsbild im Freischnitt des Dübels 4 - Übersicht - Modell *TYP 3*

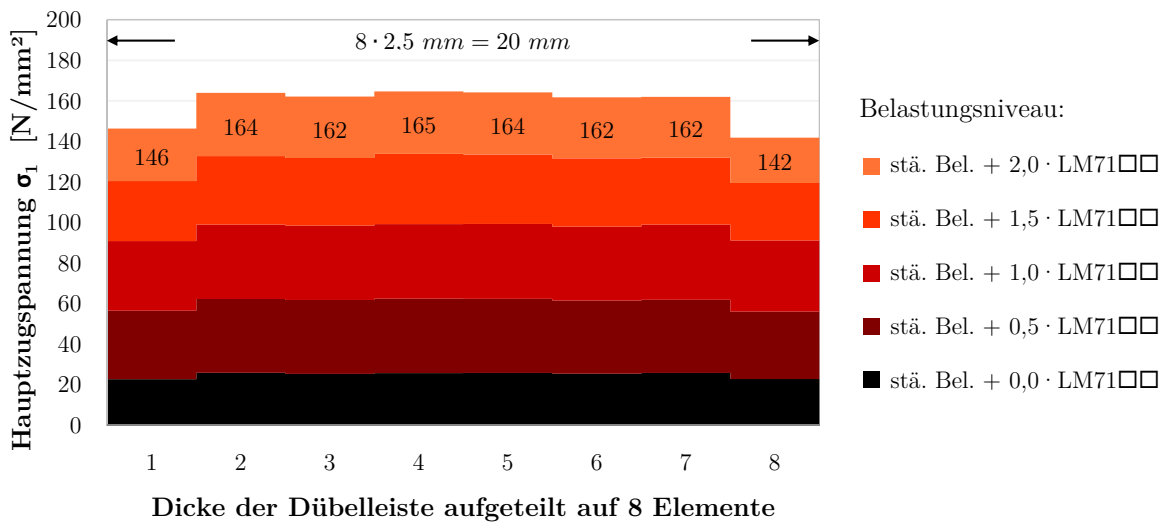


Abbildung 6.15: Hauptzugspannungsverlauf σ_1 im Dübelfreischnitt - Modell *TYP 3*

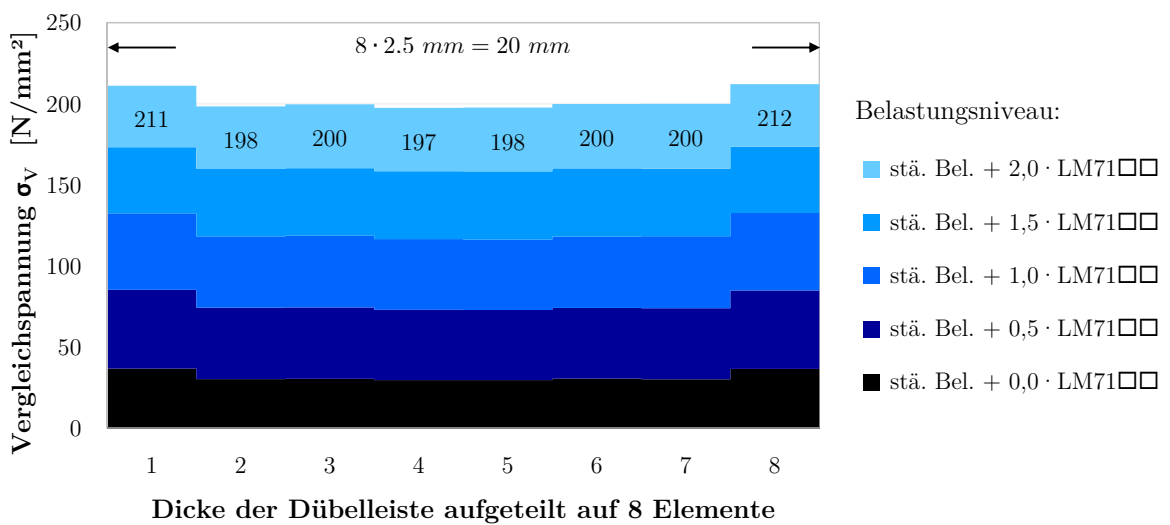


Abbildung 6.16: Vergleichsspannungsverlauf σ_v im Dübelfreischnitt - Modell *TYP 3*

• Einfluss der Netzfeinheit auf die Lebensdauer

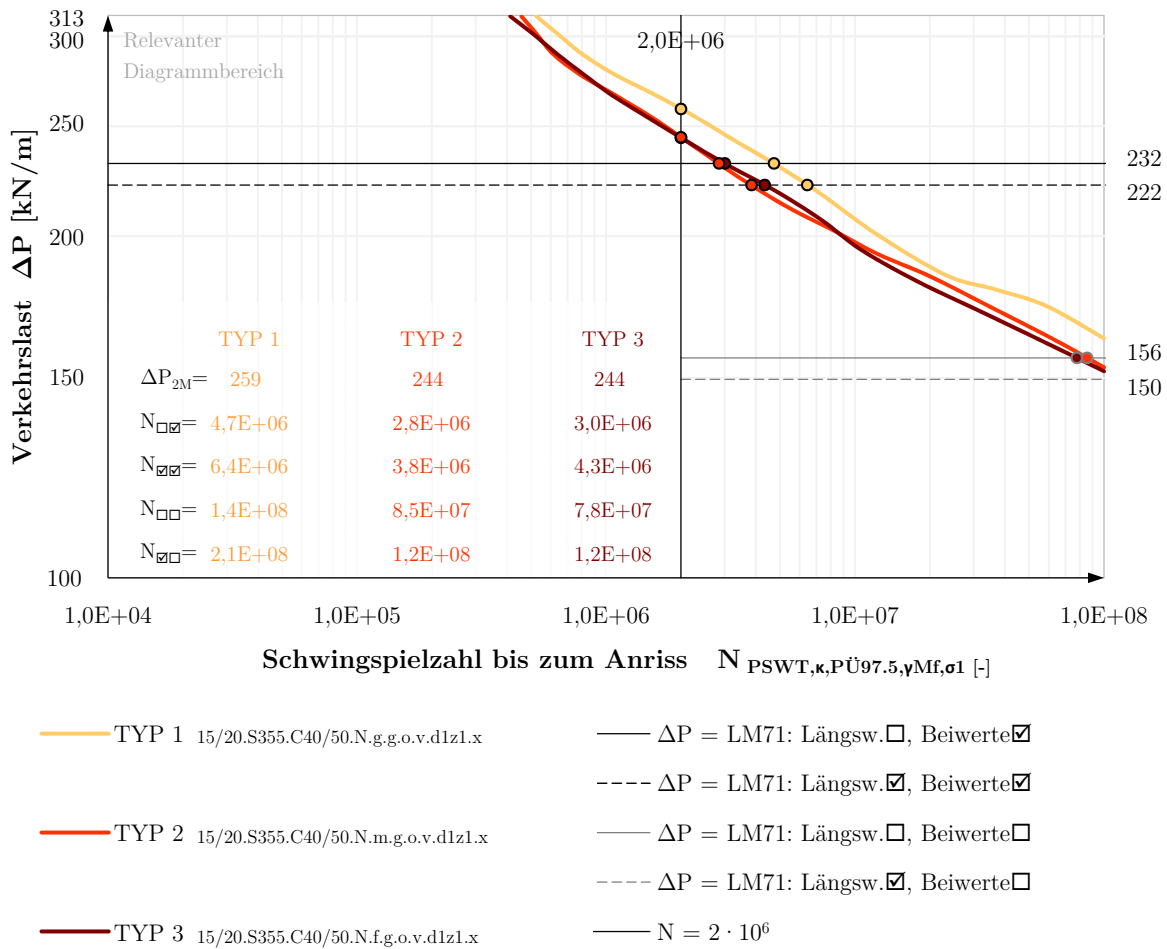


Abbildung 6.17: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
 Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingenzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
 Einfluss der Netzfeinheit im Dübelbereich auf die Lebensdauer:
TYP 1: grob, grob, TYP 2: mittel, grob, TYP 3: fein, grob

Zur Veranschaulichung der Auswirkung unterschiedliche Netzfeinheiten auf die Lebensdauer wurden die Ansätze $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ (nach *Rankine*) und $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ (nach *von Mises*) (Methode M5) gewählt. Diese nicht linearisierten Wöhlerlinien berücksichtigen die Einflüsse aus Mittelspannung σ_m und Oberflächenrauigkeit κ und enthalten die erhöhte Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}}$ und den Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} . Abbildung 6.17 zeigt die Bauteil-Wöhlerkurven, die auf Basis der Hauptzugbeanspruchungen nach *Rankine* ermittelt wurden. Die Wöhlerlinien in Abbildung 6.18 wurden auf Basis der Vergleichsspannungshypothese nach *von Mises* ermittelt. Hier kann auch beobachtet werden, dass eine lokale Erhöhung der Netzfeinheit in einer Spannungskonzentration resultiert und so indirekt die Lebensdauer verringert.

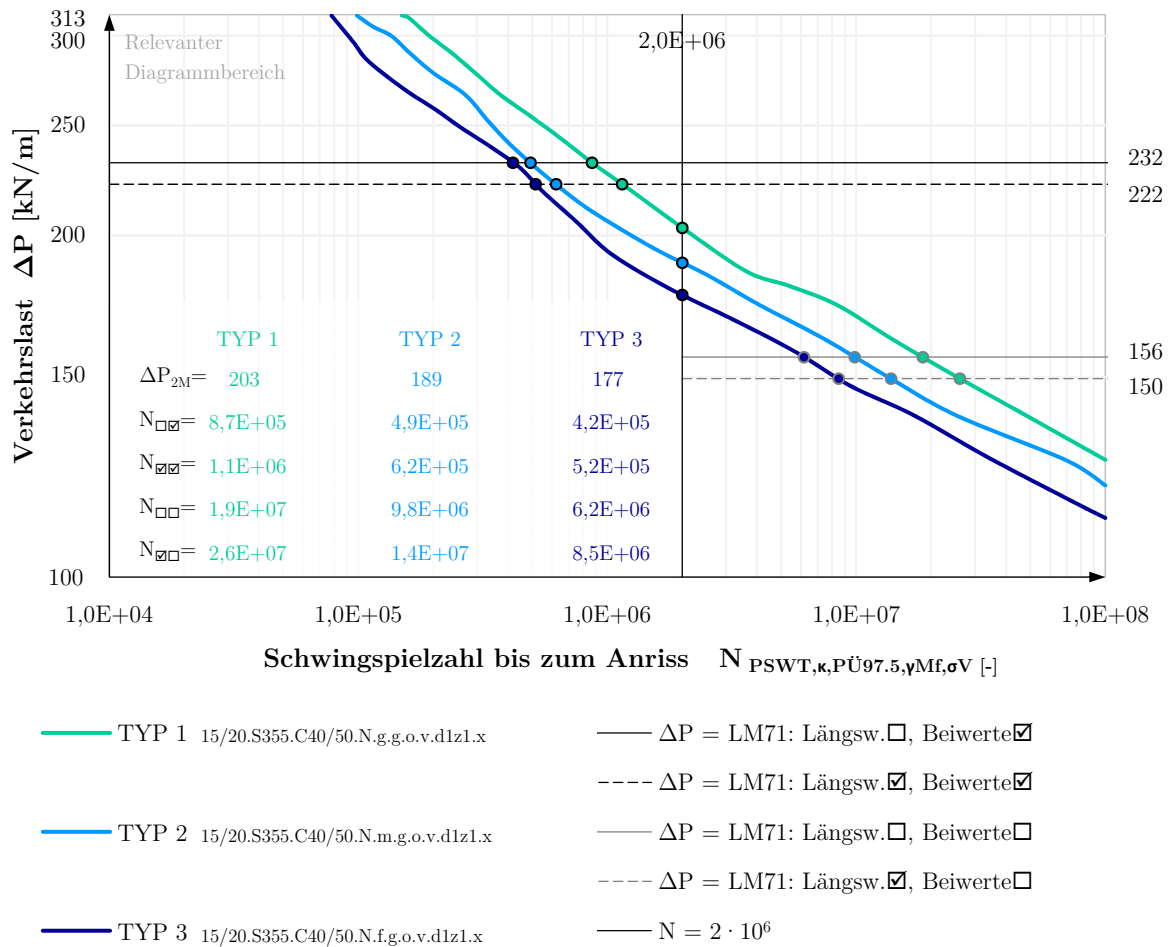
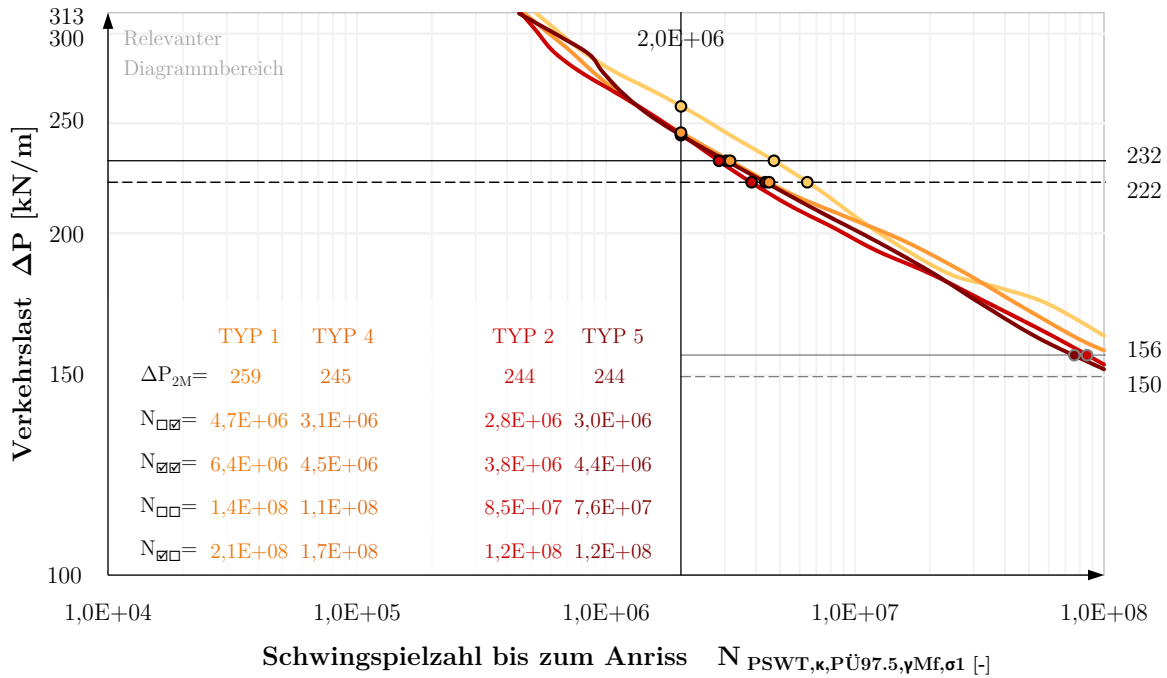


Abbildung 6.18: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT, \kappa, Pi97.5, \gamma Mf, \sigma V}$
Einfluss der Netzfeinheit im Dübelbereich auf die Lebensdauer:
TYP 1: grob, grob, TYP 2: mittel, grob, TYP 3: fein, grob

Es ist jedoch bemerkenswert, dass der Erhöhung der Netzdichte von *grob* auf *mittel* einen deutlich höheren Einfluss hat, als die Erhöhung von *mittel* auf *fein*. Im Fall einer Schädigungsbeurteilung auf Basis der Hauptzugspannungen hat letztere schon überhaupt keinen Einfluss mehr (vgl. Abbildung 6.17). Es kann damit festgestellt werden, dass die gewählte Diskretisierung *mittel* im Dübelbereich ausreichend ist und auf ein befriedigend genaues Ergebnis führt.

Diese Ergebnisse stimmen mit den Erkenntnissen von *Juen* [9] überein: Im Rahmen einer Lebensdauerberechnung von schubbeanspruchten Dübelleisten soll die maximale Elementkantenlänge im Bereich der meistbeanspruchten Stelle zwischen 2 mm und 3 mm (abhängig vom Radius des Dübelfreischchnittes) liegen [9].



- TYP 1 15/20.S355.C40/50.N.g.o.v.d1z1.x — $\Delta P = LM71$: Längsw. \square , Beiwerte \checkmark
- TYP 4 15/20.S355.C40/50.N.m.m.o.v.d1z1.x - - - $\Delta P = LM71$: Längsw. \checkmark , Beiwerte \checkmark
- TYP 2 15/20.S355.C40/50.N.m.g.o.v.d1z1.x — $\Delta P = LM71$: Längsw. \square , Beiwerte \square
- TYP 5 15/20.S355.C40/50.N.f.m.o.v.d1z1.x - - - $\Delta P = LM71$: Längsw. \checkmark , Beiwerte \square
- $N = 2 \cdot 10^6$

Abbildung 6.19: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:

Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$

Einfluss der Netzfeinheit im Dübelbereich auf die Lebensdauer:

TYP 1: grob, grob, TYP 4: mittel, mittel, TYP 2: mittel, grob, TYP 5: fein, mittel

Zur Untersuchung des Einflusses einer *gleichmäßigen* Verfeinerung der Diskretisierung werden in Abbildung 6.19 bzw. in Abbildung 6.20 die Modelle TYP 1 (*grob, grob*) mit TYP 4 (*mittel, mittel*) bzw. die Modelle TYP 2 (*mittel, grob*) mit TYP 5 (*fein, mittel*) paarweise verglichen.

Abbildung 6.20 zeigt, dass im Fall der Auswertung auf Basis der Vergleichsspannungen nach *von Mises* eine *gleichmäßige* Erhöhung der Netzdichte in einer Verringerung der Lebensdauer resultiert. Dieses Verhalten ist im Fall der Auswertung auf Basis der Hauptzugbeanspruchungen nach *Rankine* nur zwischen den Modellen TYP 1 und TYP 4 erkennbar. Eine weitere *gleichmäßige* Erhöhung der Netzdichte (auf *fein*) ist damit nicht notwendig.

Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass die gewählte Netzdichte *mittel* sowohl im Dübelbereich (*lokal*), als auch in den restlichen Bereich (*global*) des Modells ausreichend ist.

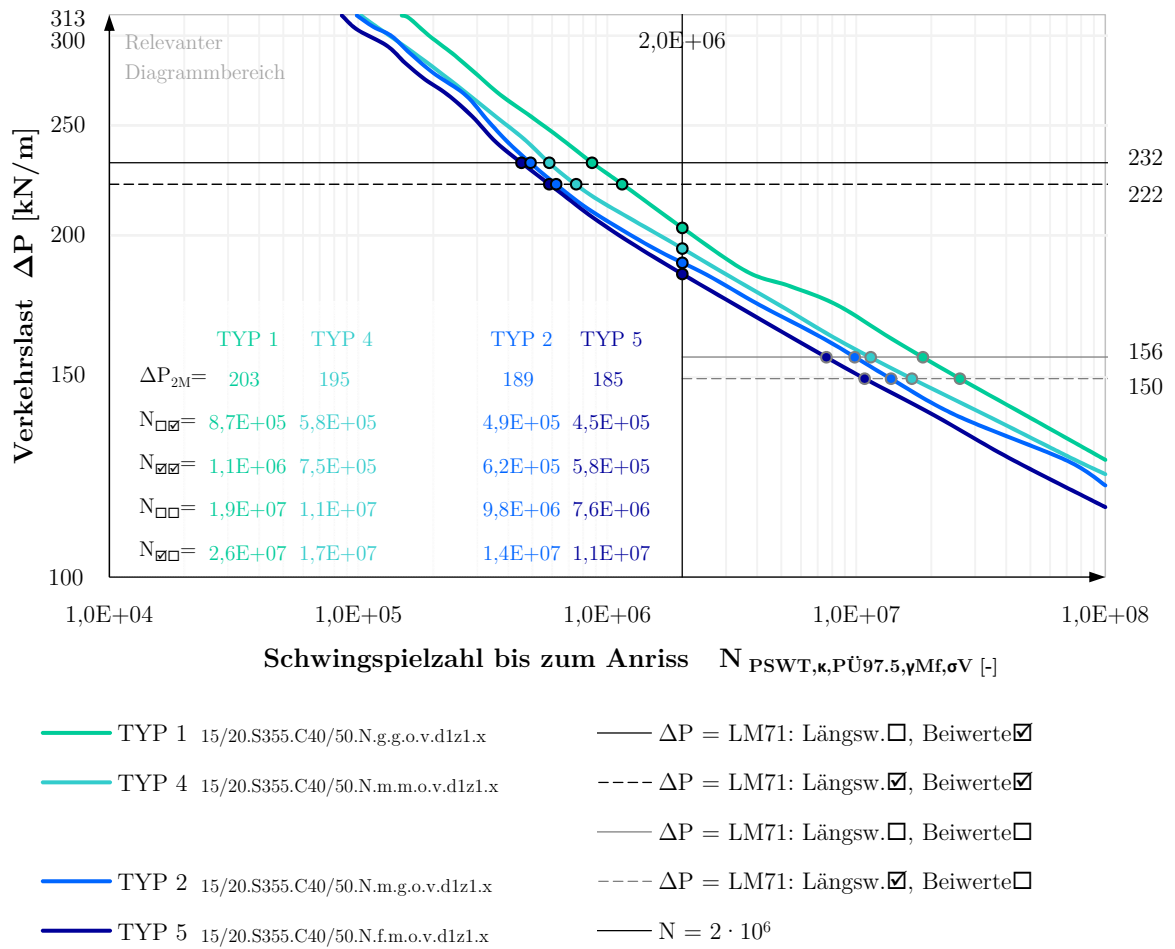


Abbildung 6.20: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT, \kappa, P\ddot{U}97.5, \gamma Mf, \sigma V}$
Einfluss der Netzfeinheit im Dübelbereich auf die Lebensdauer:
TYP 1: grob, grob, TYP 4: mittel, mittel, TYP 2: mittel, grob, TYP 5: fein, mittel

6.2.2 Maßgebende Dübelleiste für Ermüdungsbeanspruchung

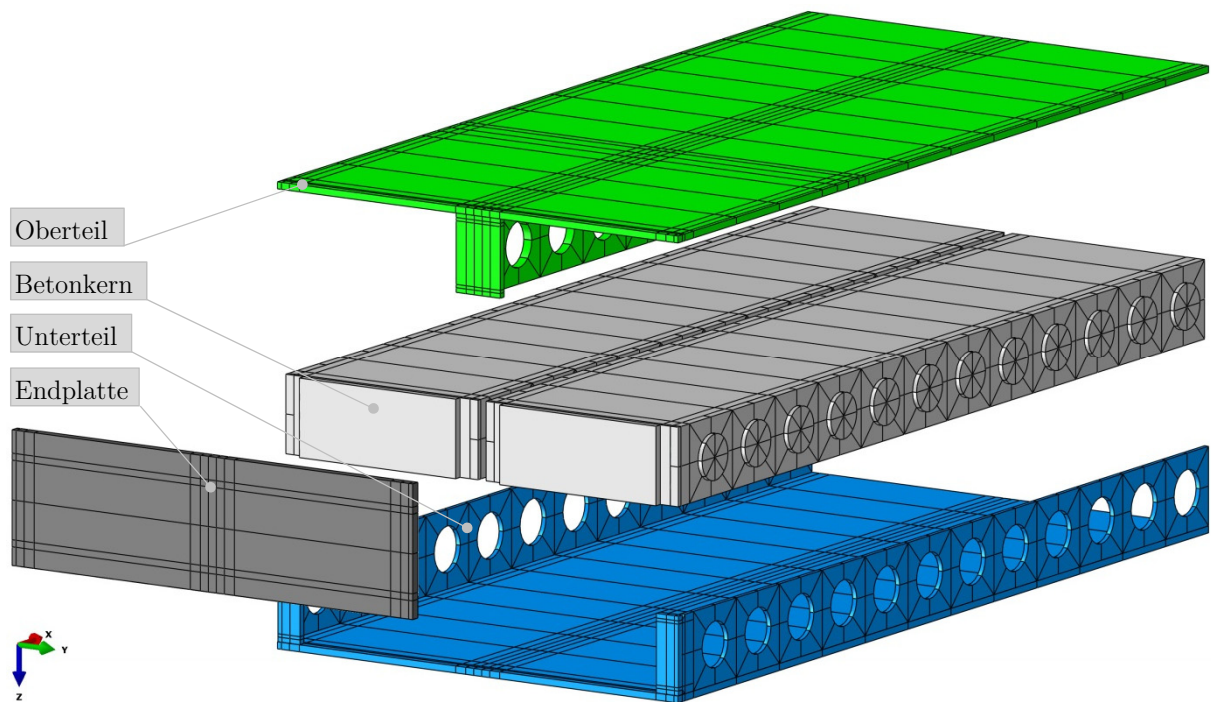
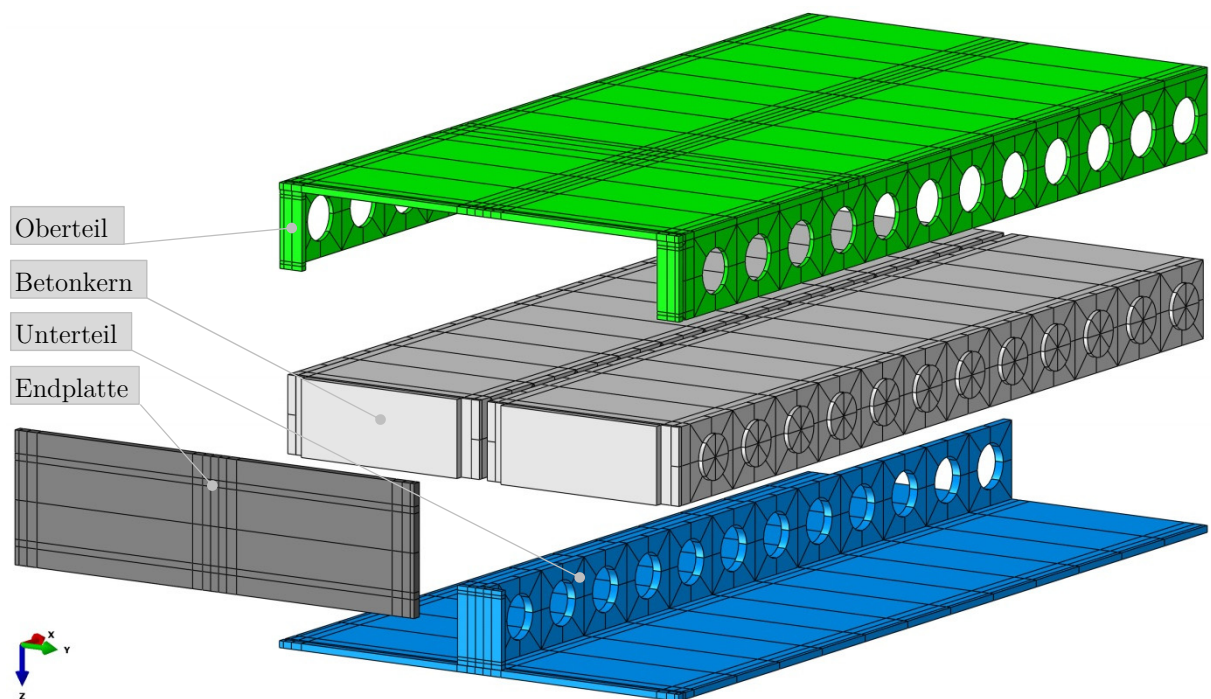
Als nächstes wird überprüft, welche Dübelleiste der SCSC-Platte für die Lebensdauerberechnung maßgebend ist: die oben oder die unten angeschweißte Dübelleiste.

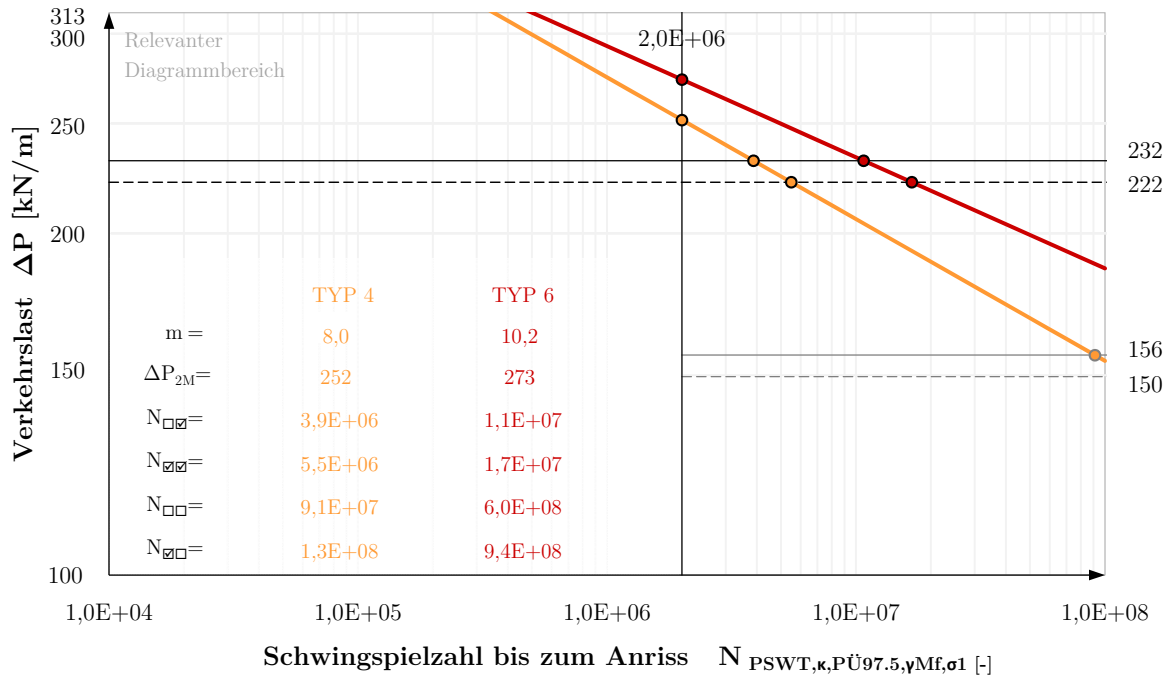
Aus Abbildung 6.21 lässt sich erkennen, dass im Fall des Modells *TYP 4* die in dem ungestörten Bereich liegende mittlere Lochdübelleiste am Deckblech angeschweißt ist. Folglich sind die seitlichen (Halb-)Dübelleisten am Bodenblech angeschweißt. Im Gegensatz dazu sind diese Bedingungen im Fall des Modells *TYP 6*, siehe Abbildung 6.22. Dieser Wechsel wurde mit dem Austausch der für die betrachteten Elemente definierten Kontaktdefinitionen *tie* bzw. *frictionless contact* in *ABAQUS* erreicht. Für die Lebensdauerberechnung wird jeweils die mittlere Dübelleiste ausgewertet.

In den nachfolgenden Lebensdauer-Vergleichsdiagrammen werden wieder die Ansätze $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ (nach *Rankine*) und $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ (nach *von Mises*) veranschaulicht (Methode M5), jedoch werden deren linearisierten Verläufe gezeigt, siehe Abbildung 6.23 bzw. Abbildung 6.24.

Anhand der Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass die oben angeschweißte mittlere Dübelleiste im Modell *TYP 4* eine wesentlich niedrigere Lebensdauer aufweist. Die Ursache dafür sind die in dieser Dübelleiste auftretenden höheren Spannungswerte. In Abbildung 6.25 bzw. in Abbildung 6.26 sind jeweils die resultierenden Bauteilfließkurven ($P_{zyk} - \varepsilon_{V,zyk}$ -Pfade) und die örtlichen Spannungs-Dehnungspfade ($\sigma_{V,zyk} - \varepsilon_{V,zyk}$ -Pfade) der Modelle *TYP 4* und *TYP 6* dargestellt. Während in der mittleren Dübelleiste des Modells *TYP 4* (oben angeschweißt) unter einem Lastniveau von 232 kN/m eine maximale Vergleichsspannung von 128 N/mm^2 entsteht, ergibt sich in der mittleren Dübelleiste des Modells *TYP 6* (unten angeschweißt) unter dem gleichen Lastniveau eine maximale Vergleichsspannung von 114 N/mm^2 .

Nur die Auswertung auf Basis der Vergleichsspannungen wurden hier gezeigt, da die Auswertung auf Basis der Hauptzugspannungen ähnliche Ergebnisse liefert.

Abbildung 6.21: Explosionsansicht des Plattenmodells *TYP 4*Abbildung 6.22: Explosionsansicht des Plattenmodells *TYP 6*



- $\Delta P = \text{LM71: Längsw. } \square, \text{ Beiwerte } \checkmark$
- TYP 4 15/20.S355.C40/50.N.m.m.o.v.d1z1.x
- TYP 6 15/20.S355.C40/50.N.m.m.u.v.d1z1.x
- $\Delta P = \text{LM71: Längsw. } \checkmark, \text{ Beiwerte } \checkmark$
- $\Delta P = \text{LM71: Längsw. } \square, \text{ Beiwerte } \square$
- $\Delta P = \text{LM71: Längsw. } \checkmark, \text{ Beiwerte } \square$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Abbildung 6.23: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
Wahl der maßgebenden Dübelleiste:
TYP 4: Dübelleiste oben angeschweißt, **TYP 6:** Dübelleiste unten angeschweißt

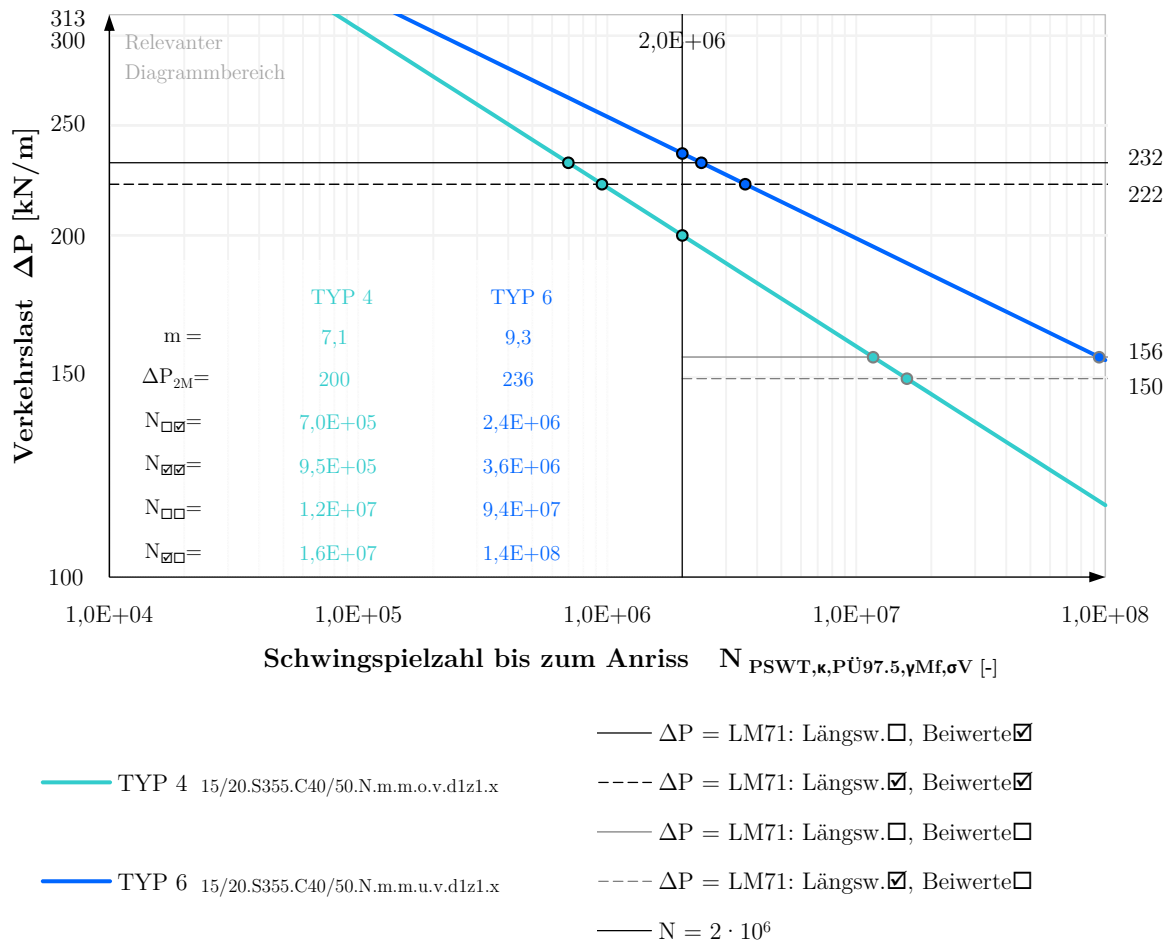


Abbildung 6.24: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
 Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingenzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$
 Wahl der maßgebenden Dübelleiste:
TYP 4: Dübelleiste oben angeschweißt, **TYP 6:** Dübelleiste unten angeschweißt

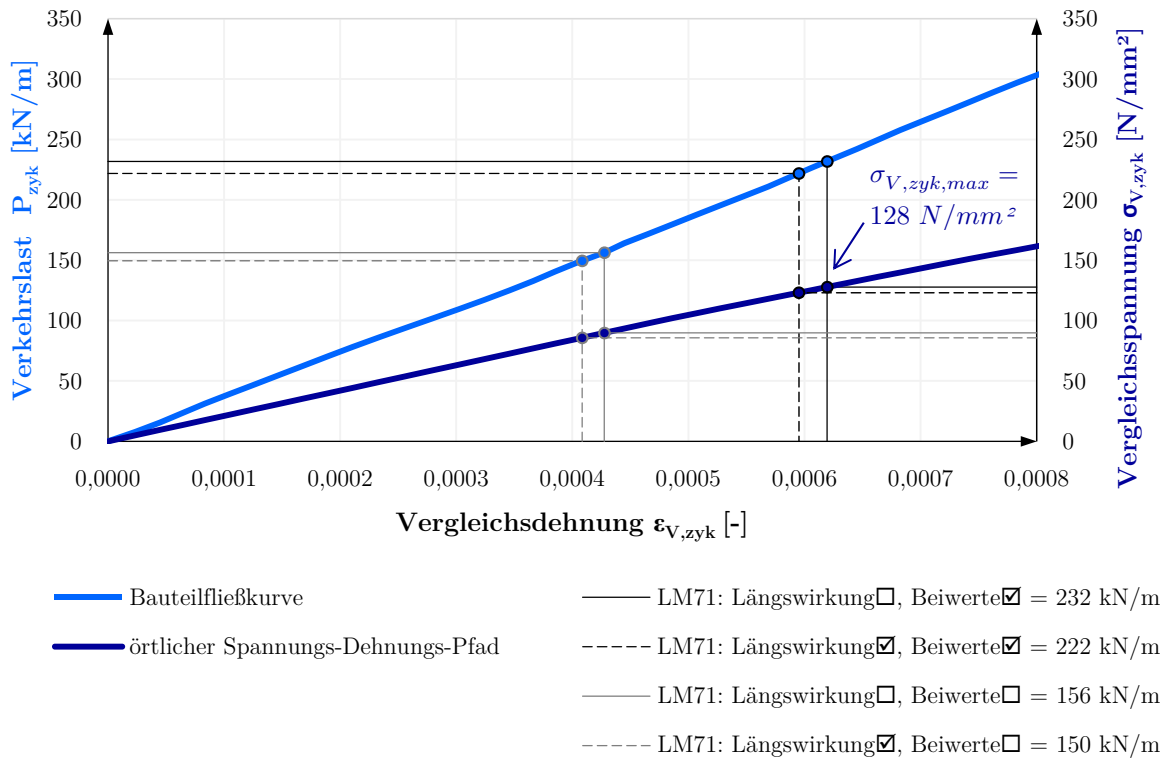


Abbildung 6.25: Lastschwingbreite ΔP inf. LM71 auf der Bauteilfließkurve (P_{zyk} - $\epsilon_{V,zyk}$ -Pfad) und auf dem örtlichen Spannungs-Dehnungspfad ($\sigma_{V,zyk}$ - $\epsilon_{V,zyk}$ -Pfad), M. TYP 4

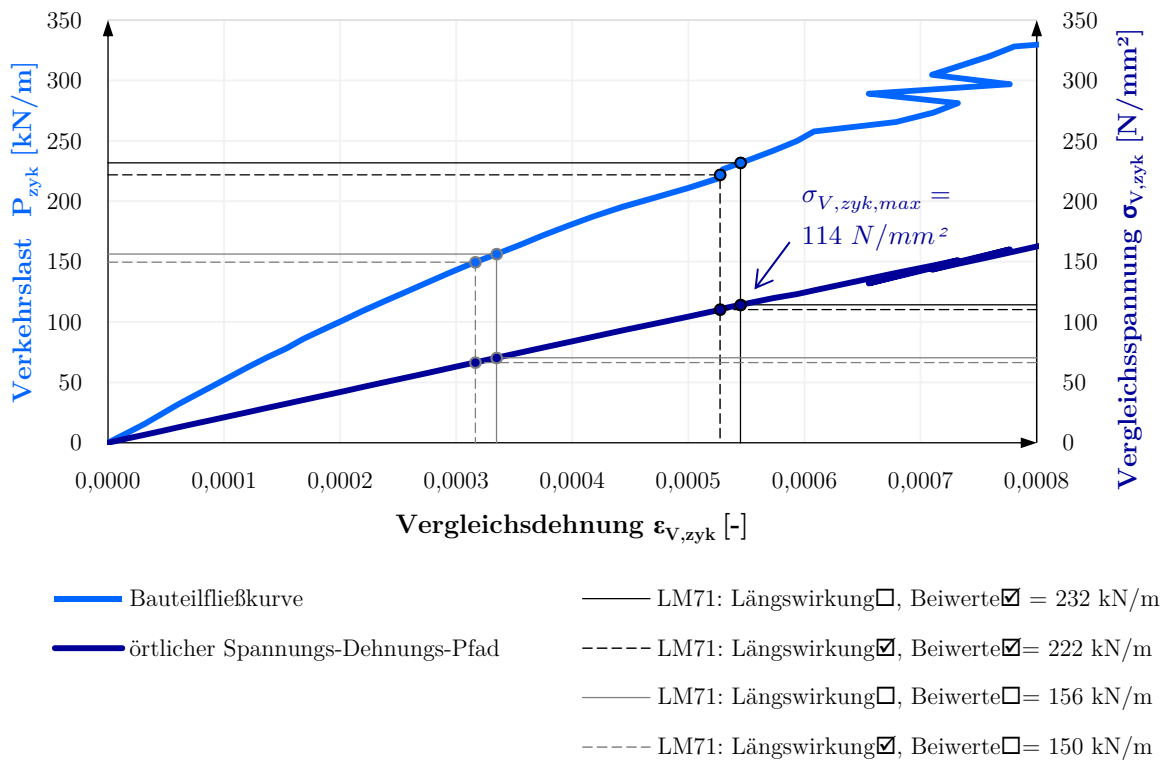


Abbildung 6.26: Lastschwingbreite ΔP inf. LM71 auf der Bauteilfließkurve (P_{zyk} - $\epsilon_{V,zyk}$ -Pfad) und auf dem örtlichen Spannungs-Dehnungspfad ($\sigma_{V,zyk}$ - $\epsilon_{V,zyk}$ -Pfad), M. TYP 6

6.2.3 Einfluss der Schweißnahtmodellierung

Die Verbindung zwischen den äußeren Blechen der SCSC-Platte (Boden- bzw. Deckblech) und der Endplatte wurden in *ABAQUS* über den Befehl *Tie* im Modul *Constraints* erstellt, siehe Abbildung 4.10 in Kapitel 4. Dabei wurde jeweils die komplette Kontaktfläche verbunden.

Die Endplatte entspricht bei einer realen Trogbrücke dem Trägersteg eines Brückenhauptträgers. Die äußeren Bleche der Platte werden mit Kehlnähten oder mit versenkten Kehlnähten einseitig (von außen) an die Endplatte (Hauptträgersteg) geschweißt. Diese Schweißnähte erfahren in Brückenhaupttragrichtung eine Schubbeanspruchung bzw. aus der lokalen Tragwirkung der Platte in Brückenquerrichtung eine Normalkraftbeanspruchung senkrecht zur Naht [1] und eine „vertikale“ Schubbeanspruchung. Da in *ABAQUS* nur ein 1 m langer Plattenstreifen modelliert wurde, enthalten die Modelle nur die letzten beiden Beanspruchungsarten.

Um die Schweißnahtausbildung (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) realitätsnäher zu modellieren, wurde beim Modell *TYP 7* nur die äußere Hälfte der Kontaktfläche über den Befehl *Tie* verbunden, siehe Abbildung 6.27.

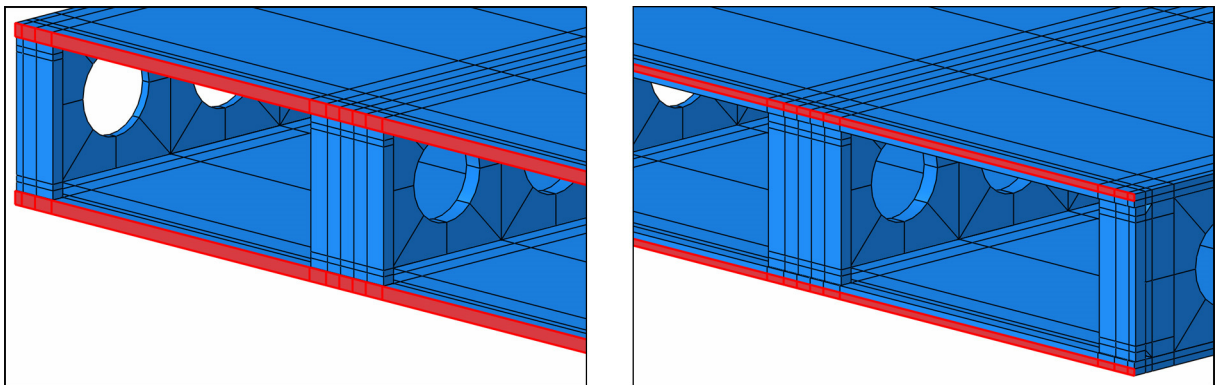


Abbildung 6.27: Vergleich der Schweißnahtmodellierung,
Teilbild links: Modell *TYP 4*, Teilbild rechts: Modell *TYP 7*

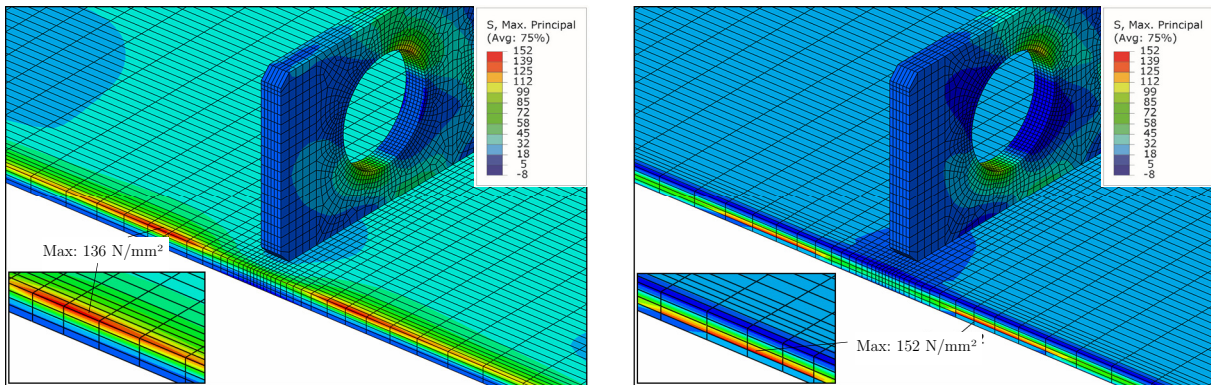


Abbildung 6.28: Vergleich der maximalen Hauptzugspannungen σ_1 im Bereich der Schweißnaht zwischen Endplatte und Bodenblech unter einem Lastniveau von stä. Bel. + $1,5 \cdot LM71$; Teilbild links: Modell *TYP 4*, Teilbild rechts: Modell *TYP 7*

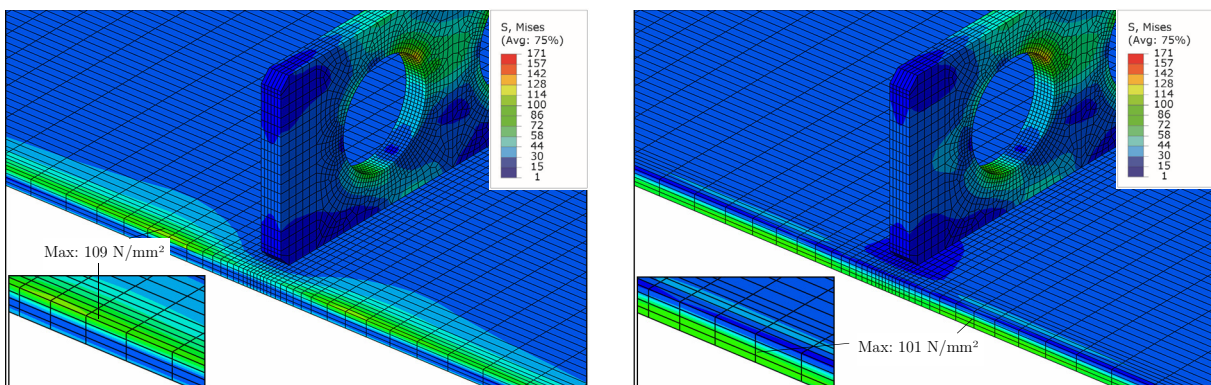


Abbildung 6.29: Vergleich der maximalen Vergleichsspannungen σ_V im Bereich der Schweißnaht zwischen Endplatte und Bodenblech unter einem Lastniveau von stä. Bel. + $1,5 \cdot LM71$; Teilbild links: Modell *TYP 4*, Teilbild rechts: Modell *TYP 7*

Abbildung 6.28 und 6.29 stellen die resultierende Hauptzug- bzw. Vergleichsspannungen σ_1 bzw. σ_V im Bereich der unteren Schweißnaht dar. Es ist bemerkbar, dass sich die Spannungen beim Modell *TYP 7* auf die halbierte Kontaktfläche konzentrieren. Dementsprechend sind dort die maximalen Spannungswerte höher.

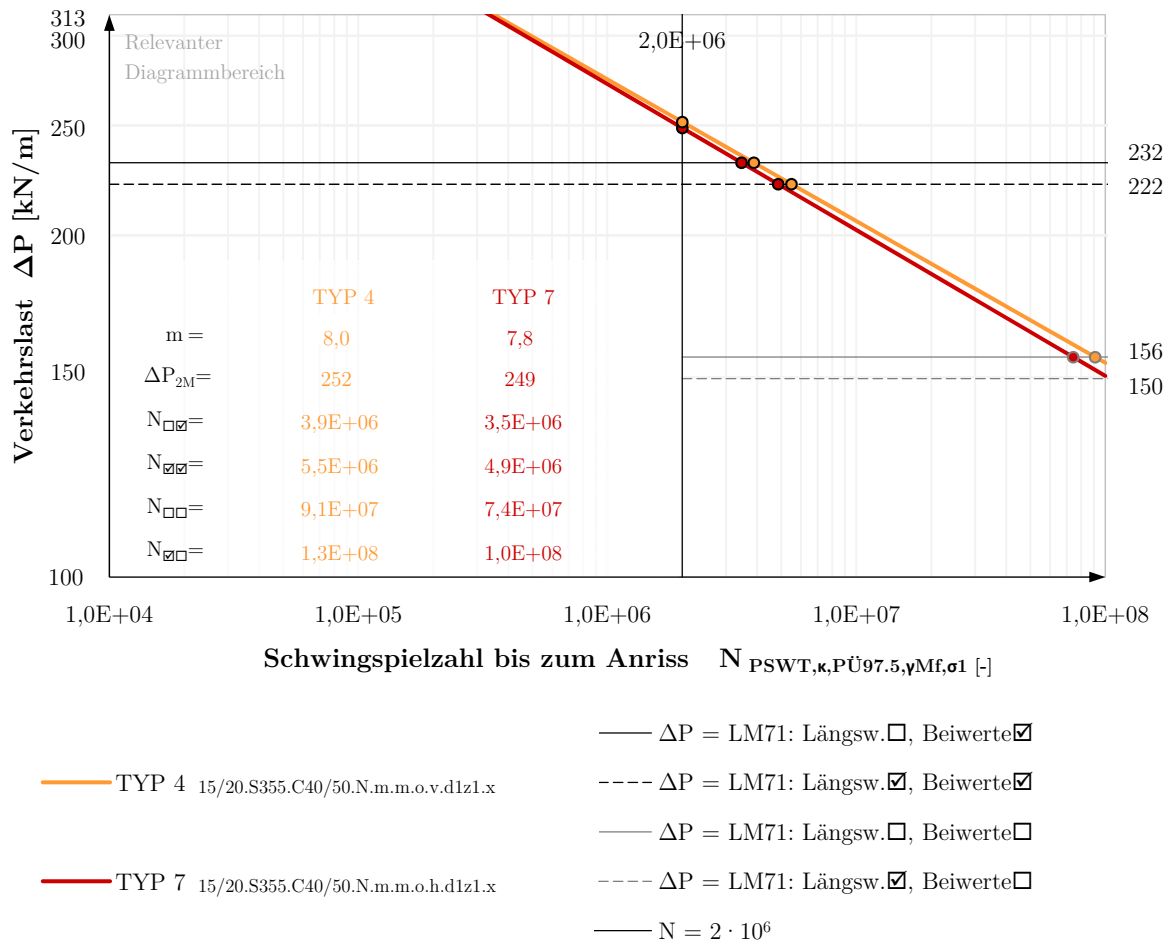
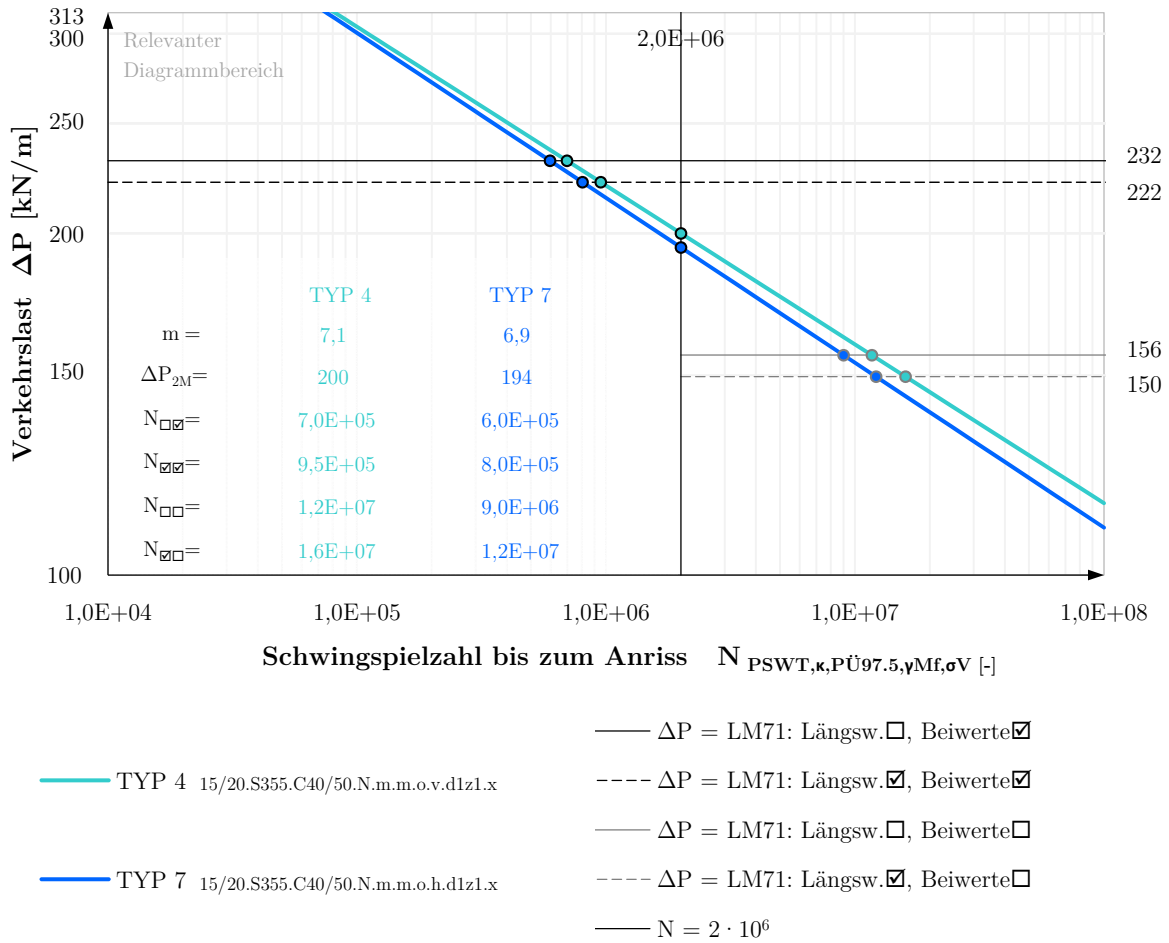


Abbildung 6.30: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
 Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
 Einfluss der Schweißnahtmodellierung:
TYP 4: komplette Kontaktfläche, *Typ 7*: halbe Kontaktfläche

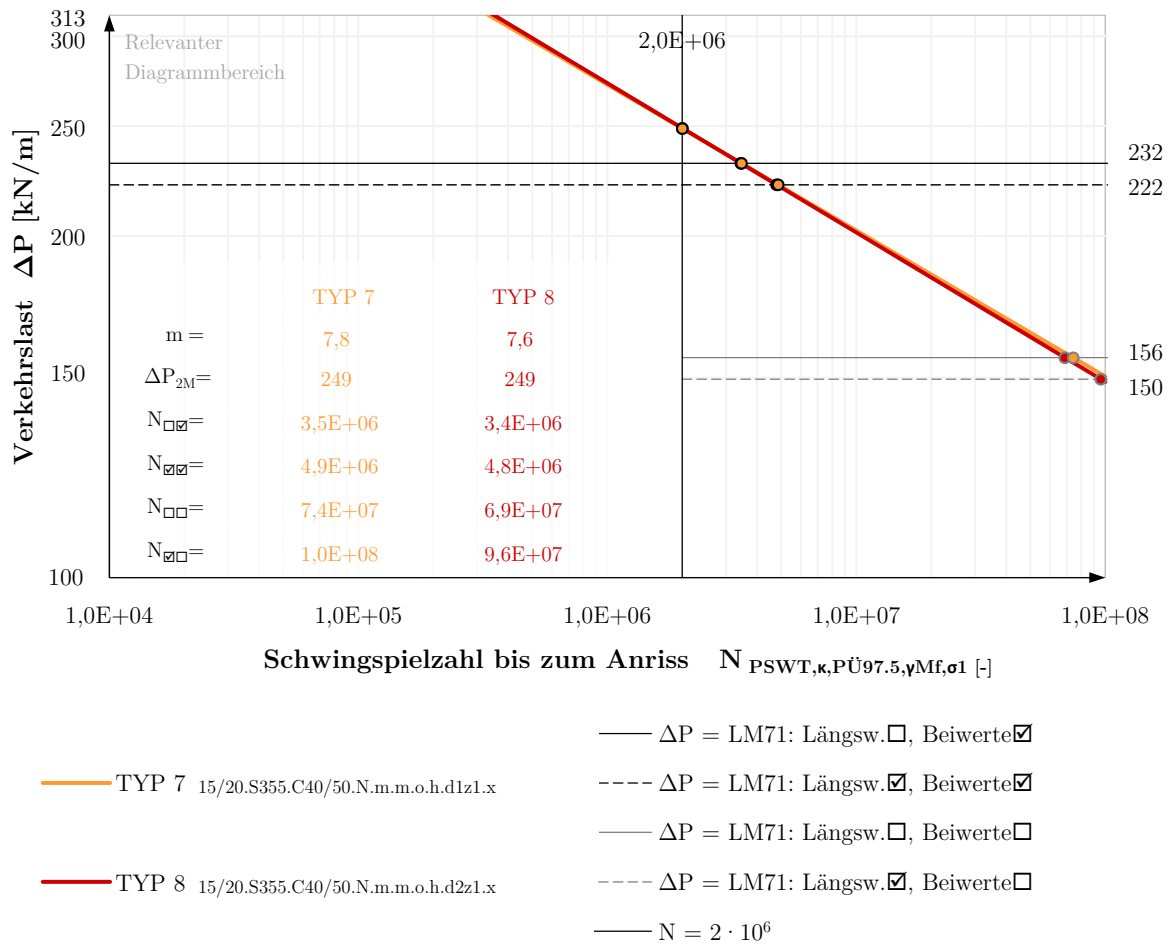
Nachfolgend wird untersucht, ob diese Änderung der Schweißnahtmodellierung einen bemerkbaren Einfluss auf die Lebensdauer hat. Abbildung 6.30 und Abbildung 6.31 stellen die resultierenden Wöhlerlinien dar, die auf Basis der Hauptzugspannungen bzw. der Vergleichsspannungen ermittelt wurden.



