

Überprüfung der Praxisrelevanz des Prüfverfahrens Friction after Polishing (FAP-Verfahren)

FA 6.117

Forschungsstelle: ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH, Berlin

Bearbeiter: Rückert, P. / Dudenhöfer, B.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2021

1 Einleitung

Derzeit soll das Merkmal "Griffigkeit" bei der Konzeption von Baustoffgemischen für Fahrbahndeckschichten aus Asphalt und Beton über ein Mindestniveau des "polished stone value" (PSV) der Gesteinskörnung 8/10 für den gesamten Nutzungszeitraum sichergestellt werden. In Abhängigkeit von der Mischgutart und der zu erwartenden Beanspruchung werden für das Asphaltmischgut für Deckschichten Anforderungen an den rechnerischen PSV der groben Gesteinskörnung gestellt, ohne dabei zum Beispiel die Gesteinsart, die Anteile der einzelnen Korngruppen und das Größtkorn zu berücksichtigen. Somit wird, in Abhängigkeit von der Asphaltmischgutart und -sorte, in vielen Fällen ein großer Anteil des Gesteinskörnungsgemischs nicht berücksichtigt. Dies gilt insbesondere für den Anteil der feinen Gesteinskörnung (vergleiche Bild 1).

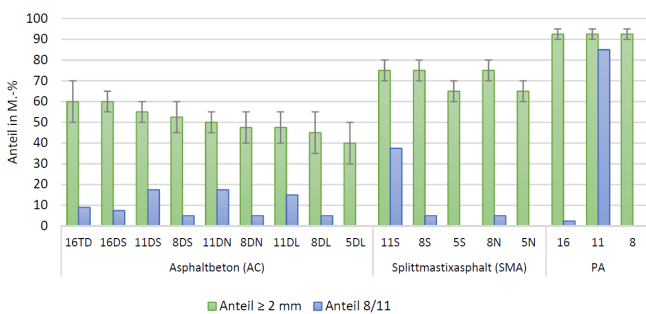


Bild 1: Grobe Gesteinskörnung zur Berechnung des PSV in den Mischgutarten/-sorten für Walzasphaltdeckschichten nach TL Asphalt-StB 07/13 (grüne Säulen) und Anteil der Prüfkörnung zur Untersuchung des PSV (blaue Säulen)

Diese Vorgehensweise ist nachgewiesenermaßen nicht schlüssig und führt zu Fehlbeurteilungen. Bereits aus wissenschaftlichen Untersuchungen der 1960er- und 1970er-Jahre ist bekannt, dass zwar ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand von Gesteinskörnungen und der Griffigkeit daraus hergestellter Straßendecken besteht, dieser aber nur zu belastbaren Prognoseergebnissen für die Griffigkeit führt, wenn das gesamte Gesteinskörnungsgemisch in diese Betrachtung einbezogen wird.

2 Problemstellung

Als übergeordnetes Ziel soll der Einfluss des PSV einer Gesteinskörnung, abhängig von der Gesteinsart und der Mischgutart, auf die Griffigkeitsentwicklung einer Asphaltdeckschicht

unter Polierbeanspruchung im Laborversuch FAP quantifiziert werden. In Hinblick auf eine Einführung möglicher nationaler Anforderungen an den FAP_{min} für Asphaltdeckschichtmischgut konnte die bisherige Praxis validiert werden.

3 Konzept der Untersuchungen

Insgesamt wurden sieben unterschiedliche Gesteine ausgewählt, die das gesamte Spektrum der Polierresistenz abbilden sollten. Von diesen Gesteinen wurden die in Asphaltdeckschichten verwendeten Lieferkörnungen beschafft und durch Voruntersuchungen die erwarteten Gesteinseigenschaften überprüft. Aus dieser Grundgesamtheit wurde dann die Auswahl der Gesteine für die Untersuchungen am Asphaltmischgut getroffen. In Bild 2 sind die Ergebnisse vor den Anforderungswerten der TL Asphalt-StB dargestellt.

