

Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

FA 4.294

Forschungsstelle: GWT-TUD GmbH, Dresden

Bearbeiter: Wellner, F. / Spanier, T. / Leischner, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: März 2021

1 Zielstellung und Inhalt

Mit dem Forschungsvorhaben sollte eine Dimensionierung von Straßenbefestigungen bei realitätsnaher Berücksichtigung des nichtlinear-elastischen und plastischen Verformungsverhaltens von ToB in Straßenbefestigungen in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen (Frost-/Tauperioden, Schwankungen des Wassergehalts in den ToB) ermöglicht werden. Hierzu wurden experimentelle Versuchsmethoden im Labormaßstab (insbesondere Triaxialversuche an UBG) weiterentwickelt und optimiert. Die Arbeiten im Labor wurden durch entsprechende Berechnungen mit der FE-Methode begleitet, um das Beanspruchungsniveau von ToB bei RStO-Bauweisen als Grundlage für die Versuchsdurchführung zu ermitteln. Die Ergebnisse der Triaxialversuche wurden in eine Datenbank eingepflegt, in welcher ebenfalls die Parameter geeigneter Stoffmodelle hinterlegt werden können. In Ergänzung zu den Triaxialversuchen wurden zyklische Ödometer- und CBR-Versuche bei gleichen Einbaubedingungen wie bei den Triaxialversuchen durchgeführt. Ziel war es, zu untersuchen, ob mit den Ergebnissen dieser Versuche eine vereinfachte Klassifizierung von UBG möglich ist. Weiterhin sollten die Auftretenshäufigkeiten der maßgebenden Lastfälle für die ToB hinsichtlich klimatischer Bedingungen ermittelt werden, um die Möglichkeit zu eröffnen, diese im Rahmen einer analytischen Dimensionierung mit den maßgebenden Verkehrsbelastungen (Achslastkollektiven) zu überlagern. Damit ist eine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit des Dimensionierungsverfahrens möglich. Anhand der Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden Arbeitsschritte und Algorithmen zur

Implementierung der Ergebnisse in die Verfahrensweise nach den RStO und RDO Asphalt und Beton als Grundlage für eine programmtechnische Umsetzung erarbeitet.

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens wurden somit die Voraussetzungen geschaffen, um mithilfe analytischer Dimensionierungsverfahren unter besonderer Berücksichtigung des nichtlinear-elastischen und plastischen Verformungsverhaltens von ToB für den Einzelfall optimierte wirtschaftliche Lösungen für den Befestigungsaufbau von Verkehrsflächen zu ermitteln. Weiterhin kann auf der Grundlage der Ergebnisse des Forschungsprojekts ein wirtschaftlicher Einsatz von RC-Baustoffen beziehungsweise Baustoffgemischen nachgewiesen/geprüft werden.

2 Erstellen der Versuchsprozedur

Die im Projekt verwendeten Stoffmodelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens sind Kurvenanpassungsmodelle. Die Materialparameter dieser Modelle werden ausschließlich auf Grundlage der Versuchsergebnisse im Triaxialversuch (beziehungsweise zyklischen Ödometer- und CBR-Versuch) bestimmt. Eine Prüfprozedur, welche das in den Modellrechnungen zu erwartende Beanspruchungsniveau der ToB berücksichtigt, ist Voraussetzung für alle folgenden Untersuchungen. Dafür wurden zwei Straßenbefestigungen untersucht und mittels FE-Berechnung das Spannungsniveau unter Berücksichtigung der relevanten Temperaturzustände in den Asphaltsschichten nach RDO Asphalt sowie jahreszeitlich schwankender Wassergehalte in den ToB bestimmt. Die beschriebenen FE-Berechnungen zu den Spannungsniveaus waren Ausgangspunkt für die Wahl der Spannungsverhältnisse und Laststufen der Prüfprozedur. Auf Grundlage dieser Berechnungen wurden Prüfprogramme für die Bestimmung der elastischen und plastischen Verformungsparameter erstellt, welche einen möglichst großen Bereich der rechnerisch ermittelten Spannungszustände abdecken. Bild 1 zeigt die Spannungszustände der FE-Berechnungen (Quadrate und Dreiecke) und die Spannungspfade der Prüfprozeduren (Rauten in der rechten Darstellung).