**Abbildung 6.31: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$
Einfluss der Schweißnahtmodellierung:
TYP 4: komplette Kontaktfläche, *Typ 7*: halbe Kontaktfläche**

Es ist erkennbar, dass die Änderung der Schweißnahtmodellierung die Lebensdauer etwas verringert. Ihr Einfluss ist jedoch sehr schwach ausgeprägt. Da die Schweißnahtmodellierungen im Fall des Modells *TYP 7* realitätsnäher sind, wird bei den weiteren Fällen der Parameterstudien diese Art der Modellierung verwendet.

6.2.4 Einfluss des Betonmodells



**Abbildung 6.32: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
Einfluss des Betonmodell im Druckbereich
*TYP 7: Druck 1, Typ 8: Druck 2***

Im Rahmen der Parameterstudien werden zwei Modelle (*TYP 7* bzw. *TYP 8*) mit unterschiedlichen Angaben des Betonmodells im Druckbereich (*Druck 1* bzw. *Druck 2*) konstruiert und vier Modelle (*TYP 8*, *TYP 9*, *TYP 10*, *TYP 11*) mit unterschiedlicher Definition zur Beschreibung des Materialerhaltens im Zugbereich (*Zug 1*, *Zug 2*, *Zug 3*, *Zug 4*) untersucht.

Der Unterschied zwischen den beiden Betonmodellen im Druckbereich liegt in der „Länge“ der angegebenen Arbeitslinie und des zugehörigen Schädigungsparameters d_c : Während für das Modell *TYP 8* die vollständige in Abbildung 4.14 (Kapitel 4.3.3) beschriebene Materialdefinition angegeben wurde, wurde für das Modell *TYP 7* nur der Bereiche A-D (ohne Verlängerung) angegeben.

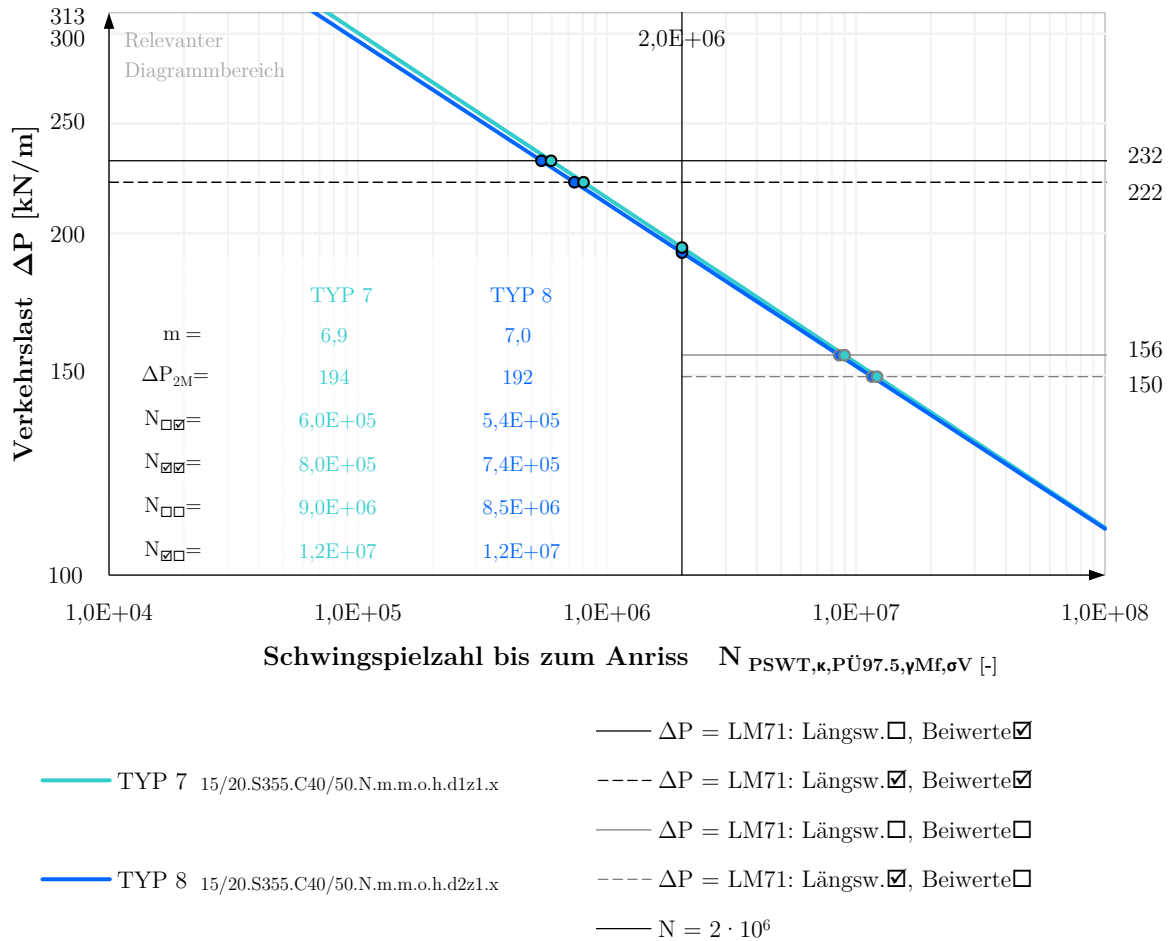


Abbildung 6.33: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\gamma Mf,\sigma V}$
Einfluss des Betonmodell im Druckbereich
TYP 7: Druck 1, Typ 8: Druck 2

Der Anfang des Verlaufs der Arbeitslinie (zwischen Punkt A und D) wurde nach den Angaben, wie in EN 1992-1-1 [44] beschrieben, ermittelt. Die Verlängerung des Verlaufs (zwischen Punkt D und F), mit der die Beschreibung des Materialverhaltens im Nachbruchbereich verbessert werden kann, wurde nach der Empfehlungen von Pavlović et al. [45] definiert.

In Abbildung 6.32 bzw. in Abbildung 6.33 sind die Modelle *TYP 7* und *TYP 8* verglichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass unter FLS-Lastniveau die Verlängerung der Arbeitslinie keinen Einfluss auf die Lebensdauer hat.

Für die weiteren Modelle der Parameterstudie wird die vollständige Arbeitslinie angegeben.

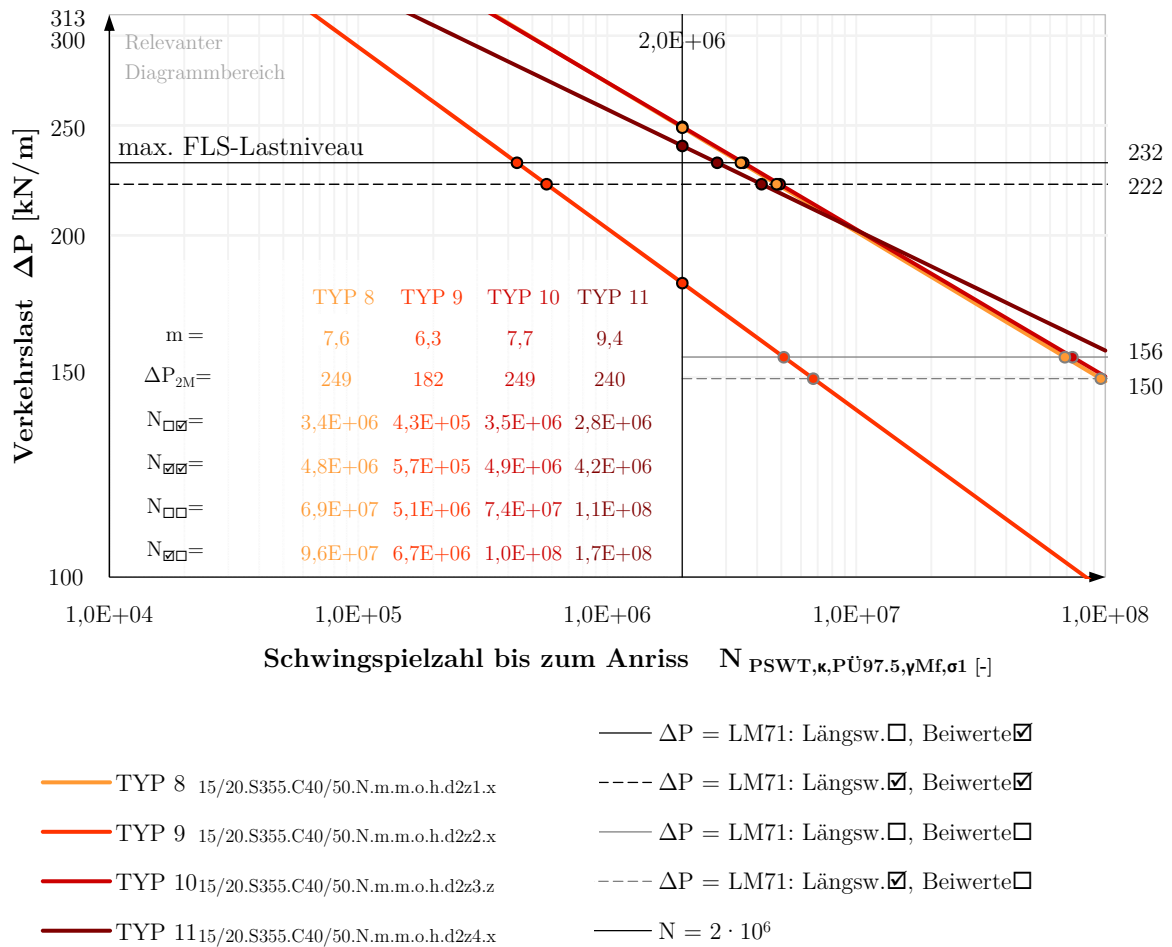


Abbildung 6.34: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
 Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,Pi97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
 Einfluss des Betonmodell im Zugbereich

TYP 8: Zug 1 (ABAQUS), Typ 9: Zug 2 (nach Pavlović et al. [45]), TYP 10: Zug 3 (Model Code 1990 $d_{max} = 32mm$), Typ 11: Zug 4 (Model Code 2010)

Als nächstes wird der Einfluss des Betonmodells im Zugbereich untersucht. Wie im Kapitel 4.3.3. beschrieben wurde, kann das Materialverhalten unter Zugbeanspruchung durch eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung oder durch eine Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung beschrieben werden. Mit der Ausnahme von Betonmodell *Zug 2* (Modell *TYP 9*), sind alle Betonmodelle anhand des letzteren Ansatzes definiert.

Da die Formulierung der Arbeitslinie als Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung (*Zug 1, Zug 3, Zug 4*) im Gegensatz zur anderen Methode (*Zug 2*) weitgehend netzunabhängig ist, wird diese Vorgehensweise zur Beschreibung des Zugtragverhaltens gewählt.

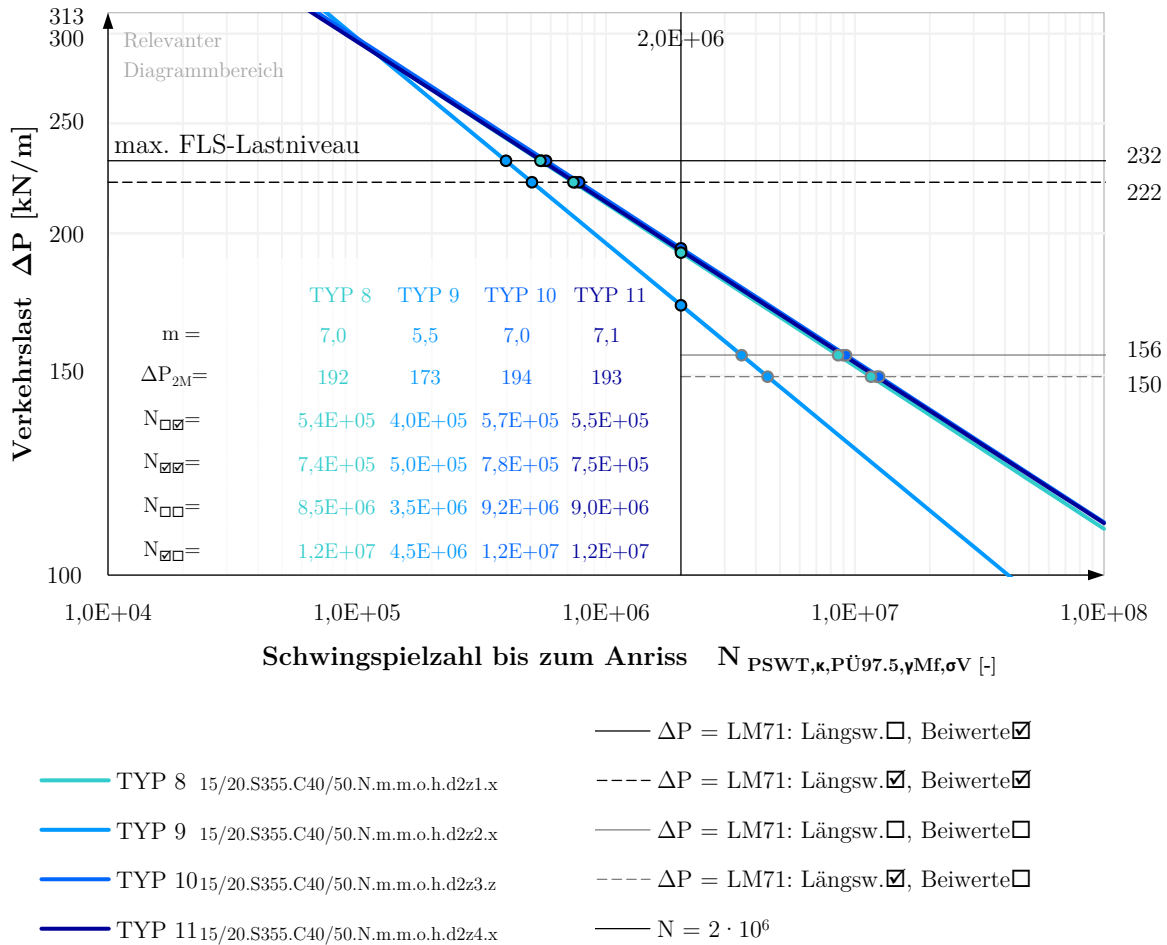


Abbildung 6.35: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$
Einfluss des Betonmodell im Zugbereich

TYP 8: Zug 1 (ABAQUS), Typ 9: Zug 2 (nach Pavlović et al. [45]), TYP 10: Zug 3 (Model Code 1990 $d_{max} = 32mm$), Typ 11: Zug 4 (Model Code 2010)

In Abbildung 6.34 bzw. in Abbildung 6.35 sind alle Betonmodelle mit unterschiedlichen Angaben zur Beschreibung des Materialverhaltens im Zugbereich verglichen. Es ist erkennbar, dass die drei Betonmodelle mit gleicher Art der Materialdefinition (Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung) auf ein näherungsweise deckungsgleiches Ergebnis führen. Im Gegensatz dazu verringert das Betonmodell *Zug 2* (Modell *TYP 9*) deutlich die Lebensdauer. Die Ursache dafür liegt höchstwahrscheinlich in der oben erwähnten Netzabhängigkeit des Betonmodells *Zug 2*, darauf wird jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen.

Für die weiteren Modelle der Parameterstudie wird das in *CEB-FIP Model Code 1990* [52] beschriebene Betonmodell *Zug 3* verwendet.

6.2.5 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

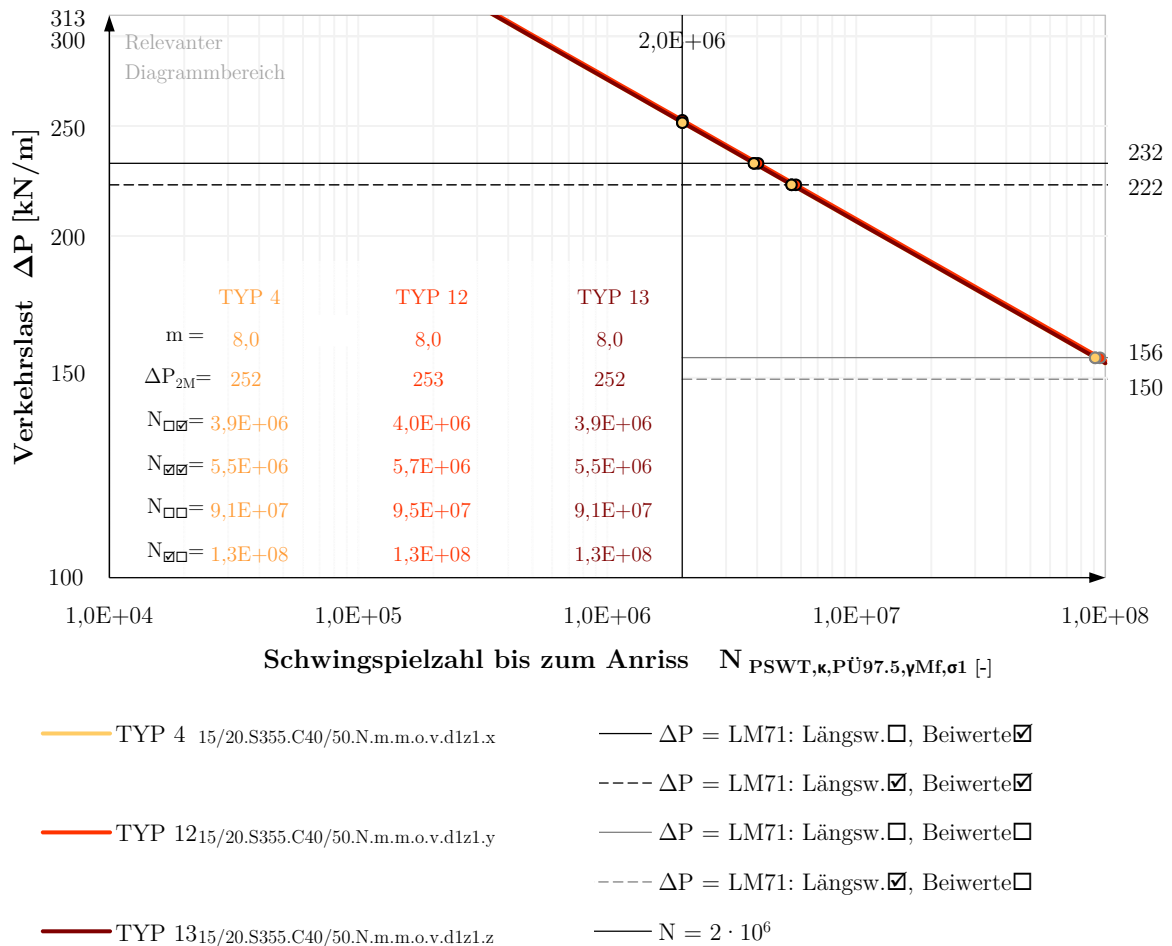


Abbildung 6.36: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingenzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit
TYP 4: 6 kN/m²/frame, Typ 12: 8 kN/m²/frame, TYP 13: 10 kN/m²/frame

Die FE-Berechnungen wurden mit dem Berechnungsalgorithmus *explicit* in *ABAQUS* durchgeführt (*ABAQUS Explicit*). Dabei handelt es sich um ein dynamisches Lösungsverfahren (Integrationsmethode), womit der Nachbruchbereich (Schädigung des Betons im Dübelbereich) plausibel beschrieben werden kann. Wird diese Integrationsmethode für quasistatische Untersuchungen verwendet, muss die aufgebrachte Belastung pro *frame* (Berechnungsschritt) so klein gewählt werden, dass die Trägheits- und Dämpfungskräfte vernachlässigbar sind [1]. Ob diese Bedingung eingehalten wird, kann mit dem Quotient zwischen kinetischer Energie und Verzerungsenergie kontrolliert werden. Nach Abbildung 4.38 in Kapitel 4.61 wurde diese Bedingung eingehalten. Es wird jedoch auch untersucht, ob ein Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die resultierende Wöhlerlinie feststellbar ist.

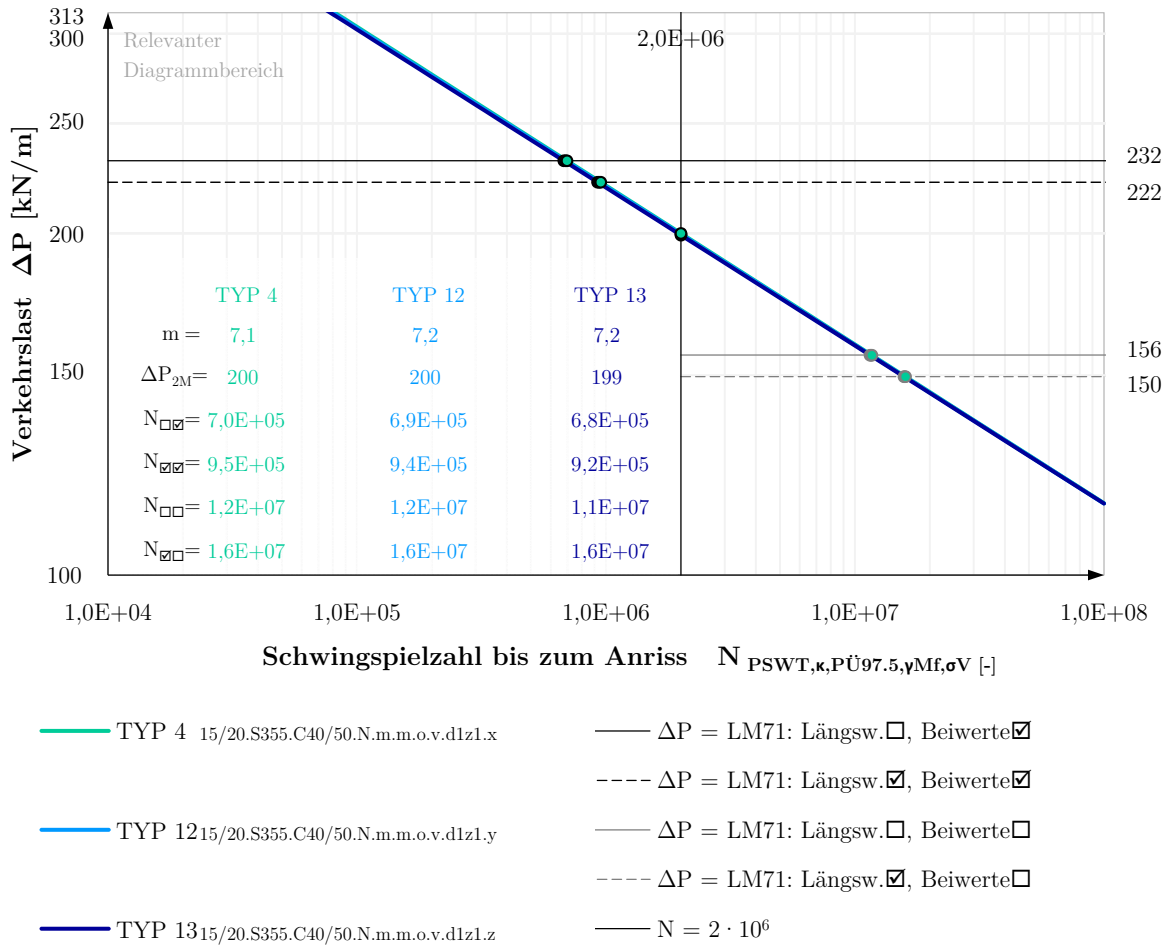


Abbildung 6.37: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
 Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$
 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit
TYP 4: 6 kN/m²/frame, *Typ 12*: 8 kN/m²/frame, *TYP 13*: 10 kN/m²/frame

Abbildung 6.36 bzw. Abbildung 6.37 enthalten die Gegenüberstellungen der Ergebnisverläufe aller Modelle der Parameterstudie, die mit unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit modelliert wurden. Die Abbildungen deuten darauf hin, dass die Belastungsgeschwindigkeit in dem untersuchten Bereich offensichtlich keinen Einfluss auf die Lebensdauer hat.

6.3 Parameterstudie II: Reale Einflüsse

Zur Veranschaulichung der Auswirkung realer Einflüsse auf die Lebensdauer werden wieder die Ansätze $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma1}$ (nach *Rankine*) und $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma1}$ (nach *von Mises*) verwendet (*Methode M5*).

6.3.1 Einfluss der Stahlsorte und der Betongüte

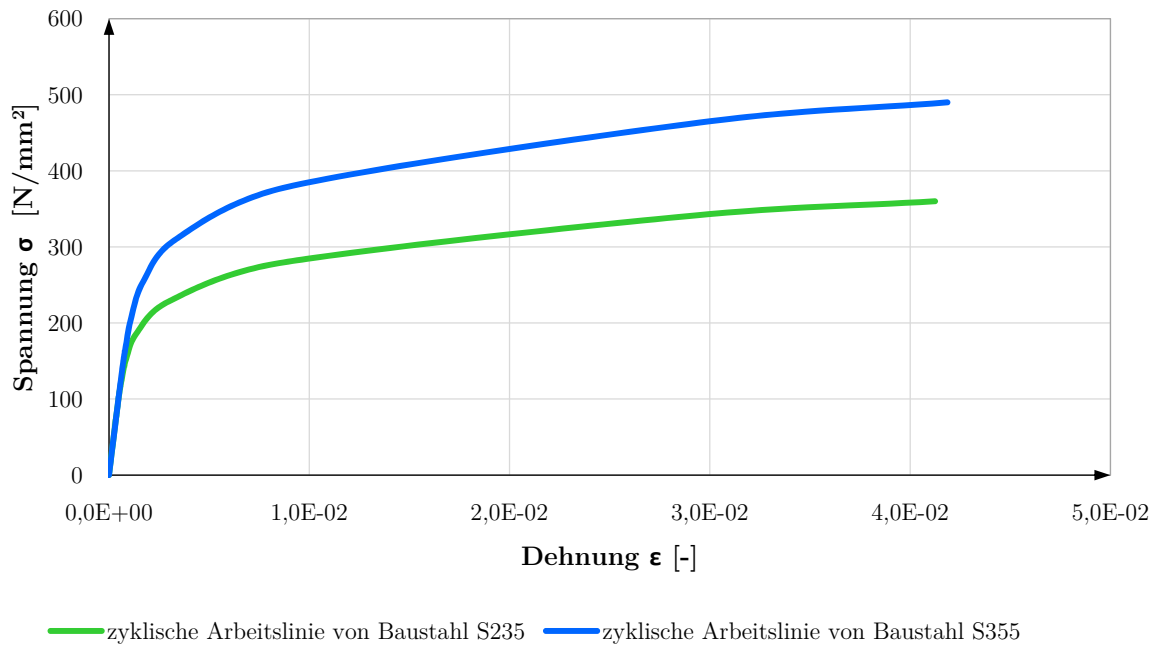
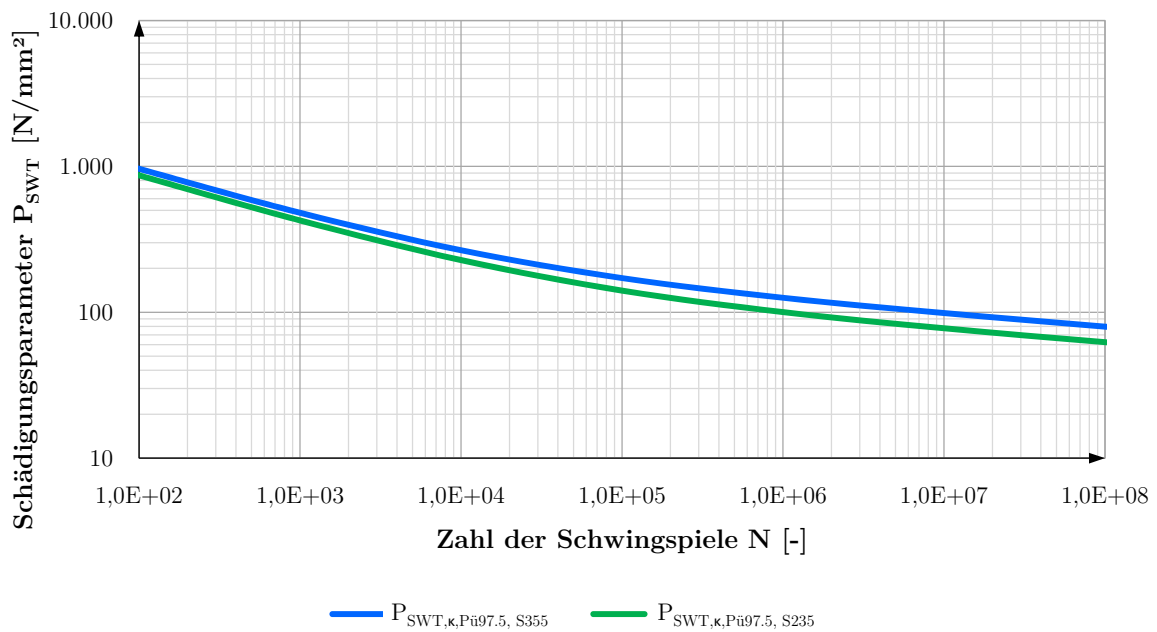
Als erstes wird bei Parameterstudie II der Einfluss der verwendeten Stahlsorte bzw. Stahlfestigkeit und der Betongüte auf die Lebensdauer untersucht. Dazu werden vier Modelle der Parameterstudie gegenübergestellt:

- *TYP 4*: Stahlsorte *S355*, Betongüte: *C40/50*
- *TYP A*: Stahlsorte ***S235***, Betongüte: *C40/50*
- *TYP B*: Stahlsorte *S355*, Betongüte: ***C25/30***
- *TYP C*: Stahlsorte ***S235***, Betongüte: ***C25/30***

Die Modelle weisen sonst die gleiche Beschaffenheit auf.

Die Angaben der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven für die beiden untersuchten Stahlsorten (*S355* bzw. *S235*) wurden in Kapitel 4.3.3. tabellarisch dargestellt. Deren Verläufe sind in Abbildung 6.38 miteinander verglichen. Abbildung 6.39 zeigt die resultierenden Schädigungsparameter-Wöhlerlinien. Das Materialverhalten im Zug- bzw. im Druckbereich für Beton *C40/50* wurde ebenso in Kapitel 4.3.3. beschrieben. Die Angaben der Betongüte *C25/30* sind Anhang A.1.4 zu entnehmen.

Abbildung 6.40 bzw. Abbildung 6.41 zeigen die resultierenden Bauteil-Wöhlerkurven der vier Modelle. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Stahlsorte eine beträchtliche Auswirkung auf die Lebensdauer aufweist. Im Vergleich dazu hat die verwendete Betongüte nahezu keinen Einfluss auf die Lebensdauer.

Abbildung 6.38: Zyklische Arbeitslinien von Baustahl *S355/S235*Abbildung 6.39: Schädigungsparameter-Wöhlerlinien von Baustahl *S355/S235*

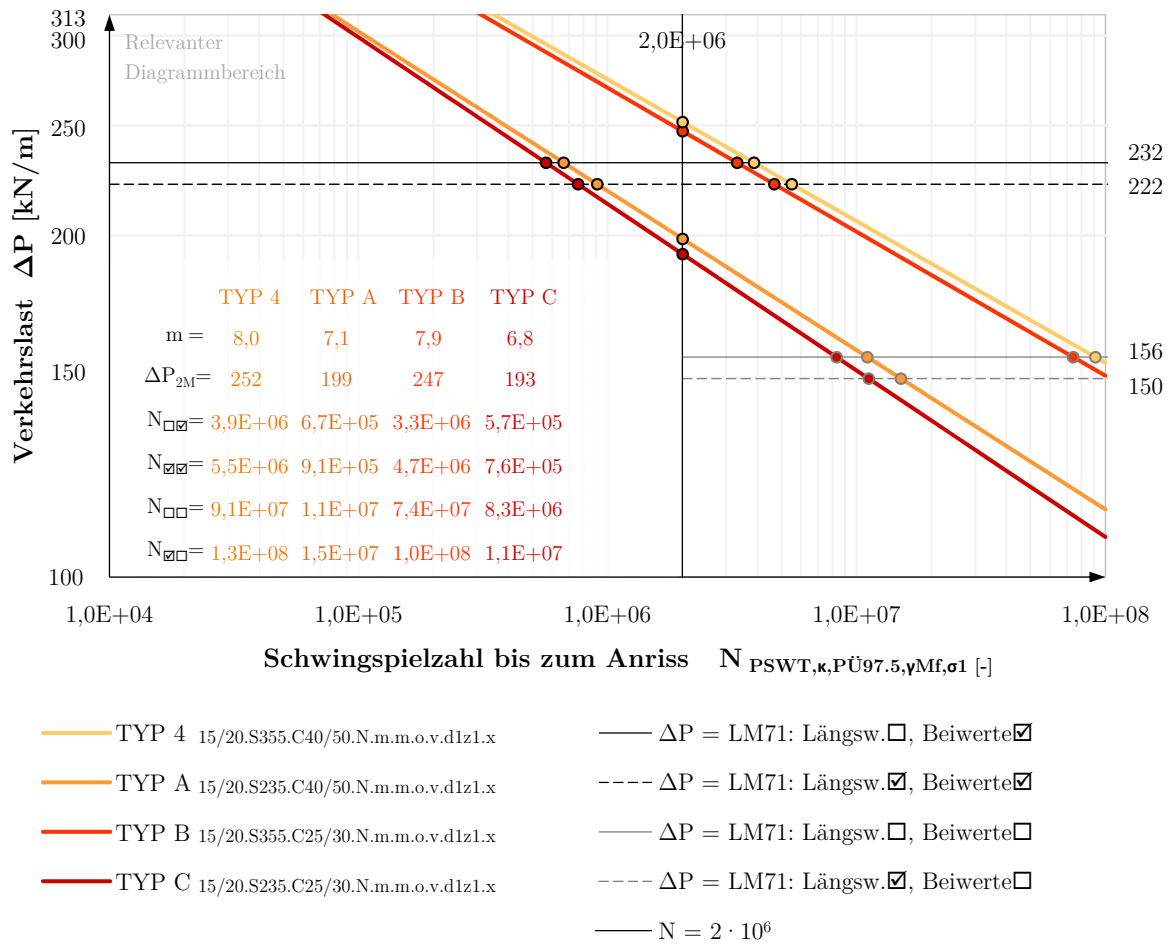


Abbildung 6.40: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
 Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingenspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
 Einfluss der Stahlorte und der Betongüte

TYP 4: S355, C40/50, Typ A: S235, C40/50, TYP B: S355, C25/30, TYP C: S235, C25/30

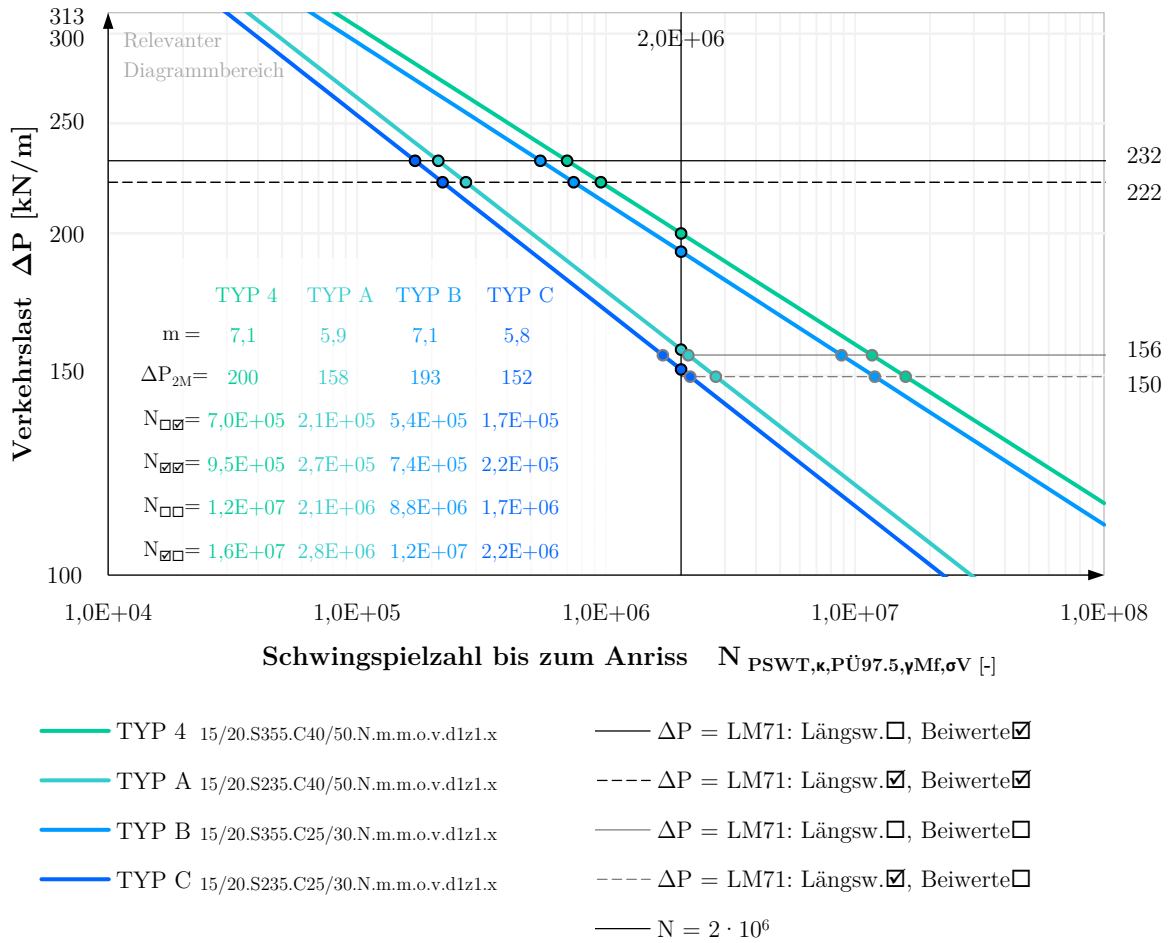


Abbildung 6.41: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
 Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$
 Einfluss der Stahlsorte und der Betongüte

TYP 4: S355, C40/50, Typ A: S235, C40/50, TYP B: S355, C25/30, TYP C: S235, C25/30

6.3.2 Einfluss der Schotterbetthöhe

Das Nennschotterbett ist in ÖNORM-B 1991-1-1 [66] mit einer Höhe von 550 mm definiert. Jedoch ist bei der Bemessung von Tragwerken eine Abweichung von $\pm 30\%$ zu berücksichtigen. Der Einfluss der unterschiedlichen Schotterbetthöhen soll durch Vergleich von drei Modellen verdeutlicht werden:

- Modell *TYP D*: Schotterbetthöhe = $550 \text{ mm} \cdot 0,7 = 385 \text{ mm}$;
- Modell *TYP 4*: Nennschotterbetthöhe = 550 mm ;
- Modell *TYP E*: Schotterbetthöhe = $550 \text{ mm} \cdot 1,3 = 715 \text{ mm}$.

Die unterschiedlichen Höhen wurden schon im Kapitel 4.3.3 gezeigt, aber aus Gründen der Übersicht werden sie hier noch einmal dargestellt. Wie Abbildung 4.42 zeigt, hängt die Breite und damit die Höhe der Belastung, die direkt an der Deckblech-Oberkante angreift, von der Schotterbetthöhe ab (siehe Tabelle 6.5).

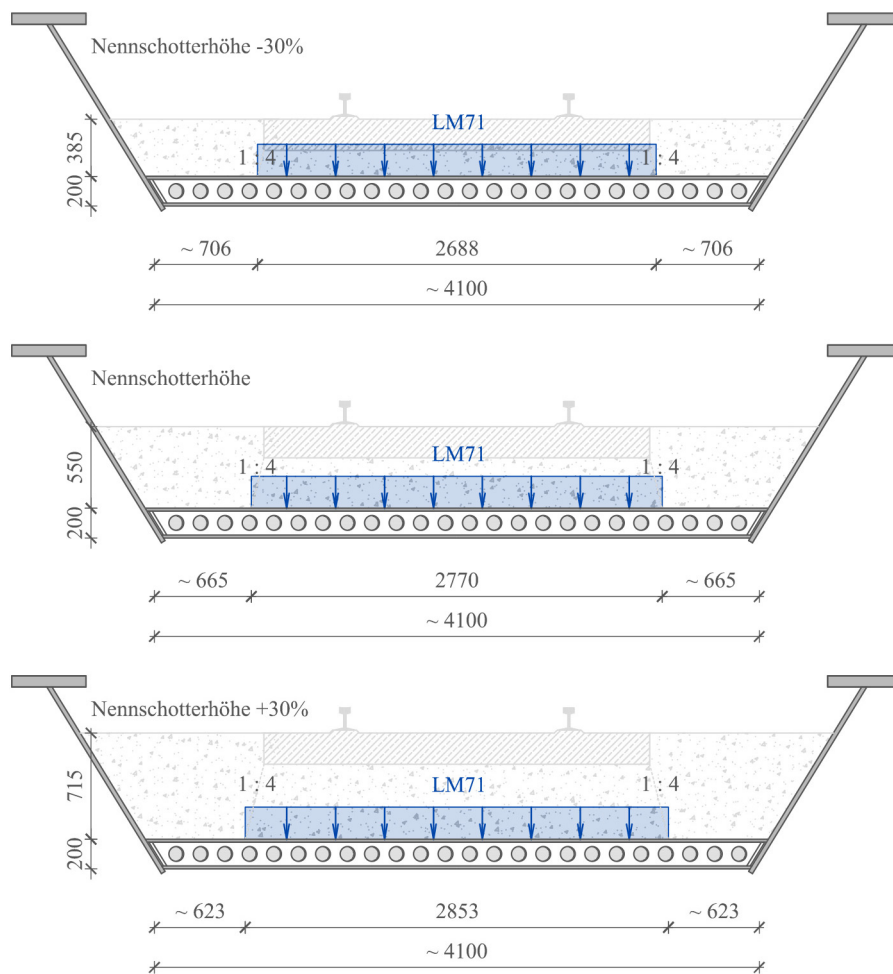


Abbildung 6.42: Verteilung der vertikalen Lasten in Querrichtung ohne Exzentrizität durch den Schotteroberbau; Teilbild oben: Nennschotterbetthöhe -30%; Teilbild mittlen: Nennschotterbetthöhe; Teilbild unten: Nennschotterbetthöhe +30%

Tabelle 6.5 Belastungsniveaus der Verkehrslast

| Schotterbett | Lastmodell 71 | [kN/m ²] | [kN/m] |
|--------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Nennhöhe -30%: | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> | 86,24 ⁶⁾ | 231,82 |
| 550 · 0,7 = 385 mm | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> | 82,56 ⁷⁾ | 221,92 |
| Belastungsbreite: | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input type="checkbox"/> | 58,13 ⁸⁾ | 156,25 |
| 2688 mm | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input type="checkbox"/> | 55,65 ⁹⁾ | 149,58 |
| Nennhöhe: | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> | 83,69 | 231,82 ²⁾ |
| 550 mm | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> | 80,12 | 221,92 ³⁾ |
| Belastungsbreite: | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input type="checkbox"/> | 56,41 | 156,25 ⁴⁾ |
| 2770 mm | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input type="checkbox"/> | q_{äqu} = 54 | 149,58 ⁵⁾ |
| Nennhöhe +30%: | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> | 81,25 ¹⁰⁾ | 231,82 |
| 550 · 1,3 = 715 mm | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> | 77,79 ¹¹⁾ | 221,92 |
| Belastungsbreite: | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input type="checkbox"/> | 54,77 ¹²⁾ | 156,25 |
| 2853 mm | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte ¹⁾ <input type="checkbox"/> | 52,43 ¹³⁾ | 149,58 |

¹⁾ Beiwerte für die Ermüdungslasten: $\gamma_{F,f} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda = 1,48$

²⁾ $\gamma_{F,f} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda \cdot 156,25 \text{ [kN/m]} = 1,48 \cdot 156,25 \text{ [kN/m]} = 231,82 \text{ [kN/m]}$

³⁾ $\gamma_{F,f} \cdot \Phi_2 \cdot \lambda \cdot 149,58 \text{ [kN/m]} = 1,48 \cdot 156,25 \text{ [kN/m]} = 221,92 \text{ [kN/m]}$

⁴⁾ $4 \cdot 250 \text{ [kN]} / 6,40 \text{ [m]} = \mathbf{156,25 \text{ [kN/m]}}$ (Basiswert *ohne* Längswirkung)

⁵⁾ $\mathbf{54 \text{ [kN/m}^2]} \cdot 2,77 \text{ [m]} = 149,58 \text{ [kN/m]}$ (Basiswert *mit* Längswirkung)

⁶⁾ $231,82 \text{ [kN/m]} / 2,688 \text{ [m]} = 86,24 \text{ [kN/m}^2]$

⁷⁾ $221,92 \text{ [kN/m]} / 2,688 \text{ [m]} = 82,56 \text{ [kN/m}^2]$

⁸⁾ $156,25 \text{ [kN/m]} / 2,688 \text{ [m]} = 58,13 \text{ [kN/m}^2]$

⁹⁾ $149,58 \text{ [kN/m]} / 2,688 \text{ [m]} = 55,62 \text{ [kN/m}^2]$

¹⁰⁾ $231,82 \text{ [kN/m]} / 2,853 \text{ [m]} = 81,25 \text{ [kN/m}^2]$

¹¹⁾ $221,92 \text{ [kN/m]} / 2,853 \text{ [m]} = 77,79 \text{ [kN/m}^2]$

¹²⁾ $156,25 \text{ [kN/m]} / 2,853 \text{ [m]} = 54,77 \text{ [kN/m}^2]$

¹³⁾ $149,58 \text{ [kN/m]} / 2,853 \text{ [m]} = 52,43 \text{ [kN/m}^2]$

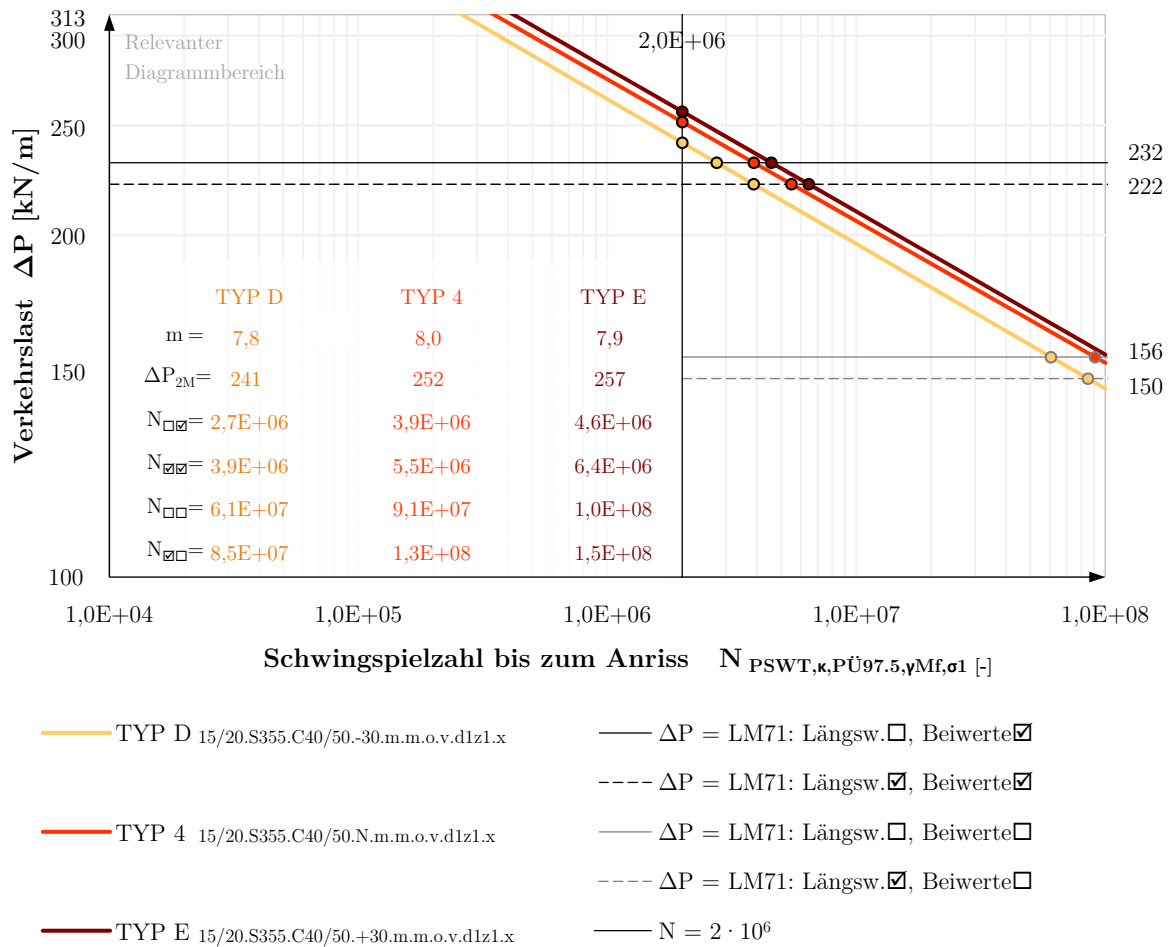


Abbildung 6.43: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich:
 Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
 Einfluss der Schotterbetthöhe
TYP D: Nennhöhe -30%, *Typ 4*: Nennhöhe, *TYP E*: Nennhöhe +30%,

Aus der Veränderung der Schotterbetthöhe resultieren zwei Einflüsse auf die Lebensdauer der Lochdübelreihe: eine ungünstige und eine günstige Wirkung. Durch Verringerung der Schotterbetthöhe konzentriert sich die Verkehrslast *LM71* auf eine kleinere Belastungsfläche (ungünstige Wirkung), gleichzeitig wird aber das Eigengewicht des Schotterbetts auch verringert (günstige Wirkung). Genau das Gegenteil ist der Fall (hinsichtlich beider Wirkungen) bei einer Erhöhung der Schotterbetthöhe. Es soll untersucht werden, welche Lastverteilung hinsichtlich Ermüdung maßgebend wird.

Abbildung 6.43 und 6.44 stellen die resultierenden Wöhlerlinien der drei Modelle gegenüber. Das Ergebnis ist eher überraschend. Eine Erhöhung der Schotterbetthöhe erhöht gleichzeitig die Lebensdauer und umgekehrt. Der Einfluss der Lastverteilung ist jedoch nicht stark ausgeprägt.