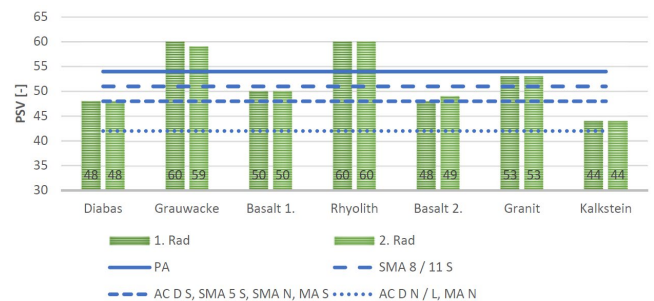


Bild 2: Zusammenfassende Darstellung des PSV der Gesteinskörnungen (Doppelbestimmung)

Anhand der Voruntersuchungen wurden vier Gesteine ausgewählt, welche die mögliche Spannweite des PSV darstellen.

Es wurde Asphaltmischgut unterschiedlicher Art und Sorte einheitlich aus den vier Gesteinen hergestellt. Ausgehend von den Rezepturen mit einheitlichen Gesteinen, wurden Korngruppen gänzlich oder nur teilweise durch andere Gesteine ersetzt, um gezielt Abstufungen des rechnerischen PSV abzusichern. Um den Einfluss von Größtkorn beziehungsweise der Texturtiefe zu validieren, wurden abgestufte Varianten mit einem Größtkorn von 8 und 5 mm untersucht. Weiterhin sollte der Einfluss der Mischgutart untersucht werden. Hierzu wurden Mischungen einer Asphaltbetonrezeptur, Splittmastixasphalt und eines offenporigen Asphalts hergestellt. Der gesamte Probenumfang umfasst 42 Varianten.

4 Zusammenfassung

4.1 Erwartungsbereiche für FAP-Werte unterschiedlicher Asphaltmischgutarten

Es ist festzustellen, dass die Kategorie FAP nach den DIN EN 13108 nicht das gesamte Spektrum des Bewertungshintergrunds abbildet. Bei Asphaltdeckschichten aus Splittmastixasphalt werden 60 und bei Asphaltbeton 35 % der mit einem rechnerisch ausreichendem PSV hergestellten Asphalte

bisher von den Kategorien ausgeschlossen. Es wäre daher zu empfehlen, die Spanne der DIN EN 13108 insgesamt und in den Kategorien zu vergrößern. Für Splittmastixasphalte wird hierfür eine untere Grenze von 0,14 und für Asphaltbetone von 0,18 FAP-Einheiten als praxisingerecht angesehen. Im Ergebnis der Untersuchungen werden 7 % der Splittmastixasphalte und 5 % der Asphaltbetone in einer untersten Kategorie (FAP_{min}) berücksichtigt, welche für die Praxis nicht von Interesse sein sollte. Es wird empfohlen, die Kategorien der europäischen Norm entsprechend anzupassen

4.2 Zusammenhang zwischen dem Reibbeiwert einer Asphaltoberfläche und dem rechnerischen Polierwert der verwendeten Gesteinskörnung

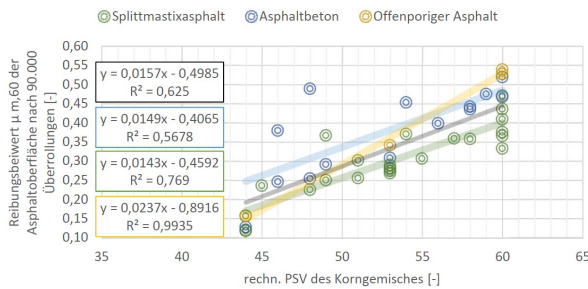


Bild 3: Zusammenhang zwischen Reibbeiwert der Asphaltoberfläche nach 90 000 Überrollungen zum rechnerischen PSV des Korngemischs

Die einfachste Beziehung der beiden Kennwerte kann über einen linearen Zusammenhang beziehungsweise eine lineare Regression hergestellt werden (vergleiche Bild 3). Insgesamt weist der Reibbeiwert der Asphaltoberfläche einen gleichen Trend auf, wie der rechnerische PSV der groben Gesteinsmischungen. Dabei steigt die Stärke des Zusammenhangs mit abnehmendem Anteil der feinen Gesteinskörnung von Asphaltbeton mit 57 auf 77 % bei Splittmastixasphalten auf 99 % bei offenporigen Asphalten.

Äquivalent zum rechnerischen PSV wurde ein rechnerischer PWS des Korngemischs bestimmt. Der rechnerische PWS beinhaltet jedoch nicht nur den Polierwert der groben Gesteinskörnung, sondern berücksichtigt auch den Polierwert der feinen Gesteinskörnung.

