

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

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 172

bast

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

von

Frohmut Wellner
Sabine Leischner
Titus Spanier

GWT-TUD GmbH
Dresden

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 172

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 04.0294

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

Fachbetreuung

Gudrun Golkowski

Referat

Analyse und Entwicklung von Straßenoberbauten

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-663-4

Bergisch Gladbach, Februar 2022

Kurzfassung – Abstract

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

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen für die 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 Wassergehaltes in den ToB) durchgeführt. Hierzu wurden experimentelle Versuchsmethoden im Labormaßstab, insbesondere Triaxialversuche an ungebundenen Baustoffgemischen (UBG) weiterentwickelt und optimiert. Die Arbeiten im Labor wurden durch entsprechende Berechnungen mit der Finite Elemente Methode (FE-Methode) begleitet, um das Beanspruchungsniveau von ToB als Grundlage für die Versuchsdurchführung zu ermitteln.

Die in den Triaxialversuchen angewendete Versuchszurichur sicherte eine gute Erfassung des Materialverhaltens und ist geeignet, sowohl die Steifigkeiten von UBG als auch deren plastisches Verformungsverhalten zu charakterisieren. Auf Grundlage der Versuche wurden Materialparameter für das erweiterte modifizierte Universal-Modell (elastisches Verhalten) und das dehnungsbasierte plastische Modell bestimmt. Die erzeugte Materialantwort lieferte jedoch keine präzisen Informationen zum plastischen Shakedown-Limit und dem charakteristischen Grenzdehnungszustand. Zur Integration dieser Grenzkriterien in das Prüfprogramm und deren schärferer Eingrenzung ist eine Anpassung zweckmäßig.

Voraussetzungen und Untersuchungskriterien für die analytische Dimensionierung der ToB wurden zusammengetragen und ein auf den untersuchten Stoffmodellen basierendes Verfahren zur Berechnung der plastischen Verformungen in ToB vorgestellt. Anhand dieser Ergebnisse 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.

In Ergänzung zu den Triaxialversuchen wurden zyklische Ödometer- und CBR-Versuche durchge-

führt. Ziel war es, zu untersuchen, ob mit den Ergebnissen dieser Versuche eine vereinfachte Klassifizierung von UBG möglich ist. Das elastische Verformungsverhalten der geprüften Materialien konnte auf Grundlage der zyklischen Ödometerversuche gut abgeschätzt und verglichen werden. Mit den Ergebnissen der zyklischen CBR-Versuche war keine befriedigende Charakterisierung des plastischen Verformungsverhaltens möglich. Eine Klassifizierung auf Basis zyklischer Ödometer- und CBR-Versuche scheint im gegenwärtigen Entwicklungsstadium nicht möglich, hierzu sind Triaxialversuche notwendig. Es wurden verschiedene Klassifizierungsverfahren verglichen und eine neue Darstellungsvariante entwickelt, mit der das Potenzial von UBG besser bewertet und verschiedene Materialien verglichen werden können.

Improving the characterisation of the performance of unbound granular base layers (UGLs) for consideration in german regulations (RStO, RDO and RSO)

Within the framework of the research project, investigations were carried out for the design process of road pavements including a realistic consideration of the non-linear-elastic and plastic deformation behaviour of UGLs in road pavements. This behaviour significantly depends on climatic conditions (freeze/thaw periods, fluctuations of the UGL's water content). For this purpose, experimental test methods on laboratory scale (especially triaxial tests on UGL materials) were advanced and optimised. The work in the laboratory was accompanied by respective calculations using the FE-method in order to determine the stress level of the UGL as a basis for test execution.

The test procedure used in the triaxial tests is suitable to characterise both the stiffness of UGL material and its plastic deformation behaviour and therefore ensured a good determination of the overall material behaviour. Based on the experiments, material parameters were determined for the extended modified Universal Model (elastic behavior) and the strain-based plastic model. However, the generated material response did not provide precise information about the plastic shakedown limit and the characteristic limit strain state. In order to integrate these criteria into the test program and to further narrow them down, an adaption was considered appropriate.

Requirements and investigation criteria for the analytical design process of UGLs were identified and a method for calculating plastic deformations of the UGL based on the investigated material models was presented. Based on these results, work steps and algorithms for the implementation of the results in the design procedures according to the RStO, the RDO Asphalt and the RDO Beton were developed as a basis for a computational implementation.

In addition to the triaxial tests, cyclic oedometer and CBR tests were performed. The aim was to investigate whether a simplified classification of UGL materials is possible with the results of these experiments. The elastic deformation behaviour of the tested materials could be well estimated and compared on the basis of the cyclic oedometer tests. However, no satisfactory characterisation of the plastic deformation behaviour was possible with the results of the cyclic CBR tests. A classification based on cyclic oedometer and CBR tests does not seem to be possible in the current stage of development, therefore triaxial tests are necessary. Various classification methods were compared and a new visualisation technique was developed to compare and better evaluate the potential of different UGL materials.

Summary

Improving the characterisation of the performance of unbound granular base layers (UGLs) for consideration in german regulations (RStO, RDO and RSO)

1 Objective and content

The research project aimed at enabling the design process of road pavements including a realistic consideration of the non-linear-elastic and plastic deformation behaviour of UGLs in road pavements in dependence on climatic conditions (freeze/thaw periods, fluctuations of the UGL's water content). For this purpose, experimental test methods on laboratory scale (especially triaxial tests on UGL materials) were advanced and optimised. The work in the laboratory was accompanied by respective calculations using the FE-method in order to determine the stress level of the UGL built according to the „RStO“ as a basis for test execution. The results of the triaxial tests were included in a database, in which the parameters of suitable material models can also be stored. In addition to the triaxial tests, cyclic oedometer and CBR tests were performed under the same setup conditions as for the triaxial tests. The aim was to investigate whether a simplified classification of UGL materials is possible with the results of these experiments. Furthermore, the frequencies of occurrence of the decisive load cases for the UGL with regard to climatic conditions should be determined in order to

provide the possibility of superposing these with the decisive traffic loads (axle load collectives) within the framework of analytical design. This allows a significant improvement in the accuracy of the design process.

Based on these results, work steps and algorithms for the implementation of the results in the design procedures according to the "RStO", the "RDO Asphalt" and the "RDO Beton" were developed as a basis for a computational implementation.

As a result of the research project, requirements were created for the determination of individually optimised economic solutions for the pavement structure of traffic areas by means of analytical design methods with special consideration of the non-linear-elastic and plastic deformation behavior of UGL materials. Furthermore, based on the results of the research project, an economic use of RC building materials or building material mixtures can be verified/tested.

2 Defining the test procedure

The material models used in the project for describing the deformation behavior are curve fitting models. The material parameters of these models are determined exclusively on the basis of test results obtained from triaxial tests (or cyclic oedometer and CBR tests). A test procedure, which considers the stress level of the UGL to be expected in the model calculations is a requirement for all following investigations. For this purpose, two road pavements were investigated and the stress level

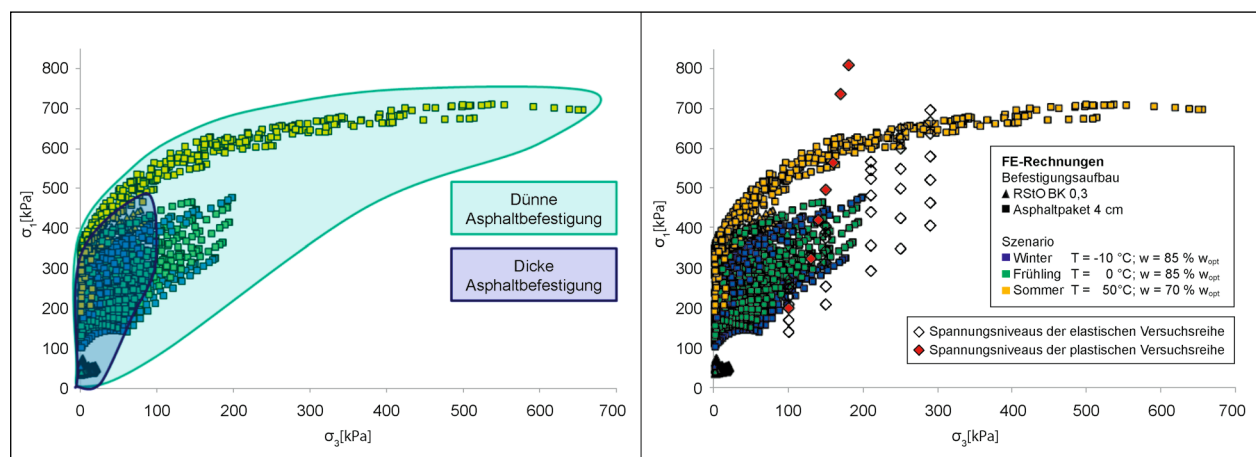


Fig. 2-1: Stresses determined with the FE-calculations and selected stress conditions to determine the elastic and plastic deformation properties (figure on the right)

was determined by means of FE-calculation taking into account the relevant temperature conditions in the asphalt layers according to „RDO Asphalt“ as well as seasonally fluctuating water contents in the UGL. The described FE-calculations of the stress levels were the starting point for the selection of the stress conditions and load levels of the test procedure. On the basis of these calculations, test programs for the determination of the elastic and plastic deformation parameters were created, which cover the largest possible range of computationally determined stress states. Figure 2-1 shows the stress states of the FE-calculations (squares and triangles) and the stress paths of the test procedures (diamonds in the right figure).

3 Laboratory testing

3.1 Cyclic triaxial tests

The material parameters for the used material models were determined with triaxial tests of selected unbound granular material mixtures. They were performed as a multi-stage experiment according to the test procedures developed in the first step at constant cell pressure. Cylindrical specimens were prepared for the triaxial tests with a height $H = 300$ mm and a diameter $D = 150$ mm. The sample material was installed with 97% Proctor density and water contents of $0.85 \cdot w_{opt}$ and $0.7 \cdot w_{opt}$, respectively.

The test procedure used in the project proved to be suitable to characterise the stiffness of UGL material as well as its plastic deformation behaviour. The experiments provided consistent results for the description of the elastic and plastic deformation behavior, on the basis of which the material parameters for the extended Modified Universal Model and the strain-based plastic model could be determined.

The coefficient of determination achieved for the models was in the range of 89.6% to 99.4%. However, the generated material response did not provide precise information about the plastic shakedown limit. The limit was estimated on the basis of the experiment for determining the plastic parameters and compared with the results from other research projects. The range of the increasing material failure was also detectable with the plastic test. The knowledge of the stress states, which define the plastic shakedown limit, is a requirement

for prognoses of the plastic deformation behaviour. One possibility to better estimate the shakedown limit within the test procedure is the modification of the test stresses for the plastic test. It should be possible to determine the plastic shakedown limit with tests at three different cell pressures and at least three different deviator stresses per stress path, according to the method described in [DIN EN 13286-7] Annex C.4.2.2, provided that the stress levels are chosen appropriately (i.e. the shakedown limit lies within this range).

3.2 Cyclic oedometer and CBR tests

Uniaxial oedometer and CBR tests were performed aiming at investigating whether a simplified classification of UGL materials is possible with the results of these experiments. The used variations of the cyclic oedometer and CBR test have the advantage of a relatively simple test setup compared to the triaxial test. The effort and risks involved in sample preparation are also significantly lower than with triaxial testing. The disadvantage of these tests is that the stress states that can be realised in the laboratory can only be transferred to the conditions in the pavement structure to a very limited extent. These states can be represented much better with triaxial experiments. The degree of compaction and the water content of the investigated UGL material corresponded to the test specimens of the triaxial test.

The cyclic oedometer tests provided plausible results for elastic deformation behaviour, on the basis of which the material parameters for the K- Θ -model could be determined. The coefficient of determination of the model was in the range of 82.6% to 99.4% and for 10 of 12 samples tested the coefficient of determination was above 90%. However, no satisfactory characterisation of the plastic deformation behaviour was possible with the results of the cyclic CBR tests. It can be assumed that the unsuitable ratio of load stamp diameter (56.42 mm) to maximum grain size (32 mm) is the cause of the strongly scattering test results. The grain mixture located directly below the load stamp is therefore most likely not representative and can vary greatly in its composition, depending on the positioning of the load stamp. The extent to which a more appropriate test arrangement can be realised using standardised equipment (test forms, load stamps, ...) should be the subject of further investigations.

4 Classification of UGL materials

Different procedures were investigated for a classification with the aim of preselecting suitable materials.

Assessing the suitability of materials based on cyclic oedometer and CBR experiments seems possible. However, due to the low prognostic reliability of this method, especially when estimating the plastic deformation behavior in the CBR test, this method cannot be recommended at its current stage of development. But the oedometer tests are well suited for the estimation of the elastic deformation behavior (ranking) in a multi-stage classification procedure.

In order to enable an evaluation and comparison of different materials, the visualisation of classification results according to (figure 4-1) is suggested. A prerequisite for this visualisation are triaxial tests, the results of which can be used to model the material behaviour for a certain stress range. For this purpose, a variant of the test procedure used in the research project that is optimised in terms of test time is recommended. In this diagram the limits of the characteristic modulus of elasticity E_c are represented by an equivalent elastic strain ($\epsilon_{1}^{el_c}$). The development of the plastic strain rate as a function of the equivalent elastic strain in the triaxial test is plotted as a graph for each material mixture. A point on this graph marks the elastic strain ($\epsilon_{1}^{el_c}$) equivalent to the characteristic modulus of elasticity E_c and the corresponding characteristic plastic axial strain rate ϵ_{1c} .

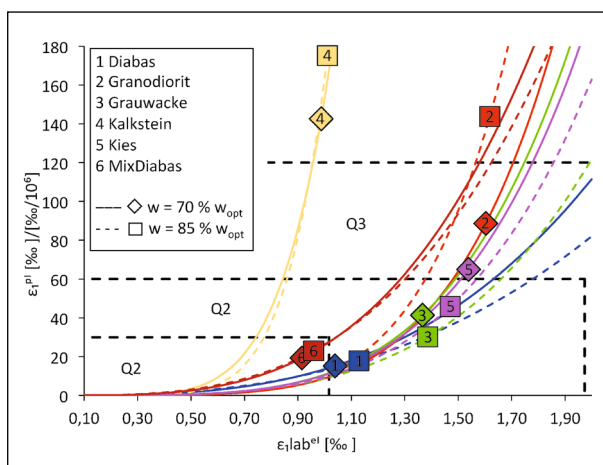


Fig. 4-1: Result of the classification, all material mixtures, test method triaxial test

5 Analytical design of UGL

Influence of water content

The significant dependence of the deformation behaviour on the water content was subject of scenario calculations with the FE-method and a literature research. Their consideration in the analytical design requires that the expected water contents are known with regard to their magnitude (w/w_{opt} ; or m-%), their duration (days/year), and their probability of occurrence at certain temperatures. Reliable data on the seasonal development of the water content in the UGL are not yet available.

As a result of the research, there are current activities for the development of suitable measurement technology to be able to collect corresponding data. The determination of the water content in the UGL in analogy to the calculation method of the DWD for the determination of soil moisture could be another source for data collection. So far, however, the requirements for such a project are not met.

The FE-calculations show that, depending on the selected pavement structure and material mixture, the water content of the UGL is decisive for the maxima of the occurring elastic strains of the UGL. It is therefore necessary to determine the deformation behaviour of the material mixture at expected water contents. Parameters determined in the process are relevant for designing.

Design approach

Within the scope of the project a design approach was developed, which can be integrated into the procedure according to the RStO, the RDO Asphalt and the RDO Beton. The permanent deformations on the subgrade and the UGL must be verified in the design process. A mechanistic-empirical approach is proposed to verify the permanent deformations on the subgrade. The permanent deformations on the surface of the UGL are to be determined by means of the presented calculation method, which is based on the material models used in the project. Further design criteria are the limit stresses of the shake-down limit.

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	11	6.4.4	Bestimmung der Parameter für das erweiterte modifizierte Universal-Modell	30
2	Ziel und Inhalt der Untersuchungen	12	6.5	Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens mit dem Triaxialversuch	32
3	Theoretische Grundlagen	12	6.5.1	Versuchsablauf	32
3.1	Modellierung des Materialverhaltens	12	6.5.2	Ergebnisse	32
3.2	Elastische Verformung	13	6.5.3	Bestimmung der Parameter für das plastische Modell	34
3.2.1	Linear-elastisches Verformungsverhalten	13	6.5.4	Abhängigkeit der plastischen Verformungen vom Wassergehalt	34
3.2.2	Nichtlineare Zusammenhänge	13	6.5.5	Gültigkeitsgrenzen bei Anwendung eines Modells	36
3.2.3	Nichtlineare Modelle	14	6.5.6	Bestimmung des charakteristischen Grenzdehnungszustandes	37
3.3	Plastisches Verformungsverhalten	16	6.6	Zusammenfassung	37
4	Erstellung einer Versuchsprozedur	18	7	Zyklische Ödometer- und CBR-Versuche	39
4.1	Bestimmung des Beanspruchungsniveaus von ToB	18	7.1	Geräte und Versuchsanordnung	39
4.2	Spannungspfade der Versuchsprozedur für Triaxialversuche	19	7.2	Probekörperherstellung	40
5	Laborversuche	22	7.3	Vorversuche	41
5.1	Untersuchte Baustoffgemische	22	7.4	Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens im Ödometerversuch	41
5.2	Voruntersuchungen	22	7.4.1	Versuchsablauf	41
6	Zyklische Triaxialversuche	23	7.4.2	Ergebnisse	41
6.1	Geräte und Versuchsanordnung	23	7.4.3	Bestimmung der Parameter für das modifizierte Universal-Modell, Ödometerversuche	42
6.2	Probekörperherstellung	24	7.5	Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens mit dem CBR-Versuch	44
6.3	Vorversuche	25	7.5.1	Versuchsablauf	44
6.4	Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens im Triaxialversuch	26	7.5.2	Ergebnisse	44
6.4.1	Versuchsablauf	26	7.5.3	Bestimmung der Parameter für das plastische Modell	46
6.4.2	Ergebnisse der elastischen Triaxialversuche	28	7.6	Zusammenfassung	47
6.4.3	Bestimmung der Parameter für das modifizierte Universal-Modell	28			

8	Klassifizierung	48	Literatur	68
8.1	Klassifizierung nach DIN EN 13286-7	48	Bilder	71
8.2	Klassifizierung der Baustoffgemische mit modifizierter Methode	49	Tabellen	73
8.3	Darstellung der Klassifizierung	53		
8.4	Spannungsverhältnisse	54		
8.5	Anpassung der Versuchsprozedur	54		
8.6	Zusammenfassung	55		
9	Maßgebende Lastfälle für die analytische Dimensionierung	56		
9.1	Lastfälle aus Verkehr und Witterung	56		
9.2	FE-Rechnungen zum Einfluss des Wassergehaltes	56		
9.3	Wassergehalte in der ToB	58		
9.4	Berücksichtigung des Wassergehaltes in der Dimensionierung	58		
10	Ansatz zur Ermittlung der plastischen Verformungen in der ToB im Rahmen einer analytischen Dimensionierung	59		
10.1	Berechnung der vertikalen plastischen Verformung	59		
10.2	Dimensionierungskriterien hinsichtlich der plastischen Verformung	62		
11	Implementierung der Ergebnisse in die Verfahrensweise nach RStO, RDO Asphalt und RDO Beton	63		
11.1	Voraussetzungen	63		
11.2	Zu berücksichtigende Beanspruchungsfälle	63		
11.3	Nachweisführung	64		
11.4	Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von ToB	64		
12	Substanzbewertung von ToB	65		
13	Zusammenfassung/Ausblick	65		

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung und Problemstellung

Für das Infrastrukturnetz der Bundesrepublik Deutschland spielen Straßen eine zentrale Rolle. Ziel ist es, durch einen effizienten und umweltschonenden Einsatz der vorhandenen Baustoffe haltbare und dauerhafte Straßenbefestigungen herzustellen. Die einzelnen Strukturbereiche von Straßenbefestigungen, d. h. die gebundenen und ungebundenen Schichten der Befestigungen, sind hierfür entsprechend ihrer unterschiedlichen Aufgaben und Anforderungen zu optimieren. Der Straßenaufbau sollte beispielsweise in der Lage sein, den während des Nutzungszeitraums auftretenden Beanspruchungen ohne vorzeitige Schädigung zu widerstehen. Hierfür sind die gebundenen Schichten adäquat zu stützen. Sowohl in Asphalt- als auch in Betonbefestigungen haben sich für diese Aufgabe (auch bei sehr hoher Verkehrsbelastung) Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) ausgezeichnet bewährt. Dabei beteiligen sich die verschiedenen Schichten auf unterschiedliche Weise an der Gesamttragwirkung. Beispielsweise tragen die gebundenen Schichten Lasten vorrangig über Biegung ab, während in ungebundenen Schichten Lastausbreitung hauptsächlich über Reibung im Korngerüst erfolgt. In dauerhaften Befestigungen sind diese verschiedenen Mechanismen der Lastabtragung genau aufeinander abgestimmt.

Die Dimensionierung der Straßenbefestigungen wird in Deutschland bisher auf der Grundlage empirischer Erkenntnisse nach den RStO (aktuelle Fassung RStO 12 [RStO 12]) durchgeführt. Das Verhalten von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) wird hier bisher im Rahmen dieser Dimensionierung nur sehr vereinfacht unter Nutzung von E_{v2} -Werten berücksichtigt. Dieser Wert spiegelt jedoch nicht das Steifigkeitsverhalten der ToB in-situ wider. Mit den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht [RDO Asphalt 09] steht seit 2009 in Deutschland erstmals ein Verfahren zur Verfügung, mit dem u. a. auch das realitätsnahe Materialverhalten der Baustoffe, das Verhalten der ToB ist hierbei gegenwärtig vereinfachend implementiert, im Dimensionierungsprozess Berücksichtigung findet. Dieses Dimensionierungsverfahren wird derzeit jedoch ausschließlich für Befestigungen mit sehr hohen Verkehrsbelastungen verwendet. Eine Anwendung der RDO Asphalt 09 zur Dimensionierung von Asphaltbefestigungen mit niedrigen Belastungen ist

jedoch ebenso sinnvoll und zweckmäßig, da mit abnehmender Dicke des Asphaltpaketes die Tragwirkung der ToB an Bedeutung gewinnt. Auch sind analytische Verfahren zur Dimensionierung von Pflasterbefestigungen, wo das Spannungs-Verformungsverhalten der ToB eine besondere Rolle spielt, sinnvoll. Insbesondere in der rechnerischen Dimensionierung gilt es, das Verhalten der ToB realitätsnäher zu beschreiben, damit auch von den RStO-Bauweisen abweichende Oberbauvarianten wirtschaftlich dimensioniert werden können. Für diesen Zweck müssen die in den RDO Asphalt zu Grunde liegenden Ansätze (linear-elastisches Verformungsverhalten der ToB), besonders im Hinblick auf die Analyse des Trag- und Materialverhaltens der ToB, weiterentwickelt werden. Im Verfahren nach den RDO Asphalt 09 ist gegenwärtig jedoch nur ein sehr vereinfachter Ansatz für den Nachweis der zulässigen Spannungen/Dehnungen auf den ToB und dem Untergrund unter Annahme linear-elastischen Materialverhaltens enthalten.

Geeignete Laboruntersuchungen (Triaxialversuche) bilden zunächst die Grundlage zur Beschreibung des Spannungs-Verformungsverhaltens ungebundener Baustoffgemische (UBG). Die Ergebnisse der Triaxialversuche an ungebundenen Gesteinskörnungsgemischen haben gezeigt, dass unterschiedliche UBG auch unterschiedliches plastisches Verformungsverhalten aufweisen, obwohl alle nach gleicher Rezeptur (Sieblinie, Verdichtungsgrad) zusammengesetzt wurden [ARN 06]. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, mit der derzeit gültigen empirischen Spezifikation für UBG für ToB (z. B. TNZ M/4 [TNZ 05] oder TL SoB [TL SoB]) die Leistungsfähigkeit der Materialien hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens einzuschätzen.

An der Professur für Straßenbau der TU Dresden wurden bereits in den 90er Jahren in einem großmaßstäblichen Versuchstand [ROS 96] Untersuchungen zum plastischen und elastischen Verformungsverhalten von ToB durchgeführt. Diese Untersuchungen zum Verformungsverhalten von ToB wurden in Form von Dissertationen an der TU Dresden [GLE 96], [NUM 03], [WER 03], [OES 04], [PAT 15] weitergeführt. In diesen Arbeiten wurde sowohl ein elastisches als auch plastisches Stoffmodell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von ToB entwickelt und in ein Berechnungsmodell integriert. Weiterhin wurde an der Professur für Straßenbau der TU Dresden das Forschungsprojekt FE 09.0175/2011/ERB [WEL 14] bearbeitet. Im Ergebnis dieses Forschungsprojektes wurden unter an-

derem wertvolle Erkenntnisse zum Spannungsverformungsverhalten von ToB unter Variation des Wassergehaltes gewonnen sowie auch Erkenntnisse zur optimierten Gestaltung des Versuchsablaufes zur Bestimmung der Verformungskennwerte von UBG.

Auch in anderen Ländern erfolgt derzeit eine adäquate Erfassung des nichtlinearen Verhaltens UBG nur für Forschungszwecke und hat bisher auch international kaum Eingang in Dimensionierungsmethoden und Richtlinien gefunden. Ein Grund dafür ist die außerordentliche Komplexität des Verhaltens ungebundener Materialien. Weiter beruhen die derzeit verfügbaren Analysemodelle auf der Annahme linear-elastischen oder linear visko-elastischen Materialverhaltens und gestatten deshalb keine vollständige Erfassung der konstitutiven Eigenschaften der meisten Straßenbaumaterialien.

2 Ziel und Inhalt der Untersuchungen

Mit dem vorgesehenen 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 Wassergehaltes 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 und somit einer Klassifizierung 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 Auftrenshäufigkeiten 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 Forschungsprojektes ein wirtschaftlicher Einsatz von RC-Baustoffen bzw. Baustoffgemischen nachgewiesen/geprüft werden.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Modellierung des Materialverhaltens

Ungebundene Baustoffgemische bilden unter zyklischer Belastung elastische und plastische Verformungen aus. Die Gesamtdehnung ε^{total} setzt sich aus dem elastischen Dehnungsanteil ε^{el} und dem plastischen Dehnungsanteil ε^{pl} zusammen (siehe Gleichung 1). Als elastische Dehnungen bzw. Dehnungsanteile werden Dehnungen bezeichnet, die sich nach vollständiger Wegnahme der Belastung vollständig zurückbilden. Plastische Dehnungen bleiben im Korngefüge nach Entlastung bestehen.

$$\varepsilon^{total} = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} \quad \text{Gl. 1}$$

mit

ε^{total} Gesamtdehnung [-]

ε^{el} elastische Dehnung [-]

ε^{pl} plastische Dehnung [-]

Die plastischen Dehnungsanteile pro Lastwechsel sind gegenüber den elastischen Anteilen i. d. R. sehr klein. Diese plastischen Dehnungen akkumu-

lieren im Verlaufe der Nutzungsdauer einer Straßenbefestigung und führen ggf. zu Unebenheiten an der Oberseite der Befestigung. Wird jedoch nur ein Lastzyklus betrachtet, ist festzuhalten, dass die plastische Volumen- und Gestaltänderungen des Korngefüges pro Lastzyklus gegenüber den elastischen d. h. rückstellbaren Volumen- und Gestaltänderungen vernachlässigbar klein sind. Dieser Sachverhalt erlaubt eine Formulierung des Materialverhaltens mithilfe elastischer Spannungs-Dehnungsabhängigkeiten. Der elastische Ansatz darf jedoch nur innerhalb bestimmter Beanspruchungsgrenzen Anwendung finden. Sind die Beanspruchungen zu groß, stellen sich bereits bei einem Lastzyklus große plastische Volumen- und Gestaltänderungen ein, sodass elastische Formulierungen nicht mehr zutreffend wären. Derartig hohe Beanspruchungszustände sind in Straßenbefestigungen jedoch auszuschließen.

Auf Grundlage dieser Überlegungen kann die Modellierung der Beanspruchungszustände infolge eines Lastzyklus rein elastisch erfolgen.

3.2 Elastische Verformung

3.2.1 Linear-elastisches Verformungsverhalten

Als Basis für sämtliche Berechnungen zur Ermittlung der Beanspruchung einer Straßenbefestigung nutzt man den von HOOKE bereits im Jahre 1885 formulierten linearen Zusammenhang zwischen auftretenden Spannungen und den sich einstellenden Verformungen:

$$\sigma = E_r \varepsilon^{el} \quad \text{Gl. 2}$$

Der Elastizitätsmodul E_r ist hier als Proportionalitätsfaktor zwischen der Spannung und der Dehnung ε^{el} definiert. Daraus lassen sich für den dreiaxigen Spannungszustand bzw. in Hinsicht auf den Triaxialversuch für den rotationssymmetrischen Spannungszustand Formeln entwickeln, die den Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul, Querdehnzahl, Spannung und Dehnung widerspiegeln:

$$\varepsilon_1^{el} = \frac{1}{E_r} (\sigma_1 - 2\nu\sigma_3) \quad \text{Gl. 3}$$

$$\varepsilon_3^{el} = \frac{1}{E_r} [(1-\nu)\sigma_3 - \nu\sigma_1] \quad \text{Gl. 4}$$

$$\varepsilon_v^{el} = \varepsilon_1^{el} + 2\varepsilon_3^{el} \quad \text{Gl. 5}$$

$$\varepsilon_{dev}^{el} = \frac{2}{3} (\varepsilon_1^{el} + \varepsilon_3^{el}) \quad \text{Gl. 6}$$

$$\sigma_{hyd} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad \text{Gl. 7}$$

$$\sigma_{dev} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Gl. 8}$$

mit

ε_1^{el} vertikale Dehnung [%]

ε_3^{el} radiale Dehnung [%]

ε_v^{el} volumetrische Dehnung [%]

ε_{dev}^{el} deviatorische oder Scherdehnung [%]

σ_1 Vertikalspannung [kPa]

σ_3 Radialspannung [kPa]

σ_{dev} Deviatorspannung [kPa]

σ_{hyd} hydrostatische Spannung [kPa] (in engl. Lit. auch mit σ_m bezeichnet) im hydrostatischen Spannungszustand ist $\sigma_{hyd} = \sigma_1 = \sigma_3$

ν Querdehnzahl [-]

3.2.2 Nichtlineare Zusammenhänge

Traditionell werden UBG in Straßenbefestigungen vereinfachend mithilfe von linear-elastischen Ansätzen modelliert. Charakteristikum dieser Ansätze ist, dass die Spannungen im Material mit den elastischen Dehnungen über konstante Parameter (Elastizitätsmodul und Querdehnzahl) verknüpft sind. Diese Vereinfachung scheint gerechtfertigt, da die ToB durch die lastverteilende Wirkung dicker Asphaltsschichten nur relativ geringen Beanspruchungen ausgesetzt sind, innerhalb derer keine signifikante Änderung des elastischen Verhaltens zu erwarten ist.

Für Befestigungen mit dünnen Asphaltsschichten ist eine derartige Vereinfachung nicht möglich, da hier kaum eine lastverteilende Wirkung dieser Schichten vorliegt. Deshalb ist es für die Dimensionierung von Befestigungen mit dünnen Asphaltsschichten zwingend erforderlich, nichtlineare Spannungs-Dehnungsabhängigkeiten, d. h. nicht-lineare Materialmodelle, zu verwenden.

KOLISOJA [KOL 97] beschreibt den Einfluss des Gesteinskorngerüsts auf das nichtlineare Materialverhalten. Im unbelasteten Zustand berühren sich benachbarte Gesteinskörner lediglich an ihren Kontaktpunkten. Intergranulare Kontaktkräfte (ΔF) infolge der äußeren Belastung werden hier nicht übertragen. Wird die äußere (Druck-)Belastung gesteigert, so werden die Körner an weiteren Stellen in Kontakt gebracht.

gert, bewegen sich die Gesteinskörner aufeinander zu, d. h., es bilden sich Verschiebungen ($\Delta\delta$) aus. Als Konsequenz entwickeln sich zwischen den Gesteinskörnern aus den Kontaktpunkten Kontaktflächen, über die intergranulare Kontaktkräfte übertragen werden. Diese Kräfte erzeugen senkrecht zur Kontaktfläche eine Flächenpressung, die aus der Größe der intergranularen Kraft und der Größe der Kontaktfläche berechnet werden kann. Wird die Belastung gesteigert, vergrößern sich die Kontaktflächen, was einem Anwachsen der Flächenpressung und einer Zunahme der Verschiebungen entgegenwirkt. Damit steigen die Flächenpressung und die Verschiebungen langsamer als die intergranulare Kontaktkraft. Dieser von HERTZ [HERTZ 1882] untersuchte Sachverhalt führt zu einer Versteifung des Korngerüsts bei Laststeigerung und manifestiert sich in einem progressiven Verlauf der Kontaktkraft-Verschiebungs-Abhängigkeit.

Um diesen Sachverhalt zu untermauern, wurden im Projekt FE 09.0175/2011/ERB [WEL 14] verschiedene Befestigungsaufbauten analysiert. Befestigung A besteht aus einer 100 mm dicken Asphalt-schicht auf einer ToB der Dicke 150 mm. Diese ToB weist eine moderat ausgebildete nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit auf. Befestigung B besteht aus einer 10 mm dünnen Asphalt-schicht auf einer 250 mm dicken ToB mit identischem UBG wie in Befestigung A. Beide Befestigungen stützen sich auf den anstehenden Boden. Die Asphalt-schichten und der Boden wurden als linear-elastisches Material modelliert. Das Materialverhalten der ToB wurde mit einem Modell abgebildet, dass die Spannungs-abhängigkeit des Elastizitätsmoduls berücksichtigt, jedoch von einer konstanten Querdehnzahl ausgeht. Die Belastung der Befestigung wurde über eine kreisförmige Flächenlast mit einem Kontakt-druck von 700 kPa und einem Radius von 150 mm realisiert [WEL 14].

Bild 3-1 zeigt die Verteilung des mittels FE berechneten Elastizitätsmoduls in den ToB bei gleich hoher Belastung aber unterschiedlicher Dicke der Asphalt-schicht. Im hochbelasteten Bereich der ToB unmittelbar unter der Lasteinleitungsfläche der dünnen Asphalt-schicht (Bild 3-1, rechte Seite) wurden die größten Elastizitätsmoduln berechnet. Unter der 100 mm dicken Asphalt-schicht wurden deutlich geringere E-Moduln in der ToBermittelt (Bild 3-1, linke Seite). Dieser Sachverhalt ist darin begründet, dass durch eine 100 mm dicke Asphalt-schicht bereits eine signifikante Lastverteilung erfolgt und die darunter befindliche ToB somit nur geringen Beanspruchungen ausgesetzt ist, während die ToB in einer Befestigung mit einer nur 10 mm dicken Asphalt-schicht (zumindest im Bereich unterhalb der Lasteinleitung) einer sehr viel größeren Beanspruchungen ausgesetzt ist. Durch diese hohen Beanspruchungen werden die Gesteinskörner – wie oben bereits erläutert – stark aneinander gepresst, was zu einer Vergrößerung der Kontaktflächen und folglich zu einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls führt [WEL 14].

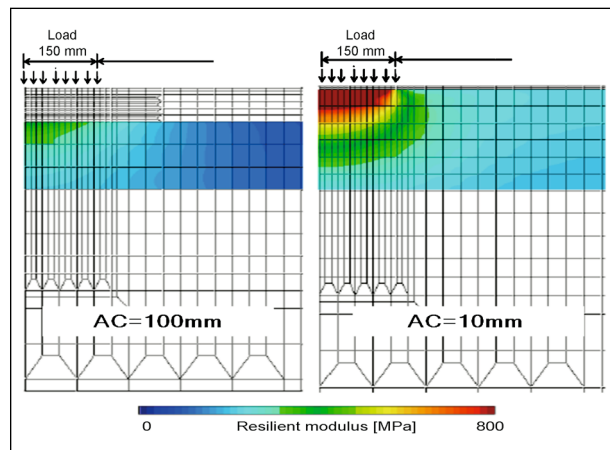


Bild 3-1: Elastizitätsmodulverteilung in den ToB für Befestigungen mit unterschiedlichen Dicken der Asphalt-schichten [WEL 14]

Es kann geschlussfolgert werden, dass unter dicken Asphalt-schichten mit einem äquivalenten konstanten Elastizitätsmodul gearbeitet werden kann. Unter dünnen Asphalt-schichten sollte ein spannungsabhängiger Elastizitätsmodul angesetzt werden.

3.2.3 Nichtlineare Modelle

Während der letzten Jahre wurde eine große Anzahl von Modellen erarbeitet, die das nichtlinear-elastische Verhalten von UBG beschreiben. Im Rahmen dieses Forschungsberichtes ist es nicht Ziel, all diese Modelle zu beschreiben. Hier soll auf Modelle fokussiert werden, die weithin Anwendung finden und ihre Leistungsfähigkeit bereits mehrfach unter Beweis gestellt haben. Diese Modelle weisen eine relativ einfache Struktur auf und können auf sehr effektive Weise das Verhalten UBG für ToB beschreiben.

Eine umfassenden Literatur- und Leistungsstudie der verschiedenen Modelle findet sich in LEKARP [LEK 00a].

Das modifizierte Universal-Modell

Im Jahre 1985 entwickelte UZAN ein nicht-lineares Modell, das neben dem Einfluss der Normalspannungen auch die Auswirkung der Schubspannungen auf den Elastizitätsmodul von UBG berücksichtigt. Der Einfluss der Normalspannungen wird über die Spannung θ erfasst, während die Schubspannungen durch die Deviatorspannung σ_{dev} ins Modell einfließen. Nach den bisherigen Erfahrungen besitzt dieses Modell bei einer einfachen Struktur eine gute Approximationsgüte.

$$E_r = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_{\text{dev}}}{p_a} \right)^{k_3} \quad \text{Gl. 9}$$

mit

E_r	Elastizitätsmodul [MPa]
θ	Summe der drei Hauptspannungen [kPa] (Druckspannung sind positiv einzusetzen)
p_a	Bezugsspannung 100 [kPa] (Luftdruck)
σ_{dev}	Deviatorspannungen [kPa] (stets positiv)
k_1	Materialparameter [MPa]
k_2, k_3	Materialparameter [-]

Der Parameter (Exponent) k_2 nimmt stets positive Werte an, was darin begründet liegt, dass bei Erhöhung der hydrostatischen Druckspannung immer auch eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls erfolgt (dichtere Kornlagerung, Hardening). Dieser Effekt würde sich erst dann umkehren, wenn die hydrostatischen Druckspannungen so groß sind, dass Kornbruch eintritt. Für derart hohe Beanspruchungszustände gilt das Modell jedoch nicht.