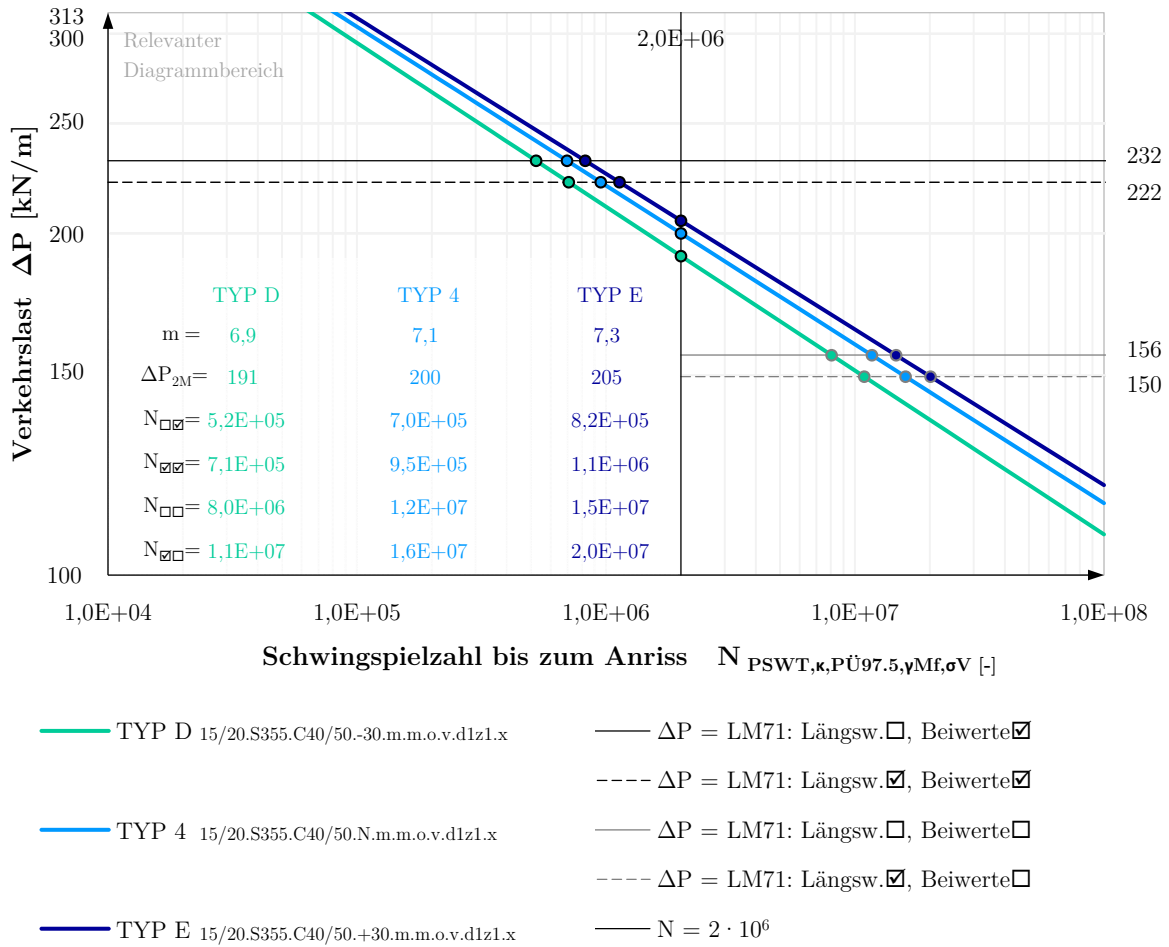


Abbildung 6.44: Vergleich der Wöhlerlinien - relevanter Diagrammbereich: Verkehrslastschwingbreite ΔP - Schwingspielzahl $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ Einfluss der Schotterbetthöhe
TYP D: Nennhöhe -30%, *Typ 4*: Nennhöhe, *TYP E*: Nennhöhe +30%,

Kapitel 7

Ergebnisanalyse, Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Ergebnisanalyse

7.1.1 Vergleich der Schädigungsbewertung auf Basis der Haupt- bzw. Vergleichsspannungen

In Tabelle 7.1 bis Tabelle 7.4 sind die resultierenden Schwingenspielzahlen für ausgewählte praxisrelevante Lastniveaus für das *Lastmodell 71* gemäß aller in der vorliegenden Arbeit verwendete Ansätze (*Methode M1* bis *Methode M5*, s. Tabelle 5.4), auf Basis der Anstrengungshypothese nach Rankine bzw. nach *von Mises*, gegenübergestellt. Eine Analyse der Tabelle bzw. der in Kapitel 5.7 dargestellten Lebensdauerdiagramme lässt erkennen, dass die Schädigungsbewertung auf Basis der Vergleichsdehnungsschwingbreiten nach *von Mises* konservativere Ergebnisse liefert als jene nach *Rankine*. Die Untersuchungen von *Song* [7], *Feldmann* [26] und *Schneider* [67], ebenso wie die Forschungstätigkeiten von *Mangerig* et. al. [10, 11, 12], zeigen, dass das Kerbdehnungskonzept unter Anwendung des Versagenskriteriums nach *Rankine* (Hauptspannungskriterium) sehr gut zur rechnerischen Ermittlung der Anrisslebensdauer geeignet ist. Durch die Gegenüberstellung von experimentellen und rechnerischen Resultaten wurde im Rahmen ihrer Arbeit die Schädigungsbewertung, basierend auf dem Versagenskriterium nach *Rankine*, als das relevante Kriterium identifiziert. Aus diesem Grund ist die Wöhlerlinie $\Delta P-N_{PWST,\kappa,P\ddot{U}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ nach *Rankine* gemäß Abbildung 5.24 – sofern ihre Gültigkeit durch Versuchsergebnisse bestätigt wird – als jene Wöhlerlinie zu verstehen, die für die eigentliche Bemessung anwendbar ist.

Tabelle 7.1 Lebensdauerwerte unter einem Lastniveau von $LM7I\checkmark\checkmark$ (Model: *TYP 10*)

| | Versagenstypothese nach <i>Rankine</i> | | Versagenstypothese nach <i>von Mises</i> | |
|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
| reine Wechselbelastung (<i>M1</i>) | $N_{\sigma 1}$ | $= 1,0 \cdot 10^{15}$ | $N_{\sigma V}$ | $= 5,3 \cdot 10^{13}$ |
| + Mittelspannungseinfluss (<i>M2</i>) | $N_{PSWT,\sigma 1}$ | $= 1,6 \cdot 10^{12}$ | $N_{PSWT,\sigma V}$ | $= 1,2 \cdot 10^{11}$ |
| + Oberflächenrauigkeit (<i>M3</i>) | $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$ | $= 1,3 \cdot 10^{11}$ | $N_{PSWT,\kappa,\sigma V}$ | $= 9,5 \cdot 10^9$ |
| + Überlebenswahrscheinl. (<i>M4</i>) | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma 1}$ | $= 2,5 \cdot 10^9$ | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma V}$ | $= 2,0 \cdot 10^8$ |
| + widerstandsseitiger Teils. (<i>M5</i>) | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ | $= 1,3 \cdot 10^8$ | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ | $= 1,3 \cdot 10^7$ |

Tabelle 7.2 Lebensdauerwerte unter einem Lastniveau von $LM7I\checkmark\checkmark$ (Model: *TYP 10*)

| | Versagenstypothese nach <i>Rankine</i> | | Versagenstypothese nach <i>von Mises</i> | |
|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
| reine Wechselbelastung (<i>M1</i>) | $N_{\sigma 1}$ | $= 6,5 \cdot 10^{14}$ | $N_{\sigma V}$ | $= 3,2 \cdot 10^{13}$ |
| + Mittelspannungseinfluss (<i>M2</i>) | $N_{PSWT,\sigma 1}$ | $= 1,1 \cdot 10^{12}$ | $N_{PSWT,\sigma V}$ | $= 8,1 \cdot 10^{10}$ |
| + Oberflächenrauigkeit (<i>M3</i>) | $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$ | $= 8,5 \cdot 10^{10}$ | $N_{PSWT,\kappa,\sigma V}$ | $= 6,3 \cdot 10^9$ |
| + Überlebenswahrscheinl. (<i>M4</i>) | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma 1}$ | $= 1,7 \cdot 10^9$ | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma V}$ | $= 1,3 \cdot 10^8$ |
| + widerstandsseitiger Teils. (<i>M5</i>) | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ | $= 8,9 \cdot 10^7$ | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ | $= 9,2 \cdot 10^6$ |

Tabelle 7.3 Lebensdauerwerte unter einem Lastniveau von $LM7I\checkmark\checkmark$ (Model: *TYP 10*)

| | Versagenstypothese nach <i>Rankine</i> | | Versagenstypothese nach <i>von Mises</i> | |
|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
| reine Wechselbelastung (<i>M1</i>) | $N_{\sigma 1}$ | $= 1,2 \cdot 10^{13}$ | $N_{\sigma V}$ | $= 5,5 \cdot 10^{11}$ |
| + Mittelspannungseinfluss (<i>M2</i>) | $N_{PSWT,\sigma 1}$ | $= 3,3 \cdot 10^{10}$ | $N_{PSWT,\sigma V}$ | $= 2,9 \cdot 10^9$ |
| + Oberflächenrauigkeit (<i>M3</i>) | $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$ | $= 2,6 \cdot 10^9$ | $N_{PSWT,\kappa,\sigma V}$ | $= 2,4 \cdot 10^8$ |
| + Überlebenswahrscheinl. (<i>M4</i>) | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma 1}$ | $= 5,6 \cdot 10^7$ | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma V}$ | $= 6,1 \cdot 10^6$ |
| + widerstandsseitiger Teils. (<i>M5</i>) | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ | $= 4,6 \cdot 10^6$ | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ | $= 6,5 \cdot 10^5$ |

Tabelle 7.4 Lebensdauerwerte unter einem Lastniveau von $LM7I\checkmark\checkmark$ (Model: *TYP 10*)

| | Versagenstypothese nach <i>Rankine</i> | | Versagenstypothese nach <i>von Mises</i> | |
|--|--|-----------------------|--|-----------------------|
| reine Wechselbelastung (<i>M1</i>) | $N_{\sigma 1}$ | $= 7,1 \cdot 10^{12}$ | $N_{\sigma V}$ | $= 3,3 \cdot 10^{11}$ |
| + Mittelspannungseinfluss (<i>M2</i>) | $N_{PSWT,\sigma 1}$ | $= 2,2 \cdot 10^{10}$ | $N_{PSWT,\sigma V}$ | $= 2,0 \cdot 10^9$ |
| + Oberflächenrauigkeit (<i>M3</i>) | $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$ | $= 1,7 \cdot 10^9$ | $N_{PSWT,\kappa,\sigma V}$ | $= 1,6 \cdot 10^8$ |
| + Überlebenswahrscheinl. (<i>M4</i>) | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma 1}$ | $= 3,9 \cdot 10^7$ | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma V}$ | $= 4,3 \cdot 10^6$ |
| + widerstandsseitiger Teils. (<i>M5</i>) | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ | $= 3,3 \cdot 10^6$ | $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ | $= 5,0 \cdot 10^5$ |

7.1.2 Relevante Lebensdauerwerte

Nachfolgend werden die signifikanten Ergebnisse der Lebensdauerberechnung der Lochdübeln für die untersuchten vier Lastniveaus zusammengefasst.

- **Lebensdauerwerte für die Auswertung von zukünftigen Versuchsergebnissen**

Die in Tabelle 7.5 dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Wöhlerlinienpunkte ΔP - N_{PSWT,κ,σ_1} und $\Delta\sigma_1$ - N_{PSWT,κ,σ_1} (nach *Rankine*) bzw. ΔP - N_{PSWT,κ,σ_1} und $\Delta\sigma_V$ - N_{PSWT,κ,σ_1} (nach *von Mises*) mit Berücksichtigung der Einflüsse aus Mittelspannung σ_m und Oberflächenrauigkeit κ (*Methode M3* nach Kapitel 5.3.4). Diese Ergebnisse bilden eine Vergleichsbasis für Wöhlerlinien, die noch anhand von diesbezüglichen Ermüdungsversuchen zur Verifikation der Rechenmodelle zu erstellen sind.

Tabelle 7.5 Relevante Ergebnisse der Wöhlerlinie gemäß *Methode M3* nach Kapitel 5.3.4 als Vergleichsbasis für die Auswertung von zukünftigen Versuchsergebnissen (Model: *TYP 10*)

| <i>Methode M 3</i> enthaltene Einflüsse: Mittelspannungseinfluss Oberflächenrauigkeit | Versagenstyp nach <i>Rankine</i> | | | Versagenstyp nach <i>von Mises</i> | | |
|--|-------------------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| | ΔP [kN/m] | $\Delta\sigma_1$ [N/mm ²] | N_{PSWT,κ,σ_1} [-] | ΔP [kN/m] | $\Delta\sigma_V$ [N/mm ²] | N_{PSWT,κ,σ_V} [-] |
| <i>N = 2 Millionen</i> | 508 | 219 | $2,0 \cdot 10^6$ | 401 | 230 | $2,0 \cdot 10^6$ |
| <i>LM71</i> ☐☑ | 232 | 105 | $1,7 \cdot 10^9$ | 232 | 138 | $1,6 \cdot 10^8$ |
| <i>LM71</i> ☑☑ | 222 | 101 | $2,6 \cdot 10^9$ | 222 | 132 | $2,4 \cdot 10^8$ |
| <i>LM71</i> ☐☐ | 156 | 71 | $8,5 \cdot 10^{10}$ | 156 | 92 | $6,3 \cdot 10^9$ |
| <i>LM71</i> ☑☐ | 150 | 68 | $1,3 \cdot 10^{11}$ | 150 | 89 | $9,5 \cdot 10^9$ |

- **Relevante Lebensdauerwerte für die Bemessung**

In Tabelle 7.6 sind Wöhlerlinienpunkte (der Regressionsgeraden) definiert, welche gemäß *Methode M5* (s. Kapitel 5.3.4) zusätzlich zu den oben angeführten Einflüssen noch die Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}}$ sowie den Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} enthalten. Somit entsprechen diese Punkte den eigentlich zur Anwendung kommenden Bemessungswerten, sofern diese durch Versuchsergebnisse, wie bereits erwähnt, bestätigt werden.

Tabelle 7.6 Relevante Ergebnisse der linearisierten Wöhlerlinie gemäß *Methode M5* nach Kapitel 5.3.4 als Bemessungswerte, sofern deren Gültigkeit durch Versuchsauswertung bestätigt wird (Model: *TYP 10*)

| <i>Methode M5</i> enthaltenen Einflüsse: Mittelspannungseinfluss Oberflächenrauigkeit Überlebenswahrscheinl. widers. Teilsicherheitsb. + Linearisierung | Versagenshypothese nach <i>Rankine</i> | | | Versagenshypothese nach <i>von Mises</i> | | |
|---|---|--|--|---|--|--|
| | ΔP [kN/m] | $\Delta\sigma_1$ [N/mm ²] | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$ [-] | ΔP [kN/m] | $\Delta\sigma_V$ [N/mm ²] | $N_{PSWT,\kappa,Pü97.5,\gamma Mf,\sigma V}$ [-] |
| <i>N = 2 Millionen</i> | 249 | 113 | $2,0 \cdot 10^6$ | 194 | 115 | $2,0 \cdot 10^6$ |
| <i>LM71</i> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> | 232 | 105 | $3,5 \cdot 10^6$ | 232 | 138 | $5,6 \cdot 10^5$ |
| <i>LM71</i> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> | 222 | 101 | $4,9 \cdot 10^6$ | 222 | 132 | $7,7 \cdot 10^5$ |
| <i>LM71</i> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | 156 | 71 | $7,5 \cdot 10^7$ | 156 | 92 | $9,4 \cdot 10^6$ |
| <i>LM71</i> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | 150 | 68 | $1,0 \cdot 10^8$ | 150 | 89 | $1,3 \cdot 10^7$ |
| Neigung <i>m</i> | 7,7 | 7,8 | – | 7,0 | 7,2 | – |

7.1.3 Beispiel zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit Lochdübel- leiste

- **Einwirkungsseite:**

Tabelle 7.7 fasst die in der vorliegenden Arbeit betrachteten vier Lastniveaus zusammen. Unter Berücksichtigung des Einflusses aus der Längswirkung, des dynamischen Beiwertes und des Schadensäquivalenzfaktors (s. Kapitel 4.4.3) ergibt sich eine Belastungsschwingbreite von $\Delta P_{Ed,2M} = 222$ [kN/m], die einer Schwingspielzahl von $N = 2 \cdot 10^6$ zuzuordnen ist.

Tabelle 7.7 Einwirkung aus Verkehrslast auf eine Trogbrücke mit SCSC-Platte (20 m Stützweite)

| | | |
|--|---|---------------------------------|
| <i>Lastmodell 71</i> : Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | <i>LM71</i> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> | $\Delta P_{Ed,2M} = 232$ [kN/m] |
| <i>Lastmodell 71</i> : Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | <i>LM71</i> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> | $\Delta P_{Ed,2M} = 222$ [kN/m] |
| <i>Lastmodell 71</i> : Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | <i>LM71</i> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | $\Delta P_{Ed,2M} = 156$ [kN/m] |
| <i>Lastmodell 71</i> : Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | <i>LM71</i> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | $\Delta P_{Ed,2M} = 150$ [kN/m] |

(Für die Berechnung der einzelnen Lastniveaus s. Tabelle 4.7)

- **Widerstandsseite:**

Für die Nachweisführung wird aus den in Kapitel 7.1.1 beschriebenen Gründen (Identifizierung der Schädigungsbewertung auf Basis der Hauptzugspannungen als relevantes Kriterium) die Wöhlerlinie $\Delta P - N_{PSWT, \kappa, P\ddot{u}97.5, \gamma Mf, \sigma 1}$, die anhand der Schädigungsbewertung auf Basis der Versagenshypothese nach Rankine ermittelt wurde, herangezogen. Vollständigkeitshalber sind in Tabelle 7.8 die Bemessungswerte der Ermüdungsfestigkeit anhand beider Versagenshypothesen dargestellt.

Tabelle 7.8 Bemessungswerte der Ermüdungsfestigkeit Lochdübelleiste, sofern deren Gültigkeit durch Versuchsauswertung bestätigt wird

| | Versagenshypothese nach <i>Rankine</i> | Versagenshypothese nach <i>von Mises</i> |
|---|--|--|
| linearisierte Wöhlerlinie (<i>Methode M5</i>) | $N_{PSWT, \kappa, P\ddot{u}97.5, \gamma Mf, \sigma 1}$ | $N_{PSWT, \kappa, P\ddot{u}97.5, \gamma Mf, \sigma V}$ |
| Ertragbare Verkehrslast <i>Lastmodell 71</i> bei $N = 2$ Millionen Lastspielzahl | $\Delta P_{Rd, 2M} = 249$ [kN/m] | $\Delta P_{Rd, 2M} = 194$ [kN/m] |
| Neigung m der linearisierten Wöhlerlinie | 7,7 | 7,0 |

- **Nachweis der Ermüdungsfestigkeit der Lochdübelleiste:**

Der Ermüdungsnachweis nach Gl. 5.1 lautet am Beispiel der Lochdübelleiste für eine Trogbrücke mit einer Stützweite von 20 m:

$$\Delta P_{Ed, 2M} = 222 \text{ kN/m} < \Delta P_{Rd, 2M} = 249 \text{ kN/m} \quad 7.1$$

Somit ist eine Kernaussage der vorliegenden Arbeit, dass der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit für die Lochdübelleiste der SCSC-Platte erfüllt ist. Abbildung 7.3 veranschaulicht den Nachweis.

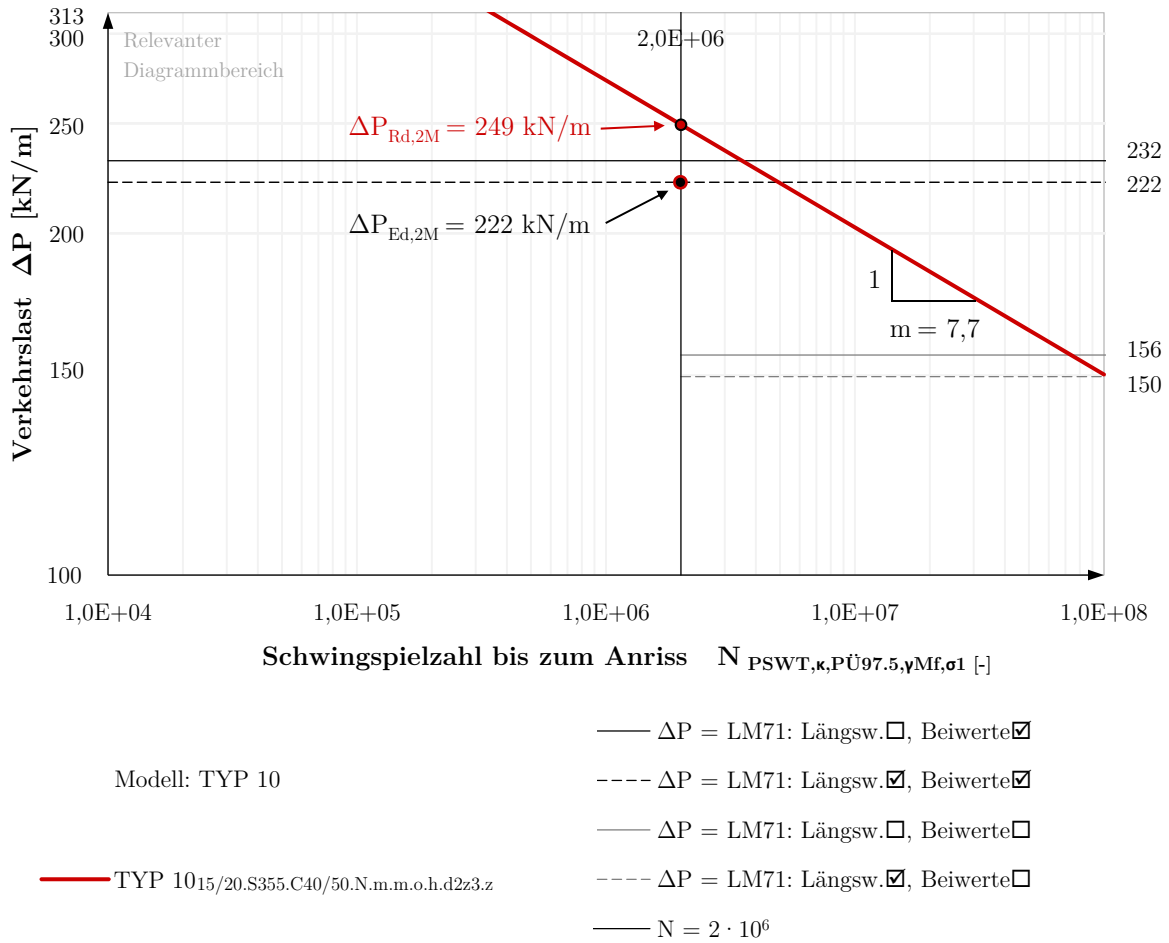


Abbildung 7.1: Nachweis der Ermüdungsfestigkeit für die Lochdübelleiste

7.2 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens der Lochdübelleiste der SCSC-Platte. Dabei handelt es sich um einen Schubverbinder, womit die Schubübertragung zwischen den außen liegenden Stahlblechen der SCSC-Platte gewährleistet wird.

Unter Verwendung der konzeptspezifischen zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve als Materialgesetz für den Stahl wurden mit Hilfe des FE-Programms ABAQUS die resultierenden Belastung-Dehnung-Spannung-Pfade in den kritischen Kerbelementen an den Öffnungen der Lochdübelleiste ermittelt. Das sehr detaillierte FE-Modell der SCSC-Platte umfasste rund 500.000 Finite-Elemente.

Für die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der Lochdübelleiste wurde von den zur Auswahl stehenden Verfahren das Kerbdehnungskonzept gewählt. Mit Hilfe dieses Verfahrens konnten die mehraxialen Beanspruchungszustände im Bereich der meistbeanspruchten kritischen Elemente und das nichtlineare Materialverhalten der beteiligten Werkstoffe in Betracht gezogen werden. Die Lebensdauerberechnung wurde mittels fünf verschiedener Methoden durchgeführt. Nach Betrachtung der Schwingbeanspruchung als reine Wechselbelastung ($R = -1$, $\sigma_m = 0$, *Methode M1*), wurden folgende Einflüsse zusätzlich noch berücksichtigt:

- Mittelspannung σ_m (*Methode M2*),
- Oberflächenrauigkeit κ (*Methode M3*),
- Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 97,5\%$ (*Methode M4*),
- widerstandseitiger Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mf} = 1,35$ (*Methode M5*).

Die Einflüsse mehrachsiger Spannungs- und Dehnungszustände, zur Beschreibung der Anstrengung des Materials, wurden über zwei Anstrengungshypothesen berücksichtigt:

- auf Basis des Versagenskriteriums nach *Rankine*, gemäß der maximalen Hauptspannungen σ_1 ,
- auf Basis des Versagenskriteriums nach *von Mises*, gemäß der Vergleichsspannungen σ_V .

In der gegenständlichen Forschungsarbeit wurde eine Berechnungsmethode gezeigt, womit das Kerbdehnungskonzept – unter Einhaltung der konzeptspezifischen Vorschriften – auch für solche Konstruktionen verwendet werden kann, die neben veränderlichen Belastungen auch ständig wirkenden Belastungen ausgesetzt sind. Durch Trennung der resultierenden Erstbelastungskurven in einen ständigen und einen zyklischen Teil wurden die Kraftumlagerungen infolge Vorbelastung aus ständiger Belastung in Betracht gezogen. Damit wurden die gesuchten Spannungs- bzw. Dehnungswerte als Eingangsgrößen der Lebensdauerberechnung

tatsächlich in jenen Kerbelementen (Finite-Elemente) der Lochdübelreihe ermittelt, in denen die maximalen Beanspruchungsschwingbreiten infolge Verkehrslast auftreten. Anders ausgedrückt: die Änderung der kritischen Stelle der Dübelreihe im Verlauf der Laststeigerung wurde richtig erfasst.

Durch Gegenüberstellung der maximalen Spannungs- und Dehnungswerte bzw. der resultierenden Wöhlerlinien wurde die oben angeschweißte Lochdübelreihe als die maßgebende Dübelreihe der SCSC-Platte identifiziert. Um die Einflüsse einer Vielzahl von anderen Modellierungs- und realen Parameter zu untersuchen, wurde eine ausführliche Parameterstudie an 18 FE-Modellen durchgeführt. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse der Parameterstudie kurz zusammengefasst.

- **Parameterstudie I: Modellierungsparameter**

Im Zuge der Parameterstudie wurde der Einfluss der Netzfeinheit durch Variation der *lokalen* (im Dübelbereich) und *globalen* (außerhalb des Dübelbereichs) Diskretisierung untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Netzfeinheit einen wesentlichen Einfluss auf die Anzahl der Finiten-Elemente und somit auf die Berechnungszeit hat. Eine *lokale* Erhöhung der Netzfeinheit führte zu einer Spannungskonzentration im Dübelbereich und somit zu einer Verringerung der Lebensdauer. Eine *gleichmäßige* Verfeinerung der Diskretisierung im Gesamtmodell reduzierte ebenso die Lebensdauer. Im Allgemeinen konnte festgestellt werden, dass eine Vernetzung im Bereich der meistbeanspruchten Stelle mit einer maximalen Elementkantenlänge von 3 mm ein befriedigend genaues Ergebnis liefert. Der Einfluss des Betonmodells im Druck- bzw. im Zugbereich wurde getrennt untersucht. Dabei hatte das verwendete Betonmodell im Druckbereich nahezu keine Auswirkung auf die Lebensdauer. Im Zugbereich führte die Betonmodelle mit Materialdefinition auf Basis der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung auf ein näherungsweise deckungsgleiches Ergebnis. Das Betonmodell, welches auf Basis der Spannungs-Dehnungs-Beziehung definiert wurde, verringerte deutlich die Lebensdauer. Der Einfluss der Schweißnahtmodellierung war vernachlässigbar und die Belastungsgeschwindigkeit hatte gar keine Auswirkung auf die resultierende Wöhlerlinien.

- **Parameterstudie II: Reale Einflüsse**

Im Zuge der Parameterstudie II zeigte sich, dass die Lebensdauer vor allem von der Stahlsorte abhängig ist. Eine Erhöhung der Zugfestigkeit von $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ (Baustahl S235) auf $f_u = 490 \text{ N/mm}^2$ (Baustahl S355) erhöht die ertragbare Verkehrslastschwingbreite bei 2 Millionen Lastspielzahl um etwa 27% ($\frac{252}{199} = 1,27$). Die verwendete Betongüte (untersucht wurden C25/30 bzw. C40/50) hatte nahezu keinen Einfluss auf den Verlauf der

ermittelten Bauteil-Wöhlerlinien. Die Variation der Schotterbetthöhe (Nennhöhe -30%, Nennhöhe, Nennhöhe +30%) hatte ebenso eine untergeordnete Bedeutung.

Als wesentliches Ergebnis der Arbeit wurden die resultierenden Wöhlerlinien linearisiert, um eine einfach anwendbare Ingenieurmethode für den Ermüdungsnachweis der Lochdübelreihe zu erhalten. Mit dieser Methode wurde der Nachweis nicht auf Spannungsebene geführt, sondern - wegen der komplexen strukturellen Zusammenhänge, die sich mit der Ermittlung der kritischen Spannungen und Kerbstellen ergeben - auf Lastebene, in Form einer Gegenüberstellung von einwirkendem und widerstehendem Lastniveau, auf Basis des *Lastmodells 71*.

Abschließend wurde beispielhaft die Ermüdungsfestigkeit der Lochdübelreihe, anhand des als Basismodell ausgewählten Modells *TYP 10*, nachgewiesen. Als Resultat konnte der Nachweis als erfüllt angesehen werden.

7.3 Ausblick

Da das in der vorliegenden Arbeit dargestellte Nachweiskonzept auf die in den maßgebenden Kerbelementen auftretenden rechnerisch ermittelten Beanspruchungsgrößen basiert, ist das nächste wesentliche Forschungsziel die Absicherung dieser rechnerischen Ergebnisse durch Bauteilversuche. Dazu können zyklischen „Großversuche“ an SCSC-Plattenelementen mit einer Stützweite von rund 4000 mm, wie im geplanten Anwendungsfall, oder zyklische Abscherversuche (engl.: Push-Out-Test) an Kleinversuchskörpern in Frage kommen. Im Rahmen dieser experimentellen Untersuchungen sind die Annahmen hinsichtlich der Betonermüdung (das Betonversagen kann durch Limitierung der Oberlast ausgeschlossen werden) zu prüfen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem hinsichtlich der Ausweitung der Parameterstudien. Dabei sind die folgenden geometrischen Einflüsse zu berücksichtigen:

- Blechdicke der äußere Stahlbleche (15 mm, 12 mm, 10 mm),
- Blechdicke der Dübelreihe (20 mm, 25 mm),
- Gesamthöhe der SCSC-Platte (200 mm, 190 mm, 180 mm).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Hauptträgersteg der Trogbrücke (Endplatte der SCSC-Platte) vereinfacht in vertikaler Lage modelliert. Als ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist noch die Optimierung dieses Auflagerbereiches der Platte zu sehen. Dabei sollte

- der Einfluss der Neigung der Endplatte (Hauptträgersteg),
- die Form der Auflagersteifen,

- die Einflüsse aus der aus derzeitiger Sicht 2 mm breiten Spalte, zwischen der Endplatte (Hauptträgersteg) und Auflagersteife,
- die geometrischen und schweißtechnischen Einflüsse auf die Schweißnahtausbildung zwischen der Endplatte (Hauptträgersteg) und der außen liegenden Stahlbleche (Boden- und Deckblech)

untersucht werden. Nach Festlegung der oben erwähnten Parameter im Auflagerbereich, ist das Ermüdungsverhalten dieses Bereiches zu untersuchen - mit besonderer Rücksicht auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnähte.

Eine weiterer notwendiger Schritt zur Anwendbarkeit der SCSC-Platte als Fahrbahnelement für Eisenbahnbrücken ist die Untersuchung des Langzeitverhaltens der Platte. Dabei sind vor allem die Einflüsse des zeitabhängigen Materialverhaltens des Betons infolge Kriechen und Schwinden auf die dauerhafte Gebrauchstauglichkeit der Verbundplattenkonstruktion von zentraler Bedeutung. Infolge zyklischer Kraftübertragung wird der Beton im Bereich der Stirnfläche der Lochdübelleiste mit steigender Lastspielzahl zunehmend verdichtet. Dieser inelastische Schlupf führt zu einer Zunahme der Durchbiegung der SCSC-Platte. Aus diesem Grund ist als ein weiteres Forschungsziel der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit unter vorwiegend nicht-ruhender Belastungen mittels lastzyklenabhängiger Berechnung des Schlupffortschritts zu sehen.

Abschließend sei erwähnt, dass die oben erwähnten Abscherversuche (Push-Out-Test an Kleinversuchskörpern) an 12 (von 15) Versuchskörpern bereits durchgeführt wurden. Die Analyse der Versuchsergebnisse findet (aus Zeitgründen) außerhalb der vorliegenden Arbeit (in [68]) statt und ist insofern als weiterer Ausblick anzusehen.

Literaturverzeichnis

- [1] Herrmann, P., *Tragfunktionsanalyse und rechnerische Modellbildung einer neuartigen Sandwich-Verbundplatte (SCSC-Platte) als Fahrbahndeck für Eisenbahnbrücken*, Dissertation, Institut für Tragkonstruktionen - Stahlbau, Technische Universität Wien, Österreich, Februar 2013.
- [2] Steurer, M.; Petraschek, T.; Fink, J., *Development of an innovative sandwich plate for trough-type railway bridges*, Steel Construction, Vol.9, No. 3, ISBN 1867-0520, 2016.
- [3] Fink, J.; Steurer, M.; Takács, P., *Die Beurteilung der Ermüdungsbeanspruchbarkeit der SCSC-Sandwichplatte auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes*, Seminarunterlagen, Biberach 39. Stahlbauseminar, 2017.
- [4] ÖNORM EN 1991-2, *Eurocode1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*, Österreichisches Normungsinstitut, 01.08.2004.
- [5] ÖNORM EN 1993-1-9, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung*, Österreichisches Normungsinstitut, 1.11.2005.
- [6] Steurer, M.; Fink, J., *Weiterführende Forschung zur neuartigen Sandwich Verbundplatte als Fahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken; SCSC-Platte*, Wien: Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung, Mai 2012.
- [7] Song, J., *Untersuchung der Anrisslebensdauer von Betondübeln mit Hilfe des Örtlichen Konzepts*, TU Darmstadt: Dissertation am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, 2002.
- [8] Lange, J.; Song, J., *Untersuchung der Anrißlebensdauer von Betondübeln mit Hilfe des Örtlichen Konzepts*, Berlin: Ernst & Sohn, Stahlbau 73, Heft 3, 2004.
- [9] Juen, L., *Analyse des Ermüdungsverhaltens von Kronendübeln als alternative Schubverbinder*, Österreich: Dissertation, Institut für Tragkonstruktionen - Stahlbau, Technische Universität Wien, Februar 2013.

-
- [10] Burger, S., *Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Betondübeln im Verbundbau*, Universität der Bundeswehr, Münschen: Dissertation am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, 2011.
- [11] Mangerig, I.; Wagner, R.; Burger, S.; Wurzer, O.; Zapfe, C., *Zum Einsatz von Betondübeln im Verbundbau (Teil 2) - Nichtruhende Beanspruchung*, Ernst & Sohn, Stahlbau 81, Heft 1, S. 26 - 31, 2012.
- [12] Wagner, R., *Untersuchungen zum Verbundverhalten von Betondübeln in vorwiegend ruhend und nicht ruhend beanspruchten Konstruktionen*, Ernst & Sohn, Stahlbau 80, Heft 4, 2011.
- [13] Fritsch, R.; Pasternak, H., *Stahlbau: Grundlagen und Tragwerke*, Springer-Verlag, 2013.
- [14] Gudehus, H.; Zenner, H., *Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung*, Düsseldorf: Verlag Stahleisen (4. Aufl.), 1999.
- [15] Haibach, E., *Betriebsfestigkeit; Verfahren und Daten zur Batueilberechnung*, Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [16] Radaj, D.; Sonsino C. M., *Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten*, Düsseldorf: Fachbucheihe Schweißtechnik, Band 142, DVS Verlag, 2000.
- [17] Radaj, D.; Vormwald, M., *Ermüdungsfestigkeit; Grundlage für Ingenieure*, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [18] Fink, J., *Stahlbau 1 - Studienblätter zur Vorlesung*, Technische Universität Wien, Österreich: Institut für Tragkonstruktionen, 2006.
- [19] Wöhler, A., *Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl.*, Z. f. Bauwesen 20, Sp. 73-106, 1870.
- [20] Basquin, O. H., *The exponential law of endurance test*, Proc. ASTM 10, S. 625-630, 1910.
- [21] Haigh, B. P., *Report on alternating stress test of a sample of mild steel.*, Manchester: BASP Rep. 85, S. 163-170. Brit. Ass. Stress Committee, 1954.
- [22] Smith, J. H., *Some experiments on fatigue of metals*, J. Iron Steel Inst. 82 (1910) 2, 246-318, 1910.
- [23] Gallwoszus, J., *Zur Ermüdung von Verbundkonstruktionen mit Verbunddübeln*, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2014.
- [24] Hänel, B.; Haibach, E.; Seeger, T.; Wirthgen, G.; Zenner, H., *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und*

- Aluminiumwerkstoffen*, FKM Forschungskuratorium Maschinenbau, VDMA Verlag 5. Auflage, 2003.
- [25] Hobbacher, A., *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile*, IIW International Institute of Welding, 1997.
- [26] Feldmann, M.; Hechler, O.; Hegger, J.; Rauscher, S., *Neue Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Verbundträgern aus hochfesten Werkstoffen mit Kopfbolzendübeln und Puzzleleiste*, Stahlbau 76 (2007), H. 11, S. 826-844..
- [27] Greuling, S.; Seeger, T., *Konzepte zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von Feinblechschweißnähten*, Materials Testing, Band 04/2004, S. 157-169..
- [28] Coffin, L. F. jr., *A study of the Effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal*, Trans. ASME 76 (1954), S.931/50.
- [29] S. S. Manson, *Fatigue: a complex subject - some simple approximations*, Experimental Mechanics 5 (1965) Nr. 7, S. 193-226.
- [30] Morrow, J. D., *Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals*, ASTM: STP 378, American Society of Testing and Materials, S. 45-87, 1965.
- [31] Ramberg, W.; Osgood, W. R., *Description of stress-strain curves by three parameters*, 1943: NACA Techn. Rep. 902, NACA.
- [32] Landgraf, R. W.; Morrow, J. D.; Endo, T., *Determination of the cyclic stress-strain curve*, Journal of Materials 4 (1969) Nr. 1, S. 176/88.
- [33] Bäuml, A. jr.; Seeger, T., *Materials data for cyclic loading. Supplement 1.*, Amsterdam: Elsevier, 1990.
- [34] Takács, P.; Fink, J., *Neuartige Sandwichfahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken - Analyse des Ermüdungsverhaltens der Lochdübelleiste anhand des Kerbdehnungskonzeptes*, Ernst & Sohn, Stahlbau 86. Jahrgang, Heft 5, S. 441 - 451, 2017.
- [35] Sinan, K., *Extension of the uniform Material Law for High Strength Steels*, Weimar: Master`s Thesis, 2008.
- [36] Smith, K. N.; Watson, P.; Topper, T. H., *A stress-strain function for the fatigue of materials*, Journal of Materials 5 No. 4, 1970, pp. 767-778.
- [37] Schott, G., *Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit*, Weinheim: Wiley-Vch Verlag, 2009.

- [38] Masing, G., *Eigenstressen und Verfestigung beim Messing*, Proc. 2nd Int. Conf. Applied Mech., Zürich, 1926.
- [39] Seeger, T., *Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise. Stahlbau Handbuch, Bd. 1, Teil B, S.5-123*, Köln: Stahlbau-Verlagsgesellschaft, 1996.
- [40] Clormann, U. H.; Seeger, T., *RAINFLOW - HCM, Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage*, Ernst & Sohn, Stahlbau 55, Heft 3, S. 65-71, 1986.
- [41] ABAQUS, *Abaqus 6.12*, Dassault Systèmes Simulia Corporation, 2012.
- [42] DLUBAL, *RFEM 5.01*, Deutschland, 2013.
- [43] ÖNORM EN 1993-1-1, *Eurucode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, 01.03.2012.
- [44] ÖNORM EN 1992-1-1, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, 01.11.2005.
- [45] Pavlović, M.; Markovic, Z.; Veljkovic, M.; Budevac, D.: Bolted shear connectors vs. headed studs, *Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests*, Journal of Constructional Steel Research, Volume 88, S.134-149.: Elsevier, September 2013.
- [46] ABAQUS, *Abaqus 6.12, Abaqus Analysis User's Manual*, USA: Dassault Systèmes Simulia Corporation, 2012.
- [47] Trunk, G., *Einfluß der Bauteilgröße auf die Bruchenergie von Beton*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Dissertation, 1999.
- [48] Kueres, D.; Stark, A.; Herbrand, M.; Claßen, M., *Numerische Abbildung von Beton mit einem plastischen Schädigungsmodell - Grundlegende Untersuchungen zu Normalbeton und UHPC*, Bauingenieur Vol. 90 , Heft 6, S. 252-264., Juni 2015.
- [49] Ricker, M., *Numerische Untersuchungen zum Durchstanzen von gedrunghenen Einzelfundamenten*, Bauingenieur 86, Heft 10, S. 443-453., 2011.
- [50] Claßen, M.; Herbrand, M.; Kueres, D.; Hegger, J., *Derivation of design rules for innovative shear connectors in steel concrete composites by systematic use of nonlinear Finite Element Analysis (FEA)*, Structural Concrete Vol. 4, Heft 17, S. 646-655., Dezember 2016.

- [51] Herbrand, M.; Kueres, D.; Stark, A.; Claßen, M., *Numerische Simulation von balken- und plattenförmigen Bauteilen aus Stahlbeton und UHPC mit einem plastischen Schädigungsmodell*, Bauingenieur Vol. 91, Heft 2, S. 46-56., Februar 2016.
- [52] Euro-International Committee for Concrete, „CEB-FIP Model Code 1990,“ T. Telford, London , 1993.
- [53] International Federation for Structural Concrete, „fib Model Code for Concrete Structures 2010,“ Lausanne, 2012.
- [54] ABAQUS, *Abaqus 6.12, Abaqus Example Problems Manual*, USA: Dassault Systèmes Simulia Corporation, 2012.
- [55] Nussbauer, A.; Günther, H., Kommentar zu DIN EN 1993-1-9: Ermüdung; Grundlagen und Erläuterungen, Ernst & Sohn; Stahlbau Kalender; S.255 - 351, 2012.
- [56] ÖNORM EN 1993-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken*, Österreichisches Normungsinstitut, 01.04.2007.
- [57] ÖNORM B 1993-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken*, Österreichisches Normungsinstitut, 01.03.2008.
- [58] Unterweger, H., *Einwirkungen auf Brücken nach Eurocode - Vorlesungsskript Brückenbau, Anhang 1*, Technische Universität Graz: Institut für Stahlbau.
- [59] ÖNORM B 1991-2, *Eurocode1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken - nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-2 und nationale Ergänzungen*, Österreichisches Normungsinstitut, 01.08.2004.
- [60] Kuss, K.; Fink, J., *Regelstatik für ÖBB - Trobrücken mit Stützweiten von 10,0 - 20,0 m*, 2.,7.
- [61] Günthel, T., *Dlubal RFEM 5 - Schweißnahtspannungen an Flächenfugen*, Dlubal Software, 2014.
- [62] Siebel, E.; Gaier, M., *Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Werkstoffe*, VDI-Z 98 Nr. 30, 1956, pp. 1715-1723.
- [63] EN9013: ÖNORM EN ISO 9013, *Thermisches Schneiden - Einteilung thermischer Schnitte - Geometrische Produktspezifikation und Qualität*, Heinestraße 38, 1020 Wien: ON Österreichisches Normungsinstitut, 01.04.2004.
- [64] EN1090: ÖNORM EN 1090-2, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken*

- *Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*, Heinestraße 38, 1020 Wien: ON Österreichisches Normungsinstitut, 01.01.2012.

- [65] Juvinall, R. C., *Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength*, New York: McGraw-Hill, 1967.
- [66] ÖNORM B 1991-1-1, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewichte, Nutzlasten im Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, 01.01.2006.
- [67] Schneider R, *Örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen*, TU Darmstadt: Dissertation am Institut für Maschinenbau, 2011.
- [68] Takács, P.; Fink, J., *Ergebnisbericht Forschungsprojekt VIF2015, Projekt Nr. 854616 (Thema Bautechnik - 2.2.10 Ermüdungsfestigkeit SCSC-Platte) Kurztitel: FLS SCSC-Platte (in Bearbeitung)*, Wien: Institut für Tragkonstruktionen - Forschungsbereich Stahlbau, Technische Universität Wien.

Anhang A - ABAQUS

A.1 Werkstoffmodelle

A.1.1 Baustahl S355

| S355 | | | | | | | | |
|------------|----------------------|--------------------|----------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------|------|
| Lastspiele | Dehnungs-Wöhlerlinie | | | | Schädigungsparameter-Wöhlerlinie | | | |
| | elastische Dehnung | plastische Dehnung | gesamt Dehnung | Spannungsamplitude | Schädigungsparameter | Schädigungsparameter | Schädigungsparameter | |
| | $\epsilon_{a,e}$ | $\epsilon_{a,p}$ | ϵ_a | σ_a | $P_{SWT,P\ddot{u}50}$ | $P_{SWT,k,P\ddot{u}50}$ | $P_{SWT,k,P\ddot{u}97.5}$ | |
| | [-] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | |
| 0 | 1,0E+00 | 0,00330 | 0,39469 | 0,39798 | 692 | 7605 | 6084 | 4320 |
| 1 | 5,3E+01 | 0,00233 | 0,03953 | 0,04186 | 490 | 2075 | 1660 | 1179 |
| 2 | 1,0E+02 | 0,00221 | 0,02731 | 0,02951 | 464 | 1695 | 1356 | 963 |
| 3 | 1,0E+03 | 0,00181 | 0,00718 | 0,00899 | 379 | 846 | 677 | 481 |
| 4 | 1,0E+04 | 0,00148 | 0,00189 | 0,00337 | 311 | 469 | 375 | 266 |
| 5 | 1,0E+05 | 0,00121 | 0,00050 | 0,00171 | 254 | 302 | 241 | 171 |
| 6 | 1,0E+06 | 0,00099 | 0,00013 | 0,00112 | 208 | 221 | 177 | 126 |
| 7 | 1,0E+07 | 0,00081 | 0,00003 | 0,00085 | 170 | 174 | 139 | 99 |
| 8 | 1,0E+08 | 0,00066 | 0,00001 | 0,00067 | 139 | 140 | 112 | 80 |
| 9 | 1,0E+09 | 0,00054 | 0,00000 | 0,00055 | 114 | 114 | 91 | 65 |
| 10 | 1,0E+10 | 0,00044 | 0,00000 | 0,00045 | 93 | 93 | 75 | 53 |
| 11 | 1,0E+11 | 0,00036 | 0,00000 | 0,00036 | 76 | 76 | 61 | 43 |
| 12 | 1,0E+12 | 0,00030 | 0,00000 | 0,00030 | 63 | 63 | 50 | 36 |
| 13 | 1,0E+13 | 0,00024 | 0,00000 | 0,00024 | 51 | 51 | 41 | 29 |
| 14 | 1,0E+14 | 0,00020 | 0,00000 | 0,00020 | 42 | 42 | 34 | 24 |
| 15 | 1,0E+15 | 0,00016 | 0,00000 | 0,00016 | 34 | 34 | 27 | 19 |
| 30 | 1,0E+30 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00001 | 2 | 2 | 1 | 1 |

| | zyklische Arbeitslinie | | | | Statische Arbeitslinie | | | |
|---|------------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------|
| | Yield Stress | Plastic Strain | elastische Dehnung | gesamt Dehnung | Yield Stress | linear-elastisch Plastic Strain | ideal-plastisch elastische Dehnung | gesamt Dehnung |
| | σ_a | $\epsilon_{a,p}$ | $\epsilon_{a,e}$ | ϵ_a | σ_a | $\epsilon_{a,p}$ | $\epsilon_{a,e}$ | ϵ_a |
| | [N/mm ²] | [-] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [-] | [-] | [-] |
| 1 | 139,35 | 0,000000 | 0,0006636 | 0,0006636 | 355,00 | 0,000000 | 0,0016905 | 0,0016905 |
| 2 | 170,25 | 0,000034 | 0,0008107 | 0,0008451 | 355,00 | 0,200000 | 0,0016905 | 0,2016905 |
| 3 | 208,02 | 0,000131 | 0,0009906 | 0,0011212 | | | | |
| 4 | 254,15 | 0,000497 | 0,0012103 | 0,0017071 | | | | |
| 5 | 310,53 | 0,001889 | 0,0014787 | 0,0033678 | | | | |
| 6 | 379,40 | 0,007182 | 0,0018067 | 0,0089888 | | | | |
| 7 | 463,55 | 0,027306 | 0,0022074 | 0,0295132 | | | | |
| 8 | 490,00 | 0,039528 | 0,002333 | 0,0418618 | | | | |

A.1.2 Baustahl S235

| S235 | | | | | | | |
|----------------|----------------------|--------------------|----------------|----------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Lastspiele | Dehnungs-Wöhlerlinie | | | | Schädigungsparameter-Wöhlerlinie | | |
| | elastische Dehnung | plastische Dehnung | gesamt Dehnung | Spannungs-amplitude | Schädigungs-parameter | Schädigungs-parameter | Schädigungs-parameter |
| | $\epsilon_{a,e}$ | $\epsilon_{a,p}$ | ϵ_a | σ_a | $P_{SWT,P\bar{u}50}$ | $P_{SWT,k,P\bar{u}50}$ | $P_{SWT,k,P\bar{u}97.5}$ |
| | [-] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 1,0E+00 | 0,00242 | 0,39469 | 0,39711 | 508 | 6511 | 5535 | 3930 |
| 5,3E+01 | 0,00171 | 0,03953 | 0,04124 | 360 | 1766 | 1501 | 1066 |
| 1,0E+02 | 0,00162 | 0,02731 | 0,02893 | 341 | 1438 | 1223 | 868 |
| 1,0E+03 | 0,00133 | 0,00718 | 0,00851 | 279 | 706 | 600 | 426 |
| 1,0E+04 | 0,00109 | 0,00189 | 0,00298 | 228 | 378 | 321 | 228 |
| 1,0E+05 | 0,00089 | 0,00050 | 0,00139 | 187 | 233 | 198 | 141 |
| 1,0E+06 | 0,00073 | 0,00013 | 0,00086 | 153 | 166 | 141 | 100 |
| 1,0E+07 | 0,00060 | 0,00003 | 0,00063 | 125 | 129 | 109 | 78 |
| 1,0E+08 | 0,00049 | 0,00001 | 0,00050 | 102 | 103 | 88 | 62 |
| 1,0E+09 | 0,00040 | 0,00000 | 0,00040 | 84 | 84 | 71 | 51 |
| 1,0E+10 | 0,00033 | 0,00000 | 0,00033 | 69 | 69 | 58 | 41 |
| 1,0E+11 | 0,00027 | 0,00000 | 0,00027 | 56 | 56 | 48 | 34 |
| 1,0E+12 | 0,00022 | 0,00000 | 0,00022 | 46 | 46 | 39 | 28 |
| 1,0E+13 | 0,00018 | 0,00000 | 0,00018 | 38 | 38 | 32 | 23 |
| 1,0E+14 | 0,00015 | 0,00000 | 0,00015 | 31 | 31 | 26 | 19 |
| 1,0E+15 | 0,00012 | 0,00000 | 0,00012 | 25 | 25 | 21 | 15 |
| 1,0E+30 | 0,00001 | 0,00000 | 0,00001 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| zyklische Arbeitslinie | | | | Statische Arbeitslinie | | | |
|------------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------|
| Yield Stress | Plastic Strain | elastische Dehnung | gesamt Dehnung | Yield Stress | linear-elastisch Plastic Strain | ideal-plastisch elastische Dehnung | gesamt Dehnung |
| σ_a | $\epsilon_{a,p}$ | $\epsilon_{a,e}$ | ϵ_a | σ_a | $\epsilon_{a,p}$ | $\epsilon_{a,e}$ | ϵ_a |
| [N/mm ²] | [-] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [-] | [-] | [-] |
| 102,38 | 0,000000 | 0,0004875 | 0,0004875 | 235,00 | 0,000000 | 0,0011190 | 0,0011190 |
| 125,08 | 0,000034 | 0,0005956 | 0,0006300 | 235,00 | 0,200000 | 0,0011190 | 0,2011190 |
| 152,83 | 0,000131 | 0,0007278 | 0,0008584 | | | | |
| 186,73 | 0,000497 | 0,0008892 | 0,0013861 | | | | |
| 228,14 | 0,001889 | 0,0010864 | 0,0029755 | | | | |
| 278,74 | 0,007182 | 0,0013273 | 0,0085095 | | | | |
| 340,57 | 0,027306 | 0,0016218 | 0,0289275 | | | | |
| 360,00 | 0,039528 | 0,001714 | 0,0412428 | | | | |

A.1.3 Beton C40/50

- Arbeitslinie im Druckbereich

| | Punkt | # | Spannung | Elastische Dehnung | Inelastische Dehnung | Gesamt Dehnung | |
|--|-------|----------|---|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------|
| | | | $\sigma_c(\varepsilon_c)$ [N/mm ²] | $\varepsilon_{c,el}$ [-] | $\varepsilon_{c,in}$ [-] | ε_c [-] | η/μ [-] |
| Nichtlinearer Verlauf nach EN1992-1-1:2004 zw. A-D | A | 0 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| | B | 1 | 19,20000 | 0,00055 | 0,00000 | 0,00055 | 0,23454 |
| | | 2 | 29,09144 | 0,00083 | 0,00007 | 0,00090 | 0,38763 |
| | | 3 | 37,14749 | 0,00105 | 0,00020 | 0,00126 | 0,54073 |
| | | 4 | 43,07647 | 0,00122 | 0,00039 | 0,00161 | 0,69382 |
| | | 5 | 46,74300 | 0,00133 | 0,00064 | 0,00197 | 0,84691 |
| | C | 6 | 48,00000 | 0,00136 | 0,00096 | 0,00232 | 1,00000 |
| | | 7 | 47,10765 | 0,00134 | 0,00128 | 0,00262 | 1,12647 |
| | | 8 | 44,36432 | 0,00126 | 0,00165 | 0,00291 | 1,25293 |
| | D | 9 | 39,66495 | 0,00113 | 0,00208 | 0,00321 | 1,37940 |
| 10 | | 32,89637 | 0,00093 | 0,00257 | 0,00350 | 1,50586 | |
| Sinusförmige Verlängerung zw. D-E | | 11 | 29,01812 | 0,00082 | 0,00294 | 0,00377 | 0,01 |
| | | 12 | 24,69802 | 0,00070 | 0,00386 | 0,00456 | 0,04 |
| | | 13 | 20,35670 | 0,00058 | 0,00531 | 0,00589 | 0,09 |
| | | 14 | 16,18372 | 0,00046 | 0,00728 | 0,00774 | 0,16 |
| | | 15 | 12,33543 | 0,00035 | 0,00977 | 0,01013 | 0,25 |
| | | 16 | 8,95289 | 0,00025 | 0,01279 | 0,01304 | 0,36 |
| | | 17 | 6,16407 | 0,00018 | 0,01631 | 0,01649 | 0,49 |
| | | 18 | 4,08214 | 0,00012 | 0,02034 | 0,02046 | 0,64 |
| | | 19 | 2,80257 | 0,00008 | 0,02489 | 0,02497 | 0,81 |
| | E | 20 | 2,40000 | 0,00007 | 0,02993 | 0,03000 | 1,00 |
| Linearer Verlauf zw. E-F | F | 21 | 0,40000 | 0,00001 | 0,09999 | 0,10000 | |

- Druckschädigungsparameter

| | Punkt | # | Spannung | Druckschädigungsparam. |
|---|-------|----------|------------------------|------------------------|
| | | | $\sigma_c(\epsilon_c)$ | d_c |
| | | | [N/mm ²] | [-] |
| 0 bis fcm, etwa sinusförmiger Verlauf zw. C-D | A | 0 | 0,00000 | 0,00 |
| | B | 1 | 19,20000 | 0,00 |
| | | 2 | 29,09144 | 0,00 |
| | | 3 | 37,14749 | 0,00 |
| | | 4 | 43,07647 | 0,00 |
| | | 5 | 46,74300 | 0,00 |
| | C | 6 | 48,00000 | 0,00 |
| | | 7 | 47,10765 | 0,02 |
| | | 8 | 44,36432 | 0,08 |
| | D | 9 | 39,66495 | 0,17 |
| 10 | | 32,89637 | 0,31 | |
| Sinusförmiger Verlauf zw. D-E | | 11 | 29,01812 | 0,40 |
| | | 12 | 24,69802 | 0,49 |
| | | 13 | 20,35670 | 0,58 |
| | | 14 | 16,18372 | 0,66 |
| | | 15 | 12,33543 | 0,74 |
| | | 16 | 8,95289 | 0,81 |
| | | 17 | 6,16407 | 0,87 |
| | | 18 | 4,08214 | 0,91 |
| | E | 19 | 2,80257 | 0,94 |
| Lineare r Verlauf zw. E-F | | 20 | 2,40000 | 0,95 |
| | F | 21 | 0,40000 | 0,99 |