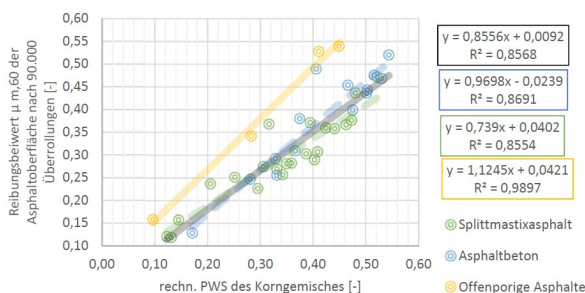


Bild 4: Zusammenhang zwischen Reibbeiwert der Asphaltoberfläche nach 90 000 Überrollungen zum rechnerischen Polierwert PWS inklusive der feinen Gesteinskörnung

Beim Vergleich der Zusammenhänge zwischen rechnerischem PSV und dem Reibbeiwert der jeweiligen Asphaltoberfläche (Bild 3) können folgende Unterschiede festgehalten werden:

- Zwischen den dichten Asphaltdeckschichten (Asphaltdeckschichten aus Splittmastixasphalt und Asphaltbeton) und den offenporigen Asphalten ist eine deutliche Spreizung im Niveau beim rechnerischen PWS erkennbar.
- Die Stärke des Zusammenhangs bei offenporigen Asphalten ist vergleichbar, was auf die Zusammensetzung der Mischgutsorte mit nur einer Korngruppe zurückzuführen ist.
- Bei Mischgutarten und -sorten, bestehend aus mehreren Korngruppen, ist der rechnerische PWS des Korngemischs dem rechnerischen PSV aufgrund der Stärke des Zusammenhangs vorzuziehen.

4.3 Einflussfaktoren auf den Reibbeiwert einer Asphaltoberfläche

Es konnte nach mathematisch-statistischem Ansatz nachgewiesen werden, dass der PSV der groben Gesteinskörnungen nach 270 000 Überrollungen im Mittel unabhängig von der Mischgutart und -sorte mit ca. 40 % einen hohen Einfluss auf den Reibbeiwert einer Asphaltoberfläche nimmt. Mit zunehmendem Feinkornanteil der Asphalte nimmt der Einfluss ab.

Dem gegenüber erhöht sich der Einfluss des Polierwiderstands der Gesteinskörnung auf den Reibbeiwert auf 55 %, wenn an Stelle des PSV der rechnerische PWS-Wert aller Kornfraktionen einer Gesteinsmischung herangezogen wird.

Neben dem Polierwiderstand der Gesteinskörnungen haben jedoch eine Reihe weiterer Faktoren einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Reibbeiwert einer Asphaltoberfläche nach Polierbeanspruchung. Neben weiteren Eigenschaften des Gesteins, zum Beispiel aus der Mineralogie, sind Texturmerkmale der Oberfläche, aber auch der Hohlraumgehalt des Asphalts von Bedeutung.

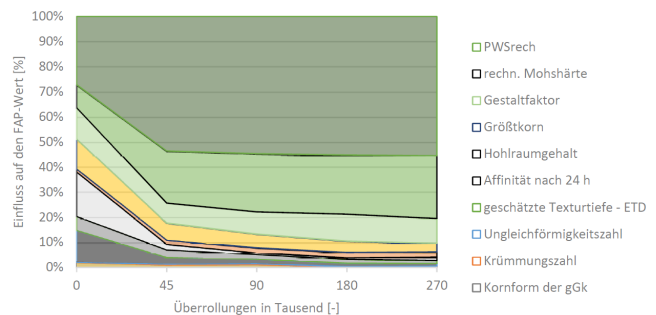


Bild 5: Einflüsse auf den Reibbeiwert einer Asphaltoberfläche in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen bei Berücksichtigung des rechnerischen PWS des Korngemischs

4.4 Empfehlung eines Bewertungshintergrunds für das FAP-Verfahren

Es konnte nachgewiesen werden, dass der Zusammenhang zwischen dem Polierwiderstand der Gesteinskörnungen und der Griffigkeit der Asphaltoberfläche nach Polieren noch verbessert werden kann, wenn neben einem Mindestniveau des FAP-Werts ein Kennwert für die Dauerhaftigkeit des Polierwiderstands als weiterer Faktor berücksichtigt wird. Über diese zweifaktorielle Beurteilung kann der Reibungsbeiwert äquivalent den Kategorien für den PSV gemäß der TL Asphalt-StB als Anforderungskriterium zielsicher festgelegt werden. Die empfohlenen Anforderungen wurden mit SKM-Messungen anderer Projekte validiert.