Ist die hydrostatische Druckspannung null, sind auch die Steifigkeiten null. Dies erscheint zwar zunächst nicht plausibel, jedoch können von ungebundenen Baustoffgemischen tatsächlich nur dann intergranulare Kräfte übertragen werden, wenn im System ein (wenn auch kleiner) hydrostatischer Druckspannungsanteil vorliegt. Ist dies nicht der Fall und wird das ungebundene Baustoffgemisch beispielsweise lediglich durch Schub beansprucht, versagt das Material instantan (vorausgesetzt es treten keine Kornverzahnungen auf). Dieser Zustand ist jedoch nicht sehr wahrscheinlich, da im Korngerüst mindestens immer ein Druckspannungszustand infolge Eigengewichts vorliegt, aus

dem dann ein hydrostatischer Druckspannungszustand abgeleitet werden kann.

Der Exponent k_3 in Gleichung 9 ist im Regelfall negativ belegt, da das Vorhandensein von Schubspannungen im System im Allgemeinen zu einer Reduktion des Elastizitätsmoduls führt (Softening). Nicht erklärbar ist jedoch der Sachverhalt, dass Gleichung 9 Werte von Null annimmt, wenn σ_{dev} Null ist, und zwar auch dann, wenn hydrostatische Druckspannungszustände vorliegen, d. h., θ größer Null ist. Um dieses Problem zu beheben, wurde im modifizierten Modell nach Uzan (siehe Gleichung 10) zum auf die Spannung p_a bezogenen Schubspannungsäquivalent $\frac{\tau_{\text{oct}}}{p_a}$ der Wert Eins addiert. τ_{oct} , auch als Oktaederspannung bezeichnet, repräsentiert ebenso wie σ_{dev} die Schubspannungen im System. Der Wert 1 führt dazu, dass die hintere Klammer in Gleichung 10 stets größer Null ist, (beachte, τ_{oct} ist ebenso wie σ_{dev} nie negativ).

$$E_r = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad \text{Gl. 10}$$

(modifiziertes
Universal-Modell)

mit

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \text{Gl. 11}$$

(Oktaederspannung)

Im Gegensatz zu den anderen Stoffmodellen wird beim modifizierten Universal-Modell von einer konstanten Querdehnzahl ν ausgegangen, was deren in der Praxis nachgewiesene Abhängigkeit vom vorherrschenden Spannungszustand nicht berücksichtigt. Das vermindert zwar den Rechenaufwand, führt aber zu Abweichungen von der Realität.

Das modifizierte Universal-Modell wurde in der Vergangenheit sehr häufig eingesetzt, um die Spannungsabhängigkeit des elastischen Verformungsverhaltens von UBG zu erfassen, da es relativ einfach in FE-Programmen implementierbar ist. Es wird auch in diesem Projekt zur Beschreibung des elastischen Verformungsverhaltens verwendet.

Modifiziertes Universal-Modell unter Berücksichtigung des Wassergehaltes

Wie bereits erläutert, wird im modifizierten Universal-Modell der Einfluss der hydrostatischen Druckspannungen durch den Exponenten k_2 gesteuert.

Die Wirkung der Schubspannungen im System wird durch den Exponenten k_3 berücksichtigt. Der Faktor k_1 steuert die Größe des Elastizitätsmoduls. Im Ergebnis seiner Beobachtungen stellte CANON FALLA [CAN 13] fest, dass geringe Änderungen des Wassergehaltes im Baustoffgemisch nur geringe Auswirkung auf das Hardening- und Softening-Verhalten (Materialparameter k_2, k_3) haben. Jedoch wurde eine Abnahme der absoluten Größe des Elastizitätsmoduls bei zunehmendem Wassergehalt beobachtet. Dieser Steifigkeitsverlust wurde in Gleichung 10 aufgenommen, indem der Parameter k_1 durch eine Funktion ersetzt wird, welche vom Wassergehalt des Materials abhängt [CAN 13].

$$E_r = \left(k_{w1} + k_{w2} \left(\frac{WC}{WC_{opt}} \right) \right) \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Gl. 12
(Erweiterung des
mod. Universal-Modell)

mit

k_{w1}, k_{w2} Materialparameter [MPa]

WC Wassergehalt [M.-%]

WC_{opt} optimaler Wassergehalt [M.-%]

Die Parameter für dieses Modell lassen sich nur bestimmen, wenn Versuche bei mindestens 2 verschiedenen Wassergehalten durchgeführt wurden, und haben nur Gültigkeit innerhalb der geprüften Wassergehalte. Ein Vorteil dieses Modells ist die Möglichkeit, Elastizitätsmoduln für beliebige, innerhalb der geprüften Grenzen liegende Wassergehalte bestimmen zu können. Darüber hinaus kann aus dem Verhältnis $k_{w2}/(k_{w1} + k_{w2})$ der Einfluss des Wassergehaltes auf die Steifigkeit abgeleitet werden. Die Bestimmung der Parameter ist jedoch aufwändiger als beim modifizierten Universal-Modell nach Gleichung 10. In diesem Projekt wurden die Parameter für das erweiterte Modell (Gleichung 12) für alle untersuchten UBG bestimmt.

3.3 Plastisches Verformungsverhalten

Plastische, d. h. bleibende Verformungen, werden vor allem durch Kornumlagerungen in ToB hervorgerufen. Diese Kornumlagerungen können als Kornverschiebungen und Kornrotationen aufgefasst werden. Der Widerstand gegen diese Verschiebungen und Rotationen hängt insbesondere

von der Kornoberflächenstruktur in den Kontaktpunkten ab [WER 03].

Ziel des Forschungsprojektes FE 09.0175/2011/ERB [WEL 14] war es, ein plastisches Verformungsmodell für UBG zu entwickeln, das den Zusammenhang zwischen den bleibenden Verformungen, den Spannungen sowie der Lastwechselzahl zutreffend abbildet. Hierfür wurden verschiedene Ansätze untersucht:

- Modellierung der bleibenden Dehnungen unter Berücksichtigung der Anzahl der Lastwechsel,
- Korrelation zwischen den elastischen Dehnungen und der plastischen Dehnungsrate,
- Definition eines plastischen Verformungsmoduls,
- Modellierung der bleibenden Dehnungen unter Berücksichtigung der Spannungen im System und
- Nutzung des Shakedown-Ansatzes.

Die meisten dieser Ansätze wurden in einer umfassenden Literaturstudie von LEKARP [LEK 00b] untersucht.

Im Ergebnis der Untersuchungen im FE 09.0175/2011/ERB [WEL 14] schlugen die Autoren ein plastisches Verformungsmodell vor, das für die Prädiktion der bleibenden Dehnungen in Befestigungen mit dünnen Asphaltsschichten eingesetzt werden soll. Dieses Modell geht von der Annahme aus, dass die bleibenden Dehnungen für alle Beanspruchungskombinationen, die zu denselben elastischen Dehnungen führen, identisch sind. Durch diese Annahme konnte die Anzahl der Beanspruchungskombinationen (Spannungskombinationen), die zum Aufbau des Modells erforderlich waren, signifikant reduziert werden. Bild 3-2 zeigt die Approximationsgüte des Modells für ein untersuchtes Baustoffgemisch. Die schwarze Linie entspricht dabei dem Funktionsverlauf von Gleichung 13. Die Rauten und Dreiecke repräsentieren die aus Triaxialversuchen ermittelten plastischen Dehnungsraten für zwei Proben bei insgesamt sieben verschiedenen Spannungskombinationen.

Das Modell wurde auf Grundlage der Ergebnisse eines zyklischen Dauerversuches unter dreiaxialen Bedingungen entwickelt, bei welchem die Spannungen und plastischen Dehnungen aufgezeichnet wurden. Die plastische Dehnungsrate wurde mithilfe der plastischen akkumulierten Dehnungskurve

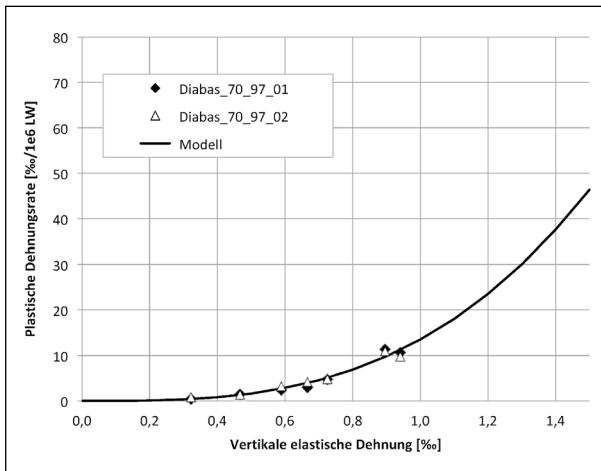


Bild 3-2: Vertikale plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit von den vertikalen elastischen Dehnungen, Versuchsergebnisse und dehnungsbasiertes Modell nach Gleichung 13

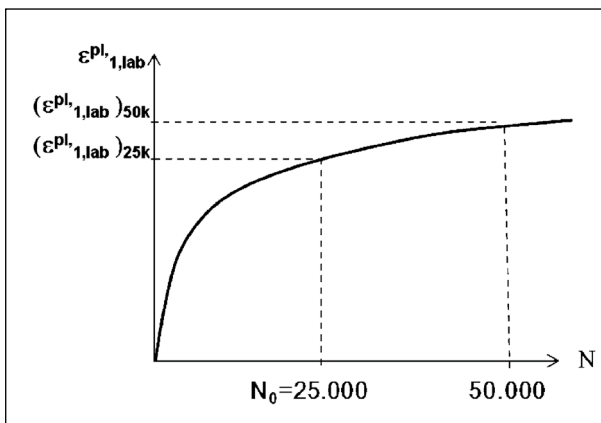


Bild 3-3: Typischer Verlauf der plastischen Dehnungen in Abhängigkeit der Lastwechsellzahl [WEL 14]

(siehe Bild 3-3) bestimmt, indem der Anstieg der Kurve zwischen dem 25.000-ten und dem 50.000-ten Lastwechsel genutzt wurde.

$$\lambda = a_1 (\varepsilon_{1,lab}^{el})^{a_2} \quad \text{Gl. 13} \\ \text{(Dehnungsbasiertes Modell)}$$

mit

λ Plastische Dehnungsrate [%/10⁶] (plastische Dehnung in Promille je 10⁶ LW)

a_1 Materialparameter [1/10⁶ Zyklen]

a_2 Materialparameter [-]

$\varepsilon_{1,lab}^{el}$ vertikale elastische Dehnung unter dreiaxialen Bedingungen [%]

$$\lambda = \frac{(\varepsilon_{1,lab}^{pl})_{50k} - (\varepsilon_{1,lab}^{pl})_{25k}}{25.000} * 10^6 \quad \text{Gl. 14}$$

mit

$(\varepsilon_{1,lab}^{pl})_{50k}$ vertikale plastische Dehnungen bei 50.000 Lastwechseln [%]

$(\varepsilon_{1,lab}^{pl})_{25k}$ vertikale plastische Dehnungen bei 25.000 Lastwechseln [%]

Bei dem Modell wurde davon ausgegangen, dass die bleibenden Dehnungen in realen Befestigungen mit den bleibenden Dehnungen desselben Materials unter Testbedingungen korrelieren. D. h., das Modell stützt sich auf das in Laboruntersuchungen beobachtete plastische Materialverhalten und überträgt dieses Verhalten auf Realbedingungen. Bei der Übertragung wird postuliert, dass der Quotient aus den plastischen Dehnungen unter Laborbedingungen und den plastischen Dehnungen unter Realbedingungen gleich dem Quotient aus den elastischen Dehnungen unter Real- und Laborbedingungen ist (siehe Gleichung 15).

$$\frac{\varepsilon_{lab}^{pl}}{\varepsilon_{feld}^{pl}} = \frac{\varepsilon_{lab}^{el}}{\varepsilon_{feld}^{el}} \quad \text{Gl. 15}$$

mit

ε_{lab}^{pl} plastische Dehnung unter Laborbedingungen [-]

ε_{feld}^{pl} plastische Dehnung unter Realbedingungen [-]

ε_{lab}^{el} elastische Dehnung unter Laborbedingungen [-]

ε_{feld}^{el} elastische Dehnung unter Realbedingungen [-]

Die Untersuchungen zum plastischen Verformungsverhalten im diesem Forschungsprojekt stützen sich auf dieses Modell.

4 Erstellung einer Versuchs-prozedur

4.1 Bestimmung des Beanspruchungsniveaus von ToB

Die in diesem Projekt verwendeten Stoffmodelle sind empirische Modelle. Die Materialparameter dieser Modelle werden ausschließlich auf Grundlage der Versuchsergebnisse im Triaxialversuch (bzw. zykl. Ödometer- und CBR-Versuch) bestimmt. Die Beschreibung des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens mit diesen Stoffmodellen ist deshalb grundsätzlich nur in den Grenzen der im Versuch geprüften Spannungen, Lastwechselzahlen und Materialzustände (Verdichtung, Wassergehalt) zulässig. Eine Prüfprozedur, welche das in den Modellrechnungen zu erwartende Beanspruchungsniveau der ToB berücksichtigt, ist Voraussetzung für alle folgenden Untersuchungen.

Dafür wurden zwei Straßenbefestigungen untersucht. Dabei wurde mittels FE-Berechnung das Spannungsniveau unter Berücksichtigung der relevanten Temperaturzustände in den Asphalt-schichten nach RDO Asphalt sowie jahreszeitlich schwankender Wassergehalte in den TOB bestimmt.

Bild 4-1 zeigt den Aufbau der untersuchten Befestigungen. Jede der dargestellten Befestigungsvarianten wurde mit drei verschiedenen UBG untersucht. Die Bestimmung des Spannungsniveaus erfolgte für die relevanten Kombinationen von Temperatur/Wassergehalt im Winter, Frühling, Sommer, d. h. in Summe 18 Kombinationen.

Das elastische Verhalten der Befestigungen wurde mithilfe des FE-Programms EasyFEM simuliert. Dieses Programm kann nicht-lineares Materialverhalten und elastoplastische Eigenschaften ungebundener Baustoffgemische berücksichtigen. Das Programm arbeitet mit einem axialsymmetrischen Modell, die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn wird durch eine Kreisfläche abgebildet. Der Radius wurde mit 150 mm so gewählt, dass bei einer Radlast von 50 kN ein Kontaktdruck von 700 kPa entsteht. Der Asphalt wurde vereinfacht als linear-elastisches Material mit isotropem Verhalten modelliert. Die Querdehnzahl wurde mit 0,35 angenommen, der zu jedem Szenario gehörende Elastizitätsmodul (Temperaturen siehe Tabelle 4-1) wurde für einen Kalibrierasphalt nach RDO bestimmt. Zur Beschreibung des Materialverhaltens der ToB wurde das modifizierte Universal-Modell (siehe Gleichung 10) eingesetzt. Die Materialparameter der untersuchten UBG stammen aus Untersuchun-

Befestigung RStO BK 0,3 Zeile 5 (Tafel1)		Befestigung mit Asphaltpaket 4 cm																			
Bauweise	mit Asphaltdeckschicht auf F2 Untergrund	Bauweise	mit Asphaltdeckschicht auf F2 Untergrund																		
Belastungsklasse (RSTO)	0,3	Belastungsklasse (RSTO)	-																		
Mindestdicke Oberbau	60 cm	Mindestdicke Oberbau	60 cm																		
	<table border="1"> <tr><td>ADS</td><td>40 mm</td></tr> <tr><td>ATS</td><td>80 mm</td></tr> <tr><td>ToB</td><td>300 mm</td></tr> <tr><td>FSS</td><td>180 mm</td></tr> <tr><td>UG</td><td></td></tr> </table>	ADS	40 mm	ATS	80 mm	ToB	300 mm	FSS	180 mm	UG			<table border="1"> <tr><td>Asphaltschicht</td><td>40 mm</td></tr> <tr><td>ToB</td><td>460 mm</td></tr> <tr><td>FSS</td><td>180 mm</td></tr> <tr><td>UG</td><td></td></tr> </table>	Asphaltschicht	40 mm	ToB	460 mm	FSS	180 mm	UG	
ADS	40 mm																				
ATS	80 mm																				
ToB	300 mm																				
FSS	180 mm																				
UG																					
Asphaltschicht	40 mm																				
ToB	460 mm																				
FSS	180 mm																				
UG																					

Bild 4-1: Aufbau der untersuchten Straßenbefestigungen

Spannung [kPa]	Szenarien	Temperatur [°C]	Wassergehalt w/w _{opt} [%]	Elastizitätsmodul FSS [MPa]	Elastizitätsmodul Planum [MPa]
700	Winter	-10	85	120	45
	Frühling	0	85	60	25
	Sommer	50	70	120	45

Tab. 4-1: Eingangsparameter der FE-Berechnung (Auswahl)

gen anderer Forschungsprojekte. Der Untergrund wurde unter Annahme isotropen linear-elastischen Materialverhaltens modelliert, dabei wurden Elastizitätsmoduln gemäß Tabelle 4-1 angenommen.

Bild 4-2 zeigt die FE-Grafiken der Spannungszustände im Befestigungsaufbau mit einer 4 cm dicken ATDS (Bild 4-1, rechte Darstellung) und einer Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) aus Granodiorit bei der Temperatur/Wassergehaltkombination im Winter (Darstellung links) und im Frühling (Darstellung rechts). Die farbliche Abstufung (Rot = Maximum, Blau = Minimum) zeigt den Verlauf des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit der Entfernung von der Lastachse. Das Modell basiert auf einem kreisförmigen Lasteintrag. In der Ecke oben links befindet sich der Lastmittelpunkt an der Oberkante (OK) der Fahrbahn. Die nach unten gerichtete Z-Achse entspricht der Tiefe unter OK Fahrbahn, der horizontale Abstand vom Lastmittelpunkt nimmt nach rechts zu. Die größte Beanspruchung ist im oberen Bereich der ToB unmittelbar unter der Lastachse erkennbar. Die Spannungsverhältnisse in der ToB im Winter (Bild links, $T = -10\text{ °C}$, Wassergehalt = 70 % w_{opt}) unterscheiden sich deutlich von denen im Frühjahr (Bild rechts, $T = 0\text{ °C}$; Wassergehalt = 90 % w_{opt}).

4.2 Spannungspfade der Versuchsprozedur für Triaxialversuche

Mit dem Ziel, sowohl die Steifigkeiten von UBG (nicht-linear-elastisches Verformungsverhalten) als auch das plastische Verformungsverhalten zu charakterisieren, wurde die an der TU Dresden [CAN 17] entwickelte Vorgehensweise, welche auf der EN 13 286 -7 basiert, auch für Beanspruchungsniveaus der ToB, die außerhalb des Niveaus für RStO-Bauweisen liegen, weiterentwickelt und angepasst. 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 (siehe Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3). Die Spannungsniveaus in den Versuchen sollten einen möglichst großen Bereich der rechnerisch ermittelten Spannungszustände abdecken. Bild 4-3 zeigt die anhand der FE-Berechnungen ermittelten Spannungszustände in den ToB (Quadrate und Dreiecke) und die Spannungspfade der Prüfprozeduren (Rauten in den rechten Darstellung).

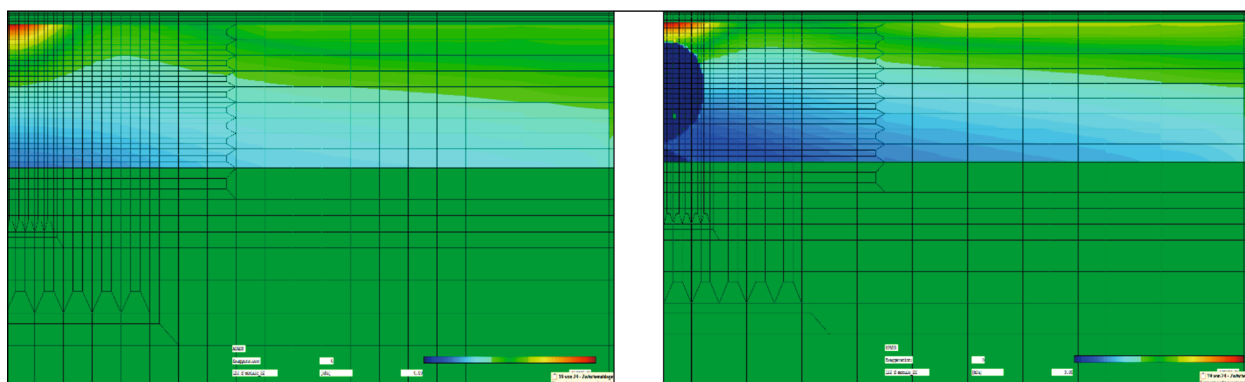


Bild 4-2: FE-Grafiken der Spannungszustände im Befestigungsaufbau mit einer 4 cm dicken ATDS

Laststufe	Zellspannung σ_3 [kPa]	axiale Deviatorspannung σ_d [kPa]		f [Hz]	LW [-]
	konstant	min	max		
1	150	0	300	10	20.000

Tab. 4-2: Prüfprogramm des Vorversuches für die zyklischen Triaxialversuche

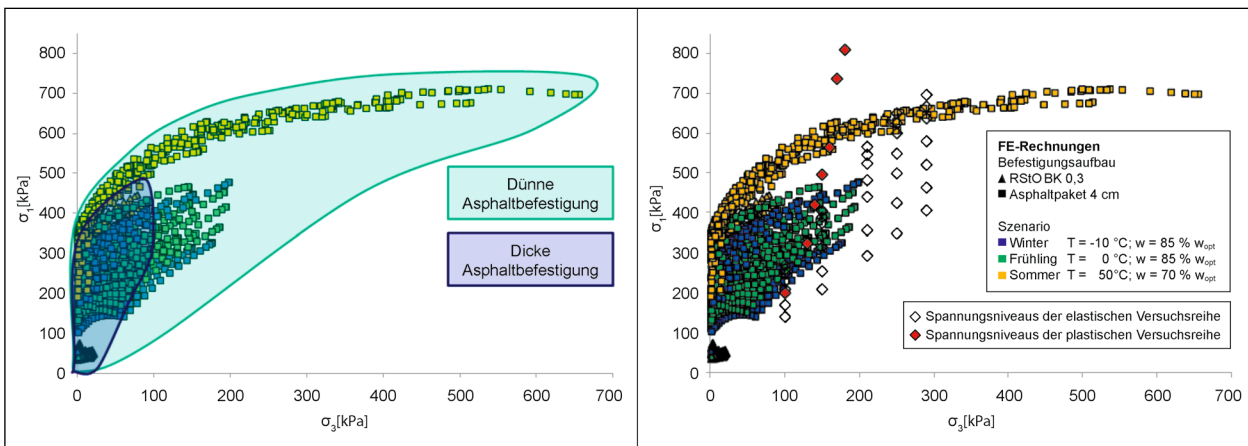


Bild 4-3: Ergebnisse der FE-Berechnungen in Form der Spannungen (Grafik links) und gewählte Spannungsverhältnisse zur Bestimmung der elastischen und plastischen Verformungseigenschaften (Grafik rechts)

Laststufe	Zellspannung σ_3 [kPa]	axiale Deviatorspannung σ_d [kPa]		f [Hz]	LW [-]		
	konstant	min	max				
1	100	0	40	1	100		
2			70				
3			110				
4			130				
5			150				
6			160				
7			170				
8	150	0	60				
9			105				
10			165				
11			195				
12			225				
13			240				
14			255				
15			210			0	84
16							147
17							231
18							273
19							315
20							336
21							357

Tab. 4-3: Prüfprogramm für die zyklischen Triaxialversuche zur Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens

Laststufe	Zellspannung σ_3 [kPa]	axiale Deviatorspannung σ_d [kPa]		f [Hz]	LW [-]
	konstant	min	max		
22	250	0	100	1	100
23			175		
24			250		
25			300		
26			350		
27			375		
28			400		
29			290		
30	174				
31	232				
32	290				
33	348				
34	377				
35	406				

Tab. 4-3: Fortsetzung

Laststufe	Zellspannung σ_3 [kPa]	axiale Deviatorspannung σ_d [kPa]		f [Hz]	LW [-]
	konstant	min	max		
1	100	0	100	5	50.000
2	130		195		
3	140		280		
4	150		346		
5	160		405		
6	170		567		
7	180		630		

Tab. 4-4: Prüfprogramm für die zyklischen Triaxialversuche zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens

5 Laborversuche

5.1 Untersuchte Baustoffgemische

In die Untersuchungen des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens wurden sechs repräsentative ungebundene Baustoffgemische (UBG) einbezogen. Ergänzend zu den bereits im Forschungsprojekt FE 09.0175/2011/ERB [WEL 14] untersuchten UBG wurden im Rahmen der zweiten Sitzung des Betreuungsausschusses für die Untersuchungen die in Tabelle 5-1 genannten Materialien festgelegt.

5.2 Voruntersuchungen

Die verwendeten UBG wurden aus regionalen Steinbrüchen bzw. Lagerstätten beschafft. Für alle Materialien wurden Proctordichte Korngrößenverteilung und Infiltrationsvermögen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

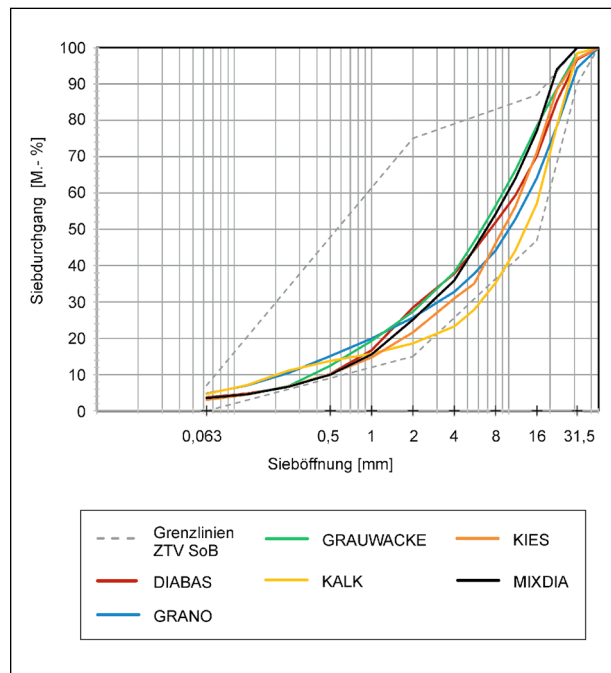


Bild 5-1: Korngrößenverteilungen der untersuchten Baustoffgemische im Lieferzustand

Anforderung lt. Aufgabenstellung	gewähltes Material [Probenbezeichnung]
gebrochener Kies 0/32	Kiessand Elbe 0/32 [KIES]
gebrochenes UBG mit sehr geringer Wasserdurchlässigkeit	Kalkstein 0/32 [KALK]
gebrochenes UBG mit sehr hoher Wasserdurchlässigkeit	Grauwacke 0/32 [GRAUWACKE]
3 gebrochene UBG mit deutlich unterschiedlichen morphologischen Eigenschaften und/oder unter Variation der Korngrößenverteilung	Granodiorit 0/32[GRANO]
	Diabas 0/32 [DIABAS] (Kornform entsprechend regulärem Lieferzustand)
	Diabas 0/32 [MIXDIA] (Gemisch aus Brechsand 0/2 und Edelsplitten der Kornklassen 2/5; 5/8;8/11;11/16;16/22)

Tab. 5-1: Materialauswahl für Untersuchungen

Material	Probenbezeichnung	Infiltrationsbeiwert	Feinanteil		Proctordichte	Optimaler Wassergehalt		
			Lieferzustand				ohne Überkorn	
			$k_{i(10)STARO}$ [m/s] 10^{-5}	[M.-% < 0,063 mm]			ρ_d [Mg/m ³]	w_{opt} [M.-%]
Diabas	Diabas	0,167	3,7	3,9	2,199	4,8		
Granodiorit	Grano	0,032	4,7	5,0	2,153	4,9		
Grauwacke	Grauwacke	0,286	3,5	3,6	2,048	5,2		
Kalkstein	Kalk	0,003	4,6	4,8	2,155	5,8		
Kies	Kies	2,036	3,0	3,1	1,971	4,9		
MIX Diabas	MixDia	0,014	3,5	3,5	2,235	4,7		

Tab. 5-2: Parameter der untersuchten Baustoffgemische

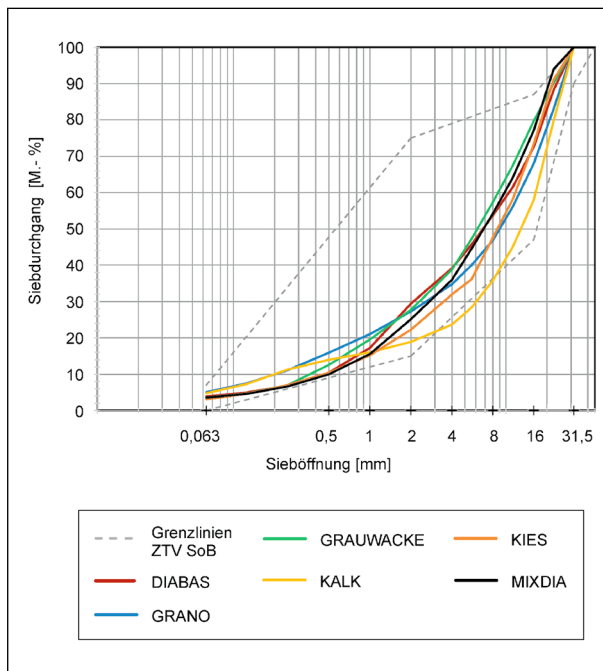


Bild 5-2: Korngrößenverteilungen der untersuchten Baustoffgemische nach Absiebung des Überkorns (32 mm)

Die Proctorversuche nach [DIN EN 13286-2] sind Grundlage zur Festlegung des Einbauwassergehaltes und der Zieldichte für die Probekörperherstellung.

6 Zyklische Triaxialversuche

6.1 Geräte und Versuchsanordnung

Die Versuche wurden mit der Triaxialanlage der Professur für Straßenbau der TU Dresden durchgeführt (Bild 6-1).

Wesentliche Elemente der Versuchsanlage mit den entsprechenden Wegmesssystemen sind in Bild 6-2 schematisch dargestellt. Die Anlage stellt zur Messung der axialen Verformungen zwei induktive Wegmesssysteme (System 1 und 2) und ein magnetisches Wegmesssystem (System 3, 3 Paare von Magneten, die jeweils 120° versetzt angeordnet sind) zur Verfügung. Für die Versuche in diesem Forschungsprojekt wurden die Messergebnisse der induktiven Wegmesssysteme genutzt. Darüber hinaus besitzt die Anlage ein Radialwegmesssystem, bestehend aus neun induktiven Wegaufnehmern, welches zur Messung der radialen Verformungen genutzt werden kann.

Die Zellspannung wird bei dieser Triaxialanlage mittels Öl aufgebracht. Die Stützdruckregelung kann



Bild 6-1: Triaxialzelle der TU Dresden

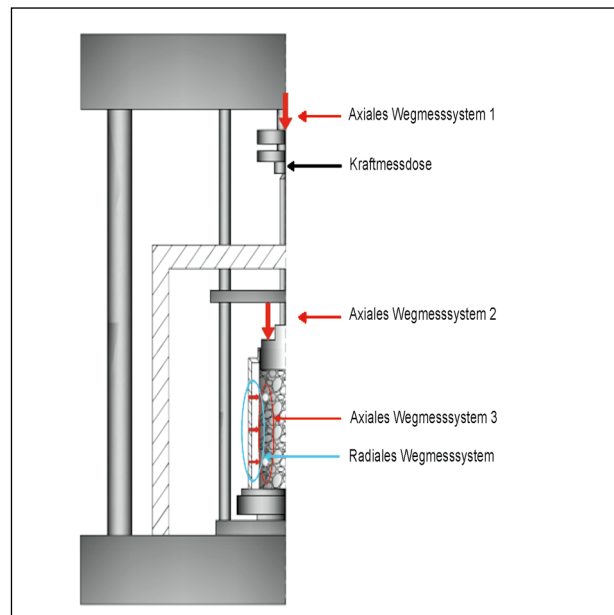


Bild 6-2: Schematische Darstellung der Triaxialanlage [GRO 05]

sowohl statisch als auch dynamisch mit verschiedenen Belastungsfunktionen erfolgen. Im Forschungsprojekt wurde mit statischem Stützdruck gearbeitet.

Die kleinste realisierbare Zellspannung wird durch die Mechanik der verwendeten Versuchseinrich-

tung bzw. der Messwerterfassung bestimmt. Kleinere Zellspannungen als 100 kPa ließen sich an der Anlage der TU Dresden nicht sicher erzeugen, da die Größenordnung der Messwerte im Bereich der Messgenauigkeit liegt und sichergestellt werden muss, dass die Membran am Probekörper anliegt.

6.2 Probekörperherstellung

Für die Triaxialversuche wurden zylindrische Probekörper mit den Maßen, Höhe $H = 300$ mm; Durchmesser = 150 mm hergestellt. Das Probenmaterial wurde mit 97 % Proctordichte und Wassergehalten von $0,85 \cdot w_{opt}$ bzw. $0,7 \cdot w_{opt}$ eingebaut. In der Annahme, dass der Wassergehalt in einer ToB unterhalb von w_{opt} liegt, und im Normalfall (d. h. intakte Entwässerung) jahreszeitlich bedingt ca. zwischen

70 % und 85 % w_{opt} schwankt, wurden diese Wassergehalte im Ergebnis der Untersuchungen festgelegt.

Die durch Probenteilung hergestellte Mischprobe des jeweiligen UBGs (ca. 15 kg) wurde zunächst durch ein Sieb mit 32 mm Öffnungsweite gegeben, um das Überkorn (Korngröße > 32 mm) zu separieren, und anschließend getrocknet. Danach wurde der jeweilige Zielwassergehalt eingestellt. Das vorbereitete UBG wurde in eine Einbauform in 4 Lagen eingebaut. Für jede Lage wurde eine der geforderten Probenmenge entsprechende Masse in die Form gegeben und mit einem Boschhammer (GSH 11E) mit Verdichtungsteller ($\varnothing = 115$ mm) solange verdichtet, bis die vorgegebene Solldichte erreicht war. Um verzahnte Schichtgrenzen und eine homogene Probe über die gesamte Höhe zu erhalten,

Gestein	Probenbezeichnung	Trockendichte Probe ρ_{d} [Mg/m ³]	Wassergehalt Probe w [M.-%]
Diabas	Diabas_70_97	2,133	3,4
	Diabas_85_97	2,133	4,1
Granodiorit	Grano_70_97	2,088	3,4
	Grano_85_97	2,088	4,2
Grauwacke	Grauwacke_70_97	1,987	3,6
	Grauwacke_85_97	1,987	4,4
Kalkstein	Kalk_70_97	2,090	4,1
	Kalk_85_97	2,090	4,9
Kies	Kies_70_97	1,912	3,4
	Kies_85_97	1,912	4,2
MIX Diabas	MixDia_70_97	2,168	3,3
	MixDia_85_97	2,168	4,0

Tab. 6-1: Wassergehalte und Trockendichten der untersuchten UBG

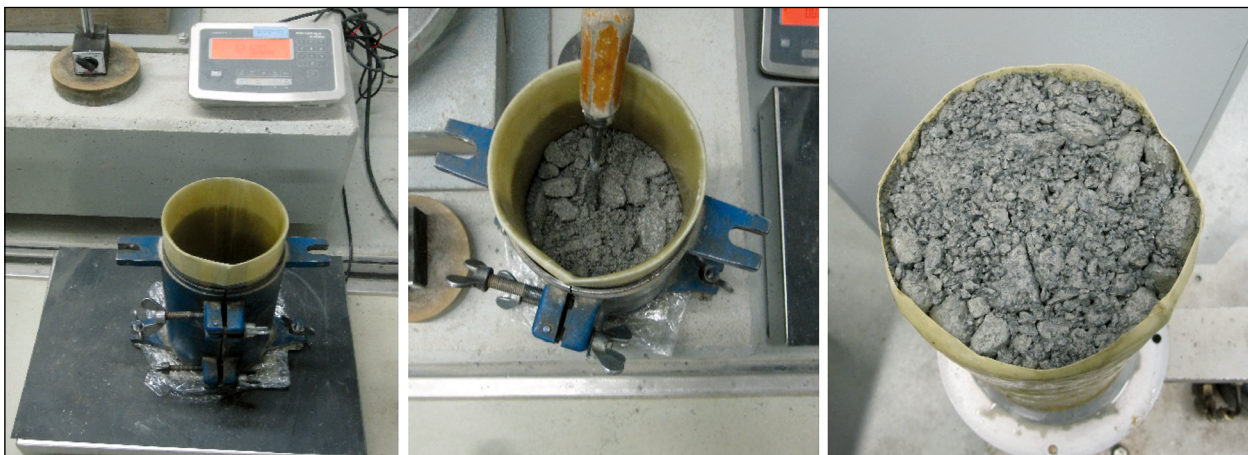


Bild 6-3: Probekörperherstellung für den Triaxialversuch

wurde die Oberfläche jeder Zwischenlage nach dem Verdichten wieder aufgekratzt. Da es sich um kohäsionslose (bzw. -arme) Lockergesteine handelte und die Versuche unter dränierten Bedingungen durchgeführt wurden, waren keine Konsolidierungsphasen erforderlich. Die Versuche wurden in der Regel unmittelbar nach Fertigstellung der Probekörper durchgeführt.

Die Probekörperherstellung erfolgte unter Zuhilfenahme einer für UBG entwickelten Einbauhilfe. Diese besteht aus einem dünnwandigen Kunststoffinnenzylinder, welcher in die in die zylindrische Stahlform eingebaut wird. Beim Ausschalen des Probekörpers wird zuerst nur die Stahlform entfernt. Während dieses Vorganges stabilisiert der Kunststoffzylinder den Probekörper. In einem zweiten Arbeitsschritt wird der Kunststoffzylinder geöffnet und entfernt. Anschließend wird die Formstabilität des Probekörpers nur durch die dünne Gummimembran und die Kohäsionskräfte im UBG gewährt (siehe Bild 6-4).