- Arbeitslinie im Zugbereich und zugehöriger Zugschädigungsparameter (MC 1990, $d_{\max} = 32 \text{ mm}$)

| Verhalten im Zugbereich | | | | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------|----|----------------|-------------------|
| | Yield Stress | Displacement | | Tension Damage | Displacement |
| | σ_t | u_t^{ck} | | d_t | u_t^{ck} |
| | [N/mm ²] | [mm] | | [-] | [mm] |
| 1 | 3,50000 | 0,00000 | 1 | 0,00 | 0,00000 |
| 2 | 2,34400 | 0,03300 | 2 | 0,38 | 0,03300 |
| 3 | 1,57000 | 0,06000 | 3 | 0,62 | 0,06000 |
| 4 | 1,05000 | 0,08500 | 4 | 0,76 | 0,08500 |
| 5 | 0,70700 | 0,11000 | 5 | 0,85 | 0,11000 |
| 6 | 0,47300 | 0,13000 | 6 | 0,91 | 0,13000 |
| 7 | 0,31700 | 0,15500 | 7 | 0,94 | 0,15500 |
| 8 | 0,21200 | 0,17500 | 8 | 0,97 | 0,17500 |
| 9 | 0,14200 | 0,19500 | 9 | 0,98 | 0,19500 |
| 10 | 0,09500 | 0,22000 | 10 | 0,99 | 0,22000 |
| 11 | 0,06400 | 0,24000 | 11 | 0,99 | 0,24000 |

A.1.4 Beton C25/30

- Arbeitslinie im Druckbereich

| | Punkt | # | Spannung | Elastische Dehnung | Inelastische Dehnung | Gesamt Dehnung | |
|--|-------|----------|---|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------|
| | | | $\sigma_c(\varepsilon_c)$ [N/mm ²] | $\varepsilon_{c,el}$ [-] | $\varepsilon_{c,in}$ [-] | ε_c [-] | η/μ [-] |
| Nichtlinearer Verlauf nach EN1992-1-1:2004 zw. A-D | A | 0 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| | B | 1 | 13,20000 | 0,00042 | 0,00000 | 0,00042 | 0,20266 |
| | | 2 | 20,35649 | 0,00065 | 0,00010 | 0,00075 | 0,36212 |
| | | 3 | 26,06624 | 0,00083 | 0,00025 | 0,00108 | 0,52159 |
| | | 4 | 29,99366 | 0,00095 | 0,00046 | 0,00141 | 0,68106 |
| | | 5 | 32,26635 | 0,00103 | 0,00071 | 0,00174 | 0,84053 |
| | C | 6 | 33,00000 | 0,00105 | 0,00102 | 0,00207 | 1,00000 |
| | | 7 | 32,17904 | 0,00102 | 0,00140 | 0,00243 | 1,17283 |
| | | 8 | 29,79511 | 0,00095 | 0,00184 | 0,00278 | 1,34567 |
| | D | 9 | 25,95831 | 0,00082 | 0,00232 | 0,00314 | 1,51850 |
| 10 | | 20,76863 | 0,00066 | 0,00284 | 0,00350 | 1,69134 | |
| Sinusförmige Verlängerung zw. D-E | | 11 | 18,32151 | 0,00058 | 0,00318 | 0,00377 | 0,01 |
| | | 12 | 15,59812 | 0,00050 | 0,00406 | 0,00456 | 0,04 |
| | | 13 | 12,86403 | 0,00041 | 0,00548 | 0,00589 | 0,09 |
| | | 14 | 10,23892 | 0,00033 | 0,00741 | 0,00774 | 0,16 |
| | | 15 | 7,82149 | 0,00025 | 0,00988 | 0,01013 | 0,25 |
| | | 16 | 5,70080 | 0,00018 | 0,01286 | 0,01304 | 0,36 |
| | | 17 | 3,95764 | 0,00013 | 0,01636 | 0,01649 | 0,49 |
| | | 18 | 2,66347 | 0,00008 | 0,02038 | 0,02046 | 0,64 |
| | | 19 | 1,87854 | 0,00006 | 0,02491 | 0,02497 | 0,81 |
| | E | 20 | 1,65000 | 0,00005 | 0,02995 | 0,03000 | 1,00 |
| Linearer Verlauf zw. E-F | F | 21 | 0,40000 | 0,00001 | 0,09999 | 0,10000 | |

- Druckschädigungsparameter

| | Punkt | # | Spannung | Druckschädigungsparam. |
|---|-------|----------|------------------------|------------------------|
| | | | $\sigma_c(\epsilon_c)$ | d_c |
| | | | [N/mm ²] | [-] |
| 0 bis fcm, etwa sinusförmiger Verlauf zw. C-D | A | 0 | 0,00000 | 0,00 |
| | B | 1 | 13,20000 | 0,00 |
| | | 2 | 20,35649 | 0,00 |
| | | 3 | 26,06624 | 0,00 |
| | C | 4 | 29,99366 | 0,00 |
| | | 5 | 32,26635 | 0,00 |
| | | 6 | 33,00000 | 0,00 |
| | | 7 | 32,17904 | 0,02 |
| | D | 8 | 29,79511 | 0,10 |
| | | 9 | 25,95831 | 0,21 |
| 10 | | 20,76863 | 0,37 | |
| Sinusförmiger Verlauf zw. D-E | | 11 | 18,32151 | 0,44 |
| | | 12 | 15,59812 | 0,53 |
| | | 13 | 12,86403 | 0,61 |
| | | 14 | 10,23892 | 0,69 |
| | | 15 | 7,82149 | 0,76 |
| | | 16 | 5,70080 | 0,83 |
| | | 17 | 3,95764 | 0,88 |
| | | 18 | 2,66347 | 0,92 |
| | E | 19 | 1,87854 | 0,94 |
| Lineare r Verlauf zw. E-F | | 20 | 1,65000 | 0,95 |
| | F | 21 | 0,40000 | 0,99 |

- Arbeitslinie im Zugbereich und zugehöriger Zugschädigungsparameter (MC 1990, $d_{\max} = 32 \text{ mm}$)

| Verhalten im Zugbereich | | | | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------|----|----------------|-------------------|
| | Yield Stress | Displacement | | Tension Damage | Displacement |
| | σ_t | u_t^{ck} | | d_t | u_t^{ck} |
| | [N/mm ²] | [mm] | | [-] | [mm] |
| 1 | 2,56496 | 0,00000 | 1 | 0,00 | 0,00000 |
| 2 | 2,18073 | 0,01000 | 2 | 0,15 | 0,01000 |
| 3 | 1,79649 | 0,02000 | 3 | 0,30 | 0,02000 |
| 4 | 1,41226 | 0,03000 | 4 | 0,45 | 0,03000 |
| 5 | 0,51299 | 0,05340 | 5 | 0,80 | 0,05340 |
| 6 | 0,49715 | 0,06000 | 6 | 0,81 | 0,06000 |
| 7 | 0,44912 | 0,08000 | 7 | 0,82 | 0,08000 |
| 8 | 0,37708 | 0,11000 | 8 | 0,85 | 0,11000 |
| 9 | 0,30504 | 0,14000 | 9 | 0,88 | 0,14000 |
| 10 | 0,23299 | 0,17000 | 10 | 0,91 | 0,17000 |
| 11 | 0,16095 | 0,20000 | 11 | 0,94 | 0,20000 |
| 12 | 0,00000 | 0,26702 | 12 | 0,99 | 0,26702 |

A.2 Kritische Elemente

Die folgenden zwei Tabellen enthalten die kritischen Elemente (fünf σ_1 und fünf σ_v) für die jeweiligen Modelle der Parameterstudie.

| Kritische σ_1 Elemente | | | | | |
|-------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Modell | Belastungsniveau 0: Belastungsniveau 1: Belastungsniveau 2: Belastungsniveau 3: Belastungsniveau 4: | | | | |
| | ständige Belastung | $\Delta 0,5 * LM71$ | $\Delta 1,0 * LM71$ | $\Delta 1,5 * LM71$ | $\Delta 2,0 * LM71$ |
| TYP 1 | 3428 | 2973 | 3010 | 2835 | 14744 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP 2 | 7889 | 7691 | 7870 | 7296 | 38844 |
| | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP 3 | 18984 | 16665 | 15669 | 15775 | 82378 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP 4 | 14998 | 13334 | 13013 | 12690 | 62848 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP 5 | 23921 | 24380 | 20026 | 24227 | 3961 |
| | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 5 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 11 |
| TYP 6 | 29012 | 44421 | 10269 | 44538 | 28249 |
| | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 5 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 |
| TYP 7 | 15219 | 13013 | 13334 | 12574 | 62959 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP 8 | 14997 | 13013 | 13334 | 12344 | 62959 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP 9 | 14997 | 830 | 940 | 3591 | 62959 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP 10 | 14998 | 13013 | 13334 | 12690 | 20638 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 10 |
| TYP 10.3 | 13013 | 13334 | 13336 | 13360 | 13441 |
| | | | Dübelleiste 2 Loch 3 | | |
| TYP 11 | 14997 | 13013 | 13334 | 35402 | 2275 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 11 | Dübelleiste 2 Loch 11 |
| TYP 12 | 14998 | 13013 | 13334 | 12690 | 62848 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP 13 | 14998 | 13013 | 13334 | 12345 | 63184 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP A | 14998 | 13334 | 13013 | 62960 | 63072 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 12 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP B | 14998 | 13337 | 59851 | 63072 | 63183 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP C | 14998 | 13337 | 12690 | 63072 | 63183 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP D | 15330 | 13013 | 13334 | 12345 | 63183 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |
| TYP E | 15330 | 13334 | 13013 | 12345 | 63184 |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 12 |

| Kritische σ_v Elemente | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--|---------------------|--|---------------------|--|
| Modell | Belastungsniveau 0: | | Belastungsniveau 1: | | Belastungsniveau 2: | | Belastungsniveau 3: | | Belastungsniveau 4: | |
| | ständige Belastung | Δ 0,5 * LM71 | Δ 1,0 * LM71 | Δ 1,5 * LM71 | Δ 2,0 * LM71 | | | | | |
| TYP 1 | 3391 | 2941 | 3052 | 10273 | 2909 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP 2 | 39321 | 7606 | 7936 | 36568 | 36883 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP 3 | 18870 | 17019 | 16186 | 78400 | 58428 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 3 | | | | | |
| TYP 4 | 63430 | 13441 | 12906 | 59419 | 59959 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 3 | | | | | |
| TYP 5 | 119294 | 24828 | 20026 | 111823 | 112894 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 5 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP 6 | 28909 | 43992 | 10159 | 44537 | 28248 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 5 | Dübelleiste 2 Loch 5 | Dübelleiste 2 Loch 5 | | | | | |
| TYP 7 | 63950 | 12906 | 13441 | 12230 | 12805 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP 8 | 63430 | 12906 | 13441 | 12805 | 12230 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP 9 | 63430 | 610 | 1160 | 62735 | 63295 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP 10 | 63951 | 44634 | 45164 | 59419 | 59959 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP 10.3 | 44634 | 44646 | 44858 | 44952 | 45164 | | | | | |
| | | | Dübelleiste 2 Loch 3 | | | | | | | |
| TYP 11 | 63431 | 44634 | 45164 | 2389 | 2047 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 11 | Dübelleiste 2 Loch 11 | | | | | |
| TYP 12 | 63430 | 45164 | 13441 | 59419 | 59959 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP 13 | 63430 | 45164 | 13441 | 59419 | 59959 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP A | 63430 | 13441 | 12906 | 59419 | 59959 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP B | 63431 | 13441 | 59419 | 59959 | 59418 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP C | 63431 | 13441 | 59419 | 12230 | 59959 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP D | 63430 | 44634 | 13441 | 59419 | 59959 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |
| TYP E | 63951 | 44634 | 12906 | 59419 | 59959 | | | | | |
| | Dübelleiste 2 Loch 2 | Dübelleiste 2 Loch 3 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | Dübelleiste 2 Loch 4 | | | | | |

A.3 Meshvarianten

Die folgenden Tabellen enthalten die Eingabewerte der Diskretisierung für das Modell *TYP 1-5*.

Die mit roter Farbe hervorgehobene Daten sind die Basisangaben für das Modell *TYP 1*. Alle andere Werte sind in irgendeinem Zusammenhang mit einer der Basisangaben.

Im Fall des Modells *TYP 2-5* wurden die Werte, die im Vergleich zum vorherigen Modell geändert wurden, mit roter Farbe hervorgehoben.

| Meshdichte: | TYP 1: Dübel: grob / Global: grob | | | | | | | |
|-------------------------------|---|-------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| Elemente: | Dübelreihe 1/3 | | | | Dübelreihe 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelHorizontal | 5 | — | 82,5 | 17 | 5 | — | 82,5 | 17 |
| DübelHorizontalRand | 2 | — | 33,0 | 17 | 2 | — | 33,0 | 17 |
| DübelKante | 4 | — | 40,0 | 10 | 8 | — | 40,0 | 5,0 |
| DübelRadiusAußenKurz | 3 | single: 2,0 | 35,0 | 8 - 16 | 5 | single: 2,0 | 35,0 | 5 - 10 |
| DübelRadiusAußenLang | 4 | single: 3,0 | 68,5 | 10 - 30 | 6 | single: 3,0 | 68,5 | 7 - 20 |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 4 | — | 20,0 | 5,0 |
| DübelVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 |
| DübelVertikalRand | 4 | — | 68,0 | 17 | 4 | — | 68,0 | 17 |
| Elemente: | Betondübel 1/3 | | | | Betondübel 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelHorizontal | 5 | — | 82,5 | 17 | 5 | — | 82,5 | 17 |
| DübelHorizontalRand | 2 | — | 33,0 | 17 | 2 | — | 33,0 | 17 |
| DübelKante | 4 | — | 40,0 | 10 | 8 | — | 40,0 | 5 |
| DübelRadiusAußenKurz | 3 | single: 2,0 | 35,0 | 8 - 16 | 5 | single: 2,0 | 35,0 | 5 - 10 |
| DübelRadiusAußenLang | 4 | single: 3,0 | 68,5 | 10 - 30 | 6 | single: 3,0 | 68,5 | 7 - 20 |
| DübelRadiusInnen | 4 | single: 2,0 | 50,0 | 9 - 18 | 6 | single: 2,0 | 50,0 | 6 - 12 |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| DübelTiefeRand | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 |
| DübelVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 |
| Elemente: | Bodenblech | | | | Deckblech | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| PlatteHorizontal | 10 | — | 165,0 | 17 | 10 | — | 165,0 | 17 |
| PlatteHorizontalRand1 | 2 | — | 17,0 | 9 | 2 | — | 17,0 | 9 |
| PlatteHorizontalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 |
| PlatteHorizontalRand3 | 3 | — | 33,0 | 11 | 3 | — | 33,0 | 11 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast1 | — | — | — | — | 2 | — | 24,0 | 12 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast2 | — | — | — | — | 3 | — | 41,0 | 14 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast3 | — | — | — | — | 3 | — | 42,0 | 14 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast4 | — | — | — | — | 4 | — | 58,0 | 15 |
| PlatteTiefeDübel1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| PlatteTiefeDübel2 | 4 | — | 20,0 | 5 | 4 | — | 20,0 | 5 |
| PlatteTiefeDübelRand1/3 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 |
| PlatteTiefeDübelRand2 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 |
| PlatteTiefeKern | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 |
| PlatteVertikal | 3 | — | 15,0 | 5 | 3 | — | 15,0 | 5 |
| Elemente: | Betonkern 1 | | | | Betonkern 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| KernHorizontal | 5 | — | 330,0 | 66 | 5 | — | 330,0 | 66 |
| KernHorizontalRand1 | 1 | — | 33,0 | 33 | 1 | — | 33,0 | 33 |
| KernHorizontalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 |
| KernHorizontalRand3 | 2 | — | 17,0 | 9 | 2 | — | 17,0 | 9 |
| KernTiefe | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 |
| KernTiefeRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 |
| KernVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 |
| Elemente: | Auflagersteife 1/3 | | | | Auflagersteife 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 4 | — | 20,0 | 5 |
| DübelTiefeRand | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 |
| DübelVertikalRand | 8 | — | 85,0 | 11 | 8 | — | 85,0 | 11 |
| Horizontal | 3 | single: 1,3 | 15,0 | 4 - 6 | 3 | single: 1,3 | 15,0 | 4 - 6 |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 |
| VertikalRand1 | 1 | — | 7,0 | 7 | 1 | — | 7,0 | 7 |
| VertikalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 |
| Element: | Endplatte | | | | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | | | | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | | | | |
| AuflagerVertikal | 4 | — | 40,0 | 10 | | | | |
| AuskragungVertikal | 3 | — | 50,0 | 17 | | | | |
| DübelTiefe1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | | | | |
| DübelTiefe2 | 4 | — | 20,0 | 5 | | | | |
| DübelTiefeRand1/3 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | | | | |
| DübelTiefeRand2 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | | | | |
| DübelVertikal | 5 | — | 170,0 | 34 | | | | |
| EndplatteHorizontal | 3 | — | 20,0 | 7 | | | | |
| PlatteTiefeKern | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | | | | |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | | | | |
| PlatteVertikal | 3 | — | 15,0 | 5 | | | | |

| Meshdichte: <input type="checkbox"/> | TYP. 2: Dübel: mittel / Global: grob | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| Elemente: | Dübelreihe 1/3 | | | | Dübelreihe 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelHorizontal | 5 | — | 82,5 | 17 | 5 | — | 82,5 | 17 |
| DübelHorizontalRand | 2 | — | 33,0 | 17 | 2 | — | 33,0 | 17 |
| DübelKante | 4 | — | 40,0 | 10 | 13 | — | 40,0 | 3,1 |
| DübelRadiusAußenKurz | 3 | single: 2,0 | 35,0 | 8 - 16 | 7 | single: 2,0 | 35,0 | 4 - 7 |
| DübelRadiusAußenLang | 4 | single: 3,0 | 68,5 | 10 - 30 | 9 | single: 3,0 | 68,5 | 4 - 13 |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 6 | — | 20,0 | 3,3 |
| DübelVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 |
| DübelVertikalRand | 4 | — | 68,0 | 17 | 4 | — | 68,0 | 17 |
| Elemente: | Betondübel 1/3 | | | | Betondübel 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelHorizontal | 5 | — | 82,5 | 17 | 5 | — | 82,5 | 17 |
| DübelHorizontalRand | 2 | — | 33,0 | 17 | 2 | — | 33,0 | 17 |
| DübelKante | 4 | — | 40,0 | 10 | 13 | — | 40,0 | 3 |
| DübelRadiusAußenKurz | 3 | single: 2,0 | 35,0 | 8 - 16 | 7 | single: 2,0 | 35,0 | 4 - 7 |
| DübelRadiusAußenLang | 4 | single: 3,0 | 68,5 | 10 - 30 | 9 | single: 3,0 | 68,5 | 4 - 13 |
| DübelRadiusInnen | 4 | single: 2,0 | 50,0 | 9 - 18 | 9 | single: 2,0 | 50,0 | 4 - 8 |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 3 | — | 10,0 | 3 |
| DübelTiefeRand | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 |
| DübelVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 |
| Elemente: | Bodenblech | | | | Deckblech | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| PlatteHorizontal | 10 | — | 165,0 | 17 | 10 | — | 165,0 | 17 |
| PlatteHorizontalRand1 | 2 | — | 17,0 | 9 | 2 | — | 17,0 | 9 |
| PlatteHorizontalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 |
| PlatteHorizontalRand3 | 3 | — | 33,0 | 11 | 3 | — | 33,0 | 11 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast1 | — | — | — | — | 2 | — | 24,0 | 12 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast2 | — | — | — | — | 3 | — | 41,0 | 14 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast3 | — | — | — | — | 3 | — | 42,0 | 14 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast4 | — | — | — | — | 4 | — | 58,0 | 15 |
| PlatteTiefeDübel1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| PlatteTiefeDübel2 | 6 | — | 20,0 | 3 | 6 | — | 20,0 | 3 |
| PlatteTiefeDübelRand1/3 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 |
| PlatteTiefeDübelRand2 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 |
| PlatteTiefeKern | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 |
| PlatteVertikal | 3 | — | 15,0 | 5 | 3 | — | 15,0 | 5 |
| Elemente: | Betonkern 1 | | | | Betonkern 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| KernHorizontal | 5 | — | 330,0 | 66 | 5 | — | 330,0 | 66 |
| KernHorizontalRand1 | 1 | — | 33,0 | 33 | 1 | — | 33,0 | 33 |
| KernHorizontalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 |
| KernHorizontalRand3 | 2 | — | 17,0 | 9 | 2 | — | 17,0 | 9 |
| KernTiefe | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 |
| KernTiefeRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 |
| KernVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 |
| Elemente: | Auflagersteife 1/3 | | | | Auflagersteife 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 6 | — | 20,0 | 3 |
| DübelTiefeRand | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 |
| DübelVertikalRand | 8 | — | 85,0 | 11 | 8 | — | 85,0 | 11 |
| Horizontal | 3 | single: 1,3 | 15,0 | 4 - 6 | 3 | single: 1,3 | 15,0 | 4 - 6 |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 |
| VertikalRand1 | 1 | — | 7,0 | 7 | 1 | — | 7,0 | 7 |
| VertikalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 |
| Element: | Endplatte | | | | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | | | | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | | | | |
| AuflagerVertikal | 4 | — | 40,0 | 10 | | | | |
| AuskragungVertikal | 3 | — | 50,0 | 17 | | | | |
| DübelTiefe1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | | | | |
| DübelTiefe2 | 6 | — | 20,0 | 3 | | | | |
| DübelTiefeRand1/3 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | | | | |
| DübelTiefeRand2 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | | | | |
| DübelVertikal | 5 | — | 170,0 | 34 | | | | |
| EndplatteHorizontal | 3 | — | 20,0 | 7 | | | | |
| PlatteTiefeKern | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | | | | |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | | | | |
| PlatteVertikal | 3 | — | 15,0 | 5 | | | | |

| Meshdichte: | < | TYP 3: Dübel: fein / Global: grob | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|----------------------------|--|
| Elemente: | Dübelleiste 1/3 | | | | Dübelleiste 2 | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | |
| DübelHorizontal | 5 | — | 82,5 | 17 | 5 | — | 82,5 | 17 | |
| DübelHorizontalRand | 2 | — | 33,0 | 17 | 2 | — | 33,0 | 17 | |
| DübelKante | 4 | — | 40,0 | 10 | 18 | — | 40,0 | 2,2 | |
| DübelRadiusAußenKurz | 3 | single: 2,0 | 35,0 | 8 - 16 | 9 | single: 2,0 | 35,0 | 3 - 5 | |
| DübelRadiusAußenLang | 4 | single: 3,0 | 68,5 | 10 - 30 | 12 | single: 3,0 | 68,5 | 3 - 10 | |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 8 | — | 20,0 | 2,5 | |
| DübelVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 | |
| DübelVertikalRand | 4 | — | 68,0 | 17 | 4 | — | 68,0 | 17 | |
| Elemente: | Betondübel 1/3 | | | | Betondübel 2 | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | |
| DübelHorizontal | 5 | — | 82,5 | 17 | 5 | — | 82,5 | 17 | |
| DübelHorizontalRand | 2 | — | 33,0 | 17 | 2 | — | 33,0 | 17 | |
| DübelKante | 4 | — | 40,0 | 10 | 18 | — | 40,0 | 2 | |
| DübelRadiusAußenKurz | 3 | single: 2,0 | 35,0 | 8 - 16 | 9 | single: 2,0 | 35,0 | 3 - 5 | |
| DübelRadiusAußenLang | 4 | single: 3,0 | 68,5 | 10 - 30 | 12 | single: 3,0 | 68,5 | 3 - 10 | |
| DübelRadiusInnen | 4 | single: 2,0 | 50,0 | 9 - 18 | 10 | single: 2,0 | 50,0 | 4 - 7 | |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 4 | — | 10,0 | 3 | |
| DübelTiefeRand | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 | |
| DübelVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 | |
| Elemente: | Bodenblech | | | | Deckblech | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | |
| PlatteHorizontal | 10 | — | 165,0 | 17 | 10 | — | 165,0 | 17 | |
| PlatteHorizontalRand1 | 2 | — | 17,0 | 9 | 2 | — | 17,0 | 9 | |
| PlatteHorizontalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 | |
| PlatteHorizontalRand3 | 3 | — | 33,0 | 11 | 3 | — | 33,0 | 11 | |
| PlatteHorizontalVerkehrslast1 | — | — | — | — | 2 | — | 24,0 | 12 | |
| PlatteHorizontalVerkehrslast2 | — | — | — | — | 3 | — | 41,0 | 14 | |
| PlatteHorizontalVerkehrslast3 | — | — | — | — | 3 | — | 42,0 | 14 | |
| PlatteHorizontalVerkehrslast4 | — | — | — | — | 4 | — | 58,0 | 15 | |
| PlatteTiefeDübel1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 | |
| PlatteTiefeDübel2 | 8 | — | 20,0 | 3 | 8 | — | 20,0 | 3 | |
| PlatteTiefeDübelRand1/3 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | |
| PlatteTiefeDübelRand2 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 | |
| PlatteTiefeKern | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | |
| PlatteVertikal | 3 | — | 15,0 | 5 | 3 | — | 15,0 | 5 | |
| Elemente: | Betonkern 1 | | | | Betonkern 2 | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | |
| KernHorizontal | 5 | — | 330,0 | 66 | 5 | — | 330,0 | 66 | |
| KernHorizontalRand1 | 1 | — | 33,0 | 33 | 1 | — | 33,0 | 33 | |
| KernHorizontalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 | |
| KernHorizontalRand3 | 2 | — | 17,0 | 9 | 2 | — | 17,0 | 9 | |
| KernTiefe | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | |
| KernTiefeRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | |
| KernVertikal | 5 | — | 85,0 | 17 | 5 | — | 85,0 | 17 | |
| Elemente: | Auflagersteife 1/3 | | | | Auflagersteife 2 | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 8 | — | 20,0 | 3 | |
| DübelTiefeRand | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 | |
| DübelVertikalRand | 8 | — | 85,0 | 11 | 8 | — | 85,0 | 11 | |
| Horizontal | 3 | single: 1,3 | 15,0 | 4 - 6 | 3 | single: 1,3 | 15,0 | 4 - 6 | |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | |
| VertikalRand1 | 1 | — | 7,0 | 7 | 1 | — | 7,0 | 7 | |
| VertikalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 | |
| Element: | Endplatte | | | | | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | | | | | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | | | | | |
| AuflagerVertikal | 4 | — | 40,0 | 10 | | | | | |
| AuskragungVertikal | 3 | — | 50,0 | 17 | | | | | |
| DübelTiefe1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | | | | | |
| DübelTiefe2 | 8 | — | 20,0 | 3 | | | | | |
| DübelTiefeRand1/3 | 3 | single: 1,5 | 20,0 | 5 - 8 | | | | | |
| DübelTiefeRand2 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 | | | | | |
| DübelVertikal | 5 | — | 170,0 | 34 | | | | | |
| EndplatteHorizontal | 3 | — | 20,0 | 7 | | | | | |
| PlatteTiefeKern | 11 | double: 2,5 | 390,0 | 22 - 56 | | | | | |
| PlatteTiefeKernRand | 2 | single: 1,5 | 25,0 | 10 - 15 | | | | | |
| PlatteVertikal | 3 | — | 15,0 | 5 | | | | | |

| Meshdichte: | TYP 4: Dübel: mittel / Global: mittel | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| Elemente: | Dübelleiste 1/3 | | | | Dübelleiste 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelHorizontal | 10 | — | 82,5 | 8 | 10 | — | 82,5 | 8 |
| DübelHorizontalRand | 4 | — | 33,0 | 8 | 4 | — | 33,0 | 8 |
| DübelKante | 6 | — | 40,0 | 7 | 13 | — | 40,0 | 3,1 |
| DübelRadiusAußenKurz | 5 | single: 2,0 | 35,0 | 5 - 10 | 8 | single: 2,0 | 35,0 | 3 - 6 |
| DübelRadiusAußenLang | 7 | single: 3,0 | 68,5 | 6 - 17 | 11 | single: 3,0 | 68,5 | 4 - 11 |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 6 | — | 20,0 | 3,3 |
| DübelVertikal | 10 | — | 85,0 | 9 | 10 | — | 85,0 | 9 |
| DübelVertikalRand | 8 | — | 68,0 | 9 | 8 | — | 68,0 | 9 |
| Elemente: | Betondübel 1/3 | | | | Betondübel 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelHorizontal | 10 | — | 82,5 | 8 | 10 | — | 82,5 | 8 |
| DübelHorizontalRand | 4 | — | 33,0 | 8 | 4 | — | 33,0 | 8 |
| DübelKante | 6 | — | 40,0 | 7 | 13 | — | 40,0 | 3 |
| DübelRadiusAußenKurz | 5 | single: 2,0 | 35,0 | 5 - 10 | 8 | single: 2,0 | 35,0 | 3 - 6 |
| DübelRadiusAußenLang | 7 | single: 3,0 | 68,5 | 6 - 17 | 11 | single: 3,0 | 68,5 | 4 - 11 |
| DübelRadiusInnen | 5 | single: 2,0 | 50,0 | 7 - 14 | 9 | single: 2,0 | 50,0 | 4 - 8 |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 3 | — | 10,0 | 3 |
| DübelTiefeRand | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 |
| DübelVertikal | 10 | — | 85,0 | 9 | 10 | — | 85,0 | 9 |
| Elemente: | Bodenblech | | | | Deckblech | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| PlatteHorizontal | 20 | — | 165,0 | 8 | 20 | — | 165,0 | 8 |
| PlatteHorizontalRand1 | 4 | — | 17,0 | 4 | 4 | — | 17,0 | 4 |
| PlatteHorizontalRand2 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| PlatteHorizontalRand3 | 4 | — | 33,0 | 8 | 4 | — | 33,0 | 8 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast1 | — | — | — | — | 4 | — | 24,0 | 6 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast2 | — | — | — | — | 6 | — | 41,0 | 7 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast3 | — | — | — | — | 6 | — | 42,0 | 7 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast4 | — | — | — | — | 8 | — | 58,0 | 7 |
| PlatteTiefeDübel1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| PlatteTiefeDübel2 | 6 | — | 20,0 | 3 | 6 | — | 20,0 | 3 |
| PlatteTiefeDübelRand1/3 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 |
| PlatteTiefeDübelRand2 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 |
| PlatteTiefeKern | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 |
| PlatteTiefeKernRand | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 |
| PlatteVertikal | 4 | — | 15,0 | 4 | 4 | — | 15,0 | 4 |
| Elemente: | Betonkern 1 | | | | Betonkern 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| KernHorizontal | 10 | — | 330,0 | 33 | 10 | — | 330,0 | 33 |
| KernHorizontalRand1 | 2 | — | 33,0 | 17 | 2 | — | 33,0 | 17 |
| KernHorizontalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 |
| KernHorizontalRand3 | 2 | — | 17,0 | 9 | 2 | — | 17,0 | 9 |
| KernTiefe | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 |
| KernTiefeRand | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 |
| KernVertikal | 10 | — | 85,0 | 9 | 10 | — | 85,0 | 9 |
| Elemente: | Auflagersteife 1/3 | | | | Auflagersteife 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 6 | — | 20,0 | 3 |
| DübelTiefeRand | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 |
| DübelVertikalRand | 16 | — | 85,0 | 5 | 16 | — | 85,0 | 5 |
| Horizontal | 4 | single: 1,4 | 15,0 | 4 | 4 | single: 1,4 | 15,0 | 4 |
| PlatteTiefeKernRand | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 |
| VertikalRand1 | 2 | — | 7,0 | 4 | 2 | — | 7,0 | 4 |
| VertikalRand2 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| Element: | Endplatte | | | | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | | | | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | | | | |
| AuflagerVertikal | 8 | — | 40,0 | 5 | | | | |
| AuskragungVertikal | 4 | — | 50,0 | 13 | | | | |
| DübelTiefe1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | | | | |
| DübelTiefe2 | 6 | — | 20,0 | 3 | | | | |
| DübelTiefeRand1/3 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | | | | |
| DübelTiefeRand2 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | | | | |
| DübelVertikal | 10 | — | 170,0 | 17 | | | | |
| EndplatteHorizontal | 4 | — | 20,0 | 5 | | | | |
| PlatteTiefeKern | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 | | | | |
| PlatteTiefeKernRand | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 | | | | |
| PlatteVertikal | 4 | — | 15,0 | 4 | | | | |

| Meshdichte: | TYP 5: Dübel: fein / Global: mittel | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| Elemente: | Dübelleiste 1/3 | | | | Dübelleiste 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelHorizontal | 10 | — | 82,5 | 8 | 10 | — | 82,5 | 8 |
| DübelHorizontalRand | 4 | — | 33,0 | 8 | 4 | — | 33,0 | 8 |
| DübelKante | 6 | — | 40,0 | 7 | 18 | — | 40,0 | 2,2 |
| DübelRadiusAußenKurz | 5 | single: 2,0 | 35,0 | 5 - 10 | 9 | single: 2,0 | 35,0 | 3 - 5 |
| DübelRadiusAußenLang | 7 | single: 3,0 | 68,5 | 6 - 17 | 13 | single: 3,0 | 68,5 | 3 - 9 |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 8 | — | 20,0 | 2,5 |
| DübelVertikal | 10 | — | 85,0 | 9 | 10 | — | 85,0 | 9 |
| DübelVertikalRand | 8 | — | 68,0 | 9 | 8 | — | 68,0 | 9 |
| Elemente: | Betondübel 1/3 | | | | Betondübel 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelHorizontal | 10 | — | 82,5 | 8 | 10 | — | 82,5 | 8 |
| DübelHorizontalRand | 4 | — | 33,0 | 8 | 4 | — | 33,0 | 8 |
| DübelKante | 6 | — | 40,0 | 7 | 18 | — | 40,0 | 2 |
| DübelRadiusAußenKurz | 5 | single: 2,0 | 35,0 | 5 - 10 | 9 | single: 2,0 | 35,0 | 3 - 5 |
| DübelRadiusAußenLang | 7 | single: 3,0 | 68,5 | 6 - 17 | 13 | single: 3,0 | 68,5 | 3 - 9 |
| DübelRadiusInnen | 5 | single: 2,0 | 50,0 | 7 - 14 | 10 | single: 2,0 | 50,0 | 4 - 7 |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 4 | — | 10,0 | 3 |
| DübelTiefeRand | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 |
| DübelVertikal | 10 | — | 85,0 | 9 | 10 | — | 85,0 | 9 |
| Elemente: | Bodenblech | | | | Deckblech | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| PlatteHorizontal | 20 | — | 165,0 | 8 | 20 | — | 165,0 | 8 |
| PlatteHorizontalRand1 | 4 | — | 17,0 | 4 | 4 | — | 17,0 | 4 |
| PlatteHorizontalRand2 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| PlatteHorizontalRand3 | 4 | — | 33,0 | 8 | 4 | — | 33,0 | 8 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast1 | — | — | — | — | 4 | — | 24,0 | 6 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast2 | — | — | — | — | 6 | — | 41,0 | 7 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast3 | — | — | — | — | 6 | — | 42,0 | 7 |
| PlatteHorizontalVerkehrslast4 | — | — | — | — | 8 | — | 58,0 | 7 |
| PlatteTiefeDübel1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| PlatteTiefeDübel2 | 8 | — | 20,0 | 3 | 8 | — | 20,0 | 3 |
| PlatteTiefeDübelRand1/3 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 |
| PlatteTiefeDübelRand2 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 |
| PlatteTiefeKern | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 |
| PlatteTiefeKernRand | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 |
| PlatteVertikal | 4 | — | 15,0 | 4 | 4 | — | 15,0 | 4 |
| Elemente: | Betonkern 1 | | | | Betonkern 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| KernHorizontal | 10 | — | 330,0 | 33 | 10 | — | 330,0 | 33 |
| KernHorizontalRand1 | 2 | — | 33,0 | 17 | 2 | — | 33,0 | 17 |
| KernHorizontalRand2 | 1 | — | 10,0 | 10 | 1 | — | 10,0 | 10 |
| KernHorizontalRand3 | 2 | — | 17,0 | 9 | 2 | — | 17,0 | 9 |
| KernTiefe | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 |
| KernTiefeRand | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 |
| KernVertikal | 10 | — | 85,0 | 9 | 10 | — | 85,0 | 9 |
| Elemente: | Auflagersteife 1/3 | | | | Auflagersteife 2 | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| DübelTiefe | 2 | — | 10,0 | 5 | 8 | — | 20,0 | 3 |
| DübelTiefeRand | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 |
| DübelVertikalRand | 16 | — | 85,0 | 5 | 16 | — | 85,0 | 5 |
| Horizontal | 4 | single: 1,4 | 15,0 | 4 | 4 | single: 1,4 | 15,0 | 4 |
| PlatteTiefeKernRand | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 |
| VertikalRand1 | 2 | — | 7,0 | 4 | 2 | — | 7,0 | 4 |
| VertikalRand2 | 2 | — | 10,0 | 5 | 2 | — | 10,0 | 5 |
| Element: | Endplatte | | | | | | | |
| Kanten | Anzahl der Elemente | Verdichtung | Kantenlänge | Kantenlänge eines Elements | | | | |
| | [-] | [-] | [mm] | [mm] | | | | |
| AuflagerVertikal | 8 | — | 40,0 | 5 | | | | |
| AuskragungVertikal | 4 | — | 50,0 | 13 | | | | |
| DübelTiefe1/3 | 2 | — | 10,0 | 5 | | | | |
| DübelTiefe2 | 8 | — | 20,0 | 3 | | | | |
| DübelTiefeRand1/3 | 4 | single: 1,5 | 20,0 | 4 - 6 | | | | |
| DübelTiefeRand2 | 5 | single: 1,5 | 20,0 | 3 - 5 | | | | |
| DübelVertikal | 10 | — | 170,0 | 17 | | | | |
| EndplatteHorizontal | 4 | — | 20,0 | 5 | | | | |
| PlatteTiefeKern | 15 | double: 2,5 | 390,0 | 16 - 41 | | | | |
| PlatteTiefeKernRand | 3 | single: 1,5 | 25,0 | 7 - 10 | | | | |
| PlatteVertikal | 4 | — | 15,0 | 4 | | | | |

Anhang B - *R-FEM*

B.1 Schnittgrößenverläufe

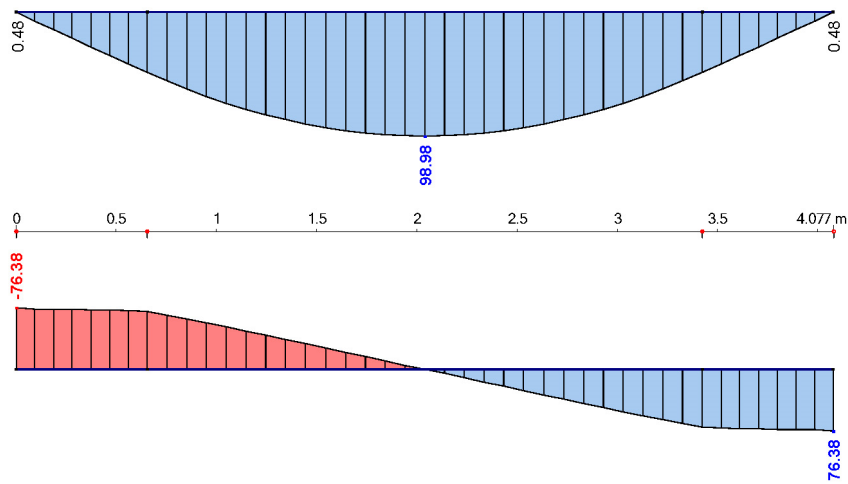


Abbildung B.1: Grundschnittgrößen m_y (oben) und v_y (unten) in der Mitte der Platte des Trogbriickenmodells unter dem Lastgebirge aus LM71 (siehe Abbildung 4.24)

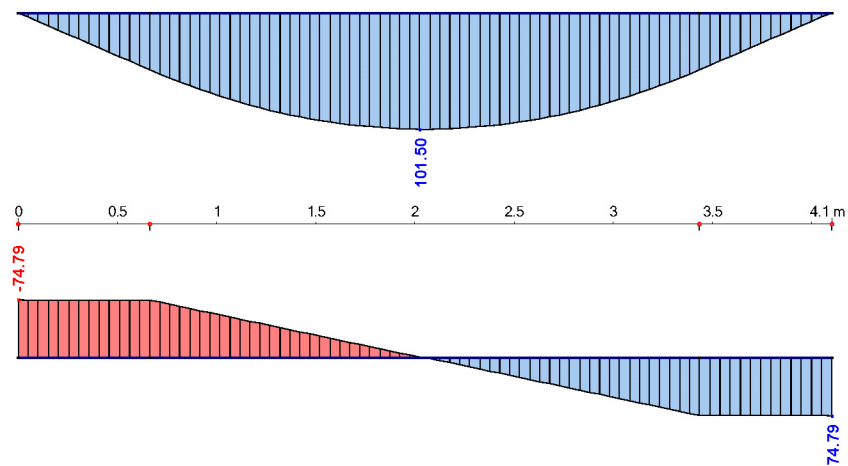


Abbildung B.2: Grundschnittgrößen m_y (oben) und v_y (unten) in der Mitte der Platte des Äquivalentmodells unter einer Gleichlast von 54 kN/m² (siehe Abbildung 4.25)

Anhang C - *Excel*-Tabellen

C.1 Belastungen der SCSC-Platte

C.1.1 Abmessungen, Belastungsflächen

| Abmessungen | | | |
|----------------------------|-------------------|---------------|--------------|
| | Spannweite [m] | Breite [m] | Länge [m] |
| Brücke mit SCSC-Platte | 4,077 | 3,955 ÷ 4,200 | 1,000 |
| Versuchskörper SCSC-Platte | 4,100 | 4,120 | 3,000 |
| ABAQUSmodell | 4,100 | 2,060 | 1,000 |

| Belastungsflächen | | | | |
|--------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| | Fall | Breite auf der Brücke [m] | Breite auf dem Versuchskörper [m] | Breite auf dem ABAQUSmodell [m] |
| Ständige Belastung | | 4,200 | 4,080 | 2,040 |
| Verkehrslast | Nennschotterbetthöhe - 30% | 2,688 | 2,688 | 1,344 |
| | Nennschotterbetthöhe | 2,770 | 2,770 | 1,385 |
| | Nennschotterbetthöhe + 30% | 2,853 | 2,853 | 1,427 |

C.1.2 Teilsicherheitsbeiwerte und andere Faktoren

| Teilsicherheitsbeiwerte, andere Beiwerte und Faktoren (ULS, SLS, FLS) | | | | |
|---|---------------------------------|-------|-------|-------|
| | | ULS | SLS | FLS |
| Einwirkungsseite | | | | |
| Lastklassenbeiwert | $\alpha =$ | 1,210 | 1,210 | 1,000 |
| Schwingbeiwert (dyn. Beiwert) | $\phi =$ | 1,279 | 1,279 | 1,279 |
| Schädenequivalenzfaktor (nur im Ermüdung) | $\lambda =$ | - | - | 1,160 |
| Teilsicherheitsbeiwert für die Ständige Belastungen | $\gamma_G =$ | 1,35 | 1,00 | 1,00 |
| Teilsicherheitsbeiwert für die Verkehrslasten | γ_Q und $\gamma_{F,l} =$ | 1,45 | 1,00 | 1,00 |
| Produkt im Fall der ständige Belastungen: | $\prod_{\text{Stä,Bel.}} =$ | 1,350 | 1,000 | 1,000 |
| Produkt im Fall der Verkehrslast: | $\prod_{\text{LM71}} =$ | 2,244 | 1,548 | 1,484 |

| | | | | |
|---|-------------------------------------|------|---|--|
| Widerstandsseite | | | | |
| Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeit von Stahl | $\gamma_{M,0}$ und $\gamma_{M,f} =$ | 1,00 | - | 1,15 bzw. 1,35 abh. von der Zugänglichk. |
| Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeit von Beton | $\gamma_M =$ | 1,50 | | |

$$E_{d,ULS} = \gamma_G \cdot g_{a,k} + \gamma_G \cdot g_{v,k} + \alpha \cdot \varphi_2 \cdot \gamma_Q \cdot q_{v,k} \quad E_{d,SLS} = \gamma_G \cdot g_{a,k} + \gamma_G \cdot g_{v,k} + \alpha \cdot \varphi_2 \cdot \gamma_Q \cdot q_{v,k} \quad E_{d,FLS} = \gamma_G \cdot g_{a,k} + \gamma_G \cdot g_{v,k} + \alpha \cdot \varphi_2 \cdot \lambda \cdot \gamma_{F,f} \cdot q_{v,k}$$

Eigengewicht+Aufbaulast+Verkehrslast Eigengewicht+Aufbaulast+Verkehrslast Eigengewicht+Aufbaulast+Verkehrslast

| Lastniveaus | [kN] | [kN] | [kN] |
|------------------------------|------------|------------|------------|
| Summe der Ständige Belastung | 109 | 81 | 81 |
| Verkehrslast | 351 | 242 | 232 |
| Summe | 460 | 323 | 313 |

C.1.3 Ständige Belastungen

• Eigengewicht der SCSC-Platte

| Eigengewicht TYP: 15/20 | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|----------|---------------------------------|--------------------------------|---------------|----------------|-----------------|
| Teil des Modells | Volumen [mm ³] | Material | Dichte [kg/mm ³] | Wichte [N/mm ³] | Masse [kg] | Gewicht [N] | Gewicht [kN] |
| Bodenblech | 30600000 | | | | 240,2 | 2402 | 2,402 |
| Deckblech | 30600000 | | | | 240,2 | 2402 | 2,402 |
| Dübelreihe 1 | 2495631 | | | | 19,6 | 196 | 0,196 |
| Dübelreihe 2 | 4991262 | | | | 39,2 | 392 | 0,392 |
| Dübelreihe 3 | 2495631 | Stahl | 7,85E-06 | 7,85E-05 | 19,6 | 196 | 0,196 |
| Auflagersteife 1 | 140250 | | | | 1,1 | 11 | 0,011 |
| Auflagersteife 2 | 280500 | | | | 2,2 | 22 | 0,022 |
| Auflagersteife 3 | 140250 | | | | 1,1 | 11 | 0,011 |
| Endplatte | 5800000 | | | | 45,5 | 455 | 0,455 |
| Σ Stahl (ohne Endplatte) | 71743524 | | | | 563,2 | 5632 | 5,632 |
| Betondübel 1 | 7820667 | | | | 18,8 | 188 | 0,188 |
| Betondübel 2 | 15641334 | | | | 37,5 | 375 | 0,375 |
| Betondübel 3 | 7820667 | Beton | 2,40E-06 | 2,40E-05 | 18,8 | 188 | 0,188 |
| Betonkern 1 | 152447504 | | | | 365,9 | 3659 | 3,659 |
| Betonkern 2 | 152447504 | | | | 365,9 | 3659 | 3,659 |
| Σ Beton | 336177676 | | | | 806,8 | 8068 | 8,068 |
| Σ SCSC-Platte (ohne Endplatte) | 407921200 | | | | 1370,0 | 13700 | 13,700 |

• Aufbaulasten

| Aufbaulasten | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|--------------------------------|--|---|---|
| Teil der Brücke | Fall | Dicke auf der Brücke [m] | Breite auf der Brücke [m] | Querschnittsfläche auf der Brücke [m ²] | Wichte [kN/m ³] | Linienlast auf der Brücke [kN/m] | Flächenlast auf der Brücke [kN/m ²] | Flächenlast auf dem ABAQUSmodell [kN/m ²] |
| Schotterbett | Nennschotterbetthöhe - 30% | 0,385 | variabel | 1,708 | 20,0 | 34,16 | 8,13 | 8,37 |
| | Nennschotterbetthöhe | 0,550 | | 2,496 | | 49,91 | 11,88 | 12,23 |
| | Nennschotterbetthöhe + 30% | 0,715 | | 3,317 | | 66,33 | 15,79 | 16,26 |
| Abdichtung | Nennschotterbetthöhe - 30% | 0,007 | 4,200 | 0,0294 | 25,0 | 0,74 | 0,18 | 0,18 |
| | Nennschotterbetthöhe | 0,010 | | 0,0420 | | 1,05 | 0,25 | 0,26 |
| | Nennschotterbetthöhe + 30% | 0,013 | | 0,0546 | | 1,37 | 0,33 | 0,33 |
| Schienen | | | | | | 1,20 | 0,29 | 0,29 |
| Schienenbefestigung | | | | | | 0,50 | 0,12 | 0,12 |
| Stahlbetonschwellen | | | | | | 1,00 | 0,24 | 0,25 |
| Σ | Nennschotterbetthöhe - 30% | | | | | 37,59 | 8,95 | 9,21 |
| | Nennschotterbetthöhe | | | | | 53,66 | 12,78 | 13,15 |
| | Nennschotterbetthöhe + 30% | | | | | 70,40 | 16,76 | 17,25 |

• Zusammenfassung

| Eigengewicht (berechnet mit dem ABAQUSmodell) | | | | |
|---|-------------------------------------|--|--|--|
| Fall | Eigengewicht SCSC-Platte Brücke | | Eigengewicht SCSC-Platte ABAQUSmodell | |
| | TYPI: 15/20 [kN/m ²] | | TYPI: 15/20 [kN/m ²] | |
| Nennschotterbetthöhe - 30% | 6,524 | | 6,716 | |
| Nennschotterbetthöhe | 6,524 | | 6,716 | |
| Nennschotterbetthöhe + 30% | 6,524 | | 6,716 | |
| Σ Ständige Belastung | | | | |
| Fall | Σ Ständige Belastung Brücke | | Σ Ständige Belastung ABAQUSmodell | |
| | TYPI: 15/20 [kN/m ²] | | TYPI: 15/20 [kN/m ²] | |
| Nennschotterbetthöhe - 30% | 15,47 | | 15,93 | |
| Nennschotterbetthöhe | 19,30 | | 19,87 | |
| Nennschotterbetthöhe + 30% | 23,29 | | 23,97 | |
| | | Σ Ständige Belastung Brücke TYPI: 15/20 [kN] | Σ Ständige Belastung ABAQUSmodell TYPI: 15/20 [kN] | |
| | | 64,99 | 32,50 | |
| | | 81,06 | 40,53 | |
| | | 97,80 | 48,90 | |

C.1.4 Verkehrslast

| Verkehrslast | | | | | |
|----------------------------|---|-------------------------------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Fall | Fall | Flächenlast [kN/m ²] | Linienlast [kN/m] | Brücke [kN] | ABAQUSmodell [kN] |
| Nennschotterbetthöhe - 30% | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 86,24 | 231,82 | 231,82 | 115,91 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 82,56 | 221,92 | 221,92 | 110,96 |
| | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 58,13 | 156,25 | 156,25 | 78,13 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 55,65 | 149,58 | 149,58 | 74,79 |
| Nennschotterbetthöhe | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 83,69 | 231,82 | 231,82 | 115,91 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 80,12 | 221,92 | 221,92 | 110,96 |
| | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 56,41 | 156,25 | 156,25 | 78,13 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 54,00 | 149,58 | 149,58 | 74,79 |
| Nennschotterbetthöhe + 30% | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 81,25 | 231,82 | 231,82 | 115,91 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 77,79 | 221,92 | 221,92 | 110,96 |
| | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 54,77 | 156,25 | 156,25 | 78,13 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 52,43 | 149,58 | 149,58 | 74,79 |

C.1.5 Summe der Belastungen

| Σ der Belastungen SCSC-Platte | | | |
|-------------------------------|---|----------------|----------------------|
| Fall | Fall | Brücke [kN] | ABAQUSmodell [kN] |
| Nennschotterbetthöhe - 30% | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 296,81 | 148,41 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 286,92 | 143,46 |
| | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 221,24 | 110,62 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 214,57 | 107,29 |
| Nennschotterbetthöhe | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 312,88 | 156,44 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 302,99 | 151,49 |
| | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 237,31 | 118,66 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 230,64 | 115,32 |
| Nennschotterbetthöhe + 30% | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 329,62 | 164,81 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input checked="" type="checkbox"/> | 319,72 | 159,86 |
| | Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 254,05 | 127,02 |
| | Längswirkung <input checked="" type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> | 247,38 | 123,69 |

C.1.6 Angesetzte Belastungen

| Angesetzte Belastungen auf das Modell in RFEM | | | |
|--|--|--------------------------------------|---------------------------|
| Grundfall: TYP: 15/20, Nennschotterbetthöhe, Verkehrslast: Längswirkung <input type="checkbox"/> , Beiwerte <input type="checkbox"/> (für die Berechnung der Längswirkung aus der ständigen Belastung) | | | |
| | Eigengewicht SCSC-Platte [kN/m ²] | Ausbaulasten [kN/m ²] | Σ [kN/m ²] |
| Brückenmodell | 6,72 | 13,16 | 19,88 |
| ABAQUSmodell | 6,68 | 13,09 | 19,77 |
| Angesetzte Belastungen auf das Modell in ABAQUS | | | |
| | Ständige Belastung [N/mm ²] | Verkehrslast [N/mm ²] | |
| Nennschotterbetthöhe - 30% | 0,01593 | 0,30 | |
| Nennschotterbetthöhe | 0,01987 | 0,29 | |
| Nennschotterbetthöhe + 30% | 0,02397 | 0,28 | |

C.1.7 Belastungsgeschwindigkeit

| Belastungsgeschwindigkeit des Modells in ABAQUS (Grundfall: TYP: 15/20, Nennschotterbetthöhe) | | | | |
|---|----------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------------|
| | Flächenlast auf dem ABAQUSmodell | | Belastungsdauer | Belastungsgeschwindigkeit |
| | [N/mm ²] | [kN/m ²] | [frame] | [kN/m ² /frame] |
| Ständige Belastung | 0,01987 | 19,87 | 5 | 4,0 |
| | | | 50 | 5,8 |
| Verkehrslast | 0,29000 | 290,00 | 40 | 7,3 |
| | | | 30 | 9,7 |

C.2 Beispiel für die Lebensdauerberechnung (Modell *TYP 10*)

Aus Platzmangel werden hier die Berechnungen teilweise nur für ein kritisches Element dargestellt.