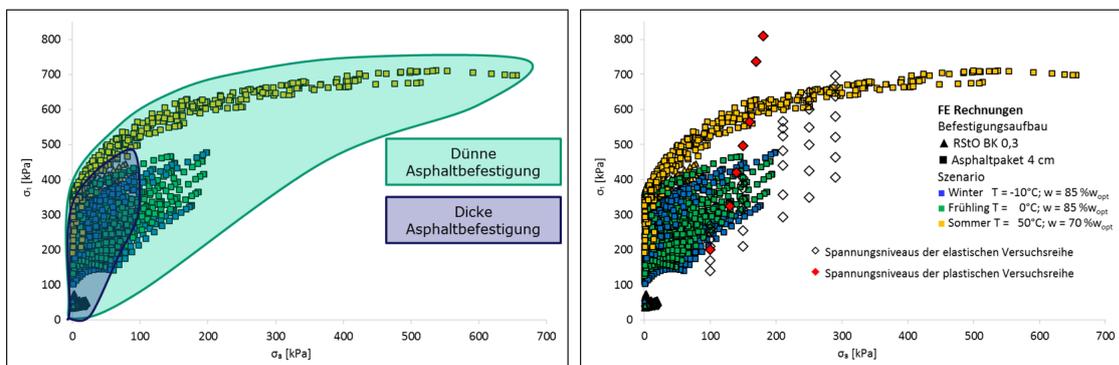


Bild 1: Aus den FE Berechnungen ermittelte Spannungen und gewählte Spannungsverhältnisse zur Bestimmung der elastischen und plastischen Verformungseigenschaften (Grafik rechts)

3 Laborversuche

3.1 Zyklische Triaxialversuche

Mit Triaxialversuchen an ausgewählten ungebundenen Baustoffgemischen wurden die Materialparameter für die verwendeten Stoffmodelle bestimmt. Sie wurden als Multi-Stage-Versuch nach den im ersten Schritt entwickelten Prüfprozeduren bei konstantem Zelldruck durchgeführt. Für die Triaxialversuche wurden zylindrische Probekörper mit den Maßen Höhe $H = 300$ mm, Durchmesser $D = 150$ mm hergestellt. Das Probenmaterial wurde mit 97 % Proctordichte und Wassergehalten von $0,85^*_{wopt}$ beziehungsweise $0,7^*_{wopt}$ eingebaut.

Die im Projekt verwendete Versuchsprozedur erwies sich als geeignet, sowohl die Steifigkeiten von UBG als auch deren plastisches Verformungsverhalten zu charakterisieren. Die Versuche lieferten schlüssige Ergebnisse zur Beschreibung des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens, auf deren Grundlage die Materialparameter für das erweiterte Modifizierte Universal-Modell und das dehnungsbasierte plastische Modell bestimmt werden konnten. Das dabei erzielte Bestimmtheitsmaß der Modelle lag zwischen 89,6 und 99,4 %. Die erzeugte Materialantwort lieferte jedoch keine präzisen Informationen zum plastischen Shakedown-Limit. Dies wurde auf Grundlage des Versuchs zur Bestimmung der plastischen Parameter abgeschätzt und mit den Ergebnissen aus anderen Forschungsvorhaben verglichen. Der Bereich des zunehmenden Materialversagens war mit dem plastischen Versuch ebenfalls feststellbar. Die Kenntnis der Spannungszustände, welche die Grenze des plastischen Shakedown-Limits bilden, ist Voraussetzung für Prognosen zum plastischen Verformungsverhalten. Eine Möglichkeit, das Shakedown-Limit im Rahmen der Versuchsprozedur besser abschätzen zu können, ist die Modifikation der Prüfspannungen im plastischen Versuch. Mit Versuchen bei drei verschiedenen Zelldrücken und mindestens drei unterschiedlichen Deviatorspannungen je Spannungspfad sollte, bei günstiger Wahl der Spannungsniveaus (das heißt, das Shakedown-Limit liegt innerhalb dieses Bereichs), die plastische Shakedown-Grenze nach dem in (DIN EN 13286-7) Anhang C.4.2.2 beschriebenen Verfahren bestimmt werden können.