6.3 Vorversuche

Für die Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens sind Spannungsverhältnisse zu wählen, die nahezu ausschließlich elastischen Verformungen des Probekörpers führen. Um diesen Zustand zu erreichen, d. h. die anfänglichen hohen plastischen Verformungen vorwegzunehmen, ist es notwendig, eine Vorbelastung aufzubringen. Diese Vorbelastung wurde durch einen Vorversuch mit einer Zellspannung von 150 kPa, einer Deviatorspannung von 300 kPa und 20.000 Lastwechseln bei 10 Hz realisiert. Der Versuch wird spannungsgere-

gelt durchgeführt. Untersuchungen im Forschungsprojekt FE 09.0175/2011/ERB [WEL 14] haben gezeigt, dass mit der Wahl dieser Spannungsverhältnisse am Ende der Vorversuche vorwiegend nur elastische Verformungen auftreten und die plastische Dehnungsrate sehr gering ist. Die gewählte Belastungsfrequenz von 10 Hz sichert für den Vorversuch eine ausreichend genaue Messerfassung bei kurzer Versuchsdauer. Bild 6-5 zeigt für die Vorversuche mit Diabas die Entwicklung der plastischen Dehnungen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl. Die anfänglich hohen Dehnungsraten klingen schnell ab, spätestens nach 5.000 Lastwechseln kann der Kurvenverlauf hinreichend genau durch eine Gerade mit geringem Anstieg beschrieben werden. In Anlage 2 sind die Ergebnisse der Vorversuche für alle untersuchten UBG aufge-

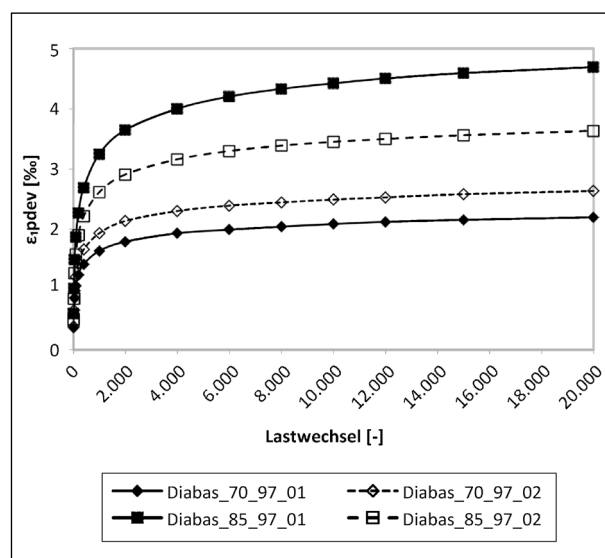


Bild 6-5: Entwicklung der plastischen Dehnungen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl beim Vorversuch



Bild 6-4: Probekörperherstellung – Links: Probekörper im Kunststoffzylinder, nach Entfernen der Stahlschalen, Mitte: Probekörper mit Gummimembran, Rechts: vollständig ausgeschalteter Probekörper nach Versuchsdurchführung (Diabas)

führt. Die Versuche zum elastischen- und plastischen Verformungsverhalten werden als Multistage-Versuch am gleichen Probekörper durchgeführt. Die Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens erfolgt unmittelbar nach den Versuchen zum elastischen Verformungsverhalten.

6.4 Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens im Triaxialversuch

6.4.1 Versuchsablauf

Die Ergebnisse der Triaxialversuche zur Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens sollen die Bestimmung der Parameter für das elastische Stoffmodell ermöglichen.

Um das Verformungsverhalten in einem möglichst großen Belastungsbereich beschreiben zu können, erfolgten die Triaxialversuche bei verschiedenen Hauptspannungsverhältnissen sowie bei unterschiedlichen Zellspannungen. Ausgangspunkt für die Wahl der Spannungsverhältnisse und Laststufen der Versuchsprozedur sind die Ergebnisse der FE-Berechnungen, welche für zwei Straßenbefestigungen durchgeführt wurden (siehe Kapitel 4 und 4.2).

Bild 6-6 zeigt die gewählten Spannungspfade, in Bild 6-7 sind die aufgebrachten Spannungen zu sehen. Insgesamt wurde zur Bestimmung des elasti-

schen Verformungsverhaltens jede Probe 35 unterschiedlichen Spannungen ausgesetzt. Zuerst wurde ein hydrostatischer Spannungszustand durch zeitgleiches Aufbringen der konstanten Zellspannung ($\sigma_3 = 100, 150, 180, 210, 250$ und 290 kPa) und einer vertikalen Spannung $\sigma_1 = \sigma_3$ eingestellt. Danach wurden bei konstanter Zellspannung jeweils zusätzliche sinusförmige Vertikalspannungen σ_d auf die Probe gegeben. Die Spannungsverhältnisse σ_1/σ_3 variierten zwischen 1 und 2,7. Die Vertikalbelastung σ_d wurde bei allen Versuchen sinusförmig mit einer Frequenz von 1 Hz aufgebracht.

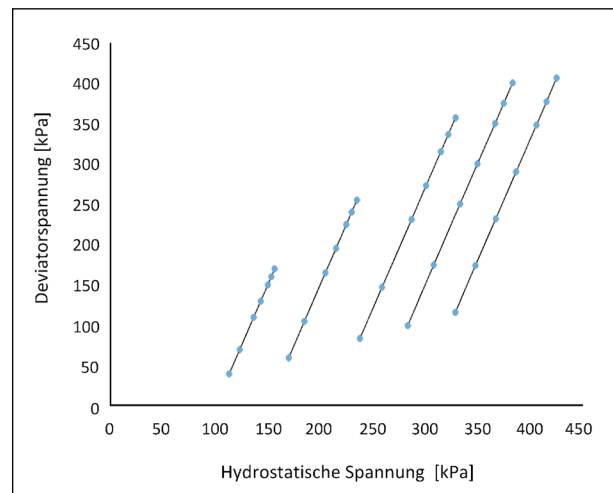


Bild 6-6: Spannungspfade für die Untersuchung der elastischen Verformungseigenschaften im Triaxialversuch

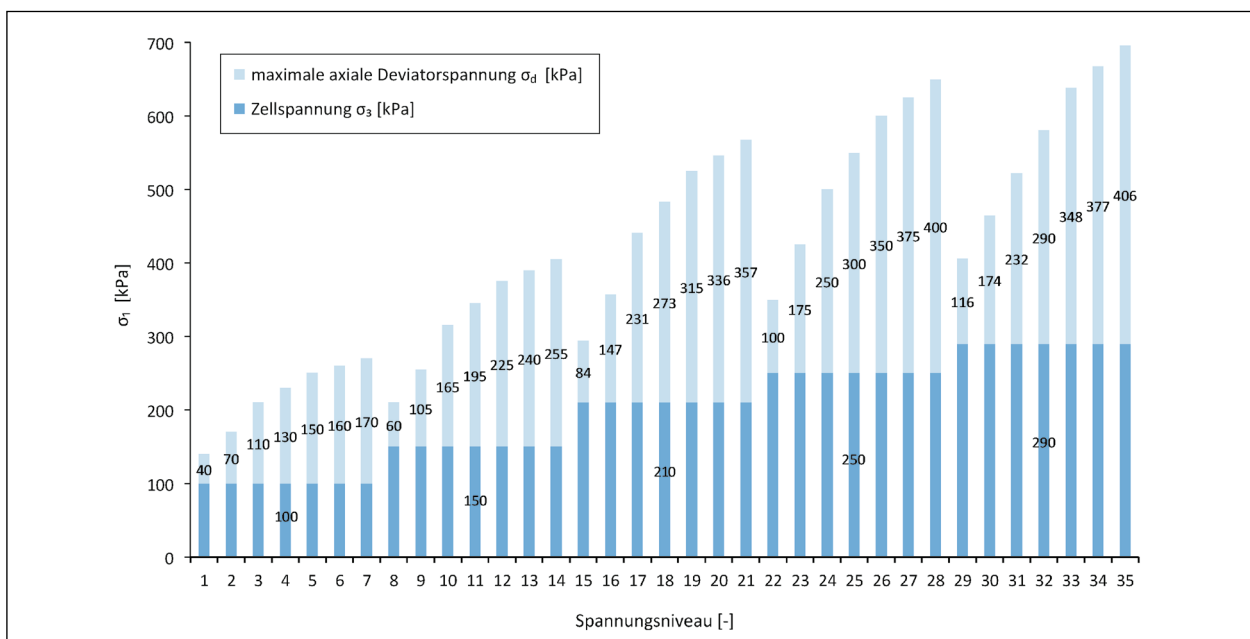


Bild 6-7: Spannungen für die Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens, je Laststufe 100 LW bei 1 Hz

Untersuchte Baustoffgemische	Wassergehalt	Versuche zur Bestimmung des elastischen Verformungsverhaltens	Versuche zur Klassifizierung von UBG	Versuche zur Bestimmung des plastischen Verformungsverhaltens	
Material 1	nat. Wassergehalt (70 % w_{opt})	35	1	7	Doppelbelegung
		35	1	7	
	erhöhter Wassergehalt (85 % w_{opt})	35	1	7	Doppelbelegung
		35	1	7	

Tab. 6-2: Aufstellung der zyklischen Triaxialversuche für ein Material (mit Doppelbelegung)

Korngrößenverteilung	Variable in Abstimmung mit dem BA (max. Korngröße 32 mm)
Probekörperabmessungen	150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe
Probenherstellung	Vibrationshammer
Zieldichte	97 % Proctordichte
Wassergehalt	70 % w_{opt} und 85 % w_{opt}
Triaxialanlage	Sinusförmige vertikale Belastung und konstantem Stützdruck
Drainierung	Drainierte Bedingungen
Spannungsverhältnisse	Vorversuch: $\sigma_1 = 450$ kPa $\sigma_3 = 150$ kPa Bestimmung der elastischen Parameter: siehe Tabelle 4-3 und Bild 6-7 Bestimmung der plastischen Parameter siehe Tabelle 4-2 und Bild 6-13
Lastwechselzahlen/ Frequenz	Vorversuch: 20.000 Lastwechsel bei 10 Hz Elastische Parameter: je Spannungsniveau 100 Lastwechsel bei 1 Hz Plastische Parameter: je Spannungsniveau 50.000 Lastwechsel bei 5 Hz

Tab. 6-3: Versuchsparameter für die zyklischen Triaxialversuche

Vorversuch			
	Lastwechsel (LW)	Aufzeichnung	LW Gesamt
	1 – 1.000	komplett	1.000
	1.001 – 20.000	10 LW je 100 LW	1.900
Summe Vorversuch			2.900
Versuche zum elastischen Veformungsverhalten			
	Lastwechsel (LW)	Aufzeichnung	LW Gesamt
je Laststufe	1 – 100	komplett	100
Summe elastische Versuche (35 Laststufen)			3.500
Versuche zum plastischen Veformungsverhalten			
	Lastwechsel (LW)	Aufzeichnung	LW Gesamt
je Laststufe	1 – 50	komplett	50
	51 – 1.000	10 LW je 100 LW	90
	1.001 – 50.000	10 LW je 5.000 LW	100
Summe je Laststufe			240
Summe plastische Versuche (7 Laststufen)			1.680

Tab. 6-4: Triaxialanlage, aufgezeichnete Versuchsdaten

Vorversuch	
plastische Dehnung kumulativ	komplett
elastische Dehnung	5 LW bei LW {5;15;45;95;195;395;995;1.995;3.995;5.995;7.995;9.995;11.995;14.9995;19.9992}
Versuche zum elastischen Veformungsverhalten	
elastische Dehnung	je Laststufe 5 LW bei LW {92}
Versuche zum plastischen Veformungsverhalten	
plastische Dehnung kumulativ	komplett
elastische Dehnung	je Laststufe 5 LW bei LW {5;45;195;495;995;4.995;14.995;19.995;24.995;29.995;34.995;39.995;44.995;49.992}

Tab. 6-5: Triaxialversuch, ausgewertete Versuchsdaten

6.4.2 Ergebnisse der elastischen Triaxialversuche

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurden für ein aufgebrachtes Spannungsverhältnis die jeweils 5 letzten Lastwechsel einer Lastwechselgruppe ausgewertet. Der Elastizitätsmodul kann als Sekantenmodul definiert werden (Anstieg der Linie zwischen der hydrostatischen Spannung und der maximalen vertikalen Spannung).

$$E_r = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1^{el}} = \frac{\sigma_{1,dev}}{\varepsilon_{1,dev}^{el}} \quad \text{Gl. 16}$$

mit

E_r	Elastizitätsmodul [MPa]
σ_1	vertikale Spannung [kPa]
$\sigma_{1,dev}$	vertikale deviatorische Spannung [kPa]
ε_1^{el}	vertikale elastische Dehnungen [‰]
$\varepsilon_{1,dev}^{el}$	vertikale elastische deviatorische Dehnungen [‰]

In Bild 6-8 und Bild 6-9 sind exemplarisch die grundlegenden Darstellungsvarianten für zwei Versuchsreihen zu sehen. Es sind die Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit von der Deviatorspannung und der Zellspannung dargestellt. Alle Diagramme zeigen deutlich eine Staffelung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der wirkenden Zellspannung. Diese Ergebnisse bestätigen die bisherigen Kenntnisse über das Veformungsverhalten von UBG. Eine höhere Zellspannung bewirkt durch das stärkere Zusammendrücken der einzelnen Körner einen Stei-

figkeitszuwachs und somit eine Erhöhung des Veformungswiderstandes gegenüber einer einwirkenden Belastung. Der Einfluss der Deviatorspannung auf den Elastizitätsmodul ist erkennbar, jedoch ist dieser weniger deutlich ausgeprägt im Vergleich zum Einfluss der Zellspannung auf den Elastizitätsmodul, insbesondere bei niedrigen Deviatorspannungen. Die Diagramme zu allen Versuchsreihen sind in Anlage 11 enthalten.

6.4.3 Bestimmung der Parameter für das modifizierte Universal-Modell

Die Stoffparameter der jeweiligen Baustoffgemische für das modifizierte Universal-Modell (Gleichung 10) wurden anhand der Triaxialversuche zur Bestimmung des elastischen Veformungsverhaltens ermittelt. Die Bestimmung der Modellparameter k_1 , k_2 und k_3 erfolgte mittels Regressionsrechnung (Methode der kleinsten Fehlerquadrate). Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 6-6 dargestellt. Die ermittelten Modellparameter sind nur für die untersuchten UBG, Dichten und Wassergehalte (70 % und 85 % w_{opt}) gültig.

Für die untersuchten UBG wurde bei der Regression ein Bestimmtheitsmaß R^2 von mindestens 94 % erreicht. Unter 97 % lagen nur die Serien Grano_85_97, Grauwacke_70_97, und Grauwacke_85_97. Die Diagramme in Bild 6-10 zeigen exemplarisch eine Gegenüberstellung der gemessenen und mit den Modellparametern in Tabelle 6-6 nach Gleichung 10 berechneten Elastizitätsmoduln für den untersuchten Diabas. Entsprechende Darstellungen für alle untersuchten Baustoffgemische sind in Anlage 13 abgelegt.

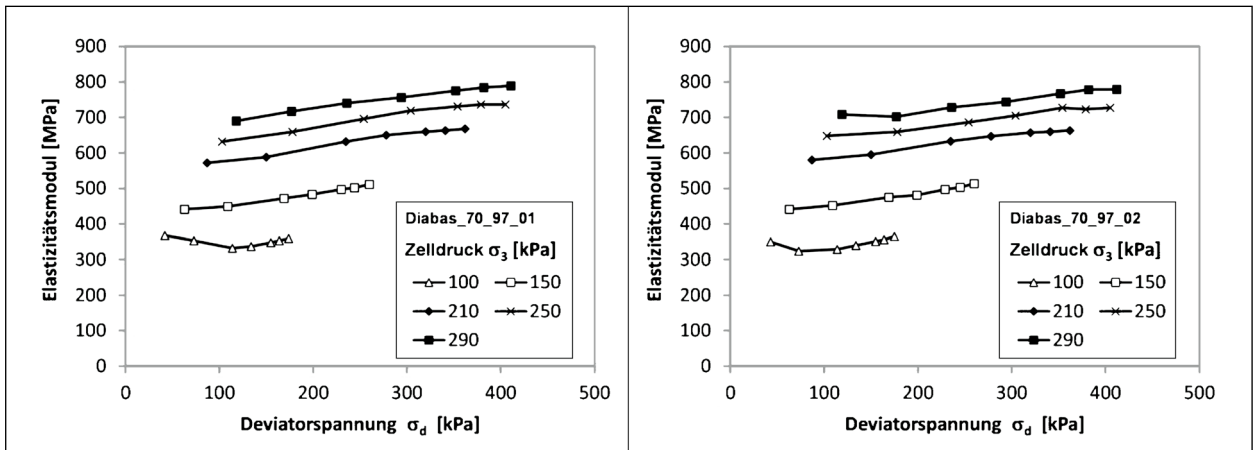


Bild 6-8: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung für verschiedene Zellspannungen (Diabas; w = 70 % w_{opt}; ρ = 97 % D_{pr})

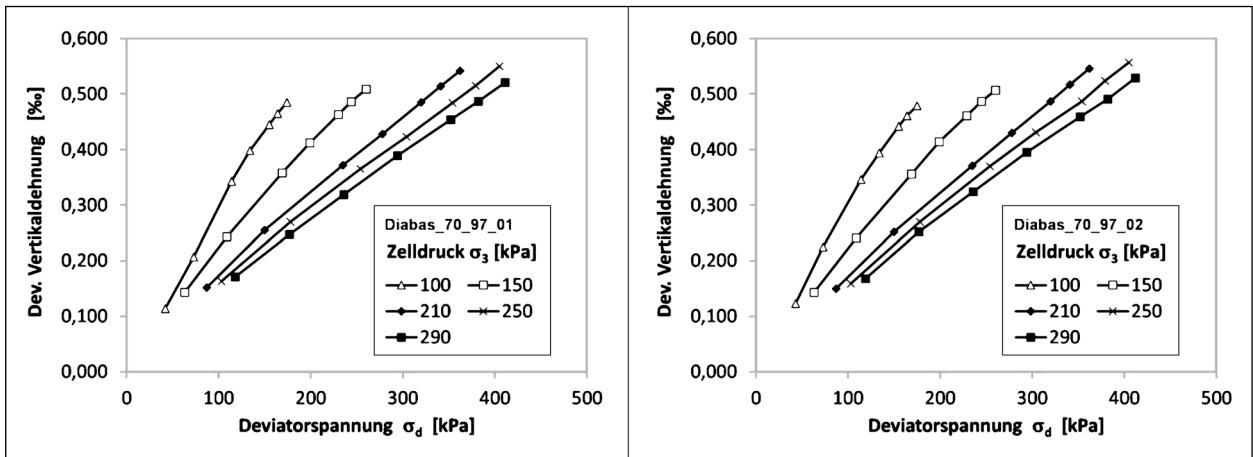


Bild 6-9: Elastische deviatorische Dehnungen in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung für verschiedene Zellspannungen (Diabas; w = 70 % w_{opt}; ρ = 97 % D_{pr})

Baustoffgemisch	$E_r = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$			
	k ₁ [Mpa]	k ₂	k ₃	R ²
Diabas_70_97	114,26	0,8497	-0,2131	98,3 %
Diabas_85_97	108,65	0,8657	-0,2662	98,3 %
Grano_70_97	70,42	0,8308	-0,1401	98,2 %
Grano_85_97	68,32	0,8541	-0,1614	95,7 %
Grauwacke_70_97	92,65	0,8436	-0,2563	94,0 %
Grauwacke_85_97	93,75	0,8296	-0,2539	96,6 %
Kalk_70_97	116,33	0,8737	-0,2252	98,0 %
Kalk_85_97	115,47	0,8469	-0,1936	97,3 %
Kies_70_97	69,38	0,8812	-0,1776	97,3 %
Kies_85_97	70,88	0,8938	-0,1784	97,4 %
MixDia_70_97	130,26	0,8542	-0,2235	98,7 %
MixDia_85_97	130,2	0,8245	-0,2125	97,4 %

Tab. 6-6: Modellparameter für Gleichung 10 und Bestimmtheitsmaß R² der untersuchten UBG

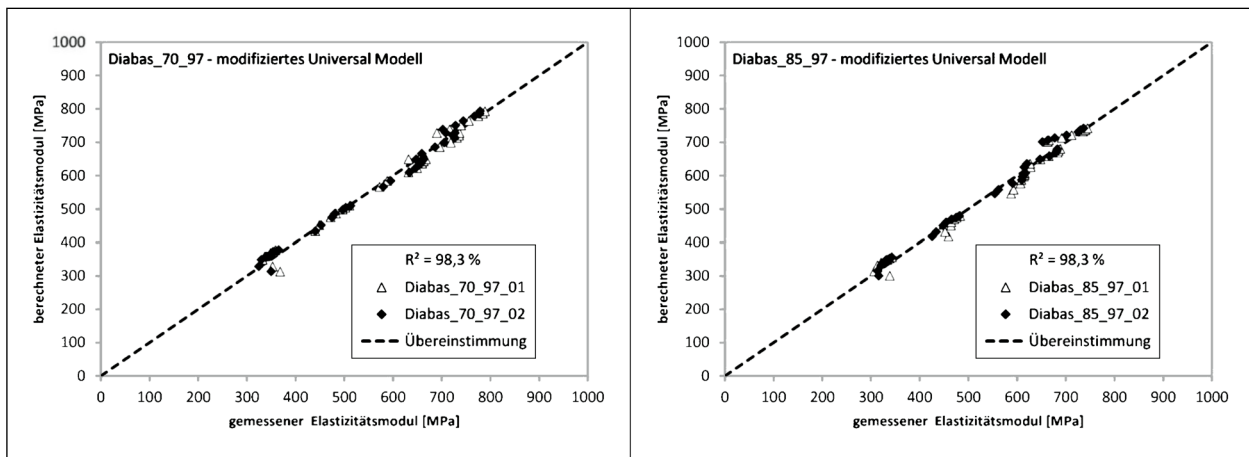


Bild 6-10: Gegenüberstellung der gemessenen und mit Gleichung 10 berechneten Elastizitätsmodul (Diabas; $w = 70$ und 85 %; w_{opt} ; $Q = 97$ % D_{pr})

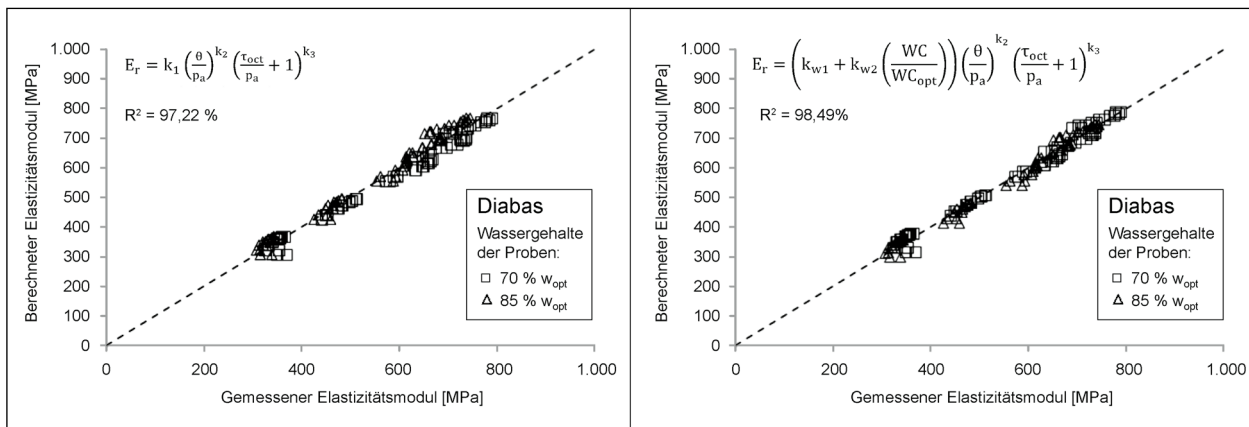


Bild 6-11: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Elastizitätsmodul Triaxialversuche mit Diabas (links: erster Schritt, rechts: zweiter Schritt der Regressionsrechnung)

6.4.4 Bestimmung der Parameter für das erweiterte modifizierte Universal-Modell

Ergänzend zu den Stoffparametern für Gleichung 10 wurden die Parameter für das erweiterte Modell nach Gleichung 12 bestimmt (siehe Kapitel 3.2.3). Die Berechnung erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden, analog zur Vorgehensweise im Kapitel 6.4.3, für Gleichung 10 die Parameter k_1 , k_2 und k_3 mittels Regressionsrechnung ermittelt. Abweichend zu Kapitel 6.4.3 wurden in diese Regressionsrechnung jedoch alle Messergebnisse eines UBG, unabhängig vom Wassergehalt der Probe, einbezogen. Im zweiten Berechnungsschritt wurden die zuvor (im Schritt 1) ermittelten Parameter k_2 und k_3 in Gleichung 12 eingesetzt und durch lineare Regression die Parameter k_{w1} und k_{w2} berechnet.

Die Verbesserung der Anpassungsgüte des Modells zwischen erstem und zweitem Berechnungsschritt ist in Bild 6-11 erkennbar. Gegenüber Schritt

1 wird im rechten Bild (Schritt 2) vor allem im oberen Bereich eine bessere Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Elastizitätsmodul erzielt.

Mit Verweis auf das Bestimmtheitsmaß der jeweiligen Regression haben beide Modelle (Gleichung 10 mit Parametern in Tabelle 6-6 und Gleichung 12, mit Parametern in Tabelle 6-7) nahezu die gleiche, hohe Anpassungs- oder Approximationsgüte. Mit annähernd dem gleichem Verhältniswert $k_{w2}/(k_{w1}+k_{w2})$ besitzen die Baustoffgemische Diabas und MIXDiabas die gleiche Abhängigkeit der elastische Verformungseigenschaften vom Wassergehalt. Der Elastizitätsmodul von Kalkstein und Kies ist ebenfalls deutlich vom Wassergehalt abhängig, jedoch nimmt, entgegen den Erfahrungen aus anderen Forschungsprojekten, bei Kies die Steifigkeit mit steigendem Wassergehalt zu (k_{w2} mit positivem Vorzeichen). Bei Grauwacke und Granodiorit beeinflusst der Wassergehalt augenscheinlich kaum das

Baustoffgemisch	$E_r = \left(k_{w1} + k_{w2} \left(\frac{WC}{WC_{opt}} \right) \right) \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$					
	k_{w1} [MPa]	k_{w2}	k_2	k_3	R^2	$k_{w2}/(k_{w1}+k_{w2})$
Diabas	143,96	-41,98	0,858	-0,239	98,5 %	-0,41
Granodiorit	67,41	2,65	0,842	-0,151	97,4 %	0,04
Grauwacke	102,19	-11,36	0,836	-0,255	94,8 %	-0,13
Kalkstein	141,95	-33,30	0,860	-0,209	98,5 %	-0,31
Kies	52,46	22,86	0,887	-0,177	98,0 %	0,30
MIXDiabas	169,02	-50,13	0,839	-0,218	98,4 %	-0,42

Tab. 6-7: Modellparameter für Gleichung 12, Bestimmtheitsmaß R^2 und Verhältnis k_{w1}/k_{w2} für die untersuchten UBG; Ergebnisse der Triaxialversuche

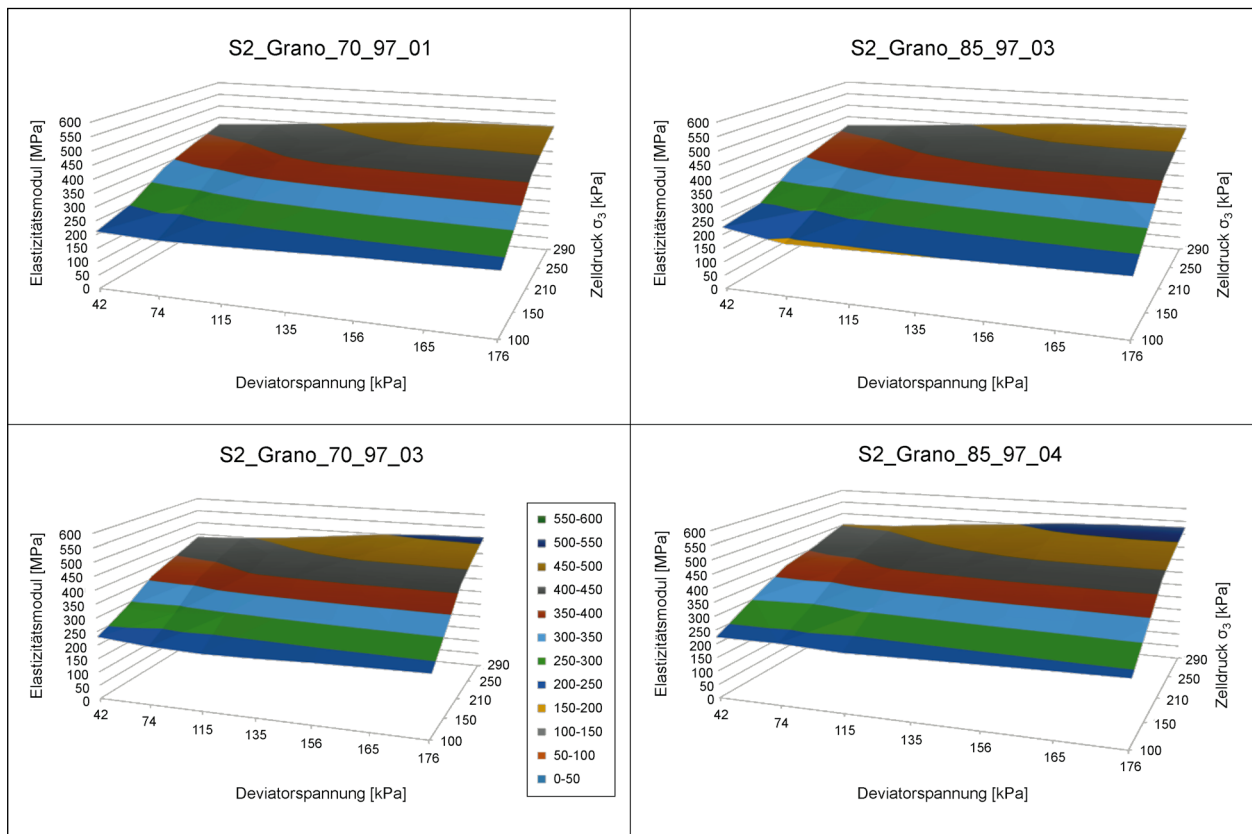


Bild 6-12: Messergebnisse Triaxialversuch, elastische Parameter, 3D-Visualisierung

elastische Verformungsverhalten. Auffällig ist hier wieder die wassergehaltsabhängige Zunahme der Steifigkeit beim Granodiorit.

Entsprechend der Visualisierung der Messergebnisse für die Proben aus Granodiorit (Bild 6-12) ergibt sich eine gute Übereinstimmung für die in einer Zeile angeordneten Probenpaare {Grano_70_97_01, Grano_85_97_03} und {Grano_70_97_03, Grano_85_97_04}. Die Zusammengehörigkeit entsprechend dem Wassergehalt der Proben ent-

spricht jedoch den Spalten, Spalte 1 {Grano_70_97_01; Grano_70_97_03}; Spalte 2 {Grano_85_97_03; Grano_85_97_04}. Die Aufzeichnungen zur Probenherstellung und die Messwertdateien der Prüfmaschinen bestätigen die, augenscheinlich nicht zutreffende, Zuordnung in Spalten, d. h. die Probenbezeichnung in Bild 6-12 ist korrekt. Aus dieser Zuordnung und den gegenüber der Probe Grano_70_97_01 geringeren Steifigkeiten der Probe Grano_85_97_03 resultiert das positive Vorzeichen des Parameters k_{w2} .

Die größere Steifigkeit der Proben mit höherem Wassergehalt für Kies ist ebenfalls in der 3D-Visualisierung (Anlage 20) sichtbar.

6.5 Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens mit dem Triaxialversuch

6.5.1 Versuchsablauf

Zur Beschreibung und Einschätzung des plastischen Verformungsverhaltens wurden an jedem UBG Multi-Stage-Triaxialversuche bei jeweils zwei Wassergehalten durchgeführt.

Zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens wurden 7 Belastungsstufen mit je 50.000 Lastwechseln (Multi-Stage-Versuche analog EN 13286-7 [EN 13286-7]) und einer Frequenz von 5 Hz auf die Probe aufgebracht. Das Multi-Stage-Verfahren stellt eine verkürzte Methode zur Beurteilung des plastischen Verformungsverhaltens dar, wobei unterschiedliche Spannungsniveaus nacheinander auf ein und denselben Probekörper mit einer bestimmten Lastwechselzahl aufgebracht werden. Auf die Probekörper wurden Spannungen gemäß Tabelle 4-2 aufgebracht. Diese Spannungsniveaus basieren auf Erfahrungen aus dem Forschungsvorhaben FE 09.0175/2011/ERBFE [WEL 14] und den ermittelten Belastungsniveaus (siehe Kapitel 4.2, Bild 4-2). Sie unterscheiden sich von den Spannungsniveaus nach EN 13286-7 Tabelle 6 und 7 [EN 13286-7].

6.5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Triaxialversuche zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens sind in Anlage 4 und Anlage 9 dargestellt. Bild 6-14 zeigt exemplarisch die Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl für die Versuche mit Diabas bei einem Wassergehalt von 70 % w_{opt} . Nach jeweils 50.000 Lastwechseln wird ein höheres Beanspruchungsniveau auf die Probe gebracht (Spannungswerte in Bild 6-12 und Bild 6-13). Dabei ist sehr gut die Spannungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls zu erkennen, mit steigendem Beanspruchungsniveau nimmt die Steifigkeit des UBG zu. In jeder Laststufe nehmen die plastischen Dehnungen während der ersten Lastwechsel (ca. 500 LW) rasch zu (Nachverdichtung).

Anschließend kommt es in den Laststufen 1 und 2 zu einer Stabilisierung der plastischen Dehnungen auf nahezu konstantem Niveau. Im Unterschied dazu ist in den Laststufen 3, 4 und 5 auch nach der anfänglichen Nachverdichtungsphase eine stetige Zunahme der plastischen Dehnung auf niedrigem Niveau zu beobachten. In den Belastungsstufen 6 und 7 ist keine Stabilisierungsphase zu erkennen, hier nimmt die plastische Dehnung auf hohem Niveau zu (zunehmendes Versagen). Die Bilder mit der Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl zu allen untersuchten UBG befinden sich in Anlage 9.

Die Ergebnisse der Triaxialversuche in Form der vertikalen plastischen Dehnungen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl für die untersuchten UBG mit unterschiedlichen Wassergehalten zeigt Bild 6-15. Bis zur Laststufe 5 (LW 200.000 – 250.000) scheint der Wassergehalt bei allen Baustoffgemischen keinen wesentlichen Einfluss auf das plastische Verformungsverhalten zu haben. Die Differenz der akkumulierten plastischen Dehnungen der einzelnen Probekörper bei gleicher Lastwechselzahl ist gering. Für Diabas, Granodiorit und MixDiabas ist eine eindeutige (aber geringe) Zunahme der plastischen Dehnungen bei steigendem Wassergehalt festzustellen. Bei den Versuchen mit Kalkstein und Grauwacke ist keine eindeutige Tendenz vorhanden. Beim untersuchten Kies nahm der Widerstand gegen plastische Verformung mit steigendem Wassergehalt zu.