Das Bild 6 zeigt eine Empfehlung für einen Bewertungshintergrund auf Basis der Ergebnisse des Projekts. Je höher das Niveau des Dauerhaftigkeitsfaktors ($|N_{m,\Delta-0,10}|$) desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Asphaltdeckschicht ein gleichbleibendes Griffigkeitsniveau während des Beanspruchungszeitraums behält.

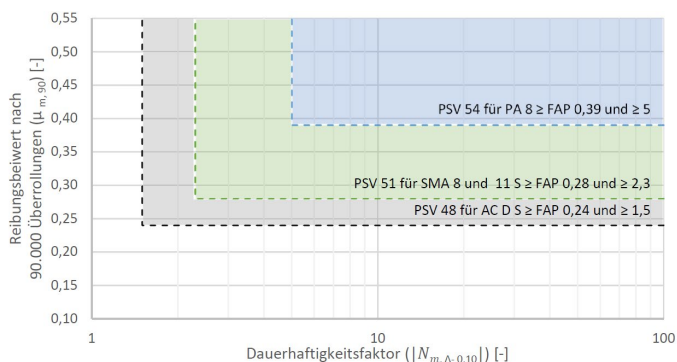


Bild 6: Empfohlener Bewertungshintergrund für das FAP-Verfahren auf Basis des rechnerischen PSV der Korngemische gemäß TL Asphalt-StB

5 Schlussfolgerungen

Die Griffigkeitsprognose mit dem FAP-Verfahren an Asphaltmischungen unterschiedlicher Art und Sorte hat gezeigt, dass die Abschätzung des Reibungsbeiwerts einer Asphaltoberfläche unter Berücksichtigung des rechnerischen PSV der groben Gesteinskörnung zu Fehleinschätzungen führt und Gesteine mit ausreichenden Eigenschaften von der Verwendung ausschließt. Dies ist unwirtschaftlich und führt zu einem unnötigen Verbrauch natürlicher Ressourcen. Die jahrzehntelang praktizierte Vorgehensweise hat den gravierenden Nachteil, dass die weiteren Einflussfaktoren, wie Größtkorn der Asphaltmischgutsorte und die Korngrößenabhängigkeit des Polierwerts der Gesteine, völlig unberücksichtigt bleiben. Das PSV-Kriterium ist auf einem Prinzip mit sehr hohem Sicherheitsfaktor begründet und führt dementsprechend zu einer unnötigen Ressourcenaus-schöpfung der Gesteine. Weiterhin werden primäre Einflussgrößen aus der Kornzusammensetzung der Asphalte und die Textur beziehungsweise der Hohlraumgehalt nicht berücksichtigt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass auch mit Gesteinsmischungen eine dauerhaft griffige Oberfläche erzeugt werden kann, welche nach dem rechnerischen PSV von der Verwendung auszuschließen wären, wenn:

- der rechnerische PWS-Wert des Korngemischs inklusive der feinen Gesteinskörnung bestimmt wird oder
- primär der FAP-Wert am zur Verwendung kommenden Asphaltmischgut nach 90 000 Überrollungen bestimmt wird oder
- in Anbetracht eines dauerhaften Griffigkeitsniveaus der Dauerhaftigkeitsfaktor unter Berücksichtigung von mindestens drei weiteren Griffigkeitsmessungen nach dem FAP-Verfahren für eine gesteigerte Prognose bestimmt wird.

Für einen ressourcenschonenden Umgang mit den natürlichen Gesteinen wäre eine schnelle Umsetzung des FAP-Verfahrens als bindendes Merkmal in Eignungsnachweisen in die Praxis, unter Beachtung der Anforderungen an die Griffigkeit gemäß ZTV Asphalt-StB, zu empfehlen.