3.2 Zyklische Ödometer- und CBR-Versuche

Mit dem Ziel auf Basis einaxialer Versuche eine vereinfachte Klassifizierung von UBG vornehmen zu können, wurden zyklische Ödometer- und CBR-Versuche durchgeführt. Die verwendeten Varianten des zyklischen Ödometer und CBR-Versuchs besitzen den Vorteil eines, gegenüber dem Triaxialversuch, relativ einfachen Versuchsaufbaus. Aufwand und Risiken bei der Probekörperherstellung sind ebenfalls deutlich geringer als beim Triaxialversuch. Nachteil dieser Versuche ist, dass die im Versuch realisierbaren Spannungsverhältnisse nur sehr eingeschränkt auf die Verhältnisse in der Fahrbahn übertragbar sind. Mit Triaxialversuchen können diese Zustände deutlich besser

abgebildet werden. Verdichtungsgrad und Wassergehalt der untersuchten UBG entsprach den Probekörpern des Triaxialversuchs.

Die zyklischen Ödometerversuche lieferten plausible Ergebnisse zum elastischen Verformungsverhalten, auf deren Grundlage die Materialparameter für das $K-\theta$ Modell ermittelt werden konnten. Das Bestimmtheitsmaß des Modells lag zwischen 82,6 und 99,4 %, für zehn von zwölf untersuchten Proben lag das Bestimmtheitsmaß über 90 %. Mit den Ergebnissen der zyklischen CBR-Versuche war keine befriedigende Charakterisierung des plastischen Verformungsverhaltens möglich. Es ist anzunehmen, dass das ungünstige Verhältnis von Laststempeldurchmesser (56,42 mm) zur maximalen Korngröße (32 mm) Ursache der stark streuenden Versuchsergebnisse ist. Das unmittelbar unter dem Laststempel liegende Korngemisch ist damit sehr wahrscheinlich nicht repräsentativ und kann sich, je nach Positionierung des Laststempels, in seiner Zusammensetzung stark unterscheiden. Inwiefern sich eine zweckmäßigere Versuchsanordnung unter Verwendung genormter Ausrüstungsteile (Prüfformen, Laststempel, ...) realisieren lässt, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

4 Klassifizierung von UBG

Für eine Klassifizierung mit dem Ziel, im Rahmen einer Vorauswahl geeignete Materialien zu finden, wurden unterschiedliche Verfahrensweisen untersucht.

Eine Abschätzung der Eignung von Materialien auf Basis von zyklischen Ödometer- und CBR-Versuchen scheint möglich. Aufgrund der geringen Prognosesicherheit dieses Verfahrens, insbesondere bei Einschätzung des plastischen Verformungsverhaltens im CBR-Versuch, ist dieses Verfahren in seiner jetzigen Entwicklungsstufe jedoch nicht zu empfehlen. Die Ödometerversuche eignen sich jedoch gut für die Abschätzung des elastischen Verformungsverhaltens (Ranking) in einem mehrstufigen Klassifizierungsverfahren.

Um eine Bewertung und den Vergleich verschiedener Materialien zu ermöglichen, wird die Darstellung von Klassifizierungsergebnissen nach Bild 2 vorgeschlagen. Voraussetzung für diese Darstellung sind Triaxialversuche, mit deren Ergebnissen sich das Materialverhalten für einen Spannungsbereich modellieren lässt. Dafür empfiehlt sich eine hinsichtlich der Prüfzeit optimierte Variante der im Forschungsprojekt verwendeten Versuchsprozedur. In diesem Diagramm werden die Grenzen des Charakteristischen Elastizitätsmoduls E_c durch eine äquivalente elastische Dehnung ($\epsilon_{e, \pm c}$) dargestellt. Für jedes Baustoffgemisch wird die Entwicklung der plastischen Dehnungsrate in Abhängigkeit der äquivalenten elastischen Dehnung im Triaxialversuch als Graf aufgetragen. Ein Punkt auf diesem Grafen markiert die zum Charakteristischen Elastizitätsmodul E_c äquivalente elastische Dehnung ($\epsilon_{e, \pm c}$) und die zugehörige Charakteristische plastische Axialdehnungsrate $\epsilon_{p,c}$.