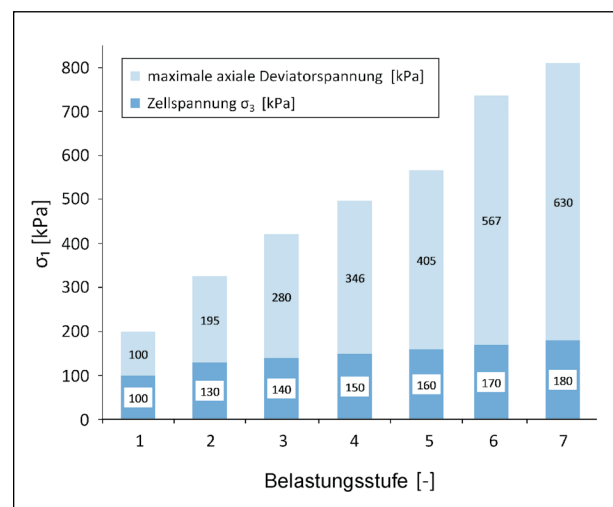


Bild 6-13: Belastungsniveaus für die Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens, je Laststufe 50.000 LW bei 5 Hz

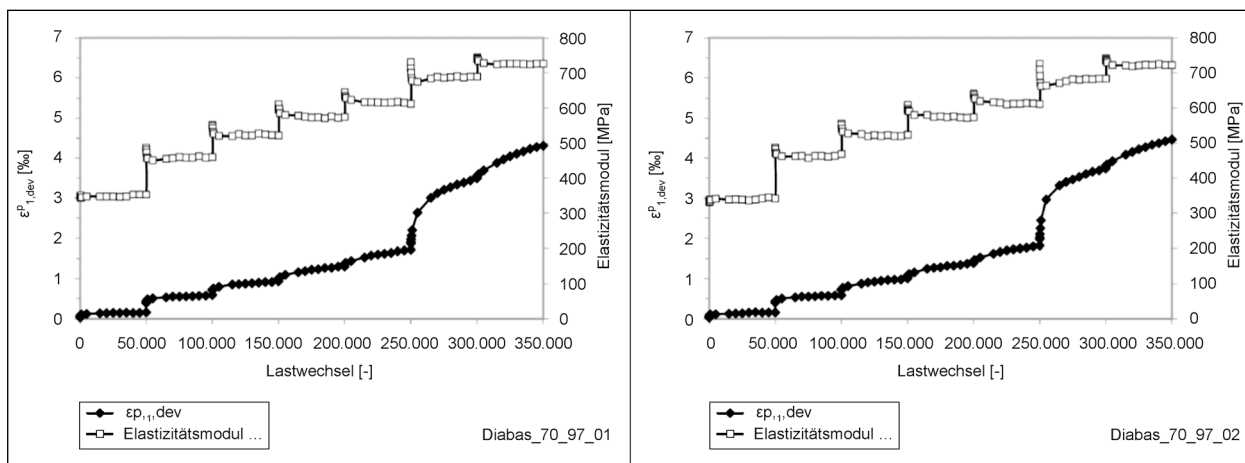


Bild 6-14: Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl – Versuche mit Diabas bei einem Wassergehalt von 70 % w_{opt}

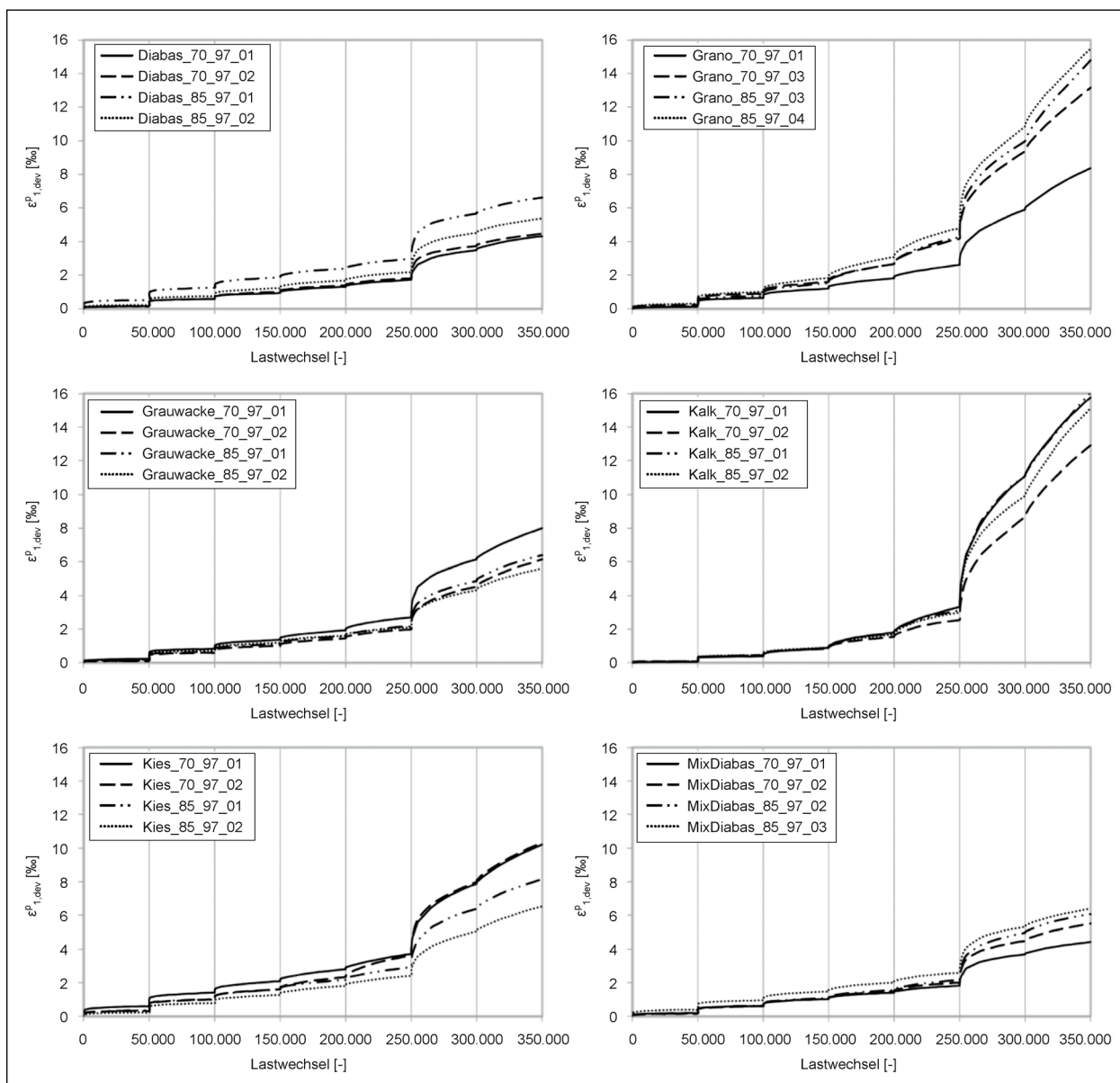


Bild 6-15: Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen für alle untersuchten UBG

6.5.3 Bestimmung der Parameter für das plastische Modell

Die Parameter a_1 und a_2 für das bereits im FE 09.0175/2011/ERB [WEL 14] verwendete plastische Modell (siehe Kapitel 3.3 und Gleichung 13) wurden anhand der Ergebnisse der Triaxialversuche für die untersuchten UBG ermittelt. Dabei erfolgte keine Berücksichtigung der Nachverdichtungsphase. Die plastische Dehnungsrate wurde mithilfe der plastischen akkumulierten Dehnungs-

Baustoffgemisch	$\lambda = a_1 (\epsilon_{1,lab}^{el})^{a_2}$		
	a_1	a_2	R^2
Diabas_70_97	13,500	3,044	95,2 %
Diabas_85_97	12,873	2,669	93,1 %
Grano_70_97	8,773	4,897	89,6 %
Grano_85_97	10,575	5,420	99,1 %
Grauwacke_70_97	10,686	4,332	97,4 %
Grauwacke_85_97	8,715	3,803	97,4 %
Kalk_70_97	153,049	5,492	96,4 %
Kalk_85_97	163,641	6,590	99,4 %
Kies_70_97	10,400	4,248	98,1 %
Kies_85_97	9,375	4,118	95,7 %
MixDia_70_97	25,940	3,348	90,4 %
MixDia_85_97	26,238	3,134	93,3 %

Tab. 6-8: Modellparameter für Gleichung 13 und Bestimmtheitsmaß R^2 für die untersuchten UBG, Triaxialversuch

kurve bestimmt, indem der Anstieg der Kurve zwischen dem 25.000-ten und dem 50.000-ten Lastwechsel (Gleichung 14) für jedes der sieben aufgebrauchten Spannungsverhältnisse genutzt wurde. Die für Gleichung 13 ermittelten Materialparameter (a_1 ; a_2) der untersuchten Baustoffgemische sind in Tabelle 6-8 aufgeführt. Werden die mit den Parametern a_1 und a_2 berechneten plastischen Dehnungen mit den im Triaxialversuch gemessenen Dehnungen gegenübergestellt, so ergibt sich für Granodiorit die Darstellung in Bild 6-16 bzw. in Anlage 17 (alle Baustoffgemische).

Die Beobachtungen aus Kapitel 6.5.2 spiegeln sich auch in den Parametern für das plastische Modell wider. Infolge des geringen Einflusses des Wassergehaltes unterscheiden sich die Modellparameter kaum.

6.5.4 Abhängigkeit der plastischen Verformungen vom Wassergehalt

Um den Einfluss des Wassergehaltes besser zu verdeutlichen, wurde das dehnungsbasierte Modell (Gleichung 13) auf gleiche Weise wie das modifizierte Universal-Modell erweitert (siehe Gleichung 12). Die Aufteilung des Parameters a_1 in einen konstanten (a_{w1}) und einen vom Wassergehalt abhängigen Anteil (a_{w2}) ist in Gleichung 17 dargestellt.

$$\lambda = \left(a_{w1} + a_{w2} \left(\frac{WC}{WC_{opt}} \right) \right) (\epsilon_{1,lab}^{el})^{a_2} \quad \text{Gl. 17}$$

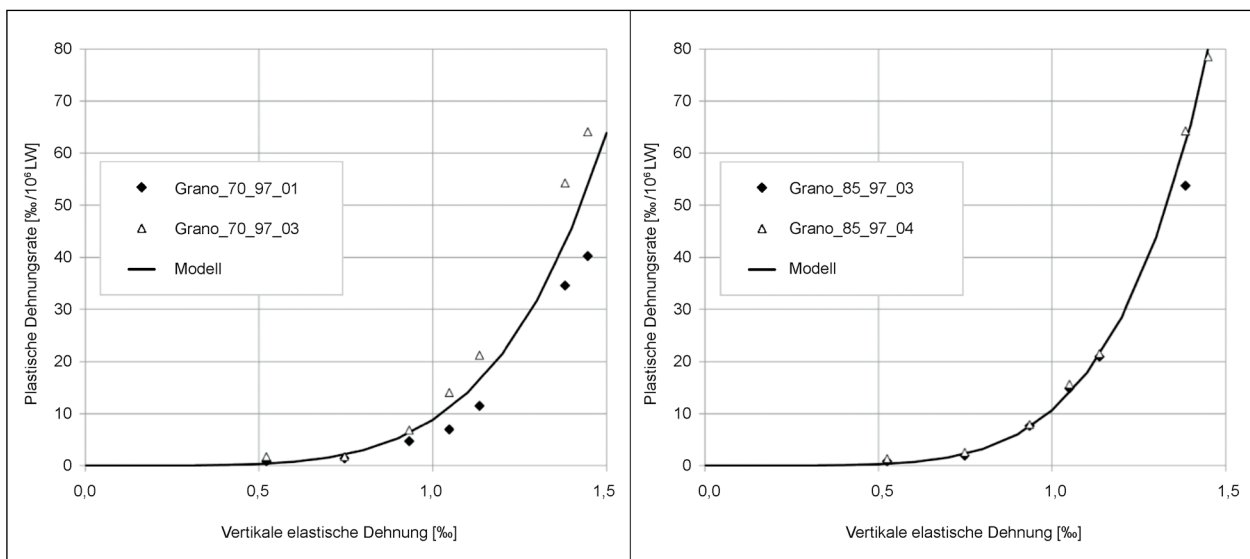


Bild 6-16: Vertikale plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit von den vertikalen elastischen Dehnungen, Modell nach Gleichung 13, Triaxialversuch Granodiorit

mit

a_{w1}, a_{w2} Materialparameter[$1/10^6$ Zyklen]

W Wassergehalt [M.-%]

W_{opt} optimaler Wassergehalt [M.-%]

Die Ermittlung der Parameter erfolgte analog zu der im Kapitel 6.4.4 beschriebenen Vorgehensweise in zwei Berechnungsschritten unter Einbeziehung aller Versuchsergebnisse, unabhängig vom Wassergehalt. Die Berechnungsergebnisse zeigt Tabelle 6-9. Für die Mehrheit der UBG konnte bereits im ersten Berechnungsschritt eine gute Abbildungsgüte des Modells erzielt werden, was eine geringe Wasserabhängigkeit vermuten lässt. Es ist hierbei zu beachten, dass die Wasserabhängigkeit des elastischen Verformungsverhaltens bereits in die Modellierung eingeht.

Die (im Verhältnis zu a_{w1}) großen Werte für a_{w2} (Granodiorit, MIX Diabas) sind mit Bezug auf Bild 6-15 als Ergebnis der eindeutigen Tendenz zu interpretieren. Für Ergebnisse mit uneindeutiger Tendenz (Kalkstein, Grauwacke) ist der Parameter a_{w2} Null. Generell sind die Parameter und Berechnungsergebnisse des Modells im Kontext mit dem Berechnungsmodell für die elastischen Dehnungen zu sehen. Ein Teil des Wassereinflusses auf das Verformungsverhalten wird bereits durch die wasserhaltabhängigen Parameter des elastischen Modells kompensiert. Die Lage der Messpunkte im Bezug zum Berechnungsmodell für Diabas und Granodiorit ist in Bild 6-17 zu sehen. Darstellungen für alle Baustoffe sind in Anlage 19 enthalten. Inwiefern die vorgenommene Erweiterung des Modells geeignet ist, die Abhängigkeit des Verformungsverhaltens vom Wassergehalt abzubilden, lässt sich

Material	$\lambda = a_1 (\epsilon_{1,lab}^{el})^{a_2}$			$\lambda = \left(a_{w1} + a_{w2} \left(\frac{WC}{WC_{opt}} \right) \right) (\epsilon_{1,lab}^{el})^{a_2}$			
	Berechnungsschritt 1			Berechnungsschritt 2			
	a_1	a_2	R^2	a_{w1}	a_{w2}	a_2	R^2
Diabas	12,09	2,58	93,90 %	13,01	0,00	2,58	94,39 %
Granodiorit	10,81	4,24	89,95 %	0,00	12,45	4,24	95,09 %
Grauwacke	9,57	3,37	92,71 %	9,86	0,00	3,37	93,13 %
Kalkstein	99,17	4,93	97,46 %	155,94	0,00	4,93	97,69 %
Kies	10,30	3,40	95,60 %	9,62	0,00	3,40	96,72 %
MIX Diabas	22,99	2,98	92,32 %	18,12	10,39	2,98	93,00 %

Tab. 6-9: Modellparameter für Gleichung 17 und Bestimmtheitsmaß R^2 für die untersuchten UBG, Triaxialversuch

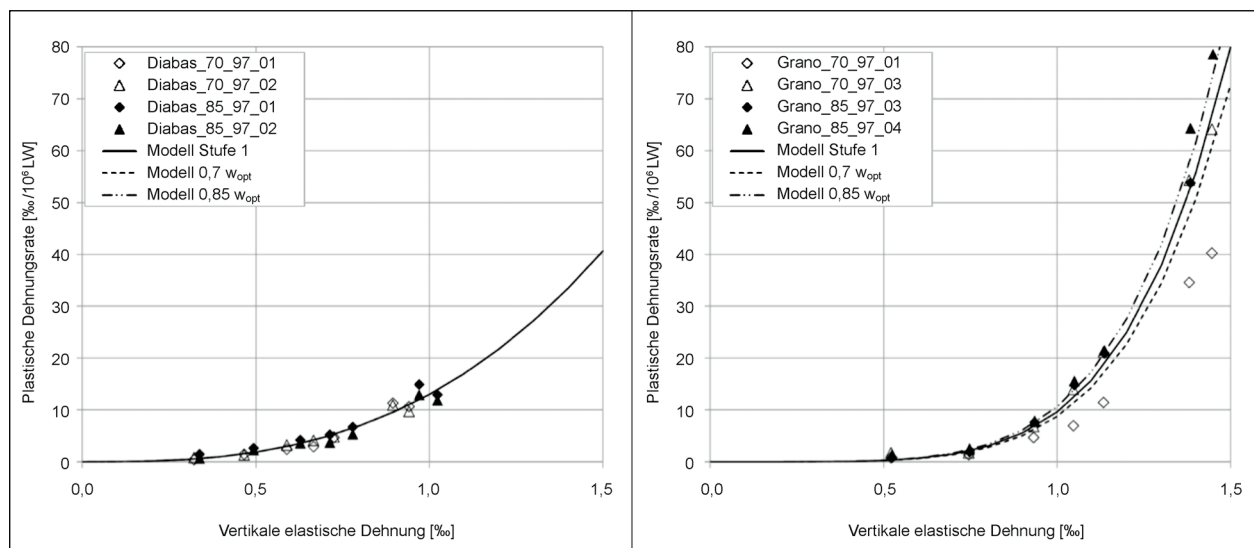


Bild 6-17: Vertikale plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit von den vertikalen elastischen Dehnungen, Modell nach Gleichung 17, Triaxialversuch Diabas und Granodiorit

aufgrund uneindeutiger Tendenzen und geringer Ausprägung des beobachteten Zusammenhangs schwer beurteilen. Diese Erweiterung erscheint nicht zielführend und wird deshalb nicht weiterverfolgt.

6.5.5 Gültigkeitsgrenzen bei Anwendung eines Modells

Die Materialparameter der verwendeten Stoffmodelle werden ausschließlich auf Grundlage der Versuchsergebnisse des Triaxialversuchs (bzw. zykl. Ödometer- und CBR-Versuchs) bestimmt. Die Beschreibung des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens mit diesen Stoffmodellen und Materialparametern ist deshalb grundsätzlich nur in den Grenzen der im Versuch geprüften Spannungen, Lastwechselzahlen und Materialzustände (Verdichtung, Wassergehalt) zulässig. Die Versuchsprozeduren wurden so aufgestellt, dass ein möglichst großer Bereich der für zwei Straßenkonstruktionen rechnerisch ermittelten Spannungen abgedeckt wird. Die Lastwechselzahlen der plastischen Versuchsreihe (50.000 LW je Laststufe) orientieren sich jedoch an Erfahrungen bezüglich Dauer der Konsolidierungsphasen und vertretbarer Prüfdauer.

Sollen mit dem plastischen Modell Dehnungen für höhere Lastwechsel (LW > 50.000) berechnet werden, ist sicherzustellen, dass das maximale Spannungsniveau unterhalb der plastischen Shakedown-Grenze des Materials liegt. Wird die plastische Shakedown-Grenze nicht überschritten, gelten die ermittelten Materialparameter unabhängig von der Lastwechselzahl. Liegt das maximale Spannungsniveau über der plastischen Shakedown-Grenze, sind gesicherte Prognosen zum plasti-

schen Dehnungsverhalten nur bis 50.000 Lastwechsel möglich. Bei Berechnungen für darüber hinausgehenden Lastwechselzahlen sinkt die Prognosesicherheit mit zunehmender Lastwechselzahl.

Zur Bestimmung der plastischen Shakedown-Grenze nach [DIN EN 13286-7] sind im Triaxialversuch die Spannungen zu ermitteln, welche bei einer zyklischen Belastung des Probekörpers eine plastische Dehnungsrate $\epsilon_1^{pl} = \{\epsilon_1^{pl_{3000}} - \epsilon_1^{pl_{5000}}\} = 0,045 \text{ [‰]}$ bzw. $\epsilon_1^{pl} = 22,5 \text{ [‰]}/10^6 \text{ (LW)}$ erzeugen. Die Auswertung der plastischen Versuchsergebnisse mit Bezug auf dieses Bewertungskriterium ergab eine Zuordnung nach Tabelle 6-10. Abweichend zu [DIN EN 13286-7] wurde die plastische Dehnungsrate aus der Differenz der akkumulierten plastischen Dehnungen zwischen den Lastwechseln Nr. 5.000 und 1.000 berechnet und mehrere Laststufen auf den gleichen Probekörper aufgebracht (Multi-Stage-Versuch). Bild 6-18 zeigt die Lage der einzelnen Laststufen in Bezug zu den in [WER 03] für

Material	größte Laststufe mit plastischer Dehnungsrate $\{\epsilon_1^{pl_{1000}} - \epsilon_1^{pl_{5000}}\} \leq 22,5 \text{ [‰]}/10^6 \text{ (LW)}$		
	Laststufe	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]
Diabas	5	565	160
Grano	4	496	150
Grauwacke	4	496	150
Kalkstein	3	420	140
Kies	2	325	130
MixDiabas	5	565	160

Tab. 6-10: Auswertung der plastischen Versuche bezüglich der plastischen Shakedown-Grenze

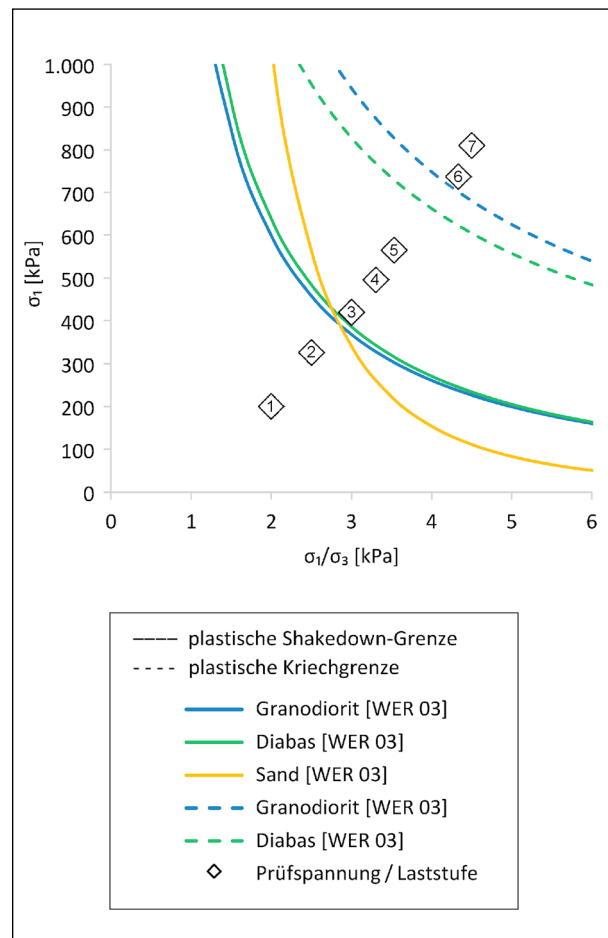


Bild 6-18: Lage der Prüfspannungen/Laststufen des plastischen Versuchs in Bezug auf Shakedown-Grenzen aus [WER 03]

Baustoffgemische aus Granodiorit, Diabas und Kies ermittelten Grenzkurven des plastischen Shake-down-Limits und der plastischen Kriechgrenze.

6.5.6 Bestimmung des charakteristischen Grenzdehnungszustandes

Im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen sind materialspezifische charakteristische Materialkennwerte/-kennwertfunktionen (des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl) essentielle Voraussetzung für Schichtdickenfestlegungen und Nutzungsdauerprognosen. Grundlage hierfür ist die möglichst realitätsnahe Einschätzung der elastischen Materialantwort. Da im Gebrauchsverhalten insbesondere von hochbelasteten Straßenbefestigungen (Bundesautobahnen) maßgeblich von der Aktivierung der elastischen Dehnungsantwort UBG ausgegangen wird, wurde dieses quasi-elastische (vergleichsweise kleine) Dehnungsverhalten separat untersucht.

Im Ergebnis seiner Untersuchungen postulierte [PAT 15], „dass durch Spannungspfade, aus welchen ein degressiver Dehnungszuwachs resultiert, im Wesentlichen Teilchentranslation in Richtung der Teilchenschwerpunkte vorliegt. Infolge dessen ist ausschließlich eine zyklische Verfestigung zu erwarten. Deshalb ist der Übergang vom degressiven zum progressiven Dehnungsverhalten als Grenzkriterium interpretierbar. Den genannten Überlegungen folgend wird ein charakteristischer Grenzdehnungszustand definiert, welcher dem Übergang von einer Materialverfestigung zur Materialentfestigung entspricht.“ [PAT15]

Dieser charakteristische Grenzdehnungszustand ist sowohl spannungs- als auch materialzustandsabhängig (Dichte, Wassergehalt). Um diesen zu ermitteln, wurden die Versuchsergebnisse zur Bestimmung des elastischen Verformungsverhaltens (vgl. Kapitel 6.4.2) ausgewertet. Diese wurden bei einem Verdichtungsgrad (97 % d_{pr}) und zwei unterschiedlichen Wassergehalten (75 % und 85 % w_{opt}) durchgeführt. Durch zusätzliche Versuche mit geänderten Wassergehalten und Einbaudichten konnten weitere Materialzustände berücksichtigt werden.

Der charakteristische Grenzdehnungszustand stellt sich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm als Wendepunkt zwischen degressivem und progressivem

Kurvenverlauf dar. Dieser Punkt definiert die Grenzdehnung bzw. das Grenzspannungsverhältnis. Für die Approximation der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit vom Spannungszustand wird ein Polynom 3. Grades verwendet.

$$\varepsilon_1^{el} = a_3 \cdot \sigma_1^3 + a_2 \cdot \sigma_1^2 + a_1 \cdot \sigma_1 + a_0 \quad \text{Gl. 18}$$

Die Koeffizientenbestimmung erfolgt durch lineare Regression. Für die Ermittlung des Wendepunktes ist die zweite Ableitung des Polynoms gleich Null zu setzen. Die zur jeweiligen elastischen Grenzdehnung gehörende Grenzspannung berechnet sich damit zu

$$\sigma_1(\varepsilon_1^{el_{grz}}) = - (1/3) \cdot a_2/a_3 \quad \text{Gl. 19}$$

Mit dieser Herangehensweise wurden die Grenzspannungsverhältnisse für alle UBG bei jeweils 5 Radialspannungsstufen und mindestens 2 unterschiedlichen Wassergehalten berechnet. Bild 6-19 zeigt die Spannungsverhältnisse der charakteristischen Grenzdehnung im s-t-Diagramm.

Der den charakteristischen Grenzdehnungszustand kennzeichnende Wendepunkt war für alle UBG auf den Spannungspfaden mit $\sigma_3 \geq 210$ kPa nachweisbar, die Punkte dieser Spannungspfade liegen nahezu auf einer Geraden (Trendlinie). Auf Spannungspfaden mit kleinerer Zellspannung konnte der Nachweis nur vereinzelt geführt werden. Diese Punkte liegen im Diagramm (Bild 6-19) häufig deutlich außerhalb der Geraden.

Wird durch lineare Regression eine Trendlinie für alle zu einer Probe gehörenden Spannungspunkte berechnet, so entspricht deren Winkel zu Horizontalen dem im Diagramm angegebenen Winkel φ (d. h. $\varphi = \arctan((\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3))$).

6.6 Zusammenfassung

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die verwendete Versuchsprozedur geeignet ist, sowohl die Steifigkeiten von UBG als auch deren plastisches Verformungsverhalten zu charakterisieren.

Alle durchgeführten Triaxialversuche lieferten schlüssige Ergebnisse.

Zur Beschreibung des Materialverhaltens wurden zwei Modelle ausgewählt:

- a) Beschreibung des elastischen Verformungsverhaltens:
- modifiziertes Universal-Modell nach Gleichung 10,
 - erweitertes modifiziertes Universal-Modell nach Gleichung 12.
- b) Beschreibung des plastischen Verformungsverhaltens:
- dehnungsbasiertes Modell nach Gleichung 13.

Mit den gewählten Methoden sowie der anhand der Ergebnisse der Triaxialversuche bestimmten Modellparameter lässt sich das Materialverhalten der UBG gut abbilden. Die hohe Approximationsgüte der Modelle ist aus den Darstellungen Bild 6-16, Bild 6-10 sowie aufgrund des hohen Bestimmtheitsmaßes R^2 (Tabelle 6-6 und Tabelle 6-8) erkennbar.

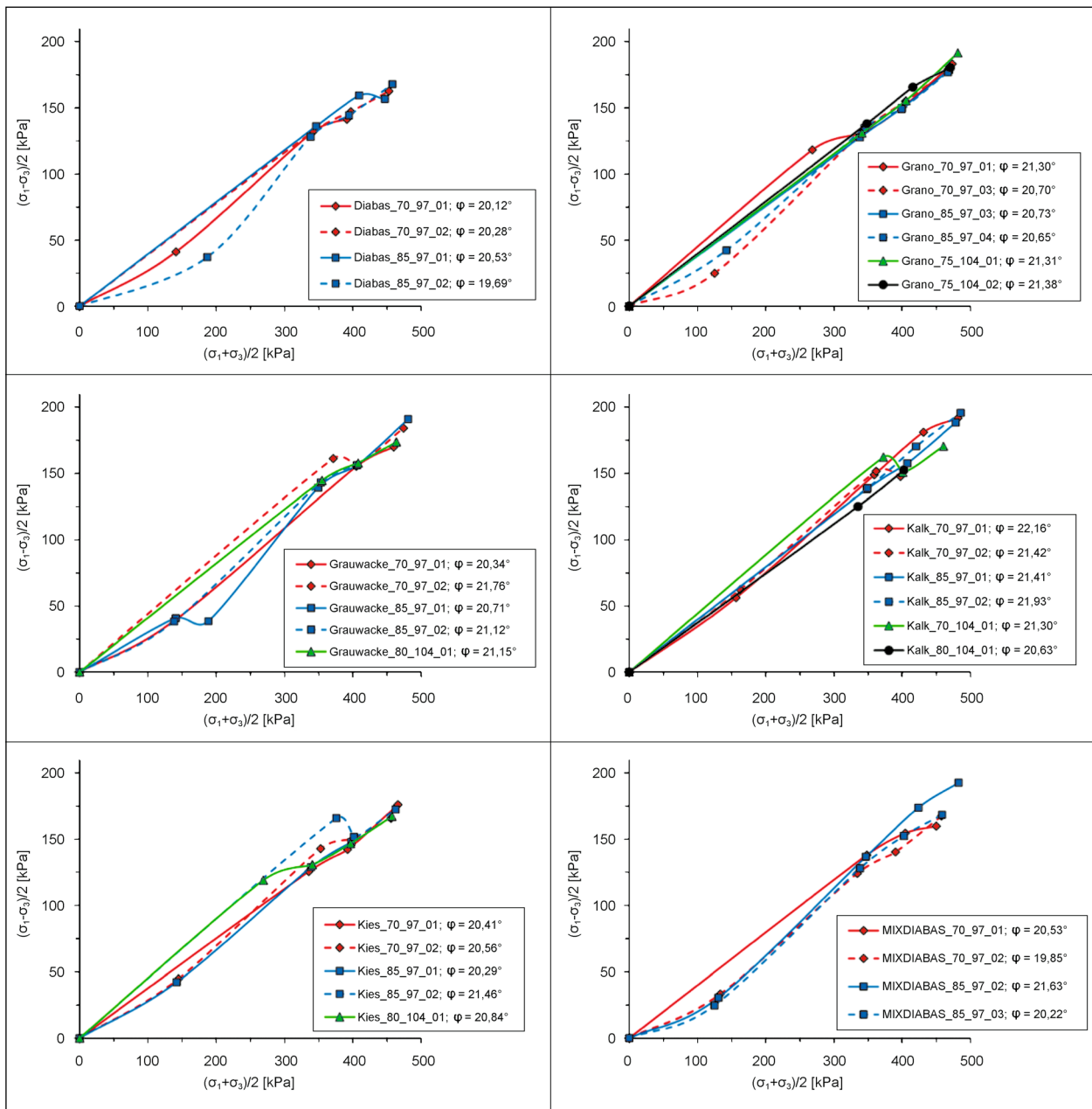


Bild 6-19: Spannungsverhältnisse der charakteristischen Grenzdehnung im s-t-Diagramm

7 Zyklische Ödometer- und CBR-Versuche

In Ergänzung zu den Triaxialversuchen wurden zyklische Ödometer- und CBR-Versuche unter drainierten Bedingungen nach der von CANON FALLA [CAN 17] an der TU Dresden entwickelten Versuchsspeziedur bei gleichen Einbaubedingungen wie bei den Triaxialversuchen durchgeführt. Die in diesem Forschungsprojekt vorgestellten zyklischen Ödometer- und CBR-Versuche besitzen den Vorteil eines gegenüber dem Triaxialversuch relativ einfachen Versuchsaufbaus. Der Aufwand bei der Probekörperherstellung ist ebenfalls deutlich geringer als beim Triaxialversuch. Nachteil dieser Versuche ist, dass die im Versuch realisierbaren Spannungsverhältnisse nur sehr eingeschränkt auf die Verhältnisse in situ übertragbar sind. Mit Triaxialversuchen können diese Zustände deutlich besser abgebildet werden.

Ziel dieser Untersuchungen war es, anhand der Ergebnisse dieser Versuche eine vereinfachte Klassifizierung von UBG zu ermöglichen.

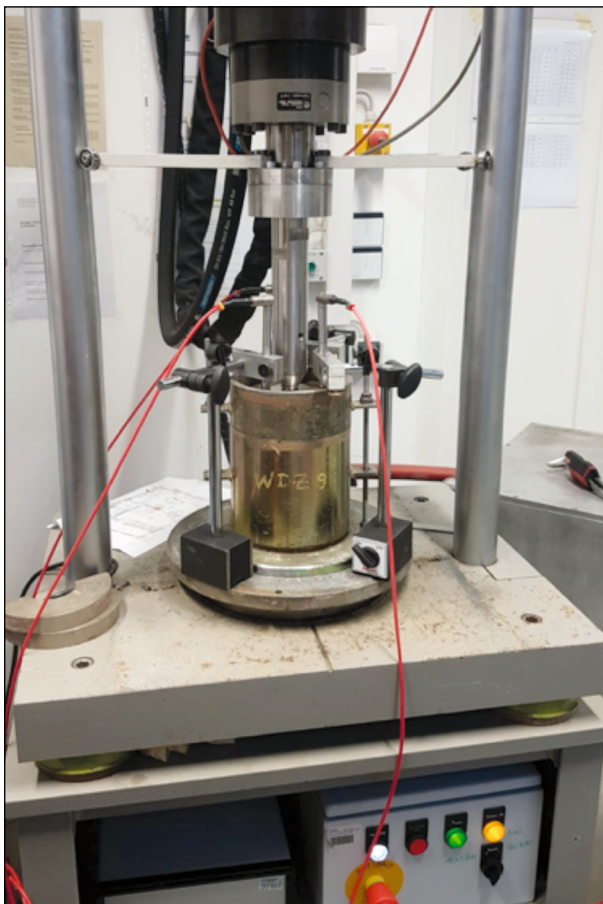


Bild 7-1: Ansicht der servohydraulischen Prüfmaschine

7.1 Geräte und Versuchsanordnung

Für die Versuchsdurchführung stand eine einaxiale servohydraulische Prüfmaschine der TU Dresden zur Verfügung (siehe Bild 7-1).

Die Messung der axialen Verformungen erfolgte mit 3 induktiven Wegaufnehmern und dem axialen Wegmesssystem des Kolbenweges der Maschine.

Die zylindrischen Probekörper, $\varnothing = 150 \text{ mm}$, Höhe = 175 mm, wurden in einer Prüfform hergestellt und anschließend getestet. Für die Untersuchungen waren zwei Versuchsanordnungen erforderlich.

- **Versuchsanordnung A) Ödometerversuch**

Vorversuch und Versuch zur Bestimmung der elastischen Modellparameter:

Beim Vorversuch und dem Versuch zur Bestimmung der elastischen Parameter erfolgte der Lasteintrag über die gesamte Probenfläche. Um die gleichmäßige Lastverteilung der Prüflast zu gewährleisten, wurde auf die fertige Probe eine runde Stahlplatte (Lastverteilungsplatte mit $\varnothing = 150 \text{ mm}$

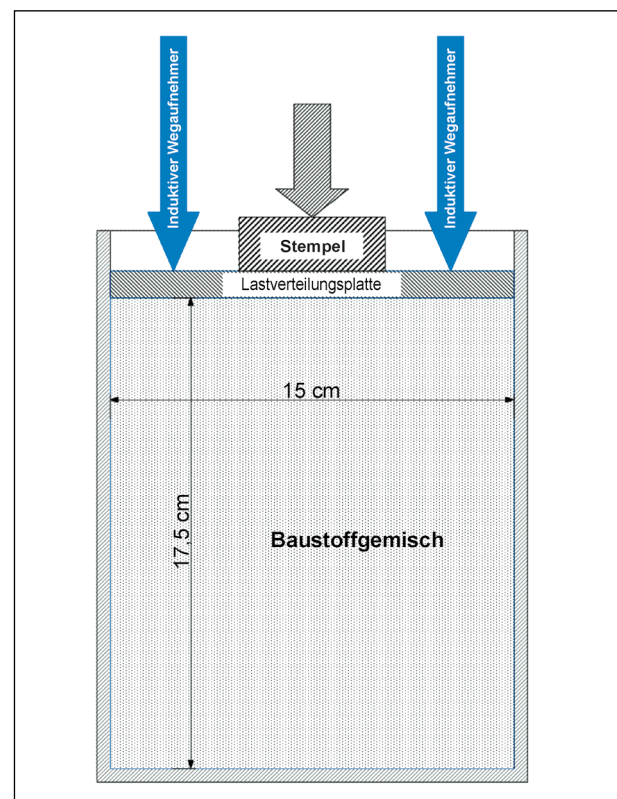


Bild 7-2: Ödometerversuch, Positionierung der induktiven Wegmesssysteme für den Vorversuch und den Versuch zur Bestimmung der elastischen Parameter

und $h = 10$ mm, bündig am Rand der Stahlform anliegend) gelegt. Der Lasteintrag auf die Stahlplatte erfolgte unter Zuhilfenahme eines Stempels ($\varnothing = 56,42$ mm, $h = 20$ mm). Die drei induktiven Wegmesssysteme wurden bei dieser Versuchsanordnung um jeweils 120° versetzt auf der Lastverteilungsplatte der Probe positioniert (siehe Bild 7-2).

Im zyklischen Ödometerversuch ist, bedingt durch die starre Horizontalbegrenzung des Probekörpers, keine radiale Dehnung ($\epsilon_3 = 0$) möglich. Die Spannungszustände in diesem Laborversuch sind somit nur bedingt mit denen des Triaxialversuches vergleichbar.

- **Versuchsanordnung B)
CBR-Versuch**

Bestimmung der plastischen Modellparameter:

Beim Versuch zur Bestimmung der plastischen Modellparameter erfolgte der Lasteintrag des Kolbens auf den Prüfkörper mit einem Stempel ($\varnothing = 56,42$ mm, $h = 20$ mm). Bei dieser Versuchsanordnung wurde ein Wegaufnehmer direkt auf dem Prüfstempel positioniert. Darüber hinaus wurde mit zwei

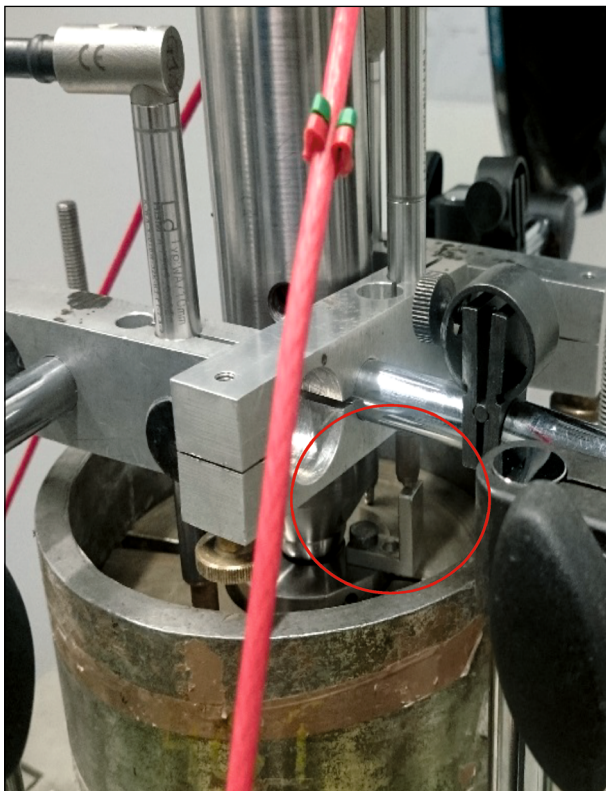


Bild 7-3: Versuchsanordnung zur Bestimmung der plastischen Parameter, Positionierung des induktiven Wegaufnehmers auf dem Prüfstempel

Wegaufnehmern die vertikale Verformung des Probekörpers im Bereich zwischen dem Prüfstempel und der Wandung der Prüfform gemessen (siehe Bild 7-3 und Bild 7-4).

7.2 Probekörperherstellung

Die Herstellung der Probekörper für die zyklischen CBR-Versuche entspricht bezüglich Vorbereitung und Einbau der UBG der im Kapitel 6.2 beschriebenen Vorgehensweise. Nach dem Separieren des Überkorns und Einstellen des Wassergehaltes wurde das UBG in 4 Lagen eingebaut und mit einem Vibrationshammer bis zum Erreichen der Zieldichte verdichtet. Das UBG verblieb während der Versuchsdurchführung in der Prüfform. Die eingestellten Wassergehalte und Dichten entsprachen denen der Triaxialversuche (siehe Tabelle 6-1). Analog zu den Triaxialversuchen erfolgte eine zweifach Belegung der Versuche und die Durchführung als Multi-Stage-Versuch.

