

Diploma Thesis

Stiffnessanalysis of pavement layers from backcalculation software based on Falling Weight Deflectometer Measurements

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Steifigkeitsanalyse von Oberbauschichten aus Rückrechnungsprogrammen von Fallgewichtdeflektometermessungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Stefan Hofbauer, BSc

Matr.Nr.: 01608686

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Ronald Blab**

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Lukas Eberhardsteiner**, BSc

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E230-03, 1040 Wien, Österreich

Wien, im September 2021



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Fallgewichtsdeflektometermessungen (FWD-Messungen) sind die am weitesten verbreitete Methode, den aktuellen strukturellen Zustand eines Straßenaufbaus zu bewerten, und bilden einen elementaren Bestandteil des Pavement Management Systems (PMS) auf nationaler und internationaler Ebene. Nach den abgeschlossenen FWD-Messungen gibt es zahlreiche Möglichkeiten der Auswertung [5, 6], das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der Rückrechnung von Schichtsteifigkeiten mittels Softwarelösungen. Diesen liegen analytische Formelwerke [3, 4] oder moderne numerische Ansätze (Finite Elemente Methode (FEM)) zugrunde.

Wertet man FWD-Messung mehrmals mit unterschiedlichen Programmen aus, ist es nicht selten, dass die Ergebnisse voneinander abweichen. Die Anwendung erfordert deshalb viel Erfahrung mit dem Programm selbst und setzt in vielen Fällen eine Erwartungshaltung an die Ergebnisse voraus. Eine Validierung erfolgt in der Praxis oftmals durch Plausibilitätskontrollen des Ingenieurs. Man läuft also Gefahr, den strukturellen Zustand der Straße zu missinterpretieren. Hinzu kommt, dass selten ausreichend Wissen über die Bedingungen, Schichtdicken und Materialien vorhanden ist und weitere Ungenauigkeiten in Form von Annahmen getroffen werden müssen. Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der Zuverlässigkeit zweier Softwarelösungen anhand eigens dafür installierter Feldmessstellen (FMS). An diesen wurden im Zuge der Errichtung sämtliche Bestandsaufnahmen erhoben, um Unbekannte zu minimieren. Seit der Fertigstellung wurden in regelmäßigen Abständen, bei unterschiedlichen Temperaturbedingungen, an derselben Stelle FWD-Messungen durchgeführt. Die Berechnung erfolgt dennoch möglichst unvoreingenommen. Jede FMS ist zur Validierung der FWD-Ergebnisse mit einer Vielzahl an Sensoren ausgestattet. Verglichen werden die aus den Programmen rückgerechneten Steifigkeiten untereinander sowie mit den Ergebnissen von Vierpunkt-Biegeprüfungen (4PB-Pr) für Asphalt, Steifigkeitsprüfungen des Betons und der in den FMS verbauten Sensorik. Betrachtet wird eine Feldmessstelle mit Asphaltdecke der Bautype AS4 sowie eine Zweite mit einer Betondecke der Bautype BE2.

Nach der Auswertung von 251 FWD-Messung mit den Programmen ELMOD und BAKFAA kann gesagt werden, dass ELMOD mit zufriedenstellender Genauigkeit und Konstanz Schichtsteifigkeiten rückrechnen kann. Dasselbe kann über BAKFAA nicht gesagt werden. Große Schwankungen zwischen direkt aufeinanderfolgenden Messungen, unplausible Ergebnisse sowie die schwierige Handhabung des Programmes sind negative Merkmale. Positiv zu nennen ist die kostenfreie Nutzbarkeit von BAKFAA und mit Fachwissen und Erfahrung in der Thematik der Steifigkeitsanalyse aus FWD-Messung können die Rückrechnungsergebnisse dennoch Anwendung finden. Denn auch die Anwendung von ELMOD liefert keine eindeutig richtigen Ergebnisse, auch hier ist Fachwissen erforderlich.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Falling Weight Deflectometer Measurements are the most common method to analyze and judge the structural integrity of road structures. They are key for a functioning Pavement Management System and are used on a national and international level. There are several ways to interpret FWD-Measurements [5, 6], the focus of this work lies on the backcalculation of moduli with the help of computational software. Based on proven but dated analytical theories [3, 4] or modern numerical approaches (Finite Elements Method (FEM)) the software interprets the stiffness of each pavement layer in accordance to the measured deflection basin.

Often the results of the same FWD-Measurement differ with different backcalculation-software. The interpretation of results is therefore tied knowledge of the software itself as well as expertise in the field of pavement evaluation. Main indicator for a correct result is commonly an expected moduli based on conditions that may not even apply at the measured road due to lack of knowledge about its conditions. Unknown factors can be the structural design of the road and their materials or climate conditions, which may contribute to a falsely interpreted structural pavement state. The objective of this paper is to analyze the reliability of two backcalculation applications based on FWD-Measurements at field-testing sites. Each site is built with an array of acceleratory sensors, strain gauges and temperature sensors in each layer to register and record the impact of the load during testing. To minimize variables the thickness of each layer was documented and their material behavior was evaluated in the laboratory. Since then, FWD-Measurements have been conducted periodically at different temperatures and their backcalculation results were compared with the sensor data as well as the laboratory results. Two field testing sites were reviewed, one with an asphalt concrete topping (type AS4 of the Austrian Standard [20]), the other with a plain cement concrete topping (type BE2 [20]).

Evaluating 251 FWD-Measurements with ELMOD and BAKFAA concluded that ELMODs backcalculated moduli are adequately accurate as well as sufficiently consistent. BAKFAAs calculations on the other hand fluctuate noticeably and are often not plausible and its useability is lackluster. With experience in the topic of pavement analysis, the results can still be used to gain information of the status of the pavement's structure. Its availability as freeware is very beneficial.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Tragfähigkeitsmessung	9
1.1.1	Fallgewichtdeflektometer	10
2	Feldmessstellen	12
2.1	Sensoren	12
2.1.1	Beschleunigungssensor	12
2.1.2	Dehnungsaufnehmer	13
2.1.3	Temperatursensor	13
2.2	Feldmessstelle mit Betondecke der Bautype BE2	13
2.3	Feldmessstelle mit Asphaltoberbau	14
2.3.1	Asphaltoberbau der Bautype AS4	14
2.4	Einbau	15
2.4.1	Einbau in ungebundene Tragschichten	15
2.4.2	Einbau in zementstabilisierten Tragschichten	16
2.4.3	Einbau zwischen Asphaltschichten	17
2.4.4	Einbau der Dehnungsaufnehmer	17
2.5	Probenentnahme	20
3	Vierpunkt-Biegeprüfung	21
3.1	Feldmessstelle A10	22
3.2	Feldmessstelle A3	23
4	Rückrechnung der Schichtsteifigkeiten	25
4.1	Strukturmodellierung	25
4.1.1	Burmisters Mehrschichtentheorie	25
4.1.2	Odenmarks Schichttransformation	26
4.1.3	Boussinesq Halbraumtheorie	27
4.1.4	Plattentheorie nach Westergaard	28
4.1.5	Finite Elemente Methode (FEM)	31
4.2	ELMOD	31
4.2.1	Anwendungseinschränkungen	32
4.3	BAKFAA	33
4.4	Feldmessstelle A10	34
4.4.1	Erwartungswerte aus Laborprüfungen	37
4.4.2	ELMOD: Berechnungen	39
4.4.3	BAKFAA: Berechnungen	50
4.5	Feldmessstelle A3	62
4.5.1	Erwartungswerte aus Laborprüfungen	66
4.5.2	ELMOD: Berechnungen	69
4.5.3	BAKFAA: Berechnungen	78

5 Vergleich	89
5.1 Feldmessstelle A10	89
5.2 Feldmessstelle A3	92
6 Fazit	95
A Daten	100
A.1 ELMOD A3	100
A.2 BAKFAA A3	103
A.3 ELMOD A10	106
A.4 BAKFAA A10	113

Kapitel 1

Einleitung

FWD-Messungen sind die am weitesten verbreitete Methode den aktuellen strukturellen Zustand eines Straßenaufbaus zu bewerten und bilden einen elementaren Bestandteil des Pavement Management Systems (PMS) auf nationaler und internationaler Ebene. Es hat sich bewährt Messungen, in regelmäßigen Abständen, abhängig von dem betrachteten Straßenabschnitt, in der rechten, am höchsten belasteten Fahrspur durchzuführen. Nach den abgeschlossenen FWD-Messungen gibt es zahlreiche Möglichkeiten der Auswertung [5, 6], allerdings kann man zwischen zwei grundlegenden Prinzipien unterscheiden:

- die direkte Bewertung der gemessenen Deflektionen (siehe Abbildung 1.2) mittels statistischer oder geometrischer Analyse [11, 13],
- sowie die Rückrechnung von Schichtsteifigkeiten mittels Softwarelösungen zahlreicher Anbieter.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf dem zweiten Prinzip. Üblichen Auswertesoftwarelösungen liegen analytische Formelwerke [3, 4] oder moderne numerische Ansätze (FEM) zugrunde. Wertet man die selbe FWD-Messung mehrmals mit unterschiedlichen Programmen aus, ist es nicht selten, dass die Ergebnisse voneinander abweichen. Die Anwendung erfordert deshalb viel Erfahrung mit dem Programm selbst und setzt in vielen Fällen eine ingenieurmäßige Einschätzung voraus. Man läuft also Gefahr, den strukturellen Zustand der Straße zu missinterpretieren. Hinzu kommt, dass selten ausreichend Wissen über die Bedingungen, Schichtdicken und Materialien vorhanden ist und weitere Ungenauigkeiten in Form von Annahmen in Kauf genommen werden müssen. Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der Zuverlässigkeit zweier Softwarelösungen anhand eigens dafür installierter Feldmessstelle (FMS). An diesen wurden im Zuge der Errichtung sämtliche Bestandsaufnahmen erhoben um Unbekannte zu minimieren. Seit der Fertigstellung wurden in regelmäßigen Abständen, zu unterschiedlichen Temperaturbedingungen an der selben Stelle FWD-Messungen durchgeführt. Jede FMS ist zur Validierung der FWD-Ergebnisse mit einer Vielzahl an Sensoren ausgestattet. Verglichen werden die Steifigkeiten der Rückrechnungsprogramme untereinander, sowie mit den Ergebnissen von 4PB-Pr für Asphalt, Steifigkeitsprüfungen des Betons und der in den FMS verbauten Sensorik.

1.1 Tragfähigkeitsmessung

Die Tragfähigkeit einer Straße ist definiert als der mechanische Widerstand einer Straßenbefestigung gegen kurzzeitige Verformungen. Sie wird charakterisiert durch die Steifigkeiten der einzelnen Schichten und deren Unterlage. Die Ermittlung dieser Tragfähigkeit kann mittels verschiedenster Messverfahren erfolgen, deren Prinzip sich jedoch ähnelt: Eine bekannte äußere Last wird aufgebracht und die daraus resultierende vertikale Verformung wird gemessen. Wiederholt man Versuche an einer bestimmten Stelle einer befestigten Fahrbahn, so erhält man unterschiedliche Ergebnisse je nach Temperaturverteilung im Fahrbahnaufbau. Daher ist der

Vergleich von zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführten Versuchen problematisch. Zur Bewertung der Messungen gibt es international zahlreiche Kennwerte. Ihre Aussagekraft in Hinblick auf die Tragfähigkeit von Fahrbahnaufbauten sowie Ansätze zur Umrechnung der Messergebnisse auf eine Bezugstemperatur wurden in „Gegenüberstellung von Indikatoren zur Bewertung der Tragfähigkeit bituminös gebundener Straßen“ [13] diskutiert. Als statisches Messverfahren sind der (automatische-) Benkelmann-Balken sowie der Krümmungsmesser zu nennen. Das Fallgewichtsdeflektometer (FWD) sowie das Lacroix-Deflectometer messen dynamisch [10, 22]. Im Anschluss wird genauer auf die Messmethodik des Falling-Weight-Deflectometers eingegangen.

1.1.1 Fallgewichtsdeflektometer

Die Idee des Fallgewichtsdeflektometers entstand in Frankreich, die Entwicklung wurde allerdings nach einiger Zeit eingestellt. Basierend auf den französischen Untersuchungen wurde der erste Versuch ein FWD zu produzieren im Jahr 1964 in Dänemark durchgeführt. Nach anfänglichen Problemen, vor allem bei der Lastübertragung, wurde das Messgerät modifiziert und verbessert. Schließlich erreichte man das Ziel, eine Halbsinuswelle zu messen. Kritik wurde geäußert im Hinblick auf die kürzere Lasteinwirkungsdauer, außerdem sei die Trägheit der Straßenbaustoffe die durch das Fallgewicht aktiviert wird, relevant. Dänische Vergleichsmessungen mit einem schnell laufenden Reifen entkräfteten diese Argumente. Die Deflektionen waren in beiden Fällen gleich groß [9]. Der Bau und Einsatz von FWDs stieg danach rapide an und wurde seitdem fortlaufend weiterentwickelt und verbessert. Es ist bis heute ein wichtiges Werkzeug zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Straßenkonstruktionen [9, 14].

1.1.1.1 Messprinzip

Das FWD ist ein dynamisches Messsystem für den Einsatz auf Asphalt-, Beton- und Pflasterbefestigungen, welches auf einem Anhänger montiert oder in einem Fahrzeug eingebaut sein kann [22]. Bei Tragfähigkeitsmessungen wird das dynamische Verhalten einer Verkehrsflächenbefestigung durch ein schwingungsfähiges System beschrieben. Ein Modell dieses Systems ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Die Masse A besteht aus der mitschwingenden Masse A_0 und der Geschirrmasse A_G des Gerätes. Die Stoßkraft $P(t)$ wird in einem Feder-Dämpfer-System (C_F , B_F) erzeugt, auf welches die Masse A_F fällt. $P(t)$ wird über die Lastplatte auf die Straßenoberfläche eingeleitet und mit Hilfe einer Kraftmessdose gemessen. Die Messung der zeitabhängigen Verformung $w(t)$ erfolgt durch Deflektionsaufnehmer. Die Masse A_G besteht aus den Massen der Lastplatte, der Kraftmessdose und anderen Geräteteilen unterhalb der Feder C_F und des Dämpfers B_F . Die mathematische Beschreibung des Modells führt zu zwei gekoppelten Differentialgleichungen. Aus der Lösung dieses Gleichungssystems erhält man $P(t)$ und $w(t)$. Zur Berechnung von $P(t)$ und $w(t)$ haben die Fallmasse A_F und die Geschirrmasse A_G bekannt zu sein [2, 22].

Bei der Messung wird eine Stoßkraft auf die Verkehrsfläche aufgebracht und die elastische Einsenkung der Oberfläche erfasst. Diese Kraft wird durch das Fallenlassen einer definierten Masse aus einer bestimmten Höhe auf ein Federsystem (bestehend aus Gummipuffern) erzeugt, welche über eine kreisförmige Lastplatte in die Oberbaukonstruktion eingeleitet wird. Die Größe der Stoßkraft hängt von der Fallhöhe sowie der Masse des Fallgewichts ab. Die elastische Verformung der Verkehrsfläche wird mit Deflektionsaufnehmern (Geophonen) gemessen. Diese werden im Lastzentrum und danach in fest definierter Anzahl und Abstand angeordnet. Verbindet man die gemessenen Verformungen der einzelnen Deflektionsaufnehmer, erhält man die sogenannte Deflektionsmulde, siehe Abbildung 1.2.

Kapitel 2

Feldmessstellen

Drei wohlinstrumentierte FWD-Feldmessstellen wurden im Zuge von Neubau- und Sanierungsprojekten von Autobahnen im Netz der ASFINAG eingerichtet. Eine der Messstellen in einem Netzabschnitt mit Betondecke (Bautype BE2 [20]), die zwei Weiteren in Netzabschnitten mit Asphaltdecken (Bautypen AS1 und AS4 [20]) unterschiedlicher Aufbauten. Bereits während der Herstellung der Feldmessstellen wurden sehr sorgsam die Dicken der einzelnen Schichten des Oberbaus sowie deren Materialeigenschaften - wie die Steifigkeit und die mittlere Massendichte - ermittelt. Die Ausstattung der Messstellen beinhaltet Temperatursensoren, sowie Messaufnehmer zur Ermittlung der Ankunft der Druckwellen, die durch den Aufprall des Fallgewichts auf der Oberfläche ausgelöst werden. Auf diesen Feldmessstellen werden in regelmäßigen Abständen und zu unterschiedlichen Umgebungstemperaturen FWD-Messungen durchgeführt.

2.1 Sensoren

Um den Impuls der FWD-Messung zu erfassen, wurden in der Lastachse und in deren Umgebung Sensoren eingebaut. Dabei handelt es sich um die folgenden Bauweisen.

2.1.1 Beschleunigungssensor

Zeitlich hochauflösende Beschleunigungsaufnehmer haben ein sehr breites Einsatzspektrum, sind im Straßenbau bzw. als Teil eines Pavement Management Systems (PMS) nicht üblich. Der Einbau als „verlorener“ Sensor, der nach Abschluss des Projektes in der Straße zurückbleibt ist genauso unerprobt wie die Funktionalität in verhältnismäßig groben Gesteinsgefügen. Benutzt wurden IMI-Sensoren der Firma *PCB Piezotronics* mit der Bezeichnung *602D61*, dargestellt in Abbildung 2.1. Im Bereich der Asphaltsschichten wurde die temperaturbeständigere Variante *HT602D61* („High Temperature“) benutzt, um den hohen Temperaturen während des Einbaus standhalten zu können. Pro Feldmessstelle wurden drei bzw. vier Beschleunigungsaufnehmer jeweils an den Schichtgrenzen (Abbildungen 2.4 und 2.5) mit dem Ziel eingebaut, den Lastimpuls einer FWD-Messung durch den Oberbau zu erfassen und die Laufzeit durch eine Schicht zu nutzen, um deren Steifigkeit rückzurechnen. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen wurden im Zuge dieser Arbeit für die Ermittlung der Steifigkeit unterschiedlicher Schichten herangezogen.



Abb. 2.1: “IMI“ Beschleunigungssensor

2.1.2 Dehnungsaufnehmer

Abbildung 2.2 zeigt den eingebauten Sensor der Firma *Tokyo Measuring Instruments Lab.* mit der Bezeichnung *KM-100HAS*. In den Asphaltsschichten der Feldmessstellen wurden Dehnungsaufnehmer radial in Abständen zwischen 25 cm und 45 cm von der Lastmitte eingebaut. Während auf den Feldmessstellen mit Asphaltdecke (Abbildung 2.5) zwei Sensoren in Fahrtrichtung montiert wurden, baute man auf der Feldmessstelle mit Betondecke (Abbildung 2.4) zusätzlich zwei Dehnungsaufnehmer in Querrichtung ein. Aufgabe der Dehnungsmesser ist die Validierung der gemessenen FWD-Daten und der Beschleunigungsaufzeichnungen. Es wurden außerdem mehrere Einbaumethoden erprobt, siehe Abbildung 2.9.



Abb. 2.2: Dehnungsaufnehmer

2.1.3 Temperatursensor

Um den Temperaturverlauf im Straßenaufbau zuverlässig ablesen zu können, wurden an jeder Schichtgrenze Temperatursensoren eingebaut. Die Lage der Messer innerhalb der Ebene der Schichtgrenzen wurde außerhalb der Lastachse gewählt um Beeinflussungen zu minimieren (Abbildungen 2.4 und 2.5). Im Betondeckenaufbau wurden außerdem aufgrund der Schichtdicke zusätzliche Temperaturmesser innerhalb der Betondecke angebracht, siehe Abbildung 2.4.



Abb. 2.3: Temperatursensor

2.2 Feldmessstelle mit Betondecke der Bautype BE2

Eine Feldmessstelle mit Betondecke befindet sich auf der Tauernautobahn A10, auf Höhe des Knoten Pongau/Bischofshofen in Fahrtrichtung Villach (Abbildung 2.4.a). Angeordnet am unbefahrenen und dennoch befestigten Pannestreifen wurde der Messpunkt in Plattenmitte eingerichtet. Die Betonplatte hat die Abmessungen 5,0 m * 3,5 m (Abbildung 2.4.b). In Fahrtrichtung rechts der Platte befindet sich unbefestigtes Bankett, links der erste Fahrstreifen. Die Kabel der Sensoren wurden auf dem kürzesten Weg von der Fahrbahn weggeführt und werden in einem Schaltkasten witterungsgeschützt gelagert. Insgesamt wurden drei Beschleunigungsaufnehmer B2, B3 und B4 verbaut, mit dem Ziel die Steifigkeit der zwischenliegenden Schichten berechnen zu können (Abbildung 2.4.c). In der lediglich 5 cm dünnen Asphaltsschicht sind vier Dehnungsaufnehmer in 90° Winkeln, in einem Abstand von 45 cm zum Messpunkt, angeordnet (Abbildung 2.4.d). Temperatursensoren sind an jeder Schichtgrenze sowie zwei weitere im Beton eingebaut um eine Temperaturkurve im Vergleich zur Tiefe zu erhalten.

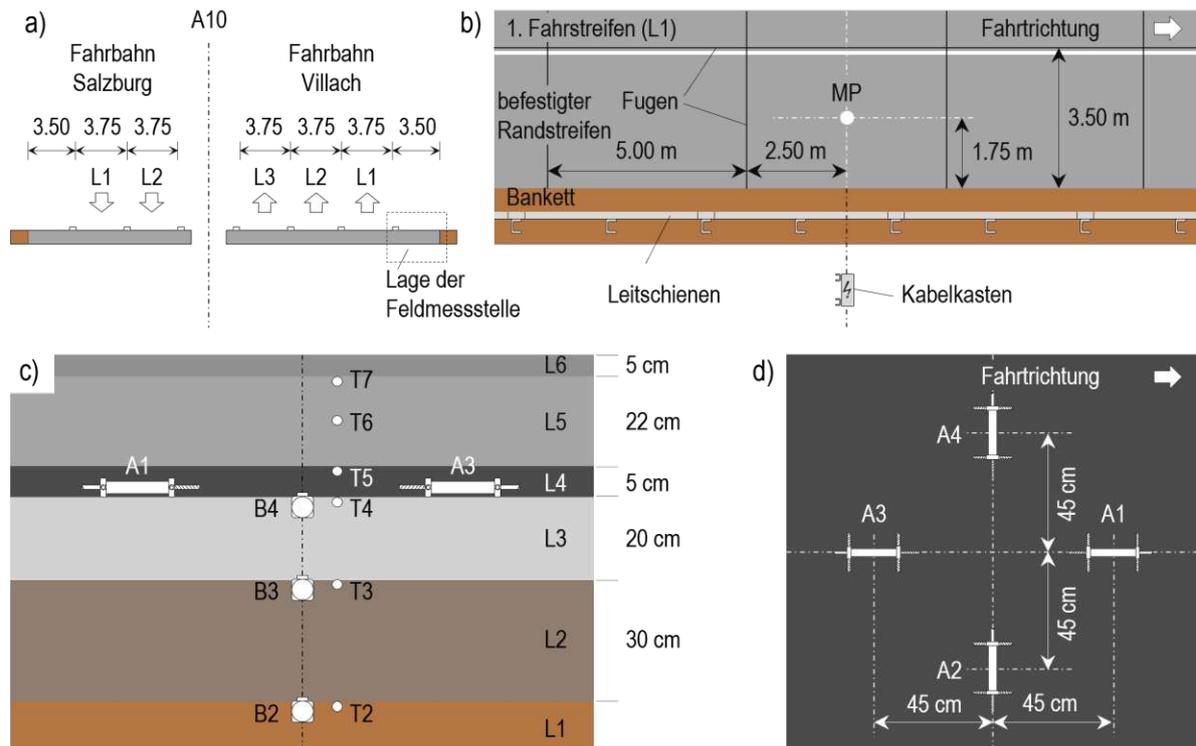


Abb. 2.4: a. Aufteilung der Fahrbahn, b. Grundriss der Feldmessstelle, c. Schnitt des Straßenbaus und eingebaute Sensoren, d. Anordnung der Dehnungsaufnehmer

2.3 Feldmessstelle mit Asphaltoberbau

Messpunkte an Straßen mit Asphaltdecke konnten an zwei Orten umgesetzt werden.

2.3.1 Asphaltoberbau der Bautype AS4

Die zweite Feldmessstelle befindet sich auf der Südostautobahn A3 in der Nähe der Auffahrt „Ebreichsdorf Nord“ in Fahrtrichtung Wien. Hier wurden in einem Abstand von ca. 70 m zwei Messpunkte mit identer Ausstattung auf dem Pannestreifen, mittig mit einem Abstand von 1,5 m vom Bankett, errichtet (Abbildung 2.5.a und Abbildung 2.5.b). Es wurden vier Beschleunigungsaufnehmer B2, B3, B4 und B6 eingebaut (Abbildung 2.5.c). Im Zuge der Autobahnsanierung wurden allerdings lediglich die Asphaltschichten erneuert. Um den Einbau des Sensors B2 und B3 zu ermöglichen, war es erforderlich die obere zementstabilisierte Tragschicht sowie die untere ungebundene Tragschicht kleinflächig abzutragen. Dies hatte zur Folge, dass die Zementstabilisierung in einem Abschnitt von 2,5 m * 2,5 m um den Messpunkt mit Magerbeton mit einer Festigkeit C8/10 ersetzt werden musste. Zwei Dehnungsaufnehmer befinden sich in Fahrtrichtung 25 cm vom Messpunkt entfernt (Abbildung 2.5.d), auf die Dehnungssensoren quer zur Fahrtrichtung wurde verzichtet. Temperatursensoren wurden in jeder Schichtgrenze eingebaut.

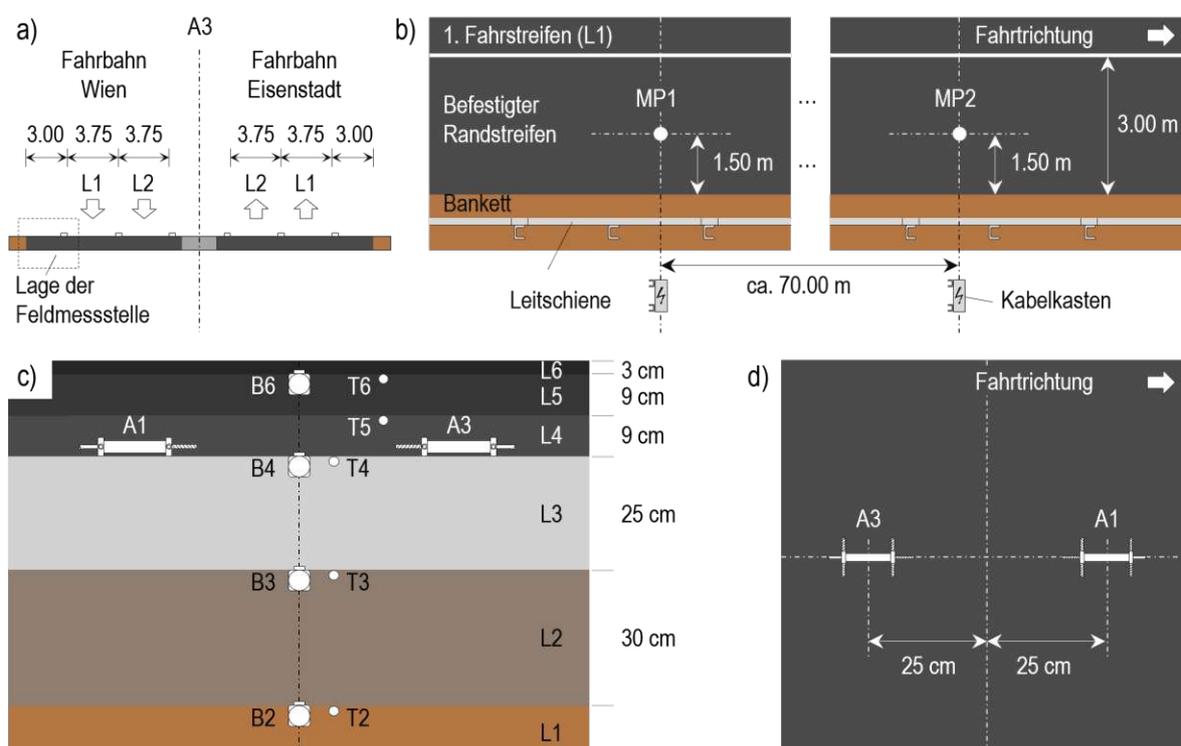


Abb. 2.5: a. Aufteilung der Fahrbahn, b. Grundriss der Feldmessstelle, c. Schnitt des Straßenbaus und eingebaute Sensoren, d. Anordnung der Dehnungsaufnehmer

2.4 Einbau

Der Einbau der Sensoren erforderte eine intensive Absprache mit allen Beteiligten des jeweiligen Straßenbauprojektes. Dank deren freundlicher Kooperation konnte der Einbau an allen drei Messstellen effizient erfolgen, ohne den eigentlichen Baufortschritt zu behindern.

2.4.1 Einbau in ungebundene Tragschichten

An der Schichtgrenze der unteren ungebundenen Tragschicht zum Untergrund befindet sich für alle drei Messstellen der unterste Beschleunigungssensor sowie ein Temperatursensor. Zu deren Einbau wurde zunächst eine Fläche bis zur oberen Grenze der ungebundenen unteren Tragschicht ausgehoben (Abbildung 2.6.a), im Anschluss wurde ein Graben bis zur Untergrenze der unteren Tragschicht ausgehoben. Dieser verläuft bis über den Bankettrand hinaus, um im Anschluss die Kabelführung zu erleichtern (Abbildung 2.6.b). Der Beschleunigungssensor und der Temperatursensor befinden sich zum Schutz in einem vor Feuchtigkeit abgedichteten Hüllrohr. Die Lage des Sensorenbündels wird in einem schnellbindenden Zementmörtelbett fixiert (Abbildung 2.6.c). Nach der Aushärtung wird zunächst die untere und im Anschluss die obere Tragschicht wieder verfüllt und schichtweise verdichtet (2.6.d). Das zweite Sensorenbündel ist an der Oberkante der oberen Tragschicht auf gleiche Weise angeordnet (Abbildung 2.6.e & Abbildung 2.6.f).



Abb. 2.6: a. Aushub der o.TS, b. Aushub der u.TS, c. Einbau an der UK der u.TS, d. Verdichtung der beiden TS, e. & f. Einbau an der OK der o.TS

2.4.2 Einbau in zementstabilisierten Tragschichten

Die Vorgehensweise des Einbaus der unteren ungebundenen Tragschicht ist zunächst ident mit jener Beschreibung in Kapitel 2.4.1, siehe Abbildung 2.7.a bis d. Zwischen oberer und unterer Tragschicht kommt nun ein zusätzlicher Beschleunigungssensor sowie ein Temperatursensor zum Einsatz (Abbildung 2.7.e). Die obere Tragschicht ist zementgebunden. Da die bestehende zementstabilisierte Tragschicht auf der A3 nicht saniert wurde (Kapitel 2.3.1) und die Wiederherstellung der Zementstabilisierung nach dem Einbau der Sensoren nicht replizierbar ist, ersetzte man diese mit einem Magerbeton der Festigkeitsklasse C8/10. Um eine Wechselwirkung zwischen Zementstabilisierung und Magerbeton während der Messung auszuschließen, wurde die Zementstabilisierung auf einer Fläche von 2,5 m * 2,5 m erfasst (Abbildung 2.7.f).



Abb. 2.7: a. Aushub der o.TS, b. Aushub der u.TS, c. Einbau an der UK der u.TS, d. Verdichtung der u.TS, e. Einbau an der OK der u.TS, f. Füllung mit Magerbeton

2.4.3 Einbau zwischen Asphaltsschichten

Die in Asphaltsschichten angebrachten Sensoren wurden erst zeitnah zur Fertigung der darauffolgenden Schichte eingebaut. Hierzu wurden Kabelkanäle in den bereits ausgehärteten Asphalt gefräst (Abbildung 2.8.d und Abbildung 2.8.e), mit gesiebttem Asphalt (siehe Kapitel 2.4.4) verfüllt (Abbildung 2.8.f) und händisch verdichtet (Abbildung 2.8.c). Dies wurde auch bei der neu errichteten Zementstabilisierung auf der A10 (Kapitel 2.2) umgesetzt (Abbildung 2.8.a und Abbildung 2.8.b).



Abb. 2.8: a., d. & e. Fräsen des Kabelkanals, b. & f. Einbau und Verfüllung der Sensoren, c. händische Verdichtung

2.4.4 Einbau der Dehnungsaufnehmer

Der Einbau der Dehnungsaufnehmer erfolgte auf drei verschiedene Varianten, siehe Abbildung 2.9. Sie unterscheiden sich in Hinsicht der Arbeitsvorbereitung und der Vorgehensweise während dem Einbau. Methode A beruht auf Erkenntnissen von Seo und Lee [23] und wurde bei der Messstelle auf der A10 umgesetzt. Für den Einbau auf der Messstelle A3 wurde Methode B angewandt, hierzu wurden Stahlvorrichtungen zur Sicherstellung der Lage vorbereitet. Für die dritte Methode wurden Stahl-Dummies angefertigt, nach dem Erhärten des Asphaltes kann der Dummy entfernt und der Sensor eingelegt werden.

Abbildung 2.10.a zeigt die Verdichtung des frisch verlegten Asphaltes. Im Anschluss wurde die Lage der Sensoren gemessen und markiert (Abbildung 2.10.b), Material entfernt (Abbildung 2.10.c), Dehnungsaufnehmer mit großer Sorgfalt auf deren Lage eingebaut (Abbildung 2.10.d), verwendeter Asphalt gesiebt (Abbildung 2.10.e) und benutzt um die Löcher zu füllen und statisch verdichtet (Abbildung 2.10.f).

Abbildung 2.11.a zeigt die vorbereitete Stahlvorrichtung. In diese kann der Dehnungsaufnehmer eingelegt werden, um in sowie quer zur Sensorachse gegen Verschieben gesichert zu sein. Die Vorrichtungen wurden an der dafür vorgesehenen Position mit der Zementstabilisierung verschraubt (Abbildung 2.11.b). Für die Funktionalität essentiell ist die Möglichkeit der Ausdehnung in Längsachse des eingelegten Dehnungssensors. Abbildung 2.11.c zeigt, dass ausreichend Spiel vorhanden ist. Im Anschluss wird gesiebttes Material aufgeschüttet und händisch verdichtet (Abbildung 2.11.d und Abbildung 2.11.e), um die Sensoren während dem Asphaltieren zu schützen. Während dem Verlegen ist darauf zu achten, dass der Fertiger weder die Sensoren noch deren Kabel beschädigt (Abbildung 2.11.f).

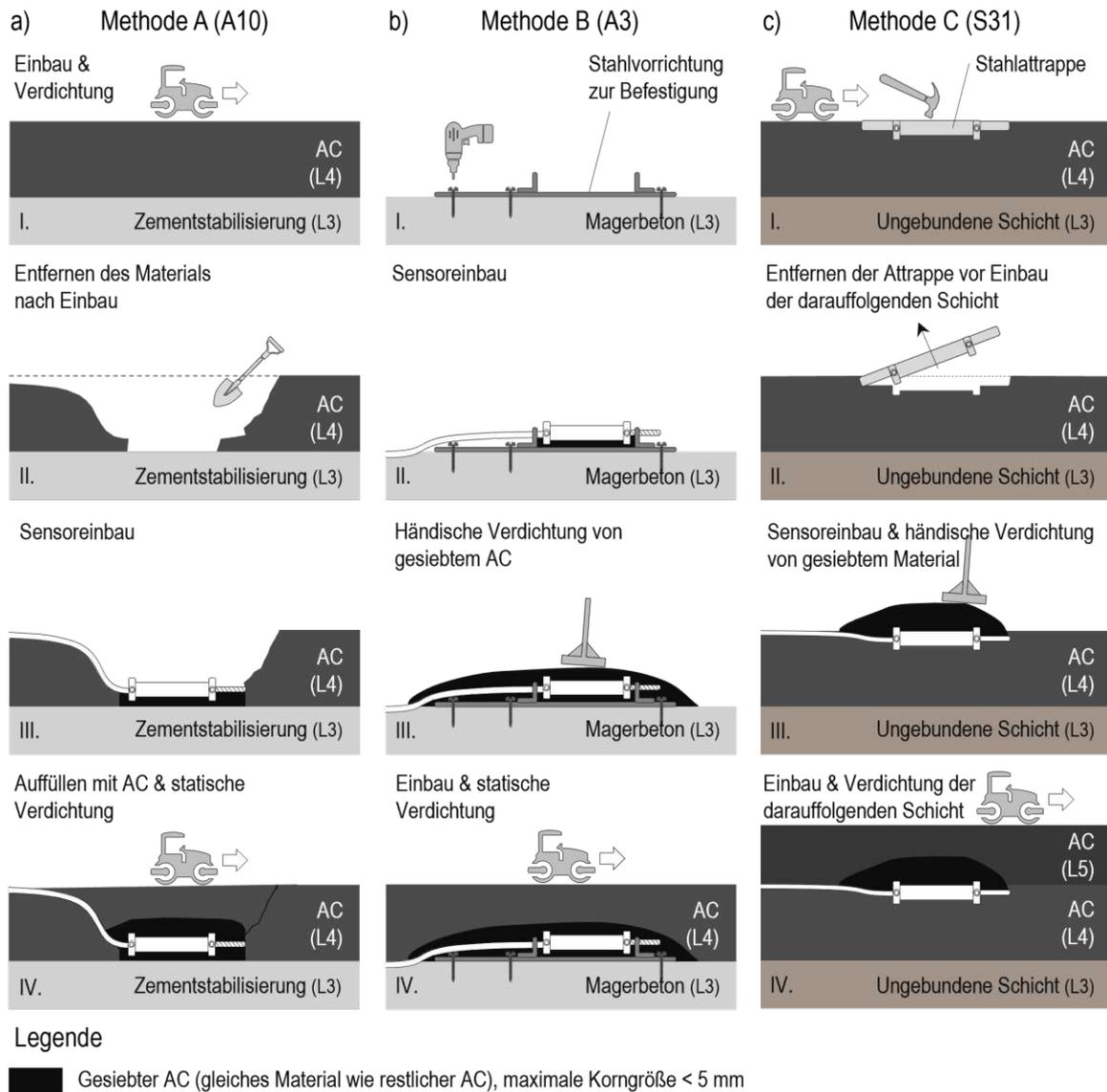


Abb. 2.9: Drei angewandte Methoden zum Einbau von Dehnungsaufnehmern

Für den Einbau der dritten Methode wurden detailgetreue Stahlattrappen hergestellt (Abbildung 2.12.a). Diese wurden unmittelbar nach dem Aufbringen des Asphalt an der dafür vorgesehenen und gemessenen Position eingeschlagen (Abbildung 2.12.b), woraufhin ohne weitere Rücksichtnahme der Asphalt verdichtet werden konnte. Nach dem Auskühlen und Erhärten und vor dem Asphaltieren der nächsten Schicht, wurde der davor mit Asphaltlösemittel besprühte Dummy entfernt (Abbildung 2.12.c) und Kabelkanäle gefräst. Der eingelegte Sensor wurde mit schnellhärtendem Zementmörtel verfüllt (Abbildung 2.12.d) und abermals mit gesiebtem und händisch verdichtetem Asphalt vor dem Einbau der nächsten Asphaltenschicht geschützt (Abbildung 2.12.f).



Abb. 2.10: Einbau nach Methode A



Abb. 2.11: Einbau nach Methode B

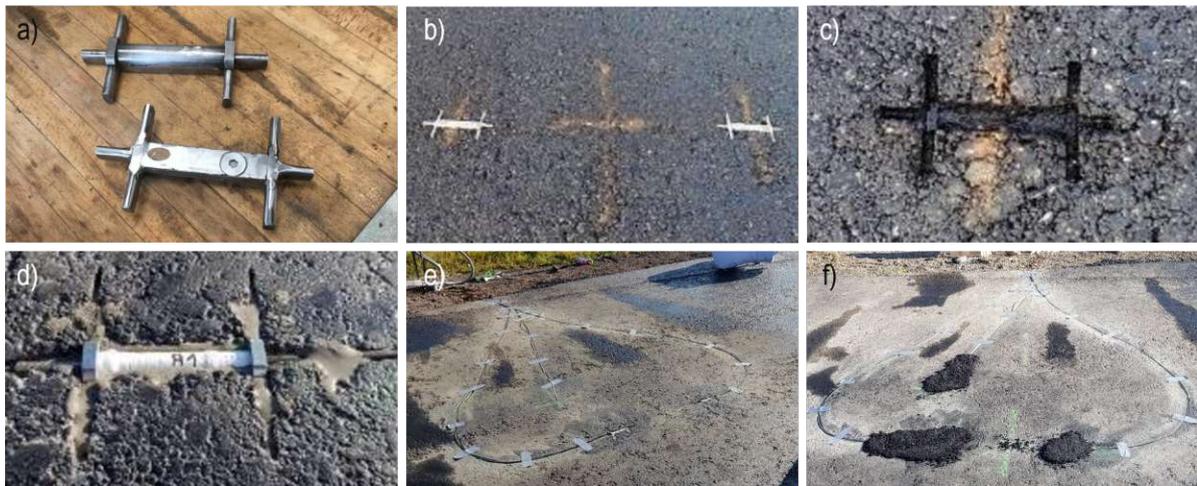


Abb. 2.12: Einbau nach Methode C

2.5 Probenentnahme

Essentiell für weitere Forschungsschritte ist die Bekanntheit der Dichte aller Schichten, insbesondere der ungebundenen und zementstabilisierten Tragschichten. Hierzu wurde die Massendichte ermittelt, indem ein Loch ausgestemmt (Abbildung 2.13.a) und mit wasserdichter, stichfester Folie ausgelegt wurde (Abbildung 2.13.b). Das Loch wurde nun mit einer bekannten Menge Wasser bis zur Schichtgrenze befüllt, so erhält man das Volumen (Abbildung 2.13.c). Das entnommene Material wurde gewogen um letztendlich die gesuchte Massendichte zu berechnen.



Abb. 2.13: Bestimmung der Massendichte, a. Entnahme von Material, b. Auslegen mit robuster Folie, c. Befüllen des Loches mit Wasser und abmessen des benötigten Volumens

Während jedem Schritt wurden Proben des eingebauten Asphalts bzw. Betons zur späteren Laborprüfung entnommen (Abbildung 2.14).



Abb. 2.14: Entnahme von Probekörpern, a. Asphaltproben von jeder Schicht, b. & c. anfertigen von Betonzylindern und -würfeln

Kapitel 3

Vierpunkt-Biegeprüfung

Die Vierpunkt-Biegeprüfung (4PB-Pr) ist in *ÖNORM EN 12697-26:2020-03: Asphalt - Prüfverfahren Teil 26: Steifigkeit* normativ geregelt. Mit der 4PB-Pr kann die Steifigkeit eines prismatischen Probekörpers ermittelt werden. Die Probe wird dazu periodisch, mit freier Rotation und horizontaler Translation an allen Belastungs- und Reaktionspunkten geprüft. Belastet wird der Probekörper an zwei symmetrisch zum Schwerpunkt angeordneten Lastpunkten, senkrecht zur Längsachse, siehe Abbildung 3.1. Die Lage der Endpunkte bleibt unverändert.

Die periodische Verschiebung an den Lastpunkten erfolgt mittels einer sinusförmigen Welle, welche symmetrisch zum Nullpunkt ist und deren Verschiebungsamplitude konstant in Abhängigkeit des betrachteten Zeitraums ist. Gemessen wird die erforderliche Kraft als Funktion der Zeit, um eine definierte Verschiebung zu erreichen und die Phasenverzögerung zwischen Kraft- und Verschiebungssignal. Aus beiden Messwerten kann der Steifigkeitsmodul, sowie der Phasenverschiebungswinkel der Probe berechnet werden. [17]

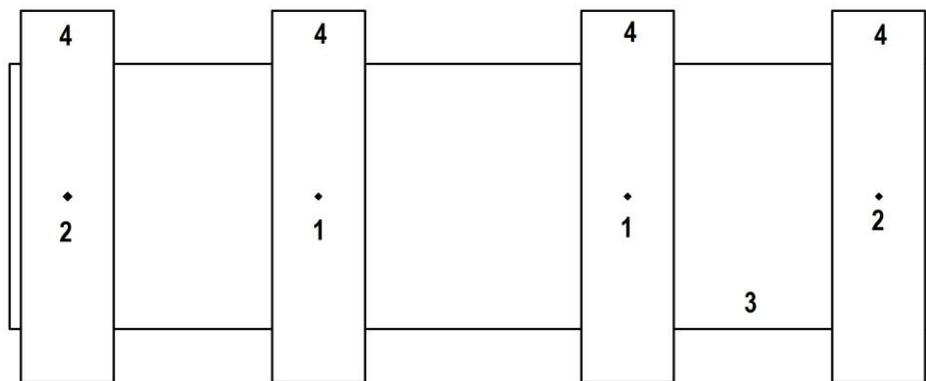


Abb. 3.1: Versuchsaufbau der 4PB-Pr nach *DIN EN 12697-26* [17]

- 1 ... Belastungspunkte
- 2 ... Auflagerpunkte
- 3 ... Probekörper
- 4 ... Probekörperklemmen

Mittels Klemmvorrichtungen wird der Probekörper im Biegerahmen eingespannt. Eine Klemme an jedem Belastungs- und Auflagerpunkt garantiert die Lastübertragung. Dabei ist die Abmessung

A so zu wählen, dass $0,25 < A/L < 0,4$. Die Gesamtlänge L_{ges} des Probekörpers darf von der effektiven Länge (Abstand der Auflagerklemmen) um nicht mehr als 10% abweichen und die Höhe H bzw. die Breite B des Körpers dürfen dabei $L_{ges}/6$ nicht überschreiten. Die Probekörperklemmen werden dabei in folgenden Abständen angeordnet: $x_a = 0$, $x_b = A$, $x_c = L - A$, $x_d = L$. [17]

3.1 Feldmessstelle A10

Proben der Asphaltsschicht auf der A10 (siehe Abbildung 2.4) wurden während dem Einbau gesammelt. Daraufhin wurden zwei Platten im Labor hergestellt, aus diesen wurden jeweils drei Probekörper geschnitten, siehe Tabelle 3.1.