| Modell auswählen: | | TYP 10 | | | | | Kritische σ_1 Elemente | | | | | | | | | |
|---|----------|----------|---------|---------|------|------|-------------------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| | | | | | | | Element A | | Element B | | Element C | | Element D | | Element E | |
| | | | | | | | Dübelreihe 2 12690 | | Dübelreihe 2 13013 | | Dübelreihe 2 13334 | | Dübelreihe 2 14998 | | Dübelreihe 2 20638 | |
| | | | | | | | SP3 | LEP3 | SP3 | LEP3 | SP3 | LEP3 | SP3 | LEP3 | SP3 | LEP3 |
| Ständige Belastung | Zeit | Allie | Allke | RF3 | RF3 | U3 | 0 | 2,4E-07 | 0 | 1,2E-05 | 0 | 1,2E-05 | 0 | 1,7E-06 | 0 | 5,6E-06 |
| | 1 | 1191 | 10 | -9141 | 18 | 0,3 | 6 | 3,1E-05 | 7 | 3,6E-05 | 7 | 3,3E-05 | 7 | 3,6E-05 | 4 | 1,3E-05 |
| | 2 | 3788 | 37 | -17531 | 35 | 0,6 | 12 | 5,8E-05 | 13 | 6,9E-05 | 13 | 7,1E-05 | 13 | 6,5E-05 | 7 | 3,2E-05 |
| | 3 | 7277 | 84 | -24839 | 50 | 0,8 | 17 | 8,6E-05 | 18 | 9,0E-05 | 18 | 9,1E-05 | 18 | 8,1E-05 | 10 | 4,3E-05 |
| | 4 | 11525 | 84 | -32000 | 64 | 1,0 | 21 | 1,1E-04 | 23 | 1,2E-04 | 23 | 1,2E-04 | 23 | 1,1E-04 | 13 | 5,4E-05 |
| Verkehrslast | 5 | 18306 | 33 | -40531 | 81 | 1,3 | 27 | 1,3E-04 | 29 | 1,5E-04 | 29 | 1,5E-04 | 29 | 1,4E-04 | 18 | 8,6E-05 |
| | 5 | 18306 | 33 | -40531 | 81 | 1,3 | 27 | 1,3E-04 | 29 | 1,5E-04 | 29 | 1,5E-04 | 29 | 1,4E-04 | 18 | 8,6E-05 |
| | 6 | 37662 | 35 | -54671 | 109 | 1,9 | 39 | 2,0E-04 | 42 | 2,1E-04 | 42 | 2,1E-04 | 42 | 2,1E-04 | 24 | 1,0E-04 |
| | 7 | 67021 | 113 | -69356 | 139 | 2,5 | 52 | 2,7E-04 | 55 | 2,9E-04 | 55 | 2,9E-04 | 55 | 2,8E-04 | 33 | 1,6E-04 |
| | 8 | 103511 | 258 | -83283 | 167 | 3,1 | 64 | 3,3E-04 | 67 | 3,5E-04 | 67 | 3,5E-04 | 66 | 3,4E-04 | 42 | 2,0E-04 |
| | 9 | 142313 | 325 | -95505 | 191 | 3,7 | 75 | 3,8E-04 | 79 | 4,1E-04 | 79 | 4,0E-04 | 77 | 3,9E-04 | 52 | 2,5E-04 |
| | 10 | 189343 | 354 | -108424 | 217 | 4,3 | 87 | 4,4E-04 | 90 | 4,7E-04 | 90 | 4,7E-04 | 87 | 4,4E-04 | 63 | 3,1E-04 |
| | 11 | 252995 | 84 | -123528 | 247 | 5,0 | 100 | 5,1E-04 | 104 | 5,3E-04 | 103 | 5,3E-04 | 99 | 5,0E-04 | 77 | 3,7E-04 |
| | 12 | 328460 | 167 | -138373 | 277 | 5,8 | 114 | 5,9E-04 | 117 | 6,1E-04 | 117 | 6,0E-04 | 111 | 5,7E-04 | 91 | 4,3E-04 |
| | 13 | 411468 | 378 | -151595 | 303 | 6,5 | 125 | 6,5E-04 | 127 | 6,8E-04 | 127 | 6,7E-04 | 121 | 6,3E-04 | 106 | 5,0E-04 |
| | 14 | 494519 | 282 | -164261 | 329 | 7,2 | 134 | 7,2E-04 | 136 | 7,4E-04 | 136 | 7,3E-04 | 129 | 6,8E-04 | 122 | 5,9E-04 |
| | 15 | 598590 | 119 | -178842 | 358 | 8,0 | 145 | 8,0E-04 | 146 | 8,1E-04 | 146 | 8,0E-04 | 137 | 7,4E-04 | 146 | 7,2E-04 |
| | 16 | 711717 | 182 | -193805 | 388 | 8,8 | 156 | 8,8E-04 | 157 | 9,0E-04 | 157 | 8,8E-04 | 147 | 8,1E-04 | 164 | 8,2E-04 |
| | 17 | 821448 | 340 | -206109 | 412 | 9,5 | 165 | 9,5E-04 | 165 | 9,7E-04 | 165 | 9,6E-04 | 154 | 8,6E-04 | 178 | 9,3E-04 |
| | 18 | 939720 | 247 | -219725 | 439 | 10,2 | 175 | 1,0E-03 | 174 | 1,0E-03 | 174 | 1,0E-03 | 161 | 9,1E-04 | 190 | 9,9E-04 |
| | 19 | 1077319 | 172 | -234153 | 468 | 11,0 | 181 | 1,1E-03 | 180 | 1,1E-03 | 180 | 1,1E-03 | 170 | 9,8E-04 | 202 | 1,1E-03 |
| | 20 | 1226381 | 738 | -248437 | 497 | 11,8 | 187 | 1,2E-03 | 185 | 1,2E-03 | 185 | 1,2E-03 | 176 | 1,1E-03 | 214 | 1,2E-03 |
| | 21 | 1380111 | 287 | -261963 | 524 | 12,5 | 192 | 1,3E-03 | 190 | 1,3E-03 | 190 | 1,3E-03 | 181 | 1,2E-03 | 222 | 1,3E-03 |
| | 22 | 1532751 | 211 | -275162 | 550 | 13,2 | 198 | 1,4E-03 | 196 | 1,4E-03 | 196 | 1,4E-03 | 186 | 1,2E-03 | 231 | 1,4E-03 |
| | 23 | 1718268 | 193 | -289101 | 578 | 14,0 | 205 | 1,6E-03 | 203 | 1,5E-03 | 203 | 1,5E-03 | 191 | 1,3E-03 | 240 | 1,5E-03 |
| | 24 | 1905518 | 285 | -302804 | 606 | 14,8 | 208 | 1,7E-03 | 207 | 1,6E-03 | 207 | 1,6E-03 | 197 | 1,4E-03 | 249 | 1,7E-03 |
| | 25 | 2091900 | 197 | -317432 | 635 | 15,6 | 211 | 1,8E-03 | 210 | 1,8E-03 | 210 | 1,8E-03 | 203 | 1,5E-03 | 256 | 1,8E-03 |
| | 26 | 2320159 | 476 | -331460 | 663 | 16,5 | 213 | 2,0E-03 | 212 | 1,9E-03 | 213 | 1,9E-03 | 208 | 1,6E-03 | 262 | 2,0E-03 |
| | 27 | 2503534 | 290 | -344011 | 688 | 17,2 | 216 | 2,1E-03 | 215 | 2,0E-03 | 215 | 2,0E-03 | 211 | 1,7E-03 | 267 | 2,1E-03 |
| | 28 | 2740373 | 135 | -358338 | 717 | 18,1 | 220 | 2,3E-03 | 218 | 2,2E-03 | 219 | 2,2E-03 | 213 | 1,8E-03 | 272 | 2,3E-03 |
| | 29 | 3010992 | 230 | -373818 | 748 | 19,0 | 224 | 2,5E-03 | 221 | 2,3E-03 | 223 | 2,4E-03 | 215 | 1,9E-03 | 278 | 2,5E-03 |
| | 30 | 3293755 | 579 | -388219 | 776 | 20,0 | 227 | 2,7E-03 | 224 | 2,5E-03 | 226 | 2,5E-03 | 217 | 2,0E-03 | 284 | 2,6E-03 |
| | 31 | 3507835 | 430 | -398697 | 797 | 20,7 | 231 | 2,8E-03 | 228 | 2,6E-03 | 230 | 2,7E-03 | 220 | 2,1E-03 | 289 | 2,8E-03 |
| | 32 | 3808888 | 88 | -413425 | 827 | 21,6 | 235 | 3,1E-03 | 233 | 2,8E-03 | 235 | 2,8E-03 | 222 | 2,3E-03 | 296 | 3,0E-03 |
| | 33 | 4164996 | 219 | -429682 | 859 | 22,7 | 236 | 3,4E-03 | 239 | 3,0E-03 | 241 | 3,0E-03 | 226 | 2,4E-03 | 303 | 3,2E-03 |
| | 34 | 4462214 | 695 | -442217 | 884 | 23,6 | 235 | 3,6E-03 | 241 | 3,2E-03 | 243 | 3,2E-03 | 229 | 2,6E-03 | 308 | 3,4E-03 |
| | 35 | 4815332 | 174 | -455263 | 911 | 24,6 | 235 | 3,9E-03 | 240 | 3,5E-03 | 243 | 3,5E-03 | 232 | 2,7E-03 | 312 | 3,7E-03 |
| | 36 | 5244831 | 442 | -470872 | 942 | 25,8 | 237 | 4,2E-03 | 240 | 3,7E-03 | 242 | 3,8E-03 | 140 | 3,0E-03 | 316 | 3,9E-03 |
| | 37 | 5640161 | 1009 | -483805 | 968 | 26,8 | 238 | 4,6E-03 | 239 | 4,0E-03 | 243 | 4,1E-03 | 145 | 3,1E-03 | 319 | 4,2E-03 |
| | 38 | 6022272 | 350 | -494877 | 990 | 27,8 | 239 | 4,9E-03 | 239 | 4,3E-03 | 243 | 4,4E-03 | 153 | 3,2E-03 | 322 | 4,4E-03 |
| | 39 | 6581015 | 509 | -511667 | 1023 | 29,3 | 241 | 5,4E-03 | 240 | 4,7E-03 | 244 | 4,8E-03 | 162 | 3,4E-03 | 326 | 4,8E-03 |
| | 40 | 7021210 | 836 | -524217 | 1048 | 30,3 | 241 | 5,7E-03 | 241 | 5,0E-03 | 245 | 5,1E-03 | 163 | 3,6E-03 | 329 | 5,1E-03 |
| | 41 | 7563004 | 502 | -538896 | 1078 | 31,7 | 245 | 6,1E-03 | 243 | 5,4E-03 | 246 | 5,4E-03 | 168 | 3,9E-03 | 333 | 5,5E-03 |
| | 42 | 8496849 | 2194 | -555282 | 1111 | 33,7 | 248 | 6,8E-03 | 240 | 6,1E-03 | 246 | 5,9E-03 | 170 | 4,2E-03 | 340 | 6,2E-03 |
| | 43 | 8967532 | 1281 | -564031 | 1128 | 34,8 | 248 | 7,5E-03 | 241 | 6,5E-03 | 247 | 6,2E-03 | 167 | 4,6E-03 | 342 | 6,4E-03 |
| | 44 | 9841309 | 1652 | -583624 | 1167 | 36,6 | 248 | 8,2E-03 | 240 | 7,1E-03 | 248 | 6,8E-03 | 173 | 4,8E-03 | 349 | 7,1E-03 |
| | 45 | 10561656 | 1648 | -594310 | 1189 | 38,1 | 248 | 8,3E-03 | 241 | 7,5E-03 | 247 | 7,2E-03 | 184 | 5,0E-03 | 354 | 7,5E-03 |
| | 46 | 11530192 | 1958 | -608615 | 1217 | 40,0 | 248 | 9,3E-03 | 240 | 8,1E-03 | 248 | 7,8E-03 | 183 | 5,6E-03 | 360 | 8,0E-03 |
| | 47 | 12406724 | 2655 | -620255 | 1241 | 41,7 | 248 | 1,0E-02 | 240 | 8,8E-03 | 248 | 8,5E-03 | 202 | 5,8E-03 | 365 | 8,5E-03 |
| | 48 | 13554216 | 2132 | -633088 | 1266 | 44,0 | 248 | 1,1E-02 | 240 | 9,5E-03 | 248 | 9,2E-03 | 207 | 6,3E-03 | 369 | 9,2E-03 |
| | 49 | 14809870 | 2429 | -650309 | 1301 | 46,4 | 248 | 1,2E-02 | 240 | 1,0E-02 | 248 | 9,9E-03 | 218 | 6,8E-03 | 372 | 1,0E-02 |
| | 50 | 15937064 | 2544 | -661735 | 1323 | 48,6 | 248 | 1,3E-02 | 240 | 1,1E-02 | 248 | 1,1E-02 | 226 | 6,9E-03 | 374 | 1,1E-02 |
| | 51 | 17674278 | 6815 | -676100 | 1352 | 51,8 | 248 | 1,4E-02 | 240 | 1,2E-02 | 248 | 1,2E-02 | 234 | 7,4E-03 | 377 | 1,2E-02 |
| | 52 | 20158048 | 9101 | -688273 | 1377 | 56,0 | 248 | 1,5E-02 | 240 | 1,3E-02 | 248 | 1,3E-02 | 241 | 8,2E-03 | 382 | 1,4E-02 |
| | 53 | 22352532 | 4824 | -705766 | 1412 | 59,5 | 248 | 1,6E-02 | 242 | 1,4E-02 | 248 | 1,4E-02 | 244 | 8,7E-03 | 386 | 1,6E-02 |
| 54 | 24027858 | 6735 | -717893 | 1436 | 62,1 | 248 | 1,7E-02 | 245 | 1,5E-02 | 248 | 1,5E-02 | 245 | 9,1E-03 | 391 | 1,7E-02 | |
| 55 | 27465722 | 36696 | -719224 | 1438 | 67,4 | 248 | 1,8E-02 | 248 | 1,6E-02 | 248 | 1,6E-02 | 250 | 9,6E-03 | 405 | 2,0E-02 | |
| Verkehrslast minus die ständige Belastung | 0 | | | 0 | 0,0 | | 0,0E+00 | | 0,0E+00 | | 0,0E+00 | | 0,0E+00 | | 0,0E+00 | |
| | 1 | | | -14139 | 28 | 0,6 | 12 | 6,5E-05 | 13 | 6,9E-05 | 13 | 5,9E-05 | 13 | 6,6E-05 | 6 | 1,7E-05 |
| | 2 | | | -28825 | 58 | 1,2 | 25 | 1,4E-04 | 26 | 1,4E-04 | 27 | 1,4E-04 | 26 | 1,4E-04 | 15 | 7,0E-05 |
| | 3 | | | -42752 | 86 | 1,8 | 37 | 2,0E-04 | 39 | 2,0E-04 | 39 | 1,9E-04 | 37 | 2,0E-04 | 24 | 1,1E-04 |
| | 4 | | | -54974 | 110 | 2,4 | 48 | 2,5E-04 | 50 | 2,6E-04 | 50 | 2,5E-04 | 48 | 2,5E-04 | 34 | 1,6E-04 |
| | 5 | | | -67893 | 136 | 3,0 | 60 | 3,1E-04 | 61 | 3,2E-04 | 62 | 3,1E-04 | 58 | 3,0E-04 | 45 | 2,2E-04 |
| | 6 | | | -82996 | 166 | 3,8 | 73 | 3,8E-04 | 75 | 3,9E-04 | 75 | 3,8E-04 | 70 | 3,6E-04 | 59 | 2,9E-04 |
| | 7 | | | -97841 | 196 | 4,5 | 87 | 4,5E-04 | 88 | 4,6E-04 | 89 | 4,5E-04 | 82 | 4,3E-04 | 73 | 3,4E-04 |
| | 8 | | | -111064 | 222 | 5,2 | 98 | 5,2E-04 | 98 | 5,3E-04 | 98 | 5,1E-04 | 92 | 4,9E-04 | 87 | 4,1E-04 |
| | 9 | | | -123730 | 247 | 5,9 | 107 | 5,8E-04 | 107 | 5,9E-04 | 107 | 5,7E-04 | 100 | 5,3E-04 | 104 | 5,0E-04 |
| | 10 | | | -138311 | 277 | 6,7 | 118 | 6,6E-04 | 117 | 6,6E-04 | 118 | 6,5E-04 | 108 | 6,0E-04 | 128 | 6,3E-04 |
| | 11 | | | -153273 | 307 | 7,5 | 129 | 7,4E-04 | 128 | 7,5E-04 | 128 | 7,3E-04 | 118 | 6,7E-04 | 145 | 7,4E-04 |
| | 12 | | | | | | | | | | | | | | | |

Modell: TYP 10
 Dübeltyp: I
 Blechdicke: 15/20
 Stahlsorte: S355
 Schotterbett: N

Maximale Spannungs- und Dehnungswerte vom Erstbelastungspfad unter der ständigen Belastung im ABAQUS
 Modell ist mit der genauen ständigen Belastung auf der gesamten Fläche belastet.

| Zeit | Kinetic Energy | Internal Energy | Allie / Allie | Zeit / Laststufe | Ständige Belastung auf die Brücke | Verschiebung | Maßgebe nde σ_1 | Hauptzug- spannung | Hauptzug- dehnung | Maßgebe nde σ_V | Vergleichs- spannung | Vergleichs- dehnung | Plastische Hauptdehnungs- komponente | | | |
|------|----------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------------------------|--------------|---|--------------------------------|---|-----------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| | | | | | | | | | | | | | PEP1 | PEP2 | PEP3 | |
| t | [frame] | [] | [] | [] | t _{stä} | Faktor | RF3 P _{stä} [kN/m ²] | U3 u _{stä} [mm] | SP3 $\sigma_{1,stä}$ [N/mm ²] | LEP3 $\epsilon_{1,stä}$ [-] | Mises $\sigma_{V,stä}$ [N/mm ²] | - $\epsilon_{V,stä}$ [-] | PEP1 $\epsilon_{1,p,stä}$ [-] | PEP2 $\epsilon_{2,p,stä}$ [-] | PEP3 $\epsilon_{3,p,stä}$ [-] | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | * stä.Bel. = | 0 | 0,0 | A | 0 | 0,00000 | F | 0 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 1 | 10 | 1191 | 0,00840 | 1 | 0,2 | * stä.Bel. = | 4 | 0,3 | D | 7 | 0,00004 | J | 10 | 0,00005 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | 37 | 3788 | 0,00977 | 2 | 0,4 | * stä.Bel. = | 9 | 0,6 | D | 13 | 0,00006 | J | 18 | 0,00009 | 0,00000 | 0,00000 |
| 3 | 84 | 7277 | 0,01154 | 3 | 0,6 | * stä.Bel. = | 12 | 0,8 | D | 18 | 0,00008 | J | 25 | 0,00012 | 0,00000 | 0,00000 |
| 4 | 84 | 11525 | 0,00729 | 4 | 0,8 | * stä.Bel. = | 16 | 1,0 | D | 23 | 0,00011 | J | 32 | 0,00015 | 0,00000 | 0,00000 |
| 5 | 33 | 18306 | 0,00180 | 5 | 1,0 | * stä.Bel. = | 20 | 1,3 | D | 29 | 0,00014 | J | 40 | 0,00019 | 0,00000 | 0,00000 |
| 6 | 40 | 37667 | 0,00106 | 6 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 118 | 67026 | 0,00176 | 7 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 263 | 103516 | 0,00254 | 8 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 330 | 142318 | 0,00232 | 9 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 159 | 189348 | 0,00084 | 10 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 89 | 253000 | 0,00035 | 11 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 172 | 328465 | 0,00052 | 12 | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 383 | 411473 | 0,00093 | 13 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 287 | 494524 | 0,00058 | 14 | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 124 | 598595 | 0,00021 | 15 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 187 | 711722 | 0,00026 | 16 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 345 | 821453 | 0,00042 | 17 | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 252 | 939725 | 0,00027 | 18 | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 177 | 1077324 | 0,00016 | 19 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 743 | 1226386 | 0,00061 | 20 | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 292 | 1380116 | 0,00021 | 21 | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 216 | 1532756 | 0,00014 | 22 | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 198 | 1718273 | 0,00012 | 23 | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 290 | 1905523 | 0,00015 | 24 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 202 | 2091905 | 0,00010 | 25 | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 481 | 2320164 | 0,00021 | 26 | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 295 | 2503539 | 0,00012 | 27 | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 140 | 2740378 | 0,00005 | 28 | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 235 | 3010997 | 0,00008 | 29 | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 584 | 3293760 | 0,00018 | 30 | | | | | | | | | | | | |
| 31 | 435 | 3507840 | 0,00012 | 31 | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 93 | 3808893 | 0,00002 | 32 | | | | | | | | | | | | |
| 33 | 224 | 4165001 | 0,00005 | 33 | | | | | | | | | | | | |
| 34 | 700 | 4462219 | 0,00016 | 34 | | | | | | | | | | | | |
| 35 | 179 | 4815337 | 0,00004 | 35 | | | | | | | | | | | | |
| 36 | 447 | 5244836 | 0,00009 | 36 | | | | | | | | | | | | |
| 37 | 1014 | 5640166 | 0,00018 | 37 | | | | | | | | | | | | |
| 38 | 355 | 6022277 | 0,00006 | 38 | | | | | | | | | | | | |
| 39 | 514 | 6581020 | 0,00008 | 39 | | | | | | | | | | | | |
| 40 | 841 | 7021215 | 0,00012 | 40 | | | | | | | | | | | | |
| 41 | 507 | 7563009 | 0,00007 | 41 | | | | | | | | | | | | |
| 42 | 2199 | 8496854 | 0,00026 | 42 | | | | | | | | | | | | |
| 43 | 1286 | 8967537 | 0,00014 | 43 | | | | | | | | | | | | |
| 44 | 1657 | 9841314 | 0,00017 | 44 | | | | | | | | | | | | |
| 45 | 1653 | ##### | 0,00016 | 45 | | | | | | | | | | | | |
| 46 | 1963 | ##### | 0,00017 | 46 | | | | | | | | | | | | |
| 47 | 2660 | ##### | 0,00021 | 47 | | | | | | | | | | | | |
| 48 | 2137 | ##### | 0,00016 | 48 | | | | | | | | | | | | |
| 49 | 2434 | ##### | 0,00016 | 49 | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 2549 | ##### | 0,00016 | 50 | | | | | | | | | | | | |
| 51 | 6820 | ##### | 0,00039 | 51 | | | | | | | | | | | | |
| 52 | 9106 | ##### | 0,00045 | 52 | | | | | | | | | | | | |
| 53 | 4829 | ##### | 0,00022 | 53 | | | | | | | | | | | | |
| 54 | 6740 | ##### | 0,00028 | 54 | | | | | | | | | | | | |
| 55 | 36701 | ##### | 0,00134 | 55 | | | | | | | | | | | | |

Spannungs- und Dehnungswerte vom Erstbelastungspfad unter der ständigen Belastung im ABAQUS in den einzelnen kritischen Elementen

Modell ist mit der genauen ständigen Belastung auf der gesamten Fläche belastet.

| t _{stä} | Faktor | RF3 P _{stä} [kN/m ²] | U3 | SP3 $\sigma_{1,stä}$ [N/mm ²] | LEP3 $\epsilon_{1,stä}$ [-] | Mises $\sigma_{V,stä}$ [N/mm ²] | - $\epsilon_{V,stä}$ [-] | PEP1 $\epsilon_{1,p,stä}$ [-] | PEP2 $\epsilon_{2,p,stä}$ [-] | PEP3 $\epsilon_{3,p,stä}$ [-] |
|------------------|--------|---|----|---|-----------------------------------|---|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 0,0 | * stä.Bel. = | 0 | 0,0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 1 | 0,2 | * stä.Bel. = | 4 | 0,3 | 0,00003 | 6 | 0,00003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 2 | 0,4 | * stä.Bel. = | 9 | 0,6 | 0,00006 | 12 | 0,00006 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 3 | 0,6 | * stä.Bel. = | 12 | 0,8 | 0,00009 | 17 | 0,00009 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 4 | 0,8 | * stä.Bel. = | 16 | 1,0 | 0,00011 | 21 | 0,00011 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 5 | 1,0 | * stä.Bel. = | 20 | 1,3 | 0,00013 | 27 | 0,00013 | ##### | ##### | ##### |

| Erstbelastungspfad allein unter Verkehrslast | | |
|---|------------------|----------------|
| Modell ist mit 5*LM77 □□ auf der entsprechende, von Schotterbetthöhe abhängige Belastungsfläche belastet. | | |
| Zeit | Verkehrslast | Verschiebung |
| | auf die Brücke | |
| t_{zyk} | RF3 | U3 |
| [frame] | P_{zyk} [kN/m] | u_{zyk} [mm] |
| 0 | 0 | 0,0 |
| 1 | 28 | 0,6 |
| 2 | 58 | 1,2 |
| 3 | 86 | 1,8 |
| 4 | 110 | 2,4 |
| 5 | 136 | 3,0 |
| 6 | 166 | 3,8 |
| 7 | 196 | 4,5 |
| 8 | 222 | 5,2 |
| 9 | 247 | 5,9 |
| 10 | 277 | 6,7 |
| 11 | 307 | 7,5 |
| 12 | 331 | 8,2 |
| 13 | 358 | 8,9 |
| 14 | 387 | 9,7 |
| 15 | 416 | 10,5 |
| 16 | 443 | 11,2 |
| 17 | 469 | 12,0 |
| 18 | 497 | 12,8 |
| 19 | 525 | 13,6 |
| 20 | 554 | 14,4 |
| 21 | 582 | 15,2 |
| 22 | 607 | 15,9 |
| 23 | 636 | 16,8 |
| 24 | 667 | 17,8 |
| 25 | 695 | 18,7 |
| 26 | 716 | 19,4 |
| 27 | 746 | 20,4 |
| 28 | 778 | 21,5 |
| 29 | 803 | 22,3 |
| 30 | 829 | 23,3 |
| 31 | 861 | 24,5 |
| 32 | 887 | 25,6 |
| 33 | 909 | 26,6 |
| 34 | 942 | 28,0 |
| 35 | 967 | 29,1 |
| 36 | 997 | 30,4 |
| 37 | 1030 | 32,5 |
| 38 | 1047 | 33,5 |
| 39 | 1086 | 35,4 |
| 40 | 1108 | 36,8 |
| 41 | 1136 | 38,7 |
| 42 | 1159 | 40,4 |
| 43 | 1185 | 42,7 |
| 44 | 1220 | 45,2 |
| 45 | 1242 | 47,4 |
| 46 | 1271 | 50,5 |
| 47 | 1295 | 54,7 |
| 48 | 1330 | 58,2 |
| 49 | 1355 | 60,9 |
| 50 | 1357 | 66,1 |

| Schritt 1: Ermittlung der Erstbelastungspfad allein unter Verkehrslast | | | | | | |
|--|-------|----------------------|-----------------|----------------------|-------------------|--|
| Lastniveaus wie im Lebensdauerberechnung | | | | | | |
| Verkehrslast auf die Brücke | Zeit | Hauptzugspannung | Hauptzugdehnung | Vergleichspannung | Vergleichsdehnung | |
| u | t | σ_1 | ϵ_1 | σ_V | ϵ_V | |
| [mm] | [sec] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] | [-] | |
| 0,0 | 0,0 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | |
| 0,3 | 0,6 | 7 | 0,00004 | 9 | 0,00004 | |
| 0,6 | 1,1 | 14 | 0,00008 | 18 | 0,00009 | |
| 1,0 | 1,6 | 21 | 0,00011 | 28 | 0,00013 | |
| 1,3 | 2,2 | 28 | 0,00015 | 37 | 0,00018 | |
| 1,7 | 2,7 | 35 | 0,00018 | 46 | 0,00022 | |
| 2,0 | 3,3 | 42 | 0,00022 | 55 | 0,00026 | |
| 2,4 | 4,0 | 50 | 0,00026 | 65 | 0,00031 | |
| 2,8 | 4,6 | 57 | 0,00030 | 74 | 0,00035 | |
| 3,2 | 5,2 | 64 | 0,00033 | 83 | 0,00040 | |
| 3,5 | 5,7 | 70 | 0,00037 | 92 | 0,00044 | |
| 3,9 | 6,2 | 77 | 0,00040 | 101 | 0,00048 | |
| 4,3 | 6,7 | 85 | 0,00044 | 109 | 0,00052 | |
| 4,7 | 7,3 | 91 | 0,00048 | 116 | 0,00056 | |
| 5,1 | 7,9 | 97 | 0,00052 | 124 | 0,00060 | |
| 5,6 | 8,5 | 102 | 0,00056 | 131 | 0,00064 | |
| 6,0 | 9,1 | 108 | 0,00060 | 139 | 0,00068 | |
| 6,4 | 9,6 | 113 | 0,00064 | 146 | 0,00072 | |
| 6,8 | 10,2 | 119 | 0,00068 | 153 | 0,00075 | |
| 7,2 | 10,7 | 124 | 0,00072 | 159 | 0,00079 | |
| 7,7 | 11,2 | 130 | 0,00077 | 166 | 0,00083 | |
| 8,1 | 11,9 | 135 | 0,00081 | 171 | 0,00086 | |
| 8,5 | 12,5 | 140 | 0,00086 | 176 | 0,00089 | |
| 9,0 | 13,0 | 145 | 0,00090 | 180 | 0,00092 | |
| 9,4 | 13,6 | 148 | 0,00095 | 185 | 0,00096 | |
| 9,8 | 14,1 | 152 | 0,00100 | 194 | 0,00102 | |
| 10,2 | 14,7 | 154 | 0,00105 | 199 | 0,00105 | |
| 10,7 | 15,2 | 157 | 0,00110 | 204 | 0,00109 | |
| 11,1 | 15,8 | 160 | 0,00115 | 210 | 0,00113 | |
| 11,5 | 16,4 | 164 | 0,00120 | 215 | 0,00117 | |
| 12,0 | 17,0 | 167 | 0,00125 | 220 | 0,00121 | |
| 12,4 | 17,5 | 171 | 0,00132 | 223 | 0,00124 | |
| 12,9 | 18,1 | 223 | 0,00147 | 225 | 0,00128 | |
| 13,3 | 18,7 | 228 | 0,00153 | 228 | 0,00132 | |
| 13,8 | 19,2 | 232 | 0,00160 | 232 | 0,00136 | |
| 14,2 | 19,8 | 236 | 0,00168 | 235 | 0,00140 | |
| 14,6 | 20,3 | 240 | 0,00176 | 239 | 0,00144 | |
| 15,1 | 20,9 | 243 | 0,00185 | 242 | 0,00149 | |
| 15,6 | 21,5 | 246 | 0,00194 | 246 | 0,00153 | |
| 16,0 | 22,1 | 249 | 0,00202 | 250 | 0,00158 | |
| 16,5 | 22,6 | 252 | 0,00211 | 253 | 0,00162 | |
| 17,0 | 23,2 | 255 | 0,00221 | 257 | 0,00167 | |
| 17,4 | 23,7 | 258 | 0,00231 | 261 | 0,00172 | |
| 17,9 | 24,2 | 261 | 0,00241 | 265 | 0,00178 | |
| 18,5 | 24,7 | 265 | 0,00251 | 270 | 0,00183 | |
| 19,0 | 25,4 | 268 | 0,00261 | 274 | 0,00189 | |
| 19,5 | 26,1 | 272 | 0,00270 | 277 | 0,00196 | |
| 20,0 | 26,6 | 275 | 0,00281 | 279 | 0,00201 | |
| 20,5 | 27,1 | 279 | 0,00292 | 280 | 0,00207 | |
| 21,0 | 27,6 | 282 | 0,00304 | 283 | 0,00213 | |
| 21,6 | 28,1 | 286 | 0,00316 | 285 | 0,00220 | |

| Spannung- und Dehnungswerte vom Erstbelastungspfad allein unter Verkehrslast in ABAQUS in den einzelnen kritischen Elementen | | | | | | |
|---|------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|--|
| Modell ist mit 5*LM77 □□ auf der entsprechende, von Schotterbetthöhe abhängige Belastungsfläche belastet. Werte aus der ständigen Belastung sind abgezogen. | | | | | | |
| t_{zyk} | RF3 | SP3 | LEP3 | Mises | - | |
| [frame] | P_{zyk} [kN/m] | $\sigma_{1,zyk}$ [N/mm ²] | $\epsilon_{1,zyk}$ [-] | $\sigma_{V,zyk}$ [N/mm ²] | $\epsilon_{V,zyk}$ [-] | |
| 0 | 0 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | |
| 1 | 28 | 12 | 0,00007 | 17 | 0,00008 | |
| 2 | 58 | 25 | 0,00014 | 34 | 0,00016 | |
| 3 | 86 | 37 | 0,00020 | 50 | 0,00024 | |
| 4 | 110 | 48 | 0,00025 | 65 | 0,00031 | |
| 5 | 136 | 60 | 0,00031 | 80 | 0,00038 | |
| 6 | 166 | 73 | 0,00038 | 98 | 0,00047 | |
| 7 | 196 | 87 | 0,00045 | 113 | 0,00054 | |
| 8 | 222 | 98 | 0,00052 | 125 | 0,00061 | |
| 9 | 247 | 107 | 0,00058 | 138 | 0,00067 | |
| 10 | 277 | 118 | 0,00066 | 150 | 0,00074 | |
| 11 | 307 | 129 | 0,00074 | 163 | 0,00081 | |
| 12 | 331 | 138 | 0,00082 | 173 | 0,00087 | |
| 13 | 358 | 147 | 0,00090 | 180 | 0,00092 | |
| 14 | 387 | 154 | 0,00100 | 188 | 0,00098 | |
| 15 | 416 | 159 | 0,00110 | 197 | 0,00105 | |
| 16 | 443 | 165 | 0,00120 | 206 | 0,00111 | |
| 17 | 469 | 171 | 0,00130 | 214 | 0,00117 | |
| 18 | 497 | 178 | 0,00142 | 220 | 0,00123 | |
| 19 | 525 | 181 | 0,00155 | 224 | 0,00129 | |
| 20 | 554 | 184 | 0,00169 | 230 | 0,00136 | |
| 21 | 582 | 186 | 0,00185 | 236 | 0,00143 | |
| 22 | 607 | 189 | 0,00199 | 241 | 0,00150 | |
| 23 | 636 | 192 | 0,00215 | 248 | 0,00158 | |
| 24 | 667 | 196 | 0,00234 | 255 | 0,00167 | |
| 25 | 695 | 200 | 0,00254 | 262 | 0,00176 | |
| 26 | 716 | 203 | 0,00270 | 267 | 0,00182 | |
| 27 | 746 | 208 | 0,00293 | 273 | 0,00191 | |
| 28 | 778 | 208 | 0,00322 | 276 | 0,00201 | |
| 29 | 803 | 208 | 0,00345 | 279 | 0,00210 | |
| 30 | 829 | 208 | 0,00374 | 283 | 0,00222 | |
| 31 | 861 | 210 | 0,00409 | 287 | 0,00235 | |
| 32 | 887 | 210 | 0,00442 | 292 | 0,00250 | |
| 33 | 909 | 212 | 0,00476 | 296 | 0,00264 | |
| 34 | 942 | 214 | 0,00523 | 302 | 0,00283 | |
| 35 | 967 | 216 | 0,00557 | 307 | 0,00298 | |
| 36 | 997 | 218 | 0,00598 | 312 | 0,00315 | |
| 37 | 1030 | 220 | 0,00671 | 323 | 0,00352 | |
| 38 | 1047 | 121 | 0,00739 | 329 | 0,00371 | |
| 39 | 1086 | 139 | 0,00766 | 338 | 0,00401 | |
| 40 | 1108 | 135 | 0,00817 | 342 | 0,00426 | |
| 41 | 1136 | 138 | 0,00917 | 346 | 0,00466 | |
| 42 | 1159 | 138 | 0,00993 | 350 | 0,00498 | |
| 43 | 1185 | 131 | 0,01084 | 206 | 0,00462 | |
| 44 | 1220 | 130 | 0,01174 | 273 | 0,00497 | |
| 45 | 1242 | 138 | 0,01253 | 329 | 0,00526 | |
| 46 | 1271 | 148 | 0,01394 | 352 | 0,00556 | |
| 47 | 1295 | 164 | 0,01471 | 358 | 0,00587 | |
| 48 | 1330 | 170 | 0,01582 | 362 | 0,00619 | |
| 49 | 1355 | 187 | 0,01619 | 363 | 0,00636 | |
| 50 | 1357 | 203 | 0,01786 | 367 | 0,00690 | |

| Schritt 1: Ermittlung der Erstbelastungspfad allein unter Verkehrslast | | | | |
|--|--------------|----------------------|--------------|--|
| Lastniveaus wie im Lebensdauerberechnung | | | | |
| σ_1 | ϵ_1 | σ_V | ϵ_V | |
| [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] | [-] | |
| 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | |
| 7 | 0,00004 | 9 | 0,00004 | |
| 13 | 0,00007 | 18 | 0,00009 | |
| 20 | 0,00011 | 28 | 0,00013 | |
| 27 | 0,00015 | 37 | 0,00018 | |
| 34 | 0,00018 | 46 | 0,00022 | |
| 41 | 0,00021 | 55 | 0,00026 | |
| 48 | 0,00025 | 65 | 0,00031 | |
| 55 | 0,00029 | 74 | 0,00035 | |
| 62 | 0,00032 | 83 | 0,00040 | |
| 69 | 0,00036 | 92 | 0,00044 | |
| 76 | 0,00040 | 101 | 0,00048 | |
| 83 | 0,00043 | 109 | 0,00052 | |
| 90 | 0,00047 | 116 | 0,00056 | |
| 97 | 0,00051 | 124 | 0,00060 | |
| 102 | 0,00055 | 131 | 0,00064 | |
| 108 | 0,00059 | 139 | 0,00068 | |
| 114 | 0,00063 | 146 | 0,00072 | |
| 119 | 0,00068 | 152 | 0,00075 | |
| 125 | 0,00072 | 159 | 0,00079 | |
| 131 | 0,00076 | 165 | 0,00083 | |
| 137 | 0,00081 | 171 | 0,00086 | |
| 142 | 0,00086 | 176 | 0,00089 | |
| 148 | 0,00090 | 180 | 0,00092 | |
| 151 | 0,00096 | 185 | 0,00096 | |
| 154 | 0,00101 | 189 | 0,00099 | |
| 157 | 0,00107 | 194 | 0,00102 | |
| 160 | 0,00112 | 199 | 0,00106 | |
| 164 | 0,00118 | 204 | 0,00110 | |
| 167 | 0,00124 | 209 | 0,00113 | |
| 171 | 0,00130 | 214 | 0,00117 | |
| 175 | 0,00137 | 217 | 0,00121 | |
| 178 | 0,00143 | 220 | 0,00124 | |
| 180 | 0,00151 | 223 | 0,00127 | |
| 182 | 0,00158 | 225 | 0,00131 | |
| 183 | 0,00166 | 229 | 0,00134 | |
| 184 | 0,00174 | 232 | 0,00138 | |
| 185 | 0,00183 | 235 | 0,00142 | |
| 187 | 0,00191 | 239 | 0,00146 | |
| 189 | 0,00200 | 242 | 0,00151 | |
| 191 | 0,00209 | 246 | 0,00155 | |
| 193 | 0,00219 | 249 | 0,00159 | |
| 195 | 0,00228 | 253 | 0,00164 | |
| 197 | 0,00238 | 256 | 0,00168 | |
| 199 | 0,00249 | 260 | 0,00173 | |
| 201 | 0,00260 | 264 | 0,00178 | |
| 204 | 0,00272 | 268 | 0,00183 | |
| 206 | 0,00284 | 271 | 0,00188 | |
| 208 | 0,00297 | 273 | 0,00192 | |
| 208 | 0,00311 | 275 | 0,00197 | |
| 208 | 0,00325 | 276 | 0,00202 | |

| Last- stufe | Bestimmung der Umkehrpunkte der Hystereschleifen anhand der Erstbelastungspfad: Schritt 2: Ermittlung der Amplitudenwerte mittels lineare Interpolation. Schritt 3: Verdopplung -> Schwingbreitewerte (Numerische (und nicht analytische) Auswertung des örtlichen Spannungs-Dehnungspfad) | | | | | | | | | | | | | | Identifizierung das maßgebende Element pro Schwingspiele. | |
|----------------|---|----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|--|--|--|---|------------|------------|--|------------------------------------|
| | Schwingspiele Wechselbeanspruchung (R = -1, also wechselnd) Werten beziehen sich auf die gesamte Brückenbreite | | | | | | | | | | | | | | Kritische σ_1 Element | Kritische σ_V Element |
| | Lastschwingbreite | Last- amplitude | Verschiebung infolge P_a | Zeitdauer bis P_a in ABAQUS | Hauptzug- spannungs- amplitude | Hauptzug- spannungs- schwingbreite | Haupt- zugdehnungs- amplitude | Haupt- zugdehnungs- schwingbreite | Vergleichs- spannungs- amplitude | Vergleichs- spannungs- schwingbreite | Vergleichs- dehnungs- amplitude | Vergleichs- dehnungs- schwingbreite | σ_1 | σ_V | | |
| | Faktor | ΔP [kN/m] | P_a [kN/m] | u_a [mm] | t_a [sec] | $\sigma_{1,a}$ [N/mm ²] | $\Delta\sigma_1$ [N/mm ²] | $\varepsilon_{1,a}$ [-] | $\Delta\varepsilon_1$ [-] | $\sigma_{V,a}$ [N/mm ²] | $\Delta\sigma_V$ [N/mm ²] | $\varepsilon_{V,a}$ [-] | | | $\Delta\varepsilon_V$ [-] | |
| 0 | 0,0 * zyk.Bel. = | 0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,00000 | 0,00000 | 0 | 0 | 0,00000 | 0,00000 | - | - | |
| 1 | 0,1 * zyk.Bel. = | 16 | 8 | 0,2 | 0,3 | 4 | 7 | 0,00002 | 0,00004 | 5 | 9 | 0,00002 | 0,00004 | B | J | |
| 2 | 0,2 * zyk.Bel. = | 31 | 16 | 0,3 | 0,6 | 7 | 14 | 0,00004 | 0,00008 | 9 | 18 | 0,00004 | 0,00009 | B | F | |
| 3 | 0,3 * zyk.Bel. = | 47 | 23 | 0,5 | 0,8 | 11 | 21 | 0,00006 | 0,00011 | 14 | 28 | 0,00007 | 0,00013 | B | F | |
| 4 | 0,4 * zyk.Bel. = | 63 | 31 | 0,6 | 1,1 | 14 | 28 | 0,00008 | 0,00015 | 18 | 37 | 0,00009 | 0,00018 | B | F | |
| 5 | 0,5 * zyk.Bel. = | 78 | 39 | 0,8 | 1,4 | 18 | 36 | 0,00009 | 0,00019 | 23 | 46 | 0,00011 | 0,00022 | B | F | |
| 6 | 0,6 * zyk.Bel. = | 94 | 47 | 1,0 | 1,6 | 21 | 43 | 0,00011 | 0,00023 | 28 | 56 | 0,00013 | 0,00027 | B | F | |
| 7 | 0,7 * zyk.Bel. = | 109 | 55 | 1,1 | 1,9 | 25 | 50 | 0,00013 | 0,00027 | 33 | 65 | 0,00016 | 0,00031 | B | F | |
| 8 | 0,8 * zyk.Bel. = | 125 | 63 | 1,3 | 2,2 | 28 | 57 | 0,00015 | 0,00030 | 37 | 74 | 0,00018 | 0,00035 | B | F | |
| 9 | 0,9 * zyk.Bel. = | 141 | 70 | 1,5 | 2,5 | 32 | 64 | 0,00017 | 0,00033 | 42 | 83 | 0,00020 | 0,00040 | B | F | |
| 10 | 1,0 * zyk.Bel. = | 156 | 78 | 1,7 | 2,7 | 35 | 71 | 0,00018 | 0,00037 | 46 | 92 | 0,00022 | 0,00044 | B | F | |
| 11 | 1,1 * zyk.Bel. = | 172 | 86 | 1,8 | 3,0 | 39 | 78 | 0,00020 | 0,00040 | 51 | 101 | 0,00024 | 0,00048 | B | F | |
| 12 | 1,2 * zyk.Bel. = | 188 | 94 | 2,0 | 3,3 | 42 | 85 | 0,00022 | 0,00044 | 55 | 111 | 0,00026 | 0,00053 | B | F | |
| 13 | 1,3 * zyk.Bel. = | 203 | 102 | 2,2 | 3,7 | 46 | 92 | 0,00024 | 0,00048 | 60 | 120 | 0,00029 | 0,00057 | B | F | |
| 14 | 1,4 * zyk.Bel. = | 219 | 109 | 2,4 | 4,0 | 50 | 99 | 0,00026 | 0,00052 | 65 | 130 | 0,00031 | 0,00062 | B | F | |
| 15 | 1,5 * zyk.Bel. = | 234 | 117 | 2,6 | 4,3 | 53 | 106 | 0,00028 | 0,00056 | 70 | 139 | 0,00033 | 0,00066 | B | G | |
| 16 | 1,6 * zyk.Bel. = | 250 | 125 | 2,8 | 4,6 | 57 | 113 | 0,00030 | 0,00060 | 74 | 148 | 0,00035 | 0,00071 | B | G | |
| 17 | 1,7 * zyk.Bel. = | 266 | 133 | 3,0 | 4,9 | 60 | 120 | 0,00032 | 0,00063 | 79 | 157 | 0,00037 | 0,00075 | B | G | |
| 18 | 1,8 * zyk.Bel. = | 281 | 141 | 3,2 | 5,2 | 64 | 127 | 0,00033 | 0,00067 | 83 | 166 | 0,00040 | 0,00079 | B | G | |
| 19 | 1,9 * zyk.Bel. = | 297 | 148 | 3,3 | 5,4 | 67 | 134 | 0,00035 | 0,00070 | 88 | 176 | 0,00042 | 0,00084 | B | G | |
| 20 | 2,0 * zyk.Bel. = | 313 | 156 | 3,5 | 5,7 | 70 | 141 | 0,00037 | 0,00073 | 92 | 185 | 0,00044 | 0,00088 | B | G | |
| 21 | 2,1 * zyk.Bel. = | 328 | 164 | 3,7 | 5,9 | 74 | 148 | 0,00038 | 0,00077 | 97 | 194 | 0,00046 | 0,00092 | B | G | |
| 22 | 2,2 * zyk.Bel. = | 344 | 172 | 3,9 | 6,2 | 77 | 155 | 0,00040 | 0,00080 | 101 | 202 | 0,00048 | 0,00096 | B | F | |
| 23 | 2,3 * zyk.Bel. = | 359 | 180 | 4,1 | 6,5 | 81 | 162 | 0,00042 | 0,00085 | 105 | 209 | 0,00050 | 0,00100 | B | F | |
| 24 | 2,4 * zyk.Bel. = | 375 | 188 | 4,3 | 6,7 | 85 | 169 | 0,00044 | 0,00089 | 109 | 217 | 0,00052 | 0,00104 | B | F | |
| 25 | 2,5 * zyk.Bel. = | 391 | 195 | 4,5 | 7,0 | 88 | 177 | 0,00046 | 0,00093 | 112 | 225 | 0,00054 | 0,00108 | B | H | |
| 26 | 2,6 * zyk.Bel. = | 406 | 203 | 4,7 | 7,3 | 91 | 182 | 0,00048 | 0,00097 | 116 | 233 | 0,00056 | 0,00112 | B | H | |
| 27 | 2,7 * zyk.Bel. = | 422 | 211 | 4,9 | 7,6 | 94 | 188 | 0,00050 | 0,00101 | 120 | 240 | 0,00058 | 0,00116 | B | H | |
| 28 | 2,8 * zyk.Bel. = | 438 | 219 | 5,1 | 7,9 | 97 | 194 | 0,00052 | 0,00105 | 124 | 248 | 0,00060 | 0,00120 | B | H | |
| 29 | 2,9 * zyk.Bel. = | 453 | 227 | 5,4 | 8,2 | 100 | 200 | 0,00054 | 0,00109 | 128 | 256 | 0,00062 | 0,00124 | B | H | |
| 30 | 3,0 * zyk.Bel. = | 469 | 234 | 5,6 | 8,5 | 102 | 205 | 0,00056 | 0,00112 | 132 | 263 | 0,00064 | 0,00128 | B | H | |
| 31 | 3,1 * zyk.Bel. = | 484 | 242 | 5,8 | 8,8 | 105 | 210 | 0,00058 | 0,00116 | 136 | 271 | 0,00066 | 0,00132 | B | H | |
| 32 | 3,2 * zyk.Bel. = | 500 | 250 | 6,0 | 9,1 | 106 | 213 | 0,00051 | 0,00103 | 139 | 279 | 0,00068 | 0,00136 | E | H | |
| 33 | 3,3 * zyk.Bel. = | 516 | 258 | 6,2 | 9,4 | 113 | 225 | 0,00055 | 0,00109 | 143 | 286 | 0,00070 | 0,00140 | E | H | |
| 34 | 3,4 * zyk.Bel. = | 531 | 266 | 6,4 | 9,6 | 119 | 238 | 0,00058 | 0,00116 | 147 | 294 | 0,00072 | 0,00144 | E | H | |
| 35 | 3,5 * zyk.Bel. = | 547 | 273 | 6,6 | 9,9 | 125 | 250 | 0,00062 | 0,00123 | 151 | 301 | 0,00074 | 0,00148 | E | H | |
| 36 | 3,6 * zyk.Bel. = | 563 | 281 | 6,8 | 10,2 | 130 | 261 | 0,00065 | 0,00129 | 154 | 308 | 0,00076 | 0,00152 | E | H | |
| 37 | 3,7 * zyk.Bel. = | 578 | 289 | 7,0 | 10,4 | 135 | 270 | 0,00068 | 0,00135 | 158 | 315 | 0,00078 | 0,00156 | E | H | |
| 38 | 3,8 * zyk.Bel. = | 594 | 297 | 7,2 | 10,7 | 140 | 279 | 0,00070 | 0,00141 | 161 | 323 | 0,00080 | 0,00160 | E | H | |
| 39 | 3,9 * zyk.Bel. = | 609 | 305 | 7,4 | 10,9 | 144 | 289 | 0,00073 | 0,00146 | 165 | 330 | 0,00082 | 0,00164 | E | H | |
| 40 | 4,0 * zyk.Bel. = | 625 | 313 | 7,7 | 11,2 | 149 | 298 | 0,00076 | 0,00153 | 168 | 336 | 0,00084 | 0,00168 | E | H | |
| 41 | 4,1 * zyk.Bel. = | 641 | 320 | 7,9 | 11,6 | 153 | 307 | 0,00080 | 0,00159 | 171 | 343 | 0,00086 | 0,00172 | E | H | |
| 42 | 4,2 * zyk.Bel. = | 656 | 328 | 8,1 | 11,9 | 158 | 315 | 0,00083 | 0,00166 | 175 | 349 | 0,00088 | 0,00176 | E | H | |
| 43 | 4,3 * zyk.Bel. = | 672 | 336 | 8,3 | 12,2 | 162 | 323 | 0,00085 | 0,00170 | 177 | 355 | 0,00090 | 0,00179 | E | H | |
| 44 | 4,4 * zyk.Bel. = | 688 | 344 | 8,5 | 12,5 | 165 | 331 | 0,00087 | 0,00174 | 180 | 359 | 0,00091 | 0,00183 | E | H | |
| 45 | 4,5 * zyk.Bel. = | 703 | 352 | 8,8 | 12,7 | 169 | 338 | 0,00089 | 0,00178 | 182 | 364 | 0,00093 | 0,00186 | E | H | |
| 46 | 4,6 * zyk.Bel. = | 719 | 359 | 9,0 | 13,0 | 173 | 345 | 0,00091 | 0,00182 | 184 | 368 | 0,00095 | 0,00189 | E | I | |
| 47 | 4,7 * zyk.Bel. = | 734 | 367 | 9,2 | 13,3 | 176 | 352 | 0,00094 | 0,00188 | 187 | 373 | 0,00096 | 0,00193 | E | H | |
| 48 | 4,8 * zyk.Bel. = | 750 | 375 | 9,4 | 13,6 | 179 | 358 | 0,00097 | 0,00193 | 189 | 378 | 0,00098 | 0,00196 | E | H | |
| 49 | 4,9 * zyk.Bel. = | 766 | 383 | 9,6 | 13,8 | 182 | 364 | 0,00099 | 0,00199 | 192 | 383 | 0,00100 | 0,00200 | E | H | |
| 50 | 5,0 * zyk.Bel. = | 781 | 391 | 9,8 | 14,1 | 185 | 371 | 0,00102 | 0,00205 | 194 | 388 | 0,00102 | 0,00204 | E | H | |

| Schwingspiele | Bestimmung der Umkehrpunkte der Hystereschleifen anhand der Erstbelastungspfad: Schritt 2: Ermittlung der Amplitudenwerte mittels lineare Interpolation. Schritt 3: Verdopplung -> Schwingbreitewerte (Numerische (und nicht analytische) Auswertung des örtlichen Spannungs-Dehnungspfad) | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---|----------------------|-----------------|--|--|----------------------------|------------------------------|--|--|----------------------------|------------------------------|--|--|--|
| | Schwingspiele | | | | | | | | | | | | | |
| | Faktor | ΔP [kN/m] | P_a [kN/m] | $\sigma_{1,a}$ [N/mm ²] | $\Delta\sigma_1$ [N/mm ²] | $\varepsilon_{1,a}$ [-] | $\Delta\varepsilon_1$ [-] | $\sigma_{V,a}$ [N/mm ²] | $\Delta\sigma_V$ [N/mm ²] | $\varepsilon_{V,a}$ [-] | $\Delta\varepsilon_V$ [-] | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0,0 * zyk.Bel. = | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00000 | 0,00000 | 0 | 0 | 0,00000 | 0,00000 | | | |
| 1 | 0,1 * zyk.Bel. = | 16 | 8 | 3 | 7 | 0,00002 | 0,00004 | 5 | 9 | 0,00002 | 0,00004 | | | |
| 2 | 0,2 * zyk.Bel. = | 31 | 16 | 7 | 13 | 0,00004 | 0,00007 | 9 | 18 | 0,00004 | 0,00009 | | | |
| 3 | 0,3 * zyk.Bel. = | 47 | 23 | 10 | 20 | 0,00005 | 0,00011 | 14 | 28 | 0,00007 | 0,00013 | | | |
| 4 | 0,4 * zyk.Bel. = | 63 | 31 | 13 | 26 | 0,00007 | 0,00015 | 18 | 37 | 0,00009 | 0,00018 | | | |
| 5 | 0,5 * zyk.Bel. = | 78 | 39 | 17 | 33 | 0,00009 | 0,00018 | 23 | 46 | 0,00011 | 0,00022 | | | |
| 6 | 0,6 * zyk.Bel. = | 94 | 47 | 20 | 40 | 0,00011 | 0,00022 | 28 | 56 | 0,00013 | 0,00027 | | | |
| 7 | 0,7 * zyk.Bel. = | 109 | 55 | 24 | 47 | 0,00013 | 0,00026 | 33 | 65 | 0,00016 | 0,00031 | | | |
| 8 | 0,8 * zyk.Bel. = | 125 | 63 | 27 | 54 | 0,00015 | 0,00029 | 37 | 74 | 0,00018 | 0,00035 | | | |
| 9 | 0,9 * zyk.Bel. = | 141 | 70 | 30 | 61 | 0,00016 | 0,00033 | 42 | 83 | 0,00020 | 0,00040 | | | |
| 10 | 1,0 * zyk.Bel. = | 156 | 78 | 34 | 68 | 0,00018 | 0,00037 | 46 | 92 | 0,00022 | 0,00044 | | | |
| 11 | 1,1 * zyk.Bel. = | 172 | 86 | 37 | 74 | 0,00020 | 0,00039 | 51 | 101 | 0,00024 | 0,00048 | | | |
| 12 | 1,2 * zyk.Bel. = | 188 | 94 | 41 | 82 | 0,00021 | 0,00043 | 55 | 111 | 0,00026 | 0,00053 | | | |
| 13 | 1,3 * zyk.Bel. = | 203 | 102 | 44 | 89 | 0,00023 | 0,00047 | 60 | 120 | 0,00029 | 0,00057 | | | |
| 14 | 1,4 * zyk.Bel. = | 219 | 109 | 48 | 96 | 0,00025 | 0,00050 | 65 | 130 | 0,00031 | 0,00062 | | | |
| 15 | 1,5 * zyk.Bel. = | 234 | 117 | 51 | 103 | 0,00027 | 0,00054 | 70 | 139 | 0,00033 | 0,00066 | | | |
| 16 | 1,6 * zyk.Bel. = | 250 | 125 | 55 | 110 | 0,00029 | 0,00057 | 74 | 148 | 0,00035 | 0,00071 | | | |
| 17 | 1,7 * zyk.Bel. = | 266 | 133 | 58 | 117 | 0,00031 | 0,00061 | 79 | 157 | 0,00037 | 0,00075 | | | |
| 18 | 1,8 * zyk.Bel. = | 281 | 141 | 62 | 124 | 0,00032 | 0,00065 | 83 | 166 | 0,00040 | 0,00079 | | | |
| 19 | 1,9 * zyk.Bel. = | 297 | 148 | 65 | 130 | 0,00034 | 0,00068 | 88 | 175 | 0,00042 | 0,00084 | | | |
| 20 | 2,0 * zyk.Bel. = | 313 | 156 | 69 | 137 | 0,00036 | 0,00072 | 92 | 185 | 0,00044 | 0,00088 | | | |
| 21 | 2,1 * zyk.Bel. = | 328 | 164 | 72 | 144 | 0,00038 | 0,00075 | 97 | 194 | 0,00046 | 0,00092 | | | |
| 22 | 2,2 * zyk.Bel. = | 344 | 172 | 76 | 152 | 0,00040 | 0,00079 | 101 | 202 | 0,00048 | 0,00096 | | | |
| 23 | 2,3 * zyk.Bel. = | 359 | 180 | 79 | 159 | 0,00041 | 0,00083 | 105 | 209 | 0,00050 | 0,00100 | | | |
| 24 | 2,4 * zyk.Bel. = | 375 | 188 | 83 | 166 | 0,00043 | 0,00087 | 109 | 217 | 0,00052 | 0,00104 | | | |
| 25 | 2,5 * zyk.Bel. = | 391 | 195 | 87 | 174 | 0,00045 | 0,00091 | 113 | 225 | 0,00054 | 0,00108 | | | |
| 26 | 2,6 * zyk.Bel. = | 406 | 203 | 90 | 180 | 0,00047 | 0,00094 | 116 | 233 | 0,00056 | 0,00112 | | | |
| 27 | 2,7 * zyk.Bel. = | 422 | 211 | 93 | 187 | 0,00049 | 0,00098 | 120 | 240 | 0,00058 | 0,00116 | | | |
| 28 | 2,8 * zyk.Bel. = | 438 | 219 | 97 | 193 | 0,00051 | 0,00102 | 124 | 248 | 0,00060 | 0,00120 | | | |
| 29 | 2,9 * zyk.Bel. = | 453 | 227 | 100 | 199 | 0,00053 | 0,00106 | 128 | 256 | 0,00062</ | | | | |