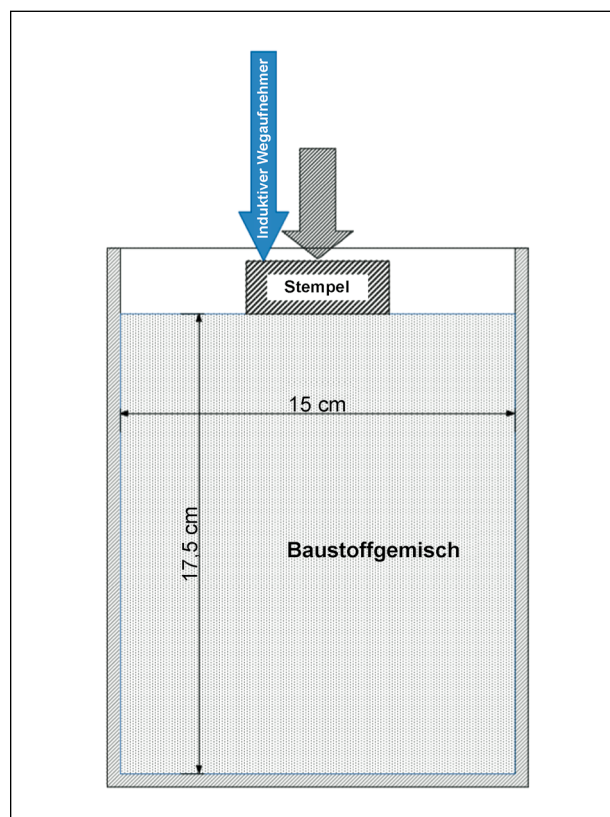


Bild 7-4: CBR-Versuch, Prinzip der Versuchsanordnung zur Bestimmung der plastischen Parameter

7.3 Vorversuche

Untersuchungen haben gezeigt, dass auch bei den zyklischen Ödometer- und CBR-Versuchen eine Vorbelastung in Form eines Vorversuches zweckmäßig ist, um die anfänglichen hohen plastischen Verformungen vorwegzunehmen. Damit wird gewährleistet, dass bei den Untersuchungen zur Erfassung des elastischen Verformungsverhaltens die plastischen Verformungen vernachlässigbar sind. Diese Vorbelastung wurde durch einen Vorversuch mit einer Spannung von 500 kPa und 50.000 Lastwechseln bei 5 Hz realisiert. In Anlage 6 sind die Ergebnisse der Vorversuche für alle untersuchten UBG aufgeführt.

7.4 Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens im Ödometerversuch

7.4.1 Versuchsablauf

Die Ergebnisse der zyklischen Ödometerversuche zur Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens sollen die Bestimmung der Parameter des elastischen Stoffmodells ermöglichen. Hierzu wurden die Proben bei 5 verschiedenen Spannungsniveaus mit jeweils 100 Lastzyklen beaufschlagt (siehe Tabelle 7-1). Die Vertikalbelastung wurde bei allen Versuchen sinusförmig mit einer Frequenz von 1 Hz aufgebracht.

7.4.2 Ergebnisse

Im Kapitel 3.2 sind die allgemeinen Gleichungen der grundlegenden Beziehung zwischen Dehnungen und Spannungen im Triaxialversuch dargestellt. Mit Bezug auf diese Formeln wird der Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul, Querdehnzahl, Spannung und Dehnung für die Zyklischen

Laststufe	σ_a [kPa]		f [Hz]	LW [-]
	min	max		
1	35	100	1	100
2	35	200	1	100
3	35	300	1	100
4	35	400	1	100
5	35	500	1	100

Tab. 7-1: Prüfprogramm CBR-Versuch zur Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens

Ödometerversuche, bei denen die radiale Dehnung gleich Null ist, in folgenden Formeln wiedergegeben.

Ableitung aus Gleichung 4 mit $\varepsilon_3^{el} = 0$:

$$\sigma_3 = \frac{\nu \sigma_1}{(1 - \nu)} \quad \text{Gl. 20}$$

Substitution von σ_3 durch Gleichung 20 in Gleichung 3:

$$E_r = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1^{el}} \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{Gl. 21}$$

mit

- ε_1^{el} vertikale Dehnung [‰]
- σ_1 Vertikalspannung [kPa]
- σ_3 Radialspannung [kPa]
- σ_{dev} Deviatorspannung [kPa]
- ν Querdehnzahl [-]

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls nach Gleichung 21 setzt die Kenntnis der Poissonzahl für das jeweilige UBG voraus. Dieser Parameter ist jedoch in der Regel unbekannt. Für die Untersuchungen in diesem Bericht wurde für alle UBG eine Poissonzahl von 0,35 angenommen. Eine Ausnahme bilden die Darstellungen des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung für verschiedene Poissonzahlen in den Diagrammen in Bild 7-5 und Anlage 12.

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurden für ein aufgebrachtes Spannungsverhältnis die jeweils 5 letzten Lastwechsel einer Lastwechselgruppe ausgewertet.

In Bild 7-5 sind exemplarisch für Kalkstein bei Wassergehalten von $w_{opt} = 70\%$ und 85% die Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit von der Axialspannung σ_1 und ausgewählter Poissonzahlen ($\nu = 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45$) dargestellt. Die Diagramme zeigen deutlich eine Staffelung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der gewählten Poissonzahl. Der Einfluss der Axialspannung auf den Elastizitätsmodul ist ebenfalls erkennbar. Dieser ist vor allem dann deutlich ausgeprägt, wenn die Poissonzahl (ν) kleine Werte annimmt. Diagramme zu allen untersuchten Baustoffen befinden sich in Anlage 12. Eine eindeutige, ausgeprägte Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls vom Wassergehalt war bei den durchgeführten Ödometerversuchen nicht zu beobachten.

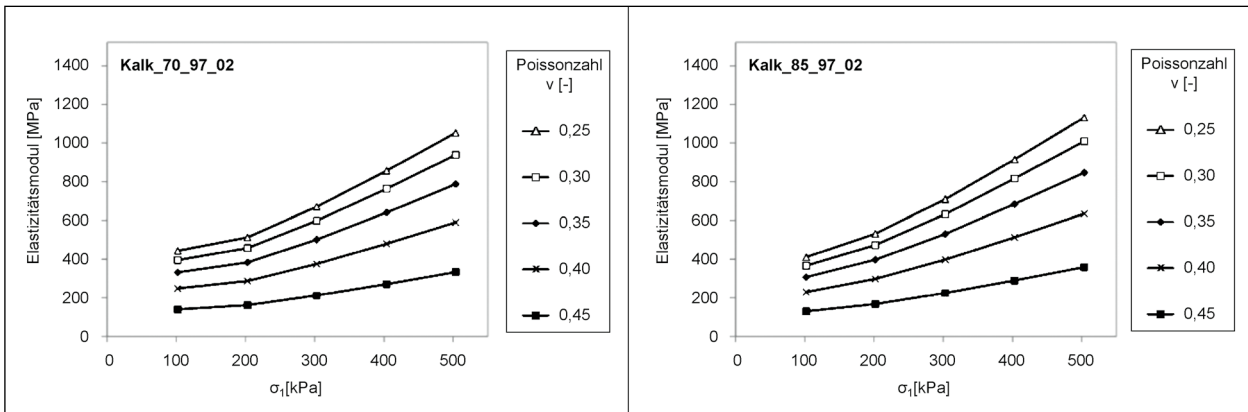


Bild 7-5: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Axialspannung σ_1 für verschiedene Poissonzahlen, Ödometerversuch

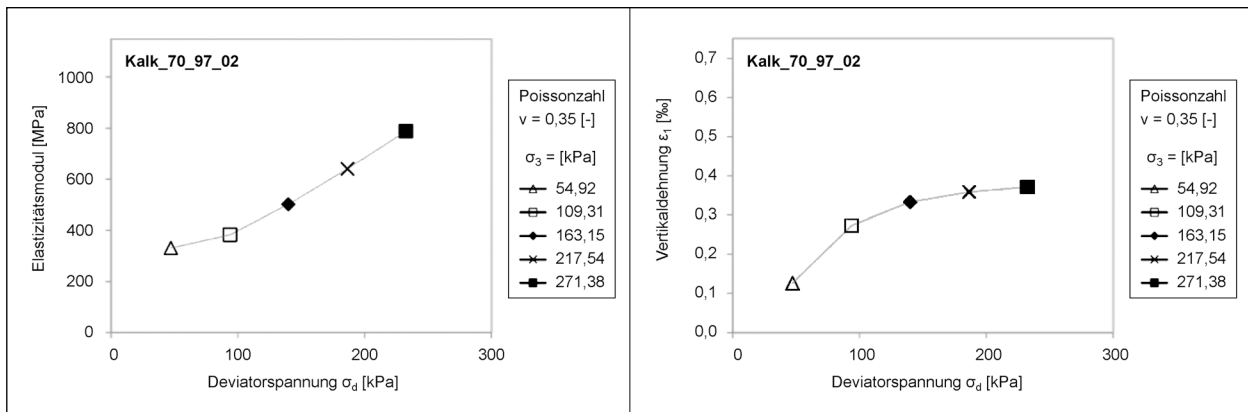


Bild 7-6: Elastizitätsmodul und Vertikaldehnung in Abhängigkeit von der Deviatorspannung für $v = 0,35$, Ödometerversuch

Infolge der Ermittlung des Elastizitätsmoduls für verschiedene Poissonzahlen vermittelt die Darstellung in Bild 7-5 den Eindruck, der Ödometerversuch liefert, wie der Triaxialversuch, eine Schaar von Messwertgraphen (vergleiche Bild 6-8 und Bild 6-9). Das ist jedoch nicht zutreffend. Eine zu Bild 6-8 und Bild 6-9 (Ergebnisse Triaxialversuche) vergleichbare Darstellung mit Poissonzahl $v = 0,35$ ist in Bild 7-10 zu sehen. Im Unterschied zum Triaxialversuch ist im Ödometerversuch nur ein Spannungspfad realisierbar. Jeder Punkt auf diesem Spannungspfad hat das gleiche Spannungsverhältnis σ_1/σ_3 , welches durch die gewählte Poissonzahl v bestimmt wird. Aufgrund dieser Einschränkung kann im Ödometerversuch der Einfluss des Spannungsdeviators nicht isoliert werden. Im Gegensatz zum Triaxialversuch sind beim Ödometerversuch nur Spannungszustände mit verhältnismäßig kleiner Radialspannung σ_3 möglich.

7.4.3 Bestimmung der Parameter für das modifizierte Universal-Modell, Ödometerversuche

Die Stoffparameter der jeweiligen UBG für das modifizierte Universal-Modell (Gleichung 10) wurden analog zur Vorgehensweise bei Auswertung der Triaxialversuche auf Basis der Messergebnisse der Versuche zur Bestimmung des elastischen Verformungsverhaltens ermittelt. Die Bestimmung der Modellparameter k_1 und k_2 erfolgte mittels Regressionsrechnung (Methode der kleinsten Fehlerquadrate). Im Unterschied zur Auswertung der Triaxialversuche lieferte eine Vollregression mit den Daten des Ödometerversuches, d. h. alle drei Modellparameter k_1 , k_2 und k_3 sind unbestimmt, unplausible Ergebnisse. Bei diesen Berechnungen wurden für den Modellparameter k_3 positive Werte ausgegeben. Die Ursache hierfür ist in der mathematischen Struktur des Universal-Modells und der fehlenden Isolationsmöglichkeit des Einflusses der Deviatorspannung im Ödometerversuch zu sehen. Die im Ödometerversuch gewonnenen Daten liefern nicht

die notwendigen Informationen, um alle Parameter für das Universal-Modell bestimmen zu können. Deshalb wurde bei den hier ausgeführten Berechnungen für den Parameter k_3 der im Ergebnis des zugehörigen Triaxialversuches ermittelte Wert angenommen. Die Modellparameter k_1 , k_2 wurden mittels Partialregression, d. h. mit vorgegebenem Wert des Modellparameters k_3 bestimmt.

Ergänzend zur Partialregression wurden die Modellparameter k_1 , k_2 für das modifizierte Universal-Modell iterativ mit Vorgabe von Startwerten ermittelt. Hierbei ergaben sich gegenüber der Regressionsrechnung geringfügig bessere Übereinstimmung zwischen Modell und Versuchsergebnis.

Insofern keine Ergebnisse aus Triaxialversuchen zur Verfügung stehen, empfiehlt es sich mit dem K- Θ -Modell (Gleichung 22) zu arbeiten. Im Unterschied zum Universal-Modell, welches den Einfluss der Gesamtspannung und den Einfluss der Deviatorspannung berücksichtigt, geht in das K- Θ -Modell nur die Gesamtspannung ein. Mit den Ergebnissen des Ödometersversuches lassen sich die Parameter k_1 , k_2 des K- Θ -Modells bestimmen.

$$E_r = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \quad \text{Gl. 22 (K-}\Theta\text{-Modell)}$$

mit

E_r Elastizitätsmodul [MPa]

θ Summe der drei Hauptspannungen [kPa]
(Druckspannungen sind positiv einzusetzen)

p_a Bezugsspannung 100 [kPa] (Luftdruck)

k_1 Materialparameter [MPa]

k_2 Materialparameter [-]

Die Ergebnisse der Berechnungen für beide Modelle sind in Tabelle 7-2 dargestellt. Die ermittelten Modellparameter sind nur für die untersuchten Baustoffgemische und Wassergehalte (70 % und 85 % w_{opt}) gültig.

Für die untersuchten Baustoffgemische betrug das Bestimmtheitsmaß R^2 , als Kennzahl zur Beurteilung der Anpassungsgüte, mindestens 82,6 %. Auffällig sind die deutlich unter 90 % liegenden Werte der Serien, Kalk_70_97 und MixDia_85_97. Die Diagramme in Bild 7-7 zeigen exemplarisch für diese Serien die Gegenüberstellung der gemessenen und der mit den Modellparametern in Tabelle 7-2 nach Gleichung 10 berechneten Elastizitätsmoduln. Ursache für die geringe Übereinstimmung zwischen gemessen und berechneten Werten der Proben MixDia_85_97_01 und MixDia_85_97_02 ist die große Messwertstreuung zwischen beiden Proben. Die Ursache für den gekrümmten Trendlinienverlauf der Serie Kalk_70_97 konnte nicht ermittelt werden. In Anlage 14 befinden sich die entsprechenden Diagramme für alle untersuchten Baustoffe.

Baustoffgemisch	$E_r = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$				$E_r = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2}$		
	k_1 [MPa]	k_2	k_3	R^2	k_1 [MPa]	k_2	R^2
Diabas_70_97	158,54	0,737	-0,213	91,0 %	163,71	0,62	93,4 %
Diabas_85_97	146,84	0,737	-0,266	94,5 %	153,26	0,590	94,5 %
Grano_70_97	99,62	0,685	-0,140	97,5 %	101,89	0,610	98,0 %
Grano_85_97	125,19	0,608	-0,171	93,5 %	128,67	0,510	93,2 %
Grauwacke_70_97	101,85	0,758	-0,256	92,3 %	106,14	0,620	93,7 %
Grauwacke_85_97	92,68	0,745	-0,254	93,6 %	96,54	0,610	94,9 %
Kalk_70_97	229,01	0,612	-0,225	83,9 %	237,46	0,490	82,6 %
Kalk_85_97	169,27	0,756	-0,191	96,1 %	174,56	0,650	96,5 %
Kies_70_97	127,15	0,704	-0,178	97,9 %	130,84	0,610	98,1 %
Kies_85_97	129,19	0,690	-0,178	96,6 %	132,95	0,590	97,6 %
MixDia_70_97	151,93	0,876	-0,224	98,9 %	157,49	0,750	99,4 %
MixDia_85_97	208,10	0,759	-0,213	83,9 %	215,33	0,640	84,3 %

Tab. 7-2: Modellparameter und Bestimmtheitsmaß R^2 für Gleichung 10 und 22 für die untersuchten Baustoffgemische, Ödometer-versuch

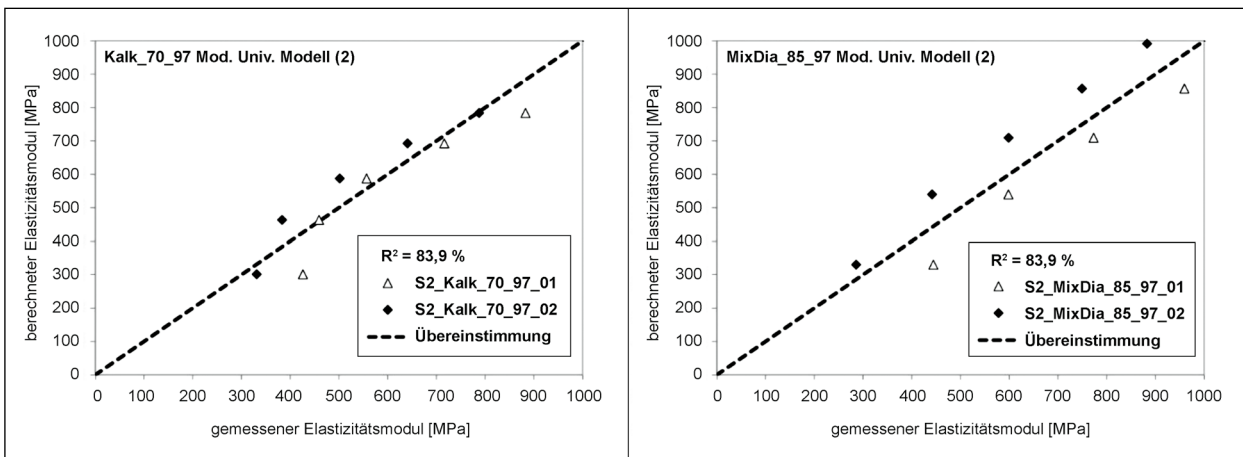


Bild 7-7: Gegenüberstellung der gemessenen und mit Gleichung 10 berechneten Elastizitätsmoduln, Ödometerversuche

Laststufe	σ_a [kPa]		f [Hz]	LW [-]
	min	max		
1	35	100	5	30.000
2	35	250	5	30.000
3	35	400	5	30.000
4	35	550	5	30.000
5	35	700	5	30.000
6	35	850	5	30.000

Tab. 7-3: Prüfprogramm CBR-Versuch zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens

Mit dem K- Θ -Modell wurde tendenziell die bessere Übereinstimmung zwischen Messwerten und Prognosewerten erzielt (größere Werte für R^2). Das bedeutet eine bessere Kurvenanpassung für dieses Modell. Auf eine bessere Beschreibung des Materialverhaltens durch dieses Modell kann hieraus jedoch nicht geschlussfolgert werden. Die Messergebnisse der Versuche mit Grano_85_97 und Kalk_70_97 (in der Tabelle farbig markiert) ließen sich mit dem modifizierten Universal-Modell besser abbilden als mit dem K- Θ -Modell.

7.5 Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens mit dem CBR-Versuch

7.5.1 Versuchsablauf

Analog zur Vorgehensweise bei den Triaxialversuchen wurden zur Beschreibung des plastischen Verformungsverhaltens an jedem UBG Multi-Stage-Versuche bei jeweils zwei Wassergehalten durchgeführt. Hierzu wurden die Proben bei 6 verschied-

denen Laststufen mit jeweils 30.000 Lastzyklen beaufschlagt (siehe Tabelle 7-3). Die Vertikalbelastung wurde bei allen Versuchen sinusförmig mit einer Frequenz von 5 Hz aufgebracht.

7.5.2 Ergebnisse

Wie im Kapitel 7.1 beschrieben, erfolgt der Lasteintrag beim Versuchsaufbau zur Bestimmung der plastischen Parameter nur auf einer kleinen Teilfläche des Probekörpers (siehe auch Bild 7-4). Infolge der nicht bis an die Topfwandung reichenden Stempelfläche sind die Horizontaldehnungen unmittelbar unter dem Laststempel ungleich null. Die Bedingungen für eine Bestimmung des Elastizitätsmodul nach Gleichung 21 sind für diese Versuchsanordnung nicht erfüllt. Bei diesem Versuchsaufbau gilt für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls folgende Formel:

$$E_r = \frac{\pi}{2} \frac{\sigma_1 r (1 - \nu^2)}{s} \tag{Gl. 23}$$

mit

- σ_1 Vertikalspannung [MPa]
- ν Querdehnzahl [-]
- r Radius des Laststempels [mm]
- s Vertikalverformung unter dem Laststempel [mm]
- E_r Elastizitätsmodul [MPa]

Die vollständigen Ergebnisse der zyklischen CBR-Versuche zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens sind in Anlage 8 und Anlage 10 dargestellt. Bei Aufbereitung der Messwerte wurde

festgestellt, dass die Messungen der ersten Laststufe unplausibel sind. Als mögliche Ursache kommen Anwendungsgrenzen der Sensoren zur Maschinensteuerung in Betracht. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Stempelfläche im CBR-Versuch werden nur geringe Kräfte (ca. 250 N) aufgebracht, der Versuch ist kraftgesteuert. In Kombination mit der Frequenz von 5 Hz ergibt sich ein ungünstiges Verhältnis zwischen dem von der Maschine auszuwertenden Signal der Kraftmessdose und dem Signalrauschen. Analog dazu arbeiten die induktiven Messeinrichtungen aufgrund der geringen Verformungen in der ersten Laststufe ebenfalls im Grenzbereich. Diese Ergebnisse bleiben deshalb in den folgenden Betrachtungen und Auswertungen unberücksichtigt.

Einzelne Messwerte werden nachfolgend zur Erläuterung exemplarisch dargestellt. Bild 7-8 zeigt die Entwicklung der plastischen Dehnungen und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl für die Versuche mit Diabas bei einem Wassergehalt von 70 % w_{opt} . Dabei ist die deutliche Spannungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls zu erkennen. Mit steigendem Beanspruchungsniveau nehmen die Steifigkeit des Baustoffgemisches sowie die plastischen Dehnungen ebenfalls zu. Für jede der dargestellten Belastungsstufen ist eine Stabilisierung der plastischen Dehnungen erkennbar (deutlich degressiver Zuwachs der plastischen Dehnungen). Diese ist jedoch nicht so stark ausgeprägt wie bei den ersten Belastungsstufen der Triaxialversuche. Darüber hinaus führten die hier gewählten Spannungen nicht zum progressiven Zuwachs der Dehnungen. Die Ergebnisse der Versuche für alle untersuchten UBG befinden sich in Anlage 10.

Die Ergebnisse der zyklischen CBR-Versuche in Form der vertikalen plastischen Dehnungen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl für die untersuchten UBG mit unterschiedlichen Wassergehalten zeigt Bild 7-9. Im Bild wird deutlich, dass mit zunehmenden Spannungen sowie mit zunehmendem Wassergehalt die plastische Dehnung ansteigt. Mit Ausnahme der Probe Kalk_70_97_01 ist für alle Baustoffgemische in den Laststufen 2 (LW 30.000 – 60.000) und 3 (LW 60.000 – 90.000) eine Konsolidierung der plastischen Dehnungen festzustellen, die plastischen Dehnungen nehmen bei steigender Lastwechselzahl nur geringfügig zu. Bei Laststufe 4 (LW 90.000 – 120.000) zeigen auch die Versuche Grano_85_97_02, Kalk_85_97_02, Kies_70_97_01; Kies_85_97_01 eine deutliche Zunahme der Dehnungen mit steigender Lastwechselzahl. In Laststufe 5 (LW 120.000 – 150.000) stellt sich nur noch bei den Versuchen Diabas_70_97_01 und Mix-Dia_70_97_01 eine Konsolidierung ein. Die Differenzen zwischen den beiden Versuchen mit einem Wassergehalt 70 % w_{opt} waren tendenziell größer als die Differenzen der Versuche mit 85 % w_{opt} . Auffällig ist die hohe Anfangsdehnung beim Versuch Kalk_70_97_01.

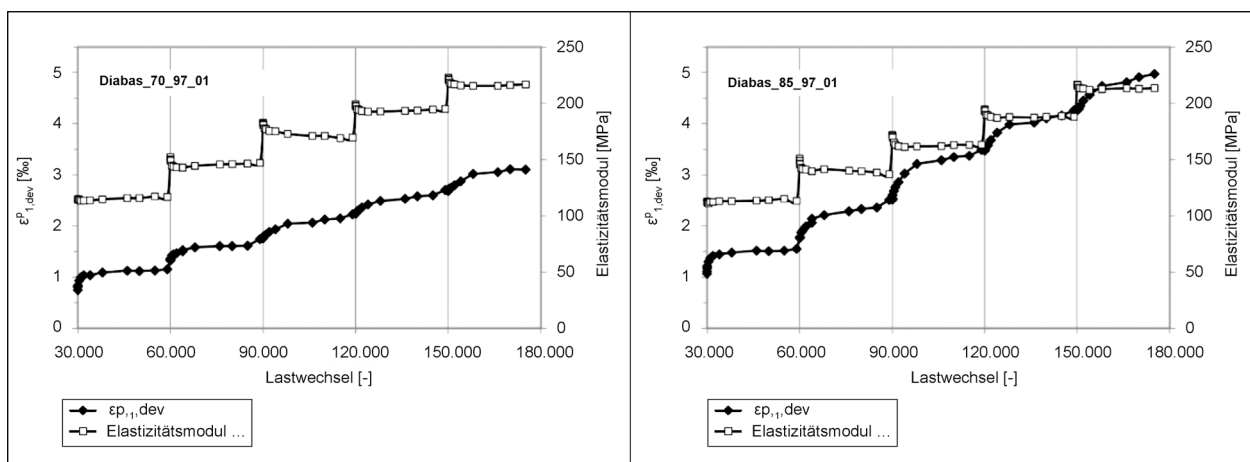


Bild 7-8: Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl – Versuche mit Diabas bei Wassergehalten von 70 % und 85 % w_{opt}

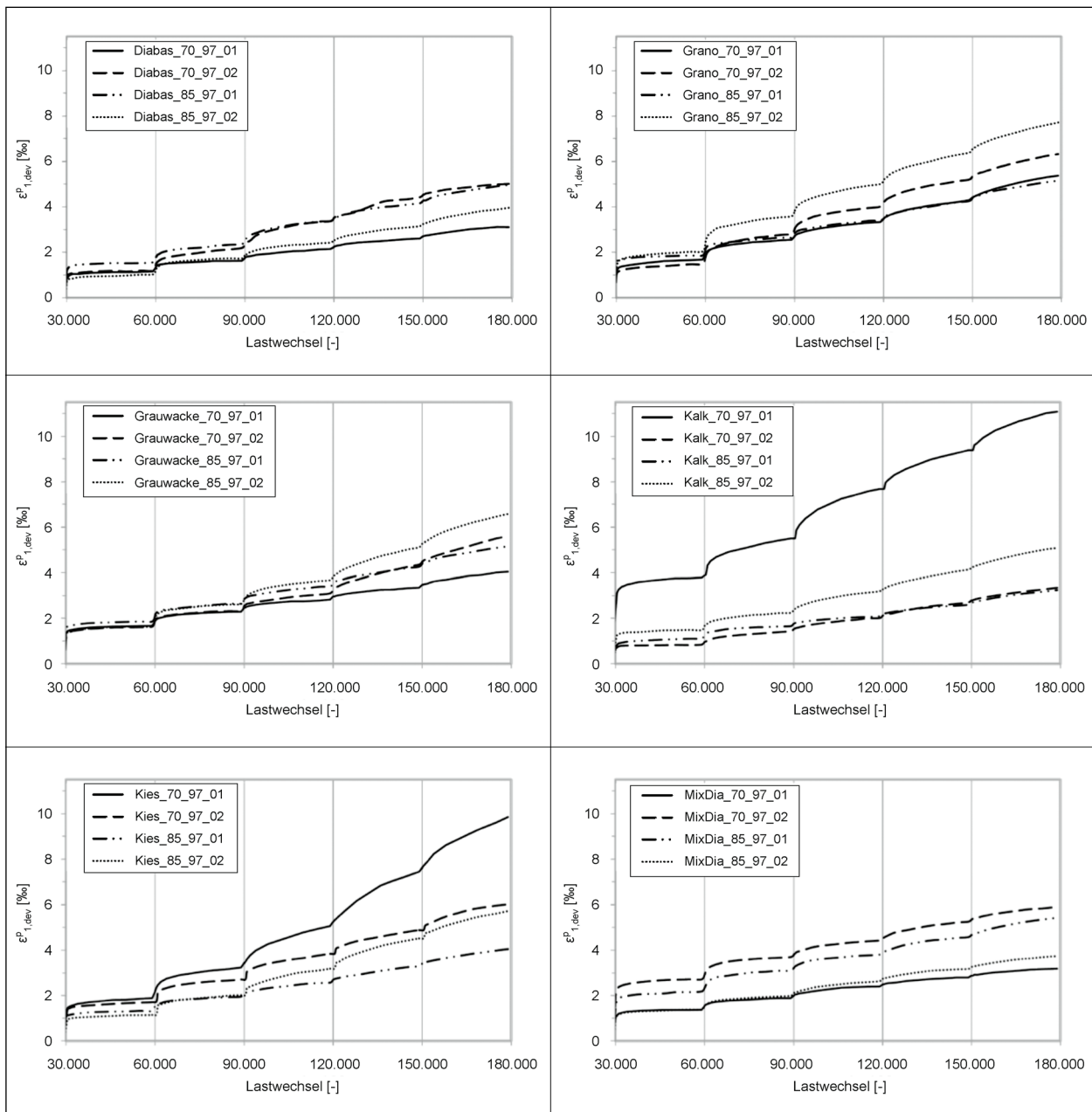


Bild 7-9: Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen für alle untersuchten Baustoffgemische, CBR-Versuche

7.5.3 Bestimmung der Parameter für das plastische Modell

Analog zur Auswertung der Triaxialversuche wurden für alle durch CBR-Versuche untersuchten Baustoffe die Parameter a_1 und a_2 für das mit Gleichung 13 beschriebene plastische Modell bestimmt. Die plastische Dehnungsrate wurde mithilfe der plastischen akkumulierten Dehnungskurve ermittelt, indem der Anstieg der Kurve zwischen dem 16.000-ten und dem 30.000-ten Lastwechsel (in Anlehnung an Gleichung 14) für jede Laststufe (Stufe 2 – 6 nach Tabelle 7-3) genutzt wurde. Die elasti-

schen Dehnungen der jeweiligen Laststufe wurden mit dem modifizierten Universal-Modell (Gleichung 10) berechnet.

Die für Gleichung 13 ermittelten Materialparameter (a_1 ; a_2) der untersuchten UBG sind in Tabelle 7-4 aufgeführt. Werden die mit den Parametern a_1 und a_2 (Gleichung 13) berechneten plastischen Dehnungen mit den im CBR-Versuch gemessenen plastischen Dehnungen gegenübergestellt, so ergibt sich für die CBR-Versuche mit Diabas die Darstellung in Bild 7-10. Diagramme zu allen CBR-Versuchen befinden sich in Anlage 18.

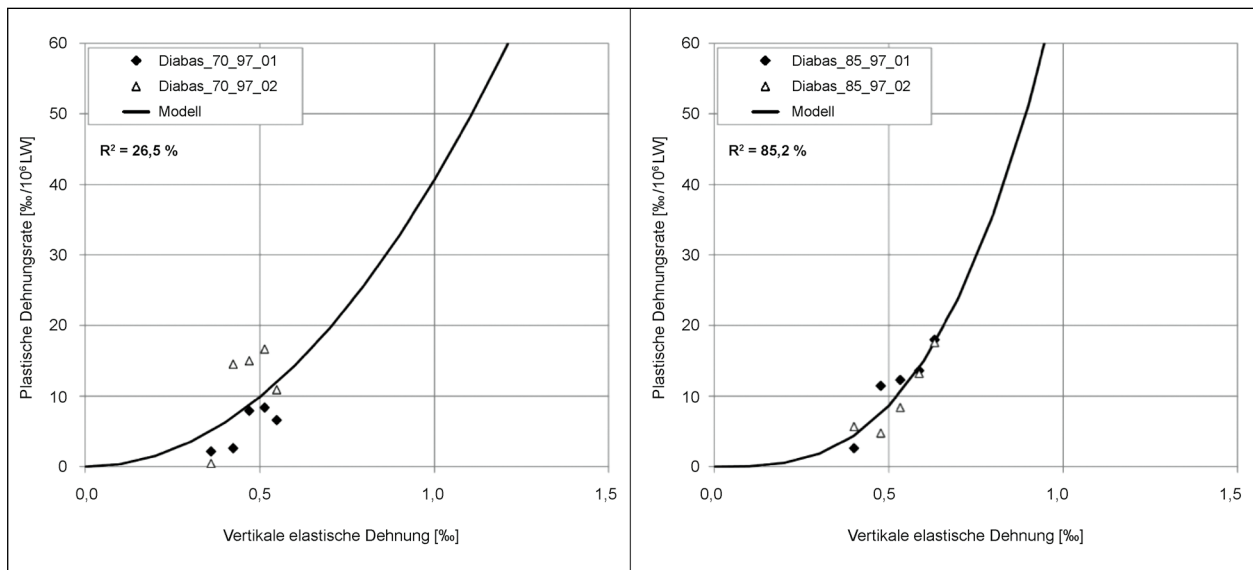


Bild 7-10: Vertikale plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit von den vertikalen elastischen Dehnungen, Messwerte und Modell nach Gleichung 13, CBR-Versuche mit Diabas

Baustoffgemisch	$\lambda = a_1 (\varepsilon_{1,lab}^{el})^{a_2}$		
	a_1	a_2	R^2
Diabas_70_97	40,661	2,039	26,5 %
Diabas_85_97	70,399	3,026	85,2 %
Grano_70_97	28,900	3,119	90,7 %
Grano_85_97	28,465	2,778	72,3 %
Grauwacke_70_97	66,138	5,820	58,5 %
Grauwacke_85_97	8,715	3,803	83,4 %
Kalk_70_97	68,398	1,685	30,2 %
Kalk_85_97	533,511	4,422	63,7 %
Kies_70_97	133,283	3,714	54,1 %
Kies_85_97	71,564	3,698	75,7 %
MixDia_70_97	673,454	4,258	45,9 %
MixDia_85_97	139,001	2,535	58,9 %

Tab. 7-4: Modellparameter für Gleichung 13 und Bestimmtheitsmaß R^2 für die untersuchten Baustoffgemische, CBR-Versuche

Im Unterschied zu den Ergebnissen in Tabelle 6-6 (Ergebnisse der Triaxialversuche) lassen sich für einige Materialien die beim CBR-Versuch gewonnenen Ergebnisse nur unzureichend mit dem gewählten Modell abbilden. Die geringe Übereinstimmung von Modell- und Messwerten bei den Proben Diabas_70_97; Kalk_70_97 und MixDia_70_97 ist auf die große Differenz der Versuchsergebnisse (siehe Bild 7-9) zurückzuführen. Die im Bild 7-9 sichtbare Tendenz der besseren Übereinstimmung der Messwerte bei den Versuchen mit dem höheren Wasser-

gehalt ($w_{opt} = 85\%$) führt auch zu einem höheren Bestimmtheitsmaß. Mit Ausnahme des Granodiorit erzielte das Modell eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen bei höherem Wassergehalt.

Eine weitere Ursache ist in der Abhängigkeit zwischen dem dehnungsbasierten Modell und dem Modell zur Beschreibung des elastischen Verformungsverhaltens zu sehen. Nur wenn eine hohe Approximationsgüte für das elastische Verformungsverhalten erzielt wurde, ist dieses für das dehnungsbasierte Modell möglich.

Für die Versuche zur Bestimmung des elastischen Verformungsverhaltens mit $R^2 \leq 91\%$ (siehe Tabelle 7-2; Diabas_70_97; Kalk_70_97; MixDia_85_97) wurde bei Anwendung des dehnungsbasierten Modells (Tabelle 7-4) ebenfalls nur ein geringes Bestimmtheitsmaß erzielt.

7.6 Zusammenfassung

Die zyklischen Ödometerversuche zur Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens lieferten im Vergleich zu den Ergebnissen der Triaxialversuche für die untersuchten UBG adäquate Ergebnisse. Auf Basis der Versuchsergebnisse ließen sich Parameter für das modifizierte Universal-Modell nach Gleichung 10 und das K- Θ -Modell nach Gleichung 22 bestimmen (siehe auch Tabelle 7-2). Das elastische Verformungsverhalten von UBG

kann anhand der Ergebnisse von zyklischen CBR-Versuchen gut erfasst werden.

Die Approximationsgüte des modifizierten Universal-Modells nach Gleichung 10 war jedoch mit der hier verwendeten Versuchsprozedur im Allgemeinen geringer als bei den Triaxialversuchen. Darüber hinaus lieferte die Vollregression zur Bestimmung der Modellparameter, d. h. alle Modellparameter k_1 , k_2 und k_3 sind unbestimmt, unplausible Ergebnisse. Bei diesen Berechnungen wurden für den Modellparameter k_3 positive Werte ausgegeben. Ersatzweise erfolgte die Bestimmung Modellparameter mittels Partialregression, d. h. die Modellparameter k_1 , k_2 wurden für einen vorgegebenen Wert des Modellparameters k_3 bestimmt. Für die hier ausgeführten Berechnungen wurde für k_3 der im Ergebnis des zugehörigen Triaxialversuches ermittelte Wert angenommen. Liegen nur Ergebnisse von zyklischen Ödometerversuchen vor, empfiehlt es sich mit dem K- Θ -Modell zu arbeiten, um das elastische Verformungsverhalten von UBG zu modellieren.

Anhand der Ergebnisse der CBR-Versuche zur Bestimmung des plastischen Verformungsverhaltens war keine befriedigende Charakterisierung des plastischen Verformungsverhaltens von UBG möglich. Nur 3 von 12 untersuchten Baustoffgemischen können durch das dehnungsbasierte Modell mit einem Bestimmtheitsmaß größer 80 % abgebildet werden. Bei Aufbereitung der Messwerte wurde festgestellt, dass die Messungen der ersten Laststufe unplausibel sind. Diese Ergebnisse blieben deshalb in den folgenden Betrachtungen und Auswertungen unberücksichtigt. Die Entwicklung der plastischen Dehnungen und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl ist aus den gewonnenen Messwerten der Laststufen 2-5 gut erkennbar (Bild 7-8, Bild 7-9 und Anlage 10), jedoch ließen sich die Messwerte nur unzureichend mit dem dehnungsbasiertes Modell nach Gleichung 13 abbilden (siehe Tabelle 7-4 und Bild 7-10).