Tab. 3.1: A10: Bezeichnungen der Probekörper pro Asphaltsschicht

Probekörper 1	Probekörper 2
E1219A	E1224A
E1219B	E1224B
E1219C	E1224C

Jeder Versuchskörper wurde bei 20 °C und bei 30 °C geprüft. Dabei wurden die folgenden Frequenzbereiche betrachtet: 0,1 Hz (nur bei 20 °C), 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz. Wobei lediglich die Ergebnisse der Messungen bei 8 Hz für weitere Vergleiche herangezogen wurden, da dies die Belastung des Fallgewichtdeflektometers sowie der Verkehrsbelastung am genauesten simuliert [19]. Dabei beschreibt \bar{E} die gemittelte Steifigkeit der jeweiligen Temperatur. σ_E bezeichnet die Standardabweichung der Steifigkeit \bar{E} .

Tab. 3.2: A10: statistische Auswertung der Probekörper bei einer Messfrequenz von 8 Hz

E* [MPa]	T	20 °C	30 °C	
	PK1	\bar{E}	7.554,77	3.647,81
σ_E		777,02	286,83	MPa
		10,29%	7,86%	
PK2	\bar{E}	8.236,06	4.545,65	MPa
	σ_E	1414,95	308,28	MPa
		17,18%	6,78%	

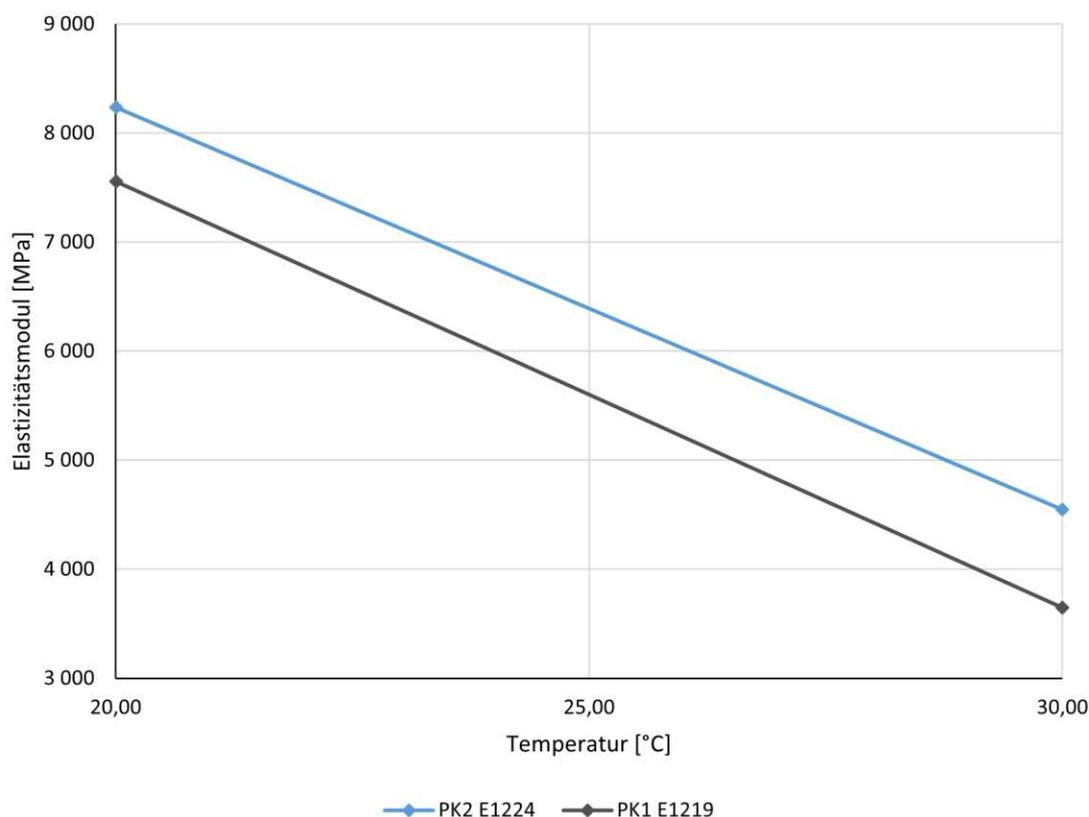


Abb. 3.2: A10: Mittlerer Elastizitätsmodul aller Schichten bei einer Messfrequenz von 8 Hz

3.2 Feldmessstelle A3

Während dem Einbau der Messstelle wurden von jeder Asphaltsschicht Proben genommen. Das Mischgut wurde dabei unmittelbar nach der Verteilschnecke des Fertigers entnommen. Im Anschluss konnten drei Probekörper pro Asphaltsschicht hergestellt werden, siehe Tabelle 3.3.

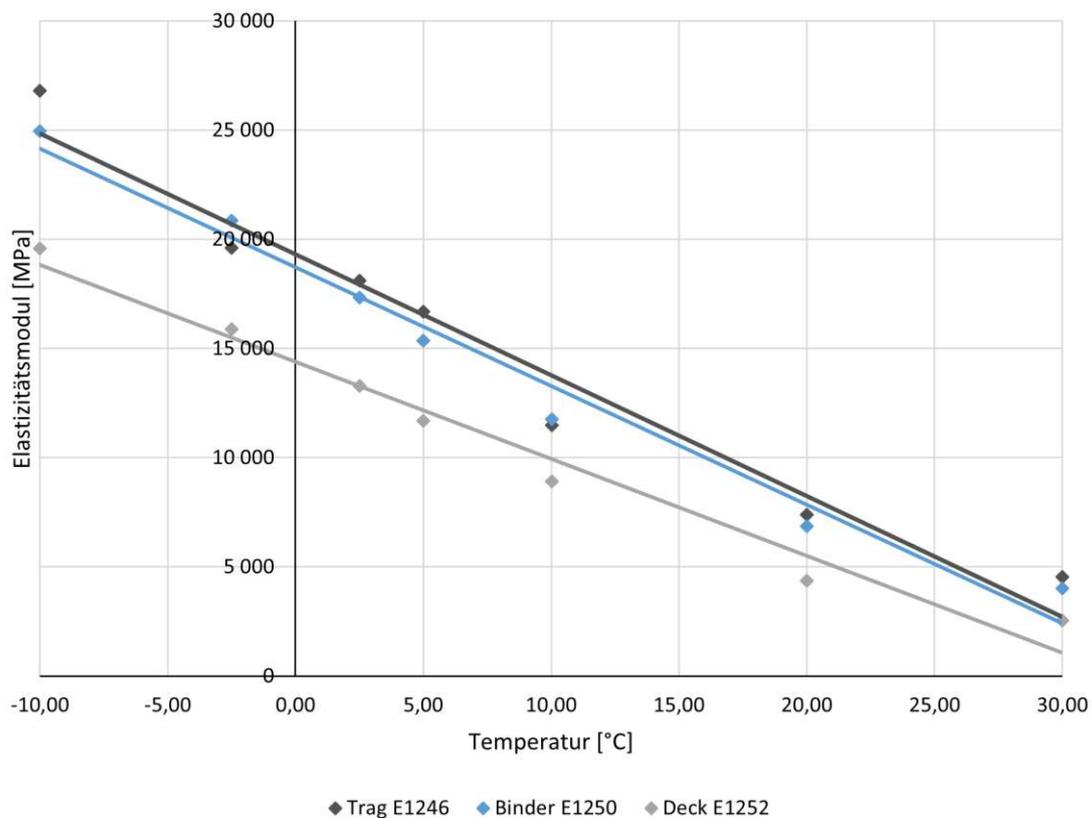
Tab. 3.3: A3: Bezeichnungen der Probekörper pro Asphaltsschicht

Tragschicht	Binderschicht	Deckschicht
E1246A	E1250A	E1252A
E1246B	E1250B	E1252B
E1246C	E1250C	E1252C

Jeder Probekörper wurde daraufhin bei sieben Temperaturen geprüft: $-10,0^{\circ}\text{C}$, $-2,5^{\circ}\text{C}$, $2,5^{\circ}\text{C}$, $5,0^{\circ}\text{C}$, $10,0^{\circ}\text{C}$, $20,0^{\circ}\text{C}$ und $30,0^{\circ}\text{C}$. Dabei wurden pro Temperatur jeweils die Frequenzbereiche 0,1 Hz, 1,0 Hz, 3,0 Hz, 5,0 Hz, 8,0 Hz und 10,0 Hz gemessen. Tabelle 3.4 und Abbildung 3.3 zeigen das gemittelte temperaturabhängige Verhalten der Asphaltsschichten. Wobei lediglich die Ergebnisse der Messungen bei 8 Hz für weitere Vergleiche herangezogen wurden, da dies die Belastung des Fallgewichtdeflektometers sowie der Verkehrsbelastung am genauesten simuliert [19]. Dabei beschreibt \bar{E} die gemittelte Steifigkeit der jeweiligen Temperatur. σ_E bezeichnet die Standardabweichung der Steifigkeit \bar{E} .

Tab. 3.4: A3: statistische Auswertung der Probekörper bei einer Messfrequenz von 8 Hz

E* [MPa]	T	-10,0 °C	-2,5 °C	2,5 °C	5,0 °C	10,0 °C	20,0 °C	30,0 °C	
		Deck	\bar{E}	19.597,37	15.894,78	13.295,17	11.677,23	8.903,21	
	σ_E	718,58	630,04	623,39	480,93	423,17	286,22	132,23	MPa
		3,67%	3,96%	4,69%	4,12%	4,75%	6,56%	5,22%	
Binder	\bar{E}	24.951,93	20.859,87	17.329,43	15.371,30	11.759,63	6.854,55	4.012,19	MPa
	σ_E	751,92	980,10	404,52	532,58	1.102,19	1.010,57	902,39	MPa
		3,01%	4,70%	2,33%	3,46%	9,37%	14,74%	22,49%	
Trag	\bar{E}	26.816,03	19.618,33	18.122,15	16.691,67	11.480,97	7.384,35	4.546,22	MPa
	σ_E	914,69	3.316,88	595,55	1.885,23	1.197,41	676,01	974,26	MPa
		3,41%	16,91%	3,29%	11,29%	10,43%	9,15%	21,43%	

**Abb. 3.3:** A3: Mittlerer Elastizitätsmodul aller Schichten bei einer Messfrequenz von 8 Hz

Kapitel 4

Rückrechnung der Schichtsteifigkeiten

Die Rückrechnung von Steifigkeiten sämtlicher Schichten eines Straßenaufbaus ist eine weit verbreitete Methode zur Interpretation von Tragfähigkeitsmessungen eines Aufbaus. Erforderlich dafür sind Deflektionen von FWD-Messungen und Informationen über den Straßenaufbau. Dabei wird ausgehend von Anfangssteifigkeiten („Seed-Moduli“), Querdehnungszahlen und Dicken jeder Schicht eine Deflektionsmulde iterativ berechnet, mit dem Ziel die Differenz zur tatsächlich gemessenen Mulde zu minimieren. Der Vorgehensweise liegen zahlreiche Theorien zugrunde, auf die Wesentlichen wird im Folgenden eingegangen.

4.1 Strukturmodellierung

Als Grundlage für die Berechnung können zahlreiche Methoden der Strukturmodellierung verwendet werden um auftretende Spannungen und Verzerrungen zu ermitteln. Dabei kann man *analytisch* oder *numerisch* vorgehen.

- Analytisch

Direkte Berechnung der auftretenden Spannungen und Verzerrungen anhand von Formeln erlauben rasche, exakte Lösungen ohne Iteration, dank eines geschlossenen Formelapparats. Dabei entstehen allerdings Einschränkungen bei den zu wählenden Eingangsparametern, vor allem in Hinblick auf die auftretende Belastung und mögliche Materialmodelle.

Flexiblen Aufbauten liegt die „Burmisters Mehrschichtentheorie“ oder die „Boussinesq Halbraumtheorie“ zugrunde, die „Plattentheorie nach Westergaard“ wird für starre Aufbauten verwendet.

- Numerisch

Spannungen und Verzerrungen werden iterativ bestimmt und abhängig von der Berechnungsdauer beliebig genau, jedoch nicht exakt bestimmt. Dabei ist eine realitätsnahe Abbildung möglich, da beliebige Materialmodelle simuliert und die tatsächlich auftretende Belastung angesetzt werden können. Mit zunehmender Komplexität steigt jedoch auch die Berechnungsdauer bzw. die erforderliche Rechenleistung stark an.

Die Finite Elemente Methode (FEM) ermöglicht die numerische Berechnung.

4.1.1 Burmisters Mehrschichtentheorie

Anwendbar bei flexiblen Oberbauten, geht Burmisters Mehrschichtentheorie von einem geschichteten Halbraum aus. Jede Schicht wird als homogen, isotrop und linear elastisch betrachtet und an deren Grenzen herrscht entweder voller oder kein Verbund. Außerdem wird jede Schicht eigengewichtslos, horizontal unbegrenzt und, mit Ausnahme der Untersten, mit definierter Dicke h angenommen. Belastet wird das Modell kreisförmig an der Oberfläche mit einer konstanten Flächenlast. Abbildung 4.1 zeigt den Modellaufbau.

Die Mehrschichtentheorie erlaubt die Berechnung von Spannungen und Verzerrungen an einer beliebigen Stelle im Querschnitt. Auch eine Überlagerung von Belastungen ist möglich. Die Ergebnisse sind exakt, allerdings auf linear elastisches Materialverhalten beschränkt. Aufgrund der unendlichen horizontalen Ausdehnung ist die Theorie jedoch nicht für Betonplatten anwendbar, da kritische Spannungen am Plattenrand nicht erfasst werden können.

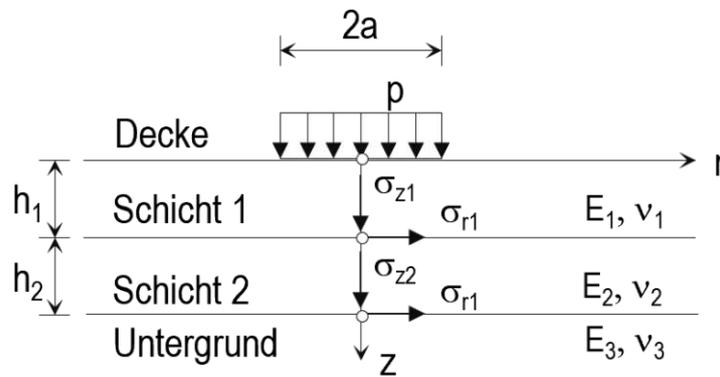


Abb. 4.1: Modell nach Burmisters Mehrschichtentheorie

4.1.2 Odenmarks Schichttransformation

Auch genannt „Methode der äquivalenten Schichtdicken“ bezeichnet die von Odemark 1949 [16] veröffentlichte Theorie, Parameter mehrerer Schichten zu vereinfachen und mit Hilfe einer äquivalenten Dicke ins Verhältnis zu setzen. Dies wird in Abbildung 4.2 dargestellt und in den Gleichungen (4.1) und (4.2) beschrieben. Zur Erfüllung dieser Formeln wird die Annahme getroffen, dass Spannungen und Dehnungen unter einer Schicht lediglich von der Steifigkeit dieser Schicht abhängen [7].

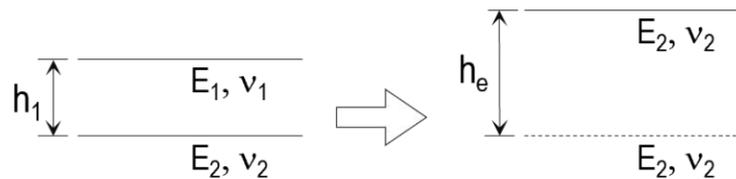


Abb. 4.2: Transformation eines zweischichtigen Aufbaus nach Odemark [16]

$$\frac{h_1^3 \cdot E_1}{1 - \nu_1^2} = \frac{h_e^3 \cdot E_2}{1 - \nu_2^2} \quad (4.1)$$

$$h_e = h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{1 - \nu_2^2}{1 - \nu_1^2}} \quad (4.2)$$

Da die Bestimmung der Querdehnungszahl in der Praxis nur sehr unzuverlässig möglich ist, wird außerdem die Annahme getroffen, dass ν in allen Schichten gleich ist und somit vereinfacht nach Gleichung (4.3) angeschrieben werden kann. Hier wird außerdem ein Korrekturfaktor f eingeführt.

$$h_e = f \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (4.3)$$

Bei einem n -schichtigen Aufbau kann eine äquivalente Dicke $h_{e,n}$ der Schichten über der n -ten, mit der Steifigkeit E_n der n -ten Schicht berechnet werden, siehe Gleichung (4.4).

Dies lässt sich in weiterer Folge als rekursive Reihe beschreiben, beschrieben in Gleichung (4.5) und ist der wesentliche Vorteil gegenüber der Mehrschichtentheorie [7]. Rekursive Reihen erlauben sehr effiziente Rechenprozesse. Gemeinsam mit Ergebnissen, welche von der Mehrschichtentheorie lediglich um 10% abweichen, ist Odemarks-Theorie in Kombination mit Boussinesq Halbraumtheorie heute die Grundlage vieler Rückrechen-Tools.

$$h_{e,n} = f \cdot \sum_{i=1}^{n-1} h_i \cdot \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (4.4)$$

$$h_{e,n} = f \cdot \left\{ \dots \left[\left(h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_2 \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} + h_3 \right] \dots + h_{n-1} \right\} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_n}} \quad (4.5)$$

Um eine hohe Übereinstimmung mit den Berechnungen der Mehrschichtentheorie zu erzielen, sind neben der Anpassung des Korrekturfaktors f außerdem folgende Bedingungen einzuhalten:

- Die Elastizitätsmoduli (E-Moduli oder E) sollen mit zunehmender Tiefe abnehmen ($E_i/E_{i+1} > 2$).
- Die äquivalente Dicke jeder Schicht ist größer als der Radius der Lastplatte.

4.1.3 Boussinesq Halbraumtheorie

Bereits im Jahr 1885 beschäftigte sich Joseph Boussinesq [3] mit Punktbelastung auf einem elastischen Halbraum. Boussinesq definierte Formeln zur Berechnung von Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen infolge besagter Einwirkung unter der Voraussetzung eines homogenen, isotropen, linear elastischen und horizontal unendlich ausgedehnten Raumes. Die Formeln (4.6) bis (4.9) sind für Polarkoordinaten verfasst und dienen der Berechnung an einem beliebigen Punkt, siehe Abbildung 4.3.

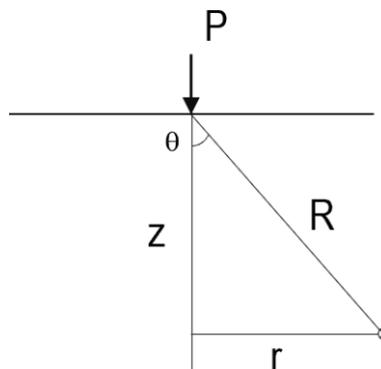


Abb. 4.3: Einwirkung einer Punktlast auf einen Halbraum

- Normalspannungen

$$\begin{aligned}
 \sigma_z &= \frac{3P}{2\pi R^2} \cdot \cos^3(\theta) \\
 \sigma_r &= \frac{P}{2\pi R^2} \cdot \left[3 \cos(\theta) \sin^2(\theta) - \frac{1-2\nu}{1+\cos(\theta)} \right] \\
 \sigma_t &= \frac{(1-2\nu)P}{2\pi R^2} \cdot \left[-\cos(\theta) + \frac{1}{1+\cos(\theta)} \right] \\
 \sigma_I &= \frac{3P}{2\pi R^2} \cdot \cos(\theta) \\
 p &= \frac{(1+\nu)P}{3\pi R^2} \cdot \cos(\theta)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

- Schubspannungen

$$\begin{aligned}
 \tau_{rz} &= \frac{3P}{2\pi R^2} \cdot [3\cos^2(\theta) \sin(\theta)] \\
 \tau_{rt} &= \tau_{tz} = 0
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

- Dehnungen

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_z &= \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 \cdot E} \cdot [3\cos^3(\theta) - 2\nu \cos(\theta)] \\
 \varepsilon_r &= \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 \cdot E} \cdot \left[-3\cos^3(\theta) + (3-2\nu) \cos(\theta) - \frac{1-2\nu}{1+\cos(\theta)} \right] \\
 \varepsilon_t &= \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 \cdot E} \cdot \left[-\cos(\theta) - \frac{1-2\nu}{1+\cos(\theta)} \right]
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

- Verschiebungen

$$\begin{aligned}
 d_z &= \frac{(1+\nu)P}{2\pi R \cdot E} \cdot [2(1-\nu) + \cos^2(\theta)] \\
 d_r &= \frac{(1+\nu)P}{2\pi R \cdot E} \cdot \left[\sin(\theta) \cos(\theta) - \frac{(1-2\nu) \sin(\theta)}{1+\cos(\theta)} \right] \\
 d_t &= 0
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

4.1.4 Plattentheorie nach Westergaard

Grundlage der Theorie ist die Bettung einer starren Platte auf Federn. Das Bettungsmodul beschreibt das Verformungsverhalten der Federn und wird definiert von den Schichtparametern unter der starren Platte, eine Kraftabtragung kann lediglich vertikal erfolgen, da die Federn keine Scherkräfte abtragen können, und sie erfolgt proportional zur Plattenbewegung [25]. Die starre Platte ist homogen, isotrop und linear elastisch, ihr Verformungsverhalten wird definiert vom E-Modul und ihrem Trägheitsmoment. Auch hier erfolgt die Belastung des Modells kreisförmig an der Oberfläche mit einer konstanten Flächenlast. Abbildung 4.4 zeigt den Modellaufbau.

Um eine Berechnung zu ermöglichen, müssen darüber hinaus weitere Annahmen getroffen werden [8]:

- Die Platte ist eben und es treten keine Risse auf.

- Fugen dürfen keine Störungen in der Plattenstruktur hervorrufen.
- Zwischen zwei Platten findet keine Kraftübertragung statt. Die Kraftübertragung zweier verdübelter Platten wird nicht berücksichtigt.

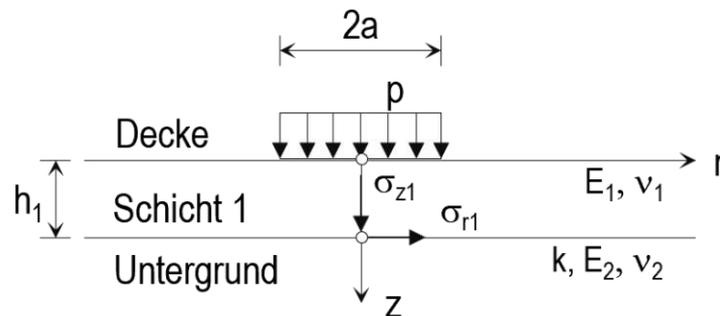


Abb. 4.4: Modell nach Westergaards Plattentheorie [25]

Westergaard [25] beschreibt drei Belastungsfälle, diese sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Für jedes Szenario existieren Formeln zur Berechnung der maximalen vertikalen Verschiebung sowie den auftretenden Spannungen, auf diese wird im Folgenden eingegangen. Dabei gilt [8]:

$\sigma_{Q,M}$... Spannung in Plattenmitte an der Unterkante der Betonplatte [N/mm²]

$w_{Q,M}$... vertikale Verformung in Plattenmitte zufolge Punktbelastung [mm]

w_M ... Vertikale Verformung in Plattenmitte zufolge Topflast [mm]

$\sigma_{Q,R}$... Spannung am Plattenrand an der Unterkante der Betonplatte [N/mm²]

$w_{Q,R}$... vertikale Verformung am Plattenrand zufolge Punktbelastung [mm]

$\sigma_{Q,E}$... Spannung in Plattenecke an der Oberkante der Betonplatte [N/mm²]

$w_{Q,E}$... vertikale Verformung in Plattenmitte zufolge Punktbelastung [mm]

$\sigma_{Q,F}$... Spannung in der Fuge zwischen zwei Betonplatten [N/mm²]

h ... Dicke der Betonplatte [mm]

a ... Radius des Belastungskreises [mm], $a = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot p}}$

p ... Kontaktdruck [N/mm²]

Q ... Radlast [N]

b ... Ersatzradius [mm], für den gilt: $b = \sqrt{1,6 \cdot a^2 + h^2} - 0,675 \cdot h$ für $a < 1,724 \cdot h$ oder $b = a$ für $a > 1,724 \cdot h$

k ... Bettungsmodul

E ... E-Modul (Young's Modulus) für Beton [N/mm²]

ν ... Poissonzahl

l ... elastische Länge [mm], $l = \left(\frac{E \cdot h^3}{12(1 - \nu^2) \cdot k} \right)^{0,25}$

α ... Abstand der Last von der Ecke [mm]

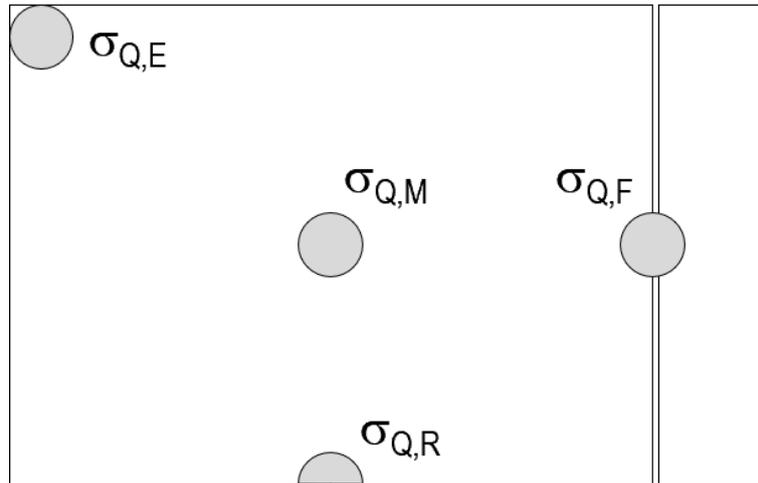


Abb. 4.5: Belastungsszenarien nach Westergaards Plattentheorie [25]

- Belastung in Plattenmitte

$$\sigma_{Q,M} = \frac{0,275 \cdot Q}{h^2} \cdot (1 + \nu) \cdot \left[\log \left(\frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) - 0,436 \right] \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.10)$$

$$w_{Q,M} = \frac{Q}{8 \cdot k \cdot l^2} \quad [\text{mm}] \quad (4.11)$$

$$w_M = w_{Q,M} \cdot \left[1 + \left(0,3665 \cdot \log \left(\frac{a}{l} \right) - 0,2174 \right) \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right] \quad [\text{mm}] \quad (4.12)$$

- Belastung am Plattenrand

$$\sigma_{Q,R} = \frac{0,529 \cdot Q}{h^2} \cdot (1 + 0,54 \cdot \nu) \cdot \left[\log \left(\frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) + \log \left(\frac{b}{1 - \nu^2} \right) - 2,484 \right] \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.13)$$

$$w_{Q,R} = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (1 + 0,4 \cdot \nu) \cdot \frac{Q}{k \cdot l^2} = 3,46 \cdot w_{Q,M} \quad [\text{mm}] \quad (4.14)$$

- Belastung in Plattenecke

$$\sigma_{Q,E} = \frac{3 \cdot Q}{h^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k}{E \cdot h^3} \right)^{0,3} \cdot (a \cdot \sqrt{2})^{1,2} \right] \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.15)$$

$$w_{Q,E} = \left(1,1 - 0,88 \cdot \frac{\alpha}{l} \right) \cdot \frac{Q}{k \cdot l^2} \quad [\text{mm}] \quad (4.16)$$

Anwendung findet die Theorie nach Westergaard heutzutage nur noch selten. Die getroffenen Annahmen und damit einhergehende Einschränkungen entsprechen nicht mehr den heutigen Anforderungen. Abgelöst wird Westergaards Theorie von der FEM.

4.1.5 Finite Elemente Methode (FEM)

Spannungen und Verzerrungen werden bei der Finite Elemente Methode numerisch iteriert. Die Struktur wird dabei in Elemente zerlegt, siehe Abbildung 4.6 [7].

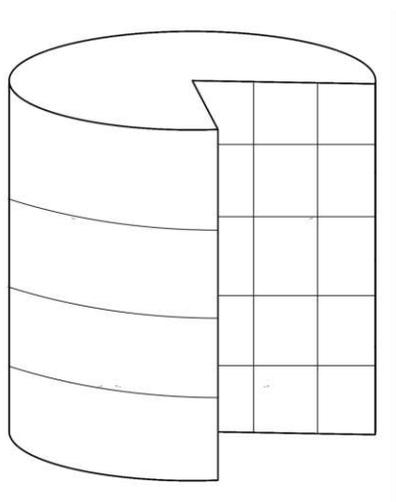


Abb. 4.6: FEM Netz

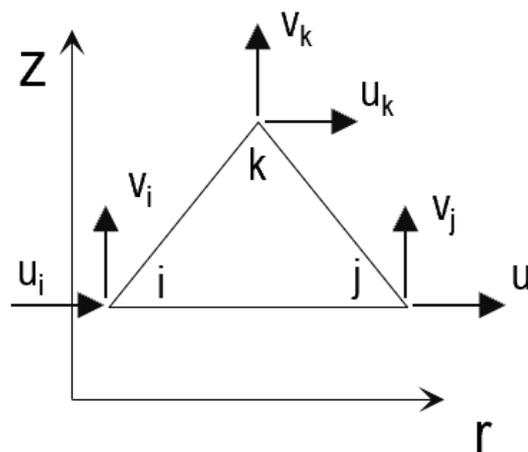


Abb. 4.7: FEM Element

Der FEM liegt das Prinzip der virtuellen Leistungen zugrunde. Gleichung 4.17 beschreibt das Gleichgewicht am Gesamtsystem, mit dem globalen Knotenkraftvektor \underline{p} , der Systemsteifigkeitsmatrix \mathbb{K} und der globalen Knotenverschiebung \underline{q} . Unter der Voraussetzung der linearen Elastizitätstheorie stehen die globalen Parameter mit den zugehörigen elementspezifischen Beiträgen: Elementknotenlastvektor \underline{p}^e , Elementknotenpunktverschiebung \underline{q}^e und Elementsteifigkeitsmatrix \mathbb{K}^e im Zusammenhang [12].

$$\underline{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_i \\ \vdots \\ p_{n_{FG}} \end{bmatrix} = \mathbb{K} \cdot \underline{q} = \begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1j} & \cdots & K_{1n_{FG}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{i1} & & K_{ij} & & K_{in_{FG}} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n_{FG}1} & \cdots & K_{n_{FG}j} & \cdots & K_{n_{FG}n_{FG}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_j \\ \vdots \\ q_{n_{FG}} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

4.2 ELMOD

ELMOD steht für „Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design“ und ist ein Software-Tool der Firma Dynatest. Es wurde entwickelt, um Ingenieuren die Erhaltung und Wiederherstellung von Straßen oder Flugbetriebsflächen zu erleichtern. Die vorhandene Struktur wird auf Grundlage von FWD-Messung analysiert, Einflüsse der lokal auftretenden Verhältnisse sind zu definieren. So können Materialcharakteristiken, Belastungen und klimatische Bedingungen berücksichtigt werden. Dynatest [7] beschreibt die Hauptaufgaben von ELMOD folgendermaßen:

- Berechnung der E-Moduli eines Aufbaus unter einem FWD-Messpunkt mit bis zu fünf Schichten nach drei unterschiedlichen Berechnungsmethoden: Dem „Krümmungsradius (Radius of Curvature)“-Ansatz, der „Deflektionsmulden Nachbildung (Deflection Basin Fit)“-Methode oder mittels numerischer Integration, wobei hier weiter zwischen der „Finite Elemente Methode (FEM)“, der „Mehrschichtentheorie (Linear Elastic Theory, LET)“ oder der „Methode der äquivalenten Schichtdicke (Method of Equivalent Thickness, MET)“ zu wählen ist. Hierbei wird die Nicht-Linearität des Untergrunds sowie die vermutliche Dicke des Untergrundes berücksichtigt.
- Die Anpassung der rückgerechneten E-Moduli an saisonale Verhältnisse. Dabei wird die Asphaltsteifigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur gesetzt und bei ungebundenen Schichten wird die Frühjahrstauperiode berücksichtigt.
- Berechnung der Restlebensdauer durch Bewertung mit „Miner’s Law“ und frei definierbarer Verkehrsbelastung.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der ersten Hauptaufgabe.

4.2.1 Anwendungseinschränkungen

Zur Kontrolle der Berechnungsgenauigkeit vergleicht man die (im Zuge des FWD-Versuchs gemessene) reale Deflektionsmulde mit der Simulation. Rückrechnungsergebnisse sind stark von den getroffenen Annahmen abhängig. Um eine möglichst hohe Präzession bei der Berechnung zu erhalten empfiehlt Dynatest [7] die Einhaltung einiger Randbedingungen:

- Der Straßenaufbau sollte lediglich *eine* Schicht mit hoher Steifigkeit ($E_1/E_{sub} > 5$) aufweisen. Alternativ sollten mehrere steife Schichten zur Berechnung zusammengefasst werden oder man unterlässt die Backcalculation und arbeitet mit einem fixierten E-Modul bei den betroffenen Ebenen.
- Die E-Moduli sollen mit zunehmender Tiefe abnehmen ($E_i/E_{i+1} > 2$).
- Die oberste Schichtdicke sollte mindestens dem halben Radius der FWD-Messplatte entsprechen, dies kann die Zusammenfassung mehrerer Asphaltsschichten zu einem Paket erfordern.
- Bei Messungen am Plattenrand von starren Deckschichten, sollte der Aufbau mit lediglich zwei Schichten berechnet werden.

Vor allem die Genauigkeit der analytischen Methoden hängt von der Einhaltung dieser Bedingungen ab, daher empfiehlt sich bei Nichteinhaltung die Berechnung mit numerischer Integration (FEM, LET oder MET) [7]. Alle Schichten werden als homogen, isotrop, linear elastisch angenommen, mit Ausnahme des Untergrunds, dessen Nichtlinearität berücksichtigt wird laut Gleichung (4.18) [7]. Nichtlinearität ist üblich bei Böden mit Kohäsion. In der Realität wirken Einflüsse wie Inhomogenität, veränderlicher Wassergehalt und Druckunterschiede mit einem der Nichtlinearität ähnlichen Effekt im Untergrund und werden aufgrund der hinreichenden Genauigkeit ebenso angenähert berechnet [7].

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{\sigma_I}{\sigma} \right)^n \quad (4.18)$$

E_0 ... Oberflächenmodul

- σ_I ... Erste Hauptspannung
- σ ... Bezugsspannung (Atmosphärischer Druck)
- C_0 ... Konstant
- n ... ≤ 0 , konstant

Bei dünnen Asphaltsschichten kann es von Vorteil sein, den E-Modul unter Berücksichtigung der auftretenden Temperaturen und Rissbildung anzunehmen. Mehrere Asphaltsschichten (Deckschicht, Binderschicht und Tragschicht) sind gemeinsam zu betrachten. Der folgenden Auswertung liegt die Berechnungsmethode MET zu Grunde. Die MET basiert auf den in Kapitel 4.1.2 und 4.1.3 vorgestellten Theorien. Diese Art der Berechnung erlaubt ausschließlich die Rückrechnung von E-Moduli. Temperaturkorrekturen oder saisonale Effekte werden nicht berücksichtigt [7]. Burmisters Mehrschichtentheorie (4.1.1) basiert auf kontinuumsmechanischen Annahmen und gilt nur für linear elastische Systeme unter statischer Belastung. Straßenaufbauten entsprechen allerdings in der Realität oft nicht den Ansprüchen eines Kontinuums, sondern bestehen aus kohäsionsfreien Partikeln mit nicht linear elastischen, viskosen, visko-elastischen oder plastischen Eigenschaften, vor allem im Untergrund. Die MET ist in der Lage die Nicht-Linearität des Untergrundes zu berücksichtigen [7]. Dies ersetzt auch die Notwendigkeit der Einführung einer künstlich interpretierten Grenze des Untergrundes. Es wird also nachwievon von einer nach unten hin unendlich ausgedehnten Schicht ausgegangen, deren Eigenschaften über die Nicht-Linearität berücksichtigt werden [7]. Vor der Berechnung können die zu betrachtenden Fallversuche („Drops“) an jedem Punkt der Kilometrierung („Chainage“) definiert werden, sowie das Fallgewicht und der Plattenradius der Belastung. Folgende Randbedingungen müssen für jede Schicht angegeben werden:

- Dicke
- Anfangssteifigkeit („Seed-Modulus“) oder die bekannte Steifigkeit der Schicht
- Querdehnungszahl ν
- Obere und untere Schranke des rückzurechnenden E-Moduls
- Berücksichtigung der Nicht-Linearität des Untergrundes

Im Zuge der Berechnung versucht ELMOD die gemessene Deflektionsmulde bestmöglich nachzubilden. Dazu wird die absolute Differenz zwischen der Berechnung und der Messung minimiert.

4.3 BAKFAA

BAKFAA ist eine Softwarelösung der „Federal Aviation Administration (FAA)“ der Vereinigten Staaten von Amerika zur Bewertung der Tragfähigkeit von Straßenaufbauten mittels FWD-Messung. Die Berechnung erfolgt mit dem „Layered Elastic Analysis Program (LEAF)“, basierend auf Burmisters Mehrschichtentheorie (siehe Kapitel 4.1.1). Mittels multidimensionalem Downhill-Simplex-Verfahren [18] kann der minimale Wert einer Funktion mit mehr als einer unabhängigen Variable gefunden werden [24]. Es können bis zu zehn Schichten berechnet werden, die Dicke des Untergrundes und seine Nicht-Linearität können nicht berücksichtigt werden. Der Nutzer kann die Dicke des Untergrundes allerdings schätzen. Auch Temperatur- und saisonale Effekte werden nicht berücksichtigt. BAKFAA ist in Virtual Basic geschrieben und als Freeware gratis für die Öffentlichkeit zugänglich. Die FAA stellt außerdem den Source-Code des Programms zur Verfügung um lokale Anpassungen treffen zu können.

4.4 Feldmessstelle A10

Die Feldmessstelle auf der A10 mit Betonfahrbahn der Bautype BE2 wurde in Kapitel 2.2 vorgestellt. Seit der Errichtung im Winter 2020/2021 wurden periodisch FWD-Messungen durchgeführt. An jedem Messtag protokollierte man zwischen 12 und 20 Auslösungen des Fallgewichts. Dabei wurden parallel die herrschenden Temperaturen an den Schichtgrenzen aufgezeichnet, siehe Tabelle 4.1, und der Temperaturverlauf als Funktion der Tiefe in Abbildung 4.8 dargestellt.

Auffällig sind die großen Temperatursprünge innerhalb der Betondecke bei der Messung im März. Diese sind ein Resultat der hohen Außentemperatur an den Tagen vor der Messung, die zu einer Erwärmung der obersten Schicht führten, während die unteren Schichten die für die Jahreszeit gewöhnliche Ausgleichstemperatur von 5 °C beibehielten. Das Temperaturdelta zwischen der Oberseite und der Unterseite der Betondecke beträgt 13,67 °C. Das Aufwölben der Betonplatte [8] kann nicht ausgeschlossen werden, sodass der Kontakt zwischen der Platte und dem Asphalt nicht sichergestellt ist. Aus diesem Grund muss auf die Validität der Ergebnisse dieser Messung besonderes Augenmerk gelegt werden. Ein ähnliches Verhalten ist beim Temperaturverlauf im April zu beobachten, allerdings erwärmten sich hier die unteren Schichten schon merklich. Das Temperaturdelta beträgt 10,24 °C. Im Juni, Juli und September pendelte sich die Temperatur im Straßenaufbau zwischen 18 °C und 22 °C ein. Auch ein „kalter“ Messtag im Juni hatte hier keinen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturen in tieferen Schichten. Nach einem warmen September, kühlte im Oktober der Aufbau ab. Im Jänner herrschten in allen Schichten sehr kalte Verhältnisse im Bereich um die 0 °C-Grenze.

Tab. 4.1: Temperaturen in den Schichtgrenzen während den Messungen auf der A10

Messung		Temperatur T_i in Schicht i [°C]						
		T_O	$T_{PCC,o}$	$T_{PCC,u}$	T_{AC}	T_{CB}	T_{UB}	T_{SUB}
März	A10.2	21,0	17,1	25,5	24,3	21,3	9,0	-0,7
April	A10.3	20,6	15,38	11,58	10,36	10,88	11,39	10,29
Juni	A10.4	17,1	22,45	19,70	19,28	19,81	19,88	17,60
Juli	A10.5	24,9	24,71	22,39	22,07	22,38	21,06	19,57
September	A10.6	20,3	19,15	17,30	17,57	18,24	18,88	18,27
Oktober	A10.7	9,0	10,45	8,77	8,96	9,64	11,00	12,68
Jänner	A10.8	-0,7	-0,63	-0,70	-0,31	0,10	0,72	1,52
Tiefe [cm]		0	-6	-15,5	-27	-35	-53	-85

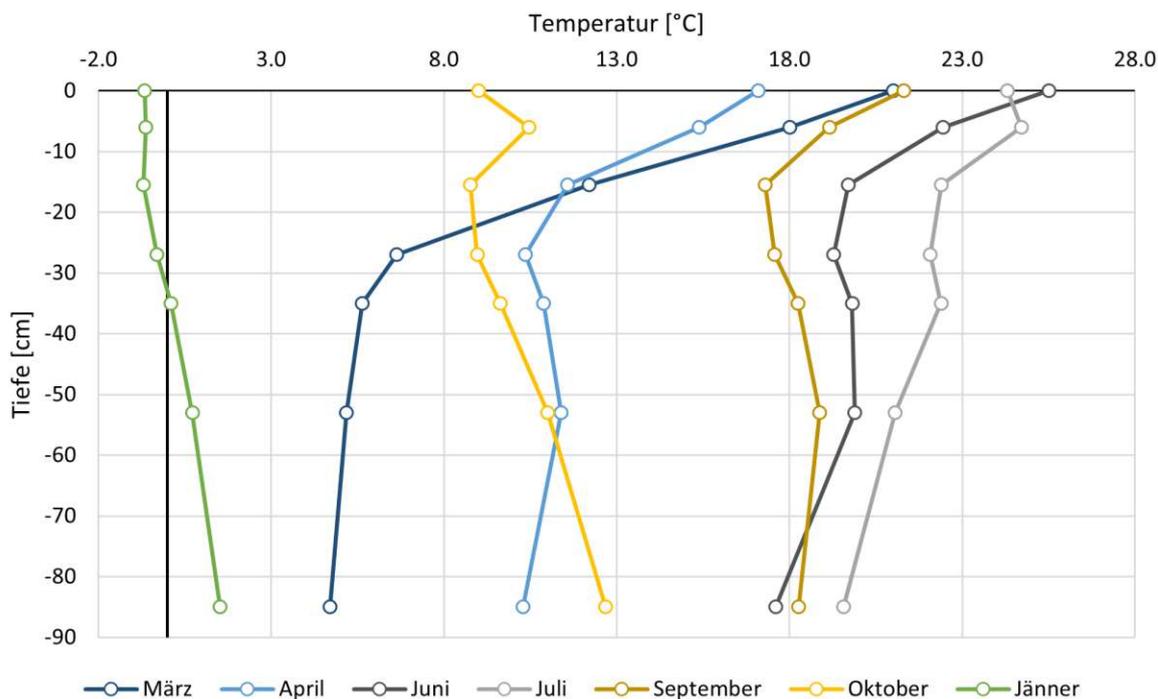


Abb. 4.8: Temperaturverlauf in zunehmender Tiefe zum Zeitpunkt der Messung auf der A10

Die gemittelten Deflektionen aller Versuche zur jeweiligen Messung sind in Tabelle 4.2 angeführt und in Abbildung 4.9 dargestellt. Die verwendeten Geophonabstände sind ebenfalls in Tabelle 4.2 protokolliert. Auffällig ist die Abnahme der Deflektionen über das fortschreitende Kalenderjahr. Die größten Verformungen treten im Frühjahr während der Tauperiode im März und April auf. Im Jänner sind erwartungsgemäß aufgrund der höheren Tragfähigkeit die Verformungen am kleinsten. Die Unterschiede bei den Messungen in kälteren Monaten sind geringer als bei höheren Temperaturen. Besonders die Differenz in den Monaten März, April und Juni sind sehr auffällig und gilt es zu beobachten.