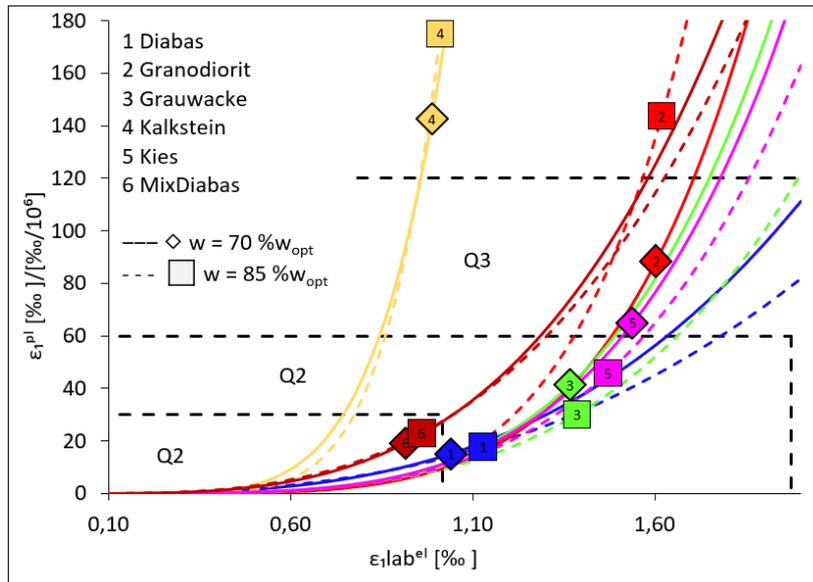


Bild 2: Ergebnis der Klassifizierung, alle Baustoffgemische, Untersuchungsmethode Triaxialversuch

5 Analytische Dimensionierung von ToB

5.1 Einfluss des Wassergehalts

Die signifikante Abhängigkeit des Verformungsverhaltens vom Wassergehalt war Gegenstand von Szenarioberechnungen mit der FE-Methode und einer Literaturrecherche. Ihre Berücksichtigung bei der analytischen Dimensionierung setzt voraus, dass zu erwartende Wassergehalte hinsichtlich ihres Betrags (w/w_{opt} ; oder M.-%), ihrer Dauer (Tage/Jahr) und ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit bei bestimmten Temperaturen bekannt sind. Belastbare Daten zum jahreszeitlichen Verlauf des Wassergehalts in der ToB liegen bisher jedoch nicht vor.

Im Ergebnis der Recherche gibt es aktuelle Aktivitäten zur Entwicklung geeigneter Messtechnik, um entsprechende Daten erfassen zu können. Die Bestimmung des Wassergehalts in der ToB in Analogie zur Berechnungsmethode des DWD zur Bestimmung der Bodenfeuchte könnte eine weitere Quelle zur Datenerhebung sein. Bisher fehlen jedoch die Voraussetzungen für ein derartiges Vorhaben.

Aus den FE-Berechnungen geht hervor, dass, je nach gewähltem Befestigungsaufbau und Baustoffgemisch, der Wassergehalt in der ToB maßgebend ist für die Maxima der auftretenden elastischen Dehnungen in der ToB. Es besteht somit die Notwendigkeit, das Verformungsverhalten des Baustoffgemischs bei zu erwartenden Wassergehalten zu bestimmen, dabei ermittelte Parameter sind dimensionierungsrelevant.

5.2 Dimensionierungsansatz

Im Rahmen des Projekts wurde ein Dimensionierungsansatz erarbeitet, welcher in die Verfahrensweise nach den RStO und RDO

Asphalt und Beton integriert werden kann. Im Dimensionierungsprozess sind die bleibenden Verformungen auf dem Planum und der ToB nachzuweisen. Zur Nachweisführung der bleibenden Verformungen auf dem Planum wird ein mechanistisch-empirischer Ansatz vorgeschlagen. Die bleibenden Verformungen auf der Oberfläche der ToB sind mithilfe eines vorgestellten Berechnungsverfahrens, welches sich auf die im Projekt verwendeten Stoffmodelle stützt, zu bestimmen. Weiteres Dimensionierungskriterium sind die Grenzspannungen des Shake-Down-Limits.