Eine mögliche Ursache ist das ungünstige Verhältnis von Laststempeldurchmesser (56,42 mm) zur maximalen Korngröße (32 mm). 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 durch eine zweckmäßigere Versuchsanordnung (z. B. durch Veränderung der Probekörper und der Laststempelabmessungen) realistischere Versuchsergebnisse erzielen lassen, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

8 Klassifizierung

8.1 Klassifizierung nach DIN EN 13286-7

Ausgangspunkt der Überlegungen für die Erstellung einer Vorgehensweise zum Eignungsnachweis (Klassifizierung) von UBG im Rahmen einer Dimensionierung sowohl nach RStO 12 als auch nach RDO Asphalt bildet der in der DIN EN 13286-7 Anhang C3 beschriebene Ansatz. Mit diesem Ansatz kann eine Einschätzung der Eignung von UBG für die Verwendung in niedrig beanspruchten Straßen (Straßen mit dünnen Asphaltsschichten) vorgenommen werden. Die UBG werden dabei anhand von zwei charakteristischen Materialparametern (ϵ_{1c} [%]; E_c [MPa]) einer Klasse (C1; C2; C3) zugeordnet.

Diese Materialparameter werden im Triaxialversuch mit einem Wassergehalt $w = 98 \% w_{opt}$ und einer Trockendichte von $97 \% \rho_{d, opt}$ bestimmt und sind in der DIN EN 13286-7 Anhang C3 wie folgt definiert:

- A) „Eine charakteristische plastische Axialdehnung, ϵ_{1c} , die den Widerstand des Baustoffgemisches gegen plastische Verformungen beschreibt. Der Wert von ϵ_{1c} wird anhand der Ergebnisse der Vorbelastung ermittelt und wie folgt berechnet: ...“ [DIN EN 13286-7]

$$\epsilon_{1c} = \epsilon_{1p}(20.000) - \epsilon_{1p}(100) \tag{Gl. 24}$$

mit

Charakteristischer Elastizitätsmodul E_c [MPa]	Charakteristische plastische Dehnung (ϵ_{1c}) [%]			
	Klassen	$0 < \epsilon_{1c} \leq 2,5$	$2,5 \leq \epsilon_{1c} < 6$	$6 < \epsilon_{1c}$
$500 < E_c$		C1	C2	C3
$250 < E_c \leq 500$		C2	C2	C3
$0 < E_c \leq 250$		C3	C3	C3

Tab. 8-1: Grenzwerte für die Einstufung in die Klassen C1 bis C3 nach DIN 13286-7:2004

$\epsilon_{1p}(20.000)$ plastische Axialdehnung nach Beendigung der Vorbelastung (nach 20.000 Lastwechseln) [-]

$\epsilon_{1p}(100)$ plastische Axialdehnung nach 100 Lastwechseln [-]

B) „Ein charakteristischer Wert des Elastizitätsmoduls, E_c , der als der für die Spannungswerte $1/3(\sigma_d+3*\sigma_3) = 250$ kPa und $\sigma_d = 500$ kPa bestimmte Elastizitätsmodul definiert ist“. [DIN EN 13286-7]

Die Deviatorspannung beträgt $\sigma_d = 500$ kPa; und die hydrostatische Spannung $\sigma_{hyd} = 250$ kPa; bzw. $\sigma_d = 500$ kPa; $\sigma_3 = 83$ kPa.

Die charakteristische plastische Axialdehnung ist nach DIN EN 13286-7 im Triaxialversuch bei Spannungen von $\sigma_{dmax} = 600$ kPa und $\sigma_{3max} = 110$ kPa zu ermitteln. Die Spannungen zur Ermittlung des charakteristischen Elastizitätsmoduls sind keine Prüfspannungen; dieser Wert kann folglich nur auf Basis eines Modells berechnet werden.

8.2 Klassifizierung der Baustoffgemische mit modifizierter Methode

Im Rahmen des Forschungsprojektes FE 09.0175/2011/ERB [WEL 14] wurde diese Klassifizierungsmethode für ToB in niedrig beanspruchten Straßebefestigungen weiterentwickelt. Dabei wurde der Parameter zu Beschreibung des plastischen Verformungsverhaltens neu definiert und die Einstufungsgrenzen angepasst.

Klassifizierung nach FE 09.0175/2011/ERB:

A) Charakteristische plastische Axialdehnungsrate bei konstantem Zeldruck

$$\epsilon_{1c}(\text{rate}) = (\epsilon_{1p}(20.000) - \epsilon_{1p}(1.000)) / (20.000 - 1.000) * 10^6 \text{ \%}/10^6; \text{ bei } \sigma_{1max} = 450 \text{ kPa}; \sigma_3 = 150 \text{ kPa} \text{ bzw. } (\sigma_{dmax} = 300 \text{ kPa}; \sigma_3 = 150 \text{ kPa}) \text{ (Anpassung der Prüfspannungen an die Prozedur des Vorversuches)}$$

B) Charakteristischer Elastizitätsmodul E_c [MPa] bei $\sigma_d = 500$ kPa; $\sigma_3 = 83$ kPa

Für die Einstufung in die Klassen Q1 bis Q3 gelten die Werte in Tabelle 8-2.

Alle in diesem Projekt untersuchten Baustoffgemische wurden nach diesem Ansatz klassifiziert.

Die Bestimmung der Materialparameter (ϵ_{1c} (rate) [%/10⁶] und E_c [MPa]) erfolgte dabei sowohl auf Basis der Triaxial- als auch der einaxialen Ödometerversuche. Die Klassifizierung der UBG auf Grundlage der Ergebnisse der Triaxial- Ödometer- und CBR-Versuche zeigt Bild 8-1. Dreiecke stellen die Einstufung nach dem Triaxialversuch dar, Kreise entsprechen den Ergebnissen der Ödometer- und CBR-Versuche. Die horizontale Position des Symbols (ϵ_{1c}) ist der Mittelwert aus zwei Versuchen (Doppelbelegung), die blauen Pfeile markieren die Schwankungsbreite der Messergebnisse für ϵ_{1c} . Zur Bestimmung der Modellparameter wurden jeweils alle (also zwei) Versuche mit gleichem Wassergehalt verwendet. Der charakteristische Elastizitätsmodul E_c wurde mit dem Modell (Gleichung 10) berechnet, folglich gibt es für jeden Wassergehalt nur einen charakteristischen Elastizitätsmodul E_c .

Keines der nach dieser Methode geprüften UBG erfüllt die Anforderungen der Klasse Q1. Im Ergebnis der Triaxialversuche gehören Grauwacke, Kalkstein und MixDia zur Klasse Q2. Infolge der vom Wassergehalt abhängigen plastischen Verformung gehören Kies, Granodiorit und Diabas zur Klasse Q3. Die Differenzen der im Vorversuch bei gleichem Wassergehalt ermittelten plastischen Dehnungsraten sind bei hohem Wassergehalt tendenziell größer. Beim Vergleich der unterschiedlichen Versuche wurden beim Ödometerversuch die größeren Differenzen festgestellt. Die Werte der aus beiden Versuchen ermittelten Parameter unterscheiden sich erheblich, dies führt je nach Versuch zu unterschiedlicher Einstufung des Materials.

Ursache für die großen Differenzen (zwischen den Ergebnissen des Triaxial- und CBR-Versuches)

	Charakteristische plastische Dehnungsrate (ϵ_{1c}) rate [%/10 ⁶]			
	Klassen	$0 < \epsilon_{1c} \leq 30$	$30 \leq \epsilon_{1c} < 60$	$60 < \epsilon_{1c}$
Charakteristischer Elastizitätsmodul E_c [MPa]	$500 < E_c$	Q1	Q2	Q3
	$250 < E_c \leq 500$	Q2	Q2	Q3
	$0 < E_c \leq 250$	Q3	Q3	Q3

Tab. 8-2: Grenzwerte der Materialparameter ϵ_{1c} (rate) [%/10⁶] und E_c [MPa] für die Einstufung in die Klassen Q1-Q3

beim plastischen Verformungsverhalten ist in der zur Bestimmung des plastischen Verformungsverhaltens verwendeten ungeeigneten Versuchsanordnung beim CBR-Versuch zu sehen (siehe Ein-

schätzung im Kapitel 7.6). Darüber hinaus unterscheiden sich die Spannungsverhältnisse in beiden Versuchen (Triaxial- und CBR-Versuch) wesentlich. Es wurde deshalb geprüft, ob es möglich ist, an-

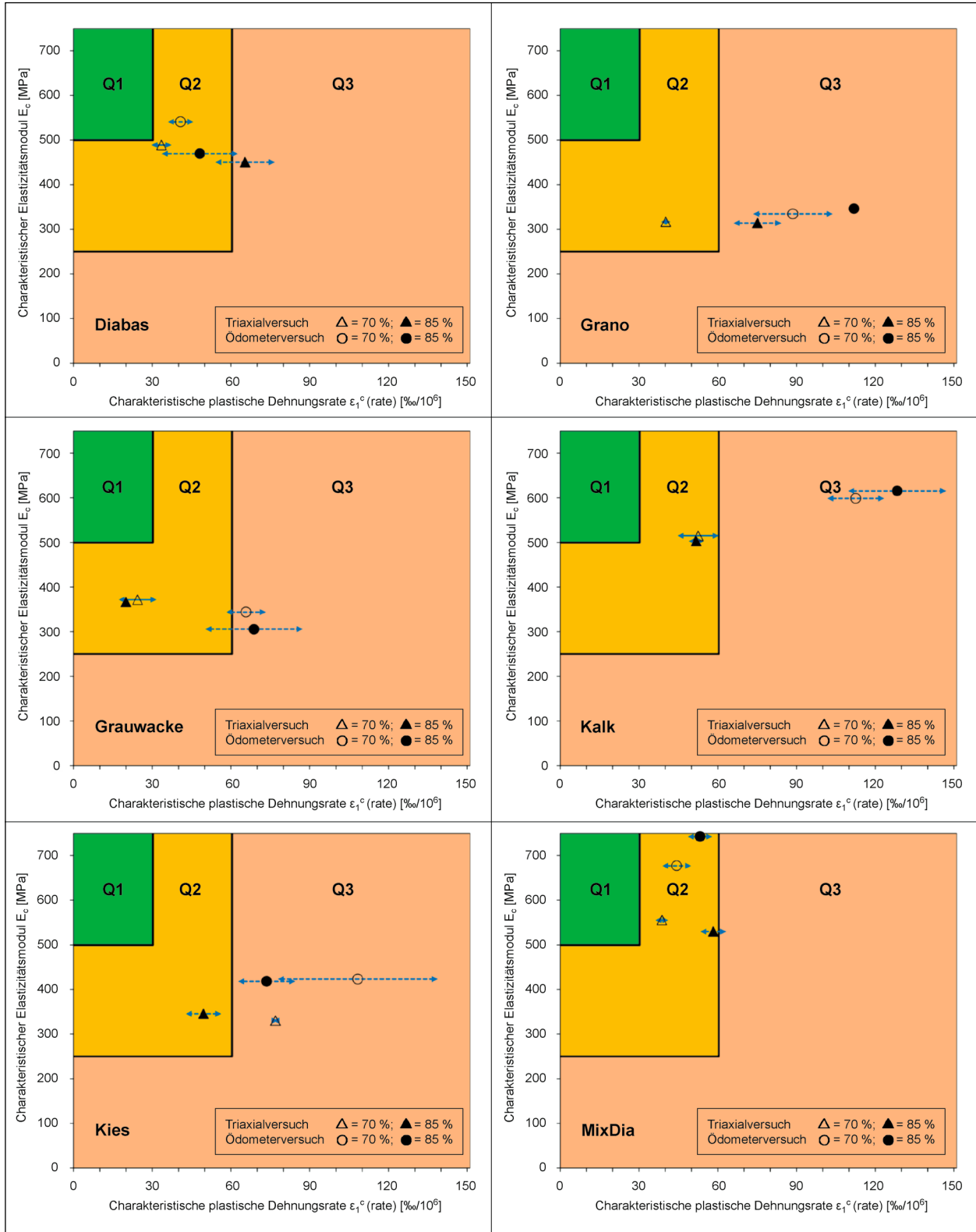


Bild 8-1: Klassifikation auf Basis der Vorversuche (ϵ_{1c}) und des elastischen Modells (E_c), Triaxial- und Ödometerversuch

hand der mit dem Modell berechneten charakteristischen plastische Axialdehnungsrate ε_{1c} mit dem Modell (Gleichung 13) eine Klassifizierung vorzunehmen. Die elastischen und plastischen Parameter wurden bei gleichem Spannungsniveau (bei $\sigma_1 = 583,33$ kPa; $\sigma_3 = 83,33$ kPa) bestimmt. Die Charakteristische plastische Dehnungsrate und der charakteristische Elastizitätsmodul stehen damit in direkter Beziehung zueinander.

Die Ergebnisse einer Klassifizierung auf Basis von Triaxialversuchen sowie auf Basis von Ödometer- und CBR-Versuchen ist in Bild 8-2 aufgezeigt. Wesentliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen, die mit verschiedenen Prüfmethode erzielt wurden, ergeben sich für die Klassifizierung des Kalksteins und MixDiabas. Aufgrund der hohen plastischen Dehnungen, ausgedrückt durch den Kennwert „charakteristische plastische Dehnungsrate ε_{1c} “, erfüllt Kalkstein nicht die Mindestanforderungen für die Klasse Q3. Bei MixDiabas wurden im plastischen Versuch nur geringe Dehnungsraten gemessen,

er kann deshalb auf Basis des Modells in Klasse Q1 eingestuft werden. Die Einstufungen für jedes Baustoffgemisch sind in der Übersicht Tabelle 8-3 zusammengefasst. Die Ziffern 1 bis 3 stehen für die Klassen Q1 bis Q3; wurde die Ziffer 4 vergeben, werden die Mindestanforderungen nach Tabelle 8-2 nicht erfüllt. Auch hier führt die Einstufung, je nach Versuch (Triaxial- oder Ödometer-/CBR-Versuch) zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Nimmt man jedoch den charakteristischen Elastizitätsmodul als alleiniges Einstufungskriterium (Tabelle 8-4), ergibt sich für beide Untersuchungsmethoden eine gute Übereinstimmung der Klassifizierungsergebnisse. Ein Ranking der Materialien nach Höhe des Elastizitätsmoduls liefert ebenfalls für beide Untersuchungsmethoden nahezu gleiche Ergebnisse (Bild 8-3 und Tabelle 8-5).

Es scheint also möglich, das elastische Dehnungsverhalten eines UBG auf Grundlage von Ödometerversuchen abschätzen zu können.

Baustoffgemisch	Vorversuch/el. Modell		el. + pl. Modell		Vorversuch/el. Modell		el. + pl. Modell	
	Triaxialversuch		Triaxialversuch		Ödometerversuch		Ödometer-/CBR-Versuch	
	w = 70 %	w = 85 %	w = 70 %	w = 85 %	w = 70 %	w = 85 %	w = 70 %	w = 85 %
Diabas	2	3	2	2	2	2	2	3
Grano	2	3	3	4	3	3	3	3
Grauwacke	2	2	2	2	3	3	4	4
Kalk	2	2	4	4	3	4	2	4
Kies	3	2	3	2	3	3	4	4
MixDia	2	2	1	1	2	2	4	2

Ziffer 4: Mindestanforderungen wurden nicht erfüllt

Tab. 8-3: Tabellarische Übersicht der Einstufungen in die Klassen Q1-Q3

Baustoffgemisch	Einstufungskriterium: Charakteristischer Elastizitätsmodul			
	Triaxialversuch		Ödometerversuch	
	w = 70 %	w = 85 %	w = 70 %	w = 85 %
Diabas	2	2	1	2
Grano	2	2	2	2
Grauwacke	2	2	2	2
Kalk	1	1	1	1
Kies	2	2	2	2
MixDia	1	1	1	1

Tab. 8-4: Einstufungen in die Klassen Q1-Q3; alleiniges Einstufungskriterium charakteristischer Elastizitätsmodul

Material	Ranking	
	Triaxialversuch	Ödometerversuch
Diabas	3	3
Granodiorit	6	6
Grauwacke	4	5
Kalkstein	2	2
Kies	5	4
MIX Diabas	1	1

Tab. 8-5: Ranking der untersuchten UBG

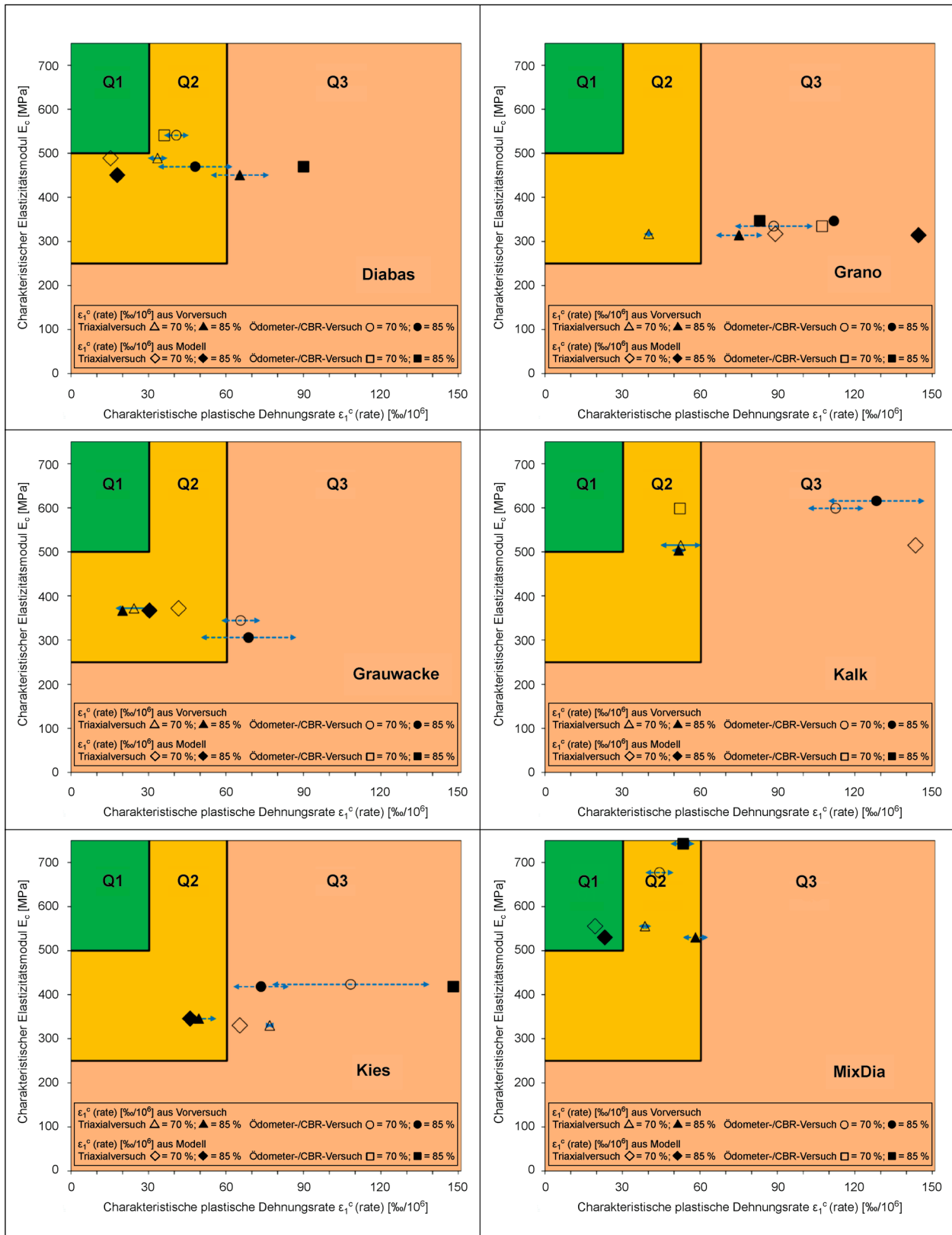


Bild 8-2: Klassifikation auf Basis des plastischen (ϵ_{1c}) und des elastischen (E_c) Modells, Triaxial- und Ödometer-/CBR-Versuch

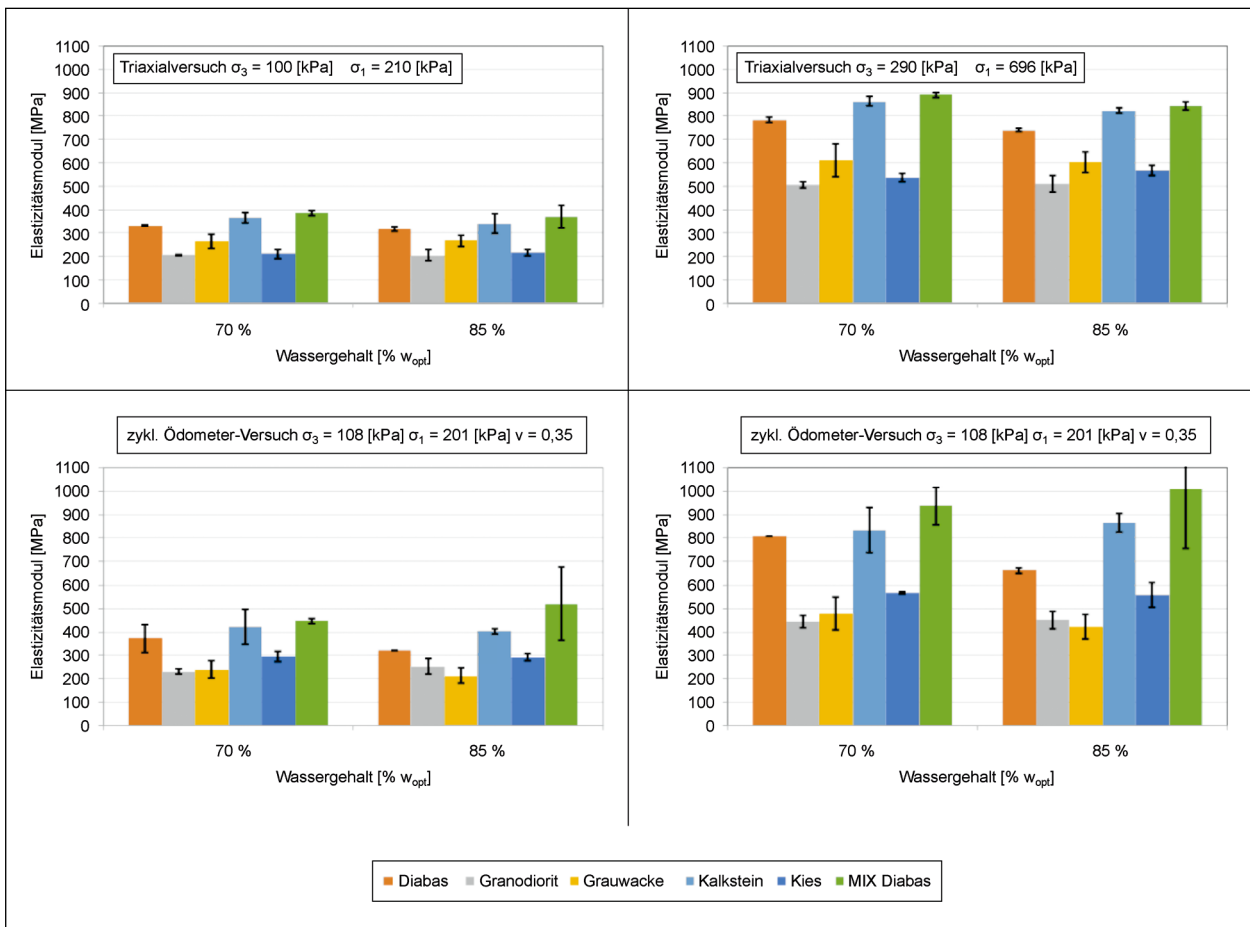


Bild 8-3: Ranking der Materialien nach dem Kriterium: Elastizitätsmodul, Untersuchungsmethoden Triaxial- und Ödometerversuch

8.3 Darstellung der Klassifizierung

Um eine bessere Bewertung und den Vergleich verschiedener UBG zu ermöglichen, wird die Darstellung gemäß (Bild 8-4) vorgeschlagen. In dieser Darstellung ist neben den charakteristischen Kenngrößen die Tendenz der plastischen Verformungen für mehrere Materialien erkennbar. Voraussetzung für diese Darstellung ist die Bestimmung der charakteristischen plastischen Axialdehnungsrate ϵ_{1c} mit dem Modell (Gleichung 13) und Berechnung der elastischen und plastischen Parameter bei gleichem Spannungsniveau ($\sigma_1 = 583,33 \text{ kPa}$; $\sigma_3 = 83,33 \text{ kPa}$).

In diesem Diagramm werden die Grenzen des charakteristischen Elastizitätsmoduls E_c durch eine äquivalente elastische Dehnung ($\epsilon_{1el,c}$) dargestellt. Die zu einem Grenzwert äquivalente elastische Dehnung wird mit einer Querdehnzahl $\nu = 0,45$ nach Gleichung 3 berechnet. Für jedes Baustoffgemisch wird die Entwicklung der plastischen Dehnungsrate in Abhängigkeit der äquivalenten elastischen Dehnung im Triaxialversuch als Graph aufgetragen

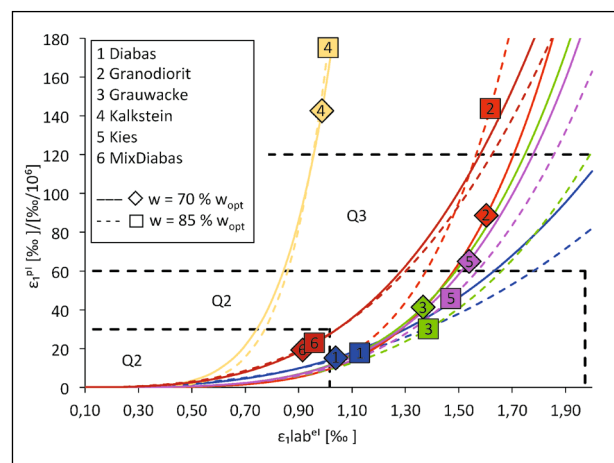


Bild 8-4: Ergebnis der Klassifizierung, alle Baustoffgemische, Untersuchungsmethode Triaxialversuch

(Kurvenverlauf nach Gleichung 13 mit Modellparametern nach Tabelle 6-8). Ein Punkt auf diesem Graphen markiert die zum charakteristischen Elastizitätsmodul E_c äquivalente elastische Dehnung ($\epsilon_{1el,c}$) und die zugehörige charakteristische plastische Axialdehnungsrate ϵ_{1c} .

8.4 Spannungsverhältnisse

Bild 8-5 zeigt die Spannungsverhältnisse für die Klassifizierung nach [DIN EN 13286-7] und die in den Triaxial- und Ödometerversuchen angewendeten Spannungen.

Die [DIN EN 13286-7] definiert den charakteristischen Elastizitätsmodul E_c für ein sehr hohes Spannungsniveau (rote Raute in Bild 8-5). Dieses hohe Spannungsniveau korrespondiert mit den rechnerisch ermittelten Spannungen in ToB unter dünnen Asphalt-schichten (siehe auch Kapitel 4). Es liegt oberhalb der in [ARN 06] veröffentlichten Versagenslinie für UBG geringer Qualität. Nach DIN EN 13286-7 ist der Versuch zur Bestimmung der Klassifizierungsparameter auf einem noch höheren Spannungsniveau durchzuführen (orangener Punkt in Bild 8-5). Das Spannungsniveau des charakteristischen Elastizitätsmoduls E_c wird dabei jedoch nicht durchlaufen. Das bedeutet, der charakteristische Elastizitätsmodul E_c ist mithilfe eines Modells zu bestimmen, die Modellprognose liegt dabei außerhalb des untersuchten Spannungsbereiches (Extrapolation).

Die in diesem Projekt untersuchten Spannungspfade der Triaxialversuche zur Bestimmung des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens (Bild 8-5, blaue Quadrate, blaue Dreiecke) liegen unterhalb des charakteristischen Spannungsniveaus. Auch hier sind Modelle erforderlich, um die charakteristischen Parameter zu ermitteln. Die dabei notwendige Extrapolation über die Spannungsberei-

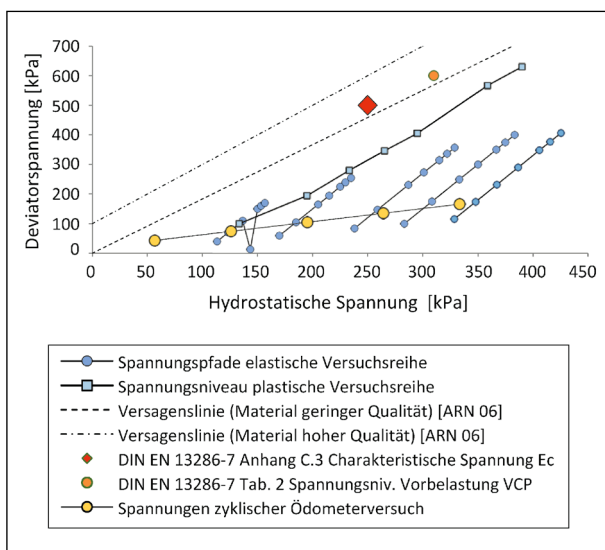


Bild 8-5: Spannungsverhältnisse für die Klassifizierung nach [DIN EN 13286-7] und angewendete Spannungen im Triaxial- und Ödometerversuch

che der Versuche ist kritisch zu bewerten. Die Modelle liefern für diesen Fall keine gesicherten Aussagen. Für gesicherte Aussagen ist die Aufnahme eines Spannungspfades mit dem charakteristischen Spannungsniveau in die Versuchsprozedur notwendig.

Der Spannungspfad des zyklischen Ödometerversuches (Bild 8-5, gelbe Punkte) liegt weit unter dem charakteristischen Spannungsniveau. Aufgrund der großen Differenz zwischen untersuchtem Spannungsniveau und dem Spannungsniveau des charakteristischen Elastizitätsmoduls E_c hat die Prognose für diesen Wert (Ermittlung auf Basis eines Modells) eine hohe Unsicherheit. Eine Anpassung der Versuchsprozedur mit dem Ziel, das charakteristische Spannungsniveau zu erreichen, ist nicht möglich.

Um gesicherte Aussagen über die zur Klassifizierung verwendeten Materialparameter treffen zu können, müssen Versuche auf dem Spannungsniveau der Klassifizierung durchgeführt werden. Das Spannungsniveau für das Klassifizierungsverfahren sollte dabei immer in Bezug zu den in der ToB erwarteten Spannungen gewählt werden. Eine Klassifizierung von UBG für Straßenbefestigungen nach RStO 12 kann auf einem deutlich niedrigeren Spannungsniveau erfolgen als die Klassifizierung für Straßenbefestigungen mit dünnen Asphalt-schichten.

8.5 Anpassung der Versuchsprozedur

Der in [DIN EN 13286-7] beschriebene Klassifizierungsansatz basiert auf den Ergebnissen eines Versuches, welcher bei variabler Zellspannung und einem Spannungsniveau $\sigma_{dmax} = 600$ kPa; $\sigma_{3max} = 110$ kPa durchzuführen ist. Wie bereits festgestellt (siehe Kapitel 8.1), muss an diesem Probekörper neben dem plastischen Materialverhalten auch das elastische Materialverhalten bei verschiedenen Spannungsniveaus untersucht werden, um den charakteristischen Elastizitätsmodul bestimmen zu können. Zur Klassifizierung eines Baustoffgemisches sind folglich immer mehrere Untersuchungen durchzuführen, die angestrebte Reduzierung des Prüfaufwandes auf einen Versuch ist nicht zielführend.

Im Ergebnis seiner Untersuchungen kommt [PAT 15] zu dem Schluss, dass das Spannungsverhältnis (σ_1/σ_3) einer Vorbelastungsprozedur den Wert von 3 nicht überschreiten sollte. In vorgenanntem Ver-

sich wird dieser Wert deutlich überschritten, mit Verweis auf [PAT 15] ist er als Vorversuch zur Untersuchung des elastischen Materialverhaltens ungeeignet.

Es ist somit zweckmäßig, auch die Klassifizierung auf Basis der in diesem Projekt angewandten Versuchsprozedur (siehe Kapitel 6) vorzunehmen. Zur Reduzierung der Prüfzeiten könnten in diesem Fall (Untersuchung dient ausschließlich der Klassifizierung) die zeitintensiven Untersuchungen zum plastischen Verformungsverhalten beispielsweise auf 25.000 Lastwechsel beschränkt werden.

Bei Laborversuchen zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens ist zu beobachten, dass die akkumulierte plastische Dehnung während der ersten Lastwechsel stark zunimmt und sich anschließend asymptotisch einem Wert nähert. Das Ende dieser Nachverdichtungsphase ist spannungsabhängig und liegt im Bereich von Lastwechselzahlen zwischen 100 und 5.000. Diese Nachverdichtungsphase sollte bei der Beschreibung des plastischen Langzeitverhaltens unberücksichtigt bleiben. Auch in [DIN EN 13286-7] werden unterschiedliche Lastwechselzahlen der Nachverdichtungsphase bei Bestimmung von Grenzwerten plastischer Dehnungen und Dehnungsraten verwendet (siehe Tabelle 8-6). Um diese Grenzwerte vergleichbar zu machen, erscheint es zweckmäßig, die Nachverdichtungsphase einheitlich zu definieren.

Für die Einstufung und Bewertung des plastischen Verformungsverhaltens werden in [DIN EN 13286-7] unterschiedliche Lastwechselintervalle und Dehnungen verwendet. Die Grenzwerte der Klassifizierung sollten jedoch z. B. in Bezug zu den Shakedown-Grenzen stehen. Um ein Baustoffgemisch in die Klasse Q1 einzustufen, sollte die plastische Shakedown-Grenze bei einem charakteristischen Spannungsniveau nicht überschritten werden. Für eine vergleichbare Ermittlung der plastischen Deh-

nungsraten ist es zweckmäßig, die zugrundeliegenden Lastwechselintervalle anzupassen und mit Bezug auf [DIN EN 13286-7] Abschnitt C.4.2.1 charakteristische Dehnungsraten im Lastwechselintervall 3.000 – 5.000 zu bestimmen.

8.6 Zusammenfassung

Für eine Klassifizierung mit dem Ziel eine Vorauswahl geeigneter Materialien zu treffen, wurden unterschiedliche Verfahrensweisen untersucht.

Eine Abschätzung der Eignung im Sinne eines Rankings von Materialien auf Basis von zyklischen Ödometer- und CBR-Versuchen scheint nur bedingt möglich. Aufgrund der geringen Prognosesicherheit dieses Verfahrens, insbesondere bei Einschätzung des plastischen Verformungsverhaltens im CBR-Versuch, ist dieses Verfahren in seiner jetzigen Entwicklungsstufe nicht zu empfehlen.

Soll die Klassifizierung realitätsnahe Aussagen zur Eignung liefern, sind Untersuchungen auf dem Spannungsniveau durchzuführen, für welches die Klassifizierungsparameter definiert sind, bzw. welchem die ToB in-situ ausgesetzt wird. Diese Versuche sind gegenwärtig nur mit einer Triaxialanlage realisierbar.

Die Bestimmung der Klassifizierungsparameter auf Grundlage eines Versuches mit nur einem Spannungsniveau und variabler Zellspannung erscheint nicht zweckmäßig. Die Beschreibung des plastischen und elastischen Verformungsverhaltens auf Basis eines untersuchten Spannungsniveaus entspricht sinngemäß dem Einpunkt-Versuch. Mit einer Modifikation der in diesem Forschungsprojekt vorgestellten Prüfprozedur (siehe Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-3) ist bei angemessenem Mehraufwand eine bessere und zielgerichtetere Beschreibung des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens

[DIN EN 13286-7]	Lastwechselintervall LW [-]		Dehnung ϵ_{1P} [‰]	Dehnungsrate ϵ_{1P} (rate) [‰/10 ⁶]
Tabelle C.1				
Mindestwert für ϵ_{1c} in Klasse C1	100	20.000	2,500	125,63
Mindestwert für ϵ_{1c} in Klasse C3	100	20.000	6,000	301,51
Abschnitt C.4.2.1 Grenzen				
plastische Shakedown-Grenze	3.000	5.000	0,045	22,50
plastische Kriechgrenze	3.000	5.000	0,400	200,00

Tab. 8-6: Grenzwerte für plastische Dehnungen und Dehnungsraten nach [DIN EN 13286-7]

möglich. Die zeitaufwändigen Versuche zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens bieten dabei das größte Optimierungspotenzial. Bei Reduzierung der Untersuchung auf 25.000 Lastwechsel je Laststufe und der Anwendung von Multi-Stage-Versuchen anstelle von Einpunkt-Versuchen liefern die Versuche im Rahmen der Klassifizierung ausreichend genaue Informationen.

Der in [DIN EN 13286-7] mit $w = 98 \% w_{opt}$ festgelegte Wassergehalt des Probekörpers ist im Vergleich zu hier durchgeführten Versuchen mit $w = 85 \% w_{opt}$ sehr hoch. Inwiefern sich dieser hohe Wassergehalt versuchstechnisch realisieren lässt, kann anhand der in diesem Projekt durchgeführten Versuche nicht beurteilt werden. Bei hohen Wassergehalten besteht die Gefahr, dass bereits während der Probekörperherstellung und der Vorverdichtung Wasser aus dem Probekörper austritt, sodass der Wassergehalt des Probekörpers bei der Prüfung nicht dem Zielwassergehalt des UGB (beim Einbau des UGB eingestellter Wassergehalt) entspricht.

Die, insbesondere für Straßenbefestigungen mit Pflaster- und Betondecken, wesentliche Eigenschaft der Wasserdurchlässigkeit bleibt bei der Klassifizierung unberücksichtigt. UBG, welche im Ergebnis der Klassifizierung als geeignet eingestuft werden und in die engere Materialauswahl kommen, sollten auch hinsichtlich dieser Eigenschaft geprüft werden.

9 Maßgebende Lastfälle für die analytische Dimensionierung

9.1 Lastfälle aus Verkehr und Witterung

Straßenbefestigungen sind, unabhängig von ihrer Bauweise, durch Verkehr und Witterung induzierten Belastungen ausgesetzt. In Abhängigkeit vom jeweiligen strukturellen Aufbau einer Straßenbefestigung und der lokalen Gegebenheiten ergeben sich unterschiedliche Wichtungen der beiden Komponenten Verkehr und Witterung. Die einzelnen Schichten einer Straßenbefestigung sind so zu konzipieren, dass sie den zu erwartenden Belastungen ausreichend standhalten.