Erstellung eines Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung und zur Prognose des Verhaltens von Pflasterbefestigungen für konzentriert eingetragene schwere Verkehrsbelastungen mit häufiger Frequentierung

FA 6.119

Forschungsstelle: GWT forschung + innovation, Dresden

Bearbeiter: Wellner, F. / Blasl, A. / Spanier, T. / Zeißler, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Februar 2024

1 Zielstellung und Inhalt

Im Forschungsvorhaben sollte eine geeignete und – zumindest unter Laborbedingungen – validierte Verfahrensweise zur rechnerischen Dimensionierung von Pflasterbefestigungen zur Verfügung gestellt werden, welche die Besonderheiten der Bauweise und der eingesetzten UBG bezüglich der relevanten Eigenschaften (Widerstand gegen plastische Verformung und Wasserdurchlässigkeit) unter Berücksichtigung konzentriert eingetragener Belastungen berücksichtigt. Des Weiteren sollte die zu entwickelnde Verfahrensweise eine Prognosemöglichkeit zur rechnerischen Abschätzung von Erhaltungsintervallen enthalten.

Zur Realisierung des Vorhabens wurden sowohl umfangreiche Laborversuche zur Untersuchung des elastischen und plasti-

schen Verformungsverhaltens von ungebundenen granularen Baustoffgemischen als auch umfangreiche Sensitivitätsuntersuchungen unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode sowie großmaßstäbliche Versuche an Pflasterbefestigungen durchgeführt.

2 Laborversuche

Das Dimensionierungsverfahren basiert auf Stoffmodellen, deren Parameter in Triaxialversuchen zu bestimmen sind. Die Beschreibung des elastischen und des plastischen Verformungsverhaltens mit den verwendeten Stoffmodellen und Materialparametern liefert grundsätzlich nur in den Grenzen der im Versuch geprüften Spannungen, Lastwechselzahlen und Materialzuständen (Verdichtung, Wassergehalt) zuverlässige Ergebnisse. In Vorbereitung der Triaxialversuche wurden deshalb mit Finite-Elemente-Berechnungen die in ungebundenen Pflasterbefestigungen zu erwartenden Beanspruchungen abgeschätzt. Auf dieser Grundlage wurden Versuchsprozeduren aufgestellt, welche einen möglichst großen Bereich der rechnerisch ermittelten Spannungen in den ungebundenen Tragschichten in Pflasterbefestigungen abdecken (siehe Bild 1).

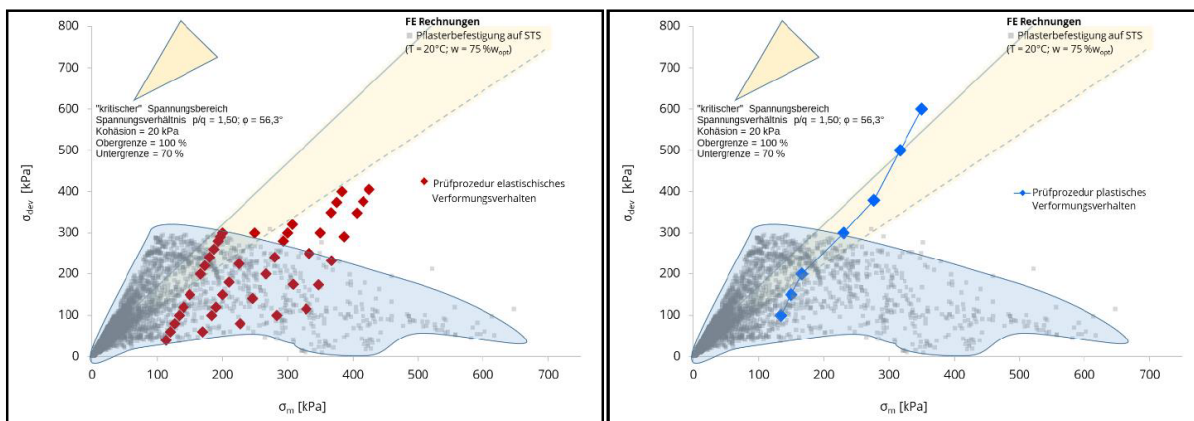


Bild 1: Spannungspfade der Prüfprozeduren für die Untersuchung des elastischen (Grafik links) und plastischen (Grafik rechts) Verformungsverhaltens

Die an zehn ungebundenen Baustoffgemischen durchgeführten Versuche lieferten schlüssige Ergebnisse zur Beschreibung des elastischen und des plastischen Verformungsverhaltens, auf deren Grundlage die Modellparameter für das erweiterte modifizierte Universal-Modell und das erweiterte dehnungsbasierte plastische Modell bestimmt werden konnten. Diese Modellparameter bildeten die Grundlage für Sensitivitätsanalysen unter Anwendung der Finiten-Elemente-Methode und eine im Forschungsvorhaben vorgestellte Methode zur Abschätzung der plastischen Shakedown-Grenzen.