Tab. 4.2: Gemittelte Deflektionen der periodischen Messungen der A10

Messung	n	STAB	Deflektion D_i am i -ten Geophon [μm]						
			D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
März A10.2	28	2,10%	285	256	226	191	157	125	97
April A10.3	25	0,72%	235	206	179	150	124	99	79
Juni A10.4	28	1,00%	210	185	160	133	111	90	74
Juli A10.5	15	1,08%	185	166	144	122	103	86	72
September A10.6	15	1,33%	177	157	136	115	99	81	68
Oktober A10.7	18	3,09%	169	150	130	110	93	75	62
Jänner A10.8	12	0,96%	166	147	129	109	91	76	61
Geophonabstand [mm] vom Lastzentrum			0	300	600	900	1200	1500	1800

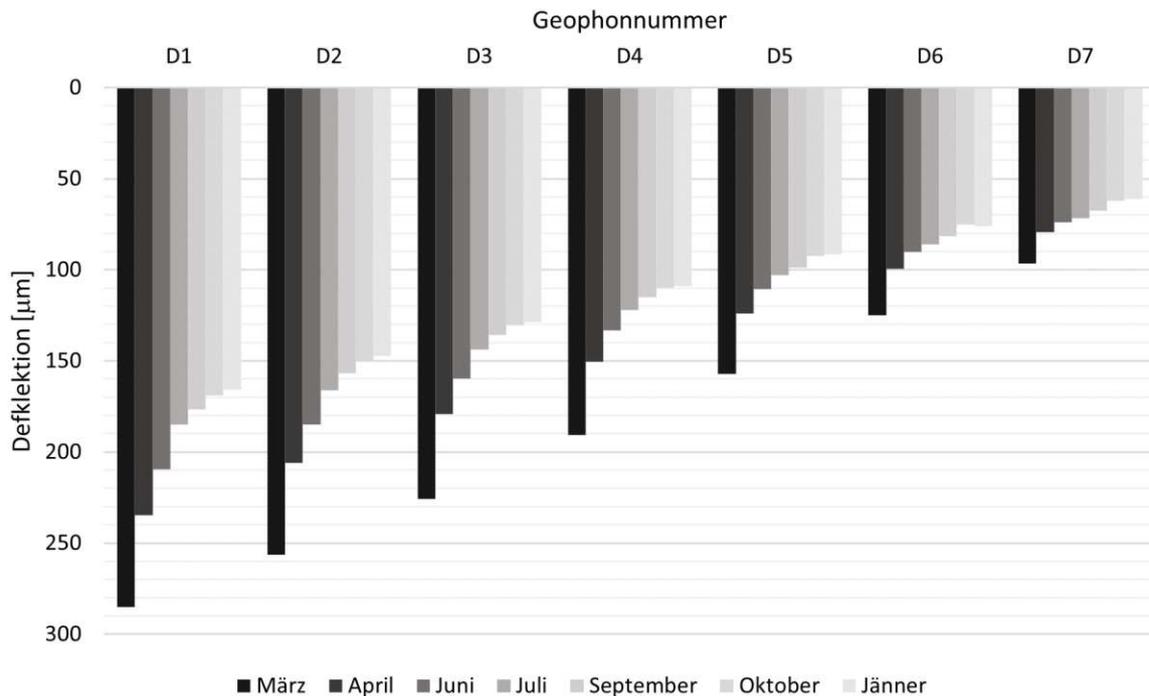


Abb. 4.9: Deflektionsmulden der periodischen FWD-Messungen auf der A10

Die entstandene Deflektionsmulde einer FWD-Messung beschreibt die Gesamtsteifigkeit eines Straßenaufbaus. Die Aufgabe des Rückrechnungsprogrammes ist die richtige Aufteilung der Gesamtsteifigkeit auf die einzelnen Schichten. Diese Aufteilung ist bei, in Österreich üblichen, Betonaufbauten erschwert durch die Lagerung der Betondecke auf einer dünnen Asphaltenschicht, wie in Abbildung 4.10 ersichtlich. Bei ersten Berechnungen stellte sich dieser sandwichartige Aufbau der Straße als Problem heraus. Sandwichartig bezeichnet den Aufbau einer steifen und dicken Betonschicht, gefolgt von einer relativ weichen, dünnen Asphaltenschicht gefolgt von einer weiteren steifen, dicken Zementstabilisierung. Vor allem betroffen sind hiervon Messungen im Sommer, da die höheren Temperatur des Asphalttes eine niedrigere Steifigkeit zur Folge hat, siehe Kapitel 3. Die Thermoviskoelastizität der Asphaltenschicht war allerdings nur eine der möglichen Ursachen für unzufriedenstellende Ergebnisse. Als zweite Möglichkeit identifizierte sich die Anzahl der zu berechnenden Schichten, da dies die Komplexität des Modells erhöht. Deshalb wurden in den weiteren Betrachtungen vier Berechnungsvarianten unterschieden, siehe Abbildung 4.11. Einerseits wurde auf die Unterscheidung zwischen ungebundener unterer Tragschicht und Untergrund verzichtet um die Anzahl an Schichten zu reduzieren, siehe Abbildung 4.12. Daraus entstand die Unterscheidung *5lay* und *4lay* (Abbildung 4.11), die erwartete Steifigkeit in diesen



Abb. 4.10: Schichtaufbau der FMS A10

unteren Schichten ist sehr ähnlich. Andererseits wurde auf die Rückrechnung der Asphalttschicht verzichtet, stattdessen wurde die, im Zuge der 4PB-Pr definierte, Steifigkeit des Asphalts bei 20 °C mittels Temperaturkorrektur auf die vorort herrschende Temperatur umgerechnet und als Konstante in das Berechnungsprogramm eingesetzt. Dies ergab die Unterscheidung in *unfixed* und *fixed* und die Betrachtung von vier Berechnungsvarianten (Abbildung 4.11).

Bezeichnung	5 Schichten	4 Schichten
Asphalt rückgerechnet	5lay_unfixed	4lay_unfixed
Asphalt aus 4PBB	5lay_fixed	4lay_fixed

Abb. 4.11: Bezeichnung der vier Berechnungsvarianten



Abb. 4.12: Modellierungsunterschiede der Berechnungsvarianten

4.4.1 Erwartungswerte aus Laborprüfungen

- Beton (Plain Cement Concrete, PCC)

Die Betonschicht wurde mit zwei Betonlagen ausgeführt die bei der Backcalculation zusammengefasst wurden. Laborversuche haben ein E-Modul von 34 100 MPa für den Oberbeton und 40 200 MPa für den Unterbeton ergeben. Erwartet wird ein E-Modul laut Gleichung (4.19).

$$E_{PCC} = \sqrt{(34100 \cdot 5/27)^2 + (46300 \cdot 22/27)^2} = 38\,250 \text{ MPa} \quad (4.19)$$

- Asphalt (Asphalt Concrete, AC)

Die erwartete Steifigkeit der Asphalttschicht wurde mittels Vierpunkt-Biegeprüfung (4PB-Pr) ermittelt und im Anschluss auf die Schichttemperatur zum Zeitpunkt der Messung korrigiert. Die möglichen Ansätze zur Temperaturkorrektur wurden in „Gegenüberstellung von Indikatoren zur Bewertung der Tragfähigkeit bituminös gebundener Straßen“ [13] diskutiert. Für die hier erforderliche Korrektur wurde der Ansatz von Baltzer und Jansen [1] angewandt. Dazu wurde die aufgezeichnete Temperatur der Sensoren T_4 und T_5 (vgl. Abbildung 2.4.c und Tabelle 4.3) gemittelt und in Gleichung (4.21) eingesetzt, um einen Temperaturkorrekturfaktor κ zu erhalten. Nach Gleichung (4.22) kann im Anschluss die zu erwartende Asphaltsteifigkeit zum Zeitpunkt der Messung berechnet werden [1], die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

- Zementstabilisierte Tragschicht (Cement-Bound Layer, CB)

Dank der verbauten Beschleunigungssensoren (vergleiche Kapitel 2.1.1) konnte während der FWD-Messung auf die Steifigkeit der Schicht direkt rückgeschlossen werden. Sie beträgt über alle Messungen gemittelt 9472 MPa, siehe Tabelle 4.4. Eine Erklärung der großen Steifigkeitsunterschiede in den Frühlingsmonaten ist die Aufwölbung der Betonplatte. Dies kann zur Folge gehabt haben, dass der Fallgewichtsimpuls abgeschwächt und damit

Tab. 4.3: Gemessene Asphaltsteifigkeit basierend auf den Ergebnissen der 4PB-Pr

Messung		T [°C]	κ [-]	E_{AC} [MPa]
Steifigkeit lt. 4PB-Pr bei 20 °C				7 500
März	A10.2	6,13	0,56	13 325
April	A10.3	10,62	0,68	11 064
Juni	A10.4	19,76	0,99	7 576
Juli	A10.5	22,23	1,10	6 839
September	A10.6	17,77	0,91	8 226
Oktober	A10.7	9,30	0,64	11 687
Jänner	A10.8	-0,11	0,43	17 258

verlangsamt wurde. Der für weitere Vergleiche relevante Mittelwert aller Messungen ist hingegen plausibel.

Tab. 4.4: Gemessene, gemittelte Steifigkeit der Zementstabilisierung basierend auf den Ergebnissen der Beschleunigungssensoren

Messung		$E_{CB,mean}$ [MPa]	STAB [%]
Februar	A10.1	9 480	15,00%
März	A10.2	17 260	99,00%
April	A10.3	28 800	28,00%
Juni	A10.4	24 010	37,00%
Juli	A10.5	10 200	25,00%
September	A10.6	9 200	14,00%
Oktober	A10.7	10 400	46,00%
Jänner	A10.8	8 080	10,00%
Mittelwert		9 472	25,00%

- Ungebundene untere Tragschicht (Unbound Layer, UB) und Untergrund (Subgrade, SUB)
Während die erwarteten Steifigkeiten des Betons, des Asphalts und der Zementstabilisierung aus Laborprüfungen oder Sensordaten ermittelt werden, bezieht sich die Erwartungshaltung der restlichen Steifigkeiten (UB und SUB) auf die Vorgaben der *RVS 03.06.68* [21]. Dabei ist die Untergrundsteifigkeit von der Jahresperiode abhängig. Für die ungebundene untere Tragschicht gibt Tabelle 9 der *RVS 03.06.68* [21] das Verhältnis $E_{UB}/E_{SUB} = 2,80$ vor. Tabelle 4.5 fasst die erwarteten Steifigkeiten zusammen.

Tab. 4.5: Erwartete Steifigkeit des Untergrundes laut *RVS 03.06.68* [21, Tab.8]

Jahresperiode	Zeitraum	E_{SUB} [MPa]	E_{UB} [MPa]
Winter	16.12.-15.03.	280	784
Frühjahrstau	16.03.-15.05.	70	196
Übergang	16.05.-15.06.	100	280
Sommer/Herbst	16.06.-15.12.	140	392

4.4.2 ELMOD: Berechnungen

Die erste Messung war geprägt von einer für die Jahreszeit ungewöhnlich hohen Temperatur, hinzu kommt die im Frühjahr auftretende Tauperiode. Dies hatte hohe Deflektionen zur Folge und die Bewertung der Tragfähigkeit wurde sichtlich erschwert. Über alle vier Berechnungsvarianten hinweg wurden die drei wesentlichen Schichten des Aufbaus als zu weich interpretiert und die Abweichung der berechneten Deflektionsmulde im Vergleich zur tatsächlich gemessenen Deflektionsmulde ist von allen Messungen am Größten. Dies wird in den Abbildungen 4.13, 4.14, 4.15 und 4.16 für alle Messungen dargestellt. Neben dem großen Fehler der Märzmessung sieht man, dass auch die Messung im April noch von der Frühjahrstauperiode betroffen ist. Dies wurde auch schon bei der Erfassung der gemessenen Deflektionen (Abbildung 4.9) erwartet. Weiters kann beobachtet werden, dass alle vier Berechnungsvarianten (*5lay_unfixed*, *4lay_unfixed*, *5lay_fixed*, *4lay_fixed*) vergleichbar sind, da die Abweichungen der Ergebnisse ähnlich groß sind. Abbildung 4.17 beschreibt das quadratische Mittel aller Berechnungen einer Messung. Auch hiermit bestätigte sich, dass die Märzmessung nur mit relativ großen Abweichungen rückgerechnet werden kann, während für die übrigen Messtage unabhängig von der Berechnungsvariante eine Abweichung zwischen 2 μm und 4 μm erreicht werden.

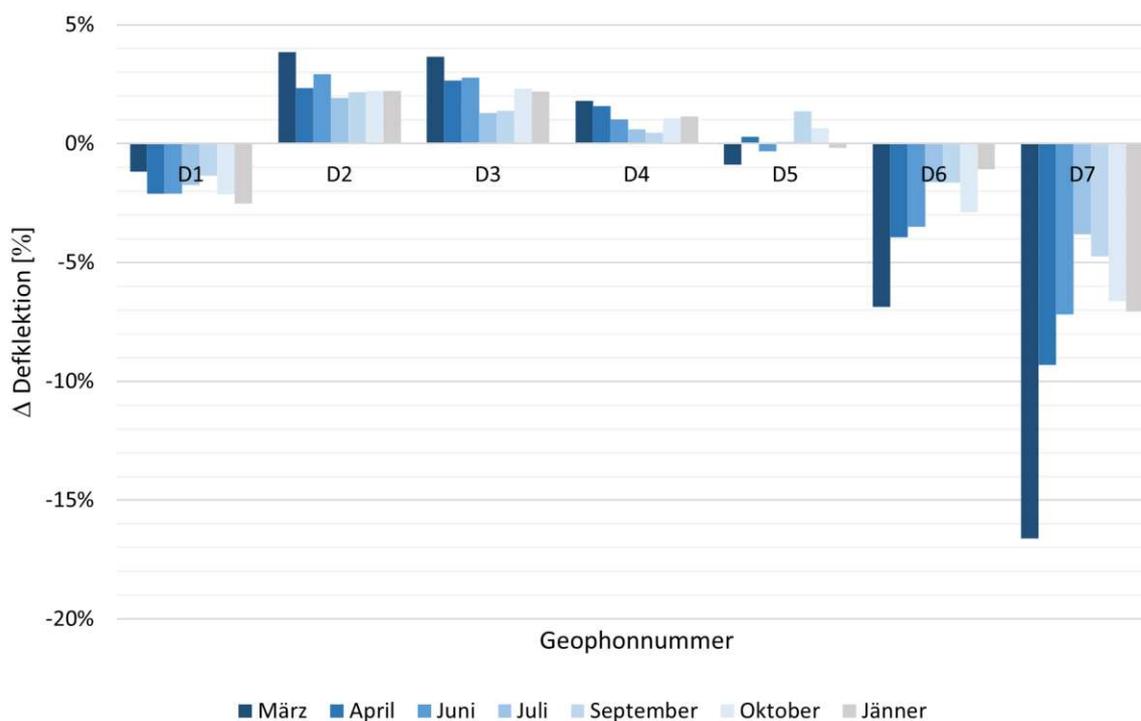


Abb. 4.13: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen, Berechnungsvariante: 5 Schichten, nicht fixierte Asphalttschicht (*5lay_unfixed*)

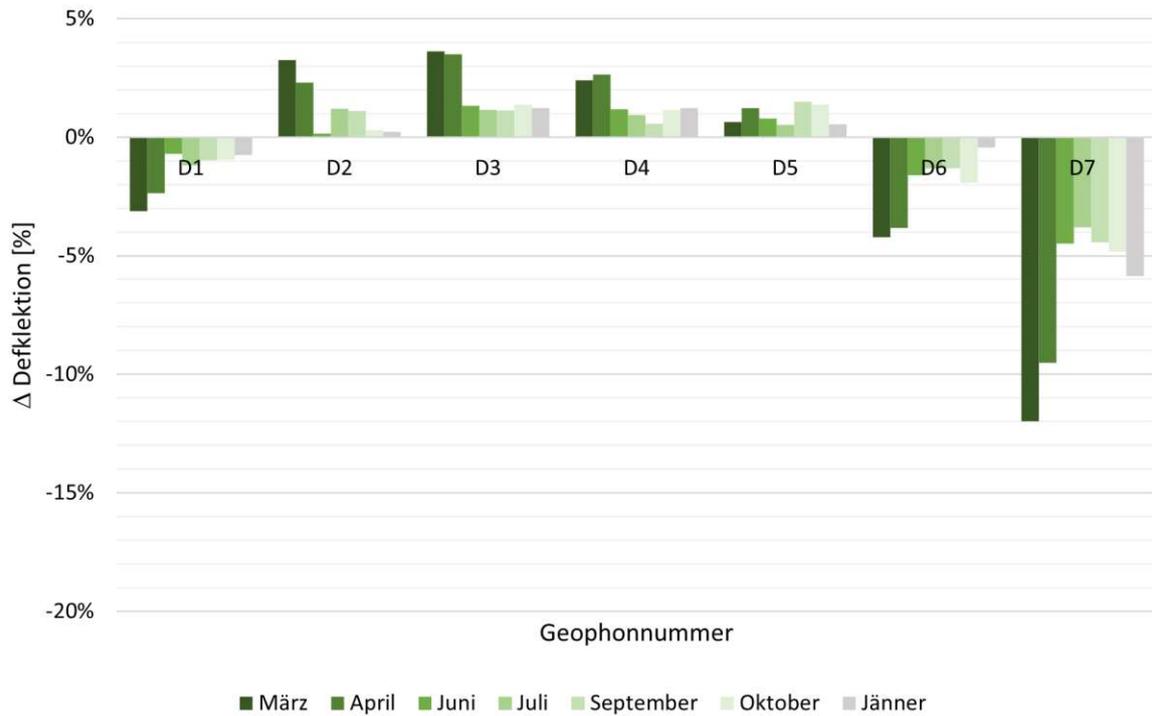


Abb. 4.14: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen, Berechnungsvariante: 4 Schichten, nicht fixierte Asphalttschicht (*4lay_unfixed*)

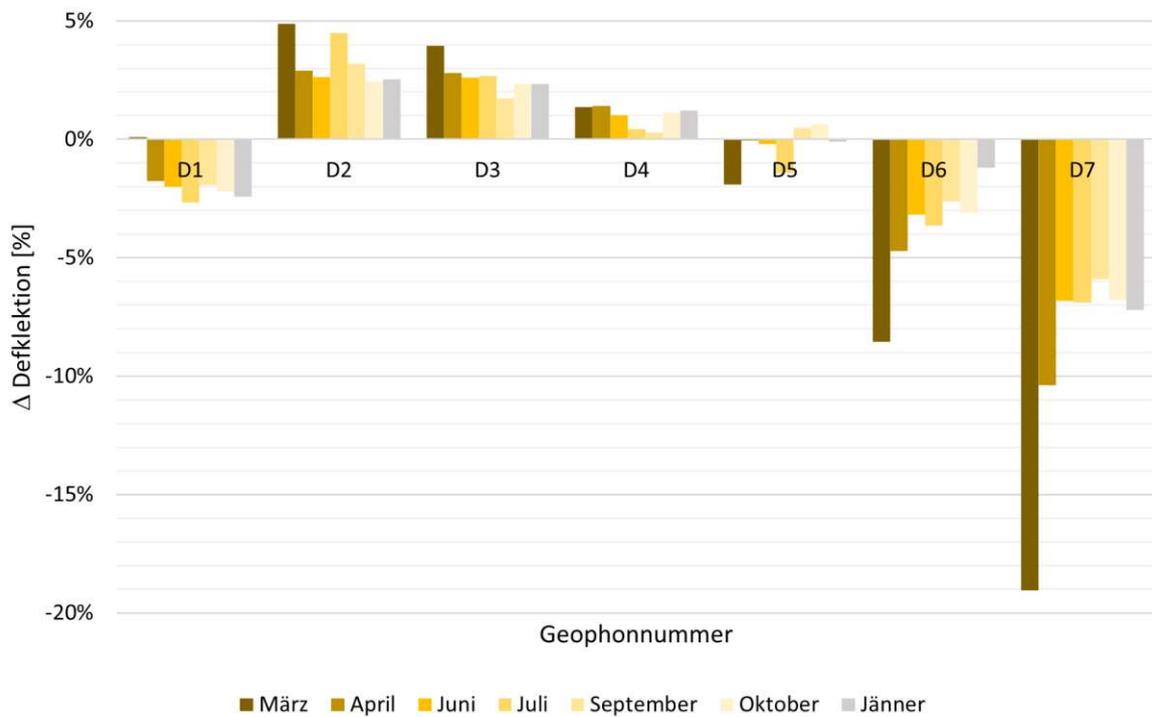


Abb. 4.15: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen, Berechnungsvariante: 5 Schichten, fixierte Asphalttschicht (*5lay_fixed*)

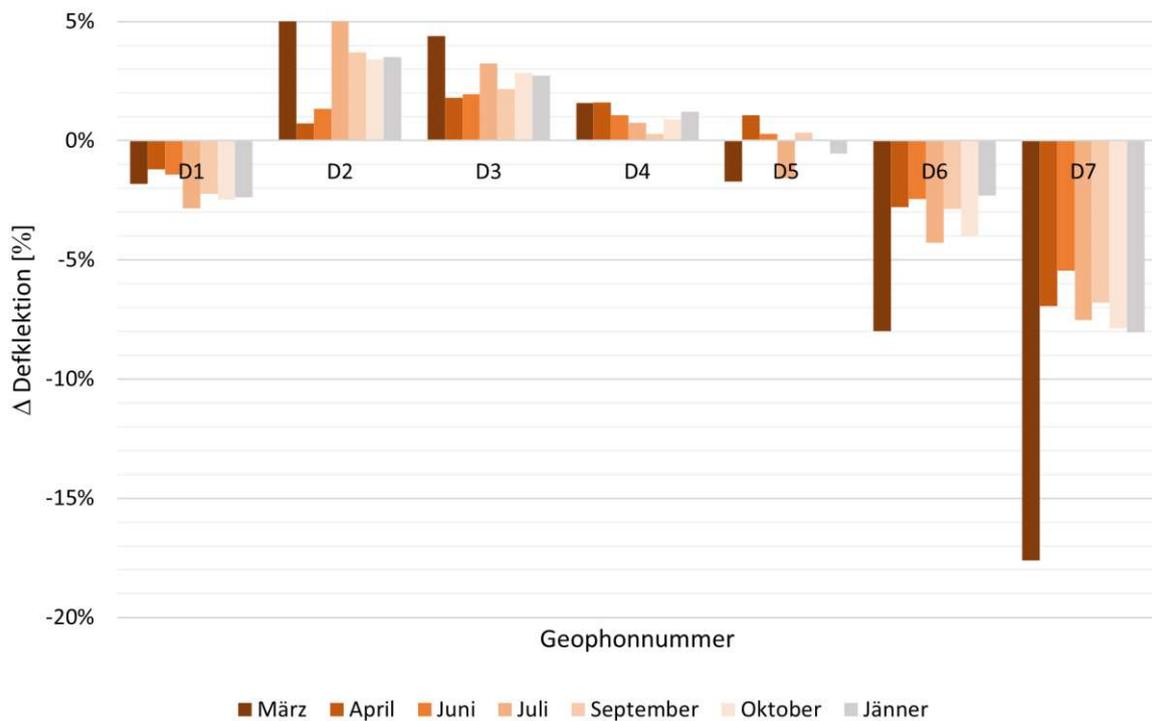


Abb. 4.16: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen, Berechnungsvariante: 4 Schichten, fixierte Asphaltsschicht (*4lay_fixed*)

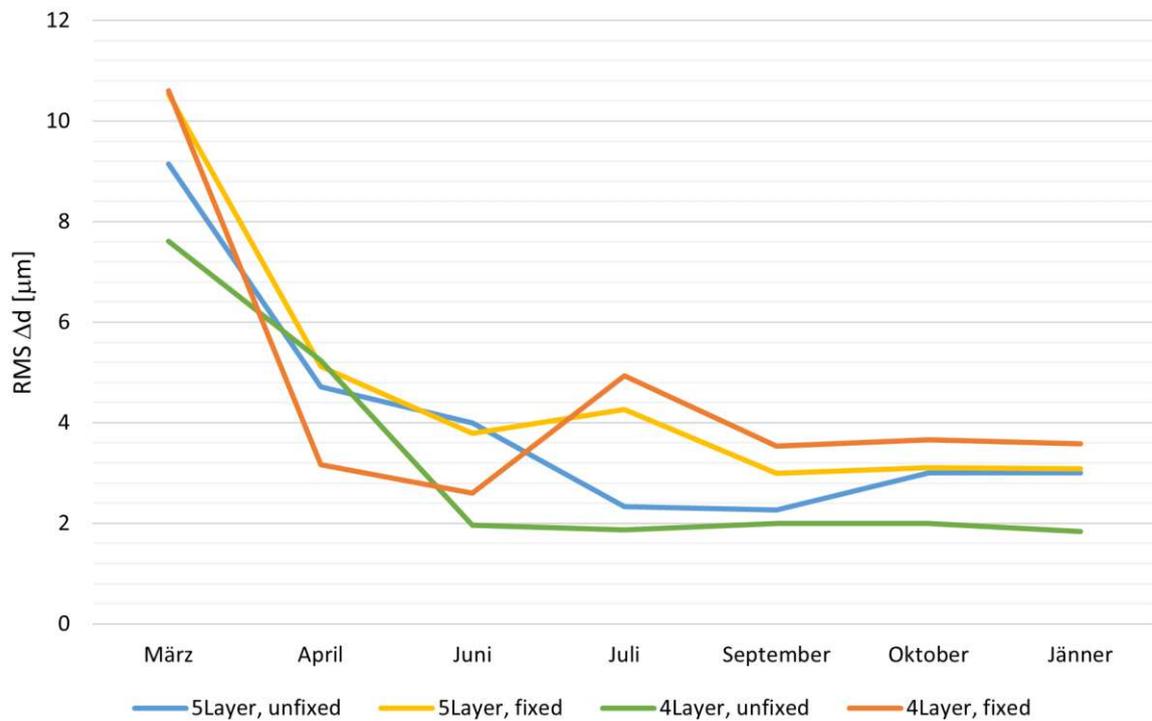


Abb. 4.17: Quadratisches Mittel (Root Mean Square, RMS) der Abweichungen der Berechnungsergebnisse pro Messung

4.4.2.1 Schichtsteifigkeiten

Im folgenden Kapitel werden die berechneten Schichtsteifigkeiten der vier Berechnungsvarianten zusammengefasst. Im Anhang A.3, Tabelle A.11 bis A.17 sind die verwendeten Randbedingungen, Schranken und Ergebnisse inklusive Standardabweichungen aufgeschlüsselt.

- Beton (Plain Cement Concrete, PCC)

Der erwartete E-Modul ist in Gleichung 4.19 definiert. Dieser konnte ausschließlich mit der Berechnungsvariante *4lay_unfixed* annähernd rückgerechnet werden. Vor allem die Ergebnisse der Berechnungsvarianten mit fixierter Asphaltsteifigkeit sind nicht zufriedenstellend, siehe Tabelle 4.6 und Abbildung 4.18.

Tab. 4.6: Steifigkeit der Betonschicht aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

Messung	E_{PCC} [MPa]				Labor	
	5lay_unfixed	4lay_unfixed	5lay_fixed	4lay_fixed	$E_{PCC,o}$	$E_{PCC,u}$
März A10.2	19 947	17 761	19 794	15 015	34 100	46 300
April A10.3	22 062	22 444	21 124	27 528	34 100	46 300
Juni A10.4	24 939	36 680	25 763	30 664	34 100	46 300
Juli A10.5	36 178	42 801	24 820	23 549	34 100	46 300
Sept. A10.6	34 931	40 856	29 021	27 036	34 100	46 300
Okt. A10.7	33 334	46 257	32 587	29 077	34 100	46 300
Jän. A10.8	32 636	47 208	32 266	29 020	34 100	46 300
Mittelwert	29 147	36 287	26 482	25 984	34 100	46 300
STAB	6 648	11 669	5 064	5 329	0,00	0,00

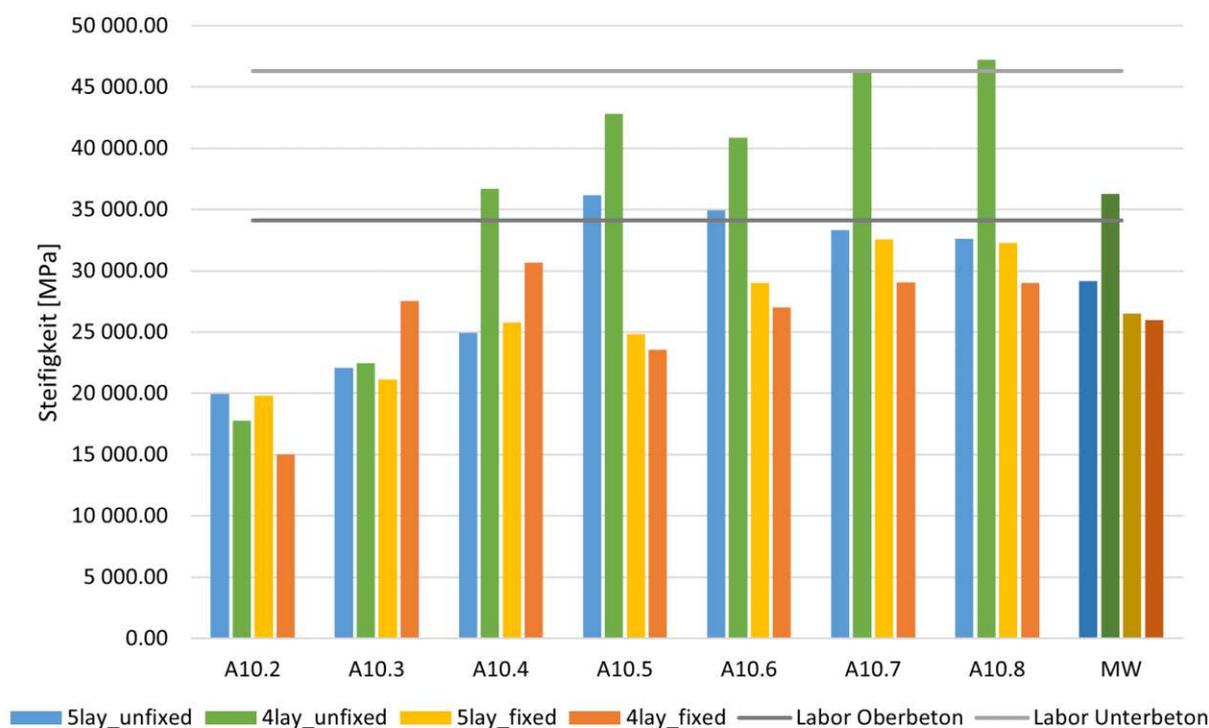


Abb. 4.18: Steifigkeit der Betonschicht aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

- Asphalt (Asphalt Concrete, AC)

Bei den Berechnungsvarianten *5lay_fixed* und *4lay_fixed* wurde die Asphaltsteifigkeit nicht von ELMOD berechnet, stattdessen wurde die zu erwartende Steifigkeit laut Laborergebnissen temperaturkorrigiert, siehe Tabelle 4.3, und als Fixwert in das Rückrechnungsprogramm eingesetzt. Dies sollte die Bewertung der übrigen Schichten erleichtern. In Tabelle 4.7 und Abbildung 4.19 ist ersichtlich, dass obwohl *4lay_unfixed* gute Ergebnisse bei der Betonsteifigkeit ergab, die Asphaltsteifigkeit tendenziell unterbewertet wurde. Bei *5lay_unfixed* ist es genau umgekehrt. Die fixierte, oftmals sehr hohe, Asphaltsteifigkeit bei *5lay_fixed* und *4lay_fixed* haben ebenfalls eine Unterbewertung der Betonsteifigkeit bei diesen Berechnungsvarianten zur Folge.

Tab. 4.7: Steifigkeit der Asphaltsschicht aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

Messung	T_{AC} [°C]	E_{AC} [MPa]				Labor	
		5lay_unfixed	4lay_unfixed	5lay_fixed	4lay_fixed		
März	A10.2	6,13	8 613	10 033	13 325	13 325	13 325
April	A10.3	10,62	7 685	5 352	11 064	11 064	11 064
Juni	A10.4	19,54	8 257	6 209	7 576	7 576	7 576
Juli	A10.5	22,23	7 538	5 682	6 840	6 840	6 840
September	A10.6	17,91	8 625	6 588	8 226	8 226	8 226
Oktober	A10.7	9,30	10 627	7 522	11 687	11 687	11 687
Jänner	A10.8	-0,11	15 754	10 496	17 258	17 257	17 257

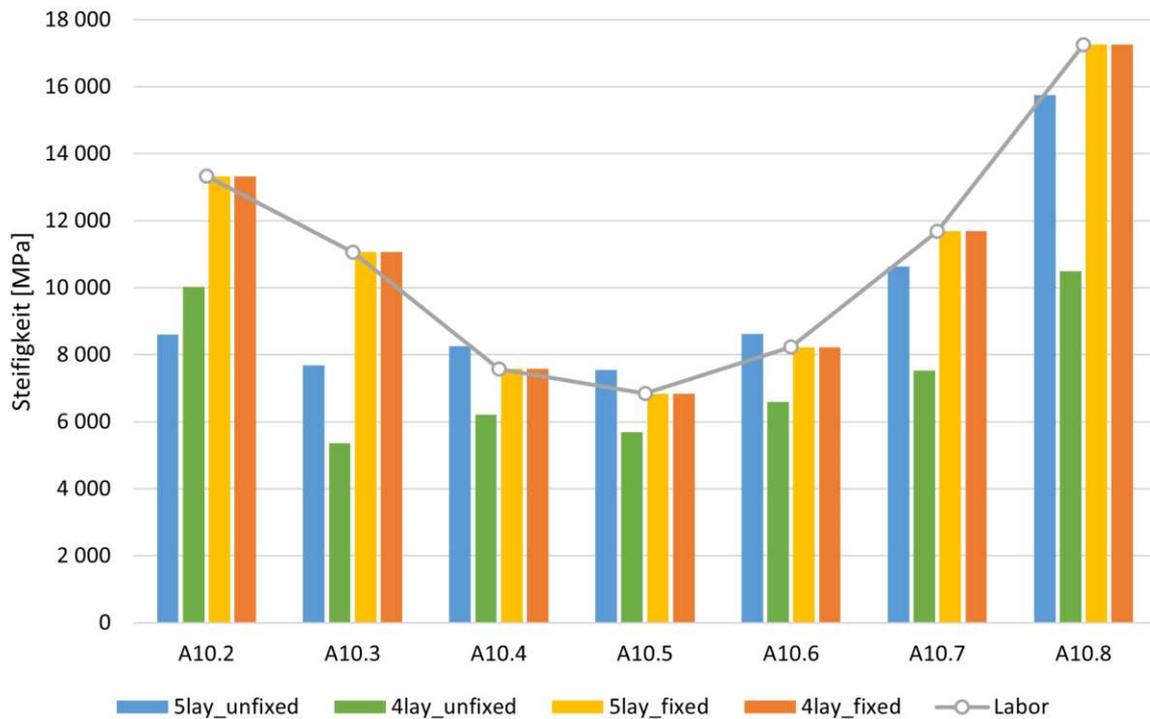


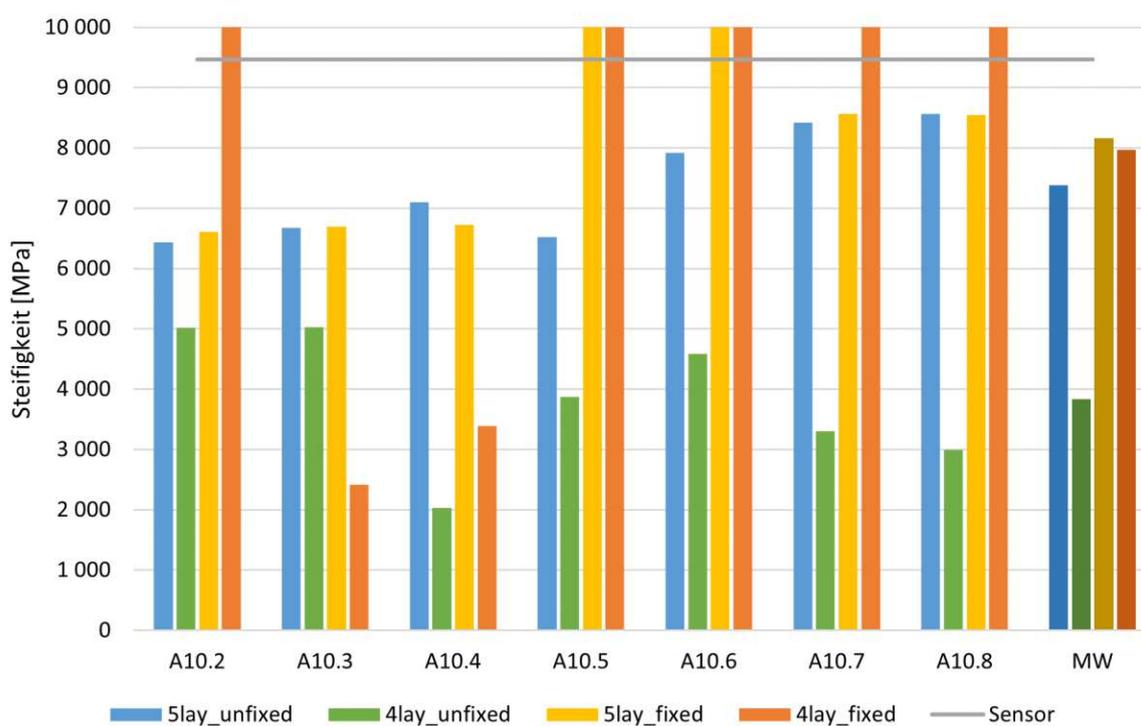
Abb. 4.19: Steifigkeit der Asphalttschicht aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

- Zementstabilisierte Tragschicht (Cement-Bound Layer, CB)

In Tabelle 4.7 und Abbildung 4.20 ist ersichtlich, dass in einigen Fällen ein E-Modul von exakt 10 000 MPa auftritt. Dies ist dem Fakt geschuldet, dass erste Ergebnisse in dieser Schicht bei den betroffenen Messungen unrealistisch niedrig waren. Als Reaktion wurde die in Kapitel 4.4.1 diskutierte, erwartete Steifigkeit von 10 000 MPa eingesetzt. Dies wirkt sich auf die niedrige Betonsteifigkeit der Varianten *5lay_fixed* und *4lay_fixed* aus und führt die Betrachtung dieser beiden Varianten ad absurdum, da man in der Realität nur in den seltensten Fällen derartig viele Informationen besitzt, um Annahmen zuverlässig treffen zu können. Die Variante *5lay_unfixed* liefert ohne Fremdeinfluss akurate Ergebnisse, während *4lay_unfixed* die zementstabilisierte Tragschicht als zu weich bewertet.

Tab. 4.8: Steifigkeit der zementstab. o.TS. aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELM-OD

Messung		E_{CB} [MPa]				Sensor
		5lay_unfixed	4lay_unfixed	5lay_fixed	4lay_fixed	
März	A10.2	6 434	5 016	6 609	10 000	9 472
April	A10.3	6 679	5 027	6 695	2 415	9 472
Juni	A10.4	7 103	2 032	6 728	3 392	9 472
Juli	A10.5	6 527	3 870	10 000	10 000	9 472
September	A10.6	7 919	4 586	10 000	10 000	9 472
Oktober	A10.7	8 426	3 299	8 564	10 000	9 472
Jänner	A10.8	8 568	2 993	8 546	10 000	9 472
Mittelwert		7 379	3 832	8 163	7 973	9 472
STAB		912	1 127	1 510	3 474	0

**Abb. 4.20:** Steifigkeit der zementstab. o.TS. aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

- Ungebundene untere Tragschicht (Unbound Layer, UB)

Bei der ungebundenen unteren Tragschicht sind die Unterschiede bei allen vier Varianten sehr gering und mit Ausnahme der Messung A10.8 sehr nahe an den erwarteten Ergebnissen (Tabelle 4.5). Die Varianten *4lay_unfixed* und *4lay_fixed* kombinieren hier die UB und SUB.

Tab. 4.9: Steifigkeit der ungeb. u.TS. aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

Messung		E_{UB} [MPa]				<i>RVS 03.06.68</i>
		<i>5lay_unfixed</i>	<i>4lay_unfixed</i>	<i>5lay_fixed</i>	<i>4lay_fixed</i>	
März	A10.2	231	189	229	184	196
April	A10.3	318	330	318	270	196
Juni	A10.4	385	353	381	353	280
Juli	A10.5	422	418	406	393	392
September	A10.6	448	446	439	426	392
Oktober	A10.7	462	434	462	438	392
Jänner	A10.8	449	411	449	413	784
Mittelwert		388	369	383	354	376
STAB		85	90	84	94	87

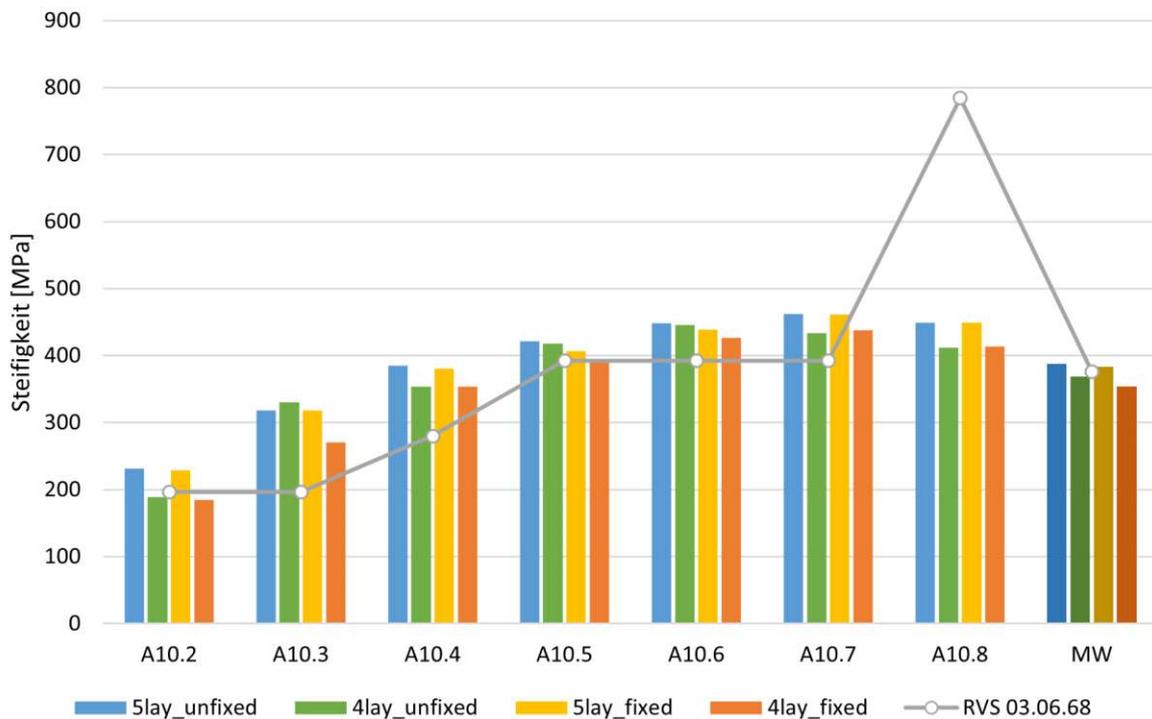


Abb. 4.21: Steifigkeit der ungeb. u.TS. aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

- Untergrund (Subgrade, SUB)

Im Unterbau wurden nur noch die Varianten *5lay_unfixed* und *5lay_fixed* betrachtet. Beide mit sehr ähnlichen Ergebnissen, wenn auch deutlich steifer als erwartet wurde. Die Erwartungshaltung wurde in beiden Fällen um beinahe das Dreifache überschritten (vergleiche Tabelle 4.5).