| Berücksichtigung der Mittelspannung: Ermittlung der Ober-, Mittel- und Unterspannungswerte und die dazugehörige Dehnungswerte unter der ständigen Belastung + Verkehrslast | | | | | | | | | | | | | | | | | Schädigungsbewertung | | | |
|--|-------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|------------|-------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------|--------------|--------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Oberspannungswerte: Werte unter die gesamte Verkehrslast anhand der zyklischen Teile der Erstbelastungskurve + die Werte aus der ständige Belastung, die im jeweiligen kritischen Element entstanden sind. | | | | | | | | | | | | | | | | | Berücksichtigung der Mittelspannung | | | |
| (praktisch die Wiedervereinigung der ständigen und der zyklischen Teil der Kurve) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelspannungswerte: Von den Oberspannungswerte sind die Werte unter der Belastungsamplitude infolge Verkehrslast abzuziehen. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Unterspannungswerte: Von den Mittelspannungswerte sind die Werte unter der Belastungsamplitude infolge Verkehrslast abzuziehen. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Unterlast | Verschiebung | Hauptzugspannung | Hauptzugdehnung | Vergleichspannung | Vergleichdehnung | Mittellast | Verschiebung | Hauptzugspannung | Hauptzugdehnung | Vergleichspannung | Vergleichdehnung | Oberlast | Verschiebung | Zeitdauer | Hauptzugspannung | Hauptzugdehnung | Vergleichspannung | Vergleichdehnung | Schädigungsparameter | Schädigungsparameter |
| | infolge Unterlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | Mittellast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | Oberlast | Oberlast | bis Oberlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | infolge Unterlast | | |
| P_u | u_u | $\sigma_{1,u}$ | $\varepsilon_{1,u}$ | $\sigma_{V,u}$ | $\varepsilon_{V,u}$ | P_m | u_m | $\sigma_{1,m}$ | $\varepsilon_{1,m}$ | $\sigma_{V,m}$ | $\varepsilon_{V,m}$ | P_o | u_o | t_o | $\sigma_{1,o}$ | $\varepsilon_{1,o}$ | $\sigma_{V,o}$ | $\varepsilon_{V,o}$ | $P_{SWT,mod,e1}$ | $P_{SWT,mod,eV}$ |
| [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [\cdot] | [N/mm ²] | [\cdot] | [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [\cdot] | [N/mm ²] | [\cdot] | [kN/m] | [mm] | [sec] | [N/mm ²] | [\cdot] | [N/mm ²] | [\cdot] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 81 | 1,3 | 29 | 0,00014 | 40 | 0,00019 | 81 | 1,3 | 29 | 0,00014 | 40 | 0,00019 | 81 | 1,3 | 5,0 | 29 | 0,00014 | 40 | 0,00019 | | |
| 81 | 1,3 | 29 | 0,00015 | 40 | 0,00019 | 89 | 1,4 | 32 | 0,00016 | 44 | 0,00021 | 97 | 1,6 | 5,6 | 36 | 0,00018 | 49 | 0,00023 | 12 | 15 |
| 81 | 1,3 | 29 | 0,00015 | 39 | 0,00019 | 97 | 1,6 | 36 | 0,00018 | 48 | 0,00023 | 112 | 1,9 | 6,1 | 43 | 0,00022 | 57 | 0,00027 | 19 | 23 |
| 81 | 1,3 | 29 | 0,00015 | 39 | 0,00019 | 105 | 1,8 | 40 | 0,00020 | 53 | 0,00025 | 128 | 2,2 | 6,6 | 50 | 0,00026 | 67 | 0,00032 | 25 | 30 |
| 81 | 1,3 | 29 | 0,00014 | 39 | 0,00019 | 112 | 1,9 | 43 | 0,00022 | 58 | 0,00027 | 144 | 2,6 | 7,2 | 57 | 0,00030 | 76 | 0,00036 | 30 | 37 |
| 81 | 1,3 | 29 | 0,00014 | 39 | 0,00018 | 120 | 2,1 | 46 | 0,00024 | 62 | 0,00029 | 159 | 2,9 | 7,7 | 64 | 0,00033 | 85 | 0,00041 | 36 | 44 |
| 81 | 1,3 | 28 | 0,00014 | 38 | 0,00018 | 128 | 2,3 | 50 | 0,00025 | 66 | 0,00032 | 175 | 3,3 | 8,3 | 71 | 0,00037 | 94 | 0,00045 | 41 | 51 |
| 81 | 1,4 | 28 | 0,00014 | 39 | 0,00018 | 136 | 2,5 | 53 | 0,00027 | 71 | 0,00034 | 190 | 3,7 | 9,0 | 78 | 0,00041 | 104 | 0,00049 | 47 | 58 |
| 81 | 1,4 | 28 | 0,00014 | 39 | 0,00018 | 144 | 2,7 | 57 | 0,00029 | 76 | 0,00036 | 206 | 4,0 | 9,6 | 85 | 0,00044 | 113 | 0,00054 | 52 | 65 |
| 81 | 1,4 | 29 | 0,00014 | 39 | 0,00018 | 151 | 2,9 | 60 | 0,00031 | 80 | 0,00038 | 222 | 4,4 | 10,2 | 92 | 0,00048 | 122 | 0,00058 | 57 | 71 |
| 81 | 1,5 | 29 | 0,00014 | 39 | 0,00018 | 159 | 3,1 | 64 | 0,00033 | 85 | 0,00040 | 237 | 4,8 | 10,7 | 99 | 0,00051 | 131 | 0,00062 | 62 | 78 |
| 81 | 1,5 | 29 | 0,00014 | 38 | 0,00018 | 167 | 3,4 | 67 | 0,00035 | 89 | 0,00042 | 253 | 5,2 | 11,2 | 106 | 0,00055 | 140 | 0,00067 | 67 | 84 |
| 81 | 1,6 | 29 | 0,00014 | 37 | 0,00018 | 175 | 3,6 | 71 | 0,00037 | 92 | 0,00044 | 269 | 5,6 | 11,7 | 113 | 0,00059 | 147 | 0,00071 | 73 | 90 |
| 81 | 1,6 | 28 | 0,00015 | 35 | 0,00017 | 183 | 3,8 | 74 | 0,00039 | 95 | 0,00046 | 284 | 6,0 | 12,3 | 120 | 0,00063 | 155 | 0,00075 | 78 | 97 |
| 81 | 1,6 | 27 | 0,00015 | 33 | 0,00017 | 190 | 4,0 | 76 | 0,00041 | 98 | 0,00048 | 300 | 6,4 | 12,9 | 126 | 0,00067 | 163 | 0,00079 | 83 | 103 |
| 81 | 1,7 | 25 | 0,00015 | 31 | 0,00016 | 198 | 4,2 | 78 | 0,00043 | 101 | 0,00049 | 315 | 6,8 | 13,5 | 131 | 0,00071 | 170 | 0,00082 | 88 | 109 |
| 81 | 1,7 | 23 | 0,00015 | 29 | 0,00016 | 206 | 4,5 | 80 | 0,00045 | 103 | 0,00051 | 331 | 7,2 | 14,1 | 137 | 0,00074 | 177 | 0,00086 | 92 | 115 |
| 81 | 1,7 | 22 | 0,00015 | 27 | 0,00015 | 214 | 4,7 | 82 | 0,00047 | 106 | 0,00053 | 347 | 7,7 | 14,6 | 142 | 0,00078 | 184 | 0,00090 | 97 | 120 |
| 81 | 1,8 | 20 | 0,00016 | 25 | 0,00015 | 222 | 4,9 | 84 | 0,00049 | 108 | 0,00054 | 362 | 8,1 | 15,2 | 148 | 0,00082 | 191 | 0,00094 | 102 | 126 |
| 81 | 1,8 | 19 | 0,00017 | 22 | 0,00014 | 230 | 5,2 | 86 | 0,00052 | 110 | 0,00056 | 378 | 8,5 | 15,7 | 153 | 0,00087 | 198 | 0,00097 | 106 | 132 |
| 81 | 1,9 | 18 | 0,00018 | 20 | 0,00013 | 237 | 5,4 | 88 | 0,00055 | 112 | 0,00057 | 394 | 8,9 | 16,2 | 159 | 0,00091 | 204 | 0,00101 | 110 | 137 |
| 81 | 1,9 | 16 | 0,00019 | 17 | 0,00013 | 245 | 5,7 | 90 | 0,00057 | 113 | 0,00059 | 409 | 9,4 | 16,9 | 164 | 0,00096 | 210 | 0,00105 | 115 | 143 |
| 81 | 2,0 | 14 | 0,00020 | 13 | 0,00012 | 253 | 5,9 | 92 | 0,00060 | 114 | 0,00060 | 425 | 9,8 | 17,5 | 169 | 0,00100 | 215 | 0,00108 | 120 | 147 |
| 81 | 2,0 | 12 | 0,00021 | 10 | 0,00011 | 261 | 6,1 | 93 | 0,00063 | 114 | 0,00061 | 440 | 10,2 | 18,0 | 174 | 0,00105 | 219 | 0,00111 | 124 | 152 |
| 81 | 2,0 | 8 | 0,00021 | 6 | 0,00010 | 269 | 6,3 | 93 | 0,00066 | 115 | 0,00062 | 456 | 10,7 | 18,6 | 177 | 0,00110 | 224 | 0,00114 | 128 | 157 |
| 81 | 2,0 | 4 | 0,00022 | 5 | 0,00011 | 276 | 6,5 | 92 | 0,00068 | 117 | 0,00065 | 472 | 11,1 | 19,1 | 180 | 0,00115 | 230 | 0,00119 | 132 | 161 |
| 81 | 2,0 | 1 | 0,00023 | 2 | 0,00010 | 284 | 6,8 | 92 | 0,00072 | 119 | 0,00066 | 487 | 11,5 | 19,7 | 183 | 0,00120 | 235 | 0,00122 | 136 | 166 |
| 81 | 2,1 | -2 | 0,00024 | 0 | 0,00010 | 292 | 7,0 | 92 | 0,00075 | 120 | 0,00068 | 503 | 11,9 | 20,2 | 186 | 0,00125 | 240 | 0,00126 | 140 | 171 |
| 81 | 2,1 | -5 | 0,00025 | -2 | 0,00010 | 300 | 7,2 | 92 | 0,00077 | 121 | 0,00070 | 519 | 12,4 | 20,8 | 189 | 0,00130 | 245 | 0,00130 | 144 | 176 |
| 81 | 2,1 | -7 | 0,00026 | -5 | 0,00010 | 308 | 7,4 | 93 | 0,00080 | 123 | 0,00072 | 534 | 12,8 | 21,4 | 192 | 0,00135 | 250 | 0,00134 | 148 | 181 |
| 81 | 2,1 | -9 | 0,00028 | -8 | 0,00010 | 315 | 7,7 | 94 | 0,00084 | 124 | 0,00074 | 550 | 13,2 | 22,0 | 196 | 0,00140 | 255 | 0,00138 | 152 | 185 |
| 81 | 2,1 | -10 | 0,00030 | -13 | 0,00009 | 323 | 7,9 | 95 | 0,00088 | 123 | 0,00075 | 565 | 13,7 | 22,5 | 200 | 0,00146 | 258 | 0,00141 | 156 | 189 |
| 81 | 2,2 | 28 | 0,00053 | -18 | 0,00009 | 331 | 8,1 | 135 | 0,00104 | 122 | 0,00077 | 581 | 14,1 | 23,1 | 241 | 0,00155 | 261 | 0,00145 | 161 | 193 |
| 81 | 2,2 | 21 | 0,00052 | -22 | 0,00009 | 339 | 8,4 | 133 | 0,00107 | 121 | 0,00079 | 597 | 14,6 | 23,7 | 246 | 0,00162 | 264 | 0,00149 | 168 | 197 |
| 81 | 2,2 | 13 | 0,00053 | -26 | 0,00009 | 347 | 8,6 | 132 | 0,00111 | 120 | 0,00081 | 612 | 15,0 | 24,2 | 251 | 0,00169 | 267 | 0,00153 | 175 | 201 |
| 81 | 2,2 | 4 | 0,00053 | -31 | 0,00009 | 355 | 8,8 | 129 | 0,00115 | 120 | 0,00083 | 628 | 15,4 | 24,8 | 254 | 0,00177 | 271 | 0,00157 | 181 | 205 |
| 81 | 2,3 | -3 | 0,00056 | -34 | 0,00009 | 362 | 9,1 | 127 | 0,00120 | 120 | 0,00085 | 644 | 15,9 | 25,3 | 258 | 0,00185 | 274 | 0,00161 | 187 | 209 |
| 81 | 2,3 | -9 | 0,00059 | -37 | 0,00010 | 370 | 9,4 | 126 | 0,00127 | 120 | 0,00088 | 659 | 16,4 | 25,9 | 261 | 0,00194 | 278 | 0,00166 | 193 | 213 |
| 81 | 2,4 | -15 | 0,00062 | -41 | 0,00010 | 378 | 9,6 | 125 | 0,00132 | 120 | 0,00090 | 675 | 16,8 | 26,5 | 264 | 0,00202 | 282 | 0,00170 | 198 | 217 |
| 81 | 2,4 | -22 | 0,00064 | -44 | 0,00011 | 386 | 9,8 | 123 | 0,00138 | 120 | 0,00093 | 690 | 17,3 | 27,1 | 267 | 0,00211 | 285 | 0,00175 | 203 | 222 |
| 81 | 2,4 | -28 | 0,00067 | -47 | 0,00011 | 394 | 10,1 | 121 | 0,00144 | 121 | 0,00095 | 706 | 17,8 | 27,6 | 270 | 0,00220 | 289 | 0,00179 | 208 | 226 |
| 81 | 2,4 | -33 | 0,00070 | -50 | 0,00012 | 401 | 10,3 | 120 | 0,00150 | 121 | 0,00098 | 722 | 18,2 | 28,2 | 273 | 0,00229 | 293 | 0,00184 | 214 | 230 |
| 81 | 2,5 | -39 | 0,00074 | -53 | 0,00013 | 409 | 10,6 | 119 | 0,00156 | 122 | 0,00101 | 737 | 18,7 | 28,7 | 276 | 0,00239 | 297 | 0,00189 | 219 | 234 |
| 81 | 2,5 | -44 | 0,00079 | -54 | 0,00015 | 417 | 10,9 | 118 | 0,00164 | 124 | 0,00105 | 753 | 19,2 | 29,2 | 279 | 0,00249 | 301 | 0,00195 | 224 | 238 |
| 81 | 2,6 | -48 | 0,00085 | -53 | 0,00018 | 425 | 11,2 | 117 | 0,00172 | 126 | 0,00109 | 769 | 19,7 | 29,7 | 283 | 0,00260 | 306 | 0,00201 | 228 | 242 |
| 81 | 2,7 | -52 | 0,00091 | -54 | 0,00021 | 433 | 11,5 | 117 | 0,00180 | 128 | 0,00114 | 784 | 20,2 | 30,4 | 286 | 0,00269 | 310 | 0,00206 | 231 | 246 |
| 81 | 2,8 | -55 | 0,00097 | -55 | 0,00024 | 440 | 11,8 | 117 | 0,00188 | 129 | 0,00118 | 800 | 20,8 | 31,1 | 290 | 0,00279 | 313 | 0,00213 | 236 | 249 |
| 81 | 2,9 | -58 | 0,00102 | -59 | 0,00025 | 448 | 12,1 | 117 | 0,00196 | 128 | 0,00122 | 815 | 21,3 | 31,6 | 293 | 0,00290 | 314 | 0,00218 | 240 | 252 |
| 81 | 3,0 | -61 | 0,00108 | -62 | 0,00027 | 456 | 12,4 | 118 | 0,00204 | 127 | 0,00126 | 831 | 21,8 | 32,1 | 297 | 0,00301 | 316 | 0,00224 | 245 | 255 |
| 81 | 3,1 | -64 | 0,00114 | -65 | 0,00030 | 464 | 12,7 | 118 | 0,00213 | 127 | 0,00130 | 847 | 22,3 | 32,6 | 300 | 0,00312 | 318 | 0,00230 | 250 | 259 |
| 81 | 3,2 | -67 | 0,00119 | -68 | 0,00033 | 472 | 13,0 | 119 | 0,00222 | 126 | 0,00135 | 862 | 22,8 | 33,1 | 304 | 0,00324 | 320 | 0,00237 | 256 | 262 |

| Berücksichtigung der Mittelspannung: Ermittlung der Ober-, Mittel- und Unterspannungswerte und die dazugehörige Dehnungswerte unter der ständigen Belastung + Verkehrslast | | | | | | | | | | | | | | | | | Schädigungsbewertung | |
|--|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|--|
| Oberspannungswerte: Werte unter die gesamte Verkehrslast anhand der zyklischen Teile der Erstbelastungskurve + die Werte aus der ständige Belastung, die im jeweiligen kritischen Element entstanden sind. | | | | | | | | | | | | | | | | | Berücksichtigung der Mittelspannung | |
| (praktisch die Wiedervereinigung der ständigen und der zyklischen Teil der Kurve) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittelspannungswerte: Von den Oberspannungswerte sind die Werte unter der Belastungsamplitude infolge Verkehrslast abzuziehen. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P_u | $\sigma_{1,u}$ | $\varepsilon_{1,u}$ | $\sigma_{V,u}$ | $\varepsilon_{V,u}$ | P_m | $\sigma_{1,m}$ | $\varepsilon_{1,m}$ | $\sigma_{V,m}$ | $\varepsilon_{V,m}$ | P_o | $\sigma_{1,o}$ | $\varepsilon_{1,o}$ | $\sigma_{V,o}$ | $\varepsilon_{V,o}$ | $P_{SWT,mod,e1}$ | $P_{SWT,mod,eV}$ | | |
| [kN/m] | [N/mm ²] | [\cdot] | [N/mm ²] | [\cdot] | [kN/m] | [N/mm ²] | [\cdot] | [N/mm ²] | [\cdot] | [kN/m] | [N/mm ²] | [\cdot] | [N/mm ²] | [\cdot] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | | |
| 81 | 27 | 0,00013 | 39 | 0,00019 | 81 | 27 | 0,00013 | 39 | 0,00019 | 81 | 27 | 0,00013 | 39 | 0,00019 | | | | |
| 81 | 27 | 0,00013 | 39 | 0,00019 | 89 | 31 | 0,00015 | 43 | 0,00021 | 97 | 34 | 0,00017 | 48 | 0,00023 | 11 | 15 | | |
| 81 | 27 | 0,00013 | 39 | 0,00019 | 97 | 34 | 0,00017 | 48 | 0,00023 | 112 | 41 | 0,00020 | 57 | | | | | |

| Lebensdauer: Schwingspielzahl bis zum Anriss | | | | | | | | Lebensdauer: Schwingspielzahl bis zum Anriss unter Berücksichtigung des widerstandseitigen Teilsicherheitsbeiwertes: $\gamma_{M,F}$ | | | | | |
|---|----------|---|---------------|---|-----------------|---|------------------------|--|-------------------------------------|--|--|---|---|
| Mittelspannungseinfluss Oberflächenrauigkeit $P_a=50\%$ $\gamma_{M,F}$ | | Mittelspannungseinfluss Oberflächenrauigkeit $P_a=50\%$ $\gamma_{M,F}$ | | Mittelspannungseinfluss Oberflächenrauigkeit $P_a=50\%$ $\gamma_{M,F}$ | | Mittelspannungseinfluss Oberflächenrauigkeit $P_a=97,5\%$ $\gamma_{M,F}$ | | Mittelspannungseinfluss Oberflächenrauigkeit $P_a=97,5\%$ $\gamma_{M,F}$ | | Mit $\gamma_{M,F}$ dividierte Hauptzug- spannungs- ... | Mit $\gamma_{M,F}$ dividierte Vergleichs- spannungs- ... | Zu $\Delta\sigma_{1,\gamma_{M,F}}$ gehörende Last- schwingbreite | Zu $\Delta\sigma_{V,\gamma_{M,F}}$ gehörende Last- schwingbreite |
| N_{01} | N_{0V} | $N_{PSWT,01}$ | $N_{PSWT,0V}$ | $N_{PSWT,0,01}$ | $N_{PSWT,0,0V}$ | $N_{PSWT,0,P097,5,01}$ | $N_{PSWT,0,P097,5,0V}$ | $N_{PSWT,0,P097,5,\gamma_{M,F},01}$ | $N_{PSWT,0,P097,5,\gamma_{M,F},0V}$ | $\Delta\sigma_{1,\gamma_{M,F}}$ | $\Delta\sigma_{V,\gamma_{M,F}}$ | $\Delta P_{01,\gamma_{M,F}}$ | $\Delta P_{0V,\gamma_{M,F}}$ |
| [] | [] | [] | [] | [] | [] | [] | [] | [] | [] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [kN/m] | [kN/m] |
| 1,7E+26 | 1,0E+25 | 1,8E+20 | 1,4E+19 | 1,4E+19 | 1,1E+18 | 2,7E+17 | 2,2E+16 | 2,7E+17 | 2,2E+16 | 5 | 7 | 12 | 12 |
| 5,8E+22 | 3,6E+21 | 1,2E+18 | 9,9E+16 | 9,9E+16 | 9,1E+16 | 7,6E+15 | 1,8E+15 | 1,8E+15 | 1,5E+14 | 11 | 14 | 23 | 23 |
| 5,0E+20 | 3,4E+19 | 4,7E+16 | 4,0E+15 | 3,6E+15 | 3,1E+14 | 7,1E+13 | 6,0E+12 | 7,1E+13 | 6,0E+12 | 16 | 20 | 35 | 35 |
| 2,0E+19 | 1,2E+18 | 4,2E+15 | 3,6E+14 | 3,3E+14 | 2,8E+13 | 6,4E+12 | 5,4E+11 | 6,4E+12 | 5,4E+11 | 21 | 27 | 46 | 46 |
| 1,5E+18 | 8,9E+16 | 6,2E+14 | 5,1E+13 | 4,8E+13 | 3,9E+12 | 9,3E+11 | 7,7E+10 | 9,3E+11 | 7,7E+10 | 26 | 34 | 58 | 58 |
| 1,9E+17 | 1,1E+16 | 1,2E+14 | 9,7E+12 | 9,2E+12 | 7,5E+11 | 1,8E+11 | 1,5E+10 | 1,8E+11 | 1,5E+10 | 32 | 41 | 69 | 69 |
| 3,2E+16 | 1,8E+15 | 2,9E+13 | 2,3E+12 | 2,2E+12 | 1,8E+11 | 4,3E+10 | 3,5E+09 | 4,3E+10 | 3,5E+09 | 37 | 48 | 81 | 81 |
| 7,4E+15 | 3,9E+14 | 8,5E+12 | 6,6E+11 | 6,5E+11 | 5,1E+10 | 1,3E+10 | 1,0E+09 | 1,3E+10 | 1,0E+09 | 42 | 55 | 92 | 92 |
| 2,1E+15 | 1,1E+14 | 2,9E+12 | 2,2E+11 | 2,2E+11 | 1,7E+10 | 4,4E+09 | 3,5E+08 | 4,4E+09 | 3,5E+08 | 47 | 62 | 104 | 104 |
| 6,5E+14 | 3,2E+13 | 1,1E+12 | 8,1E+10 | 8,5E+10 | 6,3E+09 | 1,7E+09 | 1,3E+08 | 1,7E+09 | 1,3E+08 | 52 | 68 | 115 | 115 |
| 2,3E+14 | 1,1E+13 | 4,5E+11 | 3,3E+10 | 3,3E+10 | 2,6E+09 | 6,9E+08 | 5,6E+07 | 6,9E+08 | 5,6E+07 | 57 | 75 | 126 | 126 |
| 8,2E+13 | 4,0E+12 | 1,8E+11 | 1,4E+10 | 1,4E+10 | 1,1E+09 | 2,8E+08 | 2,6E+07 | 2,8E+08 | 2,6E+07 | 63 | 82 | 138 | 138 |
| 3,2E+13 | 1,5E+12 | 7,8E+10 | 6,8E+09 | 6,1E+09 | 4,5E+08 | 1,3E+08 | 1,3E+07 | 1,3E+08 | 1,3E+07 | 68 | 89 | 150 | 150 |
| 1,4E+13 | 6,4E+11 | 3,8E+10 | 3,4E+09 | 2,9E+09 | 2,7E+08 | 6,3E+07 | 6,8E+06 | 6,3E+07 | 6,8E+06 | 73 | 96 | 162 | 162 |
| 6,2E+12 | 2,9E+11 | 2,0E+10 | 1,8E+09 | 1,6E+09 | 1,4E+08 | 3,5E+07 | 4,0E+06 | 3,5E+07 | 4,0E+06 | 79 | 103 | 174 | 174 |
| 3,0E+12 | 1,4E+11 | 1,1E+10 | 9,6E+08 | 8,9E+08 | 7,9E+07 | 2,0E+07 | 2,4E+06 | 2,0E+07 | 2,4E+06 | 84 | 110 | 185 | 185 |
| 1,5E+12 | 7,1E+10 | 6,5E+09 | 5,5E+08 | 5,1E+08 | 4,7E+07 | 1,2E+07 | 1,5E+06 | 1,2E+07 | 1,5E+06 | 89 | 117 | 197 | 197 |
| 8,0E+11 | 3,7E+10 | 3,9E+09 | 3,3E+08 | 3,1E+08 | 2,8E+07 | 7,6E+06 | 9,7E+05 | 7,6E+06 | 9,7E+05 | 94 | 123 | 208 | 208 |
| 4,4E+11 | 2,0E+10 | 2,4E+09 | 2,0E+08 | 1,9E+08 | 1,6E+07 | 5,1E+06 | 7,0E+05 | 5,1E+06 | 7,0E+05 | 99 | 130 | 219 | 219 |
| 2,5E+11 | 1,1E+10 | 1,5E+09 | 1,3E+08 | 1,2E+08 | 1,1E+07 | 3,4E+06 | 5,2E+05 | 3,4E+06 | 5,2E+05 | 104 | 137 | 230 | 230 |
| 1,4E+11 | 6,5E+09 | 9,5E+08 | 8,3E+07 | 7,8E+07 | 6,4E+06 | 2,4E+06 | 3,9E+05 | 2,4E+06 | 3,9E+05 | 109 | 144 | 242 | 242 |
| 8,3E+10 | 4,1E+09 | 6,1E+08 | 5,9E+07 | 5,1E+07 | 5,7E+06 | 1,6E+06 | 3,1E+05 | 1,6E+06 | 3,1E+05 | 115 | 149 | 253 | 253 |
| 5,0E+10 | 2,6E+09 | 3,9E+08 | 4,3E+07 | 3,3E+07 | 4,3E+06 | 1,1E+06 | 2,5E+05 | 1,1E+06 | 2,5E+05 | 120 | 155 | 265 | 265 |
| 3,0E+10 | 1,7E+09 | 2,7E+08 | 3,1E+07 | 2,4E+07 | 3,2E+06 | 8,6E+05 | 2,0E+05 | 8,6E+05 | 2,0E+05 | 125 | 161 | 277 | 277 |
| 1,9E+10 | 1,2E+09 | 1,9E+08 | 2,2E+07 | 1,7E+07 | 2,4E+06 | 6,8E+05 | 1,6E+05 | 6,8E+05 | 1,6E+05 | 131 | 167 | 289 | 289 |
| 1,3E+10 | 8,0E+08 | 1,4E+08 | 1,6E+07 | 1,2E+07 | 1,8E+06 | 5,3E+05 | 1,3E+05 | 5,3E+05 | 1,3E+05 | 135 | 172 | 299 | 299 |
| 8,9E+09 | 5,5E+08 | 1,0E+08 | 1,2E+07 | 9,2E+06 | 1,4E+06 | 4,4E+05 | 1,0E+05 | 4,4E+05 | 1,0E+05 | 139 | 178 | 309 | 305 |
| 6,3E+09 | 3,8E+08 | 7,4E+07 | 9,0E+06 | 7,0E+06 | 1,1E+06 | 3,6E+05 | 8,8E+04 | 3,6E+05 | 8,8E+04 | 144 | 184 | 319 | 315 |
| 4,5E+09 | 2,7E+08 | 5,6E+07 | 7,0E+06 | 5,5E+06 | 8,6E+05 | 3,0E+05 | 7,6E+04 | 3,0E+05 | 7,6E+04 | 148 | 189 | 328 | 325 |
| 3,3E+09 | 1,9E+08 | 4,2E+07 | 5,4E+06 | 4,3E+06 | 7,1E+05 | 2,4E+05 | 6,7E+04 | 2,4E+05 | 6,7E+04 | 152 | 195 | 337 | 335 |
| 2,5E+09 | 1,4E+08 | 3,2E+07 | 4,4E+06 | 3,3E+06 | 6,1E+05 | 2,0E+05 | 6,0E+04 | 2,0E+05 | 6,0E+04 | 156 | 201 | 345 | 346 |
| 1,9E+09 | 9,9E+07 | 2,3E+07 | 3,6E+06 | 2,5E+06 | 3,6E+05 | 1,6E+05 | 5,3E+04 | 1,6E+05 | 5,3E+04 | 158 | 207 | 370 | 357 |
| 1,2E+09 | 7,3E+07 | 1,4E+07 | 3,0E+06 | 1,6E+06 | 4,5E+05 | 1,2E+05 | 4,8E+04 | 1,2E+05 | 4,8E+04 | 167 | 212 | 382 | 367 |
| 6,2E+08 | 5,4E+07 | 9,4E+06 | 2,5E+06 | 1,1E+06 | 3,9E+05 | 9,0E+04 | 4,3E+04 | 9,0E+04 | 4,3E+04 | 176 | 218 | 394 | 377 |
| 3,4E+08 | 4,1E+07 | 6,6E+06 | 2,1E+06 | 8,3E+05 | 3,3E+05 | 7,4E+04 | 3,9E+04 | 7,4E+04 | 3,9E+04 | 185 | 223 | 405 | 387 |
| 2,1E+08 | 3,1E+07 | 4,9E+06 | 1,7E+06 | 6,6E+05 | 2,9E+05 | 6,3E+04 | 3,5E+04 | 6,3E+04 | 3,5E+04 | 193 | 228 | 417 | 398 |
| 1,4E+08 | 2,4E+07 | 3,8E+06 | 1,4E+06 | 5,4E+05 | 2,5E+05 | 5,5E+04 | 3,2E+04 | 5,5E+04 | 3,2E+04 | 200 | 234 | 428 | 408 |
| 9,7E+07 | 1,9E+07 | 2,9E+06 | 1,2E+06 | 4,4E+05 | 2,2E+05 | 4,8E+04 | 2,9E+04 | 4,8E+04 | 2,9E+04 | 207 | 239 | 440 | 419 |
| 6,7E+07 | 1,5E+07 | 2,3E+06 | 9,9E+05 | 3,7E+05 | 1,9E+05 | 4,2E+04 | 2,6E+04 | 4,2E+04 | 2,6E+04 | 214 | 244 | 451 | 430 |
| 4,7E+07 | 1,2E+07 | 1,8E+06 | 8,7E+05 | 3,0E+05 | 1,7E+05 | 3,6E+04 | 2,4E+04 | 3,6E+04 | 2,4E+04 | 220 | 249 | 463 | 440 |
| 3,4E+07 | 9,2E+06 | 1,4E+06 | 7,5E+05 | 2,5E+05 | 1,4E+05 | 3,2E+04 | 2,2E+04 | 3,2E+04 | 2,2E+04 | 227 | 254 | 475 | 450 |
| 2,4E+07 | 7,4E+06 | 1,1E+06 | 6,6E+05 | 2,1E+05 | 1,3E+05 | 2,8E+04 | 2,0E+04 | 2,8E+04 | 2,0E+04 | 234 | 259 | 486 | 459 |
| 1,8E+07 | 6,3E+06 | 9,2E+05 | 5,8E+05 | 1,8E+05 | 1,1E+05 | 2,5E+04 | 1,8E+04 | 2,5E+04 | 1,8E+04 | 239 | 263 | 498 | 467 |
| 1,4E+07 | 5,4E+06 | 8,2E+05 | 5,1E+05 | 1,6E+05 | 9,9E+04 | 2,3E+04 | 1,6E+04 | 2,3E+04 | 1,6E+04 | 245 | 266 | 509 | 474 |
| 1,1E+07 | 4,7E+06 | 7,2E+05 | 4,6E+05 | 1,4E+05 | 9,1E+04 | 2,1E+04 | 1,5E+04 | 2,1E+04 | 1,5E+04 | 250 | 269 | 521 | 481 |
| 8,5E+06 | 4,1E+06 | 6,3E+05 | 4,2E+05 | 1,2E+05 | 8,5E+04 | 1,9E+04 | 1,4E+04 | 1,9E+04 | 1,4E+04 | 256 | 273 | 532 | 489 |
| 6,9E+06 | 3,5E+06 | 5,4E+05 | 3,8E+05 | 1,0E+05 | 7,5E+04 | 1,7E+04 | 1,3E+04 | 1,7E+04 | 1,3E+04 | 260 | 276 | 544 | 495 |
| 5,6E+06 | 3,0E+06 | 4,6E+05 | 3,5E+05 | 9,2E+04 | 7,0E+04 | 1,5E+04 | 1,2E+04 | 1,5E+04 | 1,2E+04 | 265 | 280 | 556 | 503 |
| 4,6E+06 | 2,6E+06 | 4,0E+05 | 3,2E+05 | 8,3E+04 | 7,5E+04 | 1,4E+04 | 1,2E+04 | 1,4E+04 | 1,2E+04 | 270 | 284 | 567 | 510 |
| 3,7E+06 | 2,2E+06 | 3,4E+05 | 2,9E+05 | 0,0E+00 | 6,6E+04 | 1,2E+04 | 1,1E+04 | 1,2E+04 | 1,1E+04 | 275 | 288 | 579 | 518 |

| Lebensdauer: Schwingspielzahl bis zum Anriss | | | | | | | | Lebensdauer: Schwingspielzahl bis zum Anriss unter Berücksichtigung des widerstandseitigen Teilsicherheitsbeiwertes: $\gamma_{M,F}$ | | | | | |
|---|----------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| N_{01} | N_{0V} | $N_{PSWT,01}$ | $N_{PSWT,0V}$ | $N_{PSWT,0,01}$ | $N_{PSWT,0,0V}$ | $N_{PSWT,0,P097,5,01}$ | $N_{PSWT,0,P097,5,0V}$ | $N_{PSWT,0,P097,5,\gamma_{M,F},01}$ | $N_{PSWT,0,P097,5,\gamma_{M,F},0V}$ | $\Delta\sigma_{1,\gamma_{M,F}}$ | $\Delta\sigma_{V,\gamma_{M,F}}$ | $\Delta P_{01,\gamma_{M,F}}$ | $\Delta P_{0V,\gamma_{M,F}}$ |
| [] | [] | [] | [] | [] | [] | [] | [] | [] | [] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [kN/m] | [kN/m] |
| 4,9E+26 | 1,0E+25 | 3,3E+20 | 1,5E+19 | 2,5E+19 | 1,1E+18 | 4,9E+17 | 2,2E+16 | 4,9E+17 | 2,2E+16 | 5 | 7 | 12 | 12 |
| 1,7E+23 | 3,6E+21 | 2,2E+18 | 9,9E+16 | 1,7E+17 | 7,6E+15 | 3,3E+15 | 1,5E+14 | 3,3E+15 | 1,5E+14 | 10 | 14 | 23 | 23 |
| 1,6E+21 | 3,4E+19 | 8,6E+16 | 4,0E+15 | 6,6E+15 | 3,1E+14 | 1,3E+14 | 6,0E+12 | 1,3E+14 | 6,0E+12 | 15 | 20 | 35 | 35 |
| 5,6E+19 | 1,2E+18 | 7,4E+15 | 3,6E+14 | 5,7E+14 | 2,8E+13 | 1,1E+13 | 5,4E+11 | 1,1E+13 | 5,4E+11 | 20 | 27 | 46 | 46 |
| 3,8E+18 | 8,9E+16 | 1,0E+15 | 5,1E+13 | 7,8E+13 | 3,9E+12 | 1,5E+12 | 7,7E+10 | 1,5E+12 | 7,7E+10 | 25 | 34 | 58 | 58 |
| 4,3E+17 | 1,1E+16 | 1,9E+14 | 9,7E+12 | 1,5E+13 | 7,5E+11 | 2,8E+11 | 1,5E+10 | 2,8E+11 | 1,5E+10 | 30 | 41 | 69 | 69 |
| 7,0E+16 | 1,8E+15 | 4,3E+13 | 2,3E+12 | 3,3E+12 | 1,8E+11 | 4,3E+10 | 3,5E+09 | 4,3E+10 | 3,5E+09 | 35 | 48 | 81 | 81 |
| 1,5E+16 | 3,9E+14 | 1,2E+13 | 6,6E+11 | 9,6E+11 | 5,1E+10 | 1,9E+10 | 1,0E+09 | 1,9E+10 | 1,0E+09 | 40 | 55 | 93 | 93 |
| 3,9E+15 | 1,1E+14 | 4,2E+12 | 2,2E+11 | 3,2E+11 | 1,7E+10 | 6,3E+09 | 3,5E+08 | 6,3E+09 | 3,5E+08 | 45 | 62 | 104 | 104 |
| 1,2E+15 | 3,2E+13 | 1,5E+12 | 8,1E+10 | 1,2E+11 | 6,3E+09 | 2,4E+09 | 1,3E+08 | 2,4E+09 | 1,3E+08 | 50 | 68 | 116 | 116 |
| 3,9E+14 | 1,1E+13 | 6,1E+11 | 3,3E+10 | 4,7E+10 | 2,1E+09 | 9,4E+08 | 5,6E+07 | 9,4E+08 | 5,6E+07 | 55 | 75 | 127 | 125 |
| 1,4E+14 | 4,0E+12 | 2,5E+11 | 1,4E+10 | 1,9E+10 | 1,1E+09 | 3,9E+08 | 2,6E+07 | 3,9E+08 | 2,6E+07 | 60 | 82 | 139 | 138 |
| 5,3E+13 | 1,5E+12 | 1,1E+11 | 6,8E+09 | 8,6E+09 | 5,4E+08 | 1,8E+08 | 1,3E+07 | 1,8E+08 | 1,3E+07 | 66 | 89 | 150 | 150 |
| 2,2E+13 | 6,5E+11 | 3,5E+10 | 3,4E+09 | 4,2E+09 | 2,7E+08 | 8,7E+07 | 6,8E+06 | 8,7E+07 | 6,8E+06 | 71 | 96 | 162 | 162 |
| 9,7E+12 | 3,0E+11 | 2,7E+10 | 1,8E+09 | 2,1E+09 | 1,4E+08 | 4,7E+07 | 4,0E+06 | 4,7E+07 | 4,0E+06 | 76 | 103 | 174 | 174 |
| 4,5E+12 | 1,4E+11 | 1,5E+10 | 9,6E+08 | 1,1E+09 | 7,6E+07 | 2,6E+07 | 2,4E+06 | 2,6E+07 | 2,4E+06 | 81 | 110 | 185 | 185 |
| 2,2E+12 | 7,2E+10 | 8,1E+09 | 5,6E+08 | 6,4E+08 | 4,7E+07 | 1,5E+07 | 1,5E+06 | 1,5E+07 | 1,5E+06 | 86 | 117 | 197 | 197 |
| 1,2E+12 | 3,8E+10 | 4,6E+09 | 3,3E+08 | 3,7E+08 | 2,9E+07 | 8,9E+06 | 9,8E+05 | 8,9E+06 | 9,8E+05 | 91 | 123 | 208 | 208 |
| 6,2E+11 | 2,0E+10 | 2,7E+09 | 2,0E+08 | 2,2E+08 | 1,8E+07 | 5,8E+06 | 7,1E+05 | 5,8E+06 | 7,1E+05 | 97 | 130 | 220 | 219 |
| 3,4E+11 | 1,1E+10 | 1,7E+09 | 1,3E+08 | 1,3E+08 | 1,1E+07 | 3,8E+06 | 5,2E+05 | 3,8E+06 | 5,2E+05 | 102 | 137 | 231 | 230 |
| 1,9E+11 | 6,6 | | | | | | | | | | | | |

**Ermittlung der örtlichen Last-Dehnungs- und Spannungs-Dehnungs-Hysterese mit Hilfe der Masing-Hypothese
ohne Berücksichtigung der Mittelspannung, als reine Wechselbeanspruchung (R = -1)**

Ermittlung der Differenzen zwischen den einzelnen Schritten anhand der verdoppelten Erstbelastungskurven

1. Belastungsumkehr bei σ_0 (P_0)
Hystereseast von σ_0 (P_0) bis σ_1 (P_1)

2. Belastungsumkehr bei σ_1 (P_1)
Hystereseast von σ_1 (P_1) bis σ_0 (P_0)

Beide Hystereseast

| 1. Belastungsumkehr bei σ_0 (P_0) | | | | | | 2. Belastungsumkehr bei σ_1 (P_1) | | | | | | Beide Hystereseast | | | | | | | | | | | |
|--|------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|--|------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|--------------------|------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|--------|------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| Hystereseast von σ_0 (P_0) bis σ_1 (P_1) | | | | | | Hystereseast von σ_1 (P_1) bis σ_0 (P_0) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P | u | σ_1 | ϵ_1 | σ_0 | ϵ_0 | P | u | σ_1 | ϵ_1 | σ_0 | ϵ_0 | P | u | σ_1 | ϵ_1 | σ_0 | ϵ_0 | P | u | σ_1 | ϵ_1 | σ_0 | ϵ_0 |
| [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [] | [N/mm ²] | [] | [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [] | [N/mm ²] | [] | [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [] | [N/mm ²] | [] | [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [] | [N/mm ²] | [] |
| 0 | 0,0 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | 78 | 1,7 | 35 | 0,00018 | 46 | 0,00022 | -78 | -1,7 | -35 | ### | -46 | ### | 78 | 1,7 | 35 | 0,0002 | 46 | 0,0002 |
| 16 | 0,3 | 7 | 0,00004 | 9 | 0,00004 | 63 | 1,3 | 28 | 0,00015 | 37 | 0,00018 | -63 | -1,3 | -28 | -0,00015 | -37 | -0,00018 | 63 | 1,3 | 28 | 0,0001 | 37 | 0,0002 |
| 31 | 0,6 | 14 | 0,00008 | 18 | 0,00009 | 47 | 1,0 | 21 | 0,00011 | 28 | 0,00013 | -47 | -1,0 | -21 | -0,00011 | -28 | -0,00013 | 47 | 1,0 | 21 | 0,0001 | 28 | 0,0001 |
| 47 | 1,0 | 21 | 0,00011 | 28 | 0,00013 | 31 | 0,7 | 14 | 0,00007 | 19 | 0,00009 | -31 | -0,7 | -14 | -0,00007 | -19 | -0,00009 | 31 | 0,7 | 14 | 0,0001 | 19 | 0,0001 |
| 63 | 1,3 | 28 | 0,00015 | 37 | 0,00018 | 16 | 0,4 | 7 | 0,00003 | 9 | 0,00004 | -16 | -0,4 | -7 | -0,00003 | -9 | -0,00004 | 16 | 0,4 | 7 | 0,0000 | 9 | 0,0000 |
| 78 | 1,6 | 36 | 0,00019 | 46 | 0,00022 | 0 | 0,0 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,0 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0000 | 0 | 0,0000 |
| 94 | 2,0 | 43 | 0,00023 | 56 | 0,00027 | -16 | -0,3 | -7 | -0,00004 | -10 | -0,00005 | 16 | 0,3 | 7 | 0,00004 | 10 | 0,00005 | -16 | -0,3 | -7 | 0,0000 | -10 | 0,0000 |
| 109 | 2,3 | 50 | 0,00026 | 65 | 0,00031 | -31 | -0,6 | -14 | -0,00008 | -19 | -0,00009 | 31 | 0,6 | 14 | 0,00008 | 19 | 0,00009 | -31 | -0,6 | -14 | -0,0001 | -19 | -0,0001 |
| 125 | 2,6 | 57 | 0,00030 | 74 | 0,00035 | -47 | -1,0 | -22 | -0,00012 | -28 | -0,00013 | 47 | 1,0 | 22 | 0,00012 | 28 | 0,00013 | -47 | -1,0 | -22 | -0,0001 | -28 | -0,0001 |
| 141 | 3,0 | 64 | 0,00033 | 83 | 0,00040 | -63 | -1,3 | -28 | -0,00015 | -37 | -0,00018 | 63 | 1,3 | 28 | 0,00015 | 37 | 0,00018 | -63 | -1,3 | -28 | -0,0002 | -37 | -0,0002 |
| 156 | 3,3 | 71 | ### | 92 | ### | -78 | -1,7 | -35 | ### | -46 | ### | 78 | 1,7 | 35 | 0,00018 | 46 | 0,00022 | -78 | -1,7 | -35 | -0,0002 | -46 | -0,0002 |
| 172 | 3,7 | 78 | 0,00041 | 102 | 0,00048 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 188 | 4,0 | 85 | 0,00044 | 111 | 0,00053 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 203 | 4,4 | 92 | 0,00048 | 120 | 0,00057 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 219 | 4,8 | 99 | 0,00052 | 130 | 0,00062 | 156 | 3,5 | 70 | 0,00037 | 92 | 0,00044 | -156 | -3,5 | -70 | ### | -92 | ### | 156 | 3,5 | 70 | 0,0004 | 92 | 0,0004 |
| 234 | 5,2 | 106 | 0,00056 | 139 | 0,00066 | 141 | 3,2 | 63 | 0,00033 | 83 | 0,00040 | -141 | -3,2 | -63 | -0,00033 | -83 | -0,00040 | 141 | 3,2 | 63 | 0,0003 | 83 | 0,0004 |
| 250 | 5,5 | 113 | 0,00060 | 148 | 0,00071 | 125 | 2,9 | 56 | 0,00029 | 74 | 0,00035 | -125 | -2,9 | -56 | -0,00029 | -74 | -0,00035 | 125 | 2,9 | 56 | 0,0003 | 74 | 0,0004 |
| 266 | 5,9 | 120 | 0,00063 | 157 | 0,00075 | 109 | 2,6 | 49 | 0,00025 | 65 | 0,00031 | -109 | -2,6 | -49 | -0,00025 | -65 | -0,00031 | 109 | 2,6 | 49 | 0,0003 | 65 | 0,0004 |
| 281 | 6,3 | 127 | 0,00067 | 166 | 0,00079 | 94 | 2,2 | 42 | 0,00021 | 55 | 0,00026 | -94 | -2,2 | -42 | -0,00021 | -55 | -0,00026 | 94 | 2,2 | 42 | 0,0002 | 55 | 0,0003 |
| 297 | 6,7 | 134 | 0,00070 | 175 | 0,00084 | 78 | 1,9 | 35 | 0,00018 | 46 | 0,00022 | -78 | -1,9 | -35 | -0,00018 | -46 | -0,00022 | 78 | 1,9 | 35 | 0,0002 | 46 | 0,0003 |
| 313 | 7,1 | 141 | ### | 185 | ### | 63 | 1,6 | 28 | 0,00014 | 36 | 0,00017 | -63 | -1,6 | -28 | -0,00014 | -36 | -0,00017 | 63 | 1,6 | 28 | 0,0001 | 36 | 0,0002 |
| 328 | 7,5 | 148 | 0,00077 | 193 | 0,00092 | 47 | 1,2 | 21 | 0,00010 | 27 | 0,00013 | -47 | -1,2 | -21 | -0,00010 | -27 | -0,00013 | 47 | 1,2 | 21 | 0,0001 | 27 | 0,0002 |
| 344 | 7,9 | 155 | 0,00080 | 202 | 0,00096 | 31 | 0,9 | 14 | 0,00007 | 19 | 0,00008 | -31 | -0,9 | -14 | -0,00007 | -19 | -0,00008 | 31 | 0,9 | 14 | 0,0001 | 19 | 0,0002 |
| 359 | 8,3 | 162 | 0,00085 | 209 | 0,00100 | 16 | 0,6 | 7 | 0,00003 | 9 | 0,00004 | -16 | -0,6 | -7 | -0,00003 | -9 | -0,00004 | 16 | 0,6 | 7 | 0,0000 | 9 | 0,0000 |
| 375 | 8,7 | 169 | 0,00089 | 217 | 0,00104 | 0 | 0,2 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,2 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,2 | 0 | 0,0000 | 0 | 0,0000 |
| 391 | 9,1 | 176 | 0,00093 | 225 | 0,00108 | -16 | -0,1 | -7 | -0,00004 | -9 | -0,00004 | 16 | 0,1 | 7 | 0,00004 | 9 | 0,00004 | 156 | 3,5 | 70 | 0,0004 | 92 | 0,0004 |
| 406 | 9,5 | 182 | 0,00097 | 233 | 0,00112 | -31 | -0,5 | -14 | -0,00008 | -19 | -0,00009 | 31 | 0,5 | 14 | 0,00008 | 19 | 0,00009 | 141 | 3,2 | 63 | 0,0003 | 83 | 0,0004 |
| 422 | 9,9 | 188 | 0,00101 | 240 | 0,00116 | -47 | -0,9 | -22 | -0,00012 | -28 | -0,00013 | 47 | 0,9 | 22 | 0,00012 | 28 | 0,00013 | 125 | 2,9 | 56 | 0,0003 | 74 | 0,0004 |
| 438 | 10,3 | 194 | 0,00105 | 248 | 0,00120 | -63 | -1,2 | -29 | -0,00016 | -38 | -0,00018 | 63 | 1,2 | 29 | 0,00016 | 38 | 0,00018 | 109 | 2,6 | 49 | 0,0003 | 65 | 0,0004 |
| 453 | 10,7 | 199 | 0,00109 | 255 | 0,00124 | -78 | -1,6 | -36 | -0,00019 | -47 | -0,00022 | 78 | 1,6 | 36 | 0,00019 | 47 | 0,00022 | 94 | 2,2 | 42 | 0,0002 | 55 | 0,0003 |
| 469 | 11,1 | 205 | ### | 263 | ### | -94 | -2,0 | -43 | -0,00023 | -56 | -0,00027 | 94 | 2,0 | 43 | 0,00023 | 56 | 0,00027 | 78 | 1,9 | 35 | 0,0002 | 46 | 0,0003 |
| 484 | 11,5 | 210 | 0,00116 | 270 | 0,00132 | -109 | -2,4 | -50 | -0,00026 | -65 | -0,00031 | 109 | 2,4 | 50 | 0,00026 | 65 | 0,00031 | 63 | 1,6 | 28 | 0,0001 | 36 | 0,0002 |
| 500 | 12,0 | 216 | 0,00120 | 277 | 0,00136 | -125 | -2,8 | -57 | -0,00030 | -74 | -0,00035 | 125 | 2,8 | 57 | 0,00030 | 74 | 0,00035 | 47 | 1,2 | 21 | 0,0001 | 27 | 0,0002 |
| 516 | 12,4 | 221 | 0,00124 | 284 | 0,00139 | -141 | -3,2 | -64 | -0,00033 | -83 | -0,00040 | 141 | 3,2 | 64 | 0,00033 | 83 | 0,00040 | 31 | 0,9 | 14 | 0,0001 | 18 | 0,0002 |
| 531 | 12,8 | 227 | 0,00127 | 291 | 0,00143 | -156 | -3,5 | -70 | ### | -92 | ### | 156 | 3,5 | 70 | 0,00037 | 92 | 0,00044 | 16 | 0,6 | 7 | 0,0000 | 9 | 0,0000 |
| 547 | 13,2 | 232 | 0,00132 | 298 | 0,00147 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 563 | 13,6 | 238 | 0,00136 | 305 | 0,00151 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 578 | 14,1 | 243 | 0,00140 | 312 | 0,00154 | 234 | 5,6 | 102 | 0,00056 | 131 | 0,00064 | -234 | -5,6 | -102 | ### | -131 | ### | 156 | 3,5 | 70 | 0,0004 | 92 | 0,0004 |
| 594 | 14,5 | 249 | 0,00145 | 318 | 0,00158 | 219 | 5,2 | 95 | 0,00052 | 122 | 0,00060 | -219 | -5,2 | -95 | -0,00052 | -122 | -0,00060 | 141 | 3,2 | 63 | 0,0003 | 83 | 0,0004 |
| 609 | 14,9 | 254 | 0,00149 | 325 | 0,00162 | 203 | 4,9 | 88 | 0,00049 | 113 | 0,00055 | -203 | -4,9 | -88 | -0,00049 | -113 | -0,00055 | 125 | 2,9 | 56 | 0,0003 | 74 | 0,0004 |
| 625 | 15,3 | 260 | ### | 331 | ### | 188 | 4,6 | 81 | 0,00045 | 104 | 0,00051 | -188 | -4,6 | -81 | -0,00045 | -104 | -0,00051 | 109 | 2,6 | 49 | 0,0003 | 65 | 0,0004 |
| 641 | 15,8 | 265 | 0,00158 | 337 | 0,00169 | 172 | 4,3 | 74 | 0,00041 | 94 | 0,00046 | -172 | -4,3 | -74 | -0,00041 | -94 | -0,00046 | 94 | 2,2 | 42 | 0,0002 | 55 | 0,0003 |
| 656 | 16,2 | 270 | 0,00162 | 343 | 0,00173 | 156 | 3,9 | 67 | 0,00037 | 85 | 0,00042 | -156 | -3,9 | -67 | -0,00037 | -85 | -0,00042 | 109 | 2,6 | 49 | 0,0003 | 65 | 0,0004 |
| 672 | 16,7 | 275 | 0,00167 | 347 | 0,00176 | 141 | 3,6 | 60 | 0,00033 | 75 | 0,00037 | -141 | -3,6 | -60 | -0,00033 | -75 | -0,00037 | 125 | 2,9 | 56 | 0,0003 | 74 | 0,0004 |
| 688 | 17,1 | 280 | 0,00172 | 352 | 0,00179 | 125 | 3,3 | 53 | 0,00030 | 66 | 0,00033 | -125 | -3,3 | -53 | -0,00030 | -66 | -0,00033 | 141 | 3,2 | 63 | 0,0003 | 83 | 0,0004 |
| 703 | 17,5 | 285 | 0,00176 | 356 | 0,00182 | 109 | 2,9 | 46 | 0,00026 | 57 | 0,00029 | -109 | -2,9 | -46 | -0,00026 | -57 | -0,00029 | 156 | 3,5 | 70 | 0,0004 | 92 | 0,0004 |
| 719 | 17,9 | 290 | 0,00181 | 361 | 0,00185 | 94 | 2,6 | 39 | 0,00023 | 48 | 0,00024 | -94 | -2,6 | -39 | -0,00023 | -48 | -0,00024 | 156 | 3,5 | 70 | 0,0004 | 92 | 0,0004 |
| 734 | 18,3 | 294 | 0,00186 | 365 | 0,00189 | 78 | 2,2 | 32 | 0,00019 | 39 | 0,00020 | -78 | -2,2 | -32 | -0,00019 | -39 | -0,00020 | 141 | 3,2 | 63 | 0,0003 | 83 | 0,0004 |
| 750 | 18,8 | 297 | 0,00191 | 370 | 0,00192 | 63 | 1,9 | 25 | 0,00016 | 30 | 0,00016 | -63 | -1,9 | -25 | -0,00016 | -30 | -0,00016 | 125 | 2,9 | 56 | 0,0003 | 74 | 0,0004 |
| 766 | 19,2 | 300 | 0,00195 | 379 | 0,00198 | 47 | 1,5 | 18 | 0,00012 | 20 | 0,00011 | -47 | -1,5 | -18 | -0,00012 | -20 | -0,00011 | 109 | 2,6 | 49 | 0,0003 | 65 | 0,0004 |
| 781 | 19,6 | 303 | ### | 388 | ### | 31 | 1,2 | 10 | 0,00008 | 11 | 0,00007 | -31 | -1,2 | -10 | -0,00008 | -11 | -0,00007 | 94 | 2,2 | 42 | 0,0002 | 55 | 0,0003 |
| | | | | | | 16 | 0,8 | 3 | 0,00004 | 1 | 0,00002 | -16 | -0,8 | -3 | -0,00004 | -1 | -0,00002 | 78 | 1,9 | 35 | 0,0002 | 46 | 0,0003 |
| | | | | | | 0 | 0,4 | -4 | 0,00000 | -8 | ### | 0 | -0,4 | 4 | 0,00000 | 8 | 0,00002 | 63 | 1,6 | 28 | 0,0001 | 36 | 0,0002 |
| | | | | | | -16 | 0,0 | -11 | -0,00003 | | | | | | | | | | | | | | |