3 Finite-Elemente-Rechnungen und Prognoseberechnungen

Zur Bewertung des Einflusses der versuchstechnisch untersuchten Materialien auf das Gesamtverhalten unterschiedlicher Pflasterbefestigungen wurden mittels der Finiten-Elemente-Software COM-SOL Multiphysics umfangreiche Berechnungen durchgeführt. Neben einem nichtlinear elastischen Stoffmodell wurde außerdem eine Verfahrensweise zur Berechnung beziehungsweise Prognose plastischer Verformungen implemen-

tiert. Mittels COMSOL Multiphysics wurden nun die bewertungs- und dimensionierungsrelevanten Kennwerte ermittelt. Zur Durchführung von verschiedenen Verformungsnachweisen wurden die einzelnen Nachweise in Microsoft Excel umgesetzt. Die berechneten Beanspruchungen und Prognoseergebnisse sind vor dem Hintergrund der verwendeten Modelle grundsätzlich als plausibel zu werten. Hinsichtlich der Modellierung des Verbunds beziehungsweise der Reibung zwischen den einzelnen Pflastersteinen und des umliegenden Fugenmaterials beziehungsweise der darunterliegenden Bettung, das heißt, hinsichtlich der Kontaktbedingungen, wurden vereinfachte Annahmen getroffen, wegen fehlender fundierter Kenntnisse in der Praxis. Um den in der Praxis zu erwartenden Beanspruchungsbereich rechnerisch abzudecken, wurden folglich Annahmen für den für die ToB günstigsten Fall (fest verbunden) sowie den ungünstigsten Fall (freies Gleiten) umgesetzt und der Einfluss entsprechend untersucht.

Neben der Modellierung von Pflasterflächen mit Rechtecksteinen im Läuferverband wurden außerdem Modelle mit kleinformatigen sowie großformatigen Rechtecksteinen im Ellenbogenverband erstellt. Vergleichend wurden auch Modelle mit winkelförmigem Pflasterstein verwendet. Für ausgewählte Modelle wurde eine umfassende Sensitivitätsanalyse beziehungsweise Parameterstudie durchgeführt, in der insbesondere geometrische Modellgrößen wie Stein- und Schichtdicken, Fugenbreiten, aber auch Schichtsteifigkeiten systematisch variiert wurden. Die berechneten Ergebnisse sind durchweg plausibel.

Resümierend ist festzuhalten, dass die Berechnung dimensionierungsrelevanter Größen für die rechnerische Prognose der Nutzungsdauer von Pflasterbefestigungen mittels der Finiten-Elemente-Methode und unter Anwendung dreidimensionaler Berechnungsmodelle mit implementierten nicht-linear elastischen Stoffmodellen als praxistauglich hinsichtlich des erforderlichen Berechnungsaufwands zu werten ist.

4 Großmaßstäbliche Versuche

Zur Kalibrierung des Berechnungsverfahrens wurden großmaßstäbliche Versuche im Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden durchgeführt. Dafür wurden zwei Versuchsflächen mit unterschiedlichen Betonpflastersteinen hergestellt, eine aus Rechtecksteinen (100 x 200 x 100 mm) im Läuferverband und eine aus Winkelverbundsteinen (225 x 125 x 100 mm). Über zwei Lastverteilerplatten mit einem Durchmesser von 30 cm und einem Achsabstand von 1,80 m wurden auf die Pflasterflächen mit einem hydraulisch gesteuerten Zylinder (Laststempel) synchron zyklisch vertikale Belastungen auf die Pflasteroberfläche aufgebracht (siehe Bild 2). Die Gegenüberstellung der Messergebnisse des Versuchs mit den Berechnungsergebnissen in Bild 3 zeigt, dass, ungeachtet zahlreicher Annahmen und Näherungen im Berechnungsansatz, das im großmaßstäblichen Versuch beobachtete Verformungsverhalten durch die Berechnungsergebnisse gut abgebildet wird.