Tab. 4.10: Steifigkeit des Untergrundes aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

Messung		E_{SUB} [MPa]				RVS 03.06.68
		5lay_unfixed	4lay_unfixed	5lay_fixed	4lay_fixed	
März	A10.2	220	-	219	-	70
April	A10.3	303	-	305	-	70
Juni	A10.4	379	-	372	-	100
Juli	A10.5	420	-	403	-	140
September	A10.6	451	-	437	-	140
Oktober	A10.7	449	-	453	-	140
Jänner	A10.8	436	-	435	-	280
Mittelwert		380	-	375	-	134
STAB		88	-	85	-	72

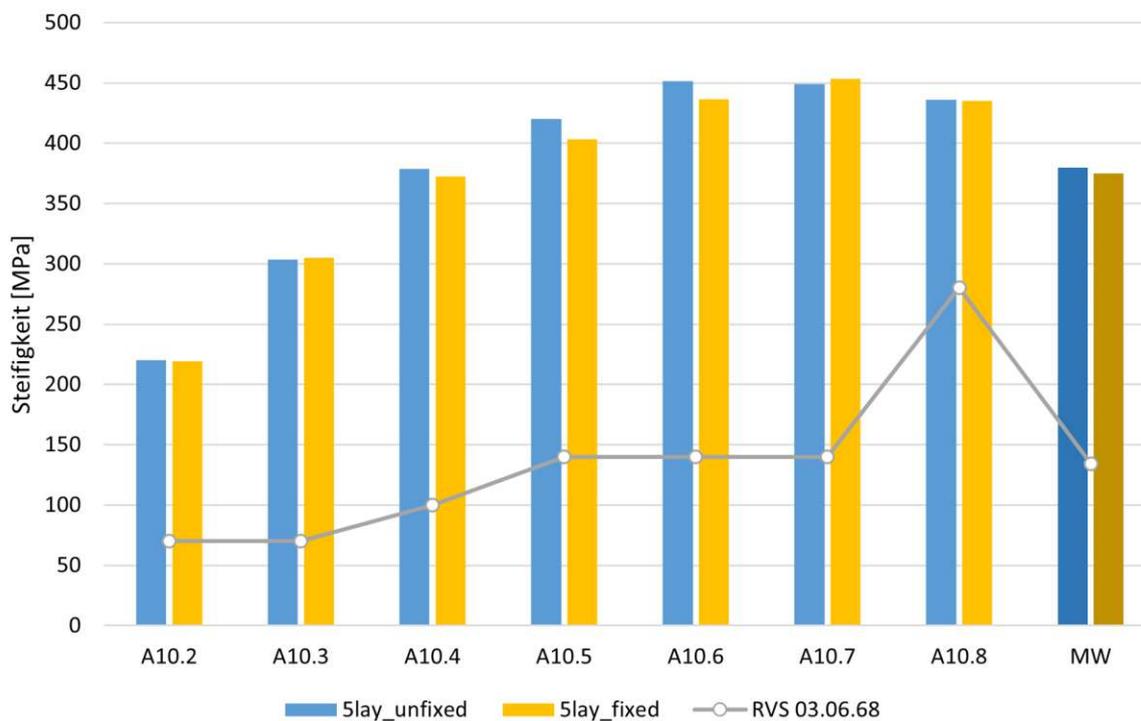


Abb. 4.22: Steifigkeit des Untergrundes aller Messungen und Berechnungsvarianten in ELMOD

- Zusammenfassung

Positiv hervorzuheben ist die Genauigkeit der Ergebnisse. Die Standardabweichungen sind bei allen Berechnungsvarianten, ausgenommen *4lay_unfixed*, sehr gering ($< 10\%$), siehe Tabelle 4.11. Abbildung 4.23 stellt die gemittelten Steifigkeiten der vier Berechnungsvarianten gegenüber. Bei den Ergebnissen von *4lay_unfixed* sieht man, dass E_{PCC} am nächsten an den Laborergebnissen liegt. Die Abweichung beträgt hier lediglich 5,1%. Die gebundenen bzw. stabilisierten Tragschichten (AC: siehe Abbildung 4.24) werden zu weich bewertet. Die Abweichung beträgt 29,4% beim Asphalt und 61,0% bei der Zementstabilisierung. Bei Variante *5lay_unfixed* ist nicht nur die Standardabweichung geringer als bei *4lay_unfixed*. Die Ergebnisse liegen näher an den erwarteten Steifigkeiten, 8,5% beim Asphalt und 24,9% bei der Zementstabilisierung. Eine Ausnahme stellt die Betonsteifigkeit dar, doch auch hier beträgt die Abweichung nur 23,8%.

Die untere ungebundene Tragschicht und der Untergrund wurden im Zuge der Autobahnsanierung nicht erneuert, dies deutet auf einen guten Zustand dieser Schichten hin. Damit sind die Ergebnisse durchaus innerhalb realistischer Grenzen, vorallem unter Betrachtung ihrer Schlüssigkeit und geringen Standardabweichungen. Die Validierung ist allerdings aufgrund der fehlenden Messbarkeit nur schwer möglich.

In Tabelle 4.12 wurden die Ergebnisse der Asphaltsteifigkeit nach der in Gleichung (4.21) und (4.22) vorgestellten Methode auf 20 °C temperaturkorrigiert, um Vergleichbarkeit zu ermöglichen. In Abbildung 4.24 wurden die Varianten mit unfixierter Asphaltsteifigkeit (*5lay_unfixed* und *4lay_unfixed*) mit der Asphalttemperatur zum Zeitpunkt der Messung und der Steifigkeit laut 4PB-Pr gegenübergestellt.

Tab. 4.11: ELMOD: Zusammenfassung der gemittelten Berechnungsergebnisse für die Messungen der A10

Variante	Parameter	Schichtsteifigkeiten [MPa]				
		E_{PCC}	E_{AC}	E_{CB}	E_{UB}	E_{SUB}
5lay_unfixed	MW	29 147	6 861	7 379	388	380
	STAB	2 090	1 281	601	13	17
	STAB%	7,17%	18,67%	8,14%	3,42%	4,45%
4lay_unfixed	MW	36 287	7 500	3 832	369	-
	STAB	4 449	0	862	19	-
	STAB%	12,26%	0,00%	22,50%	5,23%	-
5lay_fixed	MW	26 482	5 293	8 163	383	375
	STAB	1 612	908	457	14	17
	STAB%	6,09%	17,15%	5,60%	3,56%	4,45%
4lay_fixed	MW	25 984	7 500	7 973	354	-
	STAB	1 876	0	239	24	-
	STAB%	7,22%	0,00%	3,00%	6,76%	-
Labor/Sensor/RVS 03.06.68 [21]		38 251	7 500	9 820	376	134

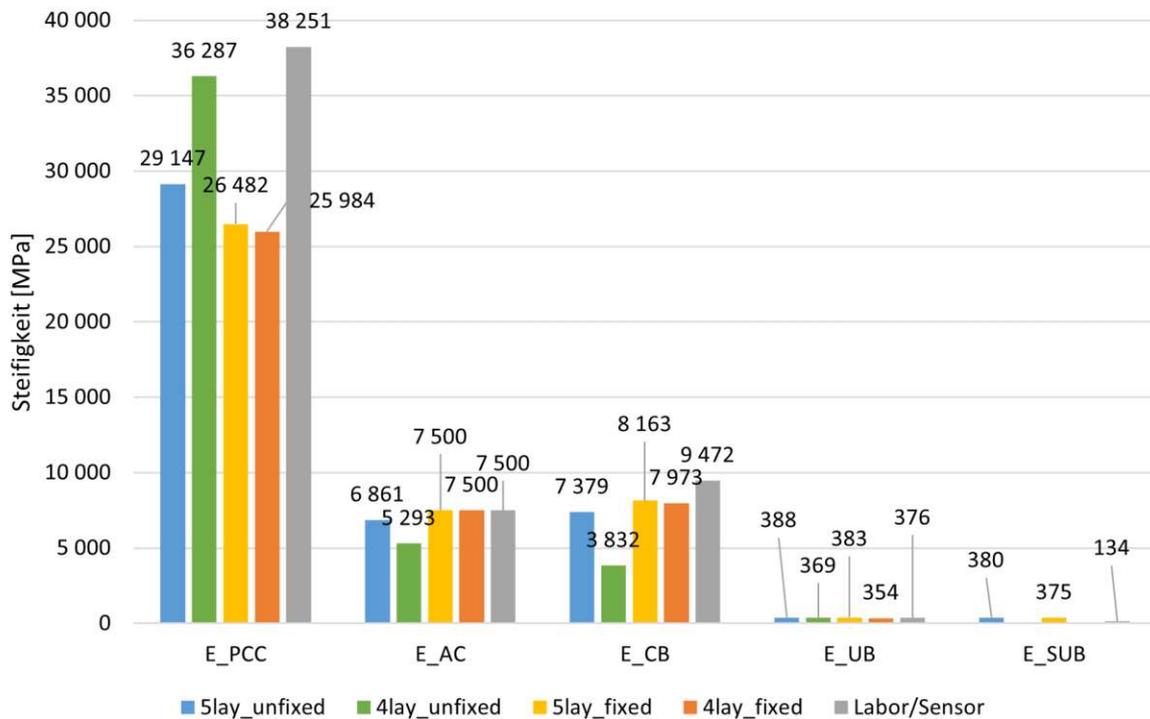


Abb. 4.23: ELMOD: Rückgerechnete Steifigkeiten anhand vier Berechnungsmethoden

Tab. 4.12: ELMOD: Berechnungsergebnisse des Asphalts temperaturkorrigiert für die Messungen der A10

Messung	T [°C]	κ [-]	Asphaltsteifigkeiten [MPa]					
			E_{AC}^{5Lay}	$E_{AC,T=20}^{5Lay}$	E_{AC}^{4Lay}	$E_{AC,T=20}^{4Lay}$	$E_{AC,T=20}^{Labor,8Hz}$	
März	A10.2	6,13	0,56	8 613	4 848	10 033	5 647	7 500
April	A10.3	10,62	0,68	7 685	5 209	5 352	3 628	7 500
Juni	A10.4	19,76	0,99	8 257	8 174	6 209	6 146	7 500
Juli	A10.5	22,23	1,10	7 538	8 267	5 682	6 231	7 500
September	A10.6	17,77	0,91	8 625	7 864	6 588	6 006	7 500
Oktober	A10.7	9,30	0,64	10 627	6 820	7 522	4 827	7 500
Jänner	A10.8	-0,11	0,43	15 754	6 847	10 496	4 561	7 500
Mittelwert				-	6 861	-	5 293	7 500
STAB				-	1 281	-	908	0

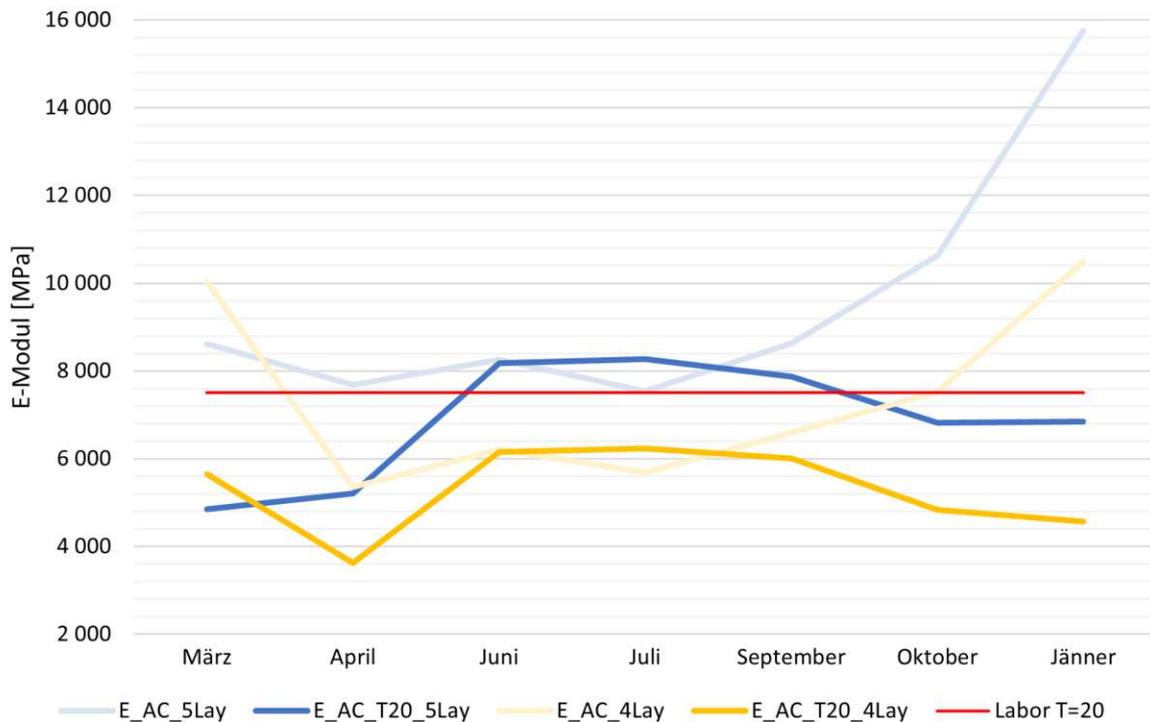


Abb. 4.24: ELMOD: Rückgerechnete Steifigkeit des Asphalts zweier Berechnungsmethoden, temperaturkorrigiert nach Baltzer und Jansen [1], verglichen mit dem Laborergebnis (Kap. 3.1)

4.4.3 BAKFAA: Berechnungen

Die Abbildungen 4.25, 4.26, 4.27 und 4.28 zeigen den Fehler der berechneten Deflektionsmulde im Vergleich zur gemessenen (Abbildung 4.9). Bei der Berechnungsvariante *5lay_unfixed* (Abbildung 4.25) sieht man, dass der Fehler vor allem bei den Messungen vom März, April und Juni sehr groß ist und mit der Distanz zur Lastplatte zunimmt. Ein Fehler von über 25 % lässt keine plausiblen Schlüsse auf den davon betroffenen Untergrund zu. Dahingehend ist der Fehler bei Berechnungsvariante *4lay_unfixed* aller Messungen sehr gering (Abbildung 4.26), mit Ausnahme jener im März. Doch auch hier ist ein Anstieg des Fehlers mit der Distanz zur Lastplatte festzustellen, er beschränkt sich allerdings auf akzeptable 5%. Berechnungen nach Variante *5lay_fixed* ergaben ähnliche Fehler wie bei der Variante *5lay_unfixed* (Abbildung 4.27), jedoch betragen die maximalen Abweichungen beim Geophon D_7 weniger als 15% und sind damit deutlich geringer und die Ergebnisse aussagekräftiger als noch zuvor. Auch *4lay_fixed* ähnelt der ersten vierschichtigen Berechnungsvariante (Abbildung 4.28). Die Märzmessung ist auch hier von großen Abweichungen geprägt, während die übrigen Ergebnisse geringe Fehler aufweisen. Im Gegensatz zu ELMOD berechnet BAKFAA den Untergrund linear. Dazu muss ein erwarteter Abstand zur ursprünglich vorhandenen Felsschicht angenommen werden. Für die in alpiner Umgebung liegende Feldmessstelle der A10 wurde eine Untergrunddicke von 65 cm gewählt. In Abbildung 4.29 wird das quadratische Mittel aller Berechnungen einer Messung dargestellt. Ersichtlich ist, dass die Genauigkeit der Varianten mit *fixierter* Asphaltsteifigkeit (*5lay_fixed*, *4lay_fixed*) mit fortschreitendem Kalenderjahr zunimmt. Die schwankenden Ergebnisse der Varianten *5lay_unfixed* und *4lay_unfixed* lassen keine aussagekräftigen Schlüsse zu.

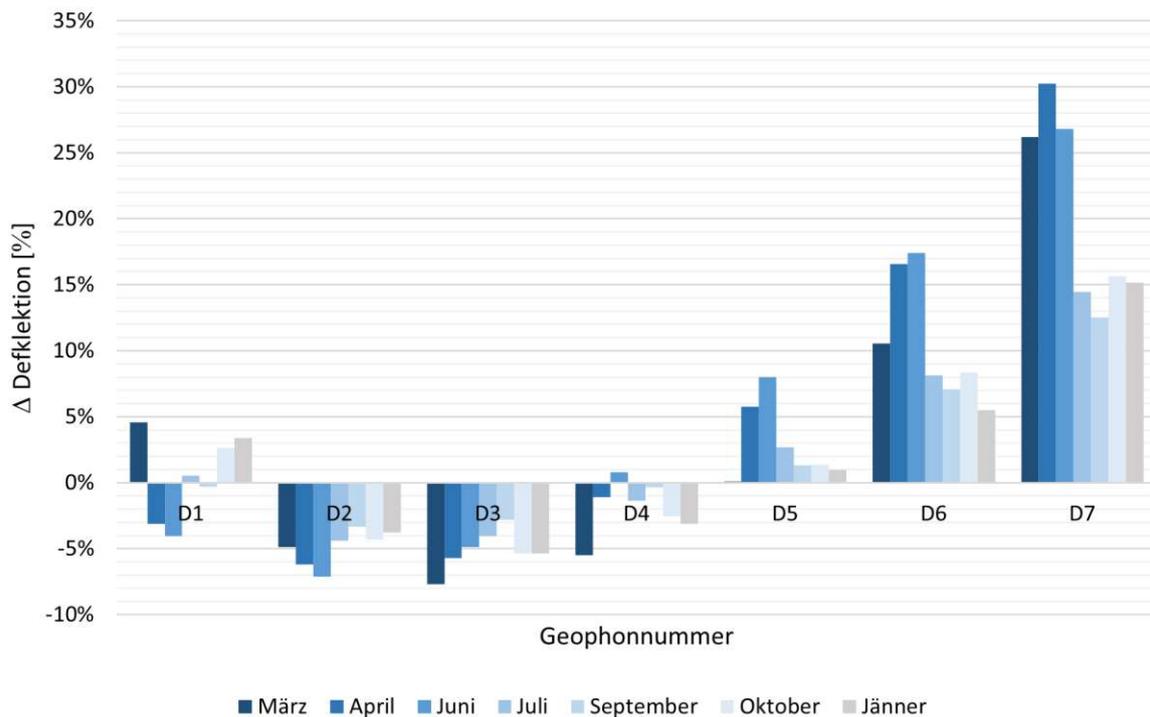


Abb. 4.25: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen, Berechnungsvariante: 5 Schichten, nicht fixierte Asphalttschicht (*5lay_unfixed*)

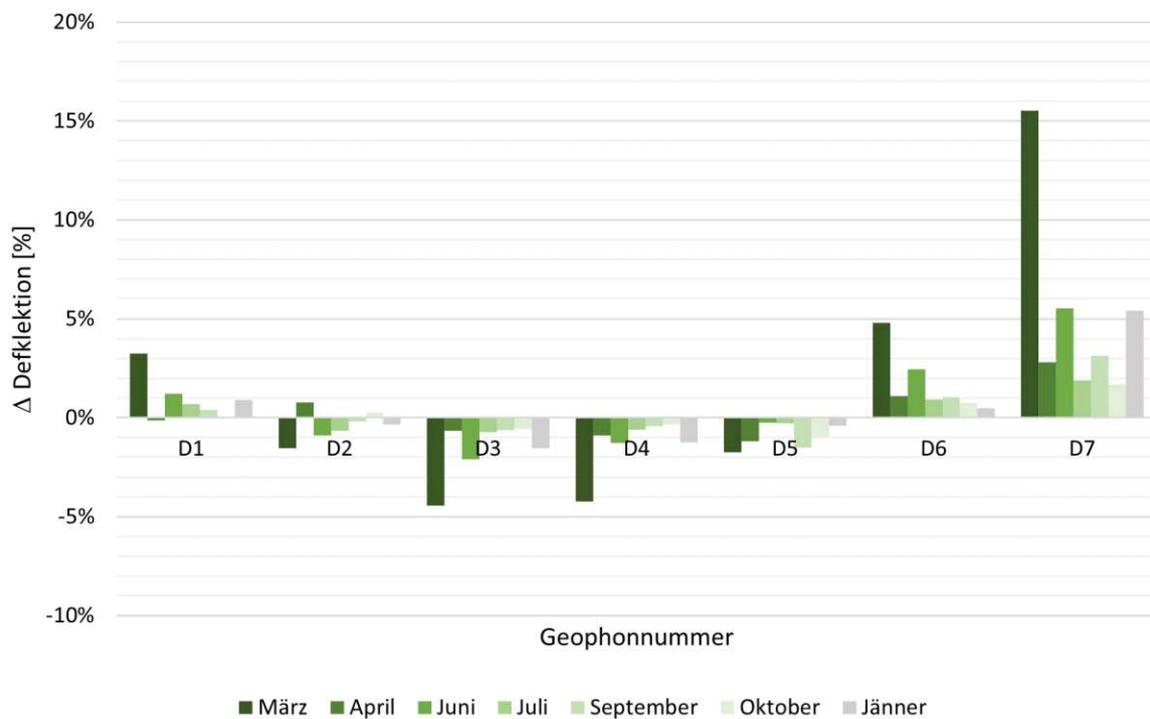


Abb. 4.26: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen, Berechnungsvariante: 4 Schichten, nicht fixierte Asphalttschicht (*4lay_unfixed*)

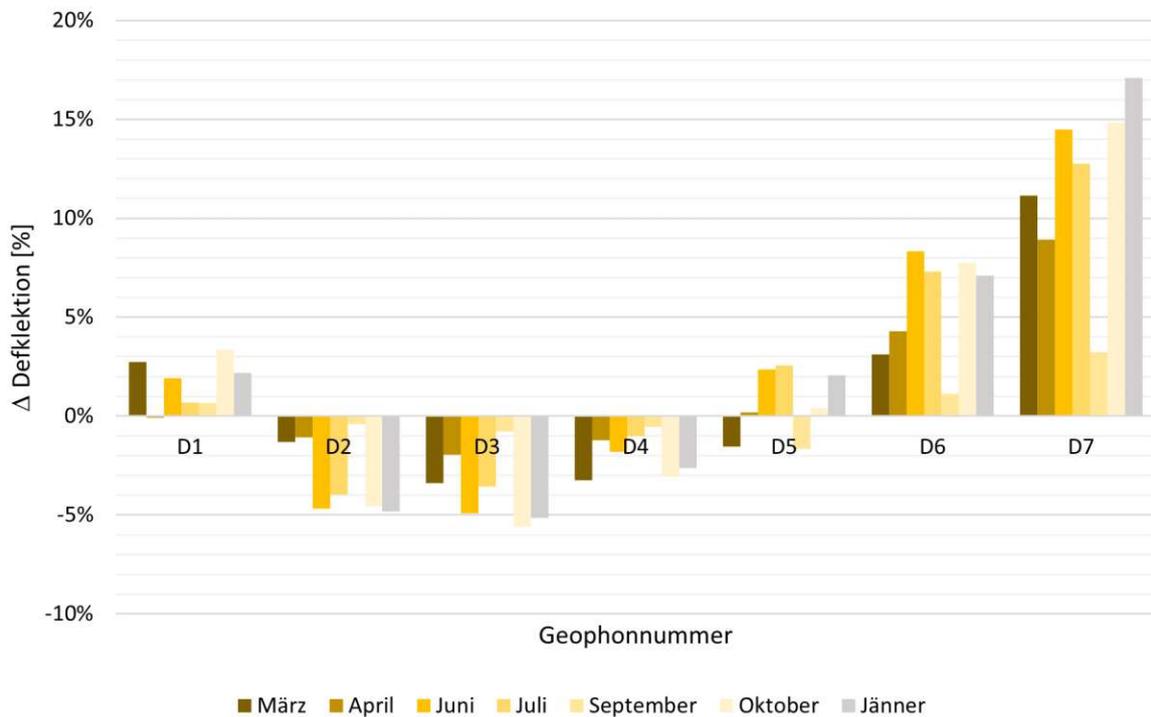


Abb. 4.27: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen, Berechnungsvariante: 5 Schichten, fixierte Asphaltsschicht (*5lay_fixed*)

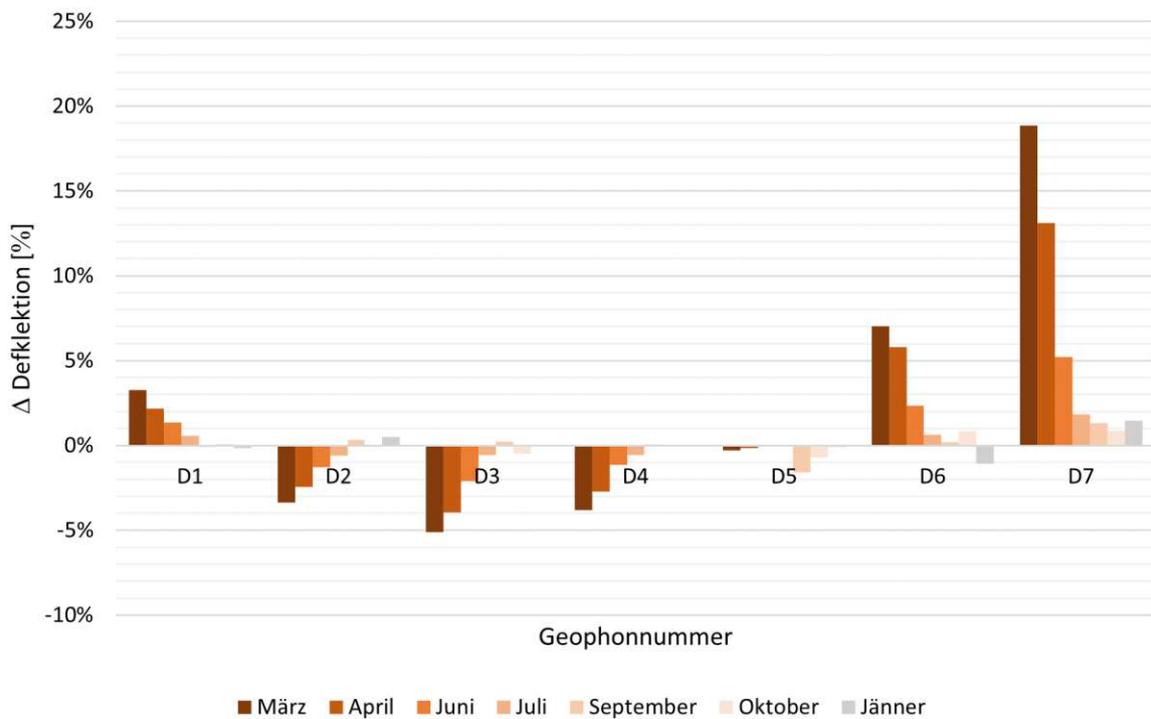


Abb. 4.28: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen, Berechnungsvariante: 4 Schichten, fixierte Asphaltsschicht (*4lay_fixed*)

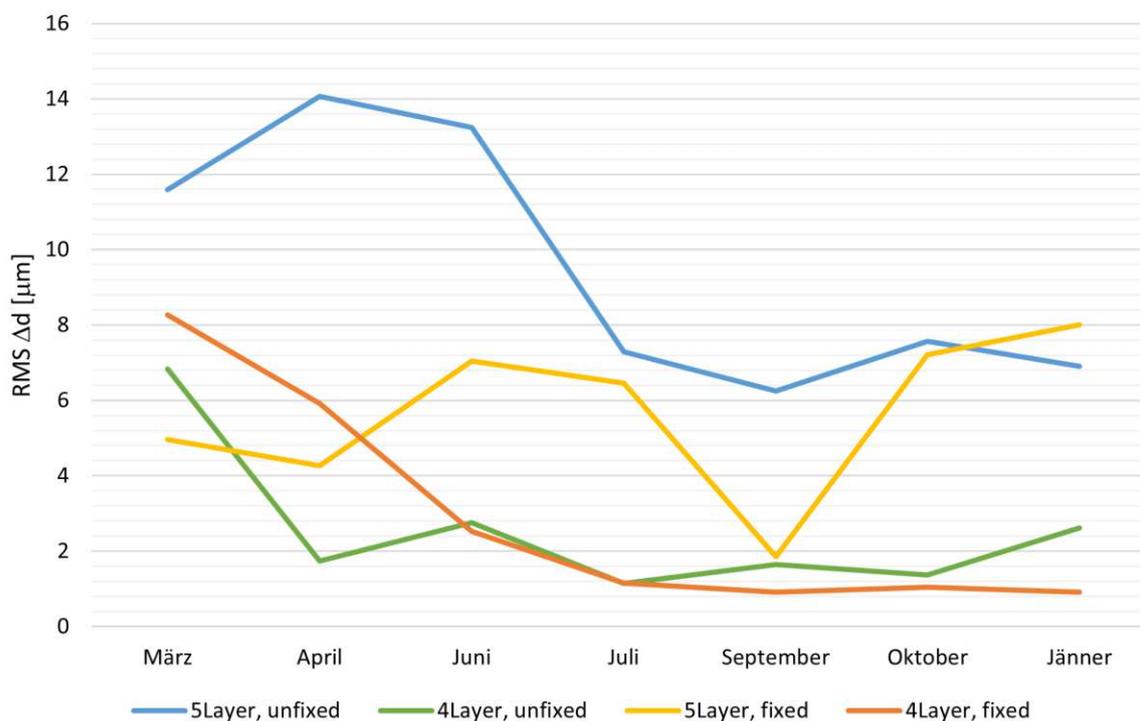


Abb. 4.29: Quadratisches Mittel (Root Mean Square, RMS) der Abweichungen der Berechnungsergebnisse pro Messung

4.4.3.1 Schichtsteifigkeiten

Im folgenden Kapitel werden die berechneten Schichtsteifigkeiten der vier Berechnungsvarianten zusammengefasst. Im Anhang A.4, Tabelle A.18 bis A.24 sind die verwendeten Randbedingungen, Schranken und Ergebnisse inklusive Standardabweichungen aufgeschlüsselt. BAKFAA stellt bei der Auswahl der Schichten Materialien zur Verfügung. Dabei bezieht man sich auf den „FAA Advisory Circular 150/5370-11B, *Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements*“. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Berechnung mit Schichtsteifigkeiten, die in BAKFAA definiert sind, bessere Ergebnisse liefert, als die Definition eigener Materialien. Mit dem Kompromiss veränderter Anfangssteifigkeiten laut Tabelle wurden die Berechnungen mit den zur Verfügung gestellten Schichteinstellungen durchgeführt.

Tab. 4.13: Steifigkeit der Betonschicht aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

Schicht	Bezeichnung	E-Modul [MPa]
PCC	P-501	27 560
AC	P-401/P-403	2 755
CB	P-304	3 445
UB	P-219	515
SUB	High Strength Subgrade	140

- Beton (Plain Cement Concrete, PCC)

Wie in Gleichung (4.19) erläutert, wurde im Labor eine Steifigkeit der Betondecke von 38 250 MPa bestimmt. Die vierschichtigen Varianten (*4lay_unfixed*, *4lay_fixed*) überbewerten die Betonsteifigkeit, während die fünfschichtigen Varianten (*5lay_unfixed*, *5lay_fixed*) selbige unterbewerten.

Tab. 4.14: Steifigkeit der Betonschicht aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

Messung	E_{PCC} [MPa]				Labor	
	5lay_unfixed	4lay_unfixed	5lay_fixed	4lay_fixed	$E_{PCC,o}$	$E_{PCC,u}$
März A10.2	17 401	25 418	28 067	19 052	34 100	46 300
April A10.3	30 304	50 275	38 352	23 292	34 100	46 300
Juni A10.4	35 853	40 261	28 369	36 708	34 100	46 300
Juli A10.5	39 104	58 029	37 571	54 672	34 100	46 300
Sept. A10.6	40 416	55 486	55 038	60 663	34 100	46 300
Okt. A10.7	31 479	68 340	27 266	63 984	34 100	46 300
Jän. A10.8	30 504	60 146	29 804	67 964	34 100	46 300
Mittelwert	32 152	51 136	34 924	46 619	34 100	46 300
STAB	7 687	14 283	9 985	20 090	0	0

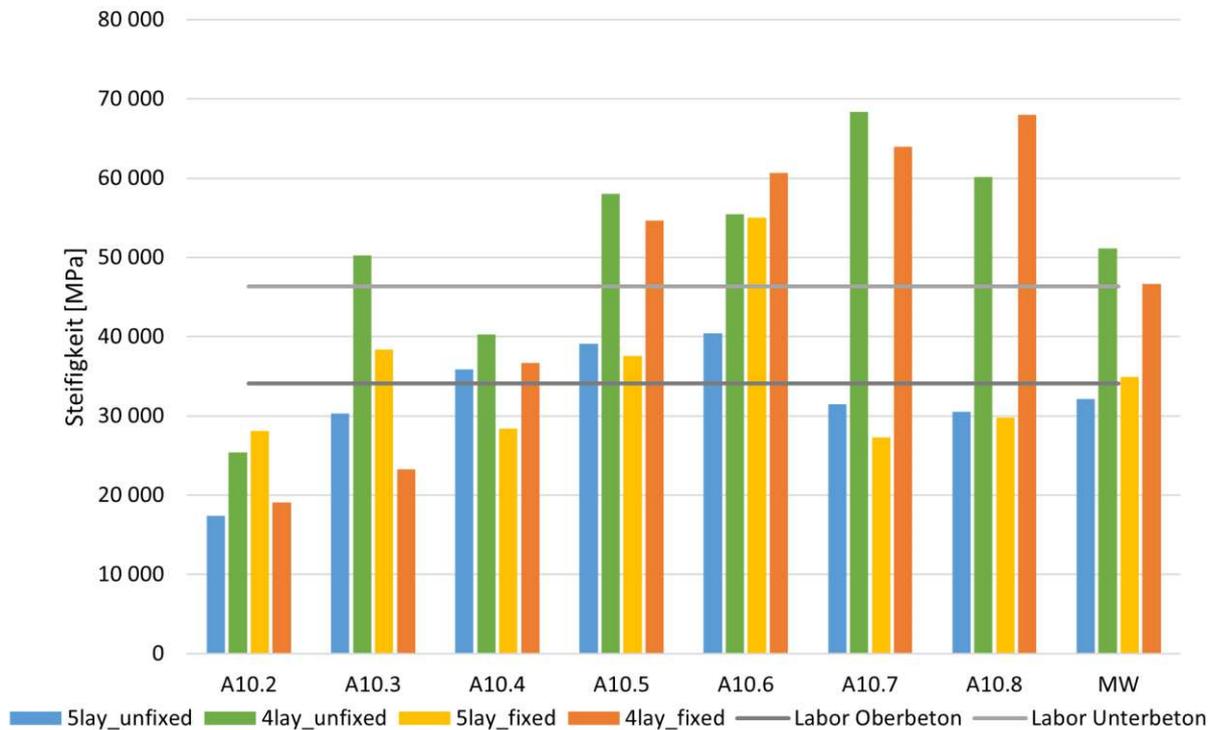


Abb. 4.30: Steifigkeit der Betonschicht aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

- Asphalt (Asphalt Concrete, AC)

Die Steifigkeit der Asphaltschicht konnte bei den Varianten *5lay_unfixed* und *4lay_unfixed* nicht zufriedenstellend oder gar realistisch berechnet werden. Der Elastizitätsmodul ist zu keiner Messung in einer akzeptablen Größenordnung.

Tab. 4.15: Steifigkeit des Asphalts aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

Messung	T_{AC} [°C]	E_{AC} [MPa]				Labor	
		5lay_unfixed	4lay_unfixed	5lay_fixed	4lay_fixed		
März	A10.2	6,13	1 454	2 255	13 325	13 325	13 325
April	A10.3	10,62	3 282	2 519	11 064	11 064	11 064
Juni	A10.4	19,54	4 113	3 054	7 576	7 576	7 576
Juli	A10.5	22,23	2 634	2 947	6 839	6 839	6 840
September	A10.6	17,91	5 259	3 783	8 226	8 226	8 226
Oktober	A10.7	9,30	3 193	3 821	11 687	11 687	11 687
Jänner	A10.8	-0,11	3 602	3 986	17 258	17 258	17 257

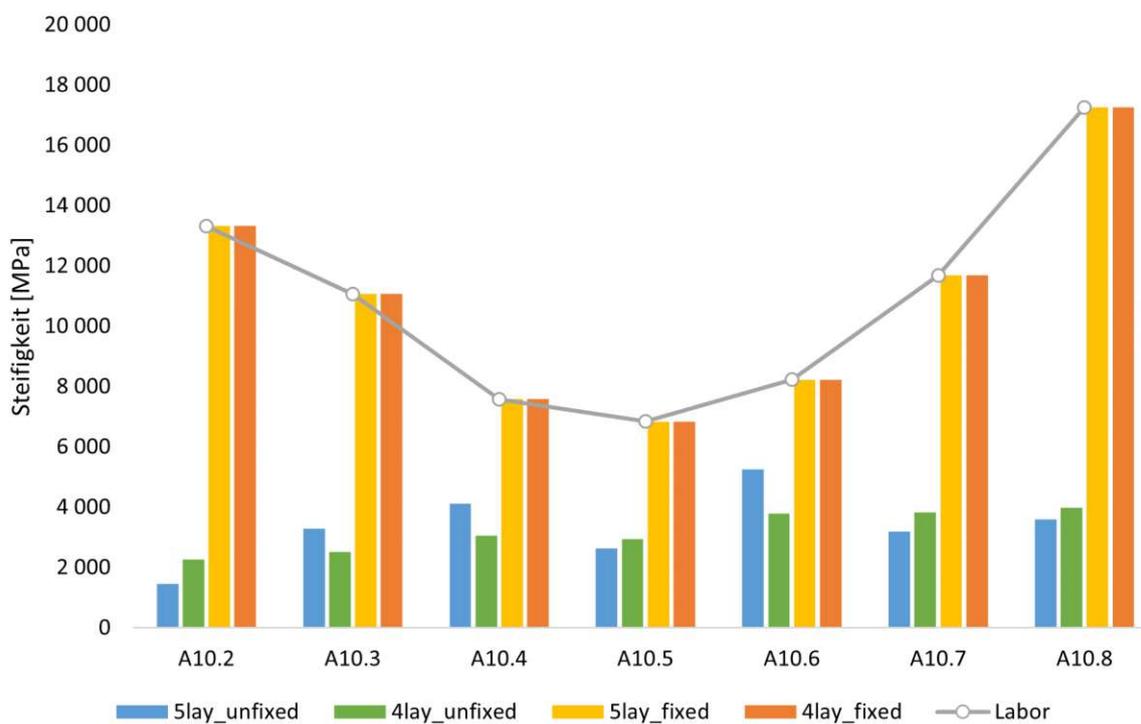


Abb. 4.31: Steifigkeit des Asphalts aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

- Zementstabilisierte Tragschicht (Cement-Bound Layer, CB)

Auch in der zementstabilisierten Tragschicht scheiterte BAKFAA. Lediglich die Variante *5lay_unfixed* konnte realistischere Ergebnisse liefern. Die übrigen Berechnungsvarianten ergaben keine zufriedenstellenden E-Moduli.

Tab. 4.16: Steifigkeit der zementstab. TS. aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAK-FAA

Messung		E_{CB} [MPa]				Sensor
		5lay_unfixed	4lay_unfixed	5lay_fixed	4lay_fixed	
März	A10.2	5 070	2 126	351	2 160	9 472
April	A10.3	7 372	535	864	2 634	9 472
Juni	A10.4	10 338	2 255	2 925	2 016	9 472
Juli	A10.5	11 177	1 638	3 486	1 349	9 472
September	A10.6	7 491	2 072	608	410	9 472
Oktober	A10.7	9 528	1 787	3 292	745	9 472
Jänner	A10.8	8 700	2 702	4 156	97	9 472
Mittelwert		8 525	1 874	2 240	1 344	9 472
STAB		2 069	682	1 577	963	0

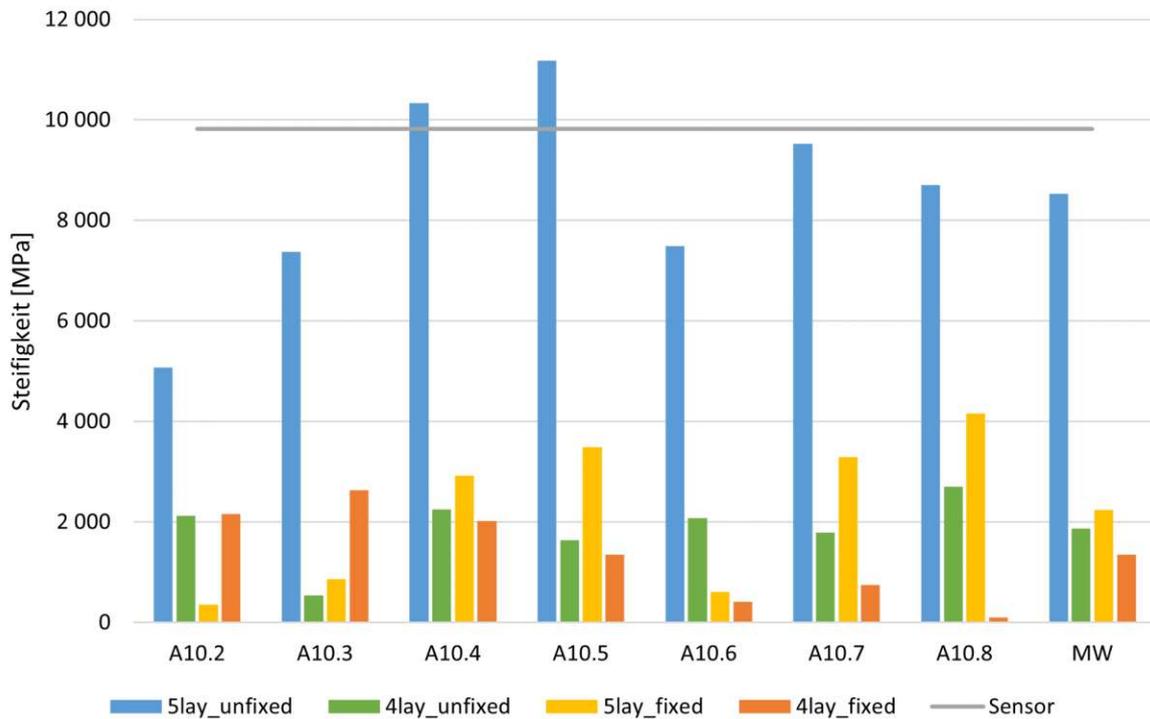


Abb. 4.32: Steifigkeit der zementstab. TS. aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAK-FAA

- Ungebundene untere Tragschicht (Unbound Layer, UB)

Die fünfschichtigen Varianten (*5lay_unfixed*, *5lay_fixed*) überbewerten die Steifigkeit, während die vierschichtigen Varianten (*4lay_unfixed*, *4lay_fixed*) die Erwartungen akzeptabel abbilden (vergleiche Tabelle 4.5).

Tab. 4.17: Steifigkeit der ungeb. u.TS. aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

Messung		E_{UB} [MPa]				<i>RVS 03.06.68</i>
		<i>5lay_unfixed</i>	<i>4lay_unfixed</i>	<i>5lay_fixed</i>	<i>4lay_fixed</i>	
März	A10.2	1 171	296	1 49	290	196
April	A10.3	1 100	540	950	370	196
Juni	A10.4	1 192	448	1 895	458	280
Juli	A10.5	1 526	471	1 756	485	392
September	A10.6	1 053	483	2 504	508	392
Oktober	A10.7	1 468	608	2 207	691	392
Jänner	A10.8	1 395	553	1 909	699	784
Mittelwert		1 272	485	1 806	500	376
STAB		188	100	508	153	201

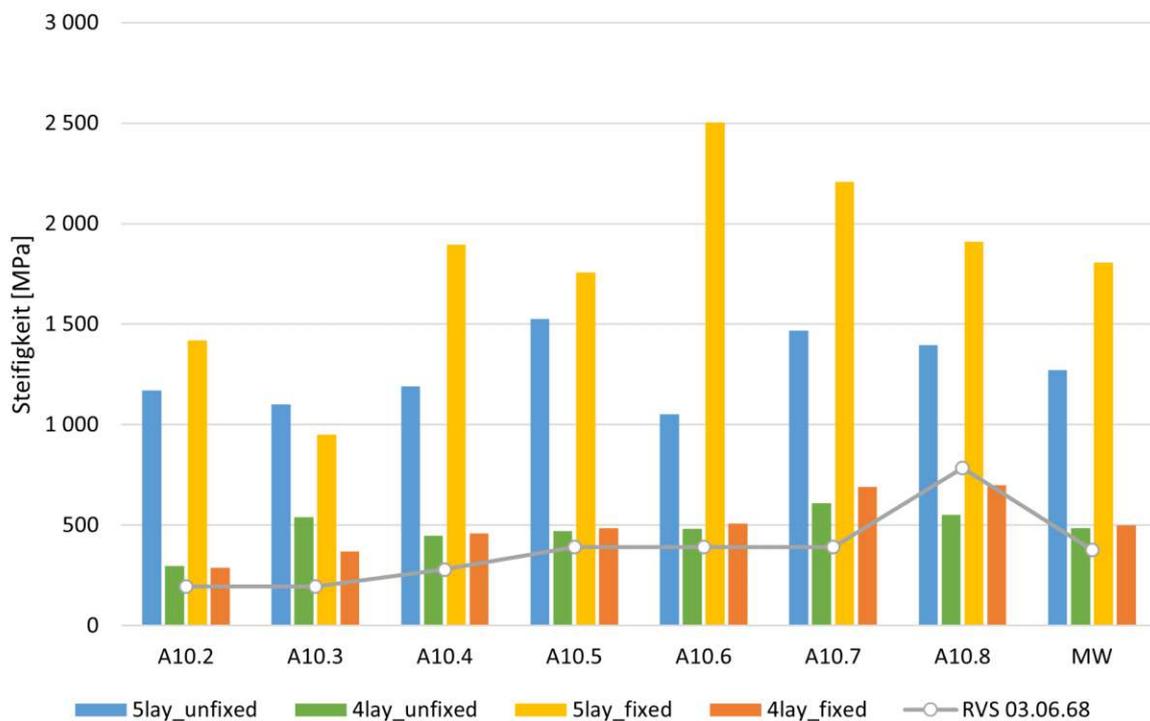


Abb. 4.33: Steifigkeit der ungeb. u.TS. aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

- Untergrund (Subgrade, SUB)

Im Unterbau wurden nur noch die Varianten *5lay_unfixed* und *5lay_fixed* betrachtet. Beide zeigen sehr ähnliche Ergebnisse, wenn auch deutlich steifer als erwartet wurde. Die Erwartungshaltung wurde in beiden Fällen um beinahe das Dreifache überschritten (vergleiche Tabelle 4.5).