Ermittlung der örtlichen Spannungs-Dehnungs-Hysteresse mit Hilfe der Masing-Hypothese mit der Berücksichtigung der Mittelspannung

| 1. Belastungsumkehr bei σ_0 | | | | | | 2. Belastungsumkehr bei σ_n | | | | | | Beide Hysteresenast | | | | | |
|---|----------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|---|----------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|---|---------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| Hysteresseast von σ_0 bis σ_n | | | | | | Hysteresseast von σ_n bis σ_0 | | | | | | | | | | | |
| P | u | σ_1 | ϵ_1 | σ_V | ϵ_V | P | u | σ_1 | ϵ_1 | σ_V | ϵ_V | P | u | σ_1 | ϵ_1 | σ_V | ϵ_V |
| [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] | [-] | [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] | [-] | [kN/m] | [mm] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] | [-] |
| $\Delta P = 1 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | | $\Delta P = 1 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | | $\Delta P = 1 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | |
| 237 | 4,80286 | 99 | 0,00051 | 131 | 0,00062 | 81 | 1,48566 | 29 | 0,00014 | 39 | 0,00018 | 237 | 4,8029 | 99 | 0,0005 | 131 | 0,0006 |
| 222 | 4,47949 | 92 | 0,00047 | 122 | 0,00058 | 97 | 1,80903 | 36 | 0,00018 | 48 | 0,00023 | 222 | 4,4795 | 92 | 0,0005 | 122 | 0,0006 |
| 206 | 4,15612 | 85 | 0,00044 | 113 | 0,00054 | 112 | 2,13240 | 43 | 0,00022 | 57 | 0,00027 | 206 | 4,1561 | 85 | 0,0004 | 113 | 0,0005 |
| 190 | 3,83114 | 78 | 0,00040 | 104 | 0,00049 | 128 | 2,45738 | 50 | 0,00026 | 66 | 0,00032 | 190 | 3,8311 | 78 | 0,0004 | 104 | 0,0005 |
| 175 | 3,50617 | 71 | 0,00036 | 94 | 0,00045 | 144 | 2,78235 | 57 | 0,00029 | 76 | 0,00036 | 175 | 3,5062 | 71 | 0,0004 | 94 | 0,0004 |
| 159 | 3,17436 | 64 | 0,00032 | 85 | 0,00040 | 159 | 3,11416 | 64 | 0,00033 | 85 | 0,00041 | 159 | 3,1744 | 64 | 0,0003 | 85 | 0,0004 |
| 144 | 2,84255 | 56 | 0,00028 | 75 | 0,00036 | 175 | 3,44596 | 71 | 0,00037 | 95 | 0,00045 | 144 | 2,8426 | 56 | 0,0003 | 75 | 0,0004 |
| 128 | 2,50723 | 49 | 0,00025 | 66 | 0,00031 | 190 | 3,78128 | 78 | 0,00041 | 104 | 0,00049 | 128 | 2,5072 | 49 | 0,0002 | 66 | 0,0003 |
| 112 | 2,17191 | 42 | 0,00021 | 57 | 0,00027 | 206 | 4,11660 | 85 | 0,00044 | 113 | 0,00054 | 112 | 2,1719 | 42 | 0,0002 | 57 | 0,0003 |
| 97 | 1,82879 | 35 | 0,00018 | 48 | 0,00023 | 222 | 4,45973 | 92 | 0,00048 | 122 | 0,00058 | 97 | 1,8288 | 35 | 0,0002 | 48 | 0,0002 |
| 81 | 1,48566 | 29 | 0,00014 | 39 | 0,00018 | 237 | 4,80286 | 99 | 0,00051 | 131 | 0,00062 | 81 | 1,4857 | 29 | 0,0001 | 39 | 0,0002 |
| $\Delta P = 2 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | | $\Delta P = 2 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | | $\Delta P = 2 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | |
| 394 | 8,93657 | 159 | 0,00091 | 204 | 0,00101 | 81 | 1,86654 | 18 | 0,00018 | 20 | 0,00013 | 394 | 8,9366 | 159 | 0,0009 | 204 | 0,0010 |
| 378 | 8,61320 | 152 | 0,00087 | 195 | 0,00097 | 97 | 2,18991 | 25 | 0,00022 | 29 | 0,00018 | 378 | 8,6132 | 152 | 0,0009 | 195 | 0,0010 |
| 362 | 8,28983 | 144 | 0,00084 | 186 | 0,00092 | 112 | 2,51328 | 32 | 0,00026 | 38 | 0,00022 | 362 | 8,2898 | 144 | 0,0008 | 186 | 0,0009 |
| 347 | 7,96485 | 137 | 0,00080 | 177 | 0,00088 | 128 | 2,83826 | 39 | 0,00029 | 47 | 0,00026 | 347 | 7,9649 | 137 | 0,0008 | 177 | 0,0009 |
| 331 | 7,63988 | 130 | 0,00076 | 167 | 0,00084 | 144 | 3,16323 | 46 | 0,00033 | 57 | 0,00031 | 331 | 7,6399 | 130 | 0,0008 | 167 | 0,0009 |
| 315 | 7,30807 | 123 | 0,00072 | 158 | 0,00079 | 159 | 3,49504 | 53 | 0,00037 | 66 | 0,00035 | 315 | 7,3081 | 123 | 0,0008 | 158 | 0,0009 |
| 300 | 6,97627 | 116 | 0,00069 | 148 | 0,00075 | 175 | 3,82684 | 60 | 0,00041 | 76 | 0,00040 | 300 | 6,9763 | 116 | 0,0007 | 148 | 0,0009 |
| 284 | 6,64095 | 109 | 0,00065 | 139 | 0,00070 | 190 | 4,16216 | 68 | 0,00044 | 85 | 0,00044 | 284 | 6,6410 | 109 | 0,0007 | 139 | 0,0009 |
| 269 | 6,30563 | 102 | 0,00061 | 130 | 0,00066 | 206 | 4,49748 | 75 | 0,00048 | 94 | 0,00049 | 269 | 6,3056 | 102 | 0,0006 | 130 | 0,0009 |
| 253 | 5,98250 | 95 | 0,00058 | 121 | 0,00061 | 222 | 4,84061 | 82 | 0,00052 | 103 | 0,00053 | 253 | 5,9825 | 95 | 0,0006 | 121 | 0,0009 |
| 237 | 5,61937 | 88 | 0,00054 | 112 | 0,00057 | 237 | 5,18374 | 88 | 0,00055 | 112 | 0,00057 | 237 | 5,6194 | 88 | 0,0005 | 112 | 0,0006 |
| 222 | 5,26130 | 81 | 0,00051 | 103 | 0,00053 | 253 | 5,54181 | 95 | 0,00059 | 121 | 0,00062 | 222 | 5,2613 | 81 | 0,0005 | 103 | 0,0006 |
| 206 | 4,90323 | 74 | 0,00047 | 93 | 0,00048 | 269 | 5,89988 | 103 | 0,00062 | 131 | 0,00066 | 206 | 4,9032 | 74 | 0,0005 | 93 | 0,0006 |
| 190 | 4,53179 | 67 | 0,00043 | 84 | 0,00044 | 284 | 6,27132 | 110 | 0,00066 | 140 | 0,00071 | 190 | 4,5318 | 67 | 0,0004 | 84 | 0,0006 |
| 175 | 4,16035 | 59 | 0,00039 | 74 | 0,00039 | 300 | 6,64276 | 117 | 0,00070 | 150 | 0,00075 | 175 | 4,1604 | 59 | 0,0004 | 74 | 0,0006 |
| 159 | 3,78012 | 52 | 0,00035 | 65 | 0,00035 | 315 | 7,02299 | 124 | 0,00074 | 159 | 0,00079 | 159 | 3,7801 | 52 | 0,0003 | 65 | 0,0006 |
| 144 | 3,39988 | 45 | 0,00032 | 56 | 0,00031 | 331 | 7,40323 | 131 | 0,00078 | 168 | 0,00084 | 144 | 3,3999 | 45 | 0,0003 | 56 | 0,0006 |
| 128 | 3,01801 | 38 | 0,00028 | 47 | 0,00026 | 347 | 7,78510 | 138 | 0,00081 | 177 | 0,00088 | 128 | 3,0180 | 38 | 0,0003 | 47 | 0,0006 |
| 112 | 2,63613 | 31 | 0,00025 | 38 | 0,00022 | 362 | 8,16698 | 145 | 0,00085 | 186 | 0,00092 | 112 | 2,6361 | 31 | 0,0002 | 38 | 0,0006 |
| 97 | 2,25134 | 25 | 0,00021 | 29 | 0,00018 | 378 | 8,55177 | 152 | 0,00088 | 195 | 0,00097 | 97 | 2,2513 | 25 | 0,0002 | 29 | 0,0006 |
| 81 | 1,86654 | 18 | 0,00018 | 20 | 0,00013 | 394 | 8,93657 | 159 | 0,00091 | 204 | 0,00101 | 81 | 1,8665 | 18 | 0,0002 | 20 | 0,0006 |
| $\Delta P = 3 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | | $\Delta P = 3 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | | $\Delta P = 3 * LM71: \text{Längsw.}\square, \text{Beiw.}\square$ | | | | | |
| 550 | ##### | 196 | 0,00140 | 255 | 0,00138 | 81 | 2,10618 | -9 | 0,00028 | -7 | 0,00010 | 550 | ##### | 196 | 0,0014 | 255 | 0,0014 |
| 534 | 12,90319 | 189 | 0,00136 | 246 | 0,00133 | 97 | 2,42955 | -2 | 0,00032 | 2 | 0,00014 | 534 | 12,9032 | 189 | 0,0014 | 246 | 0,0014 |
| 519 | 12,57982 | 182 | 0,00132 | 237 | 0,00129 | 112 | 2,75292 | 5 | 0,00035 | 11 | 0,00019 | 519 | 12,5798 | 182 | 0,0013 | 237 | 0,0014 |
| 503 | 12,25485 | 175 | 0,00129 | 228 | 0,00125 | 128 | 3,07789 | 12 | 0,00039 | 20 | 0,00023 | 503 | 12,2549 | 175 | 0,0013 | 228 | 0,0014 |
| 487 | 11,92987 | 168 | 0,00125 | 218 | 0,00120 | 144 | 3,40287 | 19 | 0,00043 | 30 | 0,00027 | 487 | 11,9299 | 168 | 0,0013 | 218 | 0,0014 |
| 472 | 11,59806 | 160 | 0,00121 | 209 | 0,00116 | 159 | 3,73467 | 27 | 0,00047 | 39 | 0,00032 | 472 | 11,5981 | 160 | 0,0013 | 209 | 0,0014 |
| 456 | 11,26626 | 153 | 0,00117 | 200 | 0,00111 | 175 | 4,06648 | 34 | 0,00050 | 49 | 0,00036 | 456 | 11,2663 | 153 | 0,0012 | 200 | 0,0014 |
| 440 | 10,93094 | 146 | 0,00114 | 190 | 0,00107 | 190 | 4,40180 | 41 | 0,00054 | 58 | 0,00041 | 440 | 10,9310 | 146 | 0,0012 | 190 | 0,0014 |
| 425 | 10,59562 | 139 | 0,00110 | 181 | 0,00102 | 206 | 4,73712 | 48 | 0,00058 | 67 | 0,00045 | 425 | 10,5956 | 139 | 0,0011 | 181 | 0,0014 |
| 409 | 10,25249 | 132 | 0,00107 | 172 | 0,00098 | 222 | 5,08025 | 55 | 0,00061 | 76 | 0,00050 | 409 | 10,2525 | 132 | 0,0011 | 172 | 0,0014 |
| 394 | 9,90936 | 125 | 0,00103 | 163 | 0,00094 | 237 | 5,42338 | 62 | 0,00065 | 85 | 0,00054 | 394 | 9,9094 | 125 | 0,0011 | 163 | 0,0014 |
| 378 | 9,55129 | 118 | 0,00099 | 154 | 0,00089 | 253 | 5,78145 | 69 | 0,00068 | 94 | 0,00058 | 378 | 9,5513 | 118 | 0,0011 | 154 | 0,0014 |
| 362 | 9,19322 | 111 | 0,00096 | 144 | 0,00085 | 269 | 6,13952 | 76 | 0,00072 | 104 | 0,00063 | 362 | 9,1932 | 111 | 0,0011 | 144 | 0,0014 |
| 347 | 8,82178 | 104 | 0,00092 | 135 | 0,00080 | 284 | 6,51096 | 83 | 0,00076 | 113 | 0,00067 | 347 | 8,8218 | 104 | 0,0011 | 135 | 0,0014 |
| 331 | 8,45034 | 97 | 0,00088 | 125 | 0,00076 | 300 | 6,88240 | 90 | 0,00080 | 123 | 0,00072 | 331 | 8,4503 | 97 | 0,0011 | 125 | 0,0014 |
| 315 | 8,07011 | 90 | 0,00084 | 116 | 0,00072 | 315 | 7,26263 | 97 | 0,00084 | 132 | 0,00076 | 315 | 8,0701 | 90 | 0,0011 | 116 | 0,0014 |
| 300 | 7,68988 | 83 | 0,00080 | 107 | 0,00067 | 331 | 7,64286 | 104 | 0,00087 | 141 | 0,00080 | 300 | 7,6899 | 83 | 0,0011 | 107 | 0,0014 |
| 284 | 7,30800 | 76 | 0,00077 | 98 | 0,00063 | 347 | 8,02474 | 111 | 0,00091 | 150 | 0,00085 | 284 | 7,3080 | 76 | 0,0011 | 98 | 0,0014 |
| 269 | 6,92613 | 69 | 0,00073 | 89 | 0,00059 | 362 | 8,40661 | 118 | 0,00094 | 159 | 0,00089 | 269 | 6,9261 | 69 | 0,0011 | 89 | 0,0014 |
| 253 | 6,54133 | 62 | 0,00070 | 80 | 0,00054 | 378 | 8,79141 | 125 | 0,00098 | 168 | 0,00093 | 253 | 6,5413 | 62 | 0,0011 | 80 | 0,0014 |
| 237 | 6,15653 | 55 | 0,00067 | 71 | 0,00050 | 394 | 9,17621 | 132 | 0,00101 | 177 | 0,00098 | 237 | 6,1565 | 55 | 0,0011 | 71 | 0,0014 |
| 222 | 5,76362 | 48 | 0,00063 | 62 | 0,00046 | 409 | 9,56912 | 139 | 0,00105 | 186 | 0,00102 | 222 | 5,7636 | 48 | 0,0011 | 62 | 0,0014 |
| 206 | 5,37070 | 41 | 0,00060 | 54 | 0,00041 | 425 | 9,96204 | 146 | 0,00108 | 194 | 0,00106 | 206 | 5,3707 | 41 | 0,0011 | 54 | 0,0014 |
| 190 | 4,96434 | 34 | 0,00055 | 46 | 0,00037 | 440 | 10,36840 | 153 | 0,00112 | 202 | 0,00110 | 190 | 4,9643 | 34 | 0,0011 | 46 | 0,0014 |
| 175 | 4,55798 | 27 | 0,00051 | 38 | 0,00033 | 456 | 10,77476 | 160 | 0,00116 | 210 | 0,00114 | 175 | 4,5579 | 27 | 0,0011 | 38 | 0,0014 |
| 159 | 4,15230 | 20 | 0,00047 | 30 | 0,00029 | 472 | 11,18044 | 167 | 0,00120 | 218 | 0,00118 | 159 | 4,1523 | 20 | 0,0011 | 30 | 0,0014 |
| 144 | 3,74662 | 14 | 0,00043 | 23 | 0,00026 | 487 | 11,58612 | 174 | 0,00124 | 225 | 0,00122 | 144 | 3,7466 | 14 | 0,0011 | 23 | 0,0014 |
| 128 | 3,34168 | 8 | 0,00039 | 15 | 0,00022 | 503 | 11,99106 | 179 | 0,00128 | 233 | 0,00126 | 128 | 3,3417 | 8 | 0,0011 | 15 | 0,0014 |
| 112 | 2,93675 | 2 | 0,00035 | 8 | 0,00018 | 519 | 12,39599 | 185 | 0,00133 | 240 | 0,00130 | 112 | 2,9368 | 2 | 0,0011 | 8 | 0,0014 |
| 97 | 2,52146 | -3 | 0,00031 | 0 | 0,00014 | 534 | 12,81128 | 191 | 0,00136 | 248 | 0,00134 | 97 | 2,5215 | -3 | 0,0011 | 0 | 0,0014 |

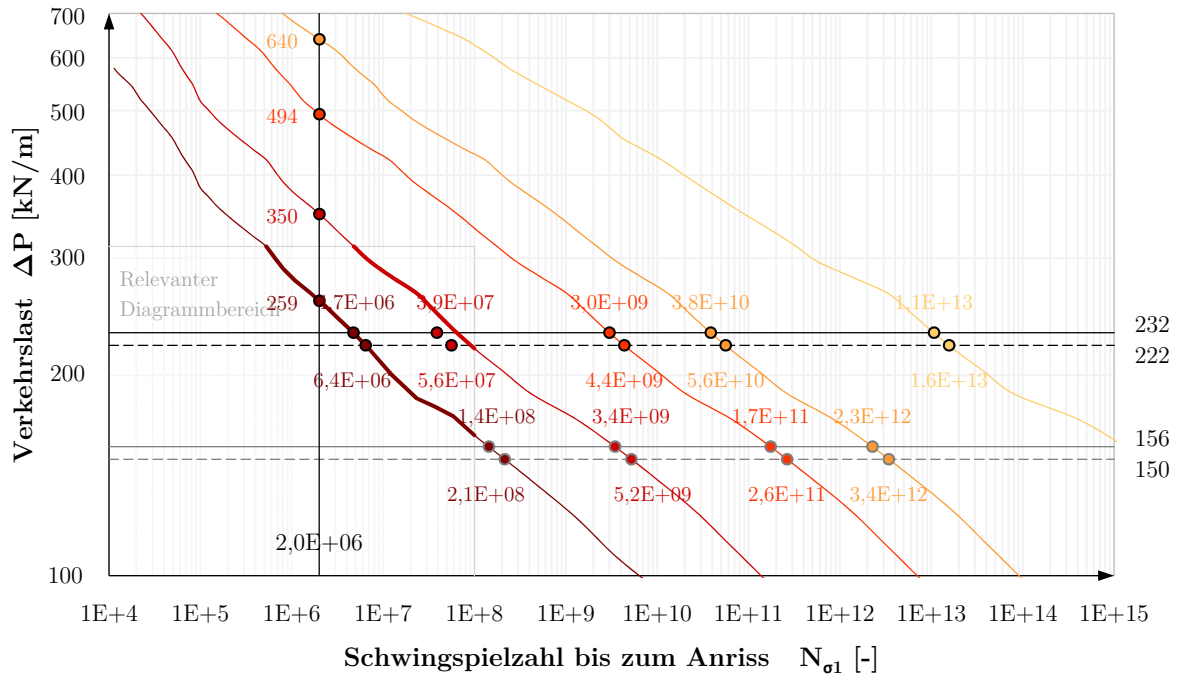
Wiedervereinigte P-ε-Pfad und σ-ε-Pfad aus der ständigen Belastung und der Verkehrslast

(Die hier ermittelten Pfade sind deckungsgleich mit den Erstbelastungskurven. Die Unterschied liegt darin, dass hier die zyklischen Teil der Erstbelastungskurve auf die hierher definierten Belastungsschritte aufgeteilt ist.)

| Last- stufe | Ständige Belastung auf die Brücke | Verkehrslast auf der Brücke | Belastungs- amplitude | Gesamte Belastung | Zeitdauer bis Oberlast | Verschiebung unter Oberlast | Haupt- zugspannung g infolge Oberlast | Haupt- zugdehnung g infolge Oberlast | Vergleichs- spannung infolge Oberlast | Vergleichs- dehnung infolge Oberlast | | |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|---|---------|-----------|
| | | | | | | | | | | | Faktor | P_{sta} |
| | | | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [sec] | [mm] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] | [-] | |
| Ständige Bel. | 0 | 0,0 * stä.Bel. = | 0,00 | | 0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,00000 | 0 | 0,00000 | |
| | 1 | 0,2 * stä.Bel. = | 4,48 | | 18 | 1,0 | 0,3 | 7 | 0,00004 | 10 | 0,00005 | |
| | 2 | 0,4 * stä.Bel. = | 8,59 | | 35 | 2,0 | 0,6 | 13 | 0,00006 | 18 | 0,00009 | |
| | 3 | 0,6 * stä.Bel. = | 12,18 | | 50 | 3,0 | 0,8 | 18 | 0,00008 | 25 | 0,00012 | |
| | 4 | 0,8 * stä.Bel. = | 15,69 | | 64 | 4,0 | 1,0 | 23 | 0,00011 | 32 | 0,00015 | |
| 5 | 1,0 * stä.Bel. = | 19,87 | | 81 | 5,0 | 1,3 | 29 | 0,00014 | 40 | 0,00019 | | |
| Verkehrslast | 1 | | 0,1 * zyk.Bel. = | 16 | 8 | 97 | 5,6 | 1,6 | 36 | 0,00018 | 49 | 0,00023 |
| | 2 | | 0,2 * zyk.Bel. = | 31 | 16 | 112 | 6,1 | 1,9 | 43 | 0,00022 | 57 | 0,00027 |
| | 3 | | 0,3 * zyk.Bel. = | 47 | 23 | 128 | 6,6 | 2,2 | 50 | 0,00026 | 67 | 0,00032 |
| | 4 | | 0,4 * zyk.Bel. = | 63 | 31 | 144 | 7,2 | 2,6 | 57 | 0,00030 | 76 | 0,00036 |
| | 5 | | 0,5 * zyk.Bel. = | 78 | 39 | 159 | 7,7 | 2,9 | 64 | 0,00033 | 85 | 0,00041 |
| | 6 | | 0,6 * zyk.Bel. = | 94 | 47 | 175 | 8,3 | 3,3 | 71 | 0,00037 | 94 | 0,00045 |
| | 7 | | 0,7 * zyk.Bel. = | 109 | 55 | 190 | 9,0 | 3,7 | 78 | 0,00041 | 104 | 0,00049 |
| | 8 | | 0,8 * zyk.Bel. = | 125 | 63 | 206 | 9,6 | 4,0 | 85 | 0,00044 | 113 | 0,00054 |
| | 9 | | 0,9 * zyk.Bel. = | 141 | 70 | 222 | 10,2 | 4,4 | 92 | 0,00048 | 122 | 0,00058 |
| | 10 | | 1,0 * zyk.Bel. = | 156 | 78 | 237 | 10,7 | 4,8 | 99 | 0,00051 | 131 | 0,00062 |
| | 11 | | 1,1 * zyk.Bel. = | 172 | 86 | 253 | 11,2 | 5,2 | 106 | 0,00055 | 140 | 0,00067 |
| | 12 | | 1,2 * zyk.Bel. = | 188 | 94 | 269 | 11,7 | 5,6 | 113 | 0,00059 | 147 | 0,00071 |
| | 13 | | 1,3 * zyk.Bel. = | 203 | 102 | 284 | 12,3 | 6,0 | 120 | 0,00063 | 155 | 0,00075 |
| | 14 | | 1,4 * zyk.Bel. = | 219 | 109 | 300 | 12,9 | 6,4 | 126 | 0,00067 | 163 | 0,00079 |
| | 15 | | 1,5 * zyk.Bel. = | 234 | 117 | 315 | 13,5 | 6,8 | 131 | 0,00071 | 170 | 0,00082 |
| | 16 | | 1,6 * zyk.Bel. = | 250 | 125 | 331 | 14,1 | 7,2 | 137 | 0,00074 | 177 | 0,00086 |
| | 17 | | 1,7 * zyk.Bel. = | 266 | 133 | 347 | 14,6 | 7,7 | 142 | 0,00078 | 184 | 0,00090 |
| | 18 | | 1,8 * zyk.Bel. = | 281 | 141 | 362 | 15,2 | 8,1 | 148 | 0,00082 | 191 | 0,00094 |
| | 19 | | 1,9 * zyk.Bel. = | 297 | 148 | 378 | 15,7 | 8,5 | 153 | 0,00087 | 198 | 0,00097 |
| | 20 | | 2,0 * zyk.Bel. = | 313 | 156 | 394 | 16,2 | 8,9 | 159 | 0,00091 | 204 | 0,00101 |
| | 21 | | 2,1 * zyk.Bel. = | 328 | 164 | 409 | 16,9 | 9,4 | 164 | 0,00096 | 210 | 0,00105 |
| | 22 | | 2,2 * zyk.Bel. = | 344 | 172 | 425 | 17,5 | 9,8 | 169 | 0,00100 | 215 | 0,00108 |
| | 23 | | 2,3 * zyk.Bel. = | 359 | 180 | 440 | 18,0 | 10,2 | 174 | 0,00105 | 219 | 0,00111 |
| | 24 | | 2,4 * zyk.Bel. = | 375 | 188 | 456 | 18,6 | 10,7 | 177 | 0,00110 | 224 | 0,00114 |
| | 25 | | 2,5 * zyk.Bel. = | 391 | 195 | 472 | 19,1 | 11,1 | 180 | 0,00115 | 230 | 0,00119 |
| | 26 | | 2,6 * zyk.Bel. = | 406 | 203 | 487 | 19,7 | 11,5 | 183 | 0,00120 | 235 | 0,00122 |
| | 27 | | 2,7 * zyk.Bel. = | 422 | 211 | 503 | 20,2 | 11,9 | 186 | 0,00125 | 240 | 0,00126 |
| | 28 | | 2,8 * zyk.Bel. = | 438 | 219 | 519 | 20,8 | 12,4 | 189 | 0,00130 | 245 | 0,00130 |
| | 29 | | 2,9 * zyk.Bel. = | 453 | 227 | 534 | 21,4 | 12,8 | 192 | 0,00135 | 250 | 0,00134 |
| | 30 | | 3,0 * zyk.Bel. = | 469 | 234 | 550 | 22,0 | 13,2 | 196 | 0,00140 | 255 | 0,00138 |
| | 31 | | 3,1 * zyk.Bel. = | 484 | 242 | 565 | 22,5 | 13,7 | 200 | 0,00146 | 258 | 0,00141 |
| | 32 | | 3,2 * zyk.Bel. = | 500 | 250 | 581 | 23,1 | 14,1 | 241 | 0,00155 | 261 | 0,00145 |
| | 33 | | 3,3 * zyk.Bel. = | 516 | 258 | 597 | 23,7 | 14,6 | 246 | 0,00162 | 264 | 0,00149 |
| | 34 | | 3,4 * zyk.Bel. = | 531 | 266 | 612 | 24,2 | 15,0 | 251 | 0,00169 | 267 | 0,00153 |
| | 35 | | 3,5 * zyk.Bel. = | 547 | 273 | 628 | 24,8 | 15,4 | 254 | 0,00177 | 271 | 0,00157 |
| | 36 | | 3,6 * zyk.Bel. = | 563 | 281 | 644 | 25,3 | 15,9 | 258 | 0,00185 | 274 | 0,00161 |
| | 37 | | 3,7 * zyk.Bel. = | 578 | 289 | 659 | 25,9 | 16,4 | 261 | 0,00194 | 278 | 0,00166 |
| | 38 | | 3,8 * zyk.Bel. = | 594 | 297 | 675 | 26,5 | 16,8 | 264 | 0,00202 | 282 | 0,00170 |
| | 39 | | 3,9 * zyk.Bel. = | 609 | 305 | 690 | 27,1 | 17,3 | 267 | 0,00211 | 285 | 0,00175 |
| | 40 | | 4,0 * zyk.Bel. = | 625 | 313 | 706 | 27,6 | 17,8 | 270 | 0,00220 | 289 | 0,00179 |
| | 41 | | 4,1 * zyk.Bel. = | 641 | 320 | 722 | 28,2 | 18,2 | 273 | 0,00229 | 293 | 0,00184 |
| | 42 | | 4,2 * zyk.Bel. = | 656 | 328 | 737 | 28,7 | 18,7 | 276 | 0,00239 | 297 | 0,00189 |
| | 43 | | 4,3 * zyk.Bel. = | 672 | 336 | 753 | 29,2 | 19,2 | 279 | 0,00249 | 301 | 0,00195 |
| | 44 | | 4,4 * zyk.Bel. = | 688 | 344 | 769 | 29,7 | 19,7 | 283 | 0,00260 | 306 | 0,00201 |
| | 45 | | 4,5 * zyk.Bel. = | 703 | 352 | 784 | 30,4 | 20,2 | 286 | 0,00269 | 310 | 0,00206 |
| | 46 | | 4,6 * zyk.Bel. = | 719 | 359 | 800 | 31,1 | 20,8 | 290 | 0,00279 | 313 | 0,00213 |
| | 47 | | 4,7 * zyk.Bel. = | 734 | 367 | 815 | 31,6 | 21,3 | 293 | 0,00290 | 314 | 0,00218 |
| | 48 | | 4,8 * zyk.Bel. = | 750 | 375 | 831 | 32,1 | 21,8 | 297 | 0,00301 | 316 | 0,00224 |
| | 49 | | 4,9 * zyk.Bel. = | 766 | 383 | 847 | 32,6 | 22,3 | 300 | 0,00312 | 318 | 0,00230 |
| | 50 | | 5,0 * zyk.Bel. = | 781 | 391 | 862 | 33,1 | 22,8 | 304 | 0,00324 | 320 | 0,00237 |

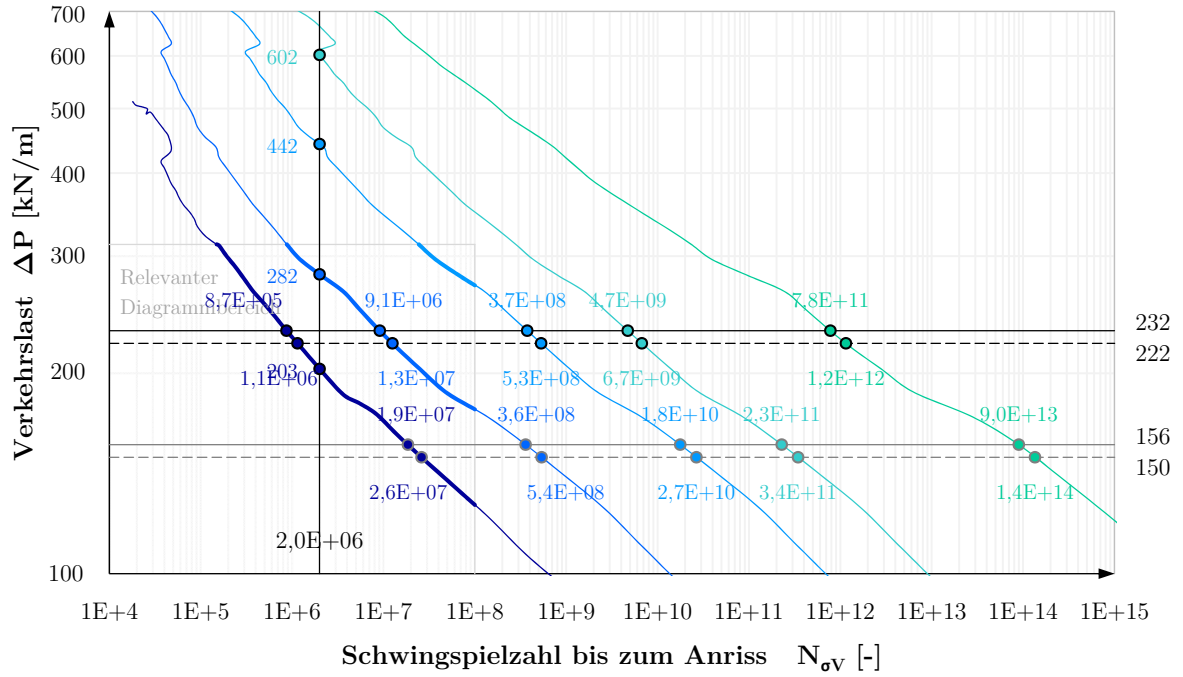
C.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des Modells *TYP 10*

Anhang D - Wöhlerlinien



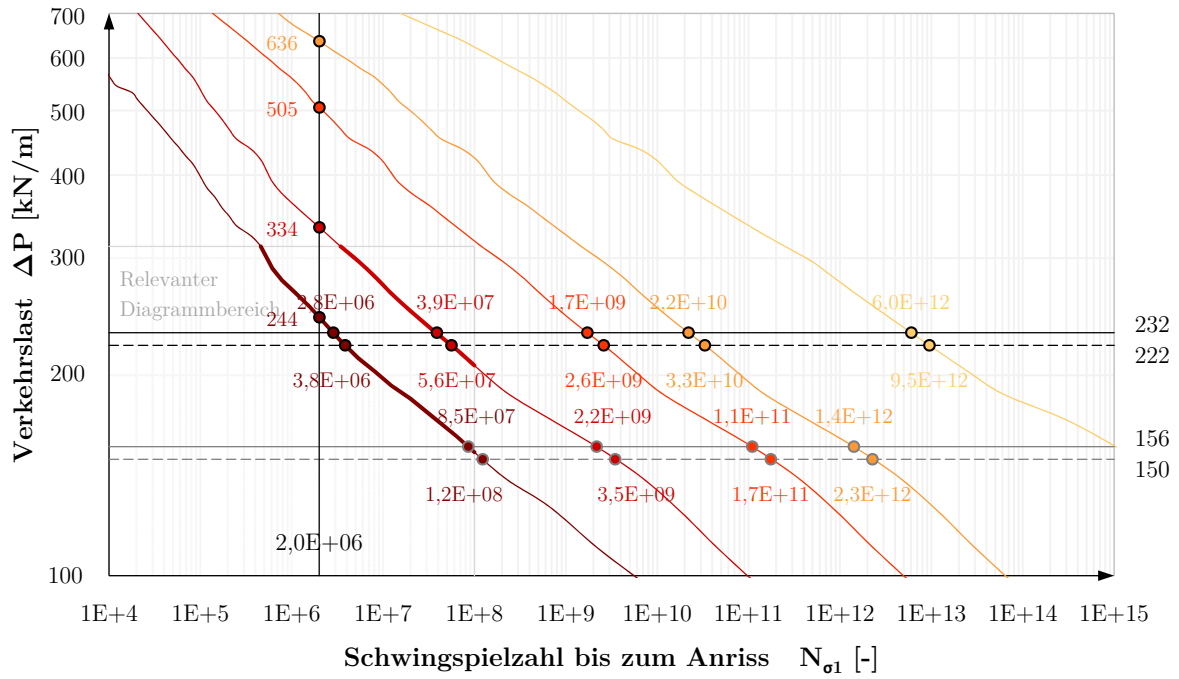
- Wöhlerlinie N_{σ1}
- Wöhlerlinie N_{PSWT,σ1}
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,σ1}
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,Pü97.5,σ1}
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,Pü97.5,γMf,σ1}
- ΔP = LM71: Längswirkung□, Beiwerte☑
- ΔP = LM71: Längswirkung☑, Beiwerte☑
- ΔP = LM71: Längswirkung□, Beiwerte□
- ΔP = LM71: Längswirkung☑, Beiwerte□
- N = 2 · 10⁶

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl N_{σ1}
Modell TYP 1



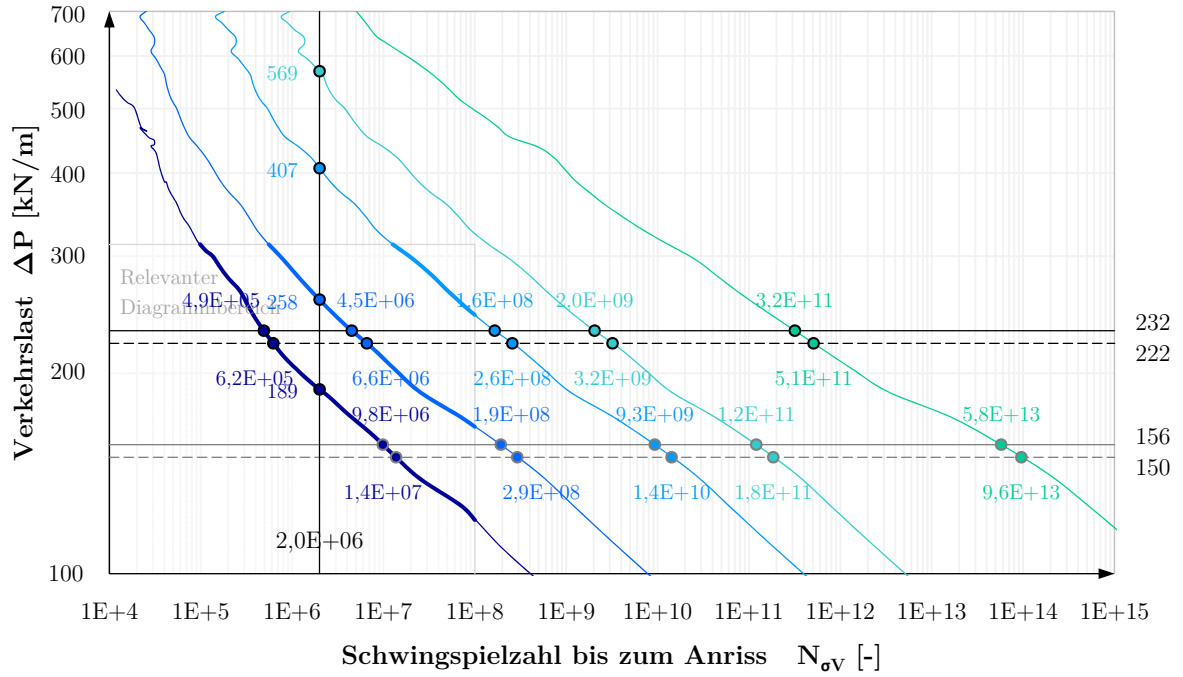
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97,5,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97,5,\text{yMf},\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingenzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 1



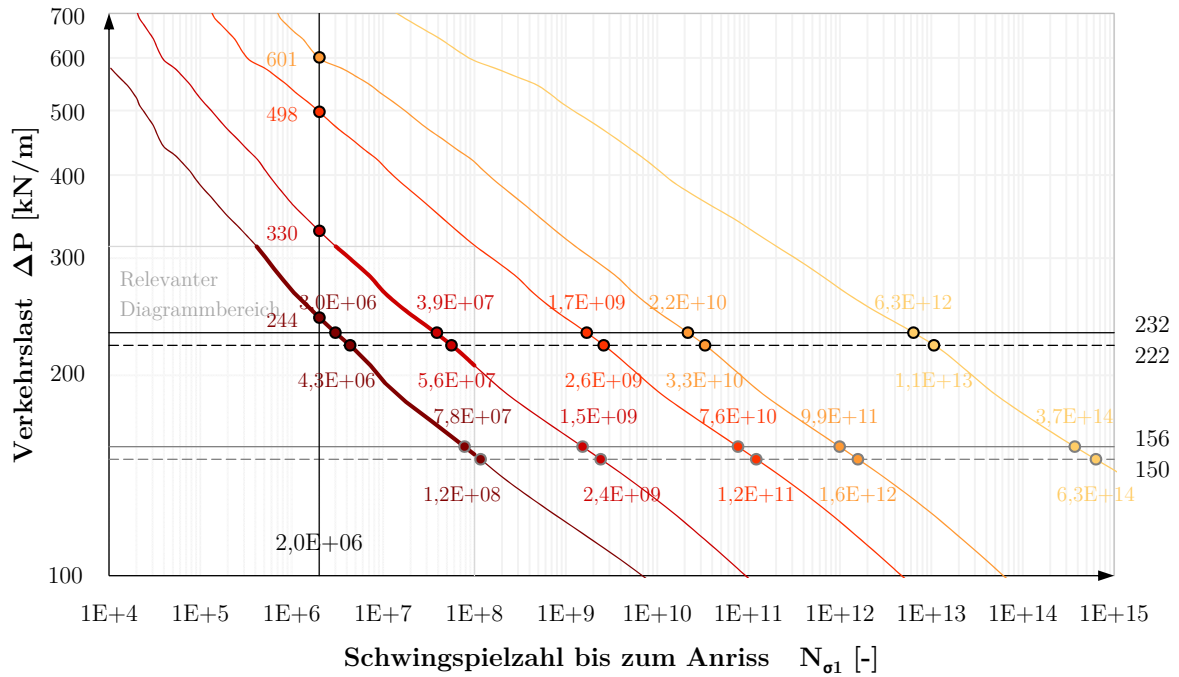
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 2



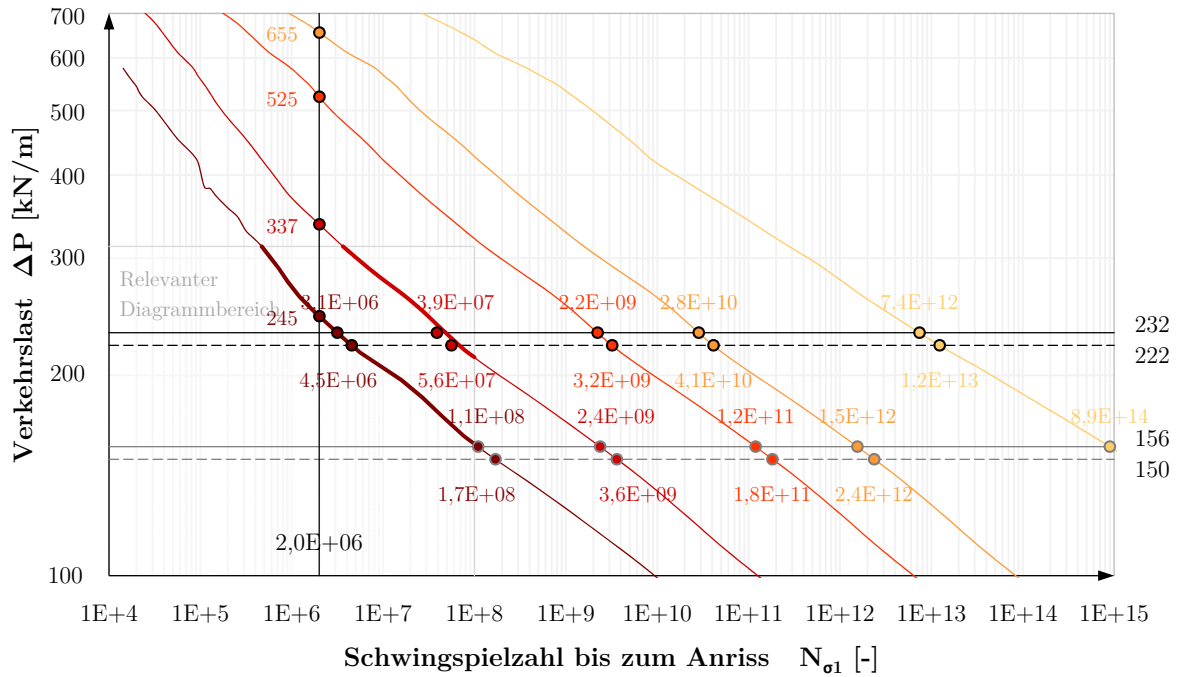
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\text{yMf},\sigma V}$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingenzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 2



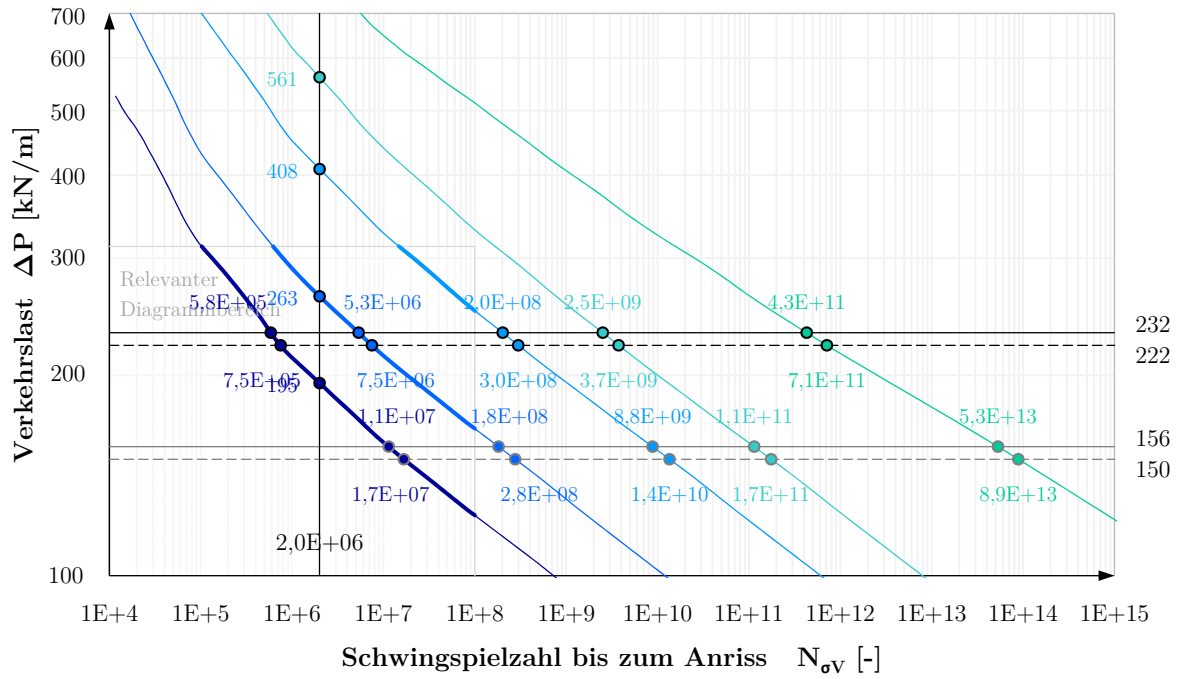
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma 1}$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma 1}$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{P}\ddot{u}97,5,\sigma 1}$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{P}\ddot{u}97,5,\gamma\text{Mf},\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung}\square, \text{Beiwerte}\square$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung}\square, \text{Beiwerte}\square$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung}\square, \text{Beiwerte}\square$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung}\square, \text{Beiwerte}\square$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 3



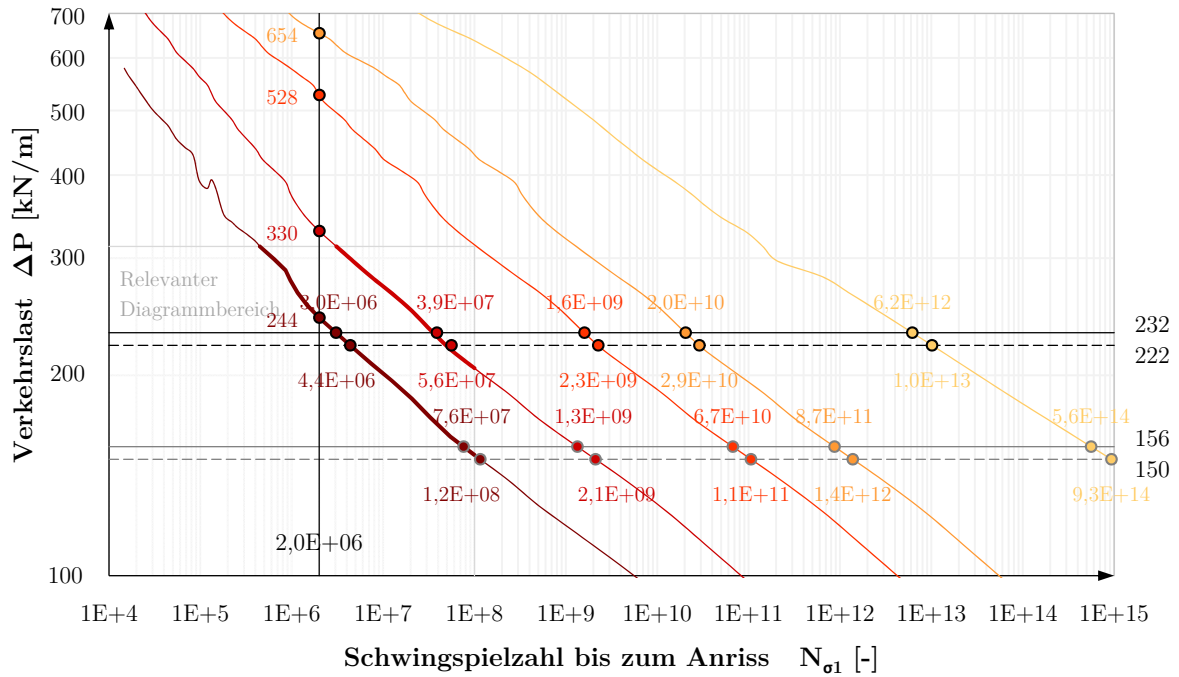
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$ — $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$ - - - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$ — $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{Pü}97.5, \sigma 1}$ - - - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{Pü}97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$ — $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 4



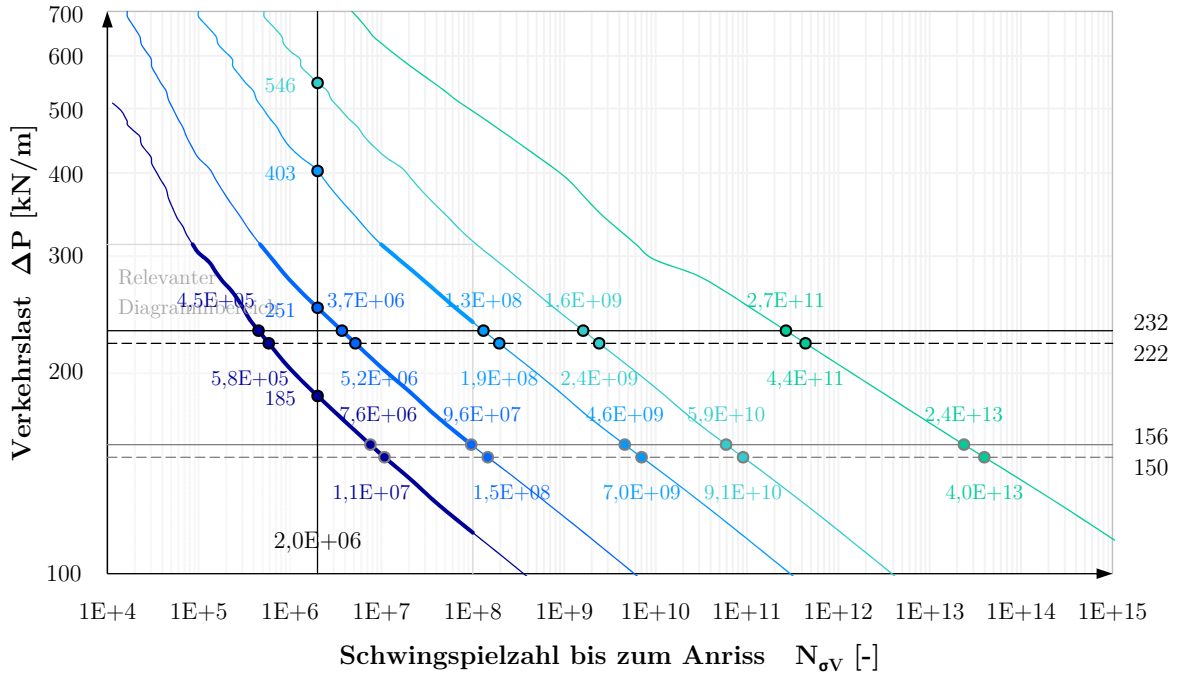
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\text{yMf},\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 4



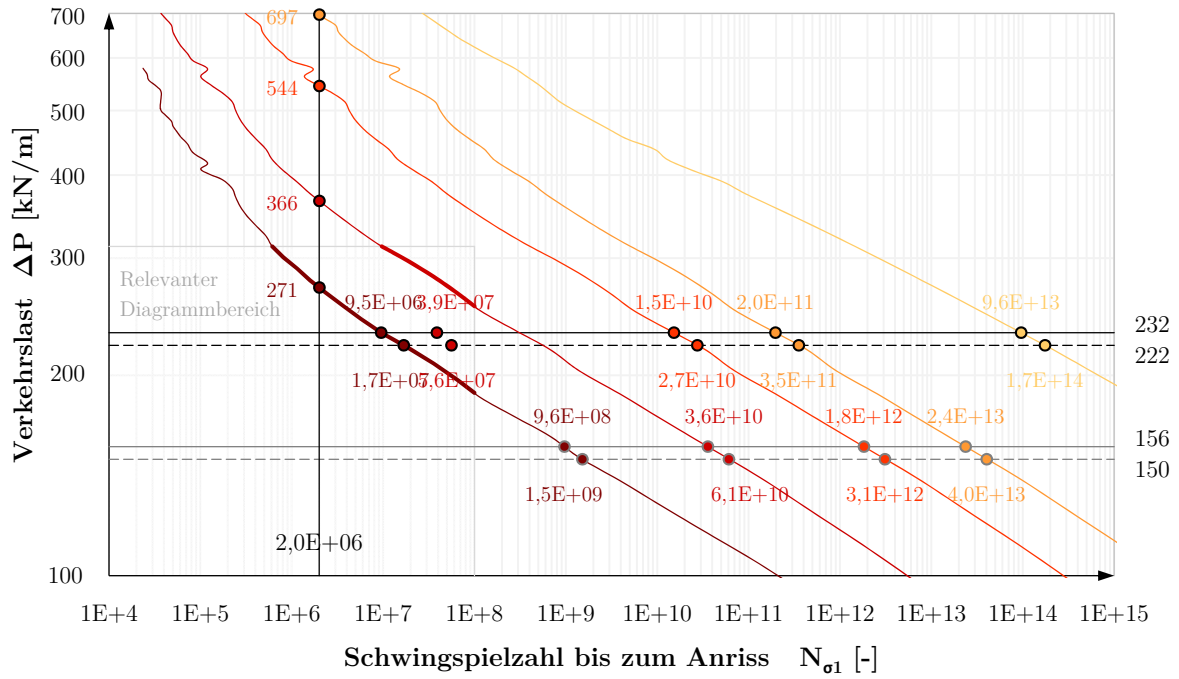
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$ — $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$ - - - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$ — $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, P \ddot{u} 97,5, \sigma 1}$ - - - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, P \ddot{u} 97,5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$ — $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 5



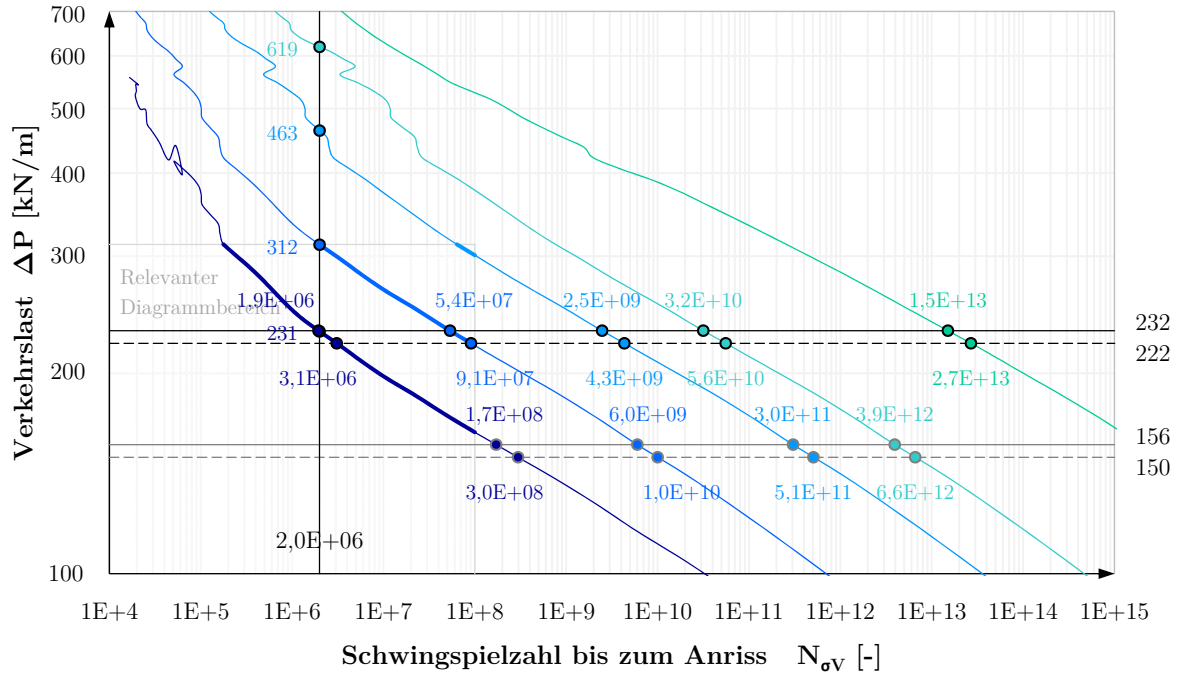
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{Pi}97.5, \sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{Pi}97.5, \text{yMf}, \sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 5