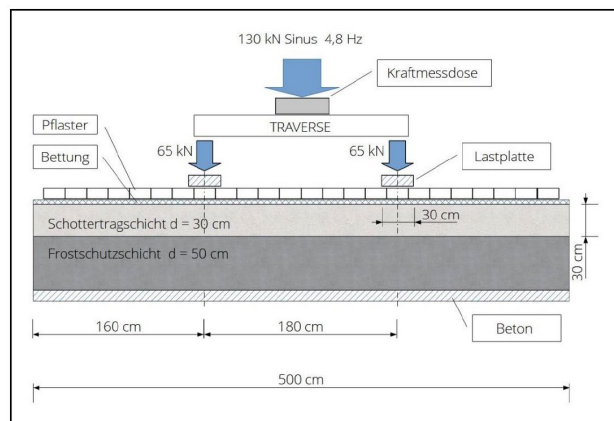


Bild 2: Aufbau des großmaßstäblichen Versuchs - Aufriss

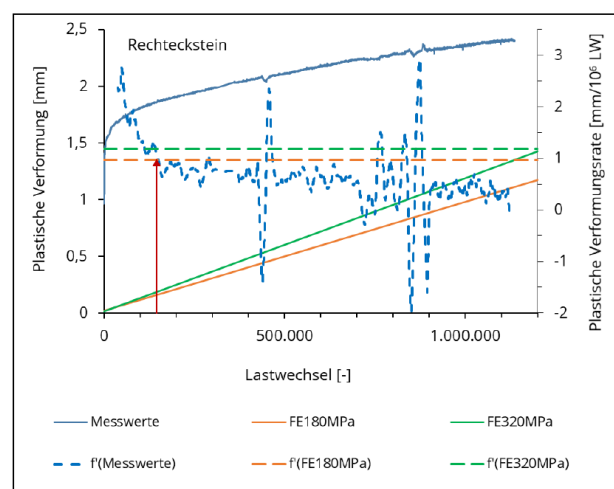


Bild 3: Gegenüberstellung der Berechnungs- und Messergebnisse für den Versuch mit dem Rechteckstein, Berechnungsergebnisse mit Berücksichtigung einer geschätzten Anfangssetzung, Sekundärachse: Anstieg der akkumulierten plastischen Verformungen

5 Dimensionierungsverfahren

Für die rechnerische Dimensionierung und Prognose der Nutzungsdauer von Pflasterbefestigungen stehen bereits heute dem Anwender für Asphalt- und Betonbefestigungen die "Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht" (RDO Asphalt 09 beziehungsweise die überarbeitete Version 09/19, [RDO Asphalt 09] beziehungsweise [RDO Asphalt 19]) sowie die "Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen" (RDO Beton 09, [RDO BETON]) bereits seit 14 Jahren zur Verfügung. Die Erarbeitung und Bereitstellung einer RDO Pflaster ist somit als konsequente Fortsetzung der Überlegungen hinsichtlich der rechnerischen Dimensionierung und Bewertung von Verkehrsflächenbefestigungen zu sehen.

Auf Grundlage umfangreicher Laboruntersuchungen zum elastischen und plastischen Materialverhalten granularer Straßenbaustoffe, ergänzt durch großmaßstäbliche Versuche an unterschiedlichen Pflasterbefestigungen und begleitet durch eine

umfassende Sensitivitätsanalyse beziehungsweise Parameterstudie, durchgeführt mittels Finiter-Elemente-Methode, wurde ein Dimensionierungsverfahren als Grundlage für eine künftige RDO Pflaster erarbeitet.

Die Methodik des erarbeiteten Dimensionierungsansatzes erscheint zielführend, eine geeignete Datengrundlage vorausgesetzt, die Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen abzuschätzen.

Das im Dimensionierungsverfahren vorgestellte Berechnungsverfahren für den Nachweis der plastischen Verformungen auf der Pflasteroberfläche enthält gegenwärtig noch einzelne Punkte beziehungsweise Größen, deren Einflüsse infolge fehlender Kenntnisse abgeschätzt werden müssen. Ungeachtet der getroffenen Annahmen und Näherungen bilden die bisherigen Berechnungsergebnisse das im großmaßstäblichen Versuch beobachtete Verformungsverhalten gut ab. Anhand der großmaßstäblichen Versuche konnten im Verfahren enthaltene Unschärfen und mögliches Verbesserungspotenzial analysiert und formuliert werden.