Tab. 4.18: Steifigkeit des Untergrundes aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

Messung		E_{SUB} [MPa]				RVS 03.06.68
		5lay_unfixed	4lay_unfixed	5lay_fixed	4lay_fixed	
März	A10.2	251	-	427	-	70
April	A10.3	296	-	485	-	70
Juni	A10.4	331	-	401	-	100
Juli	A10.5	372	-	388	-	140
September	A10.6	418	-	493	-	140
Oktober	A10.7	432	-	437	-	140
Jänner	A10.8	442	-	433	-	280
Mittelwert		363	-	438	-	134
STAB		73	-	39	-	72

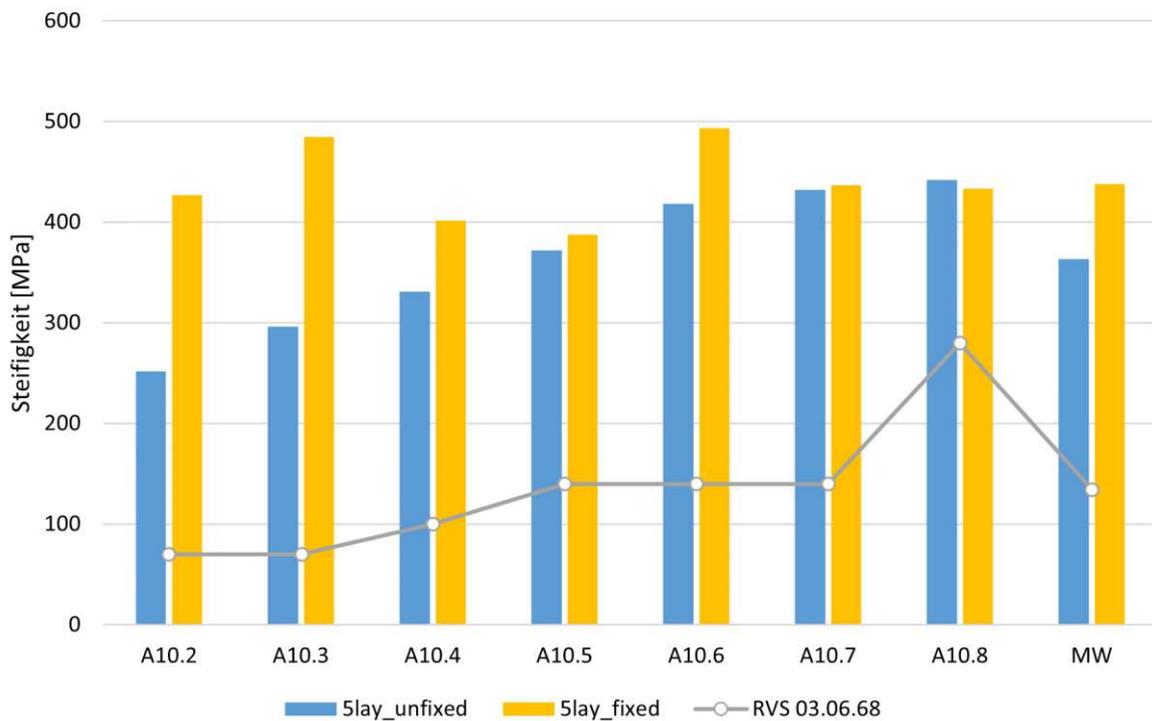


Abb. 4.34: Steifigkeit des Untergrundes aller Messungen und Berechnungsvarianten in BAKFAA

- Zusammenfassung

Die Betonsteifigkeit der fünfschichtigen Berechnungsvarianten (*5lay_unfixed* und *5lay_fixed*) wird von BAKFAA vergleichsweise zuverlässig bewertet. Die Abweichungen betragen hierfür 15,94 % (*5lay_unfixed*) und 8,70 % (*5lay_fixed*). Bei den vierschichtigen Varianten sind die Abweichungen größer, sie betragen 33,69 % (*4lay_unfixed*) und 21,88 % (*4lay_fixed*).

Die Berechnungsgenauigkeit ist für die Schichten PCC, UB und SUB größtenteils zufriedenstellend, siehe Tabelle 4.19. Dies gilt nicht für CB, hier treten Standardabweichungen bis 83,31 % auf.

Betrachtet man CB (Tabelle 4.19 und Abbildung 4.35), stellt man ähnlich ernüchternde Ergebnisse fest. Am genauesten wurden die Ergebnisse von *5lay_unfixed* berechnet, sie ergaben eine Abweichung von 13,19 % im Vergleich zur erwarteten Steifigkeit von 9820 MPa.

In den Schichten UB und SUB unterscheiden sich die fünfschichtigen und vierschichtigen Aufbauten wieder maßgeblich. *5lay_unfixed* und *5lay_fixed* ergaben dreimal so große Steifigkeiten als erwartet. Bei *4lay_unfixed* und *4lay_fixed* betragen die Abweichungen etwa 30 %.

Tab. 4.19: BAKFAA: Zusammenfassung der gemittelten Berechnungsergebnisse für die Messungen der A10

Variante	Parameter	Schichtsteifigkeiten [MPa]				
		E_{PCC}	E_{AC}	E_{CB}	E_{UB}	E_{SUB}
5lay_unfixed	MW	32 152	2630	8 525	1 272	363
	STAB	6 124	1296	1 693	204	34
	STAB%	19,05%	49,26%	19,85%	16,04%	9,41%
4lay_unfixed	MW	51 136	2409	1 874	485	-
	STAB	10 932	792	1 561	54	-
	STAB%	21,38%	32,86%	83,31%	11,11%	-
5lay_fixed	MW	34 924	7500	2 240	1 806	438
	STAB	10 610	0	1 174	634	75
	STAB%	30,38%	0,00%	52,39%	35,09%	17,16%
4lay_fixed	MW	46 619	7500	1 344	500	-
	STAB	6 756	0	672	47	-
	STAB%	14,49%	0,00%	49,97%	9,45%	-

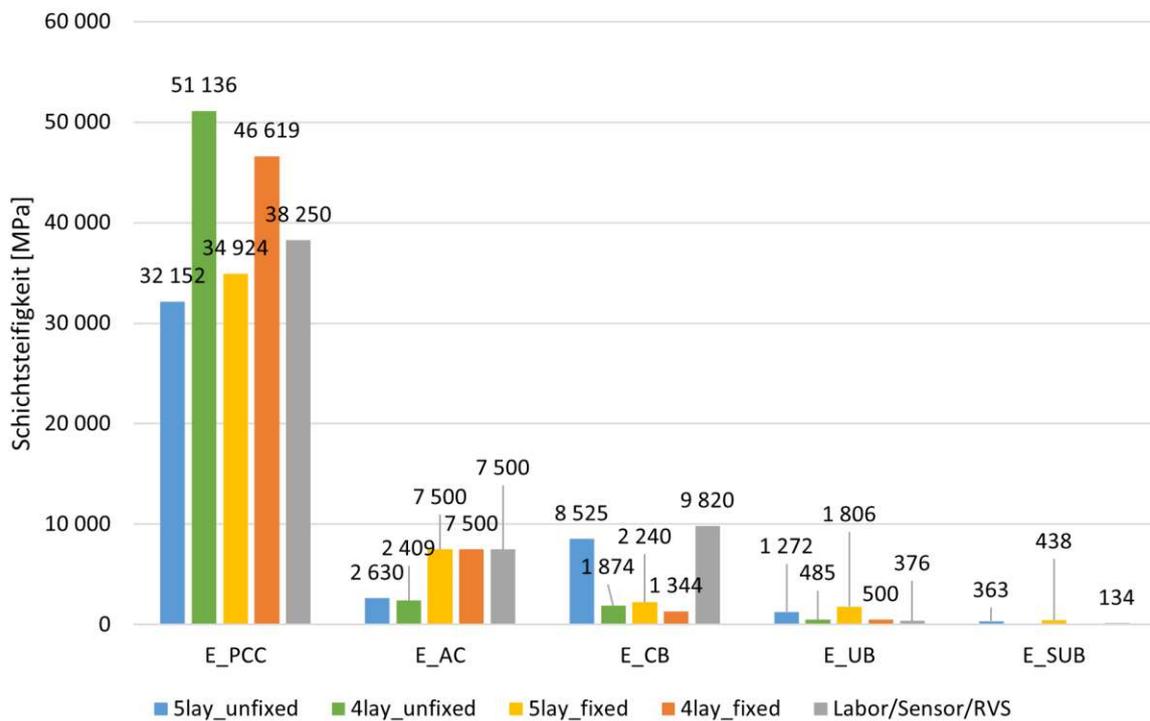


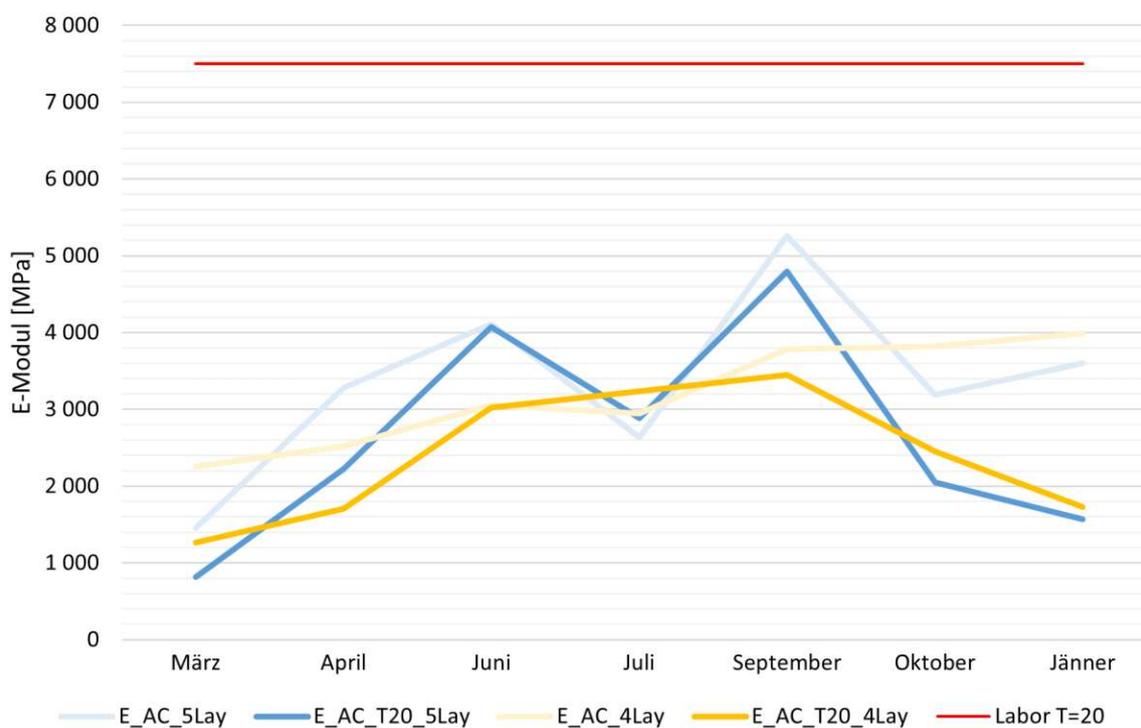
Abb. 4.35: BAKFAA: Rückgerechnete Steifigkeiten anhand vier Berechnungsmethoden

In Tabelle 4.20 und Abbildung 4.36 sieht man, dass die Rückrechnung der Asphaltsteifigkeit absolut unzufriedenstellende Ergebnisse lieferte. Am nächsten an der erwarteten Steifigkeit ist die Variante *5lay_unfixed*, doch auch hier ergibt sich eine Abweichung von über 55%. Die übrigen Varianten ergaben noch schlechtere Übereinstimmungen.

Zusammenfassend sei gesagt, dass während die Variante *5lay_unfixed* die besten Übereinstimmungen liefert, auch diese große Abweichungen aufweist. Generell zeigen die Ergebnisse, dass die Intention den „sandwichartigen“-Aufbau zu entschärfen nicht gelungen ist. Im Falle von *4lay_unfixed* und *4lay_fixed* interpretiert BAKFAA, die nun steifere Asphaltsschicht falsch und schreibt der Betondecke viel zu große Bedeutung für die Gesamtsteifigkeit des Aufbaus zu.

Tab. 4.20: BAKFAA: Berechnungsergebnisse des Asphalts temperaturkorrigiert für die Messungen der A10

Messung	T [°C]	κ [-]	Asphaltsteifigkeiten [MPa]					
			E_{AC}^{5Layer}	$E_{AC,T=20}^{5Layer}$	E_{AC}^{4Layer}	$E_{AC,T=20}^{4Layer}$	$E_{AC,T=20}^{Labor,8Hz}$	
März	A10.2	6,13	0,56	1 454	818	2 255	1 269	7 500
April	A10.3	10,62	0,68	3 282	2 225	2 519	1 708	7 500
Juni	A10.4	19,76	0,99	4 113	4 072	3 054	3 024	7 500
Juli	A10.5	22,23	1,10	2 634	2 888	2 947	3 232	7 500
September	A10.6	17,77	0,91	5 259	4 795	3 783	3 449	7 500
Oktober	A10.7	9,30	0,64	3 193	2 049	3 821	2 452	7 500
Jänner	A10.8	-0,11	0,43	3 602	1 565	3 986	1 732	7 500
Mittelwert				-	2 630	-	2 409	7 500
STAB				-	1 296	-	792	0

**Abb. 4.36:** BAKFAA: Rückgerechnete Steifigkeit des Asphalts zweier Berechnungsmethoden, temperaturkorrigiert nach Baltzer und Jansen [1], verglichen mit dem Laborergebnis (Kap. 3.1)

4.5 Feldmessstelle A3

Die Feldmessstelle auf der A3 mit einem Aufbau der Bautype AS4 wurde in Kapitel 2.3.1 vorgestellt. Seit der Errichtung im Frühling 2021 wurde nur im Juli des Jahres eine FWD-Messungen durchgeführt, ab April des Folgejahres 2022 wurde periodisch gemessen. An jedem Messtag protokollierte man 12 Auslösungen des Fallgewichts. Mit Ausnahme der ersten Juli-Messung 2021: Ziel dieser ersten Messung war in erster Linie die Ermittlung des idealen Fallgewichts. Dies hatte zur Folge, dass weniger Auslösungen pro Gewicht aufgezeichnet wurden. Bei den Steifigkeitsanalysen wurden nur jene Auslösungen des finalen Fallgewichts von 150 kN berücksichtigt. Parallel zu den FWD-Messung wurden die herrschenden Temperaturen in den Schichtgrenzen aufgezeichnet, siehe Tabelle 4.21, und die Temperaturverläufe beider Messpunkte als Funktion der Tiefe in den Abbildungen 4.37 und 4.38 dargestellt.

Auffällig sind die durchwegs heißen Temperaturen während den Messungen im Sommer. Hier wurden Temperaturunterschiede in der Asphaltenschicht von bis zu 15 °C aufgezeichnet. Die Schichten unter dem Asphalt haben hingegen sehr konstante Temperaturen. Zwischen der oberen Grenze des Magerbetons und der unteren Grenze der ungebundenen unteren Tragschicht treten lediglich maximale Unterschiede von 2 °C beim *Messpunkt 1* und 4 °C beim *Messpunkt 2* auf. Abbildung 4.39 zeigt die Abweichungen zwischen den aufgezeichneten Temperaturen der etwa 70 m voneinander entfernten *Messpunkte 1* und *2*. An der Oberfläche und unmittelbar darunter treten hohe Abweichungen auf, dies erklärt sich durch den gewählten Zeitpunkt der Messungen. An *Messpunkt 1* begannen die Aufzeichnungen in der Regel Vormittags, am *Messpunkt 2* erfolgten sie danach, nahe an der Mittagszeit. Bemerkenswert sind die vergleichsweise hohen Abweichungen in den unteren Schichten von bis zu 2 °C, wenn man die kurze Entfernung zwischen den Messpunkten berücksichtigt.

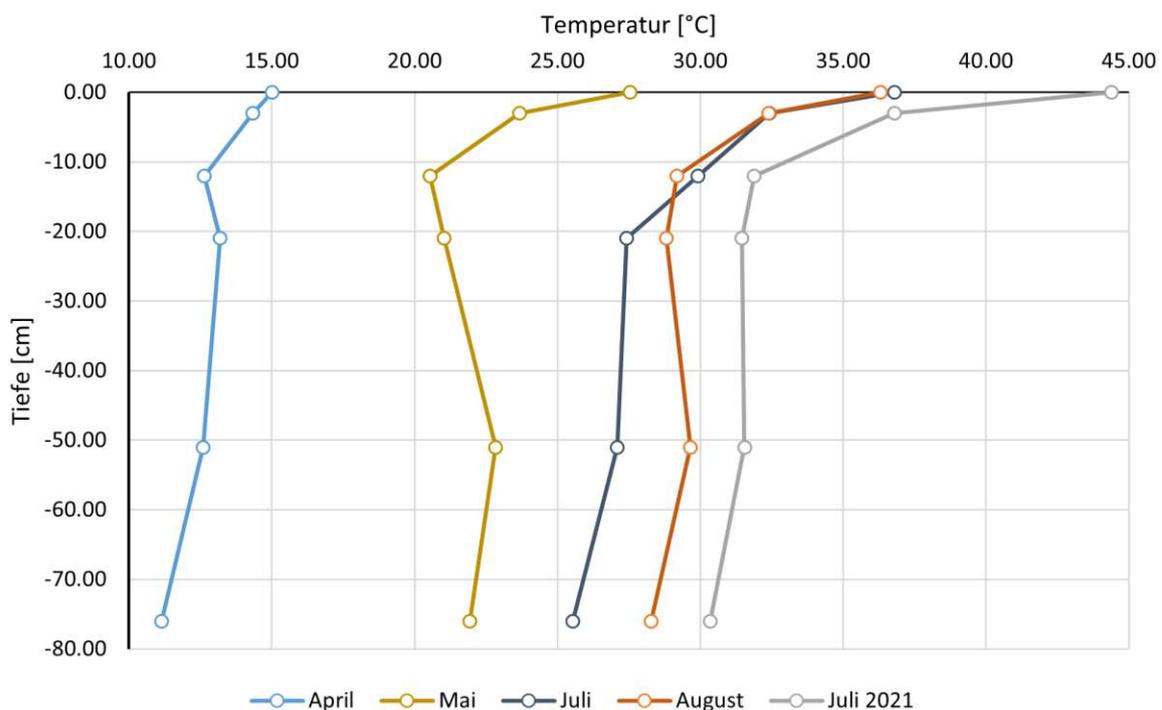
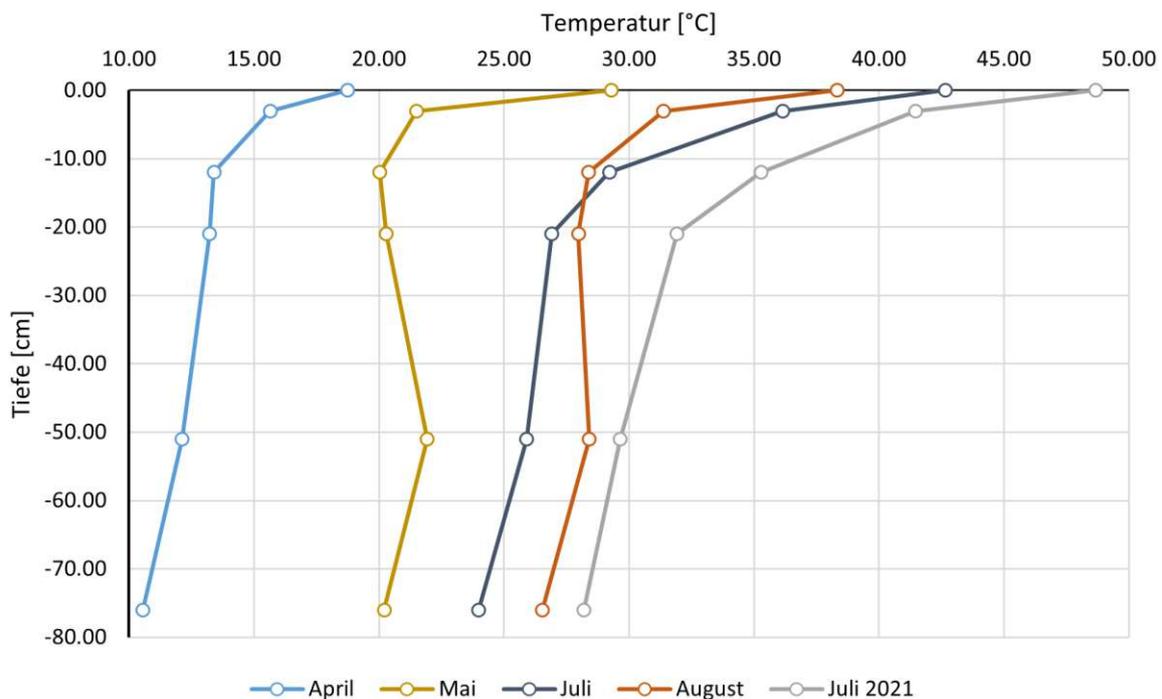


Abb. 4.37: Temperaturverlauf während den Messungen auf dem *Messpunkt 1* der A3

Tab. 4.21: Temperaturen in den Schichtgrenzen während den periodischen Messungen auf der A3

		Temperatur T_i in Schicht i [°C]					
		T_O	$T_{AC,o}$	$T_{AC,m}$	$T_{AC,u}$	T_{LC}	T_{UB}
Messpunkt 1							
Juli 2021	A3.1	44,4	36,79	31,87	31,45	31,54	30,34
April	A3.2	15,0	14,34	12,64	13,20	12,59	11,14
Mai	A3.3	27,5	23,66	20,54	21,03	22,83	21,93
Juli	A3.4	36,8	32,41	29,91	27,41	27,09	25,54
August	A3.5	36,3	32,39	29,18	28,81	29,66	28,27
Messpunkt 2							
Juli 2021	A3.1	48,7	41,47	35,28	31,92	29,64	28,19
April	A3.2	18,8	15,64	13,40	13,22	12,13	10,54
Mai	A3.3	29,3	21,50	20,03	20,28	21,93	20,21
Juli	A3.4	42,7	36,14	29,22	26,91	25,90	23,99
August	A3.5	38,3	31,37	28,39	27,97	28,41	26,54
Abweichung Δ							
Juli 2021	A3.1	4,27	4,68	3,41	0,47	1,90	2,15
April	A3.2	3,75	1,31	0,75	0,02	0,46	0,60
Mai	A3.3	1,77	2,16	0,52	0,75	0,90	1,72
Juli	A3.4	5,87	3,73	0,70	0,50	1,19	1,55
August	A3.5	2,03	1,02	0,80	0,83	1,25	1,73
Tiefe [cm]		0,00	-3,00	-12,00	-21,00	-51,00	-76,00

**Abb. 4.38:** Temperaturverlauf während den Messungen auf dem *Messpunkt 1* der A3

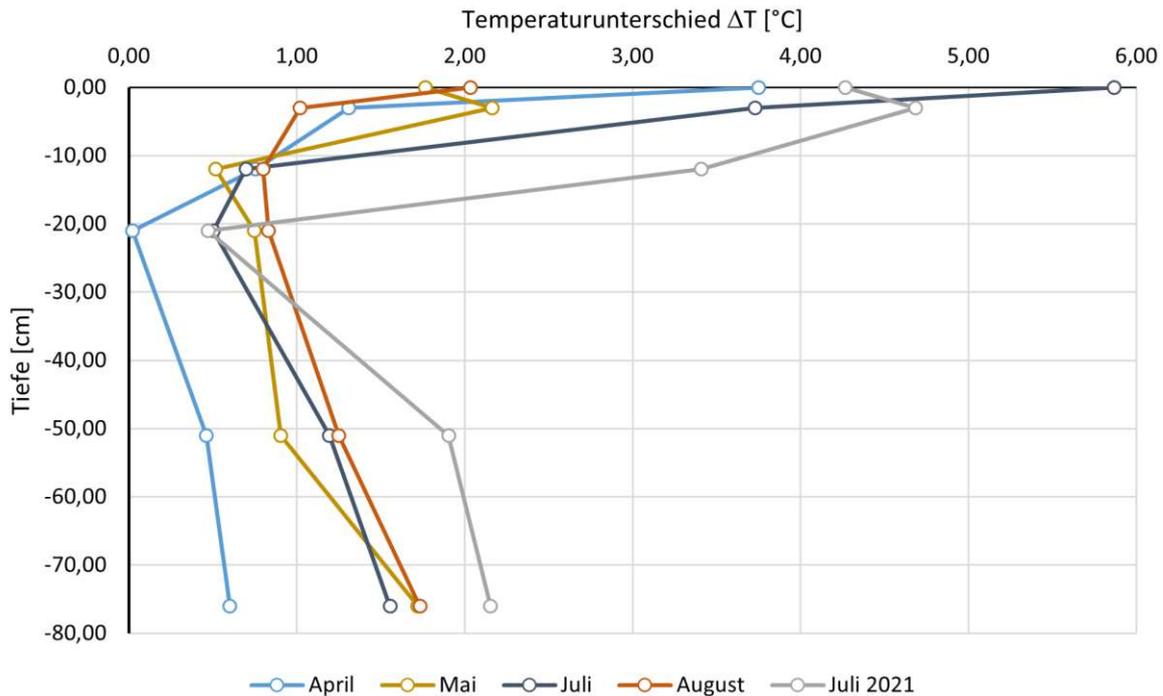


Abb. 4.39: Abweichung der gemessenen Temperatur zwischen den beiden Messpunkten der A3

Die ausgewerteten Deflektionen der Messung am *Messpunkt 1* sind in Tabelle 4.22 angeführt und in Abbildung 4.40 dargestellt. In Tabelle 4.23 und in Abbildung 4.41 sind die ausgewerteten Deflektionen aller Versuche am *Messpunkt 2* dargestellt. Die verwendeten Geophonabstände sind ebenfalls in den Tabellen 4.22 und 4.23 protokolliert. Für die Messungen A3.4 und A3.5 wurde ein anderes Fallgewichtsdeflektometer benutzt. Während sich die Belastung nicht geändert hat, kam ein achttes Geophon zwischen D_1 und D_2 mit einem Abstand von 200 mm vom Lastzentrum hinzu. Auffällig ist die ursprünglich höhere Deflektion im Lastzentrum in den Sommermonaten, dies ist die Folge der hohen Temperaturen und der daraus resultierenden geringen Steifigkeit des Asphalt. Ab dem vierten Geophon weisen alle Messungen sehr konstante Deflektionen auf.

Tab. 4.22: Gemittelte Deflektionen der periodischen Messungen der A3 am *Messpunkt 1*

Messung	n	STAB	Deflektion D_i am i -ten Geophon [μm]							
			D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8
Juli 2021 A3.1	6	0,49%	468	-	318	272	235	198	151	108
April A3.2	12	0,70%	354	-	303	259	216	176	136	103
Mai A3.3	12	0,88%	399	-	323	277	232	189	145	107
Geophonabstand [mm] vom Lastzentrum			0	-	300	600	900	1200	1500	1800
Juli A3.4	13	0,83%	426	353	329	276	228	178	139	110
August A3.5	12	1,02%	435	352	330	275	228	178	139	109
Geophonabstand [mm] vom Lastzentrum			0	200	300	600	900	1200	1500	1800

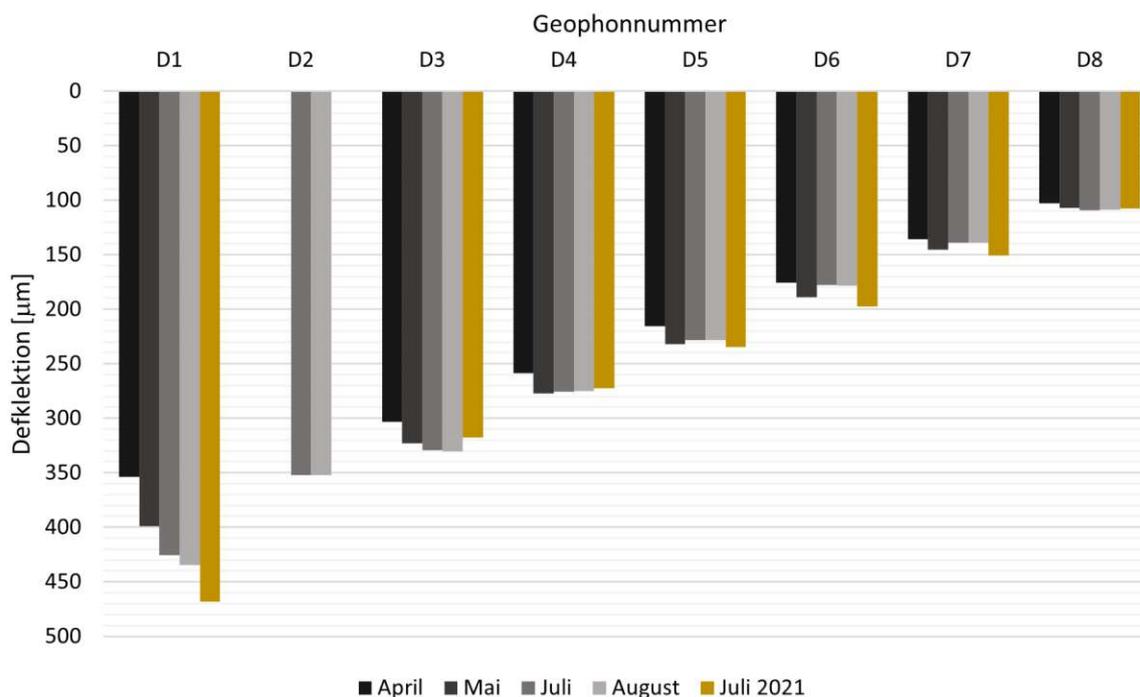


Abb. 4.40: Deflektionsmulden der periodischen FWD-Messungen auf der A3 am *Messpunkt 1*

Tab. 4.23: Gemittelte Deflektionen der periodischen Messungen der A3 am *Messpunkt 2*

Messung	<i>n</i>	STAB	Deflektion D_i am i -ten Geophon [μm]								
			D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	
Juli 2021 A3.1	5	1,37%	467	-	233	200	172	136	100	76	
April A3.2	12	0,75%	260	-	202	172	148	123	98	76	
Mai A3.3	12	0,67%	292	-	217	186	160	131	101	79	
Geophonabstand [mm] vom Lastzentrum			0	-	300	600	900	1200	1500	1800	
Juli A3.4	12	1,48%	353	249	225	186	159	129	96	75	
August A3.5	14	0,99%	352	251	225	185	159	128	96	74	
Geophonabstand [mm] vom Lastzentrum			0	200	300	600	900	1200	1500	1800	

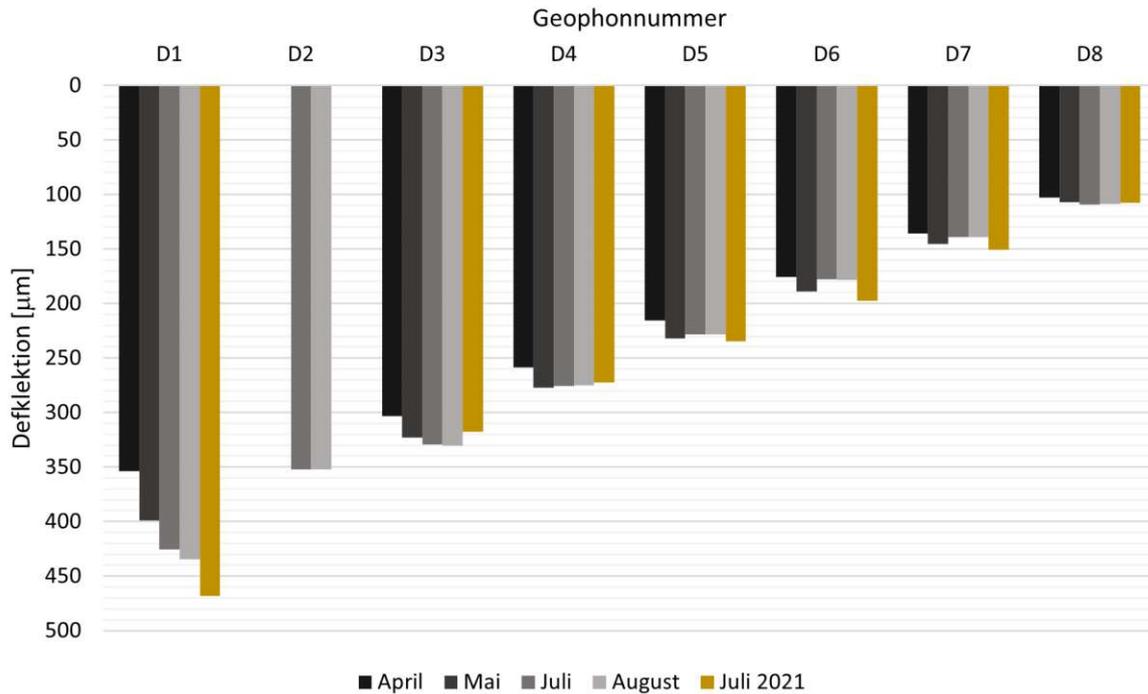


Abb. 4.41: Deflektionsmulden der periodischen FWD-Messungen auf der A3 am *Messpunkt 2*

Die entstandene Deflektionsmulde einer FWD-Messung beschreibt die Gesamtsteifigkeit eines Straßenaufbaus. Die Aufgabe des Rückrechnungsprogrammes ist die richtige Aufteilung der Gesamtsteifigkeit auf die einzelnen Schichten. Abbildung 4.42 zeigt den Schichtaufbau beider Messpunkte, wobei zur Rückrechnung der Steifigkeiten die Asphalt-schichten zusammengefasst wurden. Im Zuge der Sanierungsarbeiten blieb die bestehende zementstabilisierte obere und die ungebundene untere Tragschicht unberührt, allerdings waren Beschleunigungssensoren in den unteren Schichten vorgesehen. Dies hatte zur Folge, dass die Zementstabilisierung in einem Abschnitt von 2,5 m * 2,5 m um den Messpunkt mit Magerbeton mit einer Festigkeit C8/10 ersetzt werden musste, da die Reproduktion der ursprünglichen Schichteigenschaften nicht möglich ist, während die ungebundene untere Tragschicht wiederhergestellt wurde.



Abb. 4.42: Schichtaufbau an der FMS A3

4.5.1 Erwartungswerte aus Laborprüfungen

- Asphalt (Asphalt Concrete, AC)

Die erwartete Steifigkeit der Asphalt-schicht wurde mittels Vierpunkt-Biegeprüfung (4PB-Pr) ermittelt und im Anschluss auf die Schichttemperatur zum Zeitpunkt der Messung korrigiert. Die 4PB-Pr ergab bei einer Temperatur von 20 °C ein E-Modul von 6854,55 MPa

für die Binderschicht und $E = 7384,35 \text{ MPa}$ der Tragschicht (siehe Tabelle 3.4). Um eine Referenz zu erhalten, wurden beide Steifigkeiten laut Gleichung (4.20) gemittelt. Die möglichen Ansätze zur Temperaturkorrektur wurden in „Gegenüberstellung von Indikatoren zur Bewertung der Tragfähigkeit bituminös gebundener Straßen“ [13] diskutiert. Für die hier erforderliche Korrektur wurde der Ansatz von Baltzer und Jansen [1] angewandt. Dazu wurde die aufgezeichnete Temperatur der Sensoren T_6 , T_5 und T_4 (vgl. Abbildung 2.5.c und Tabelle 4.24) gemittelt und in Gleichung (4.21) eingesetzt um einen Temperaturkorrekturfaktor κ zu erhalten. Nach Gleichung (4.22) kann im Anschluss die zu erwartende Gesamtsteifigkeit der Asphalttschichten zum Zeitpunkt der Messung berechnet werden [1], die Ergebnisse sind in Tabelle 4.25 dargestellt. Die hiermit korrigierten Steifigkeiten decken sich mit den im Zuge der 4PB-Pr ermittelten E-Moduli. Diese ergaben bei 10°C ein E-Modul von $11\,621,14 \text{ MPa}$ und bei 30°C $E = 4287,53 \text{ MPa}$ (siehe Tabelle 3.4).

$$E_{AC} = \sqrt{(6854,55^2 + 7384,35^2)} \cdot 1/2 = 7124,38 \text{ MPa} \quad (4.20)$$

$$\kappa = 10^{-0,018 \cdot (20^\circ\text{C} - T_{AC})} \quad (4.21)$$

$$E_{AC} = \frac{E_{AC,T=20}}{\kappa} \quad (4.22)$$

Tab. 4.24: Gemittelte Asphalttemperatur zum Zeitpunkt der Messung

Messung	$T_{AC,o} [^\circ\text{C}]$	$T_{AC,m} [^\circ\text{C}]$	$T_{AC,u} [^\circ\text{C}]$	$T_{mean} [^\circ\text{C}]$
Juli 2021 A3.1	39,13	33,58	31,69	34,80
April A3.2	14,99	13,02	13,21	13,74
Mai A3.3	22,58	20,29	20,66	21,18
Juli A3.4	34,28	29,56	27,16	30,33
August A3.5	31,88	28,78	28,39	29,69

Tab. 4.25: Erwartete Asphaltsteifigkeit basierend auf den Ergebnissen der 4PB-Pr

Messung	$T [^\circ\text{C}]$	$\kappa [-]$	$E_{AC} [\text{MPa}]$
Steifigkeit lt. 4PB-Pr bei 20°C			7 124
Juli 2021 A3.1	34,80	1,85	3 858
April A3.2	13,74	0,77	9 235
Mai A3.3	21,18	1,05	6 786
Juli A3.4	30,33	1,53	4 642
August A3.5	29,69	1,49	4 769

- Magerbeton (Lean Concrete, LC)

Dank der verbauten Beschleunigungssensoren (vergleiche Kapitel 2.1.1) konnte während der FWD-Messung auf die Steifigkeit der Schicht direkt rückgeschlossen werden. Sie beträgt über alle Messungen gemittelt am *Messpunkt 1* $E = 13\,970,92 \text{ MPa}$ und für *Messpunkt 2* $E = 9382,24 \text{ MPa}$, siehe Tabelle 4.26.

- Ungebundene untere Tragschicht (Unbound Layer, UB)

Auch in der ungebundenen unteren Tragschicht wurden an den Schichtgrenzen Beschleunigungssensoren eingebaut um einen besseren Einblick in die strukturellen Zustände zu

erhalten. Sie beträgt über alle Messungen gemittelt am *Messpunkt 1* $E = 336,64$ MPa und für *Messpunkt 2* $E = 405,07$ MPa, siehe Tabelle 4.26. Darüber hinaus wurden dennoch die Angaben der *RVS 03.06.68* [21] zur Hand genommen. Für die ungebundene untere Tragschicht gibt Tabelle 9 der *RVS 03.06.68* [21] das Verhältnis $E_{UB}/E_{SUB} = 2,80$ vor. Tabelle 4.5 fasst die erwarteten Steifigkeiten zusammen.

- Untergrund (Subgrade, SUB)

Während die erwartenden Steifigkeiten des Asphalts, des Magerbetons und der ungebundenen unteren Tragschicht aus Laborprüfungen oder Sensordaten ermittelt wurden, bezieht sich die Erwartungshaltung der Untergrundsteifigkeit auf die Vorgaben der *RVS 03.06.68* [21]. Dabei ist sie von der Jahresperiode abhängig, Tabelle 4.5 fasst die erwarteten Steifigkeiten zusammen.

Tab. 4.26: Ermittelte Steifigkeiten der Beschleunigungssensoren

Messung	T_o [°C]	E_{AC} [MPa]	E_{LC} [MPa]	E_{UB} [MPa]
<i>Messpunkt 1</i>				
Juli 2021 A3.1	44,4	2 767	16 159	375
April A3.2	15,0	2 417	11 389	365
Mai A3.3	27,5	4 555	13 751	358
Juli A3.4	36,8	6 147	14 416	289
August A3.5	36,3	4 354	14 139	297
Mittelwert		4 048	13 971	337
<i>Messpunkt 2</i>				
Juli 2021 A3.1	48,7	3 775	9 608	404
April A3.2	18,8	8 602	10 284	419
Mai A3.3	29,3	6 272	9 467	436
Juli A3.4	42,7	13 090	9 449	383
August A3.5	38,3	2 176	8 104	384
Mittelwert		6 783	9 382	405

4.5.2 ELMOD: Berechnungen

Die Abbildungen 4.43 und 4.44 zeigen den Fehler der berechneten Deflektionsmulde im Vergleich zur gemessenen (Abbildungen 4.40 und 4.41). Beide Messpunkte weisen ähnliche Abweichungen in der Größenordnung unter 5 % auf. Der Fehler nimmt mit der Entfernung vom Lastzentrum zu und wächst im ungünstigsten Fall auf über 15 % am *Messpunkt 1* an, wobei der maximale Fehler am *Messpunkt 2* 11 % beträgt. Dank der nichtlinearen Berechnung des Untergrunde, sind die Berechnungsungenauigkeiten größtenteils kleiner als 10 %. Positiv erwähnt sei das zusätzliche vom Lastzentrum 200 mm entfernte Geophon. Bei den Messungen im Juli und August sind bis zum sechsten Geophon D_6 die Abweichungen nahe an 0 %. In Abbildung 4.45 wird das quadratische Mittel aller Berechnungen einer Messung dargestellt. Der Fehler ist, mit Ausnahme der Messung im Juli 2021, kleiner als 5 μm .