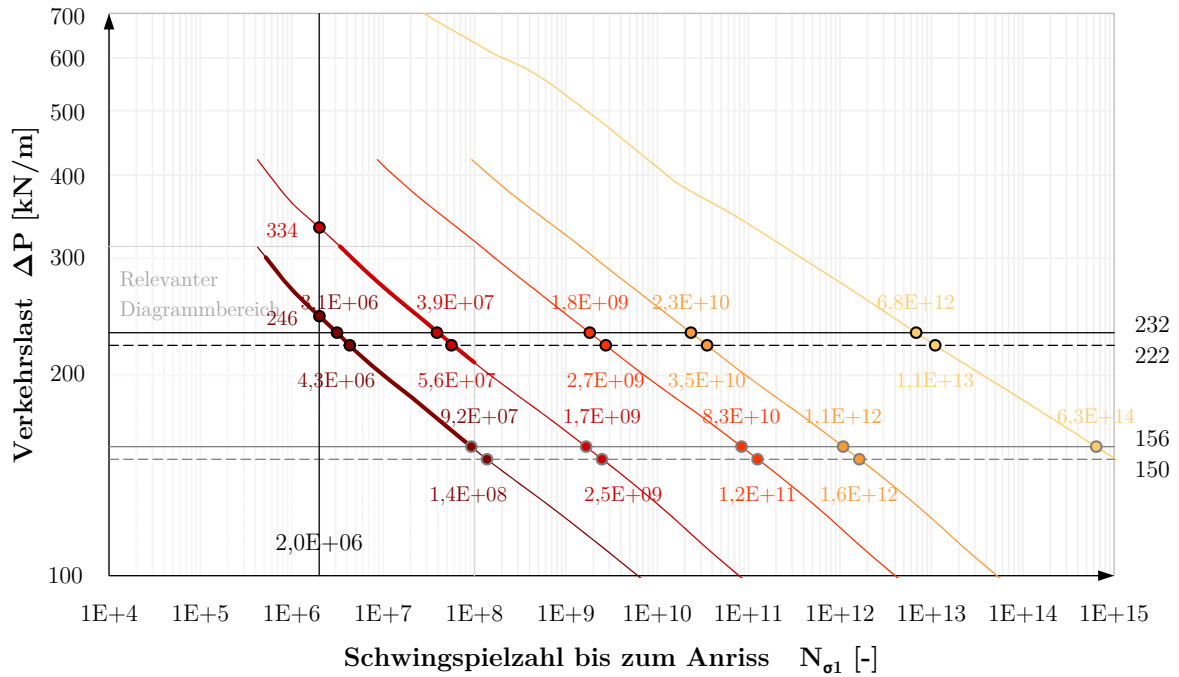
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$ — $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$ - - - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$ — $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, P \ddot{u} 97.5, \sigma 1}$ - - - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, P \ddot{u} 97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$ — $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 6



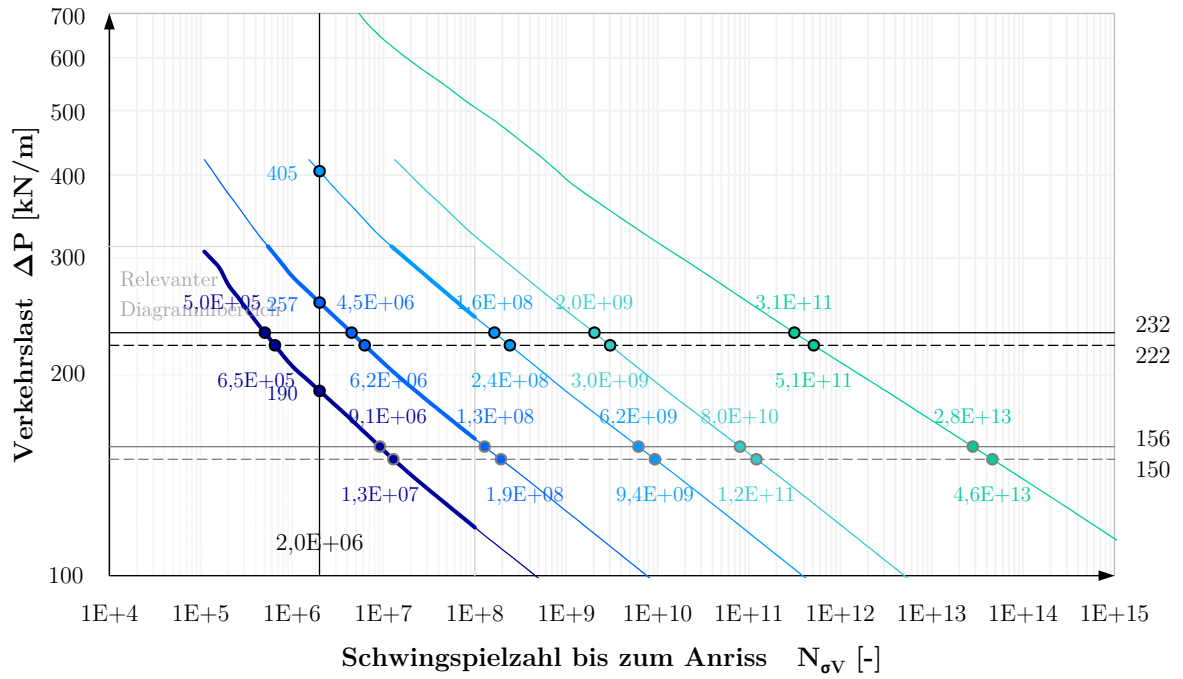
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\text{yMf},\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 6



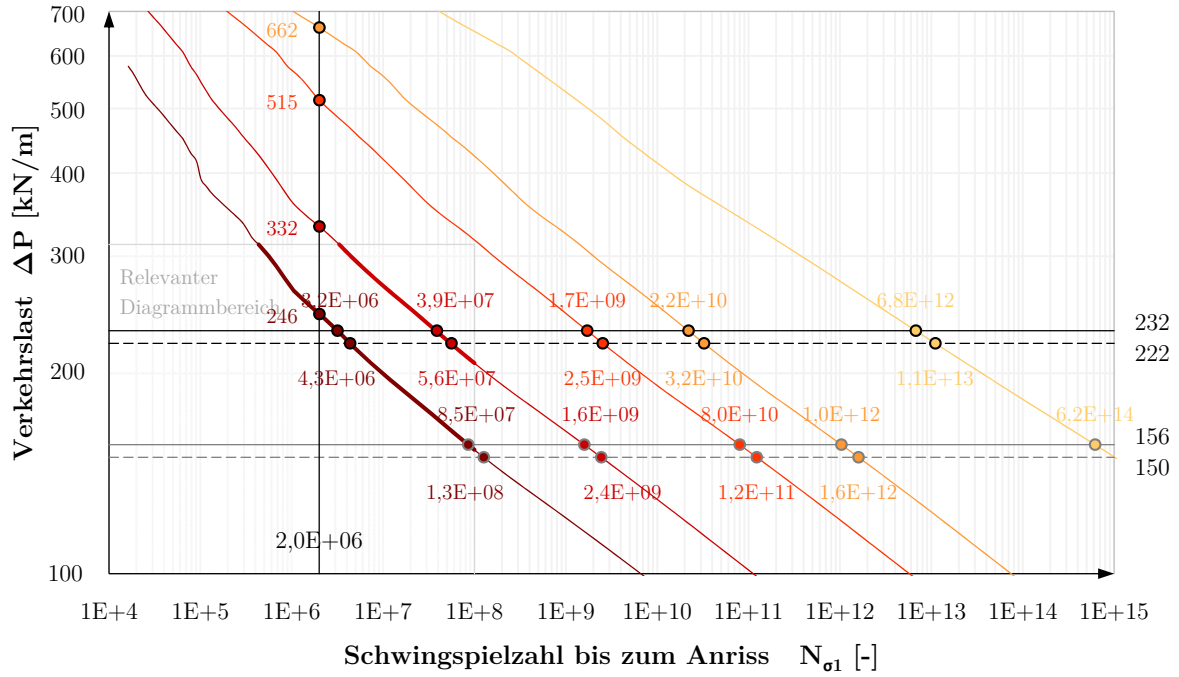
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, P \ddot{u} 97,5, \sigma 1}$
- - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, P \ddot{u} 97,5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 7



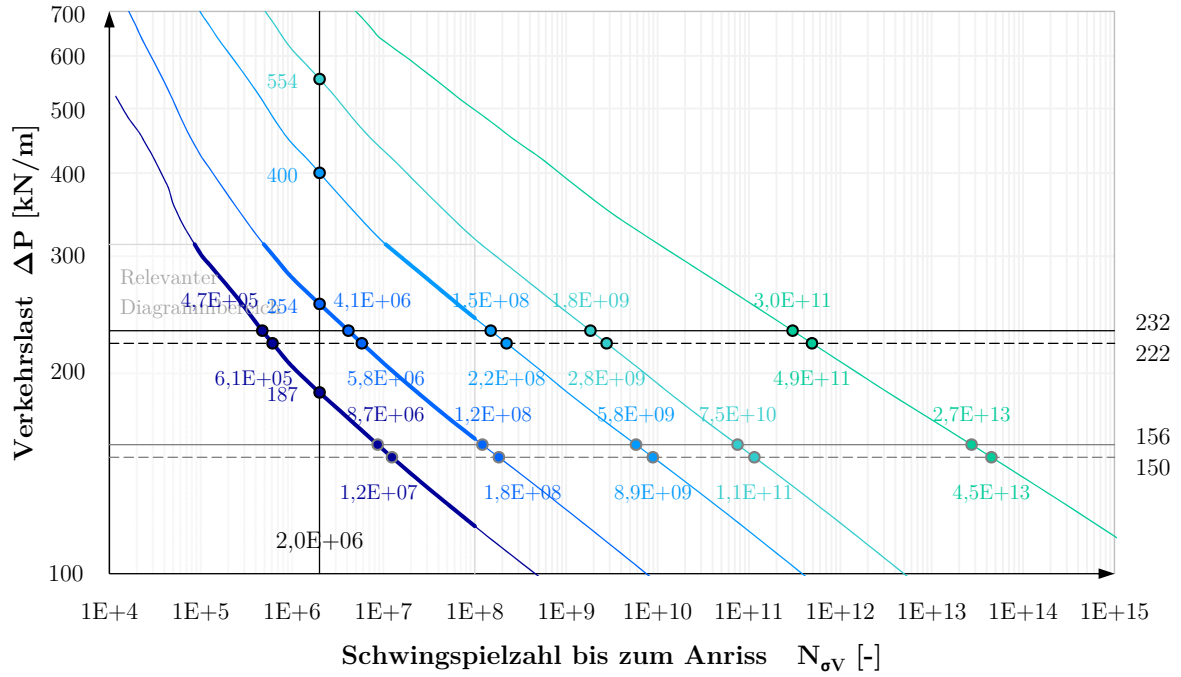
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\text{Pi}97,5,\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\text{Pi}97,5,\text{yMf},\sigma V}$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 7



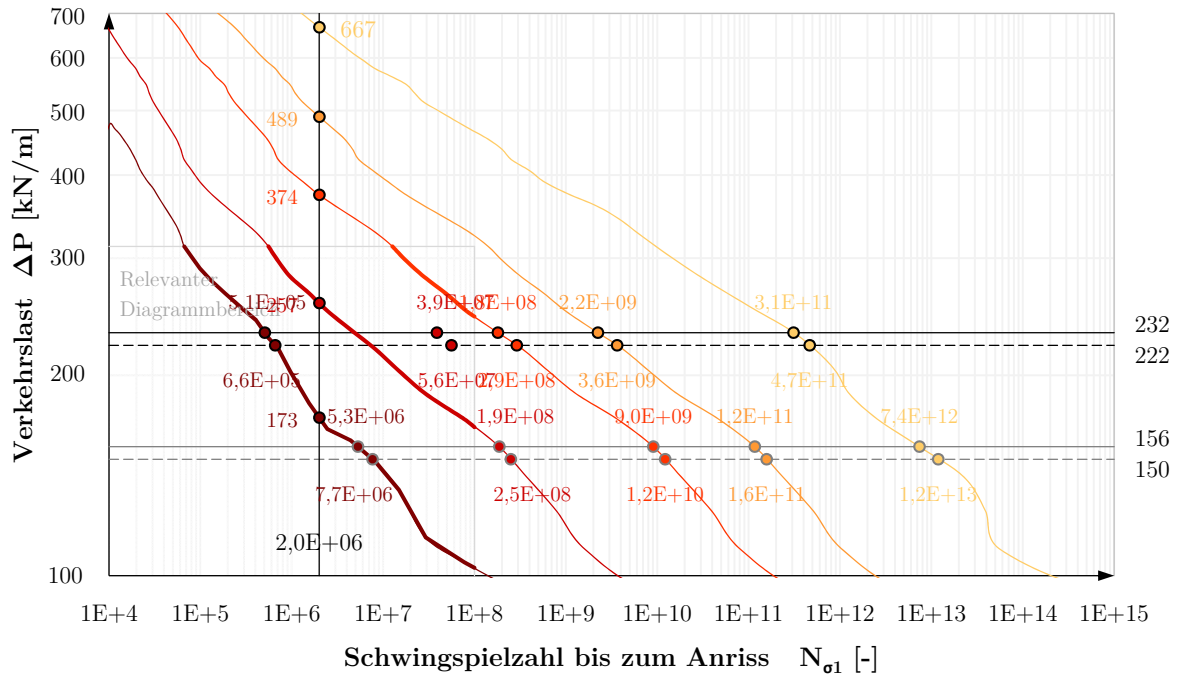
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 8



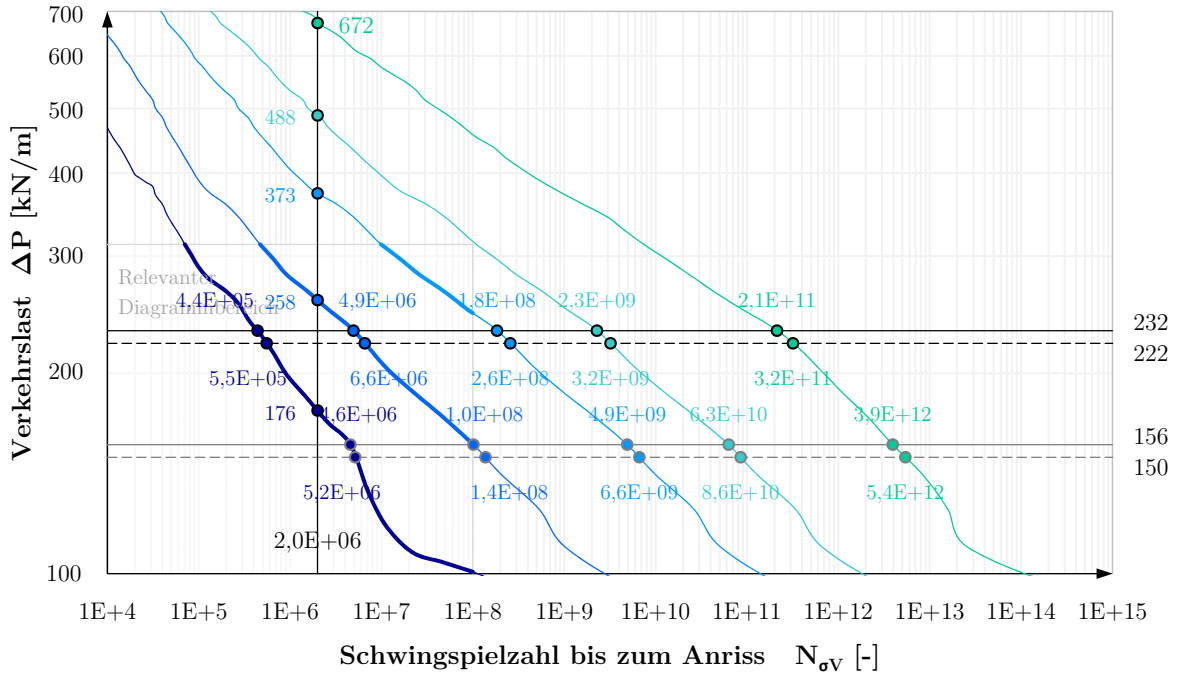
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97,5,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97,5,\text{yMf},\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 8



- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97,5, \sigma 1}$
- - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97,5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 9



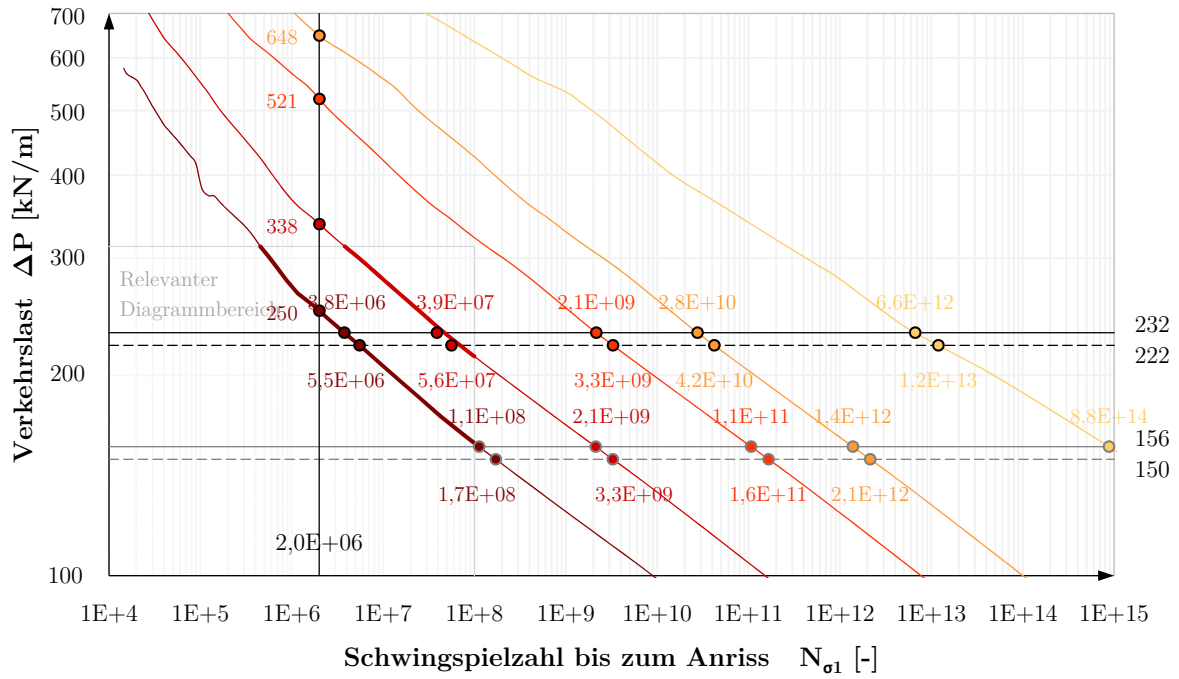
- Wöhlerlinie N_{σV}
- Wöhlerlinie N_{PSWT,σV}
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,σV}
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,Pii97.5,σV}
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,Pii97.5,yMf,σV}
- ΔP = LM71: Längswirkung □, Beiwerte ☑
- ΔP = LM71: Längswirkung ☑, Beiwerte ☑
- ΔP = LM71: Längswirkung □, Beiwerte □
- ΔP = LM71: Längswirkung ☑, Beiwerte □
- N = 2 · 10⁶

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingenspielzahl N_{σV}
Modell TYP 9



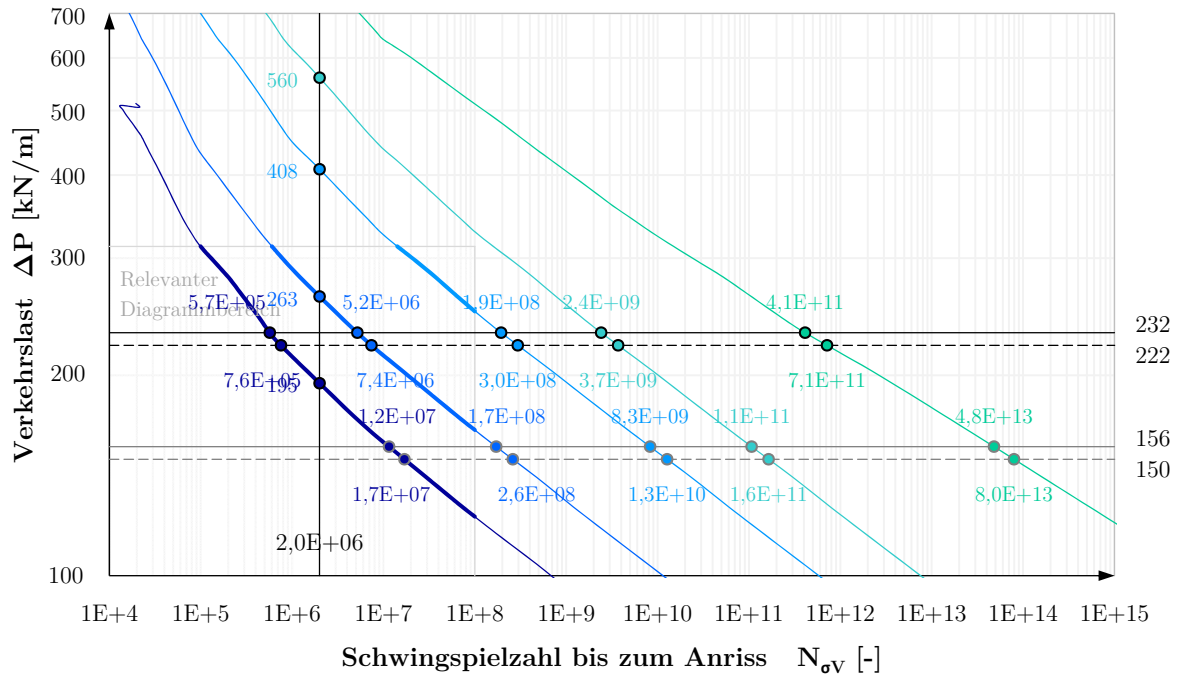
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 11



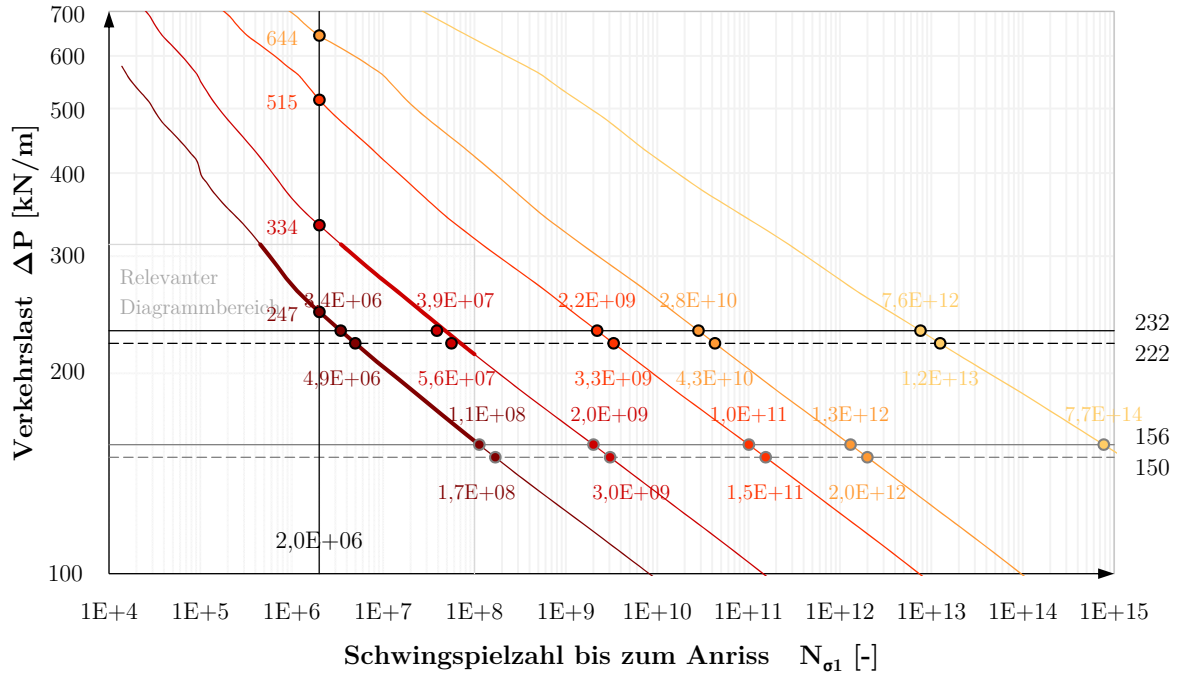
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte \square
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte \square
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte \square
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{Pü}97.5, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte \square
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{Pü}97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte \square
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 12



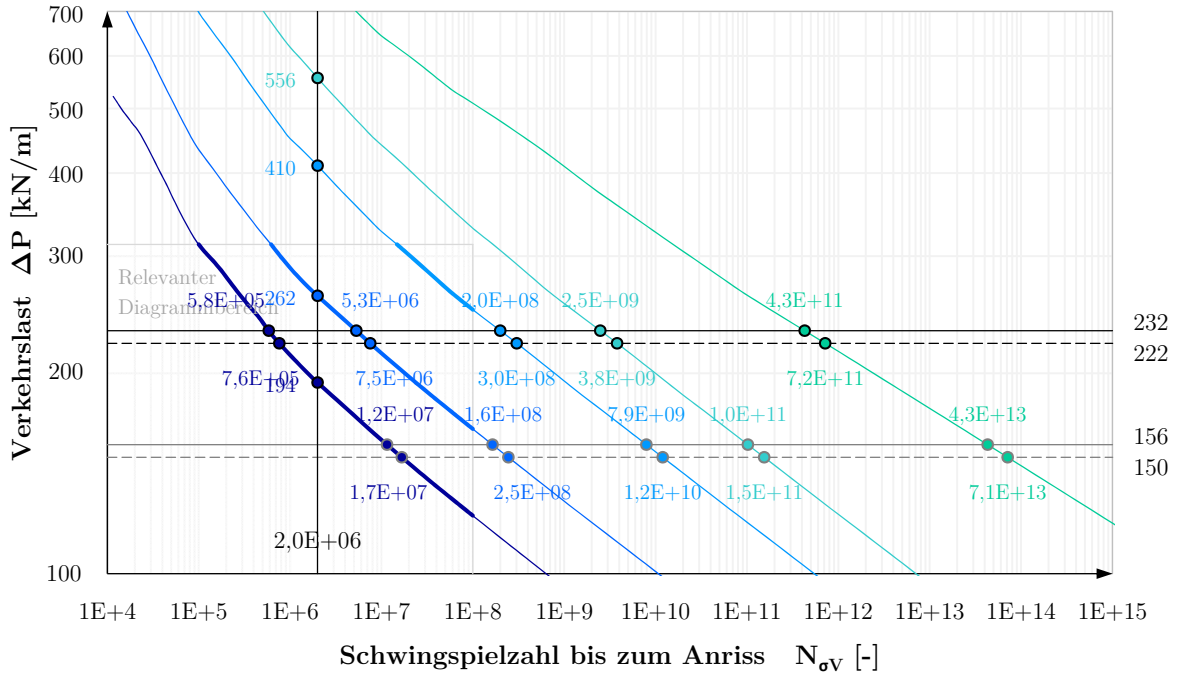
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\text{yMf},\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingenzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 12



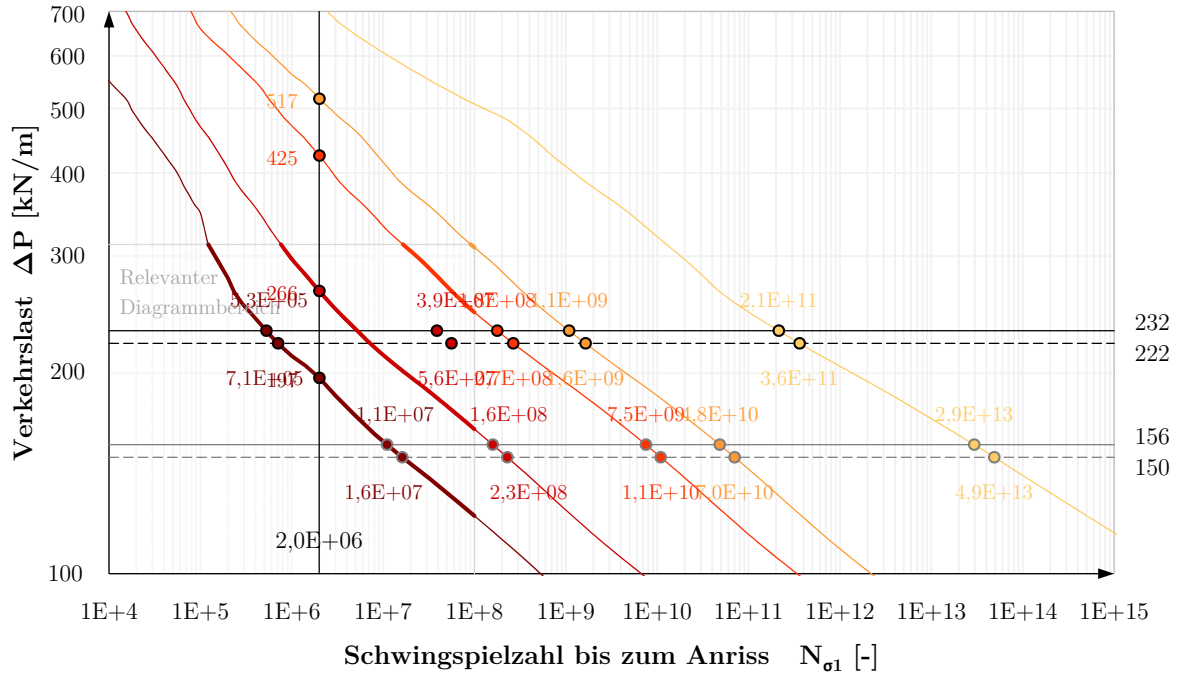
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma 1}$
- - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{P}\ddot{u}97.5,\sigma 1}$
- - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{P}\ddot{u}97.5,\gamma\text{Mf},\sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP 13



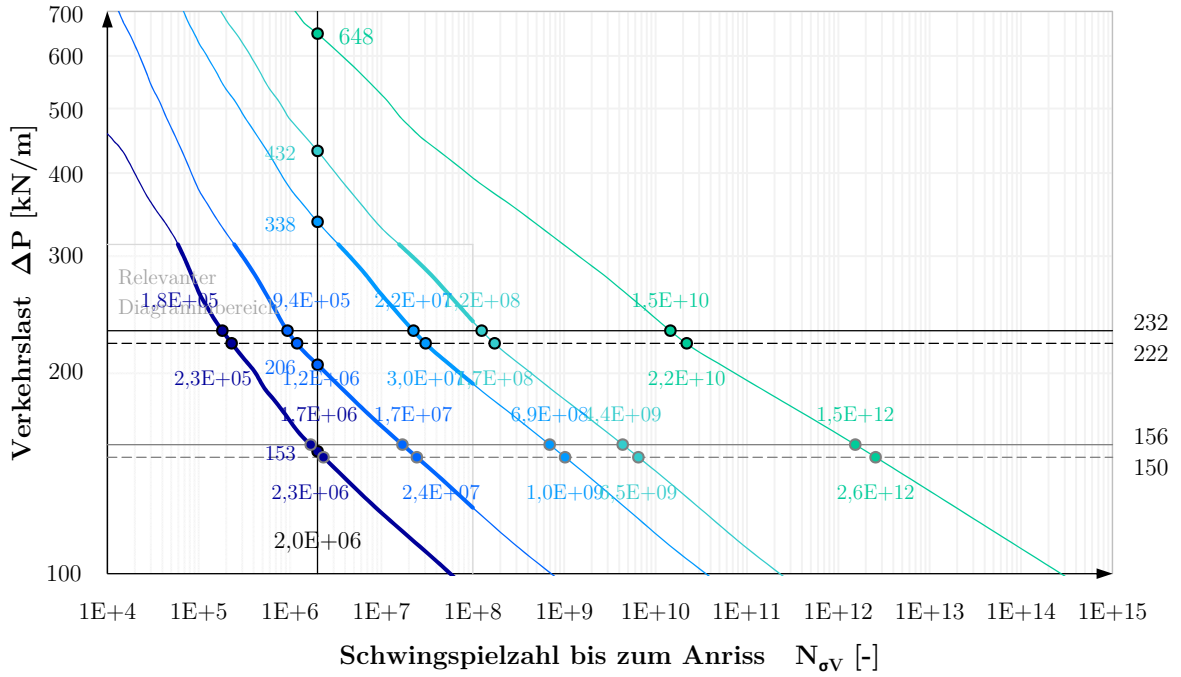
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \checkmark$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\sigma V}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \checkmark, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT},\kappa,\text{Pi}97.5,\text{yMf},\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP 13



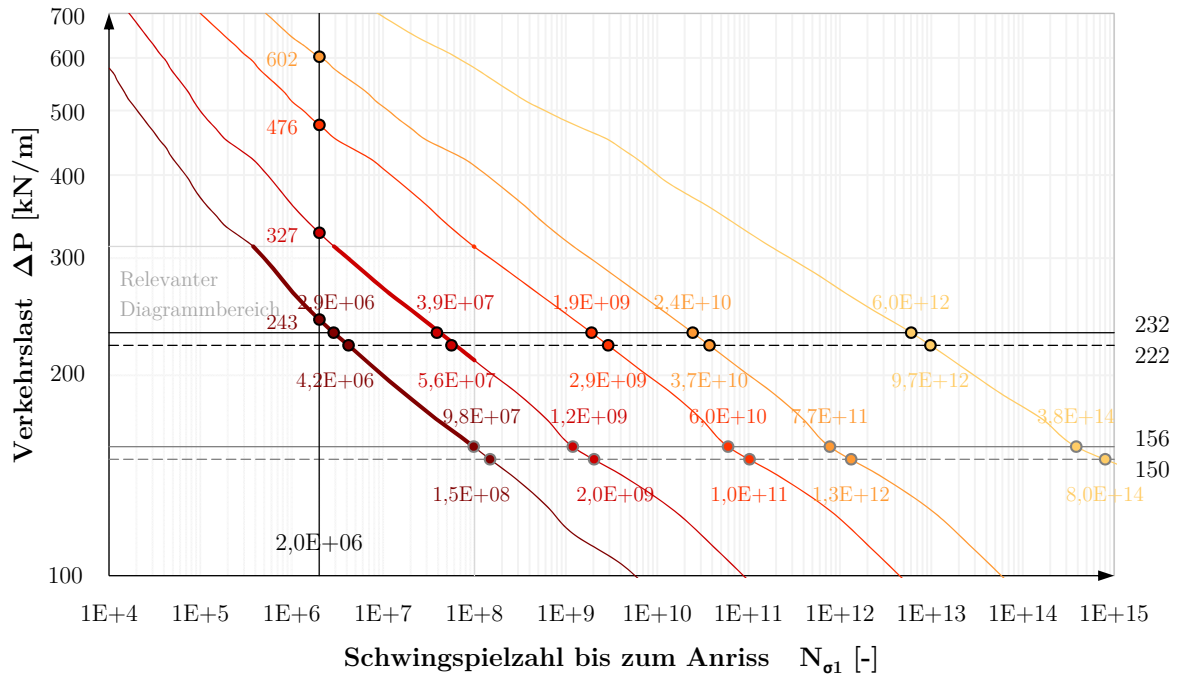
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \sigma 1}$
- - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP A



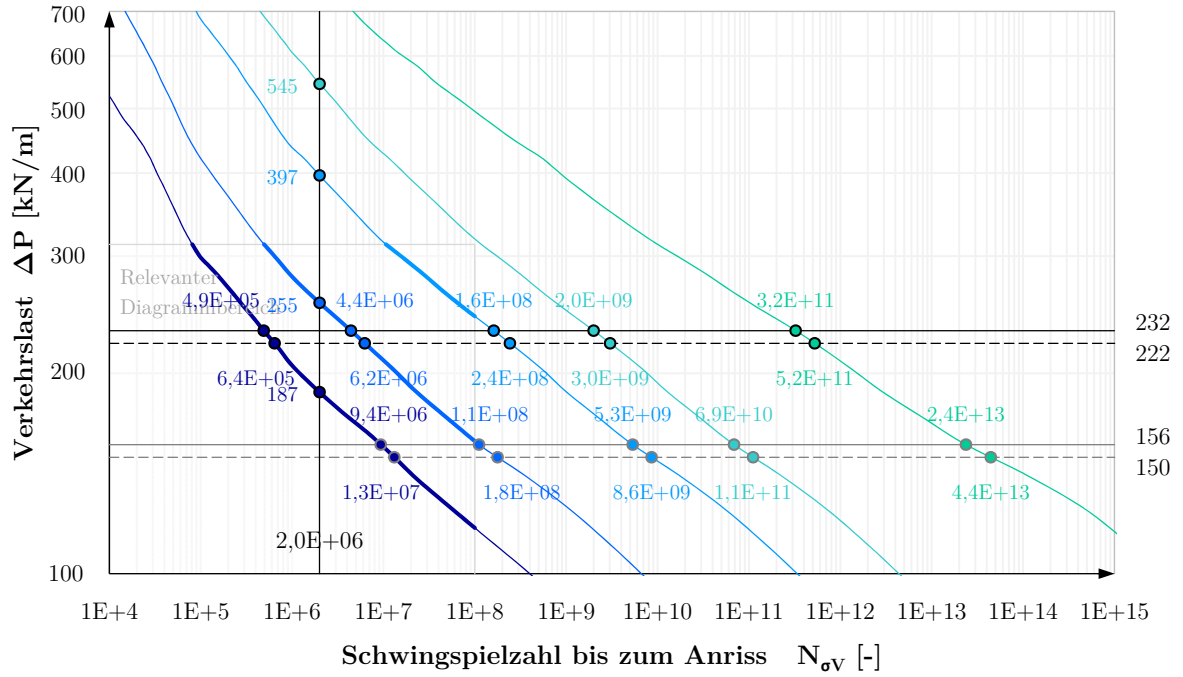
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,\sigma V}$
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,\sigma V}$
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,PI97.5,\sigma V}$
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,PI97.5,yMf,\sigma V}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingenzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP A



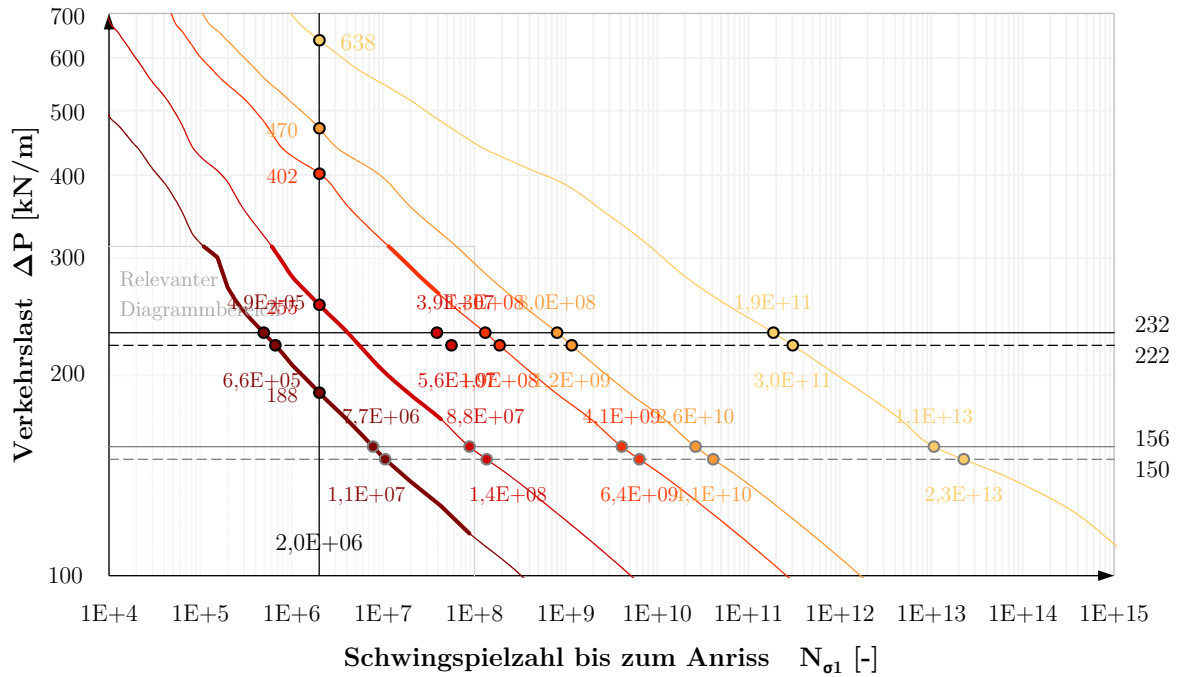
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,\sigma 1}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma 1}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$
- $\Delta P = LM71: \text{Längswirkung}\square, \text{Beiwerte}\square$
- $\Delta P = LM71: \text{Längswirkung}\square, \text{Beiwerte}\square$
- $\Delta P = LM71: \text{Längswirkung}\square, \text{Beiwerte}\square$
- $\Delta P = LM71: \text{Längswirkung}\square, \text{Beiwerte}\square$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP B



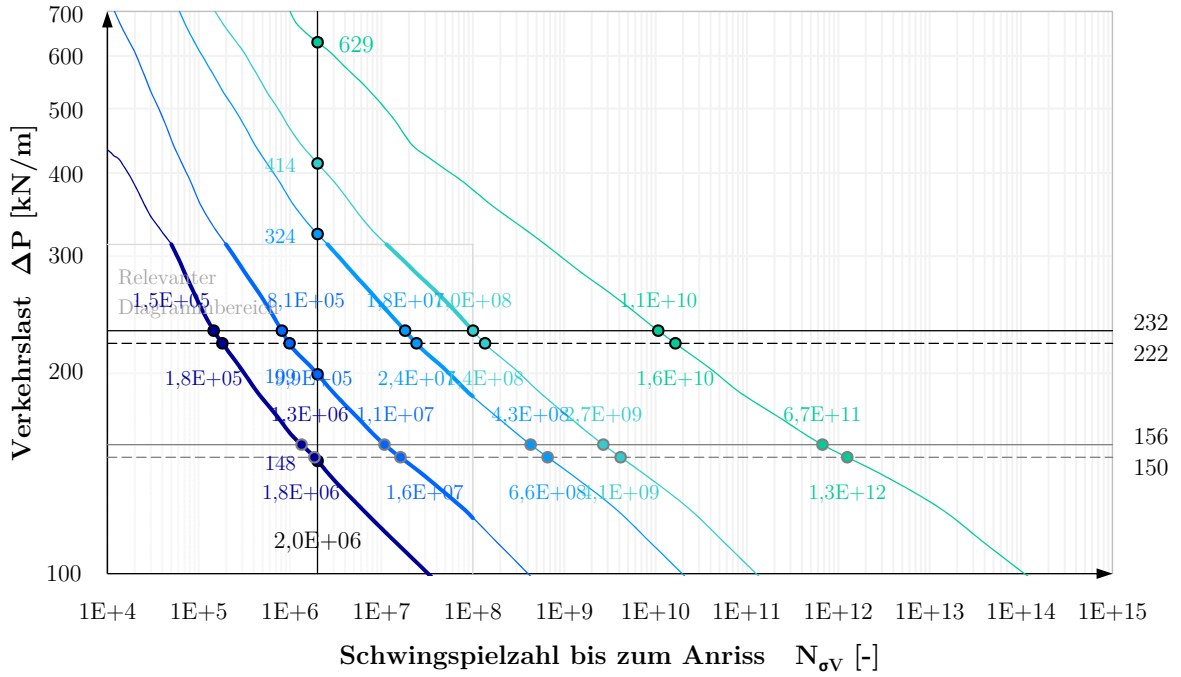
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,Pi97.5,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,Pi97.5,yMf,\sigma V}$
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- - - - $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- - - - $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP B



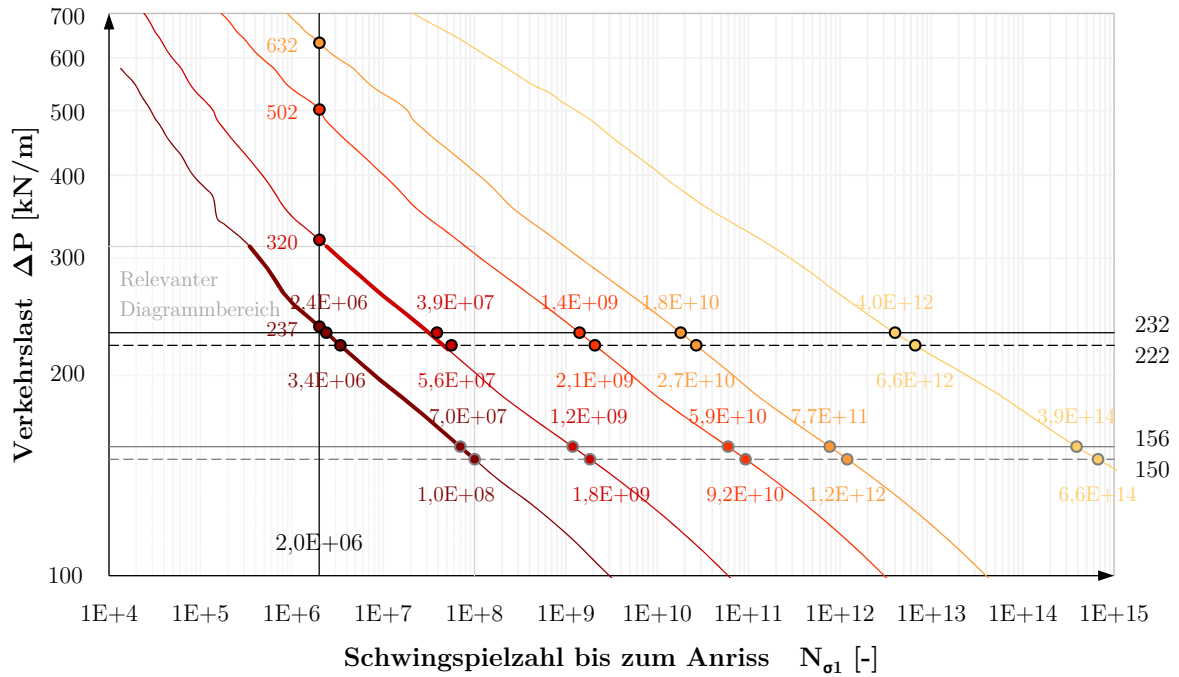
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP C



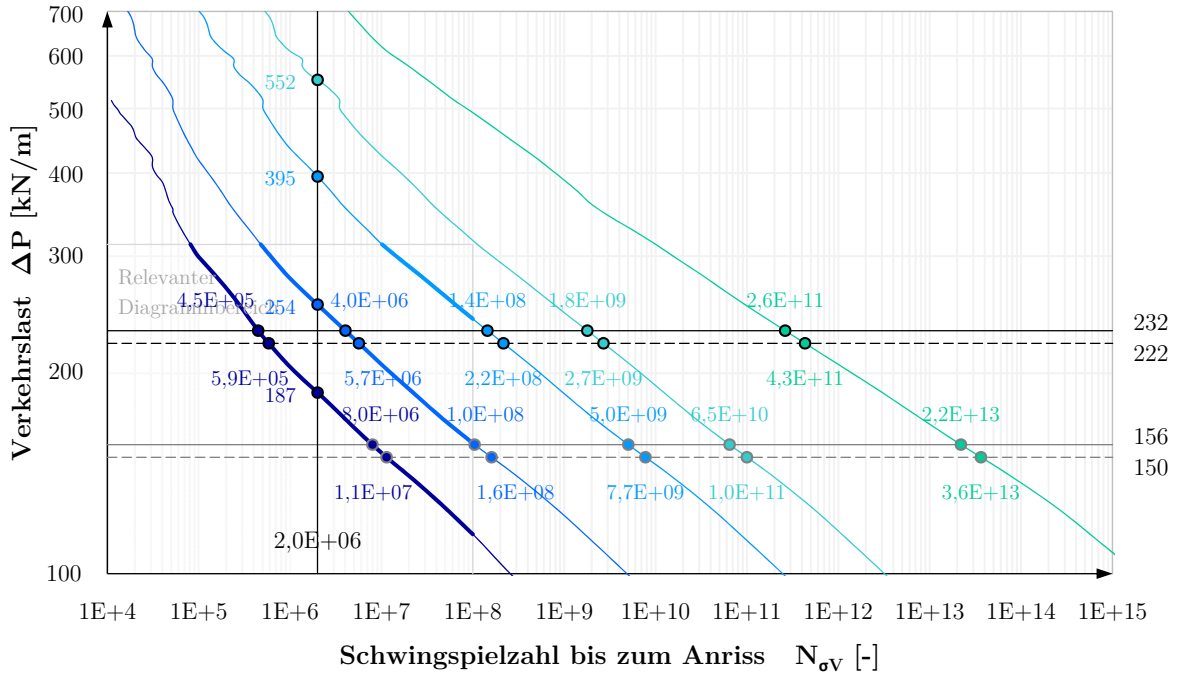
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,PI97.5,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,PI97.5,yMf,\sigma V}$
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP C



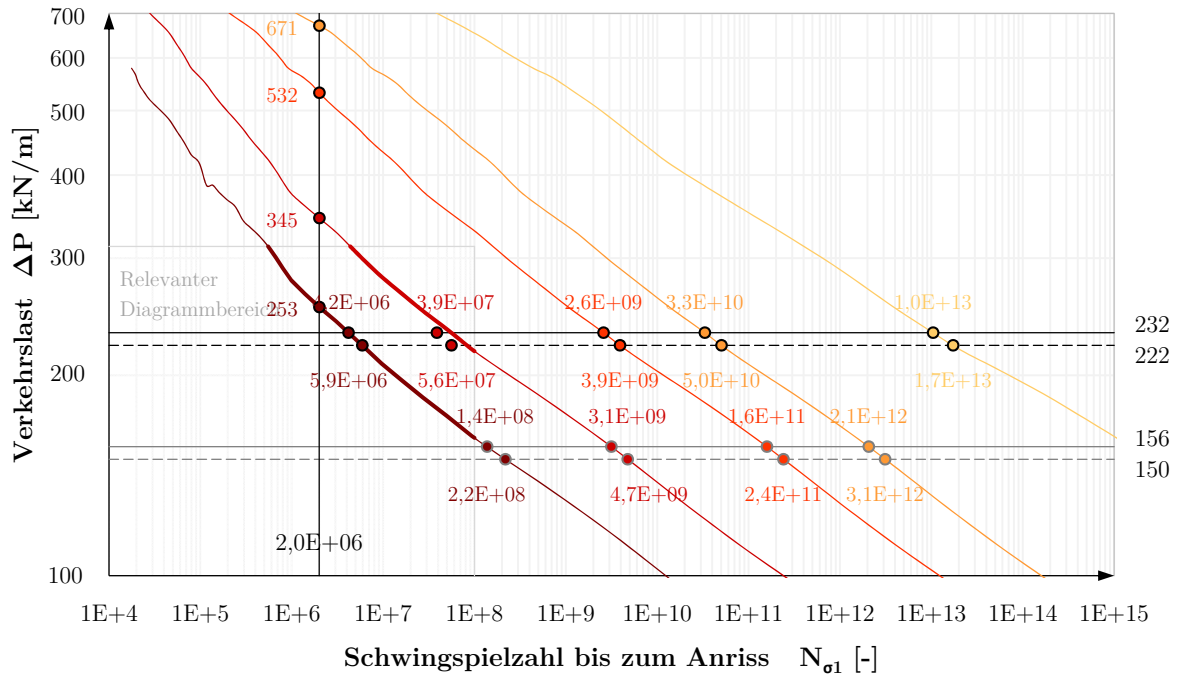
- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \sigma 1}$
- $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square, \text{Beiwerte} \square$
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP D



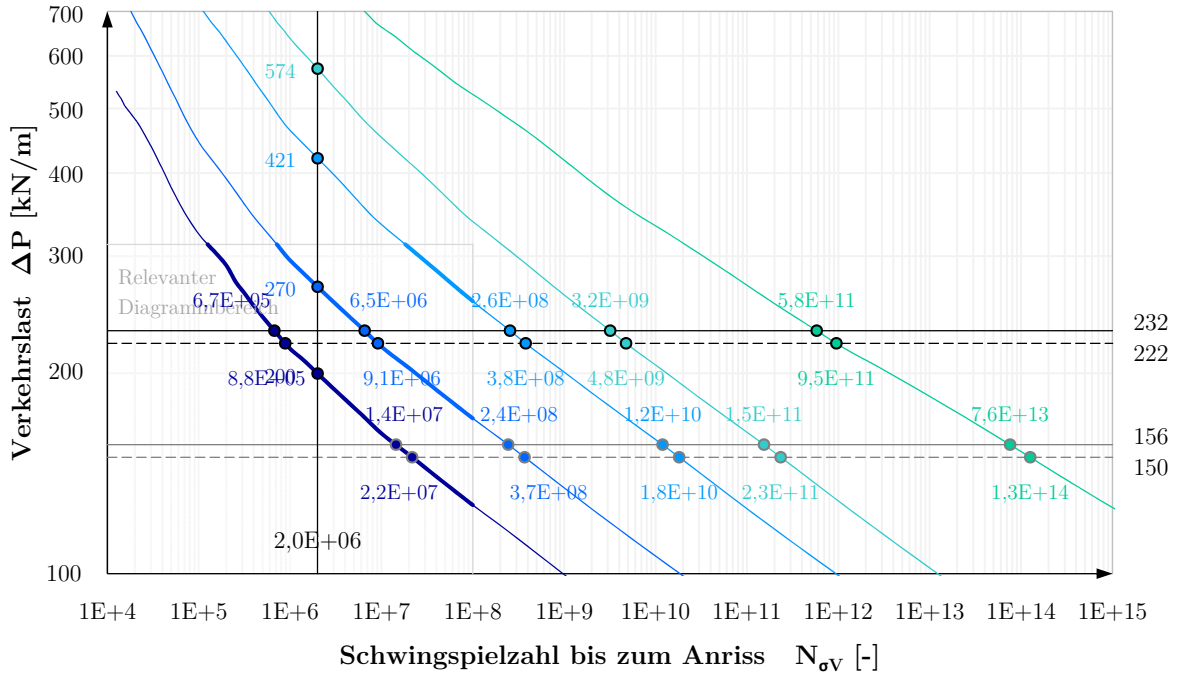
- Wöhlerlinie $N_{\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,Pi97.5,\sigma V}$
- Wöhlerlinie $N_{PSWT,k,Pi97.5,yMf,\sigma V}$
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- - - - $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- - - - $\Delta P = LM71$: Längswirkung , Beiwerte
- $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma V}$
Modell TYP D



- Wöhlerlinie $N_{\sigma 1}$ — $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \sigma 1}$ - - - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \sigma 1}$ — $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \sigma 1}$ - - - - $\Delta P = \text{LM71: Längswirkung} \square$, Beiwerte
- Wöhlerlinie $N_{\text{PSWT}, \kappa, \text{P} \ddot{u} 97.5, \gamma \text{Mf}, \sigma 1}$ — $N = 2 \cdot 10^6$

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl $N_{\sigma 1}$
Modell TYP E



- Wöhlerlinie N_{σV}
- ΔP = LM71: Längswirkung , Beiwerte
- Wöhlerlinie N_{PSWT,σV}
- ΔP = LM71: Längswirkung , Beiwerte
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,σV}
- ΔP = LM71: Längswirkung , Beiwerte
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,Pii97.5,σV}
- ΔP = LM71: Längswirkung , Beiwerte
- Wöhlerlinie N_{PSWT,κ,Pii97.5,yMf,σV}
- N = 2 · 10⁶

Wöhlerlinien:
Belastungsschwingbreite ΔP – Schwingspielzahl N_{σV}
Modell TYP E