Verkehrsbelastung

Die Belastung aus der Komponente Verkehr manifestiert sich in zu erwartenden Achslasten und de-

ren Auftretenshäufigkeiten. Grundlage diese Prognose sind Verkehrszählungen und deren statistische Auswertung.

Witterung

Prognosen für die Komponente Witterung finden über die Definition von Frosteinwirkungs- und Temperaturzonen Eingang ins aktuellen Regelwerk ([RStO 12], [RDO Asphalt 09]). Aus der Einstufung in eine Frosteinwirkungszone ergibt sich die Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus. Die aus der Oberflächentemperatur abgeleitete Asphaltsteifigkeit ergibt sich aus der statistischen Verteilung der Asphaltoberflächentemperatur im Jahresverlauf der jeweiligen Temperaturzone. Niederschlagsereignisse und deren Auswirkungen werden bei der Dimensionierung bisher nur für den Fall, dass keine ausreichenden Entwässerungsmaßnahmen gewährleistet werden können, berücksichtigt (siehe [RDO Asphalt 09] Anhang 4).

Aus den bisherigen Untersuchungen geht jedoch hervor, dass die Steifigkeit der ToB vom Wassergehalt abhängig ist. Insofern sind bei der analytischen Dimensionierung die jahreszeitlichen Schwankungen des Wassergehaltes in der ToB zu berücksichtigen.

9.2 FE-Rechnungen zum Einfluss des Wassergehaltes

Die Steifigkeit der ToB ist abhängig vom Wassergehalt, welcher wiederum, resultierend aus unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen, stark schwanken kann. Um die Auswirkung unterschiedlicher Kombinationen von Temperatur und Wassergehalt auf das Verformungsverhalten der ToB abschätzen zu können, wurden FE-Berechnungen durchgeführt. Die Untersuchung erfolgte für 4 Kombinationen des Temperatur-/Wassergehaltes (Winter, Frühling, Sommer, Herbst) an zwei Straßenbefestigungen (analog Kapitel 4) und 6 UBG (siehe Tabelle 5-2) bei gleicher Verkehrslast. Den Aufbau der untersuchten Befestigungen zeigt Bild 4-1, die Parameter des verwendeten Stoffmodells entsprechen Tabelle 6-6, weitere Eingangsparameter der FE-Berechnung sind in Tabelle 9-1 zusammengefasst.

Entsprechend der Überlegung, dass gleiche elastische Dehnungen zu gleichen plastischen Dehnungen führen, wurden die elastischen Dehnungen in

der ToB als Bewertungskriterium gewählt. Aus den Ergebnissen der FE-Berechnungen in Bild 9-1 kann geschlussfolgert werden, dass unter dicken As-

phaltschichten die temperaturabhängigen Schwankungen der Asphaltsteifigkeit den größten Einfluss auf die elastischen Dehnungen in den ToB haben.

Spannung [kPa]	Szenarien	Temperatur [°C]	Wassergehalt [w/w _{opt}]	Elastizitätsmodul FSS [MPa]	Elastizitätsmodul Planum [MPa]
700	Winter	-10	85	120	45
	Frühling	0	85	60	25
	Sommer	50	70	120	45
	Herbst	0	70	120	45

Tab. 9-1: Eingangsparameter der FE-Berechnung (Auswahl)

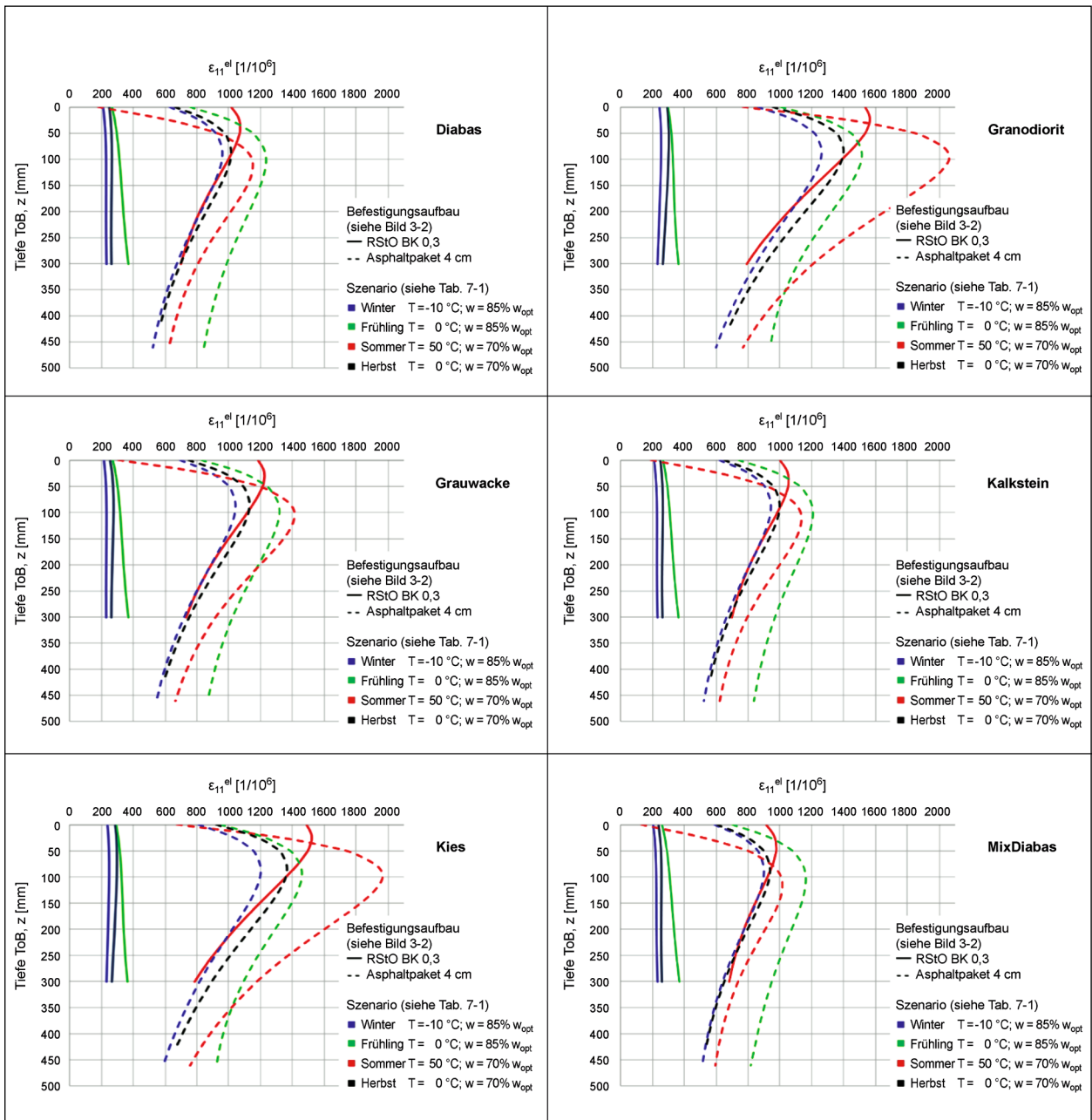


Bild 9-1: Elastische Dehnungen in der ToB, Ergebnis der FE-Berechnungen

Die unterschiedlichen Wassergehalte in der ToB bei Temperaturen von 0 °C haben hier deutlich geringere Auswirkung.

Im Gegensatz dazu ist unter dünnen Asphaltsschichten ein signifikanter Einfluss des Wassergehaltes der ToB auf die elastischen Dehnungen festzustellen. Während bei Granodiorit, Grauwacke und Kies die größten elastischen Dehnungen im Szenario „Sommer“ auftreten, sind bei Diabas, Kalkstein und MixDiabas die größten Dehnungen bei hohen Wassergehalten im Szenario „Frühling“. Darüber hinaus ist zu beobachten, dass die Maxima der elastischen Dehnungen nicht unmittelbar an der Oberfläche der ToB, sondern, je nach Befestigungsaufbau, in 4 bis 10 cm Tiefe auftreten.

Daraus ist zu schließen, dass, je nach gewähltem Befestigungsaufbau, verwendetem UBG und der auftretenden Oberflächentemperatur des Asphaltes, der Wassergehalt in der ToB maßgebend für die Maxima der auftretenden elastischen Dehnungen in der ToB sein kann. Es besteht somit die Notwendigkeit, das Verformungsverhalten des UBGs bei den zu erwartenden Wassergehalten zu bestimmen, wobei die ermittelten Parameter dimensionierungsrelevant sind.

9.3 Wassergehalte in der ToB

Die Berücksichtigung der Abhängigkeit des Verformungsverhaltens von ToB vom Wassergehalt bei der analytischen Dimensionierung setzt voraus, dass zu erwartende Wassergehalte hinsichtlich ihres Betrages (w/w_{opt}), ihrer Dauer (Tage/Jahr) und ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit bei bestimmten Temperaturen bekannt sind. Diesbezüglich wurden verschiedene Literaturquellen ausgewertet.

In [WEL 14] wurden Verfahrensweisen zur Dimensionierung von niedrig beanspruchten Straßen im Ausland zusammengetragen und analysiert. Einige dieser Verfahrensweisen berücksichtigen zwar die jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur und der Tragfähigkeit, jedoch wird kein Bezug zu konkreten Wassergehalten in der ToB bzw. im Untergrund hergestellt.

Bei einem in [WEL 14] beschriebenen Feldversuch wurde die Entwicklung des Wassergehaltes in der ToB in einer Tiefe von 15 cm aufgezeichnet. Im Ergebnis wurden zwei Szenarien definiert, ein „Natürlicher Wassergehalt“ mit $w = 3,5 \text{ M.-%}$ (bzw. 70%

w_{opt}) und ein „Erhöhter Wassergehalt“ mit $w = 4,0 \text{ M.-%}$ (bzw. 80% w_{opt}).

Im Rahmen des Forschungsprojektes AP F1100. 3206001 „Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen“ [JAN 11] wurden Feuchtemessungen mit Sensoren in der ToB und dem Unterbau (Einschnitt/Damm) durchgeführt. Dabei wurden zum gleichen Zeitpunkt in der Frostschutzschicht höhere Wassergehalte als im Untergrund gemessen. Die Wassergehalte in der Frostschutzschicht lagen bei 8 – 15 M.-%. Eine direkte Abhängigkeit der Wassergehalte von den gemessenen Niederschlägen konnte nicht nachgewiesen werden, ein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem Jahresgang des Wassergehaltes und der monatlichen Niederschlagssummen war jedoch erkennbar.

Die im Auftrag der BAST durchgeführte Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustands [SCHU 12] berichtet von Sensoren, die zur Erfassung der Bodenfeuchte zwei unterschiedliche Messmethoden nutzen. Im Ergebnis der Studie wurde festgestellt, dass das vorgeschlagene Messsystem in der Lage ist, den strukturellen Zustand der Straße zu erfassen. Zum erfolgreichen Einsatz dieser Systeme war jedoch kein Vermerk enthalten. Jedoch wird im Artikel [BAST 20] über ein Vorhaben zur Entwicklung produktionsreifer Druckspannungssensoren berichtet, in welches die Überlegungen aus vorgenannter Studie derart einfließen sollen, dass durch die Integration von Sensoren für die Umgebung (Temperatur und Feuchte) ein erster Multisensor entsteht. Im Artikel werden Schwierigkeiten beim Einsatz der Druckspannungssensoren (fehlende Kalibriermöglichkeit nach dem Einbau, Modernisierungsbedarf der Schnittstelle) genannt, Hinweise zum Einsatz der Feuchtesensoren fehlen. Es ist zu vermuten, dass die Machbarkeitsstudie den letzten Entwicklungsstand der Feuchtesensoren widerspiegelt und keine weiteren Erfahrungen vorliegen.

9.4 Berücksichtigung des Wassergehaltes in der Dimensionierung

Konkrete Werte für die eingangs genannten Dimensionierungsparameter (zum Wassergehalt in der ToB) wurden in der Literatur nicht gefunden. Die Forcierung der Entwicklung geeigneter Sensoren zur Erfassung dieser Daten im Feldversuch ist je-

doch ein Indiz für Interesse und erkannte Notwendigkeit, diese Einflussgrößen bestimmen zu können. Die in [JAN 11] gewonnenen Erkenntnisse zum jahreszeitlichen Verlauf des Wassergehaltes in der untersuchten ToB und dabei gemessene Werte sind nur bedingt auf andere ToB übertragbar. Aus den Untersuchungsergebnissen kann jedoch geschlossen werden, dass neben der Witterung (äußerer Einfluss) die Bauweise der Deckschicht sowie Beschaffenheit und Zustand des eingesetzten Baustoffgemisches wesentlichen Einfluss auf den jahreszeitlichen Verlauf des Wassergehaltes in der ToB haben.

Voraussetzung einer realitätsnahen Dimensionierung ist folglich die Charakterisierung bzw. Quantifizierung des Wasserzutrittspotenzials und des Verhaltens der ToB bezüglich der Wasseraufnahme (Infiltrationsvermögen) und -abgabe. Das Infiltrationsvermögen der ToB lässt sich versuchs-technisch bestimmen, in den [TP Gestein-StB 15] sind dafür zwei unterschiedliche Verfahren beschrieben. Umfangreiches Wissen und Erkenntnisse zu Wasserdurchlässigkeit und Infiltrationsvermögen von ToB sind in [WOL14] zusammengetragen, die betragsmäßige Höhe des Wassergehaltes und deren zeitlicher Verlauf waren jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

Eine Möglichkeit, Informationen zum jahreszeitlichen Verlauf des Wassergehaltes in der ToB zu erhalten, bietet die Berechnungsmethode des DWD zur Bestimmung der Bodenfeuchte. Für die Berechnungen wird das an der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle Braunschweig entwickelte Modell AMBAV (Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung) verwendet. Basierend auf Wetterdaten, charakterisierenden Bodenkenngrößen und Zustandsdaten zum Startzeitpunkt des Modells (Startwerte) wird täglich die Bodenfeuchte für verschiedene Kulturen und Böden berechnet (siehe [DWD] und [LÖP 83]).

Voraussetzung für ein äquivalentes Modell zur Berechnung des Wassergehaltes in den ToB wären Kenngrößen der Straßenbefestigung bzw. der ToB und Feuchtigkeitsmesswerte zum Startzeitpunkt. Durch Verknüpfung dieser Berechnungen mit einem Klimamodell ließen sich Prognosen bezüglich Höhe und Auftretenshäufigkeit bestimmter Wassergehalte treffen. Ein solches Vorhaben ließe sich zum Beispiel durch Erweiterung des in [CLA 20] vorgestellten Simulationsmodells zur Berechnung der thermischen Zustände in der Straßenkonstruktio-

on für die Nachweisführung nach den RDO realisieren.

Nach den [RDO Asphalt 09] ist für die kritische Frühjahrsperiode (Tauperiode) ein verminderter Schichtenmodul für die ToB anzusetzen. Die Tauperiode umfasst dabei alle Tage mit durchschnittlichen Asphaltoberflächentemperaturen zwischen -10 °C und $+10\text{ °C}$. In Abhängigkeit der klimatischen Gegebenheiten fallen 44,0 % bis 48,7 % der Tage eines Jahres in Deutschland in diese Periode, der Tauperiode kann aber nur die Hälfte dieser Tage zugeordnet werden.

Insofern keine belastbaren Daten zum jahreszeitlichen Verlauf des Wassergehaltes in der ToB vorliegen, wird empfohlen, für die Hälfte aller Achsübergänge bei Asphaltoberflächentemperaturen zwischen -10 °C und $+10\text{ °C}$ erhöhte Wassergehalte in der Dimensionierung anzusetzen. Diese Vorgehensweise ist konform zur Bewertung der Tauperiode in [RDO Asphalt 09] Abschnitt „Verformungskenn- und Vergleichswerte in Böden“.

10 Ansatz zur Ermittlung der plastischen Verformungen in der ToB im Rahmen einer analytischen Dimensionierung

10.1 Berechnung der vertikalen plastischen Verformung

Das im Folgenden beschriebene Verfahren zur Ermittlung der plastischen Verformungen in der ToB basiert auf dem im FE 09.0175/2011/ERB entwickelten plastischen Verformungsmodell, welches den Zusammenhang zwischen den bleibenden Verformungen der Struktur und den Spannungen sowie den Lastwechselzahlen gut abbildet. Das Modell stützt sich auf das in Laboruntersuchungen beobachtete plastische Materialverhalten und wurde im Projekt FE 09.0175/2001/ERB [WEL 14] anhand von Feldversuchen validiert.

Voraussetzungen für die Anwendung dieses Verfahrens sind:

- A) Materialparameter für ein elastisches Modell
- B) Materialparameter für das plastische Modell nach Gleichung 13 (dehnungsbasiertes Modell)

C) FE-Berechnungen auf Basis der Materialparameter des elastischen Modells (A) für die gewählte Kombination aus Verkehrslast/Befestigungsaufbau/Asphaltoberflächentemperatur/Wassergehalt der ToB

Entsprechend bisheriger Untersuchungen treten die maximalen Spannungen bzw. elastischen Dehnungen mittig unter der Lasteintragsfläche auf. Die Auswertung der FE-Rechnung beschränkt sich daher auf die Nachweispunkte (points of response), welche vertikal auf einer Linie mittig unter der Lasteintragsfläche liegen. Im Ergebnis der FE-Rechnung muss für jeden dieser Punkte folgender Datensatz bereitstehen:

- Koordinaten zur Lage des Punktes im Straßenkörper bzw. Modellraum (x, y, z [mm])
- die vertikale Dehnungskomponente $\varepsilon_1^{el}_{feld}$
- alle Komponenten des Cauchy-Spannungstensors $(\sigma_{ij})_{feld}$

Berechnungsschritte

(1) Äquivalente Spannung unter triaxialen Spannungsbedingungen
(axialsymmetrischer Hauptspannungszustand)

Aus den Komponenten des Cauchy-Spannungstensors $(\sigma_{ij})_{feld}$ sind die Spannungen des äquivalenten axialsymmetrischen Hauptspannungszustandes $(\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3)$ zu berechnen, welcher dem Spannungszustand unter RLT-Bedingungen $(\sigma_1 \sigma_3)_{lab}$ entspricht. Dies ist wie folgt durchzuführen:

Für den Cauchy-Spannungstensor $(\sigma_{ij})_{feld}$ (welcher den allgemeinen Spannungszustand des beobachteten Punktes beschreibt) ist die erste Invariante und die Oktaederschubspannung zu bestimmen.

- erste Invariante des Spannungstensors (Summe der drei Hauptspannungen):

$$I_1 = \theta = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad \text{Gl. 25}$$

(Druckspannungen sind positiv einzusetzen, siehe auch Hinweis zu Gleichung 9)

- Oktaederschubspannung:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \left((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12} + \sigma_{23} + \sigma_{31})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Gl. 26}$$

Für den axialsymmetrischen Spannungszustand im Triaxialversuch lassen sich diese Größen wie folgt darstellen:

$$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 \quad \text{Gl. 27}$$

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \text{siehe Gl. 11}$$

Mit diesen zwei Beziehungen können die zum allgemeinen Spannungszustand $((\sigma_{ij})_{feld})$ äquivalenten Spannungen im Triaxialversuch $((\sigma_1 \sigma_3)_{lab})$ berechnet werden. Dafür ist das Gleichungssystem (bestehend aus Gleichung 11 und Gleichung 27) nach σ_1 und σ_3 aufzulösen (siehe Gleichung 28 und Gleichung 29) und die nach Gleichung 25 und Gleichung 26 für θ und τ_{oct} bestimmten Größen einzusetzen.

$$\sigma_1 = \frac{1}{3}\theta + \sqrt{2}\tau_{oct} \quad \text{Gl. 28}$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{3}\theta - \frac{1}{\sqrt{2}}\tau_{oct} \quad \text{Gl. 29}$$

(2) Äquivalente Dehnung unter triaxialen Spannungsbedingungen

Mithilfe der äquivalenten Spannungen ist nun mit Gleichung 3 eine äquivalente axiale Dehnung zu berechnen.

$$(\varepsilon_1^{el})_{lab} = \frac{1}{E_r} (\sigma_1 - 2\nu\sigma_3) \quad \text{siehe Gl. 3}$$

Diese Dehnung ist als elastische Dehnungskomponente zu interpretieren, welche sich beim berechneten Spannungszustand im Prüfkörper in vertikaler Richtung ausbildet.

(3) Äquivalente plastische Dehnungsrate unter triaxialen Spannungsbedingungen

Die äquivalente plastische Dehnungsrate (λ [%/10⁶]) wird unter Verwendung des dehnungs-basierten Modells (Gleichung 13), zugehöriger Materialparameter und der im letzten Schritt berechneten Dehnung $(\varepsilon_1^{el})_{lab}$ ermittelt.

(4) Äquivalente plastische Dehnung unter triaxialen Spannungsbedingungen

Die Multiplikation der äquivalenten plastischen Dehnungsrate mit der zu berücksichtigenden Lastwechselzahl ergibt die äquivalente plastische Dehnung.

Der Zahlenwert für λ ist hierbei mit 10^6 zu multiplizieren, da die Dehnungsrate in $[\%/10^6]$ (Promille je eine Million Lastwechsel) angegeben wird.

(5) Bleibende Dehnungen in der Befestigung

Mit Anwendung von Gleichung 15 (siehe Kapitel 3.3) werden die plastischen Dehnungen unter Laborbedingungen (Grundlage des Berechnungsmodells) in plastische Dehnungen unter Realbedingungen übertragen (siehe Gleichung 30).

$$\varepsilon_{1,feld}^{pl} = \left(\varepsilon_{1,lab}^{pl} \right) \frac{\varepsilon_{1,feld}^{el}}{\varepsilon_{lab}^{el}} \quad \text{Gl. 30}$$

(6) Aufsummierung der vertikalen plastischen Verformungen

Reduziert man das FE-Modell auf die zweidimensionale x/z-Ebene (vgl. Bild 9-1) entspricht jeder Nachweispunkt (point of response) dem Mittelpunkt eines Rechtecks, dessen Kanten auf einer Randfläche oder mittig zwischen zwei Punkten liegen. Die Höhe eines Rechtecks entspricht demnach der hal-

ben Entfernung (Differenz der z-Koordinate [mm]) zu beiden benachbarten Punkten. (Wenn der benachbarte Punkt auf einer Randfläche liegt, ist der Abstand nicht zu halbieren.) Die Multiplikation dieser Höhe mit $\varepsilon_{1,feld}^{el} [\%]$ ergibt die anteilige Verformung. Die Verformung auf der Oberfläche der ToB entspricht der Summe aller anteiligen Verformungen.

Im Ergebnis dieser Berechnungsschritte erhält man die plastische Verformung auf der ToB nach N Lastwechseln für eine Kombination aus Verkehrslast/Befestigungsaufbau/Asphaltoberflächentemperatur/Wassergehalt der ToB.

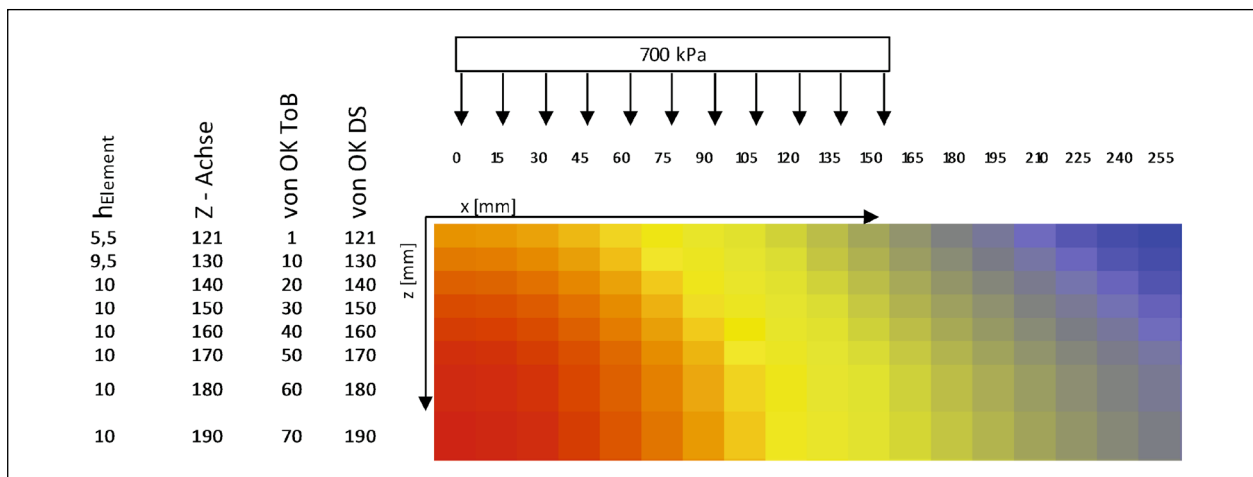


Bild 10-1: Ausschnitt aus 2D-Darstellung von Ergebnissen der FE-Rechnung, Zahlenwerte von Nachweispunkten und zugehörige Koordinaten sowie Höhe des Elements

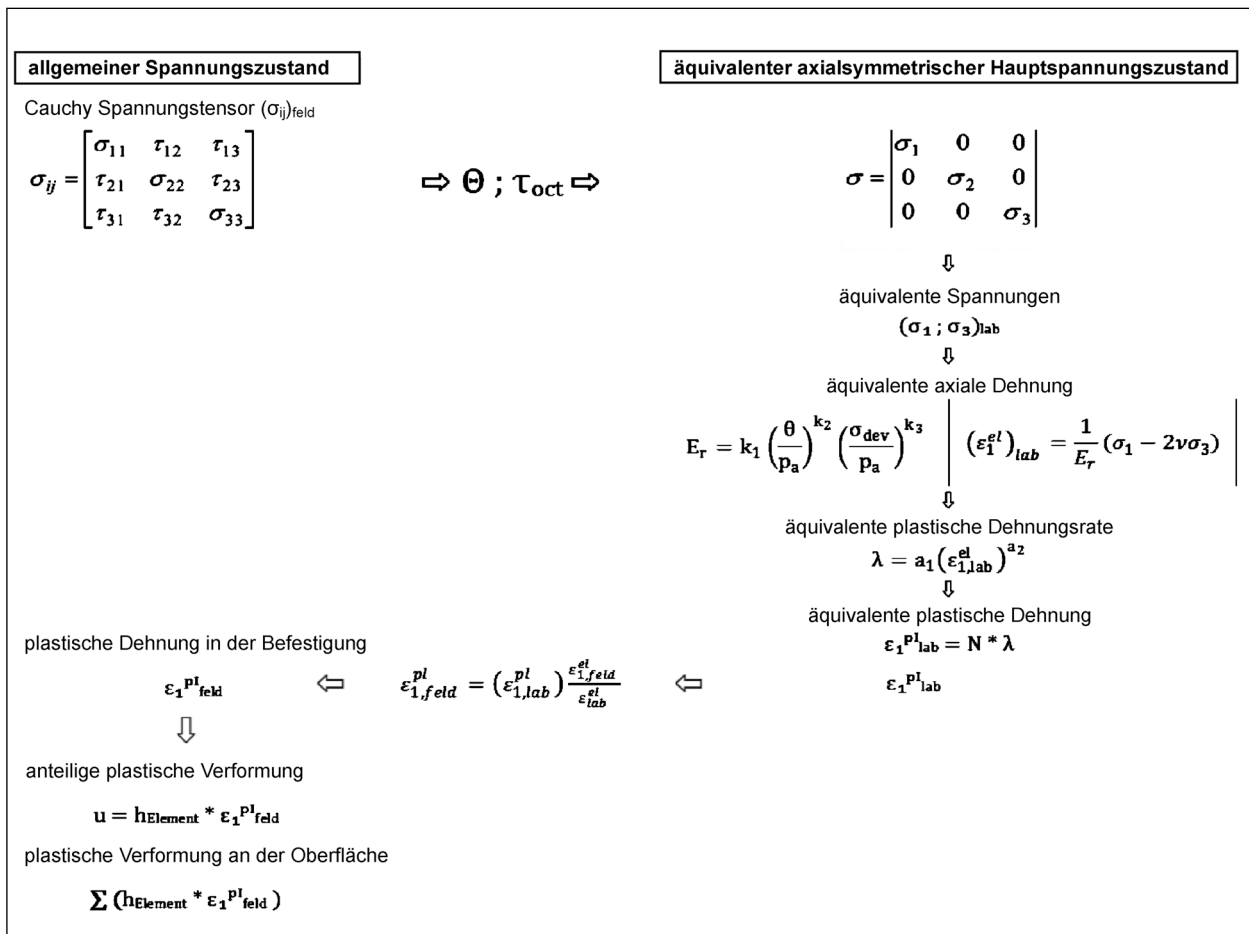


Bild 10-2: Ablaufschema Berechnung der vertikalen plastischen Verformung

10.2 Dimensionierungskriterien hinsichtlich der plastischen Verformung

Zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit der ToB über den vorgesehenen Nutzungszeitraum werden folgende Dimensionierungskriterien empfohlen:

- **Begrenzung der Spannungen in der ToB**

Gesicherte Prognosen zur Entwicklung der plastischen Verformungen auf Basis des hier vorgestellten Modells sind grundsätzlich nur in den Grenzen der im Versuch geprüften Spannungen, Lastwechselzahlen und Materialzustände möglich. Sollen Dehnungen für größere Lastwechselzahlen prognostiziert werden, ist sicherzustellen, dass das maximale Spannungsniveau unterhalb der plastischen Shakedown-Grenze des Materials liegt.

Im Ergebnis der Untersuchungen von [PAT 15] ist ein dauerhaft rein elastisches Verformungsverhalten

in ToB nur zu erwarten, wenn der charakteristische Grenzdehnungszustand nicht überschritten wird. Der charakteristische Grenzdehnungszustand kann durch Grenzspannungsverhältnisse beschrieben werden (siehe auch Kapitel 6.5.6). Diese sind im Zusammenhang mit der plastischen Shakedown-Grenze zu sehen und sollten nicht überschritten werden.

- **Begrenzung der plastischen Verformungen auf der Unterlage**

Plastische Verformungen auf dem Planum haben Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit der darüber liegenden Befestigungsschichten. Das Risiko deren Entstehung ist im Dimensionierungsprozess abzuschätzen und zu bewerten. Im Ergebnis der Untersuchungen in [WEL 14] wird empfohlen, dafür die Transferfunktion der schwedischen Dimensionierungsrichtlinie zu verwenden (siehe Gleichung 31), es wird von einer Mindeststeifigkeit des Untergrundes von 45 MPa ausgegangen.

$$N = \frac{8,06E - 8}{(\varepsilon_{v,UG})^4} \quad \text{Gl. 31}$$

mit

N zulässige Lastwechselzahl (10-t-Achsübergänge) [-]

$\varepsilon_{v,UG}$ vertikale elastische Dehnungen auf dem anstehenden Untergrund [-]

Zur Nachweisführung ist für jede vorliegende Beanspruchung (alle Kombinationen aus Achslasten und Dimensionierungsfällen) die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel unter dieser Beanspruchung zu berechnen, der Quotient aus der Anzahl der vorhandenen Lastwechsel und der ertragbaren Lastwechsel zu bilden und diese Quotienten im Sinne der Miner-Hypothese über alle vorliegenden Beanspruchungen zu addieren (Bildung der Miner-Summe). Ist die Miner-Summe kleiner oder höchstens gleich 1, gilt der Nachweis als erfüllt (vergleiche [RDO Asphalt 09], Kapitel 7.2).

- **Begrenzung der plastischen Verformungen an der Oberfläche der ToB**

Um Schäden am Asphalt und Spurrinnen zu vermeiden dürfen die Verformungen an der Oberfläche der ToB einen bestimmten Betrag nicht überschreiten. Für die Abschätzung der plastischen Verformung nach dem im Kapitel 10.1 beschriebenen Verfahren wird ein Grenzwert von 10 mm empfohlen. Die Nachweisführung erfolgt analog zur Begrenzung der plastischen Verformungen auf der Unterlage.

11 Implementierung der Ergebnisse in die Verfahrensweise nach RStO, RDO Asphalt und RDO Beton

11.1 Voraussetzungen

Die Integration einer analytischen Dimensionierung der ToB in die Verfahrenswesen nach bestehendem Regelwerk setzt das Vorhandensein entsprechender Schnittstellen voraus. Diese sind in den Grenzen zu benachbarten Befestigungsschichten zu sehen. Berechnungsgrundlage für die Dimensionierung der ToB sind die an den Schichtgrenzen

auftretende Beanspruchungen (Spannungen, Dehnungen) und der Wassergehalt (Materialzustand) der ToB. Die im Folgenden beschriebenen Schritte beziehen sich auf eine Implementierung in die RDO Asphalt. Die Schnittstellendefinition gestattet eine sinngemäße Übertragung auf RStO und RDO Beton.

Materialuntersuchung

Das zur Verwendung vorgesehene Baustoffgemisch ist experimentell zu charakterisieren. Im Ergebnis zyklische Triaxialversuche mit dem zu erwartenden Beanspruchungsniveau und Wassergehalten sind die Materialparameter für ein elastisches und ein plastisches Stoffmodell zu bestimmen. Hierfür kann die im Kapitel 6 beschriebene Versuchsprozedur verwendet werden. Darüber hinaus sind Untersuchungen zur Bestimmung des plastischen Shakedown-Limits und der charakteristischen Grenzdehnung durchzuführen.

Modellierung des Materialverhaltens

Das Materialverhalten ist mit geeigneten Stoffmodellen zu beschreiben, welche den Zusammenhang zwischen dem Spannungszustand und dem Elastizitätsmodul zutreffend wiedergeben. Außerdem müssen die Stoffmodelle den Einfluss des Wassergehaltes richtig abbilden. Diese Materialmodelle sind im Rahmen des Analyseverfahrens einzusetzen, um so die Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeiten im Material korrekt zu modellieren.

Analyse der Beanspruchung in der ToB

Zur Berechnung der Beanspruchungen sind FE-Modelle anzuwenden, welche:

- vorgenanntes Materialverhalten bzw. die gewählten Stoffmodelle abbilden können und
- die Begrenzung der Zugspannungen und der deviatorischen Spannungen mithilfe einer Grenzfunktion ermöglichen.

11.2 Zu berücksichtigende Beanspruchungsfälle

Die Zahl der zu berücksichtigenden Beanspruchungsfälle berechnet sich aus der Kombination von Achslast- und Temperaturklassen. Nach [RDO

Asphalt 09] ergeben sich hieraus 143 Beanspruchungsfälle mit natürlichem Wassergehalt in der ToB. Mit Hinweis auf Kapitel 9.4 resultieren aus der Kombination von Temperaturklassen mit mittlerer Asphaltoberflächentemperatur zwischen -10 °C und +10 °C und Achslastklassen weitere 44 Beanspruchungsfälle mit erhöhtem Wassergehalt. Für alle insgesamt 187 Beanspruchungsfälle ist die Beanspruchung in der ToB mit geeigneten FE-Programmen zu berechnen.

11.3 Nachweisführung

Das vorgeschlagene Dimensionierungsverfahren basiert auf der Versagensform der plastischen Verformungen. Es werden folgende Kriterien geprüft:

- plastische Verformungen des Untergrundes und
- plastische Verformungen der ToB.

Anwendung und Grenzwerte für beide Dimensionierungskriterien sind in Kapitel 10 beschrieben.

Für die Nachweisführung sind die Beanspruchungsfälle mit mittlerer Asphaltoberflächentemperatur

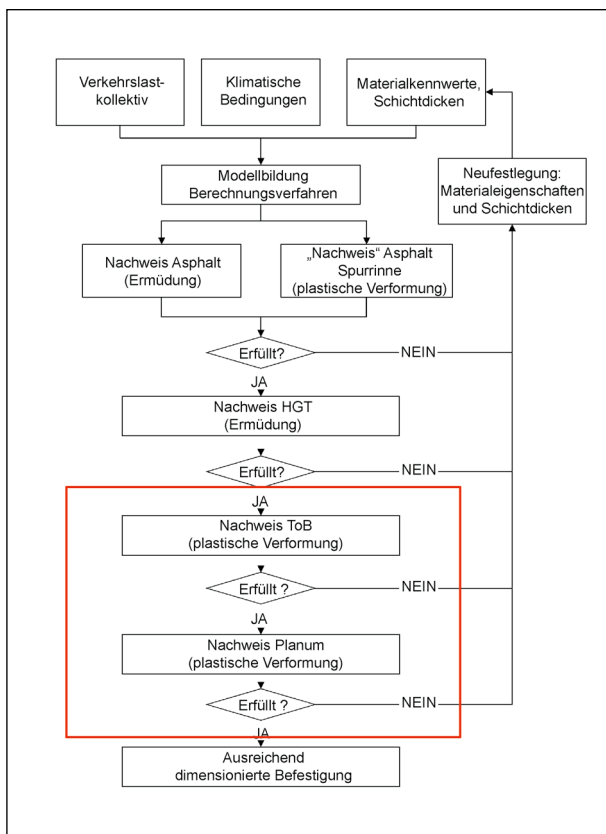


Bild 11-1: Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen [RDO Asphalt 09]

zwischen -10 °C und +10 °C jeweils mit 50 % der Achslasten zu berücksichtigen (44 x natürlicher; 44 x erhöhter Wassergehalt).

11.4 Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von ToB

Die Dimensionierung nach RDO beruht auf einem iterativen Verfahren bei welchem Startwerte für Schichtdicken und Materialparameter eingegeben werden. Gelingt die Nachweisführung mit diesen Startwerten nicht, sind diese neu festzulegen und ein neuer Berechnungszyklus zu starten (Bild 11-2).

Für die Festlegung neuer Werte sind in Abhängigkeit des Dimensionierungskriteriums unterschiedliche Strategien zu verfolgen. Werden zulässige Spannungen in der ToB oder der Grenzwert der plastischen Verformungen auf der ToB überschritten, ist eine größere Lastverteilung durch die oberen Schichten oder ein hochwertigeres ToB-Material erforderlich. Die plastischen Verformungen des Untergrundes können durch größere Dicke der ToB begrenzt werden.