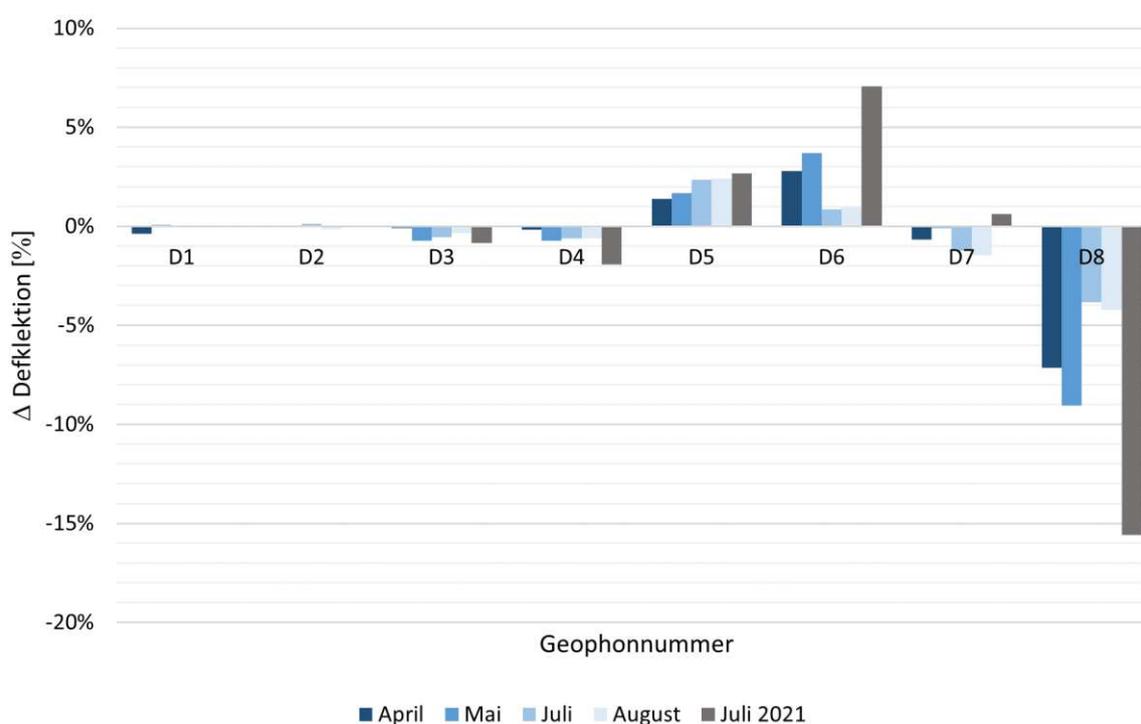


Abb. 4.43: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen am *MP 1*

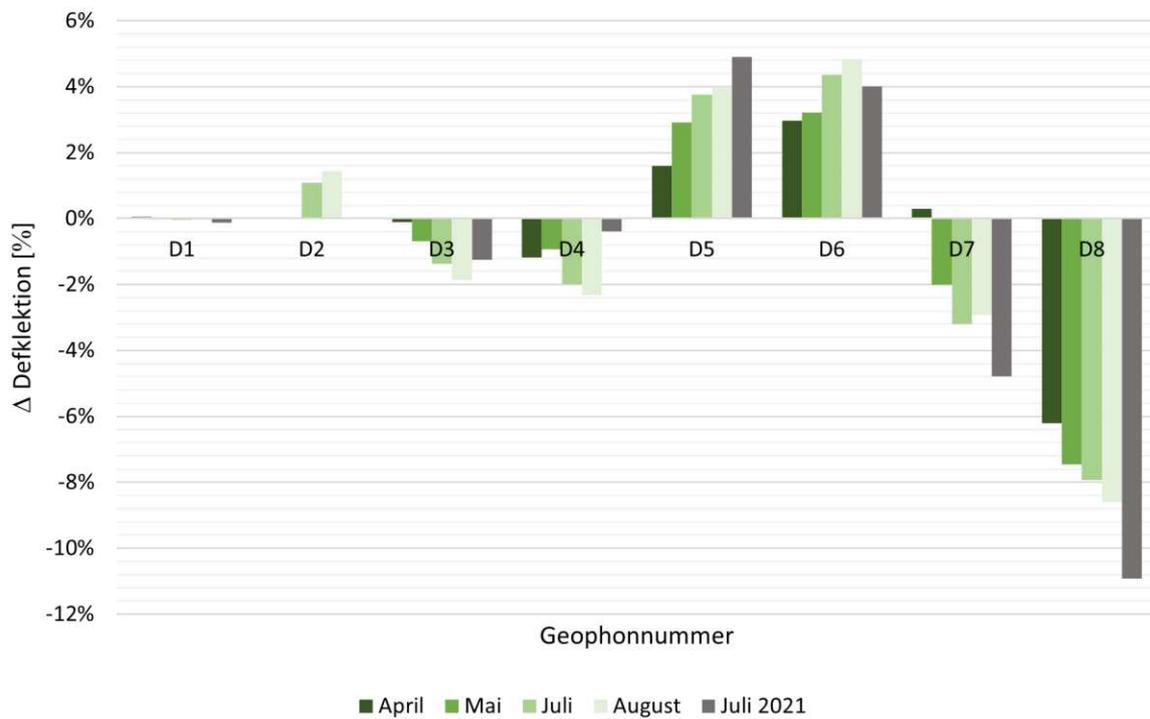


Abb. 4.44: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen am *MP 2*

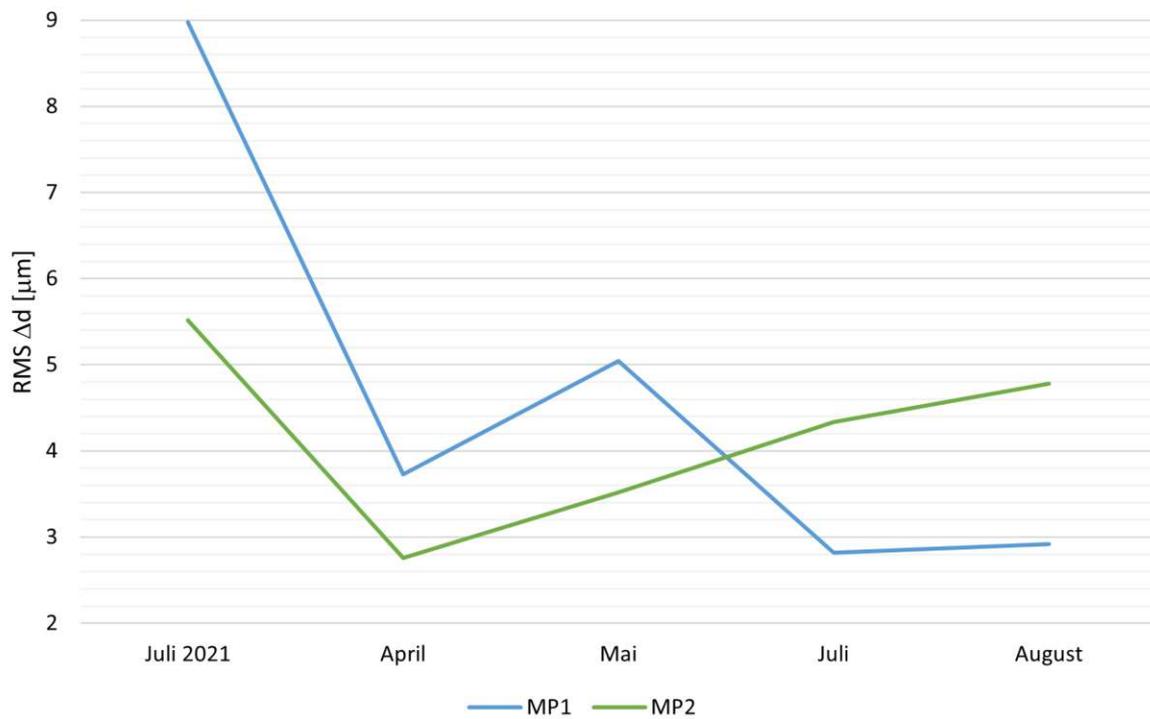


Abb. 4.45: Quadratisches Mittel (Root Mean Square, RMS) der Abweichungen der Berechnungsergebnisse pro Messung

4.5.2.1 Schichtsteifigkeiten

Im folgenden Kapitel werden die berechneten Schichtsteifigkeiten beider Messpunkte zusammengefasst. Im Anhang A.1, Tabelle A.1 bis A.5 sind die verwendeten Randbedingungen, Schranken und Ergebnisse inklusive Standardabweichungen aufgeschlüsselt.

- Asphalt (Asphalt Concrete, AC)

Die Steifigkeit der Rückrechnung stimmt nur selten mit den meisten Messungen der Sensoren und Laborprüfung überein, siehe Tabelle 4.27 und Abbildung 4.46. Auffällig ist der Ausreißer der Rückrechnung von *Messpunkt 1* der Messung A3.2. Hier wurde ein E-Modul von etwa 13 000 MPa ermittelt. Ein ähnlicher Ausreißer tritt bei Messung A3.4 *Messpunkt 2* an der Sensorsteifigkeit auf, auch hier wurde eine unrealistisch hohe Steifigkeit von etwa 13 000 MPa gemessen.

Tab. 4.27: Steifigkeit der Asphaltsschicht beider Messpunkte der A3 in ELMOD

Messung	T_{AC} [°C]	E_{AC}^{ELMOD} [MPa]		E_{AC}^{Sensor} [MPa]		$E_{AC}^{Labor,8Hz}$ [MPa]
		MP1	MP2	MP1	MP2	
Juli 2021 A3.1	34,80	2 083	1 374	2 767	3 775	3 858
April A3.2	13,74	13 119	7 820	2 417	8 602	9 235
Mai A3.3	21,18	7 017	5 582	4 555	6 272	6 786
Juli A3.4	30,33	5 179	2 872	6 147	13 090	4 642
August A3.5	29,69	4 340	2 981	4 354	2 176	4 769

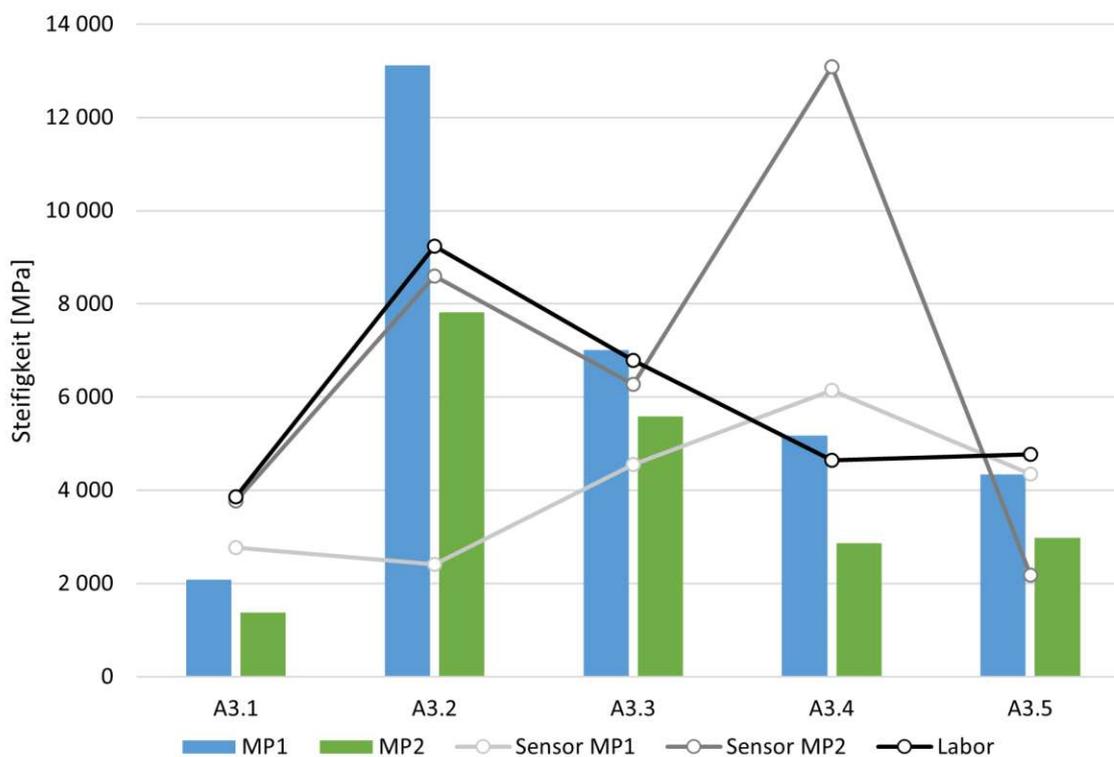


Abb. 4.46: Steifigkeit der Asphaltsschicht beider Messpunkte der A3 in ELMOD

- Magerbeton (Lean Concrete, LC)

Die Rückrechnungsergebnisse der Magerbetonsteifigkeit wurden im Vergleich zu den Sensorergebnissen unterbewertet, siehe Tabelle 4.36 und Abbildung 4.57. Beide Berechnungsmethoden ergaben sehr konstante Ergebnisse über alle Messungen hinweg. Die Rückrechnung des Messpunktes 2 ergab eine höhere Steifigkeit als bei *Messpunkt 1*, bei den Sensorberechnungen ist es umgekehrt.

Tab. 4.28: Steifigkeit des Magerbetons beider Messpunkte der A3 in ELMOD

Messung	T_{LC} [°C]	E_{LC}^{ELMOD} [MPa]		E_{LC}^{Sensor} [MPa]	
		MP1	MP2	MP1	MP2
Juli 2021 A3.1	32,63	6 727	7 035	16 159	9 608
April A3.2	13,11	5 236	9 723	11 389	10 284
Mai A3.3	20,47	6 870	8 867	13 751	9 467
Juli A3.4	28,36	5 427	6 352	14 416	9 449
August A3.5	28,59	5 476	6 226	14 139	8 104
Mittelwert		5 947	7 641	13 971	9 382
STAB		784	1 571	1 712	792

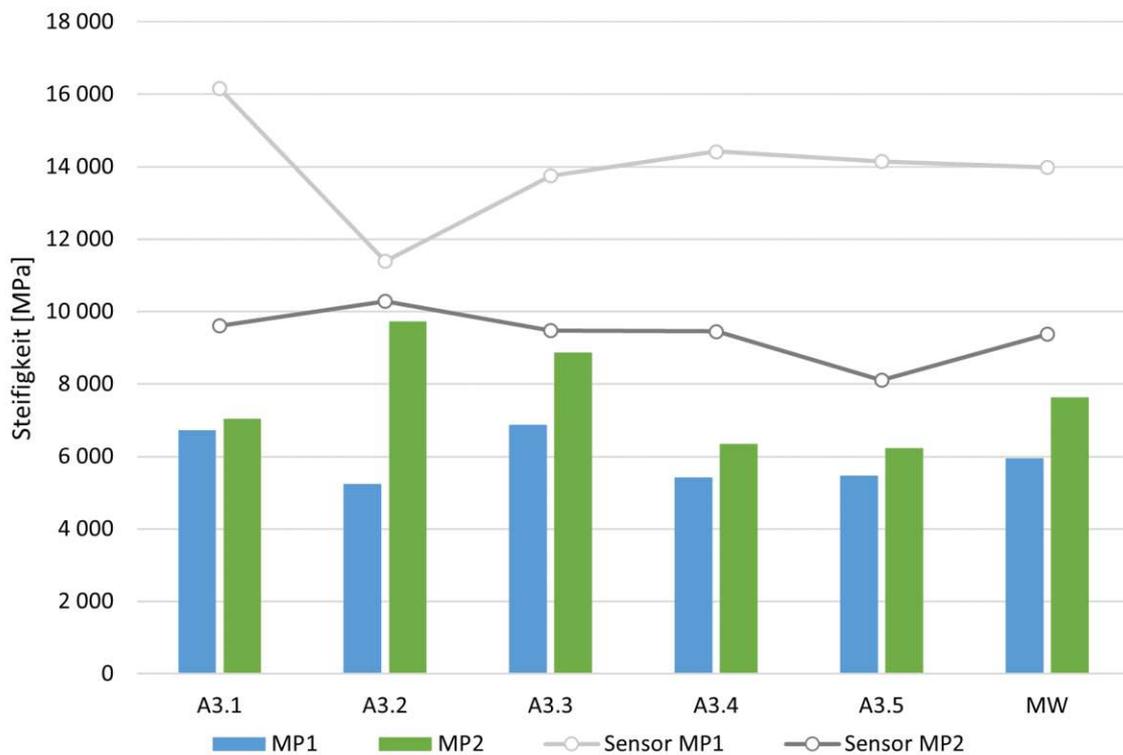


Abb. 4.47: Steifigkeit der zementstabilisierten o.TS. beider Messpunkte der A3 in ELMOD

- Ungebundene untere Tragschicht (Unbound Layer, UB)

Die ungebundene untere Tragschicht weist bei allen Berechnungen sehr konstante E-Moduli auf. Auch hier wird bei der Rückrechnung *Messpunkt 2* als steifer interpretiert als *Messpunkt 1*, siehe Tabelle 4.29 und Abbildung 4.48.

Tab. 4.29: Steifigkeit der ungebundenen u.TS. beider Messpunkte der A3 in ELMOD

Messung	T_{UB} [°C]	E_{UB}^{ELMOD} [MPa]		E_{UB}^{Sensor} [MPa]		$E_{UB}^{RVS:03.06.68}$ [MPa] [21]	
		MP1	MP2	MP1	MP2		
Juli 2021	A3.1	31,14	177	230	375	404	392
April	A3.2	12,78	140	263	365	419	196
Mai	A3.3	21,52	130	230	358	436	280
Juli	A3.4	26,83	166	295	289	383	392
August	A3.5	28,71	173	343	297	384	392
Mittelwert			157	272	337	405	330
STAB			21	48	41	23	89

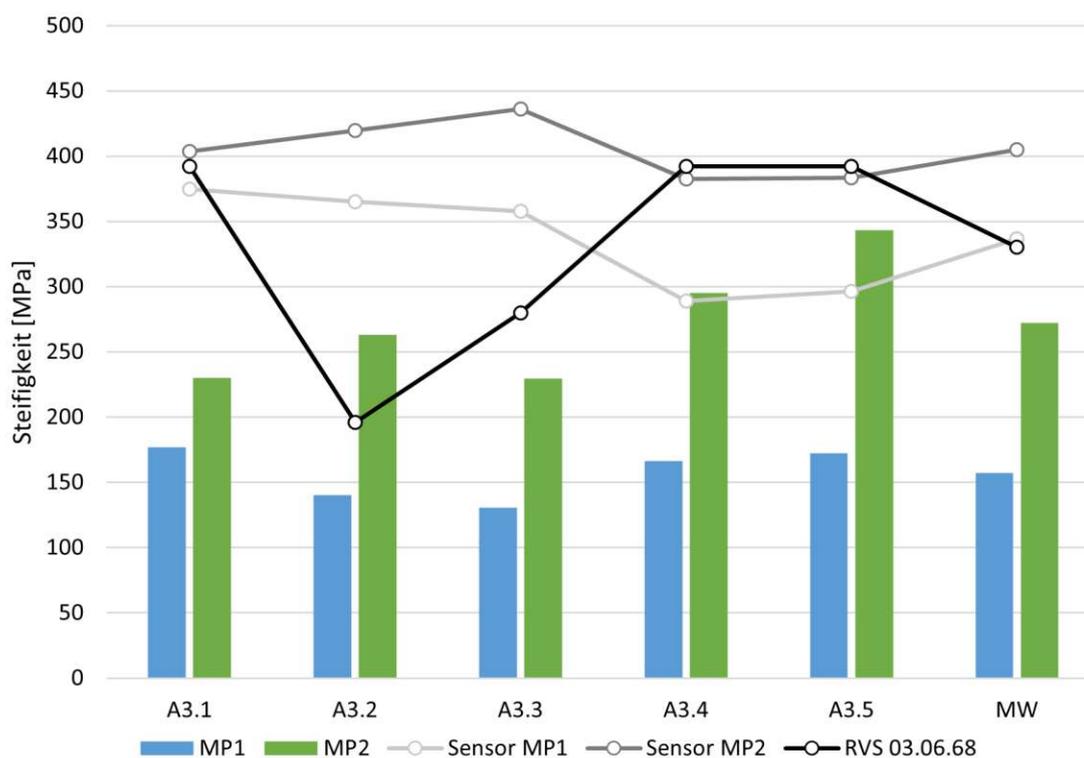


Abb. 4.48: Steifigkeit der ungebundenen u.TS. beider Messpunkte der A3 in ELMOD

- Untergrund (Subgrade, SUB)

Die Untergrundsteifigkeit des *Messpunktes 1* trifft die Erwartungshaltung gut. Im *Messpunkt 2* wird sie deutlich überschritten, siehe Tabelle 4.30 und Abbildung 4.49.

Tab. 4.30: Steifigkeit des Untergrunds beider Messpunkte der A3 in ELMOD

Messung		T_{SUB} [°C]	E_{SUB}^{ELMOD} [MPa]		$E_{SUB}^{RVS:03.06.68}$ [MPa] [21]
			MP1	MP2	
Juli 2021	A3.1	29,93	99	158	140
April	A3.2	11,60	130	231	70
Mai	A3.3	21,72	115	209	100
Juli	A3.4	25,63	135	202	140
August	A3.5	28,22	138	208	140
Mittelwert			124	202	118
STAB			16	27	32

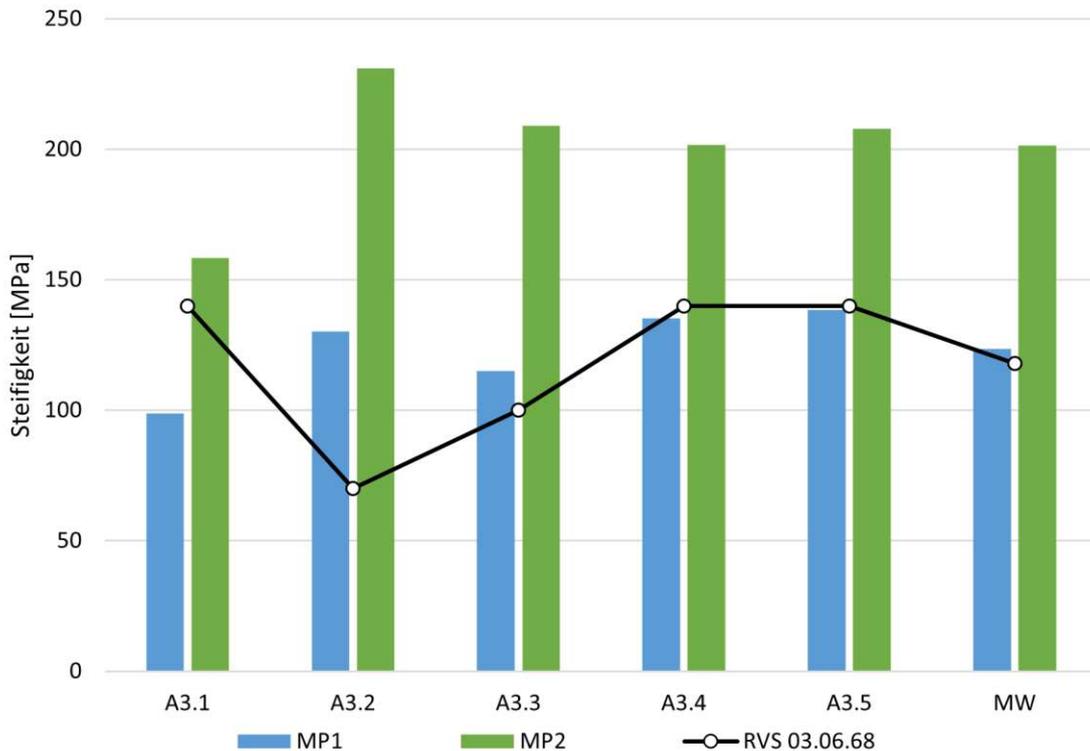


Abb. 4.49: Steifigkeit des Untergrundes beider Messpunkte der A3 in ELMOD

- Zusammenfassung

Abbildung 4.60 veranschaulicht die Mittelwerte beider Messpunkte und die jeweiligen Erwartungswerte der einzelnen Schichten (LC, UB und SUB). Der Untergrund wurde im Zuge der Sanierung nicht erneuert, dies deutet auf einen guten Zustand hin. Damit sind die Ergebnisse durchaus innerhalb realistischer Grenzen vor allem unter Betrachtung ihrer Schlüssigkeit und geringen Standardabweichungen, siehe Tabelle 4.31. Die Validierung ist allerdings aufgrund der fehlenden Messbarkeit nur schwer möglich. Zwar wurde auch die

ungebundene untere Tragschicht nicht saniert, allerdings wurde zum Einbau der Beschleunigungssensoren die Schicht in einem kleinen Abschnitt in Lastmitte ausgehoben und im Anschluss mit dem selben Material verfüllt und verdichtet. Die Abweichungen zwischen Rückrechnung und Sensor betragen für *Messpunkt 1* 53,30 % und für *Messpunkt 2* 32,80 %. Vergleicht man die Rückrechnung mit der Steifigkeit laut *RVS 03.06.68* [21] erhält man Abweichungen von etwa 52,40 % (MP1) und 17,60 % (MP2). Die Steifigkeitsrückrechnung des Magerbetons am *Messpunkt 1* ist sehr gering, die Abweichung zur ermittelten Steifigkeit laut Beschleunigungssensor beträgt 57,43 %. Bei *Messpunkt 2* wurde ein höherer E-Modul rückgerechnet, und ein niedrigerer E-Modul mittels Beschleunigungssensor bestimmt. Hier beträgt die Abweichung 18,56 %. Die Standarabweichungen der Rückrechnung sind sehr gering, siehe Tabelle 4.31. Die größten Schwankungen ergaben sich in der unteren ungebundenen Tragschicht.

Tab. 4.31: ELMOD: Zusammenfassung der gemittelten Berechnungsergebnisse beider Messpunkte der A3

Variante	Parameter	Schichtsteifigkeiten [MPa]			
		E_{AC}	E_{LC}	E_{UB}	E_{SUB}
MP1	MW	7 153	5 947	157	124
	STAB	2 043	266	18	5
	STAB%	28,56%	4,42%	11,13%	3,96%
MP2	MW	4 658	7 641	272	201
	STAB	1 260	374	42	13
	STAB%	27,06%	5,18%	15,87%	6,95%
Sensor MP1		5 539	13 971	337	-
Sensor MP2		8 706	9 382	405	-
<i>RVS 03.06.68</i> [21]		-	-	330	118

In den Tabellen 4.32 und 4.33 sowie in den Abbildungen 4.51 und 4.52 wurden sowohl Rückrechnung, als auch Sensorergebnisse der Asphalttschicht temperaturkorrigiert und mit den Ergebnissen der 4PB-Pr gegenübergestellt. Die Ergebnisse des *Messpunktes 1* sind in den Sommermonaten decken sich mit den Laborergebnissen, die Messungen A3.3 bis A3.5 konnten sehr akkurat, mit geringen Abweichung zu jenen der 4PB-Pr, temperaturkorrigiert werden. Bei der Messung A3.2 am *Messpunkt 1* sollte aufgrund der niedrigen Temperatur die Steifigkeit ohne Korrektur deutlich höher sein, demnach reduziert Baltzer und Jansens Formel [1] (Gleichung 4.21) fälschlicherweise den E-Modul. Dies gilt sowohl für die Rückrechnung als auch für die Sensorergebnisse. Der berechnete E-Modul der Messung A3.1 ist sehr niedrig und kann nicht zufriedenstellend korrigiert werden.

Die Asphaltsteifigkeit des *Messpunktes 2* wurde von ELMOD mit einer Abweichung von 34,62 % rückgerechnet und korrigiert. Am *Messpunkt 2* tritt bei der Messung A3.4 ein Ausreißer auf. Ohne dessen Berücksichtigung sind die Ergebnisse sehr nahe an den Laborergebnissen, die Abweichung beträgt hier lediglich 17,74 %.

Zusammenfassend sei gesagt, dass der Unterschied beider Messpunkte trotz der unmittelbaren Nähe zueinander sehr groß ist. Sämtliche Ergebnisse, sowohl jene der Sensordaten als auch der Rückrechnung weichen stark voneinander ab, der Grund dafür bleibt fraglich.

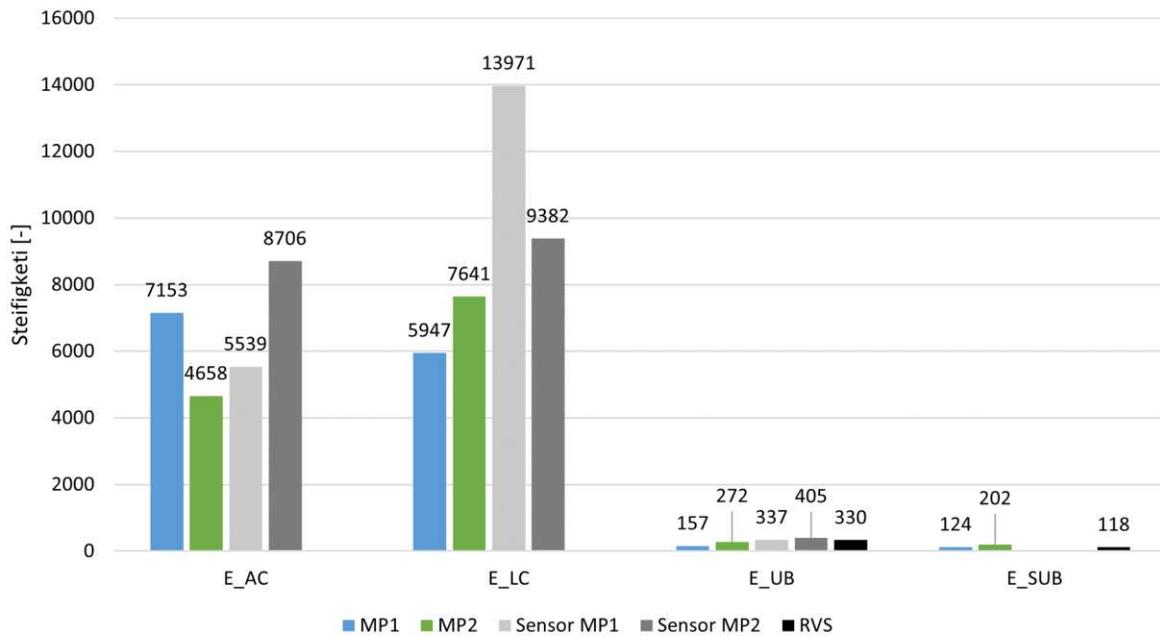


Abb. 4.50: ELMOD: Rückgerechnete Steifigkeiten beider Messpunkte der A3

Tab. 4.32: ELMOD: Berechnungsergebnisse des Asphalts, temperaturkorrigiert für die Messungen der A3 am Messpunkt 1

Messung	T [°C]	κ [-]	Asphaltsteifigkeiten [MPa]				
			E_{AC}^{ELMOD}	$E_{AC,T=20}^{ELMOD}$	E_{AC}^{Sensor}	$E_{AC,T=20}^{Sensor}$	$E_{AC,T=20}^{Labor,8 Hz}$
Juli 2021 A3.1	34,80	1,85	2 083	3 847	2 767	5 110	7 124
April A3.2	13,74	0,77	13 119	10 121	2 417	1 865	7 124
Mai A3.3	21,18	1,05	7 017	7 367	4 555	4 782	7 124
Juli A3.4	30,33	1,53	5 179	7 948	6 147	9 433	7 124
August A3.5	29,69	1,49	4 340	6 484	4 354	6 505	7 124
Mittelwert	-	-	-	7 153	-	5 539	7 124
STAB	-	-	-	2 043	-	2 464	0

Tab. 4.33: ELMOD: Berechnungsergebnisse des Asphalts, temperaturkorrigiert für die Messungen der A3 am Messpunkt 2

Messung	T [°C]	κ [-]	Asphaltsteifigkeiten [MPa]				
			E_{AC}^{ELMOD}	$E_{AC,T=20}^{ELMOD}$	E_{AC}^{Sensor}	$E_{AC,T=20}^{Sensor}$	$E_{AC,T=20}^{Labor,8 Hz}$
Juli 2021 A3.1	34,80	1,85	1 374	2 536	3 775	6 971	7 124
April A3.2	13,74	0,77	7 820	6 033	8 602	6 636	7 124
Mai A3.3	21,18	1,05	5 582	5 861	6 272	6 585	7 124
Juli A3.4	30,33	1,53	2 872	4 407	13 090	20 088	7 124
August A3.5	29,69	1,49	2 981	4 453	2 176	3 251	7 124
Mittelwert	-	-	-	4 658	-	8 706	7 124
STAB	-	-	-	1 260	-	5 850	0

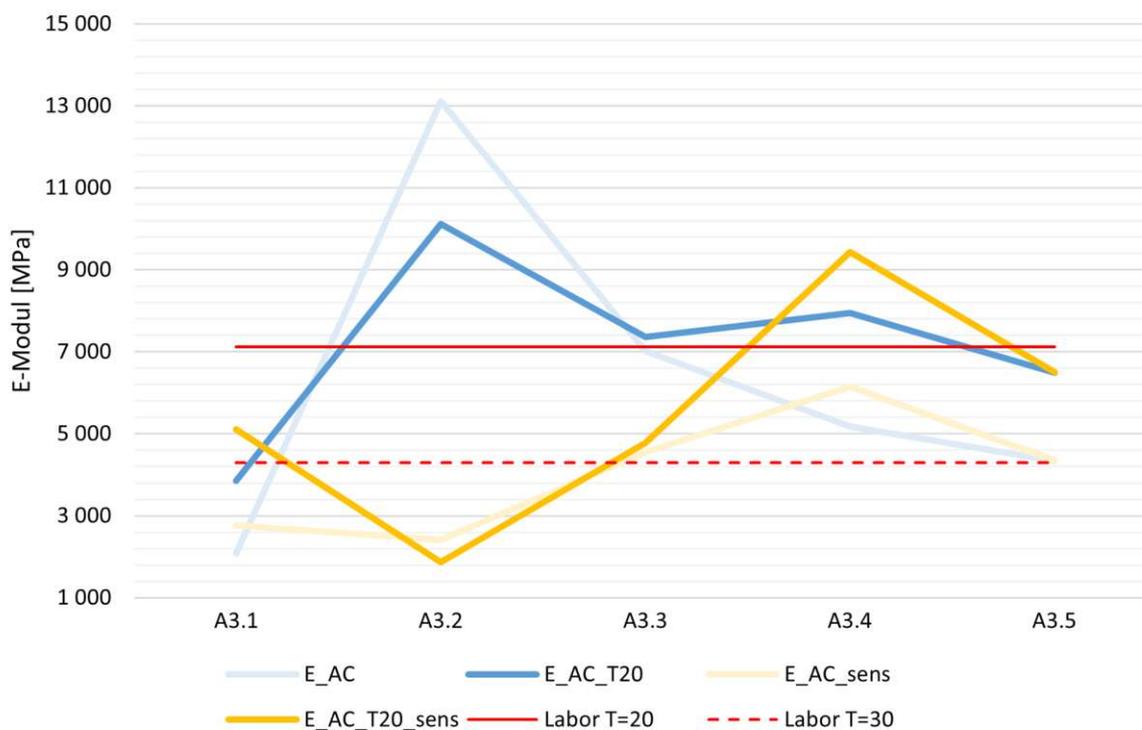


Abb. 4.51: ELMOD: Rückgerechnete Steifigkeit des Asphalts am Messpunkt 1, temperaturkorrigiert nach Baltzer und Jansen [1], verglichen mit dem Laborergebnis (Kap. 3.1)

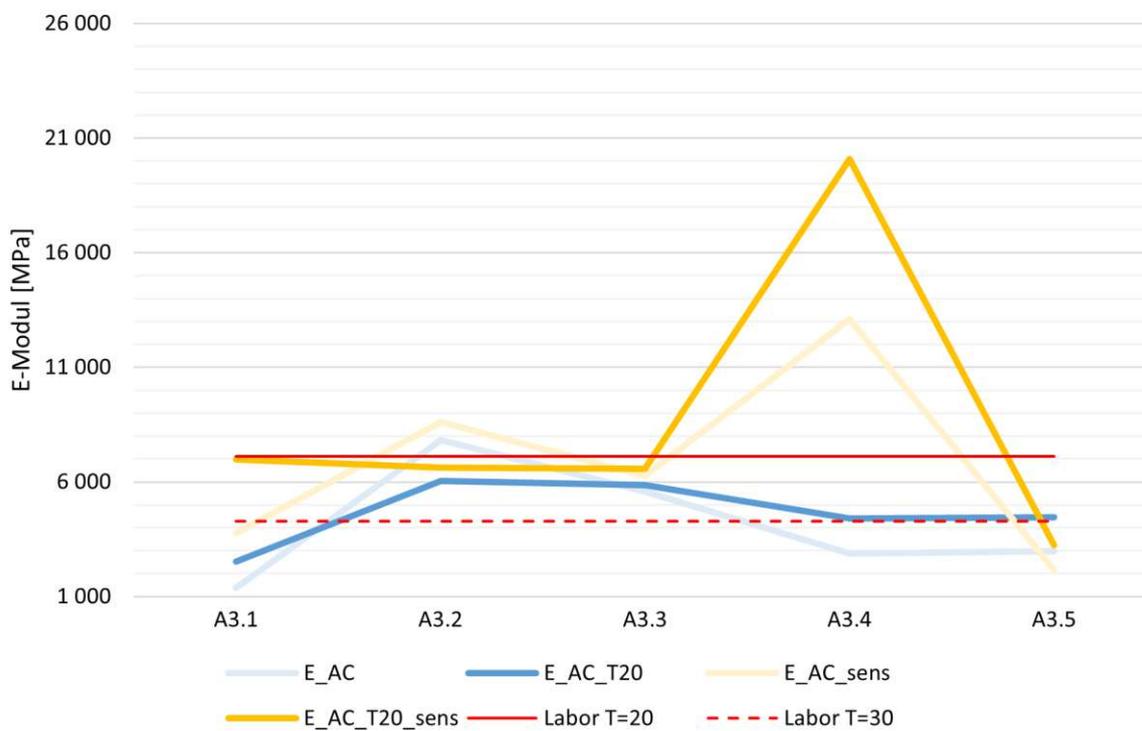


Abb. 4.52: ELMOD: Rückgerechnete Steifigkeit des Asphalts am Messpunkt 2, temperaturkorrigiert nach Baltzer und Jansen [1], verglichen mit dem Laborergebnis (Kap. 3.1)

4.5.3 BAKFAA: Berechnungen

Die Abbildungen 4.53 und 4.54 zeigen den Fehler der berechneten Deflektionsmulde im Vergleich zur gemessenen (Abbildungen 4.40 und 4.41). Beide Messpunkte weisen ähnliche Abweichungen in der Größenordnung unter 5 % auf. Der Fehler nimmt mit der Entfernung vom Lastzentrum zu und wächst im ungünstigsten Fall auf über 30 % am *Messpunkt 1*, wobei der maximale Fehler am *Messpunkt 2* deutlich niedriger ist (23 %). Im Gegensatz zu ELMOD berechnet BAKFAA den Untergrund linear. Dazu muss ein erwarteter Abstand zur ursprünglich vorhandenen Felsschicht angenommen werden, hierfür wurde eine Untergrunddicke von 65 cm gewählt. Dies hat Auswirkungen auf die Berechnungsgenauigkeit der weiter entfernten Geophone. Positiv erwähnt sei das zusätzliche vom Lastzentrum 200 cm entfernte Geophon. Bei den Messungen im Juli und August sind bis zum sechsten Geophon D_6 die Abweichungen nahe an 0 %. In Abbildung 4.55 wird das quadratische Mittel aller Berechnungen einer Messung dargestellt. Die schwankenden Ergebnisse lassen allerdings keine aussagekräftigen Schlüsse zu.

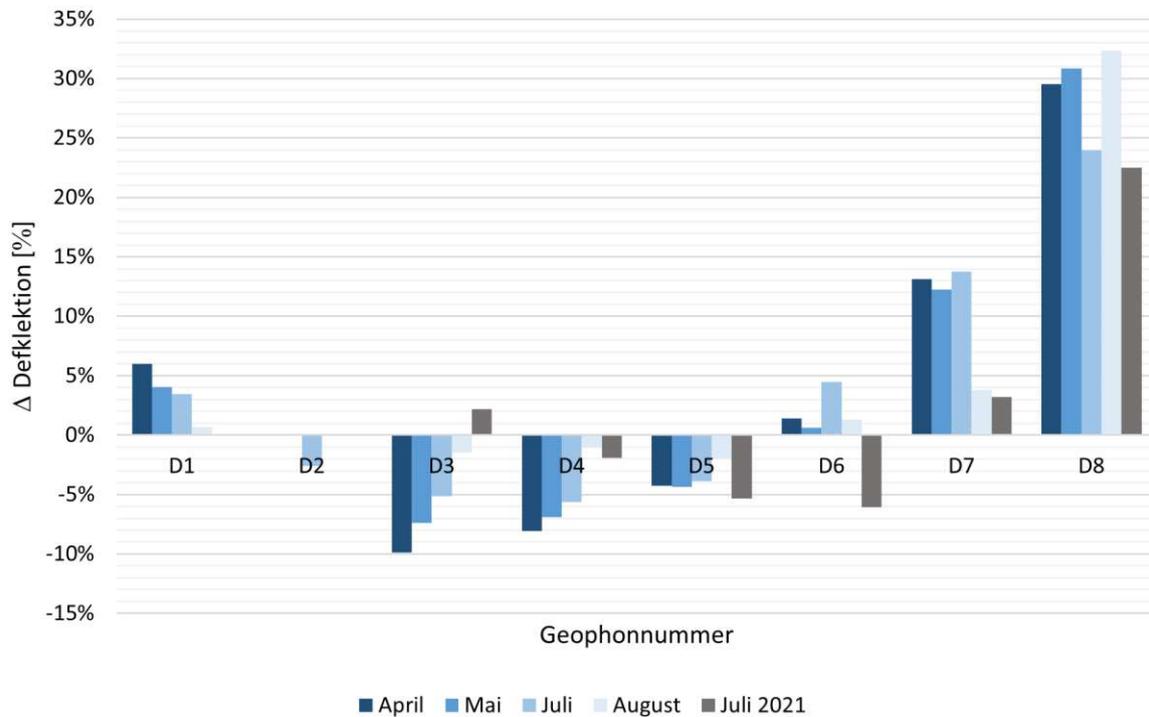


Abb. 4.53: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen am *MP 1*

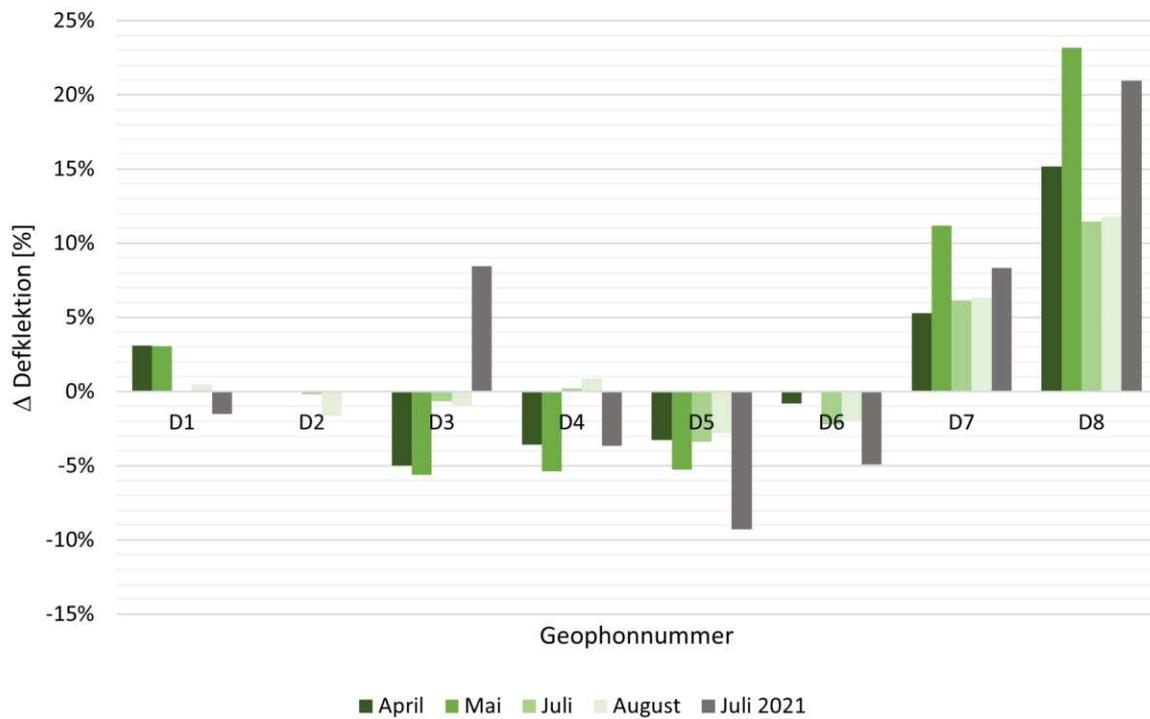


Abb. 4.54: Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde zur gemessenen am *MP 2*



Abb. 4.55: Quadratisches Mittel (Root Mean Square, RMS) der Abweichungen der Berechnungsergebnisse pro Messung

4.5.3.1 Schichtsteifigkeiten

Im folgenden Kapitel werden die berechneten Schichtsteifigkeiten beider Messpunkte zusammengefasst. Im Anhang A.2, Tabelle A.6 bis A.10 sind die verwendeten Randbedingungen, Schranken und Ergebnisse inklusive Standardabweichungen aufgeschlüsselt. BAKFAA stellt bei der Auswahl der Schichten Materialien zur Verfügung, dabei bezieht man sich auf den „FAA Advisory Circular 150/5370-11B, *Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements*.“. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Berechnung mit Schichtsteifigkeiten, die in BAKFAA definiert sind, bessere Ergebnisse liefert, als die Definition eigener Materialien. Mit dem Kompromiss veränderter Anfangssteifigkeiten laut Tabelle wurden die Berechnungen mit den zur Verfügung gestellten Schichteinstellungen durchgeführt. Dies wirkte sich besonders auf den Magerbeton aus, da hier die Anfangssteifigkeit sehr niedrig angesetzt wurde.

Tab. 4.34: Anfangswerte für die iterative Bestimmung der Schichtsteifigkeiten in BAKFAA für alle Messungen beider Messpunkte

Schicht	Bezeichnung	E-Modul MPa
AC	P-401/P-403	2 755
CB (LC)	P-304	3 445
UB	P-219	515
SUB	High Strength Subgrade	140

- Asphalt (Asphalt Concrete, AC)

Die Steifigkeit der Asphaltenschicht wird tendenziell unterbewertet, siehe Tabelle 4.35 und Abbildung 4.56. Es ist allerdings ohne Temperaturkorrektur schwer, Aussagen über die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu treffen. Dies wird in den Abbildungen 4.61 und 4.62 sowie den Tabellen 4.40 und 4.41 diskutiert. Auffällig ist der Ausreißer des Sensorergebnisses bei Messung A3.4.

Tab. 4.35: Steifigkeit der Asphaltenschicht beider Messpunkte der A3 in BAKFAA

Messung	T_{AC} [°C]	E_{AC}^{ELMOD} [MPa]		E_{AC}^{Sensor} [MPa]		$E_{AC}^{Labor,8Hz}$ [MPa]
		MP1	MP2	MP1	MP2	
Juli 2021 A3.1	34,80	3 045	2 353	2 767	3 775	3 858
April A3.2	13,74	4 100	5 841	2 417	8 602	9 235
Mai A3.3	21,18	3 720	4 558	4 555	6 272	6 786
Juli A3.4	30,33	4 221	2 887	6 147	13 090	4 642
August A3.5	29,69	4 399	2 830	4 354	2 176	4 769

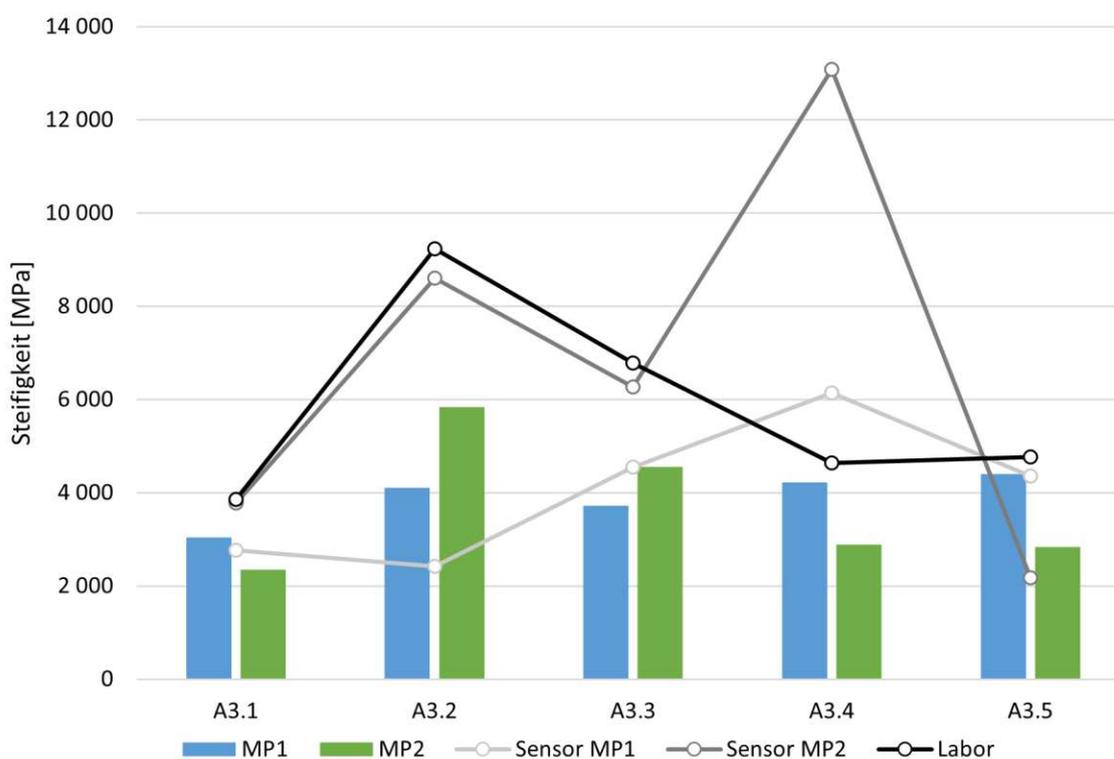


Abb. 4.56: Steifigkeit der Asphaltenschicht beider Messpunkte der A3 in BAKFAA

- Magerbeton (Lean Concrete, LC)

Die Rückrechnungsergebnisse der Magerbetonsteifigkeit werden unterbewertet, siehe Tabelle 4.36 und Abbildung 4.57. Dies kann dem Fakt geschuldet sein, dass in BAKFAA diese Schicht als Zementstabilisierung mit deutlich niedriger Steifigkeit vordefiniert wurde (siehe Tabelle 4.34). Dies musste allerdings erfolgen, da eine benutzerdefinierte Schicht keine plausiblen Ergebnisse lieferte.

Tab. 4.36: Steifigkeit des Magerbetons beider Messpunkte der A3 in BAKFAA

Messung	T_{LC} [°C]	E_{LC}^{ELMOD} [MPa]		E_{LC}^{Sensor} [MPa]	
		MP1	MP2	MP1	MP2
Juli 2021 A3.1	32,63	2 903	2 358	16 159	9 608
April A3.2	13,11	7 237	9 571	11 389	10 284
Mai A3.3	20,47	6 056	7 241	13 751	9 467
Juli A3.4	28,36	3 748	7 119	14 416	9 449
August A3.5	28,59	5 630	7 991	14 139	8 104
Mittelwert		3 653	4 897	13 971	9 382
STAB		1 762	2 697	1 712	792

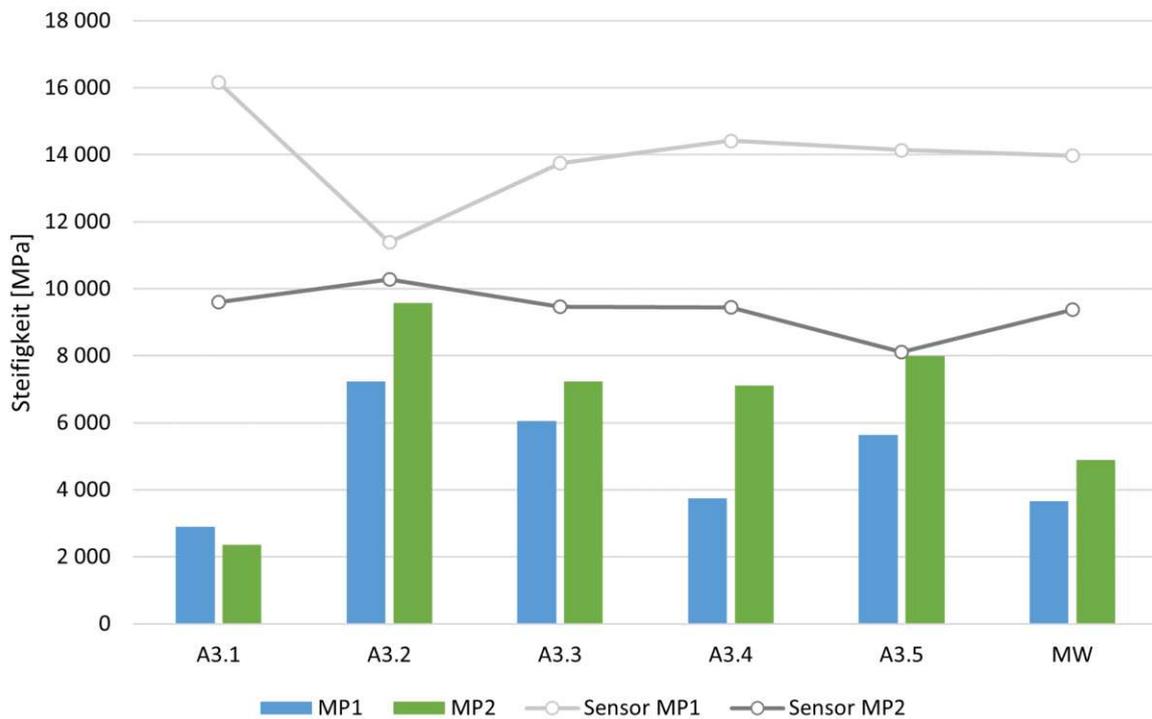


Abb. 4.57: Steifigkeit des Magerbetons beider Messpunkte der A3 in BAKFAA

- Ungebundene untere Tragschicht (Unbound Layer, UB)

Während die erwarteten Steifigkeiten sich größtenteils stark überlappen, wird die ungebundene untere Tragschicht steifer als erwartet rückgerechnet, siehe Tabelle 4.37 und Abbildung 4.58. Die Mittelwerte aller Steifigkeiten ist allerdings sehr ähnlich.

Tab. 4.37: Steifigkeit der ungebundenen u.TS. beider Messpunkte der A3 in BAKFAA

Messung	T_{UB} [°C]	E_{UB}^{ELMOD} [MPa]		E_{UB}^{Sensor} [MPa]		$E_{UB}^{RVS:03.06.68}$ [MPa] [21]	
		MP1	MP2	MP1	MP2		
Juli 2021	A3.1	31,14	504	860	375	404	392
April	A3.2	12,78	910	630	365	419	196
Mai	A3.3	21,52	738	945	358	436	280
Juli	A3.4	26,83	745	312	289	383	392
August	A3.5	28,71	132	294	297	384	392
Mittelwert			433	434	337	405	330
STAB			302	301	41	23	89

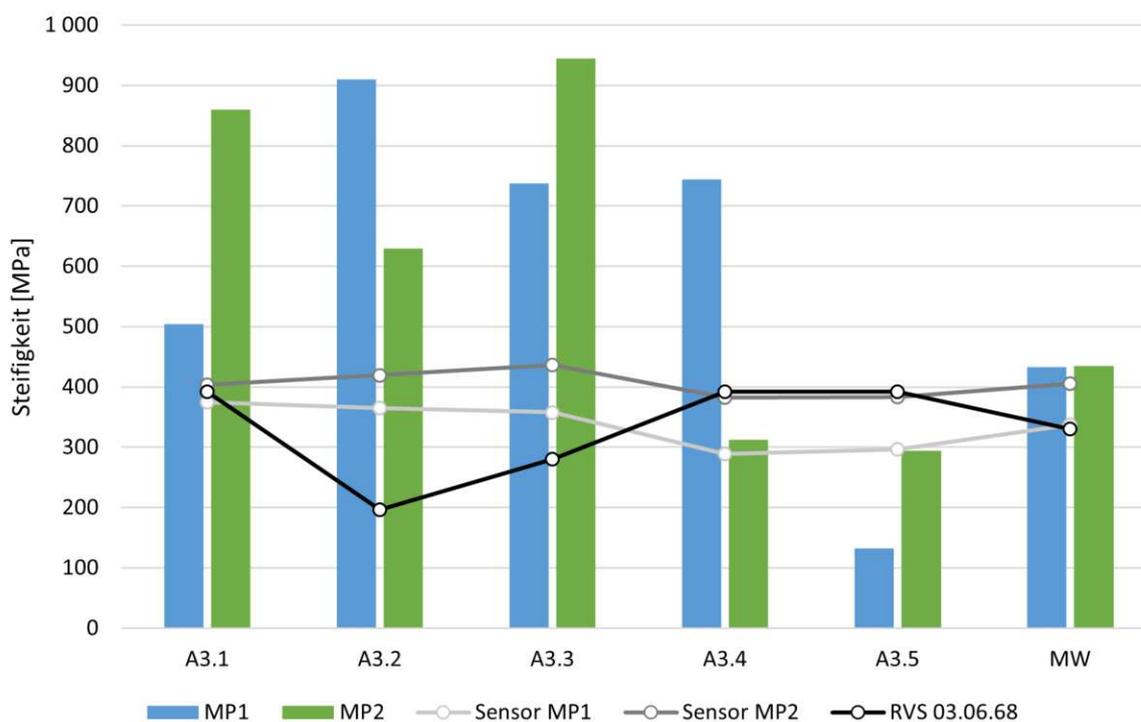


Abb. 4.58: Steifigkeit der ungebundenen u.TS. beider Messpunkte der A3 in BAKFAA

- Untergrund (Subgrade, SUB)

Die Untergrundsteifigkeit des *Messpunktes 1* trifft die Erwartungshaltung besser als jene von *Messpunkt 2*. In beiden Fällen wurde sie steifer interpretiert, siehe Tabelle 4.38 und Abbildung 4.59.

Tab. 4.38: Steifigkeit des Untergrundes beider Messpunkte der A3 in BAKFAA

Messung	T_{SUB} [°C]	E_{SUB}^{ELMOD} [MPa]		$E_{SUB}^{RVS;03.06.68}$ [MPa] [21]	
		MP1	MP2		
Juli 2021	A3.1	29,93	177	259	140
April	A3.2	11,60	186	336	70
Mai	A3.3	21,72	180	264	100
Juli	A3.4	25,63	179	353	140
August	A3.5	28,22	408	382	140
Mittelwert			162	228	118
STAB			102	55	32

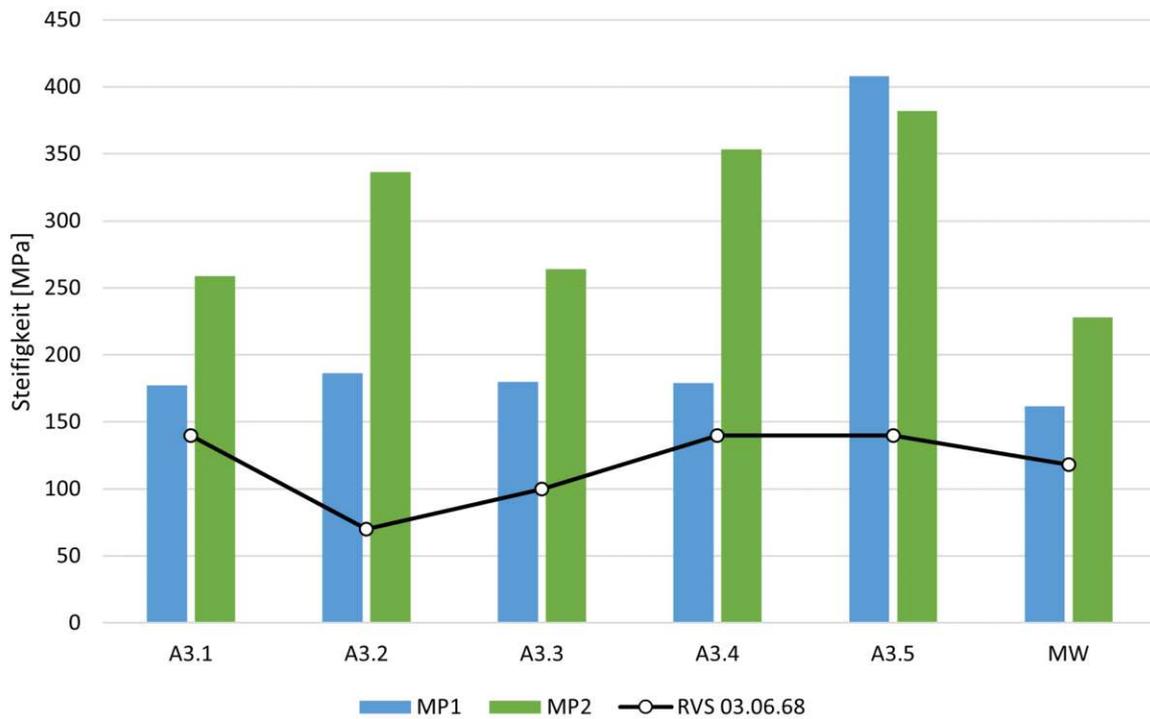


Abb. 4.59: Steifigkeit des Untergrundes beider Messpunkte der A3 in BAKFAA

- Zusammenfassung

Abbildung 4.60 veranschaulicht die Mittelwerte beider Messpunkte und ihre Erwartungswerte aller (LC, UB und SUB). Der Untergrund wurde im Zuge der Autobahnsanierung nicht erneuert, dies deutet auf einen guten Zustand hin. Damit sind die Ergebnisse durchaus innerhalb realistischer Grenzen, vor allem unter Betrachtung ihrer Schlüssigkeit und geringen Standardabweichungen, siehe Tabelle 4.39. Die Validierung ist allerdings aufgrund der fehlenden Messbarkeit nur schwer möglich. Zwar wurde auch die ungebundene untere Tragschicht nicht saniert, allerdings wurde zum Einbau der Beschleunigungssensoren die Schicht in einem kleinen Abschnitt in Lastmitte ausgehoben und im Anschluss mit dem selben Material verfüllt und verdichtet. Die Abweichungen zwischen Rückrechnung und Sensor sind zufriedenstellend niedrig, sie betragen für *Messpunkt 1* 28,52 % und für *Messpunkt 2* lediglich 7,23 %, wenn auch die Standardabweichung für *Messpunkt 2* über 57 % beträgt, siehe Tabelle 4.39. Vergleicht man die Rückrechnung mit der Steifigkeit laut *RVS 03.06.68* [21], erhält man Abweichungen von etwa 31 %. Die Steifigkeitsrückrechnung des Magerbetons liefert absolut unzufriedenstellende Ergebnisse. Im *Messpunkt 1* beträgt sie lediglich 25 % der Steifigkeit der Sensorberechnung. Bei *Messpunkt 2* beträgt die Abweichung 47,80 %. Ersichtlich ist die große Abweichung in Abbildung 4.60.

Tab. 4.39: BAKFAA: Zusammenfassung der gemittelten Berechnungsergebnisse beider Messpunkte der A3

Variante	Parameter	Schichtsteifigkeiten [MPa]			
		E_{AC}	E_{LC}	E_{UB}	E_{SUB}
MP1	MW	5 148	3 653	433	162
	STAB	1 379	556	76	26
	STAB%	26,79%	15,23%	17,51%	16,22%
MP2	MW	4 459	4 897	434	228
	STAB	188	1 214	252	44
	STAB%	4,21%	24,78%	57,92%	19,29%
Sensor MP1		5 539	13 971	337	-
Sensor MP2		8 706	9 382	405	-
<i>RVS 03.06.68</i>		-	-	330	118

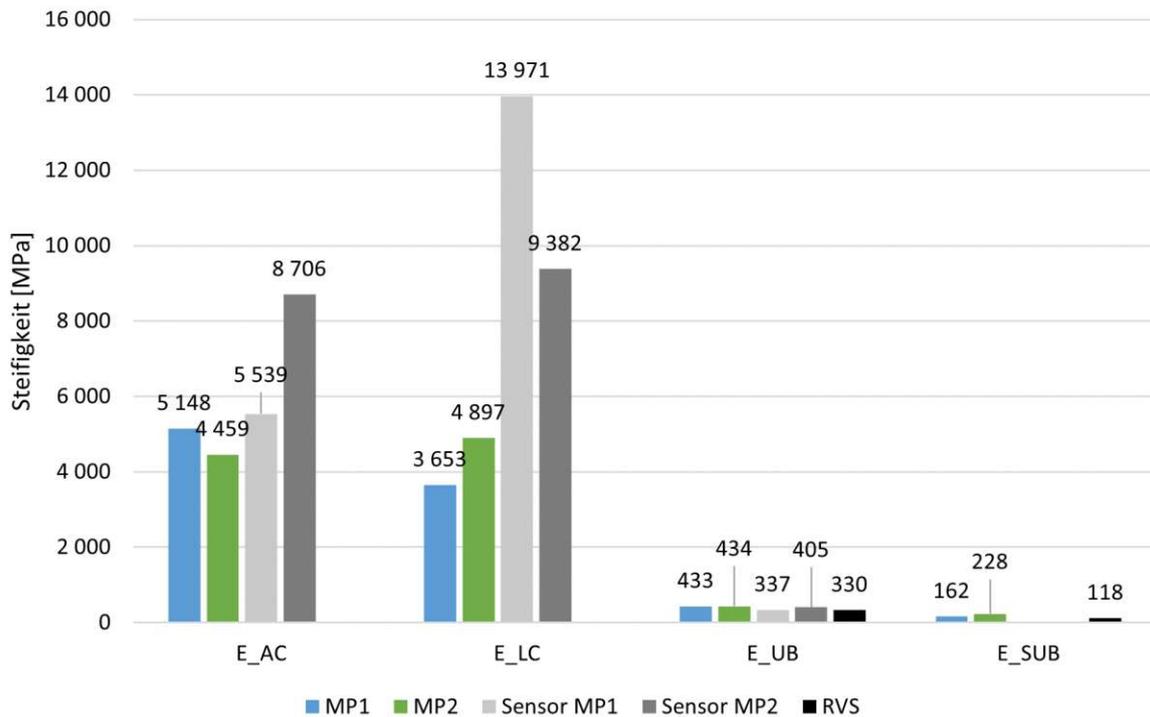


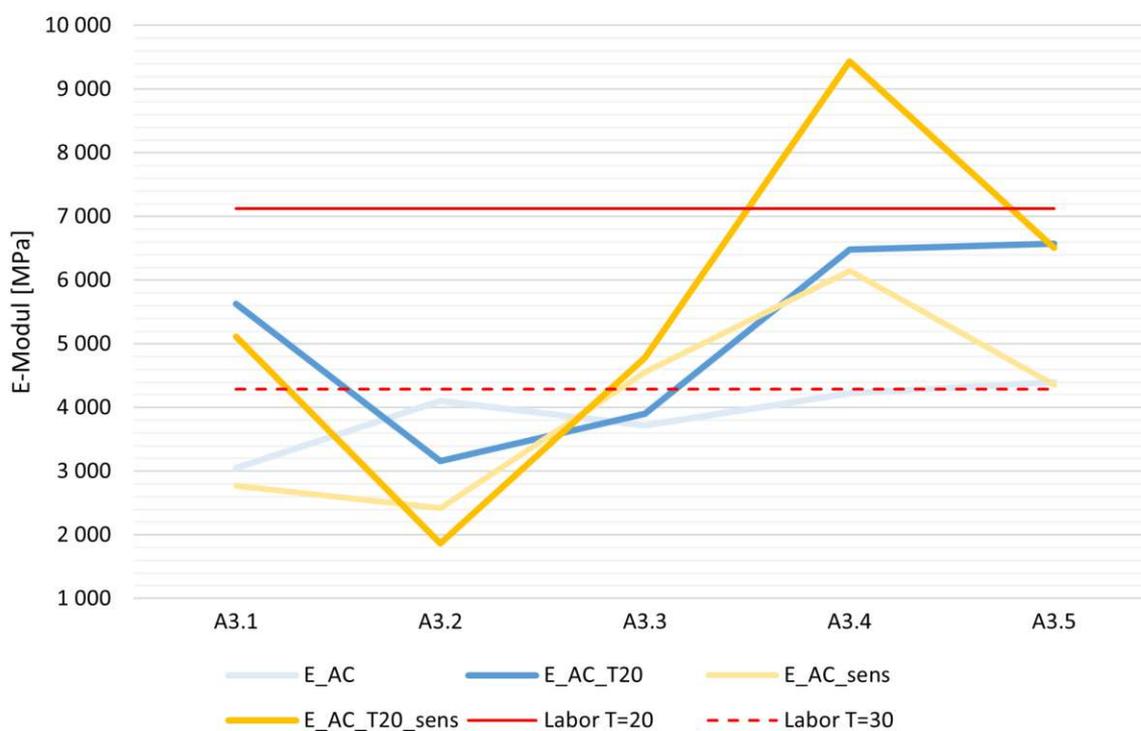
Abb. 4.60: BAKFAA: Rückgerechnete Steifigkeiten beider Messpunkte der A3

In den Tabellen 4.40 und 4.41 sowie in den Abbildungen 4.61 und 4.62 wurden sowohl Rückrechnung als auch Sensorergebnisse der Asphalttschicht temperaturkorrigiert und mit den Ergebnissen der 4PB-Pr gegenübergestellt. Die Ergebnisse von *Messpunkt 1* sind nicht zufriedenstellend. Bei Messung A3.2 sollte aufgrund der niedrigen Temperatur die Steifigkeit ohne Korrektur deutlich höher sein, demnach reduziert Baltzer und Jansens Formel [1] (Gleichung 4.21) fälschlicherweise den E-Modul. Dies gilt sowohl für die Rückrechnung als auch für die Sensorergebnisse. Bei der Messung A3.3 betrug die Temperatur zum Zeitpunkt der Messung 21,18 °C, doch das Ergebnis liegt sehr weit von jenem der 4PB-Pr entfernt. Beide Feststellungen gelten für die Rückrechnung aber auch für die Sensorauswertung, diese verhalten sich sehr ähnlich zueinander. Am *Messpunkt 2* glättete die Temperaturkorrektur wünschenswerterweise die Steifigkeiten aller Messungen. Lediglich das Sensorergebnis der Messung A3.4 ist ein Ausreißer in unrealistischem Ausmaß.

Zusammenfassend sei gesagt, dass der Unterschied beider Messpunkte trotz der unmittelbaren Nähe zueinander sehr groß ist. Sämtliche Ergebnisse sowohl der Sensordaten als auch der Rückrechnung weichen stark voneinander ab, der Grund dafür bleibt fraglich.

Tab. 4.40: BAKFAA: Berechnungsergebnisse des Asphalts temperaturkorrigiert für die Messungen der A3 am *Messpunkt 1*

Messung	T [°C]	κ [-]	Asphaltsteifigkeiten [MPa]					
			$E_{AC}^{BAKF\text{AA}}$	$E_{AC,T=20}^{BAKF\text{AA}}$	E_{AC}^{Sensor}	$E_{AC,T=20}^{Sensor}$	$E_{AC,T=20}^{Labor,8\text{Hz}}$	
Juli 2021	A3.1	34,80	1,85	3 045	5 623	2 767	5 110	7 124
April	A3.2	13,74	0,77	4 100	3 163	2 417	1 865	7 124
Mai	A3.3	21,18	1,05	3 720	3 905	4 555	4 782	7 124
Juli	A3.4	30,33	1,53	4 221	6 477	6 147	9 433	7 124
August	A3.5	29,69	1,49	4 399	6 572	4 354	6 505	7 124
Mittelwert				-	5 148	-	5 539	7 124
STAB				-	1 379	-	2 464	0

**Abb. 4.61:** BAKFAA: Rückgerechnete Steifigkeit des Asphalts am *Messpunkt 1*, temperaturkorrigiert nach Baltzer und Jansen [1], verglichen mit dem Laborergebnis (Kap. 3.2)

Tab. 4.41: BAKFAA: Berechnungsergebnisse des Asphalts temperaturkorrigiert für die Messungen der A3 am *Messpunkt 2*

Messung	T [°C]	κ [-]	Asphaltsteifigkeiten [MPa]					
			$E_{AC}^{BAKF\text{AA}}$	$E_{AC,T=20}^{BAKF\text{AA}}$	E_{AC}^{Sensor}	$E_{AC,T=20}^{Sensor}$	$E_{AC,T=20}^{Labor,8\text{Hz}}$	
Juli 2021	A3.1	34,80	1,85	2 353	4 344	3 775	6 971	7 124
April	A3.2	13,74	0,77	5 841	4 506	8 602	6 636	7 124
Mai	A3.3	21,18	1,05	4 558	4 786	6 272	6 585	7 124
Juli	A3.4	30,33	1,53	2 887	4 431	13 090	20 088	7 124
August	A3.5	29,69	1,49	2 830	4 228	2 176	3 251	7 124
Mittelwert				-	4 459	-	8 706	7 124
STAB				-	188	-	5 850	0

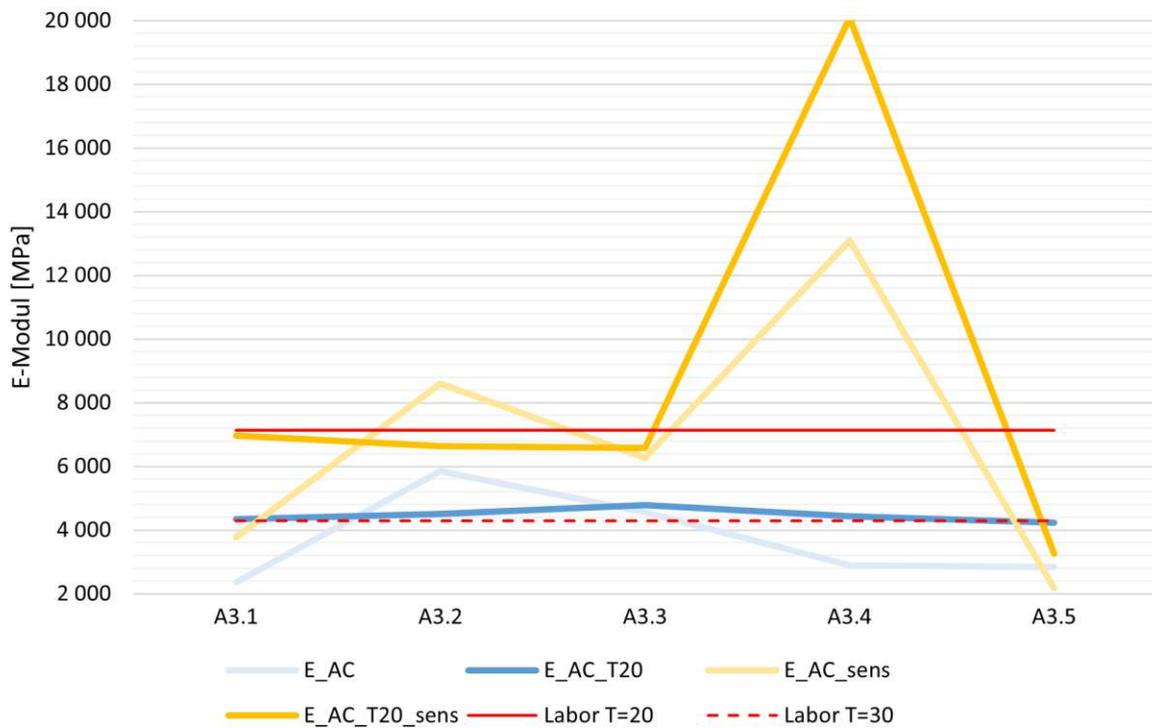


Abb. 4.62: BAKFAA: Rückgerechnete Steifigkeit des Asphalts am *Messpunkt 2*, temperaturkorrigiert nach Baltzer und Jansen [1], verglichen mit dem Laborergebnis (Kap. 3.2)

Kapitel 5

Vergleich

Im Anschluss werden die Ergebnisse der beiden Softwarelösungen verglichen und anhand der jeweiligen Feldmessstelle diskutiert.

5.1 Feldmessstelle A10

An der Feldmessstelle auf der A10 entstand die Problematik eines kompliziert zu bewertenden „sandwichartigen“ Straßenaufbaus. Dies erforderte die Betrachtung von vier Berechnungsvarianten mit dem Ziel, den Aufbau zu vereinfachen, um so den Programmen die Berechnung plausibler Ergebnisse zu ermöglichen. Die Abweichungen der berechneten Deflektionsmulden zu den gemessenen zeigen (Abbildungen 4.13 bis 4.16 und Abbildungen 4.25 bis 4.28), dass dies größtenteils gelingt. Lediglich bei der BAKFAA-Berechnung der Variante *5lay_unfixed* konnten die Deflektionen der hinteren Geophone nicht zufriedenstellend nachgebildet werden, siehe Abbildung 4.25. Konstant über beide Software-Lösungen und alle Berechnungsvarianten hinweg, kann bei der Messung A10.2 im März und in abgeschwächter Form bei der Messung A10.3 im April eine größere Ungenauigkeit beobachtet werden. Dem zuzuschreiben ist einerseits der große Temperaturunterschied von $\Delta T = 14^\circ\text{C}$ zwischen der Oberfläche und Unterseite der Betondecke (Abbildung 4.8), welcher vermutlich eine Wölbung der Platte und damit einen fehlenden Kontakt zur Unterlage während der Messung zur Folge hatte. Andererseits können die Auswirkungen der Frühjahrstauperiode auf den Untergrund ihren Beitrag leisten.

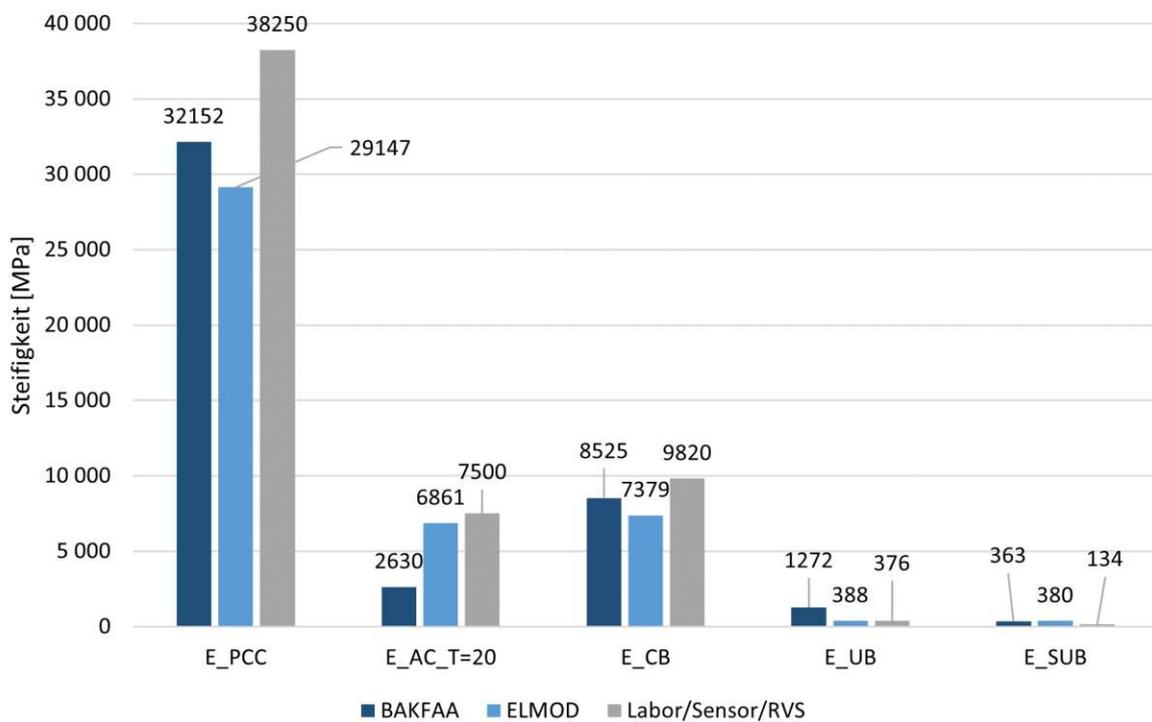
Tabelle 5.1 zeigt die Abweichungen der Berechnungsergebnisse zur erwarteten Steifigkeit. Die Abbildungen 5.1, 5.2, 5.3 und 5.4 veranschaulichen die Ergebnisse je nach Berechnungsvariante. Darüber hinaus wurde der quadratische gemittelte Fehler der Schichten E_{PCC} , $E_{AC,T=20}$ und E_{CB} ermittelt, um den gesamten Fehler der jeweiligen Berechnung bewerten zu können. Die Schichten E_{UB} und E_{SUB} wurden hier nicht berücksichtigt, da aufgrund der niedrigen E-Moduli die Abweichungen prozentuell sehr hoch sind. Absolut gesehen beeinflusst das die übrigen Ergebnisse allerdings nicht. Betrachtet man BAKFAAs Lösungen stellt man fest, dass die Abweichungen sehr groß sind. Während die Steifigkeit der Betondecke, vor allem bei den fünfschichtigen Varianten, noch akkurat interpretiert wurde, sind die Ergebnisse der Asphaltdecke und der zementstabilisierten Tragschicht nicht zufriedenstellend. Einzelne Abweichungen in Höhe von 80 %, sowie gesamt gemittelte Abweichungen über 60 %, lassen keine Schlüsse auf den Zustand der Straße zu. Die Berechnungsvariante *5lay_unfixed* ist mit einer Genauigkeit von knapp unter 40 % noch die akkurateste.

Im Gegensatz dazu sieht man, dass ELMODs Ergebnisse wesentlich geringere Abweichungen aufweisen. Die Variante *5lay_unfixed* ist auch hier die genaueste mit einer gesamten Abweichung unter 20 %, knapp gefolgt von beiden Varianten mit fixierter Asphaltsteifigkeit (*5lay_fixed* und *4lay_fixed*). Lediglich die Variante *4lay_unfixed* weist eine beträchtlich höhere Abweichung von 38,46 % vor.

¹Quadratisches Mittel der Abweichungen exklusive E_{UB} und E_{SUB}

Tab. 5.1: Abweichungen der Berechnungen zur erwarteten Steifigkeit

		E_{PCC}	$E_{AC,T=20}$	E_{CB}	E_{UB}	E_{SUB}	RMS^1
<i>5lay_unfixed</i>	BAKFAA	15,94%	64,93%	13,19%	-238,29%	-170,37%	39,34%
	ELMOD	23,80%	8,52%	22,09%	-3,18%	-182,87%	19,38%
<i>4lay_unfixed</i>	BAKFAA	-33,69%	67,88%	80,92%	-29,09%	-	64,01%
	ELMOD	5,14%	29,43%	59,55%	1,91%	-	38,46%
<i>5lay_fixed</i>	BAKFAA	8,70%	-	77,19%	-380,27%	-225,96%	54,92%
	ELMOD	30,77%	-	13,82%	-1,95%	-179,23%	23,85%
<i>4lay_fixed</i>	BAKFAA	-21,88%	-	86,31%	-33,06%	-	62,96%
	ELMOD	32,07%	-	15,83%	5,83%	-	25,29%

**Abb. 5.1:** Vergleich der rückgerechneten Steifigkeiten der Berechnungsvariante *5lay_unfixed*

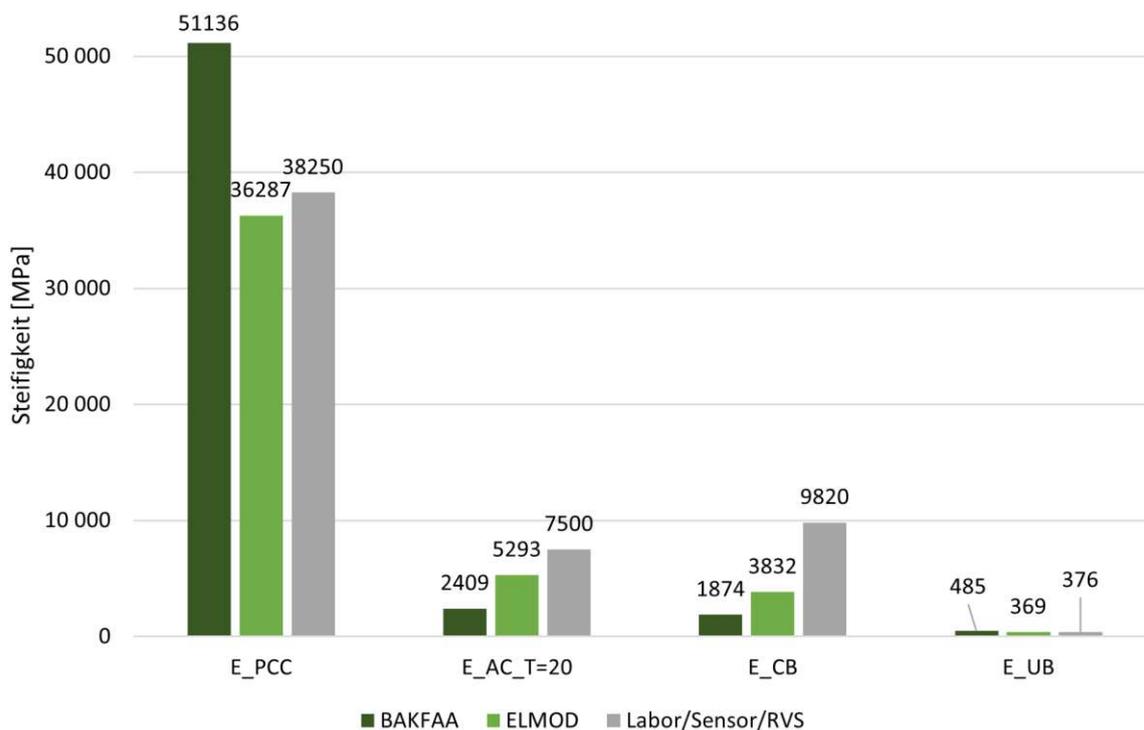


Abb. 5.2: Vergleich der rückgerechneten Steifigkeiten der Berechnungsvariante *4layer_unfixed*

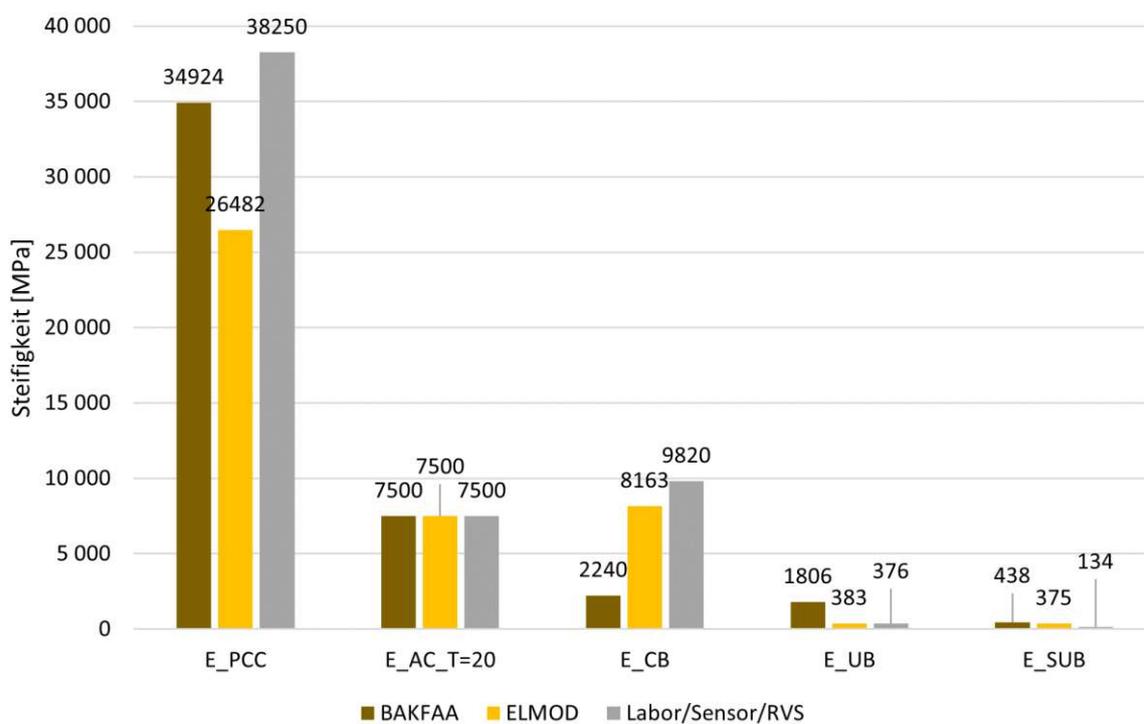


Abb. 5.3: Vergleich der rückgerechneten Steifigkeiten der Berechnungsvariante *5layer_fixed*

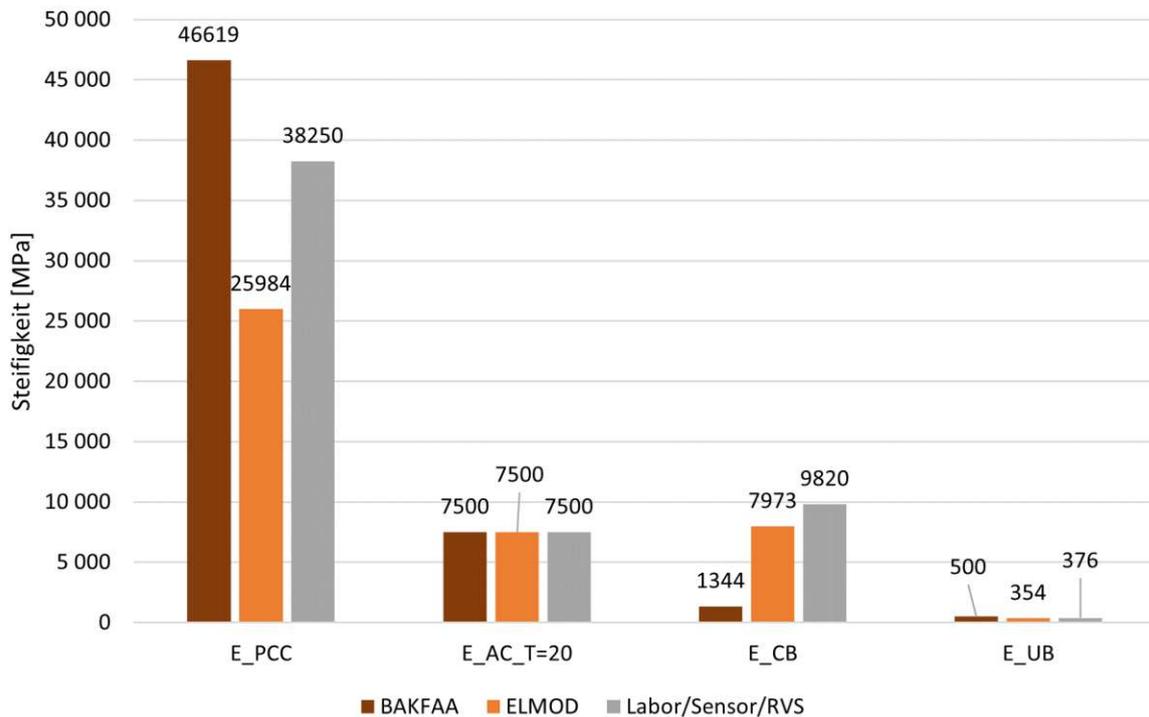


Abb. 5.4: Vergleich der rückgerechneten Steifigkeiten der Berechnungsvariante *4lay_fixed*

5.2 Feldmessstelle A3

Der hier vorhandene Asphaltaufbau der Bautype AS4 ist sehr weit verbreitet. Da zur Analyse zwei Messpunkte in einem Abstand von 70 m zur Verfügung stehen, ist eine Überprüfung der Ergebnisse möglich. Aufgrund von Wartungsarbeiten des für die Messungen A3.1 bis A3.3 verwendeten Fallgewichtsdeflektometers wurde für die Messungen A3.4 und A3.5 ein Gerät eines alternativen Herstellers benutzt. An diesem befand sich ein zusätzliches Geophon D_2 zwischen den Geophonen D_1 und D_3 im Abstand von 200 mm vom Lastzentrum. Die Rückrechnungen zeigen, dass bei diesen Messungen die Deflektionsmulde wesentlich besser nachgebildet werden konnte (vgl. Abbildungen 4.40 und 4.41). Der Fehler im Vergleich zur gemessenen Mulde konnte vor allem bis zum fünften Geophon minimiert werden. Bei beiden Programmen ist eine steigende Ungenauigkeit mit zunehmender Entfernung vom Lastzentrum festzustellen. Während der Messung im Juli 2021 wurden diverse Fallgewichte erprobt um die ideale Belastung zu identifizieren. Deshalb wurden pro Fallgewicht lediglich fünf Messungen durchgeführt und in weiterer Folge wurden in dieser Analyse lediglich die Messungen mit einer Belastung von 150 kN berücksichtigt. Fünf Messungen sind allerdings sehr wenig um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Dies wird ersichtlich sowohl bei den Abweichungen der Deflektionen, als auch bei den Steifigkeitsberechnungen dieser Messung (vgl. Abbildungen 4.45 und 4.55).

Tabelle 5.2 zeigt die Abweichungen der Berechnungsergebnisse zur erwarteten Steifigkeit. Die Abbildungen 5.5 und 5.6 veranschaulichen die Ergebnisse je nach Messpunkt. Darüber hinaus wurde der quadratische gemittelte Fehler der Schichten $E_{AC,T=20}$ und E_{LC} ermittelt, um den gesamten Fehler der jeweiligen Berechnung bewerten zu können. Die Schichten E_{UB} und E_{SUB} wurden hier nicht berücksichtigt, da aufgrund der niedrigen E-Moduli die Abweichungen prozentuell sehr hoch sind. Absolut gesehen beeinflusst das die übrigen Ergebnisse allerdings nicht.