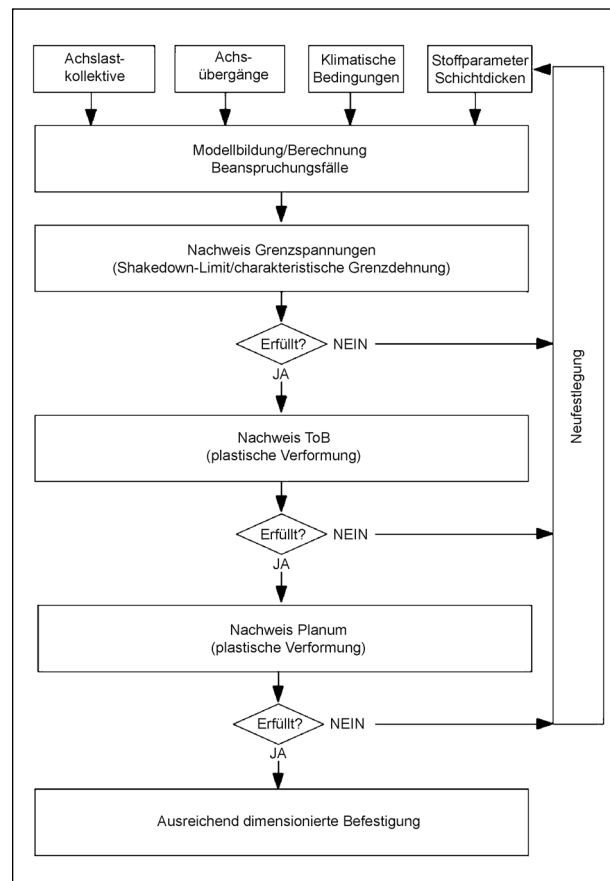


Bild 11-2: Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von Befestigungen mit dünnen Asphalt-schichten

12 Substanzbewertung von ToB

Eine Substanzbewertung im Sinne der RSO geht davon aus, dass die Eigenschaften der ToB, wie sie beim Neubau bestanden, während der bisherigen und der zukünftigen Nutzungsdauer unverändert vorliegen. Im Rahmen der Substanzbewertung für die ToB ist somit festzustellen, inwiefern diese Annahme zutreffend ist.

Als Bewertungskriterium gelten zunächst die der Herstellung zugrundeliegenden Liefer- und Vertragsbedingungen (TL SoB-StB, ZTV SoB-StB) und darin enthaltene Abnahmewerte. Für die Substanzbewertung sind hierbei zunächst die Eigenschaften Frostsicherheit, Frostbeständigkeit, Tragfähigkeit und Verdichtung von Interesse.

Frostsicherheit und Frostbeständigkeit des UBG lassen sich mithilfe aus dem Bestand entnommener Proben nachweisen. Die dabei anzuwendenden Verfahrensweisen zur Probenahme und Versuchsdurchführung sind in den ZTV SoB-StB geregelt, gleiches gilt für den Nachweis von Verdichtungsgrad und Tragfähigkeit der TOB.

Die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit und entsprechende Abnahmewerte sind bisher nicht verbindlich im Regelwerk verankert. Im Allgemeinen wird unterstellt, dass bei Einhaltung der Korngrößenverteilung eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit gewährleistet ist. Die Korngrößenverteilung des UBG liefert jedoch keine gesicherte Aussage zur Wasserdurchlässigkeit der ToB. Eine Bewertung dieser Eigenschaft ist im Ergebnis von Infiltrationsversuchen möglich. Der Infiltrationsversuch kann dabei nach [TP Gestein 8.3.2 15] (mit dem modifizierten Standrohr-Infiltrometer) oder [TP Gestein 8.3.4 15] (mit dem Doppelring-Infiltrometer) durchgeführt und ausgewertet werden. Infolge des signifikanten Einflusses des Wassergehaltes der ToB auf die Verformungsbeständigkeit (siehe Kapitel 9.2) hat die Wasserdurchlässigkeit der ToB, vor allem bei Beton- und Pflasterbefestigungen, besondere Bedeutung.

Können bei vorgenannten Untersuchungen Abnahmewerte nicht nachgewiesen werden, sind die Voraussetzungen für eine Substanzbewertung nach RSO nicht gegeben. Sind im zu bewertenden Fahrbahnabschnitt Unebenheiten und Spurrinnen erkennbar, welche in ihrer Größe und Ausprägung auf Verformungen der ToB schließen lassen, entspricht dieser Zustand ebenfalls nicht den Voraussetzungen der RSO.

Einen Ansatz zur Substanzbewertung bietet die Untersuchung des Verformungsverhaltens von aus der Befestigung entnommenem UBG im Triaxialversuch. Auf Grundlage der in diesem Bericht vorgestellten Vorgehensweise zur Beschreibung und Modellierung des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens sind Prognosen zur Schadensentwicklung und Restnutzungsdauer möglich.

Im Regelfall kann auf Basis einer Bestandsdokumentation (Erstprüfungen, Konformitätsprüfungen, Kontrollprüfungen, Messprotokolle, Abnahmeprotokolle etc.) ein Ausgangszustand rekonstruiert und beschrieben werden. Im Abgleich mit Untersuchungen am Bestand lassen sich Veränderungen der ToB feststellen. Liegen außerdem Daten zu Verkehrsbelastung und Einflüssen aus Witterung vor, besteht die Möglichkeit, verwendete Modelle zu kalibrieren und zu verbessern.

Eine Beschreibung und Modellierung des Verformungsverhaltens der ToB im Rahmen der Substanzbewertung ist darüber hinaus Voraussetzung für eine mögliche Einbindung in die Prognoserechnung nach RSO.

Die vorgenannten Untersuchungen setzen den Zugang zur Oberfläche der ToB voraus, welcher in der Regel nur sehr eingeschränkt möglich ist. Darüber hinaus ist ein Rückschluss aus Laboruntersuchungen auf die Eigenschaften der ToB in situ ist problematisch, da Bestandsmaterial nur als gestörte Probe entnommen werden kann, nur punktuelle Aussagen ermöglicht und somit nicht die Situation in situ darstellt. Um Kenntnisse über den Zustand der ToB in situ zu erhalten, scheinen zerstörungsfreie in situ Untersuchungen die bessere Wahl.

13 Zusammenfassung/Ausblick

Triaxialversuche

Die Charakterisierung und realitätsnahe Modellierung des Materialverhaltens von UGB ist nur im Bezug zu einem bestimmten Spannungszustand möglich. Um das Verformungsverhalten der ToB für einen Bereich von Spannungszuständen beschreiben und modellieren zu können, müssen die durchzuführenden Versuche diesen Spannungsbereich abdecken. In Straßenbefestigungen entspricht der zu untersuchende Spannungsbereich dem Beanspruchungsniveau infolge Verkehrsbelastung und klimatischen Einflüssen. Für die Bestimmung die-

ses Beanspruchungsniveaus mit einer FE-Berechnung sind weiterhin Materialparameter und Modelle, welche das Verformungsverhalten der ToB beschreiben, notwendig.

Das Beanspruchungsniveau für die Triaxialversuche im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde unter Verwendung von Materialparametern aus vorangegangenen Untersuchungen bestimmt. Die Versuche lieferten schlüssige Ergebnisse zur Beschreibung des elastischen und plastischen Verformungsverhalten auf deren Grundlage die Materialparameter für das erweiterte modifizierte Universal-Modell (Gleichung 12) und das dehnungsbaasierte plastische Modell nach Gleichung 13 bestimmt werden konnten. Das dabei erzielte Bestimmtheitsmaß der Modelle lag zwischen 89,6 % und 99,4 % (siehe Tabelle 6-7 und Tabelle 6-8). Die Modelle bilden folglich das im Versuch beobachtete Verformungsverhalten gut ab und bilden eine solide Basis für Prognosen innerhalb des untersuchten Spannungsbereiches. Mit den Versuchsergebnissen dieses Forschungsprojektes werden die Erkenntnisse und die Datengrundlage zur Modellierung des Materialverhaltens von ToB erweitert und liefern damit eine breitere Basis für weitere Untersuchungen.

Die in diesem Projekt verwendete Versuchsprozedur ist geeignet, sowohl die Steifigkeiten von UBG als auch deren plastisches Verformungsverhalten zu charakterisieren. Die erzeugte Materialantwort liefert jedoch keine präzisen Informationen zum plastischen Shakedown-Limit. Dieses wurde auf Grundlage des Versuches zur Bestimmung der plastischen Parameter abgeschätzt und mit den Ergebnissen aus anderen Forschungsvorhaben verglichen (siehe Kapitel 6.5.5). Der Grenzbereich 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. Mit Versuchen bei drei verschiedenen Zeldrücken und mindestens 3 unterschiedlichen Deviatorspannungen je Spannungspfad sollte, bei günstiger Wahl der Spannungsniveaus (d. h. das Shakedown-Limit liegt innerhalb dieses Bereiches), das plastische Shakedown-Limit nach dem in [DIN EN 13286-7] Anhang C.4.2.2 beschriebenen Verfahren bestimmt werden können.

Die charakteristische Grenzdehnung als Grenzkriterium für eine rein elastische Materialantwort wurde auf Grundlage der Versuche zum elastischen Materialverhalten ermittelt. Diese war für alle Baustoffgemische auf den Spannungspfaden mit $\sigma_3 \geq 210$ kPa nachweisbar. Auf Spannungspfaden mit kleinerer Zellspannung konnte der Nachweis nur vereinzelt geführt werden. Der charakteristische Grenzdehnungszustand stellt sich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm als Wendepunkt zwischen degressivem und progressivem Kurvenverlauf dar. Um diesen ermitteln zu können, muss die Messpunktdichte in unmittelbarer Umgebung dieses Wendepunktes ausreichend groß sein. Dieses war auf den Spannungspfaden mit kleinerer Zellspannung vermutlich nicht gegeben. Für künftige Untersuchungen empfiehlt sich hier eine engere Staffelung (Abstufung) der Deviatorspannungen.

Die im Triaxialversuch angewendete Versuchsprozedur sichert eine gute Erfassung des elastischen und plastischen Materialverhaltens von UBG. Zur Bestimmung des Shakedown-Limits und des charakteristischen Grenzdehnungszustandes ist jedoch eine Anpassung des Prüfprogramms zweckmäßig.

Zyklische Ödometer- und CBR-Versuche

In Ergänzung zu den Triaxialversuchen wurde untersucht, ob im Rahmen einer Klassifizierung die Beschreibung des elastischen und plastischen Materialverhaltens mit zyklischen Ödometer- und CBR-Versuche möglich ist. Die zyklischen Ödometerversuche lieferten plausible Ergebnisse zum elastischen Verformungsverhalten, auf deren Grundlage die Materialparameter für das K- Θ -Modell ermittelt werden konnten. Das Bestimmtheitsmaß des Modells lag zwischen 82,6 % und 99,4 %, für 10 von 12 untersuchten Proben lag das Bestimmtheitsmaß über 90 %. Die im Ödometerversuch gewonnenen Daten liefern nicht die notwendigen Informationen, um alle Parameter für das modifizierte Universal-Modell bestimmen zu können. Mit den Ergebnissen der zyklischen CBR-Versuche war eine zuverlässige Charakterisierung des plastischen Verformungsverhaltens nicht 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 Gesteinskörnungsgemisch ist damit sehr wahrscheinlich nicht repräsen-

tativ und kann sich, je nach Positionierung des Laststempels, in seiner Zusammensetzung stark unterscheiden. Inwiefern sich eine zweckmäßigere Versuchsanordnung unter Verwendung genormter Ausrüstungsteile realisieren lässt, sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Mit Verweis auf die bisherigen Ergebnisse ist die Anwendung von Ödometer- und CBR-Versuchen zur umfassenden Klassifizierung von UBG und die Ableitung von Eingangsgrößen für die Dimensionierung nicht zielführend.

Klassifizierung

Eine Klassifizierung auf Basis zyklischer Ödometer- und CBR-Versuche ist im gegenwärtigen Entwicklungsstadium nicht zielsicher möglich. Die Ödometerversuche eignen sich jedoch für die Abschätzung des elastischen Verformungsverhaltens (Ranking) in einem mehrstufigen Klassifizierungsverfahren. Die im Ödometerversuch realisierbaren Spannungszustände bilden jedoch nur einen kleinen Bereich der Spannungsverhältnisse in Straßenbefestigungen ab.

Für die im Rahmen der Klassifizierung durchzuführenden Triaxialversuche empfiehlt sich eine hinsichtlich Prüfzeit optimierte Variante der im Kapitel 6 vorgestellten Versuchsprozedur, mit deren Ergebnissen sich das Materialverhalten für einen Spannungsbereich modellieren lässt. Unter dieser Voraussetzung kann das Potenzial von UBG besser bewertet und in der Darstellungsvariante Bild 8-4 verglichen werden.

Ansätze zur analytischen Dimensionierung von ToB

Die jahreszeitlichen Schwankungen des Wassergehaltes in der ToB haben signifikanten Einfluss auf das elastische und plastische Verformungsverhalten. Die Berücksichtigung der Abhängigkeit des Verformungsverhaltens von ToB vom Wassergehalt bei der analytischen Dimensionierung setzt voraus, dass zu erwartende Wassergehalte hinsichtlich ihres Betrages (w/w_{opt}), ihrer Dauer (Tage/Jahr) und ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit bei bestimmten Temperaturen bekannt sind. Belastbaren Daten zum jahreszeitlichen Verlauf des Wassergehaltes in der ToB liegen bisher jedoch nicht vor. Im Ergebnis der Literaturrecherche gibt es aktuelle Aktivitäten zur Entwicklung geeigneter Messtechnik um entsprechende Daten erfassen zu können. Die Bestim-

mung des Wassergehaltes in den 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 (siehe Kapitel 9.4).

Der im Kapitel 13 vorgestellte Ansatz zur Ermittlung der plastischen Verformungen in der ToB basiert auf den Stoffmodellen nach Gleichung 12 und Gleichung 13 und wurde im Rahmen der Projekte des FE 09.0175/2011/ERB anhand von Feldversuchen validiert. Für eine analytische Dimensionierung von ToB unter Anwendung dieses Verfahrens bedarf es jedoch weiterer Erprobung und Untersuchungen, um ausreichend Sicherheit in der Anwendung zu erhalten. Für eine Implementierung in die Dimensionierungsverfahren nach RDO sind die vorhandenen Schnittstellen, welche sich an den Grenzen zu benachbarten Konstruktionsschichten befinden, zu nutzen.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Dimensionierung von ToB in Straßenbefestigungen bei realitätsnaher Berücksichtigung des nichtlinear-elastischen und plastischen Verformungsverhaltens der UBG zu ermöglichen. Basierend auf den durchgeführten Versuchen sowie den Erkenntnissen aus vorangegangenen Projekten konnten Kennwerte zur Bestimmung des Materialverhaltens als Eingangsgrößen für das vorgestellte Dimensionierungsverfahren abgeleitet werden. Das Dimensionierungsverfahren basiert auf Stoffmodellen zur Beschreibung des elastischen und des plastischen Verformungsverhaltens von UBG (siehe Gleichung 12 und Gleichung 13).

Die Beschreibung des elastischen Verformungsverhaltens von UBG mit einaxialen Ödometerversuchen lieferte im Vergleich zu den Triaxialversuchen annähernd gleiche Ergebnisse. Die CBR-Versuche zur Beschreibung des plastischen Verformungsverhaltens haben sich mit den derzeitigen Versuchsrandbedingungen als nicht zielführend erwiesen.

Um die entwickelten Dimensionierungsansätze zur Abschätzung einer möglichen Nutzungsdauer im Rahmen der Zustandsbewertung verwenden zu können, müssen im Rahmen einer Zustandserfassung Bestandsdaten zu den der Dimensionierung zugrundeliegenden Kenngrößen erfasst werden. Erprobte Verfahren und Methoden zur Ermittlung repräsentativer Bestandsdaten für diese Anwendung sind gegenwärtig noch nicht vorhanden.

Grundsätzlich ist die Methodik des Dimensionierungsansatzes geeignet, auf entsprechender Datengrundlage die Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen abzuschätzen.

Literatur

- [ARN 04] ARNOLD, G.: Rutting of Granular Pavements. PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK 2004
- [ARN 06] ARNOLD, G. & WERKMEISTER S.: Performance Tests for selecting Aggregates for Roads – Report on Progress, Annual AQA and IOQNZ Conference, July 12-14 2006, Christchurch, NZ.
- [ARA 11] ARAYA, A.: Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements. Ph.D. Thesis. Delft, Netherlands, 2011
- [AUS 04] AUSTRROADSS Pavement Design – A Guide to the structural design of road pavements. AP-G17/04, AUSTRROADSS, Sydney, Australia, 2004
- [AUS 04a] Technical Basis of AUSTRROADSS Design Guide, AUSTRROADSS, Sydney, Australia, 2004
- [BAR 72] BARKSDALE, R. D.: Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. Proceeding of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, pp 161-174, 1972
- [BASt 20] Projekt Druckspannungssensor CANopen (3415000)/GS3, Bundesanstalt fuer Straßenwesen, https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Projekte/fp-laufend-gs3.html, Abruf 17.07.2020
- [BEL 97] BELT, J.; RYYNÄNEN, T.; EHROLA, E.: Mechanical properties of unbound base course. Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Vol. 1 pp 771-781, 1997
- [BLA 14] BLASL, A.: Untersuchung des Verhaltens von Asphaltbefestigungen mit dünnen Deckschichten, Manuskript zur Dissertation, TU Dresden, 2014
- [BMV 03] Bundesverkehrswegeplan. Grundlagen für die Zukunft der Mobilität in Deutschland, Bonn, 2003
- [CAN 13] CANON FALLA, G.: Effect of the non-linear material behavior of unbound granular materials on the pavement structural response, Manuskript zur Dissertation, TU Dresden, 2013
- [CAN 17] CANON FALLA, G.; WELLNER, F.; LEISCHNER SPANIER, T.: Experimental Characterization of Unbound granular materials subjected to high harmonic loads, BCRA Conference Athen 06, 2017
- [CLA 20] CLAUß, M.: Erweiterte Analyse der thermischen Zustände in Straßenbefestigungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Einflüsse und stoffspezifischer Materialparameter, Manuskript zur Dissertation, TU Dresden, 2020
- [DAW 07] DAWSON, A.; KOLISOJA, P.; VUORIMIES, N. & T. SAARENKETO: Design of low-volume pavements against rutting – a simplified approach. In Proceedings of Transportation Research Board Low Volume Roads Conference, Austin, 2007
- [DAW 08] DAWSON, A.; KOLISOJA, P.; VUORIMIES, N.: Understanding low-volume pavement response to heavy traffic loading. Technical report, Roadex III, Northern Periphery, 2008
- [DIN 18 127] DIN 18 127:2012:09 Proctorversuch, Beuth Verlag, 2012
- [DIN EN 13286-2] Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes – Proctorversuch; Deutsche Fassung EN 13286-2:2010 + AC:2012, Beuth Verlag, 2013
- [DIN EN 13286-7] Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 7: Dreiaxialprüfung mit zyklischer Belastung für ungebundene Gemisch; Deutsche Fassung EN 13286-7:2004, Beuth Verlag 2004
- [DOU 09] DOUGLAS, R.; WERKMEISTER, S.; GRIBBLE, M.: Results of using measured full-scale tire/road contact stresses in models of pavement behaviour, Paper submitted to the 2009 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Vancouver, British Columbia, Canada, 2009
- [DWD] <https://www.dwd.de/DE/leistungen/bodenfeuchte/bodenfeuchte.html>

- [FGSV 12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RStO 12, Köln, 2012
- [FGSV 09] Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2009
- [GLE 96] GLEITZ, T.: Beitrag zur rechnerischen Erfassung des nichtlinearen Spannungs-Verformungsverhaltens ungebundener Tragschichtmaterialien in flexiblen Straßenkonstruktionen, Dissertation TU Dresden, 1996
- [GLE 96] GLEITZ, T.: Beitrag zur rechnerischen Erfassung des nichtlinearen Spannungs-Verformungsverhaltens ungebundener Tragschichtmaterialien in flexiblen Straßenkonstruktionen, PhD-Thesis, TU Dresden, 1996
- [GON 10] GONZALES, A.: Behaviour of pavements stabilized using foamed bitumen, PHD Thesis University of Canterbury New Zealand, 2010
- [GRO 05] GROß, S.: Bestimmung mechanischer Kenngrößen für einen SMA 0/11S mithilfe des dynamischen Triaxialversuches, Diplomarbeit, TU Dresden, 2005
- [HUD 86] HUDSON, S.W.; McCULLOUGH, B.F. & R.F. CARMICHAEL: Aggregate and paved surface design and rehabilitation manual for low-volume roads. Technical report, Federal highway administration, USA, 1986
- [JAN 11] JANSEN, D.; KUNZ K.: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen, Forschungsbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen, AP F1100.3206001, 2011
- [KAM 93] KAMAL, M. A.; DAWSON, A. R.; FAROUKI, O. T.; HUGHES, D. A. B. & A. A. SHA'AT: Field and laboratory evaluation of the mechanical behaviour of unbound granular materials in pavements; Transportation Research Record, No. 1406, pp. 88-97, 1993
- [KES 09] KESTLER, M.: Stabilization selection guide for aggregate and native-surfaced low volume roads. U.S. Department of Agriculture, 2009
- [KEL 18] KELLERMANN-KINNER, WOLF: Schichten ohne Bindemittel für die Straße im 21. Jahrhundert – Teil 1, Straße und Autobahn 8/2018
- [KOL 97] KOLISOJA, P.: Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials. PhD Thesis, Tampere University of Technology, 1997
- [KOR 09] KORKIALA-TANTTU, L.: Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials. PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, 2009
- [KRA 11] KRAGH, J.; GOUBERT, L.; SANDBERG, U.; KARLSSON, R.; NIELSEN, E.; OLESEN, E.; VANSTEENKISTE, S. & J. VISSCHER: Optimization of thin asphalt layers. Technical report, ERA-NET ROAD, 2011
- [LEK 00a] LEKARP, F.; ISACSSON, U. & A. DAWSON: State of the art I: resilient response of unbound aggregates. Journal of Transportation Engineering, January-February, 2000a
- [LEK 00b] LEKARP, F.; ISACSSON, U. & A. DAWSON: State of the art II: permanent strain response of unbound aggregates. Journal of Transportation Engineering, January-February, 2000b
- [LTNZ 09] Pavement Thickness Design Charts Derived from Rut Depth Finite Element Models, Project Number 1/06/31, Research report, 2009
- [NIE 02] VAN NIEKERK, A. A.: Mechanical behaviour and performance of granular bases and sub-bases in pavements. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2002
- [LÖP 83] LÖPMEIER, F.-J.: Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung, Beiträge zur Agrarmeteorologie Dt. Wetterdienst, 1983
- [NUM 03] NUMRICH, R.: Modellierung des nicht-linear-elastischen Verformungsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel, Dissertation, TU Dresden, 2003
- [OES 04] OESER, M.: Numerische Simulation des nichtlinearen Verhaltens flexibler mehrschichtiger Verkehrswegebefestigungen, Dissertation, TU Dresden, 2004
- [OES 10] OESER, M.: Nichtlineare numerische Simulationsmodelle für Verkehrswegebefestigungen; Habilitation, TU Dresden, 2010

- [OES 11] OESER, M.: Einsatz numerischer Methoden zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen in Australien, Straßenwesen im Wandel der Zeit, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 56, pp. 159-176
- [Paige-Green 09] PAIGE-GREEN, P.: Lessons learned during regular monitoring of in situ pavement bearing capacity conditions, 2009. 10.1201/9780203865286.ch156.
- [PAT 15] PATZAK, J.: Mechanisches Verformungsverhalten von Tragschichten ohne Bindemittel unter besonderer Berücksichtigung des Temperatureinflusses – Experimentelle Analyse am Beispiel einer Kiestragschicht. Dissertation, TU Dresden, 2015
- [PID 06] PIDWERBESKY, B. & S. WERKMEISTER: Better Performing Pavements: Performance of modified Basecourse Aggregates using RLT Test Results, Transit NZ & NZIHT Conference, Auckland, October 15 – 17, 2006, NZ
- [PID 96] PIDWERBESKY, B.: Fundamental behaviour of Unbound granular pavements subjected to various loading conditions and accelerated trafficking, PHD Thesis University of Canterbury New Zealand, 1996
- [EN 18 137-7] Unbound and Hydraulically Bound Mixtures for Roads – Test Methods, Part 7: Cyclic load triaxial test for Unbound Mixtures. Draft of European Standard Submitted to CEN Members EN 13286 7, Brussels, 2002
- [ROA 00] Roadex: Road condition management of low traffic volume roads in the northern periphery. Technical report, Northern Periphery Roadex, 2000
- [ROS 96] ROßBERG, K.; WELLNER, F. & T. GLEITZ: Dynamische Belastungsversuche an Pflasterkonstruktionen, Schriftenreihe der TU Dresden Heft 2, 1996
- [RStO 12] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, RStO Ausgabe 2012, FGSV, FGSV-Nr.: FGSV 499
- [RDO Asphalt 09] Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, RDO Asphalt Ausgabe 2009, FGSV, FGSV-Nr.: FGSV 498
- [SAL 03] SALEH, M.; STEVEN, B. & D. ALABASTER: Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Model for Simulating Pavement response, Transportation Research Record 1823, Washington, USA, 2003
- [SCHU 12] SCHUMACHER, I.; WÖLLENSTEIN, J.: Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustands, Forschungsbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen, FE 06.0095/2011/FRB
- [SNRA 05] SNRA. Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktion (ATB Väg), In: Swedish. Swedish Transport Administration, 2005
- [STE 05] STEVEN, B. D.: Development and Verification of A Pavement Performance Model Suitable for Use with New Zealand Materials and Pavements, PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, NZ
- [TEI 11] TEIXEIRA, L. A.: Design methods for low volume roads. PhD thesis, Department of civil engineering, University of Nottingham, 2011
- [THE 00] THEYSE, H. L.: The Development of Mechanistic-Empirical Permanent Deformation Design Models for Unbound Pavement Materials from Laboratory and Accelerated Pavement Test Data. UNBAR 5, pp 285-293, 2000
- [THO 87] THOM, N. H.; BROWN, S. F.: Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base; Transportation Research Record 1121, Transportation Research Board, pp. 50-56, Washington D. C., 1987
- [TL SoB] TL SoB-StB 04], Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004, Köln, 2004
- [TNZ 05] Transit New Zealand 2005 M/4: 2005. Specification for Basecourse Aggregate, Transit New Zealand, Wellington, NZ
- [TP Gestein-StB 15] TP Gestein-StB, Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau Ausgabe 2015 (FGSV-Nr. 610)
- [VOU 06] VOUNG, B.; ARNOLD, G.: Predicting In-service Performance of Alternative Pavement Materials. Land Transport New Zealand Research Report, 2006

- [VTI 12] SALOUR, F.; ERLINGSSON, S.: Pavement structural behaviour during spring thaw: interpretation of FWD measurements by monitoring environmental data from county road 126 at Torpsbruk, Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 2012, VTI rapport H. 738A
- [VUO 94] VUONG, B.: Evaluation of Back-Calculation and performance Models using full scale granular Pavement tested with the accelerated loading facility (ALF), Proceedings of the 4th International Symposium on the Bearing Capacity of Roads and Airfields (BCRA), Mineapolis, 17.-21. June, 1994
- [WEL 14] WELLNER, F.; WERKMEISTER, S.; CANON FALLA, G.: Straßenbefestigungen aus dünnen Asphaltsschichten auf qualitativ hochwertigen Tragschichten ohne Bindemittel für Bundesstraßen, Forschungsbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen, FE 09.0175/2011/ERBFE 09.0175/2011/ERB
- [WER 03] WERKMEISTER, S.: Permanent deformation behavior of unbound granular materials. PhD thesis, University of Technology, Dresden, Germany, 2003
- [WER 06] WERKMEISTER, S.; STEVEN, B. D. & ALABASTER, D. A.: mechanistic-empirical approach using accelerated pavement test results to determine remaining life of Low Volume Roads, Road & Transport Research Journal, Vol. 1, March 2006, Australia
- [WER 07] WERKMEISTER, S.: Abschätzung des Verformungsverhaltens von niedrig beanspruchten Strassenbefestigungen auf der Grundlage von CAPTIF Rundlaufversuchen in Neuseeland, Habilitation TU Dresden, 2007
- [WIE 08] WIEMAN & ERLINGSSON, S.: Accelerated Pavement Testing by HVS – a Transnational Testing Equipment, Transport Research Arena Europe 2008, Ljubljana
- [WOL 11] WOLF, M.: Einfluss der Tragfähigkeit auf die Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel, Schlussbericht zum FE 06.086/2007/FGB, BAST, Bergisch Gladbach, 2011
- [WOL 14] WOLF, M.: Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel in Straßenbefestigungen; Dissertation, TU Dresden, 2014

Bilder

- Bild 3-1: Elastizitätsmodulverteilung in den ToB für Befestigungen mit unterschiedlichen Dicken der Asphaltsschichten [WEL 14]
- Bild 3-2: Vertikale plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit von den vertikalen elastischen Dehnungen, Versuchsergebnisse und dehnungsbasiertes Modell nach Gleichung 13
- Bild 3-3: Typischer Verlauf der plastischen Dehnungen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl [WEL 14]
- Bild 4-1: Aufbau der untersuchten Straßenbefestigungen
- Bild 4-2: FE-Grafiken der Spannungszustände im Befestigungsaufbau mit einer 4 cm dicken ATDS (Bild 4-1, rechte Darstellung) und einer TOB aus Granodiorit bei der Temperatur/Wassergehaltkombination im Winter (Darstellung links) und im Frühling (Darstellung rechts).
- Bild 4-3: Ergebnisse der FE-Berechnungen in Form der Spannungen (Grafik links) und gewählte Spannungsverhältnisse zur Bestimmung der elastischen und plastischen Verformungseigenschaften (Grafik rechts)
- Bild 5-1: Korngrößenverteilungen der untersuchten Baustoffgemische im Lieferzustand
- Bild 5-2: Korngrößenverteilungen der untersuchten Baustoffgemische nach Absiebung des Überkorns (32 mm)
- Bild 6-1: Triaxialzelle der TU Dresden
- Bild 6-2: Schematische Darstellung der Triaxialanlage [GRO 05]

- Bild 6-3: Probekörperherstellung für den Triaxialversuch
- Bild 6-4: Probekörperherstellung: Links – Probekörper im Kunststoffzylinder, nach Entfernen der Stahlschalung, Mitte – Probekörper mit Gummimembran, Rechts – vollständig ausgeschalteter Probekörper nach Versuchsdurchführung (Diabas)
- Bild 6-5: Entwicklung der plastischen Dehnungen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl beim Vorversuch
- Bild 6-6: Spannungspfade für die Untersuchung der elastischen Verformungseigenschaften im Triaxialversuch
- Bild 6-7: Spannungen für die Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens, je Laststufe 100 LW bei 1 Hz
- Bild 6-8: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung für verschiedene Zellspannungen (Diabas; $w = 70 \% w_{opt}$; $q = 97 \% D_{pr}$)
- Bild 6-9: Elastische deviatorische Dehnungen in Abhängigkeit von der deviatorischen Spannung für verschiedene Zellspannungen (Diabas; $w = 70 \% w_{opt}$; $q = 97 \% D_{pr}$)
- Bild 6-10: Gegenüberstellung der gemessenen und mit Gleichung 10 berechneten Elastizitätsmoduln (Diabas; $w = 70$ und $85 \% w_{opt}$; $q = 97 \% D_{pr}$)
- Bild 6-11: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Elastizitätsmoduln Triaxialversuche mit Diabas (links: erster Schritt, rechts: zweiter Schritt der Regressionsrechnung)
- Bild 6-12: Messergebnisse Triaxialversuch, elastische Parameter, 3D-Visualisierung
- Bild 6-13: Belastungsniveaus für die Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens, je Laststufe 50.000 LW bei 5 Hz
- Bild 6-14: Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl – Versuche mit Diabas bei einem Wassergehalt von $70 \% w_{opt}$
- Bild 6-15: Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen für alle untersuchten UBG
- Bild 6-16: Vertikale plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit von den vertikalen elastischen Dehnungen, Modell nach Gleichung 13, Triaxialversuch Granodiorit
- Bild 6-17: Vertikale plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit von den vertikalen elastischen Dehnungen, Modell nach Gleichung 17, Triaxialversuch Diabas und Granodiorit
- Bild 6-18: Lage der Prüfspannungen/Laststufen des plastischen Versuches in Bezug auf Shakedown-Grenzen aus [WER 03]
- Bild 6-19: Spannungsverhältnisse der charakteristischen Grenzdehnung im s-t-Diagramm
- Bild 7-1: Ansicht der servohydraulischen Prüfmaschine
- Bild 7-2: Ödometerversuch, Positionierung der induktiven Wegmesssysteme für den Vorversuch und den Versuch zur Bestimmung der elastischen Parameter
- Bild 7-3: Versuchsanordnung zur Bestimmung der plastischen Parameter, Positionierung des induktiven Wegaufnehmers auf dem Prüfstempel
- Bild 7-4: CBR-Versuch, Prinzip der Versuchsanordnung zur Bestimmung der plastischen Parameter
- Bild 7-5: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Axialspannung σ_1 für verschiedene Poissonzahlen, Ödometerversuch
- Bild 7-6: Elastizitätsmodul und Vertikaldehnung in Abhängigkeit von der Deviatorspannung für $\nu = 0,35$, Ödometerversuch
- Bild 7-7: Gegenüberstellung der gemessenen und mit Gleichung 10 berechneten Elastizitätsmoduln, Ödometerversuche
- Bild 7-8: Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl – Versuche mit Diabas bei Wassergehalten von $70 \% w_{opt}$ und $85 \% w_{opt}$

- Bild 7-9: Entwicklung der deviatorischen plastischen Dehnungen für alle untersuchten Baustoffgemische, CBR-Versuche
- Bild 7-10: Vertikale plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit von den vertikalen elastischen Dehnungen, Messwerte und Modell nach Gleichung 13, CBR-Versuche mit Diabas
- Bild 8-1: Klassifikation auf Basis der Vorversuche (ϵ_{1c}) und des elastischen Modells (E_c), Triaxial- und Ödometerversuch
- Bild 8-2: Klassifikation auf Basis des plastischen (ϵ_{1c}) und des elastischen (E_c) Modells, Triaxial- und Ödometer-/CBR-Versuch
- Bild 8-3: Ranking der Materialien nach dem Kriterium: Elastizitätsmodul, Untersuchungsmethoden Triaxial- und Ödometerversuch
- Bild 8-4: Ergebnis der Klassifizierung, alle Baustoffgemische, Untersuchungsmethode Triaxialversuch
- Bild 8-5: Spannungsverhältnisse für die Klassifizierung nach [DIN EN 13286-7] und angewendete Spannungen im Triaxial- und Ödometerversuch
- Bild 9-1: Elastische Dehnungen in der ToB, Ergebnis der FE-Berechnungen
- Bild 10-1: Ausschnitt aus 2D-Darstellung von Ergebnissen der FE-Rechnung, Zahlenwerte von Nachweispunkten und zugehörige Koordinaten sowie Höhe des Elements
- Bild 10-2: Ablaufschema Berechnung der vertikalen plastischen Verformung
- Bild 11-1: Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen [RDO Asphalt 09]
- Bild 11-2: Ablaufschema zur rechnerischen Dimensionierung von Befestigungen mit dünnen Asphaltsschichten

Tabellen

- Tab. 4-1: Eingangsparmeter der FE-Berechnung (Auswahl)
- Tab. 4-2: Prüfprogramm des Vorversuches für die zyklischen Triaxialversuche
- Tab. 4-3: Prüfprogramm für die zyklischen Triaxialversuche zur Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens
- Tab. 4-4: Prüfprogramm für die zyklischen Triaxialversuche zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens
- Tab. 5-1: Materialauswahl für Untersuchungen
- Tab. 5-2: Parameter der untersuchten Baustoffgemische
- Tab. 6-1: Wassergehalte und Trockendichten der untersuchten UBG
- Tab. 6-2: Aufstellung der zyklischen Triaxialversuche für ein Material (mit Doppelbelegung)
- Tab. 6-3: Versuchsparameter für die zyklischen Triaxialversuche
- Tab. 6-4: Triaxialanlage, aufgezeichnete Versuchsdaten
- Tab. 6-5: Triaxialversuch, ausgewertete Versuchsdaten
- Tab. 6-6: Modellparameter für Gleichung 10 und Bestimmtheitsmaß R^2 der untersuchten UBG
- Tab. 6-7: Modellparameter für Gleichung 12, Bestimmtheitsmaß R^2 und Verhältnis k_{w1}/k_{w2} für die untersuchten UBG; Ergebnisse der Triaxialversuche
- Tab. 6-8: Modellparameter für Gleichung 13 und Bestimmtheitsmaß R^2 für die untersuchten UBG, Triaxialversuch
- Tab. 6-9: Modellparameter für Gleichung 17 und Bestimmtheitsmaß R^2 für die untersuchten UBG, Triaxialversuch
- Tab. 6-10: Auswertung der plastischen Versuche bezüglich der plastischen Shake-down-Grenze

- Tab. 7-1: Prüfprogramm CBR-Versuch zur Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens
- Tab. 7-2: Modellparameter und Bestimmtheitsmaß R^2 für Gleichung 10 und 22 für die untersuchten Baustoffgemische, Ödometerversuch
- Tab. 7-3: Prüfprogramm CBR-Versuch zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens
- Tab. 7-4: Modellparameter für Gleichung 13 und Bestimmtheitsmaß R^2 für die untersuchten Baustoffgemische (CBR-Versuche)
- Tab. 8-1: Grenzwerte für die Einstufung in die Klassen C1 bis C3 nach DIN 13286-7: 2004
- Tab. 8-2: Grenzwerte der Materialparameter ϵ_{1c} (rate) [$\%/10^6$] und E_c [MPa] für die Einstufung in die Klassen Q1-Q3
- Tab. 8-3: Tabellarische Übersicht der Einstufungen in die Klassen Q1-Q3
- Tab. 8-4: Einstufungen in die Klassen Q1-Q3; alleiniges Einstufungskriterium charakteristischer Elastizitätsmodul
- Tab. 8-5: Ranking der untersuchten UBG
- Tab. 8-6: Grenzwerte für plastische Dehnungen und Dehnungsraten nach [DIN EN 13286-7]
- Tab. 9-1: Eingangsparameter der FE-Berechnung (Auswahl)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Radenberg, Holzwarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

Wolf, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost € 15,50

S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser € 16,50

S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

Groschup, Große, Eger, Freudenstein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

Radenberg, Flottmann, Drewes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

Radenberg, Manke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

S 142: Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

Bräu, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

Weise, Werner, Maier, Wilsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Klein, Gehlen, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

Rigo, Unterderweide
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

Kathmann, Schroeder
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß, Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Demond, Reiche, Haas, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder, Riwe
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauphase

Gehrke, Stephan, Weigel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Radenberg, Holzwarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphalttschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

Radenberg, Twer, Louis, Buscham
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tiemann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.