Betrachtet man die Abweichungen der Asphaltstichtstifigkeiten sieht man, dass der Fehler in der Größenordnung von 30 % liegt. Mit Ausnahme der ELMOD-Berechnung des *Messpunktes 1*, hier konnte eine Abweichung von 0,41 % berechnet werden, die Zuverlässigkeit dieses Ergebnisses ist allerdings fraglich. Bei der Interpretation des Magerbetons werden die Rückrechnungen mit den Ergebnissen der Beschleunigungssensoren verglichen. Die Abweichungen der Rückrechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der Beschleunigungssensoren je Messpunkt sind sehr hoch, nur ELMOD konnte am *Messpunkt 2* eine akzeptable Abweichung von 18,56 % ermitteln.

Betrachtet man den quadratisch gemittelten Fehler in Tabelle 5.2 sieht man, dass bei *Messpunkt 2* eine bessere Übereinstimmung erzielt werden konnte als bei *Messpunkt 1* und dass ELMOD genauere Ergebnisse erzielen konnte als BAKFAA.

Tab. 5.2: Abweichungen der Berechnungen zur erwarteten Steifigkeit

		$E_{AC,T=20}$	E_{LC}	E_{UB}	E_{SUB}	RMS^2
<i>Messpunkt 1</i>	BAKFAA	27,74%	73,85%	-30,94%	-36,88%	55,78%
	ELMOD	-0,41%	57,43%	52,41%	-4,67%	40,61%
<i>Messpunkt 2</i>	BAKFAA	37,41%	47,80%	-31,47%	-93,07%	42,92%
	ELMOD	34,62%	18,56%	17,59%	-70,79%	27,78%

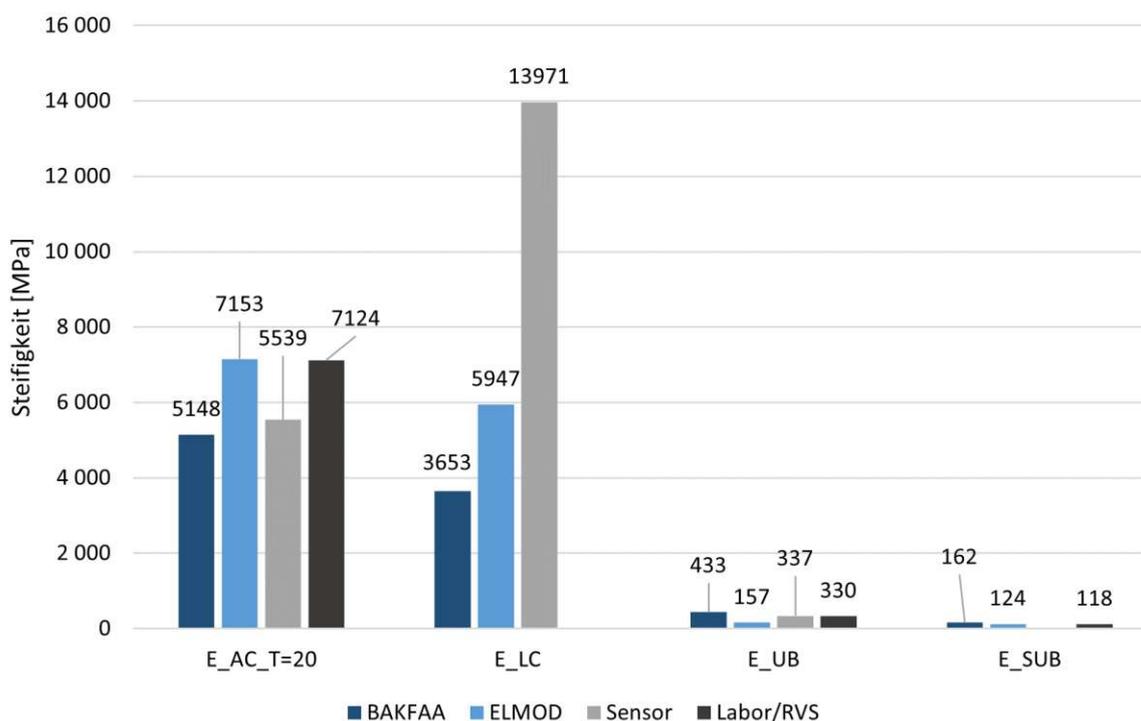


Abb. 5.5: Vergleich der rückgerechneten Steifigkeiten des 1. *Messpunktes*

²Quadratisches Mittel der Abweichungen exklusive E_{UB} und E_{SUB}

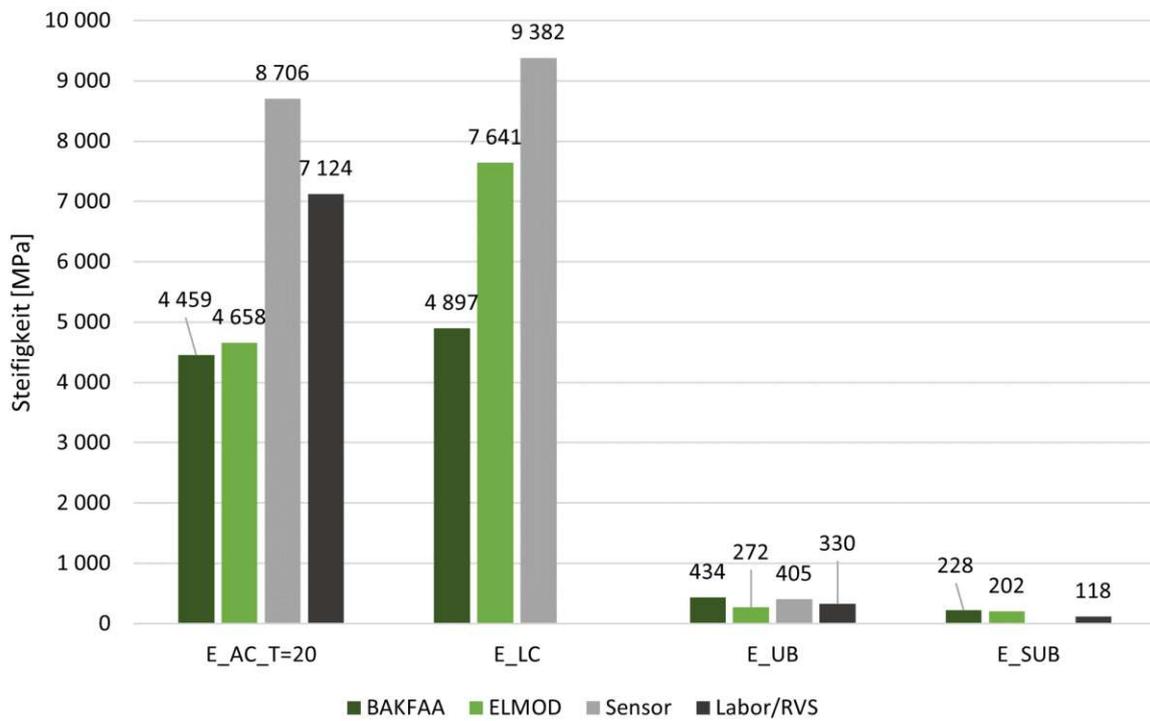


Abb. 5.6: Vergleich der rückgerechneten Steifigkeiten des 2. Messpunktes

Kapitel 6

Fazit

141 FWD-Messungen wurden auf der A10 innerhalb eines Jahres während aller vier Jahreszeiten durchgeführt. So konnten unterschiedlichste Temperaturprofile untersucht werden. Bei der Feldmessstelle auf der A3 wurden 110 Messungen (55 pro Messpunkt) durchgeführt. Eine Betrachtung über einen längeren Zeitraum, um die Anzahl an Messungen zu erhöhen, ist anzustreben. Ebenfalls wünschenswert sind Messungen zu Zeitpunkten mit unterschiedlichen Temperaturprofilen, um Aussagen über die Berechnungsunterschiede treffen zu können.

Unabhängig von der Feldmessstelle, dem Straßenaufbau und den Eingangsparametern ist die Abweichung der rückgerechneten Deflektionsmulde von der gemessenen mit zunehmender Distanz zum Lastzentrum angestiegen. Verantwortlich für die Form der Deflektionsmulde ab dem sechsten Geophon ist der strukturelle Zustand des Untergrundes [14], beide Programme behandeln diesen unterschiedlich. Die lineare Berechnung des Untergrundes von BAKFAA und die damit einhergehende Ungenauigkeit führen zu maximalen Abweichungen von 30 % (vgl. Abbildung 4.53 und 4.25). ELMODs nichtlineare Berechnung des Untergrundes erlaubt geringere Differenzen, der maximale Fehler beträgt unter 20 % (vgl. Abbildung 4.15). Dies hat auch Auswirkungen auf den quadratisch gemittelten Fehler aller Geophone einer Messung. Dieser bewegt sich bei ELMOD (mit wenigen Ausnahmen) zwischen $2\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 4.17 und 4.45), während der Fehler bei BAKFAA stark schwankt und bis zu $14\ \mu\text{m}$ ansteigt (vgl. Abbildung 4.29 und 4.55).

Zusätzlich zur größeren Berechnungsungenauigkeit von BAKFAA mussten zahlreiche Rückrechnungen einzelner FWD-Messungen aus Plausibilitätsgründen von der Auswertung ausgenommen werden. Dies reduzierte die Anzahl bewertbarer Ergebnisse mancher Messtage drastisch. Vergleicht man die Standardabweichungen der rückgerechneten Schichtsteifigkeiten an der Feldmessstelle A3 (Tabellen 4.31 und 4.39) und an der Feldmessstelle A10 (Tabellen 4.11 und 4.19) sieht man, dass ELMOD durchwegs niedrige Abweichungen zwischen 3 % und 8 %, mit einzelnen größeren Abweichungen in Höhe von 12 %, 16 % und 22,5 %, ermittelte. Währenddessen beträgt BAKFAAs niedrigste Standardabweichung 9,4 % und vor allem die Berechnungen der A10 sind starken Schwankungen unterlegen.

Ebensolche Berechnungsungenauigkeit weist das Programm BAKFAA bei den Rückrechnungsergebnissen auf. Die prozentuelle Abweichung zu den erwarteten Schichtsteifigkeiten ist quadratisch gemittelt im besten Fall (A10, *5lay_unfixed*) nur knapp unter 40 % (vgl. Tabelle 5.2 und 5.1). Die Magerbetonschicht der A3 (Abbildung 4.57) und die zementstabilisierte Tragschicht der A10 (Abbildung 4.20) konnte nicht plausibel berechnet werden. Mittels ELMOD hingegen gelingt es, die quadratisch gemittelten prozentuellen Abweichungen zu den erwarteten Schichtsteifigkeiten zwischen 19 % und 27 % zu berechnen. Mit Ausnahme der Berechnungsvariante *4lay_unfixed* der A10 (Tabelle 5.1) und am *Messpunkt 1* der A3 (Tabelle 5.2). Hier gelang keine akurate Berechnung des Magerbetons bzw. der Zementstabilisierung. Dies hatte hohe Abweichungen von der Erwartungshaltung zur Folge.

Ziel dieser Arbeit war die Analyse der Zuverlässigkeit dieser beiden Programme. Nach der Auswertung von 251 Messungen an zwei eigens dafür installierten Feldmessstellen kann gesagt werden, dass mit ELMOD Schichtsteifigkeiten mit höherer Genauigkeit und Konstanz rückgerechnet

werden können als mit BAKFAA. Große Schwankungen zwischen direkt aufeinanderfolgender Messungen, unplausible Ergebnisse sowie die schwierige Handhabung des Programmes sind negative Merkmale von BAKFAA. Positiv zu nennen ist die kostenfreie Nutzbarkeit und mit Fachwissen und Erfahrung in der Thematik der Steifigkeitsanalyse aus FWD-Messung können die Rückrechnungsergebnisse dennoch Anwendung finden. Denn auch die Anwendung von ELMOD liefert keine eindeutig richtigen Ergebnisse, auch hier ist Fachwissen zur Plausibilitätskontrolle erforderlich.

Literatur

- [1] S. Baltzer und J. M. Jansen. „Temperature Correction of asphalt-moduli for FWD-Measurements“. In: (17.–21. Juli 1994). Fourth International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Minneapolis, Minnesota, USA.
- [2] H. Beckedahl, H. Hürtgen und E. Straube. *Begleitende Forschung zur Einführung des Falling Weight Deflectometer (FWD) in der Bundesrepublik Deutschland*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 733. Deutschland: Bundesministerium für Verkehr, 1996.
- [3] J. Boussinesq. *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques: principalement au calcul des déformations et des pressions que produisent, dans ces solides, des efforts quelconques exercés sur une petite partie de leur surface ou de leur intérieur: mémoire suivi de notes étendues sur divers points de physique, mathématique et d'analyse*. Bd. 4. Gauthier-Villars, 1885.
- [4] D. M. Burmister. „The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I“. In: *Journal of Applied Physics* 16.2 (1945), S. 89–94. DOI: 10.1063/1.1707558. eprint: <https://doi.org/10.1063/1.1707558>. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1707558>.
- [5] M. Cickovic und J. Bald. „Rückrechnung der charakteristischen mechanischen Parameter von Verkehrsbefestigungen aus FWD-Messungen“. In: *Strasse und Autobahn* 68.12 (2017).
- [6] „COST 336 – Falling Weight Deflectometer“. In: (1998).
- [7] *Dynatest ELMOD 6 Software Manual*. Denmark, 2019. URL: [dynatest.com/elmod](https://www.dynatest.com/elmod).
- [8] J. Eisenmann und G. Leykauf. *Betonfahrbahnen*. Berlin: John Wiley & Sons, 2003. ISBN: 3-433-01341-1.
- [9] M. Fuchs. *Fallgewichtsdeflektionsmessung zur Tragfähigkeitsbestimmung (Endbericht COST 336)*. Straßenforschung, Heft 511. Wien, Österreich: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 1995.
- [10] B. Grätz und W. Durth. *Überprüfung praktischer Methoden zur Messung der Tragfähigkeit und Einschätzung der Restnutzungsdauer, insbesondere für Straßen auf dem Gebiet der neuen Bundesländer*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 723. Deutschland: Bundesministerium für Verkehr, 1995.
- [11] A. Großmann. „Bewertung des Tragverhaltens von Betonfahrbahnen basierend auf Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer“. In: *Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe* 52 (2003).
- [12] C. Hellmich, J. Füssl, G. Kandler und T. Kiefer. *Finite Elemente Methoden*. Skriptum. Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen der Technischen Universität Wien, 2017. URL: imws.tuwien.ac.at.
- [13] S. Hofbauer. „Gegenüberstellung von Indikatoren zur Bewertung der Tragfähigkeit bituminös gebundener Straßen“. Bachelorarbeit. Technische Universität Wien, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, 2021.
- [14] S. Jendia. *Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen*. ISE, Heft 45. Karlsruhe, Deutschland: Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, 1995.

- [15] K. Landerl. „Standardisierung der Durchführung und Auswertung von Messungen mit dem Fallgewichtsdeflektometer (FWD)“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, 2008.
- [16] N. Odemark. *Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin*. Statens Väginstitut, 1949.
- [17] *ÖNORM EN 12697-26:2020-03: Asphalt - Prüfverfahren Teil 26: Steifigkeit*. Brüssel: Europäische Norm, März 2020.
- [18] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling und B. P. Flannery. *Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing*. Cambridge university press, 2007.
- [19] J. M. Roesset und K.-Y. Shao. „Dynamic interpretation of dynaflect and falling weight deflectometer tests“. In: *Transportation Research Record* 1022 (1985), S. 7–16.
- [20] *RVS 03.06.63: Oberbaubemessung*. Wien: Forschungsgesellschaft Straße- Schiene-Verkehr (FSV), 2016.
- [21] *RVS 03.06.68: Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen*. Wien: Forschungsgesellschaft Straße- Schiene-Verkehr (FSV), 2018.
- [22] *RVS 11.06.72: Tragfähigkeitsmessungen mit dem Fallgewichtsdeflektometer*. Wien: Forschungsgesellschaft Straße- Schiene-Verkehr (FSV), 2018.
- [23] Y. Seo und J.-H. Lee. „Short- and Long-Term Evaluation of Asphalt Concrete Strain Gauge Installation Methods Applied to the KHCTR“. In: *Journal of Transportation Engineering* 138.6 (2012), S. 690–699. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000377>.
- [24] R. Tarefder und M. Ahmed. „Consistency and accuracy of selected FWD backcalculation software for computing layer modulus of airport pavements“. In: *International Journal of Geotechnical Engineering* 7.1 (2013), S. 21–35.
- [25] H. Westergaard. *Theory of Elasticity and Plasticity*. Harvard University Press, 1952. ISBN: 9780674436923. DOI: [doi:10.4159/harvard.9780674436923](https://doi.org/10.4159/harvard.9780674436923). URL: <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674436923>.

Abkürzungen

4PB-Pr Vierpunkt-Biegeprüfung

4lay_fixed 4 Schichten, fixierte Asphalttschicht

4lay_unfixed 4 Schichten, nicht fixierte Asphalttschicht

5lay_fixed 5 Schichten, fixierte Asphalttschicht

5lay_unfixed 5 Schichten, nicht fixierte Asphalttschicht

AC Asphalt (Asphalt Concrete)

BAKFAA Backcalculation Software by the Federal Aviation Administration

CB Zementstabilisierte Tragschicht (Cement-Bound Layer)

E-Modul/E Elastizitätsmodul

FAA Federal Aviation Administration

FEM Finite Elemente Methode

FMS Feldmessstelle

FWD Fallgewichtsdeflektometer

FWD-Messung Fallgewichtsdeflektometermessung

LC Magerbeton (Lean Concrete)

LET Mehrschichtentheorie (Linear Elastic Theory)

MET Methode der äquivalenten Schichtdicke (Method of Equivalent Thickness)

PCC Beton (Plain Cement Concrete)

PMS Pavement Management System

SUB Untergrund (Subgrade)

UB Ungebundene untere Tragschicht (Unbound Layer)

Anhang A

Daten

A.1 ELMOD A3

- A3.1: Juli 2021

Tab. A.1: ELMOD: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.1 im Juli 2021

Messpunkt 1	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	7 000,00	10 000,00	400,00	200,00	MPa
	thickness	170,00	300,00	230,00	-	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	2 083,26	6 727,04	176,78	98,74	MPa
	STAB	97,70	371,47	47,91	2,77	MPa
	STAB%	4,69%	5,52%	27,10%	2,81%	
Messpunkt 2	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	7 000,00	10 000,00	400,00	200,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	1 373,62	7 034,84	230,06	158,46	MPa
	STAB	203,60	611,33	71,25	23,92	MPa
	STAB%	14,82%	8,69%	30,97%	15,10%	

- A3.2: April

Tab. A.2: ELMOD: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.2 im April

Messpunkt 1	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	7 000,00	10 000,00	400,00	200,00	MPa
	thickness	170,00	300,00	230,00	-	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	13 119,23	5 235,78	140,25	130,09	MPa
	STAB	1 359,95	409,88	9,01	7,45	MPa
	STAB%	10,37%	7,83%	6,42%	5,73%	
Messpunkt 2	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	7 000,00	10 000,00	400,00	200,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	7 819,74	9 723,48	263,33	230,93	MPa
	STAB	243,43	309,40	19,71	12,00	MPa
	STAB%	3,11%	3,18%	7,49%	5,20%	

- A3.3: Mai

Tab. A.3: ELMOD: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.3 im Mai

Messpunkt 1	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	7 000,00	10 000,00	400,00	200,00	MPa
	thickness	170,00	300,00	230,00	-	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	7 016,97	6 870,35	130,45	115,09	MPa
	STAB	377,22	335,05	7,08	3,20	MPa
	STAB%	5,38%	4,88%	5,43%	2,78%	
Messpunkt 2	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	30 000,00	13 325,00	6 000,00	200,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	5 582,29	8 867,01	229,60	208,92	MPa
	STAB	109,76	234,95	17,29	8,46	MPa
	STAB%	1,97%	2,65%	7,53%	4,05%	

- A3.4: Juli

Tab. A.4: ELMOD: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.4 im Juli

Messpunkt 1	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	7 000,00	10 000,00	400,00	200,00	MPa
	thickness	170,00	300,00	230,00	-	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	5 179,17	5 427,28	166,18	135,22	MPa
	STAB	408,29	118,10	17,69	5,51	MPa
	STAB%	7,88%	2,18%	10,64%	4,07%	
Messpunkt 2	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	30 000,00	13 325,00	6 000,00	200,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	2 871,90	6 351,73	294,98	201,61	MPa
	STAB	430,56	424,17	65,10	14,04	MPa
	STAB%	14,99%	6,68%	22,07%	6,96%	

- A3.5: August

Tab. A.5: ELMOD: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.5 im August

Messpunkt 1	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	7 000,00	10 000,00	400,00	200,00	MPa
	thickness	170,00	300,00	230,00	-	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	4 339,90	5 476,02	172,55	138,42	MPa
	STAB	148,20	93,81	10,47	6,13	MPa
	STAB%	3,41%	1,71%	6,07%	4,43%	
Messpunkt 2	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	30 000,00	13 325,00	6 000,00	200,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	
Output	MW	2 980,56	6 226,11	343,40	207,77	MPa
	STAB	162,32	291,77	38,82	7,11	MPa
	STAB%	5,45%	4,69%	11,30%	3,42%	

A.2 BAKFAA A3

- A3.1: Juli 2021

Tab. A.6: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.1 im Juli 2021

Messpunkt 1	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness	0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu	0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW	3 044,83	2 902,83	504,17	177,33	MPa
	STAB	191,73	99,62	64,67	2,56	MPa
	STAB%	6,30%	3,43%	12,83%	1,44%	
Messpunkt 2	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness	0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu	0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW	2 352,67	2 358,33	859,67	259,00	MPa
	STAB	777,16	1 119,60	155,59	6,68	MPa
	STAB%	33,03%	47,47%	18,10%	2,58%	

- A3.2: April

Tab. A.7: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.2 im April

Messpunkt 1		Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed		2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness		0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu		0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW		4 099,50	7 237,17	910,00	186,33	MPa
	STAB		183,15	667,09	72,91	1,89	MPa
	STAB%		4,47%	9,22%	8,01%	1,01%	
Messpunkt 2		Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed		2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness		0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu		0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW		5 840,83	9 571,17	629,58	336,33	MPa
	STAB		1 315,45	1 573,80	559,30	83,16	MPa
	STAB%		22,52%	16,44%	88,84%	24,73%	

- A3.3: Mai

Tab. A.8: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.3 im Mai

Messpunkt 1		Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed		2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness		0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu		0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW		3 719,55	6 056,18	737,73	180,00	MPa
	STAB		121,78	385,10	42,64	3,05	MPa
	STAB%		3,27%	6,36%	5,78%	1,69%	
Messpunkt 2		Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed		2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness		0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu		0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW		4 558,08	7 240,75	944,92	264,08	MPa
	STAB		1 277,94	444,31	273,81	47,96	MPa
	STAB%		28,04%	6,14%	28,98%	18,16%	

- A3.4: Juli

Tab. A.9: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.4 im Juli

Messpunkt 1	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness	0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu	0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW	4 220,63	3 747,50	744,63	178,88	MPa
	STAB	1 875,05	1 336,76	100,98	3,26	MPa
	STAB%	44,43%	35,67%	13,56%	1,82%	
Messpunkt 2	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness	0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu	0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW	2 887,42	7 119,17	312,08	353,33	MPa
	STAB	433,47	2 295,02	390,70	66,51	MPa
	STAB%	15,01%	32,24%	125,19%	18,82%	

- A3.5: August

Tab. A.10: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A3.5 im August

Messpunkt 1	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness	0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu	0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW	4 399,17	5 629,75	131,92	408,08	MPa
	STAB	1 059,20	1 405,57	249,07	172,68	MPa
	STAB%	24,08%	24,97%	188,81%	42,31%	
Messpunkt 2	Parameter	AC	LC	UB	SUB	
Input	seed	2 755,00	3 445,00	515,00	140,00	MPa
	thickness	0,17	0,30	0,23	-	mm
	nu	0,30	0,20	0,35	0,35	
Output	MW	2 829,71	7 990,64	294,36	382,00	MPa
	STAB	420,48	3 061,91	381,66	103,32	MPa
	STAB%	14,86%	38,32%	129,66%	27,05%	

A.3 ELMOD A10

- A10.2: März

Tab. A.11: Elmod: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.2 im März

5lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	300	300	MPa
	lower limit	15 000	5000	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	12 000	6 000	200	200	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	19 946,96	8 612,71	6 433,96	231,11	220,14	MPa
	STAB	2 078,65	1 102,00	841,82	4,92	5,97	MPa
	STAB%	10,42%	12,80%	13,08%	2,13%	2,71%	
4lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	300		MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100		MPa
	seed	30 000	12 000	6 000	200		MPa
	thickness	270	80	180	320		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	17 760,89	10 033,25	5 015,79	189,07		MPa
	STAB	1 126,19	18,39	18,85	11,35		MPa
	STAB%	6,34%	0,18%	0,38%	6,00%		
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 5,64 °C	T_5 6,63 °C	\bar{T} 6,13 °C	κ 0,5629	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	13	E_{AC} 325 MPa
5lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	-	15 000	300	300	MPa
	lower limit	15 000	-	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	13 325	6 000	200	200	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	19 793,50	13 325,00	6 608,79	228,57	219,04	MPa
	STAB	2 235,56	0,00	733,10	6,54	6,26	MPa
	STAB%	11,29%	0,00%	11,09%	2,86%	2,86%	
4lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	-	-	300		MPa
	lower limit	15 000	-	-	100		MPa
	seed	30 000	13 325	10 000	200		MPa
	thickness	270	80	180	320		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	15 015,29	13 325,00	10 000,00	184,32		MPa
	STAB	24,82	0,00	0,00	7,42		MPa
	STAB%	0,17%	0,00%	0,00%	4,03%		

- A10.3: April

Tab. A.12: Elmod: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.3 im April

5lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	12 000	6 000	200	200	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	22 061,72	7 684,92	6 678,68	318,08	303,44	MPa
	STAB	976,97	690,95	392,23	23,04	27,84	MPa
	STAB%	4,43%	8,99%	5,87%	7,24%	9,17%	
4lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	500		MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100		MPa
	seed	30 000	12 000	6 000	400		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	22 443,72	5 351,96	5 027,12	330,48		MPa
	STAB	1 173,85	585,03	28,16	18,43		MPa
	STAB%	5,23%	10,93%	0,56%	5,58%		
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 10,88 °C	T_5 10,36 °C	\bar{T} 10,62 °C	κ 0,6779	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 11 064 MPa	
5lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	-	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	-	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	11 064	6 000	200	200	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	21 124,20	11 064,00	6 694,84	318,16	305,16	MPa
	STAB	579,04	0,00	428,49	22,55	27,63	MPa
	STAB%	2,74%	0,00%	6,40%	7,09%	9,05%	
4lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	-	15 000	500		MPa
	lower limit	15 000	-	5 000	100		MPa
	seed	30 000	11 064	6 000	200		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	27 528,32	11 064,00	2 415,48	270,48		MPa
	STAB	3 075,18	0,00	679,13	28,89		MPa
	STAB%	11,17%	0,00%	28,12%	10,68%		

- A10.4: Juni

Tab. A.13: Elmod: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.4 im Juni

5lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	12 000	6 000	200	200	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	24 939,46	8 257,11	7 103,39	385,21	378,75	MPa
	STAB	1 748,06	641,40	549,22	10,05	14,58	MPa
	STAB%	7,01%	7,77%	7,73%	2,61%	3,85%	
4lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	500		MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100		MPa
	seed	30 000	12 000	6 000	400		MPa
	thickness	270	80	180	-		MM
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	36 680,04	6 208,76	2 031,84	353,48		MPa
	STAB	3 414,89	2 375,68	747,31	24,21		MPa
	STAB%	9,31%	38,26%	36,78%	6,85%		
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 19,81 °C	T_5 19,70 °C	\bar{T} 19,76 °C	κ 0,9899	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 7576 MPa	
5lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	-	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	-	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	7 576	6 000	200	200	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	25 763,04	7 576,00	6 728,46	380,89	372,36	MPa
	STAB	1 313,97	0,00	270,42	14,17	18,97	MPa
	STAB%	5,10%	0,00%	4,02%	3,72%	5,09%	
4lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	-	15 000	500		MPa
	lower limit	15 000	-	5 000	100		MPa
	seed	30 000	7 576	6 000	200		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	30 663,64	7 576,00	3 392,24	353,36		MPa
	STAB	3 451,95	0,00	997,18	35,88		MPa
	STAB%	11,26%	0,00%	29,40%	10,15%		

- A10.5: Juli

Tab. A.14: Elmod: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.5 im Juli

5lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	6 839	10 000	200	200	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	36 177,93	7 537,93	6 526,53	421,53	420,00	MPa
	STAB	2 747,16	529,74	448,00	6,17	8,32	MPa
	STAB%	7,59%	7,03%	6,86%	1,46%	1,98%	
4lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	500		MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100		MPa
	seed	30 000	6 839	6 000	200		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	42 800,53	5 682,00	3 870,07	418,00		MPa
	STAB	8 636,44	1 263,11	1 323,00	9,47		MPa
	STAB%	20,18%	22,23%	34,19%	2,27%		
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 22,39 °C	T_5 22,07 °C	\bar{T} 22,23 °C	κ 1,0967	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 6839 MPa	
5lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	-	-	500	500	MPa
	lower limit	15 000	-	-	100	100	MPa
	seed	30 000	6 839	10 000	400	200	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	24 819,67	6 840,00	10 000,00	406,20	403,47	MPa
	STAB	2 057,28	0,00	0,00	10,39	12,61	MPa
	STAB%	8,29%	0,00%	0,00%	2,56%	3,12%	MPa
4lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	-	-	500		MPa
	lower limit	15 000	-	-	100		MPa
	seed	30 000	6 839	10 000	200		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	23 549,07	6 840,00	10 000,00	392,73		MPa
	STAB	1 725,39	0,00	0,00	24,60		MPa
	STAB%	7,33%	0,00%	0,00%	6,27%		

- A10.6: September

Tab. A.15: Elmod: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.6 im September

5lay_unfixed		Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit		40 000	15 000	15 000	500	500	MPa
	lower limit		15 000	5 000	5 000	100	100	MPa
	seed		30 000	8 226	10 000	400	200	MPa
	thickness		270	80	180	320	-	mm
	ν		0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW		34 931,00	8 625,27	7 919,47	448,27	451,33	MPa
	STAB		3 305,41	669,61	669,50	11,29	19,12	MPa
	STAB%		9,46%	7,76%	8,45%	2,52%	4,24%	
4lay_unfixed		Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit		40 000	15 000	15 000	500		MPa
	lower limit		15 000	5 000	5 000	100		MPa
	seed		30 000	8 226	6 000	400		MPa
	thickness		270	80	180	-		mm
	ν		0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW		40 855,67	6 587,80	4 585,60	445,80		MPa
	STAB		6 423,98	1 071,38	1 432,12	20,78		MPa
	STAB%		15,72%	16,26%	31,23%	4,66%		
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 18,24 °C	T_5 17,30 °C	\bar{T} 17,77 °C	κ 0,9117	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 8226 MPa		
5lay_fixed		Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit		40 000	-	-	500	500	MPa
	lower limit		15 000	-	-	100	100	MPa
	seed		30 000	8 226	10 000	400	200	MPa
	thickness		270	80	180	320	-	mm
	ν		0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW		29 021,13	8 226,00	10 000,00	439,07	436,60	MPa
	STAB		2 203,59	0,00	0,00	10,83	11,38	MPa
	STAB%		7,59%	0,00%	0,00%	2,47%	2,61%	
4lay_fixed		Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit		40 000	-	-	500		MPa
	lower limit		15 000	-	-	100		MPa
	seed		30 000	8 226	10 000	400		MPa
	thickness		270	80	180	-		mm
	ν		0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW		27 035,80	8 226,00	10 000,00	426,40		MPa
	STAB		2 114,21	0,00	0,00	16,66		MPa
	STAB%		7,82%	0,00%	0,00%	3,91%		

- A10.7: Oktober

Tab. A.16: Elmod: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.7 im Oktober

5lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	11 687	10 000	400	400	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	33 334,28	10 627,28	8 425,56	462,44	449,06	MPa
	STAB	2 115,35	1 305,87	638,82	21,36	24,01	MPa
	STAB%	6,35%	12,29%	7,58%	4,62%	5,35%	MPa
4lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	15 000	15 000	500		MPa
	lower limit	15 000	5 000	5 000	100		MPa
	seed	30 000	11 687	6 000	400		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	46 256,89	7 522,28	3 299,44	433,50		MPa
	STAB	5 978,15	2 910,35	1 657,59	33,89		MPa
	STAB%	12,92%	38,69%	50,24%	7,82%		
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 9,64 °C	T_5 8,96 °C	\bar{T} 9,30 °C	κ 0,6417	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	11	E_{AC} 687 MPa
5lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	-	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	-	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	11 687	10 000	400	400	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	32 586,94	11 687,00	8 563,67	461,50	453,17	MPa
	STAB	1 472,18	0,00	917,45	18,22	21,68	MPa
	STAB%	4,52%	0,00%	10,71%	3,95%	4,78%	
4lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	-	-	500		MPa
	lower limit	15 000	-	-	100		MPa
	seed	30 000	11 687	10 000	400		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	29 076,56	11 687,00	10 000,00	437,89		MPa
	STAB	1 726,00	0,00	0,00	25,21		MPa
	STAB%	5,94%	0,00%	0,00%	5,76%		

- A10.8: Jänner

Tab. A.17: Elmod: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.8 im Jänner

5lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	20 000	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	10 000	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	17 258	10 000	400	400	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	32 635,92	15 754,00	8 568,08	449,00	436,25	MPa
	STAB	1 660,08	1 113,07	666,17	15,94	18,50	MPa
	STAB%	5,09%	7,07%	7,78%	3,55%	4,24%	
4lay_unfixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	20 000	15 000	500		MPa
	lower limit	15 000	10 000	5 000	100		MPa
	seed	30 000	17 258	6 000	400		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	47 208,25	10 495,67	2 993,00	411,42		MPa
	STAB	4 387,15	2 850,21	829,16	16,83		MPa
	STAB%	9,29%	27,16%	27,70%	4,09%		
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 0,1 °C	T_5 -0,31 °C	\bar{T} -0,11 °C	κ 0,4346	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 17 258 MPa	
5lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	upper limit	40 000	-	15 000	500	500	MPa
	lower limit	15 000	-	5 000	100	100	MPa
	seed	30 000	17 258	10 000	400	400	MPa
	thickness	270	80	180	320	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35	0,35	
Output	MW	32 265,92	17 258,00	8 545,83	448,83	435,00	MPa
	STAB	1 420,24	0,00	851,84	12,92	18,38	MPa
	STAB%	4,40%	0,00%	9,97%	2,88%	4,23%	
4lay_fixed	Parameter	PCC	AC	CB	UB/SUB		
Input	upper limit	40 000	-	-	500		MPa
	lower limit	15 000	-	-	100		MPa
	seed	30 000	17 258	10 000	400		MPa
	thickness	270	80	180	-		mm
	ν	0,15	0,35	0,2	0,35		
Output	MW	29 020,08	17 257,00	10 000,00	413,33		MPa
	STAB	1 016,48	0,00	0,00	28,83		MPa
	STAB%	3,50%	0,00%	0,00%	6,98%		

A.4 BAKFAA A10

- A10.2: März

Tab. A.18: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.2 im März

	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	seed	27 579,00	2 758,00	3 447,00	517,00	138,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,20	0,35	0,35	
5lay_unfixed							
Output	MW	17 400,68	1 453,50	5 070,27	1 170,68	251,41	MPa
	STAB	1 492,24	1 224,55	1 959,49	263,86	61,95	MPa
	STAB%	8,58%	84,25%	38,65%	22,54%	24,64%	
4lay_unfixed							
Output	MW	25 417,72	2 254,68	2 126,48	295,72	-	MPa
	STAB	1 997,65	153,73	161,17	4,82	-	MPa
	STAB%	7,86%	6,82%	7,58%	1,63%	-	
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 5,64 °C	T_5 6,63 °C	\bar{T} 6,13 °C	κ 0,5629	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 13 325 MPa	
5lay_fixed							
Output	MW	28 066,54	13 325,00	350,50	1 419,08	426,96	MPa
	STAB	9 238,54	0,00	375,18	1 099,05	153,73	MPa
	STAB%	32,92%	0,00%	107,04%	77,45%	36,01%	
4lay_fixed							
Output	MW	19 051,74	13 325,00	2 159,65	289,52	-	MPa
	STAB	1 309,85	0,00	55,77	4,02	-	MPa
	STAB%	6,88%	0,00%	2,58%	1,39%	-	

- A10.3: April

Tab. A.19: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.3 im April

	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	seed	27 579,00	2 758,00	3 447,00	517,00	138,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,20	0,35	0,35	
5lay_unfixed							
Output	MW	30 304,06	3 281,94	7 372,19	1 100,00	296,00	MPa
	STAB	10 119,14	1 158,52	731,12	123,31	23,37	MPa
	STAB%	33,39%	35,30%	9,92%	11,21%	7,90%	
4lay_unfixed							
Output	MW	50 274,83	2 518,96	535,30	539,52	-	MPa
	STAB	10 550,98	1 262,08	1 021,48	100,77	-	MPa
	STAB%	20,99%	50,10%	190,82%	18,68%	-	
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 10,88 °C	T_5 10,36 °C	\bar{T} 10,62 °C	κ 0,6779	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 11 064 MPa	
5lay_fixed							
Output	MW	38 351,70	11 064,00	864,13	950,22	484,83	MPa
	STAB	11 861,81	0,00	1 226,91	490,27	140,26	MPa
	STAB%	30,93%	0,00%	141,98%	51,60%	28,93%	
4lay_fixed							
Output	MW	23 292,00	11 064,00	2 634,30	369,78	-	MPa
	STAB	284,96	0,00	24,73	5,97	-	MPa
	STAB%	1,22%	0,00%	0,94%	1,61%	-	

- A10.4: Juni

Tab. A.20: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.4 im Juni

	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	seed	27 579,00	2 758,00	3 447,00	517,00	138,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,20	0,35	0,35	
5lay_unfixed							
Output	MW	35 852,86	4 113,19	10 338,33	1 191,86	330,57	MPa
	STAB	11 984,26	1 028,79	2 293,11	166,63	41,28	MPa
	STAB%	33,43%	25,01%	22,18%	13,98%	12,49%	
4lay_unfixed							
Output	MW	40 261,44	3 054,44	2 255,20	447,88	-	MPa
	STAB	10 520,46	1 227,26	1 370,12	55,01	-	MPa
	STAB%	26,13%	40,18%	60,75%	12,28%	-	
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 19,81 °C	T_5 19,70 °C	\bar{T} 19,76 °C	κ 0,9899	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 7576 MPa	
5lay_fixed							
Output	MW	28 369,48	7 576,00	2 924,72	1 895,12	401,28	MPa
	STAB	15 242,65	0,00	1 875,23	541,99	93,09	MPa
	STAB%	53,73%	0,00%	64,12%	28,60%	23,20%	
4lay_fixed							
Output	MW	36 707,57	7 576,00	2 015,78	458,48	-	MPa
	STAB	11 083,76	0,00	1 513,22	57,04	-	MPa
	STAB%	30,19%	0,00%	75,07%	12,44%	-	

- A10.5: Juli

Tab. A.21: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.5 im Juli

	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	seed	27 579,00	2 758,00	3 447,00	517,00	138,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,20	0,35	0,35	
5lay_unfixed							
Output	MW	39 104,21	2 633,71	11 176,64	1 525,57	371,79	MPa
	STAB	5 590,47	2 041,01	1 198,45	271,87	26,22	MPa
	STAB%	14,30%	77,50%	10,72%	17,82%	7,05%	
4lay_unfixed							
Output	MW	58 029,14	2 946,93	1 638,00	470,79	-	MPa
	STAB	10 565,29	1 501,72	1 778,01	30,44	-	MPa
	STAB%	18,21%	50,96%	108,55%	6,46%	-	
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 22,39 °C	T_5 22,07 °C	\bar{T} 22,23 °C	κ 1,0967	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 6839 MPa	
5lay_fixed							
Output	MW	37 570,77	6 839,00	3 486,46	1 755,85	387,77	MPa
	STAB	11 530,87	0,00	1 746,46	606,84	45,87	MPa
	STAB%	30,69%	0,00%	50,09%	34,56%	11,83%	
4lay_fixed							
Output	MW	54 671,92	6 839,00	1 348,69	485,46	-	MPa
	STAB	13 226,30	0,00	1 497,34	50,09	-	MPa
	STAB%	24,19%	0,00%	111,02%	10,32%	-	

- A10.6: September

Tab. A.22: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.6 im September

	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	seed	27 579,00	2 758,00	3 447,00	517,00	138,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	-	mm
	ν	0,15	0,35	0,20	0,35	0,35	
5lay_unfixed							
Output	MW	40 416,08	5 258,92	7 491,17	1 052,58	418,00	MPa
	STAB	6 897,27	2 238,37	3 841,37	448,26	55,35	MPa
	STAB%	17,07%	42,56%	51,28%	42,59%	13,24%	
4lay_unfixed							
Output	MW	55 485,86	3 783,14	2 071,86	482,93	-	MPa
	STAB	10 646,35	826,52	1 745,65	21,36	-	MPa
	STAB%	19,19%	21,85%	84,26%	4,42%	-	
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 18,24 °C	T_5 17,30 °C	\bar{T} 17,77 °C	κ 0,9117	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 8226 MPa	
5lay_fixed							
Output	MW	55 037,93	8 226,00	607,86	2 503,93	493,29	MPa
	STAB	15 753,23	0,00	680,30	930,82	61,48	MPa
	STAB%	28,62%	0,00%	111,92%	37,17%	12,46%	
4lay_fixed							
Output	MW	60 662,58	8 226,00	409,83	508,33	-	MPa
	STAB	6 302,01	0,00	148,91	19,78	-	MPa
	STAB%	10,39%	0,00%	36,33%	3,89%	-	

- A10.7: Oktober

Tab. A.23: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.7 im Oktober

	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	seed	27 579,00	2 758,00	3 447,00	517,00	138,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	-	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	0,35	
5lay_unfixed							
Output	MW	31 479,25	3 192,94	9 528,25	1 467,69	432,06	MPa
	STAB	6 146,29	985,26	1 067,50	104,60	23,86	MPa
	STAB%	19,52%	30,86%	11,20%	7,13%	5,52%	
4lay_unfixed							
Output	MW	68 339,63	3 820,63	1 786,63	608,06	-	MPa
	STAB	12 871,44	2 523,06	2 320,90	106,54	-	MPa
	STAB%	18,83%	66,04%	129,90%	17,52%	-	
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 9,64 °C	T_5 8,96 °C	\bar{T} 9,30 °C	κ 0,6417	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 11 687 MPa	
5lay_fixed							
Output	MW	27 266,05	11 687,00	3 291,84	2 207,26	436,89	MPa
	STAB	1 878,88	0,00	1 195,16	395,47	11,80	MPa
	STAB%	6,89%	0,00%	36,31%	17,92%	2,70%	
4lay_fixed							
Output	MW	63 984,10	11 687,00	745,35	691,30	-	MPa
	STAB	12 349,09	0,00	1 448,30	162,72	-	MPa
	STAB%	19,30%	0,00%	194,31%	23,54%	-	

- A10.8: Jänner

Tab. A.24: BAKFAA: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Messung A10.8 im Jänner

	Parameter	PCC	AC	CB	UB	SUB	
Input	seed	27 579,00	2 758,00	3 447,00	517,00	138,00	MPa
	thickness	270,00	80,00	180,00	320,00	-	mm
	nu	0,15	0,35	0,20	0,35	0,35	
5lay_unfixed							
Output	MW	30 503,64	3 601,91	8 699,55	1 395,45	441,64	MPa
	STAB	638,98	487,39	756,72	49,39	7,13	MPa
	STAB%	2,09%	13,53%	8,70%	3,54%	1,61%	
4lay_unfixed							
Output	MW	60 146,38	3 986,13	2 702,25	552,63	-	MPa
	STAB	19 370,65	1 721,62	2 530,01	58,56	-	MPa
	STAB%	32,21%	43,19%	93,63%	10,60%	-	
TK nach Gl. (4.21), (4.22)	T_4 0,1 °C	T_5 -0,31 °C	\bar{T} -0,11 °C	κ 0,4346	$E_{AC,T=20}$ 7500 MPa	E_{AC} 17 258 MPa	
5lay_fixed							
Output	MW	29 804,33	17 258,00	4 156,25	1 909,25	433,00	MPa
	STAB	8 767,10	0,00	1 116,45	371,02	19,57	MPa
	STAB%	29,42%	0,00%	26,86%	19,43%	4,52%	
4lay_fixed							
Output	MW	67 963,92	17 258,00	97,17	699,33	-	MPa
	STAB	2 735,20	0,00	14,32	31,43	-	MPa
	STAB%	4,02%	0,00%	14,73%	4,49%	-	