

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

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 135

bast

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

von

Philipp Botor
Steffen Tost

BaGrund Dresden
Ingenieurgesellschaft mbH

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 135

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 Öffentlichkeitsarbeit.

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 Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 05.0184/2013/MGB:
Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Fachbetreuung

Michael Bürger

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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 978-3-95606-462-3

Bergisch Gladbach, Juli 2019



Kurzfassung – Abstract

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

Jährlich fallen bei Erdbauarbeiten mehrere Millionen Tonnen Bodenaushub an, die nicht wieder eingebaut werden. Die als bautechnisch schwierig eingestuft Böden, wie beispielsweise Böden mit hohem Feinkornanteil, werden oft als mineralische Restmassen deponiert. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen ist der qualifizierte Wiedereinbau anzustreben. Um die Anforderungen an Hinterfüllbereiche von Bauwerken zu erfüllen, werden jedoch im Regelfall grob- und gemischtkörnige Böden mit ≤ 15 M.-% Feinkornanteil verwendet.

Für die Untersuchung der Eignung bindemittelbehandelter, bindiger Böden für Hinterfüllbereiche wurden ein fein- und ein gemischtkörniger Boden mit einem Feinkornanteil > 15 M.-% der Bodengruppe TL bzw. ST* gemäß DIN 18196 gewählt.

Die Böden wurden mit je zwei Bindemitteln und drei Bindemittelgehalten (3 %, 5 %, 7 %) untersucht. Die Untersuchungen an Boden TL erfolgten mit einem Weißkalkhydrat und einem Mischbindemittel 50/50 (50 % Kalk/50 % Zement). Boden ST* wurde mit den Mischbindemitteln 50/50 und 30/70 untersucht.

Mit einem Laborprogramm aus insgesamt ca. 360 Laborversuchen aus einer Kombination von einaxialen Druckversuchen, CBR-Versuchen, Triaxialversuchen und Ödometerversuchen an den Ausgangsböden und den Boden-Bindemittel-Gemischen wurde deren Festigkeit und Verformungsverhalten bestimmt, um die Gleichwertigkeit mit herkömmlichen, grobkörnigen Böden nachzuweisen.

Mit den Laborergebnissen und über Setzungsberechnungen konnte bei allen untersuchten Boden-Bindemittel-Gemischen die Gleichwertigkeit zu herkömmlichen Hinterfüllmaterialien nachgewiesen werden.

Es wurden Handlungsempfehlungen für die Praxis erarbeitet. Diese beinhalteten die Ermittlung der Scherparameter auf Basis von einaxialen Druckversuchen über empirisch abgeleitete Grenzwerte und der Angabe von prinzipiell erreichbaren Scherparametern für eine Anwendung im Regelfall. Weiterhin wird eine Empfehlung für die Ableitung des Steife-

moduls aus den Ergebnissen einaxialer Druckversuche gegeben.

Suitability of soil-binder-mixtures as construction material for backfill areas of structures

Each year several million tonnes of soil are excavated and not installed again. Soils that are found to be difficult for construction, such as soils with a high content of fines, are often deported as mineral waste. For economic and ecological reasons a qualified re-installation is to be aspired. In order to meet the requirements for backfilled areas of structures, however, coarse grained and mixed-grained soils with a fines content of $\leq 15\%$ by mass are used as a rule.

In order to analyse the suitability of cohesive soils treated with binders for backfill areas of structures, a fine grained and a mixed-grained soil with a fines content of $> 15\%$ by mass of soil group TL or ST*, respectively, according to German standard DIN 18196 were selected.

Both soils were treated with two binder types and three binder contents (3%, 5%, 7%) each and examined. Tests on soil TL were made with a calcium hydroxide as well as with a 50/50 binder mixture (50% lime/50% cement). Soil ST* was treated with a 50/50 and a 30/70 binder mixture.

A laboratory programme comprising a total of 360 laboratory tests – a combination of uniaxial compressive tests, CBR tests, triaxial tests and oedometric tests – was performed on original soils and on the soil-binder-mixtures to determine their strength and deformability, in order to prove that the treated soil is on par with conventional coarse-grained backfill material.

Thanks to the results gained from laboratory tests and settlement calculations it could be shown that all tested soil-binder mixtures are on par with conventional backfill material.

Recommended procedures for a use in practice are developed. These include the determination of shear parameters based on uniaxial compression tests via empirically derived limit values and the specification of in principal achievable shear parameters for use as a rule. Furthermore, a recommendation for the derivation of the constrained modulus from results gained during uniaxial compression tests is given.

Summary

Suitability of soil-binder-mixtures as construction material for backfill areas of structures

1 Instigation and definition of project

Each year several million tonnes of soil are excavated during earthworks and not installed again. The soil that is found to be unsuitable for construction is often deported as mineral waste. In the sense of a sustainable economy and in order to do better justice to the German Law on Closed Cycle Management, the qualified re-installment e.g. at the excavation area is to be striven for. For this, however, demands are made on the soil that is to be installed, in order to ensure a permanent transition from engineering structure to earthwork structure with minimum settlement. This transition area from the stiff engineering structure to the relatively soft earthwork structure is especially prone to occurring settlement differences (see figure 1).

For a qualified re-installment of the backfill area of engineering structures, coarse grained soils like gravels and sands are predominantly suitable. Most often, this lead to material consisting of fine and

medium grained soils being rejected for the use in backfill areas, thus being removed from the construction site. So far, in cases like this, qualified material (e.g. coarse grained soils) had to be delivered and installed. However, the mechanic properties of excavated soils can be improved in such a way that they also meet the demands on materials for backfill areas, simply by adding binders like chalk or cement or binder mixtures, respectively.

The research project "Suitability of soil-binder-mixtures as construction material for backfill areas of structures", which was commissioned by the German Federal Highway Research Institute (BAST), is expected to extend knowledge regarding achievable mechanical properties of qualified fine grained and mixed-grained soils improved by the addition of binders and consequently lead to sustainable construction methods.

2 Analytical method

In order to analyse properties of soils treated with binders and their suitability to be placed in backfill areas of structures, a fine grained (TL) and a mixed-grained soil (ST*) were selected. Both soils were treated with 2 binder types each and examined. Soil TL was treated with calcium hydroxide (CL 90 S) as well as with a 50/50 binder mixture (50% calcium hydroxide/50% cement). Soil ST* was treated with a 50/50 binder mixture and a 30/70 binder mixture.

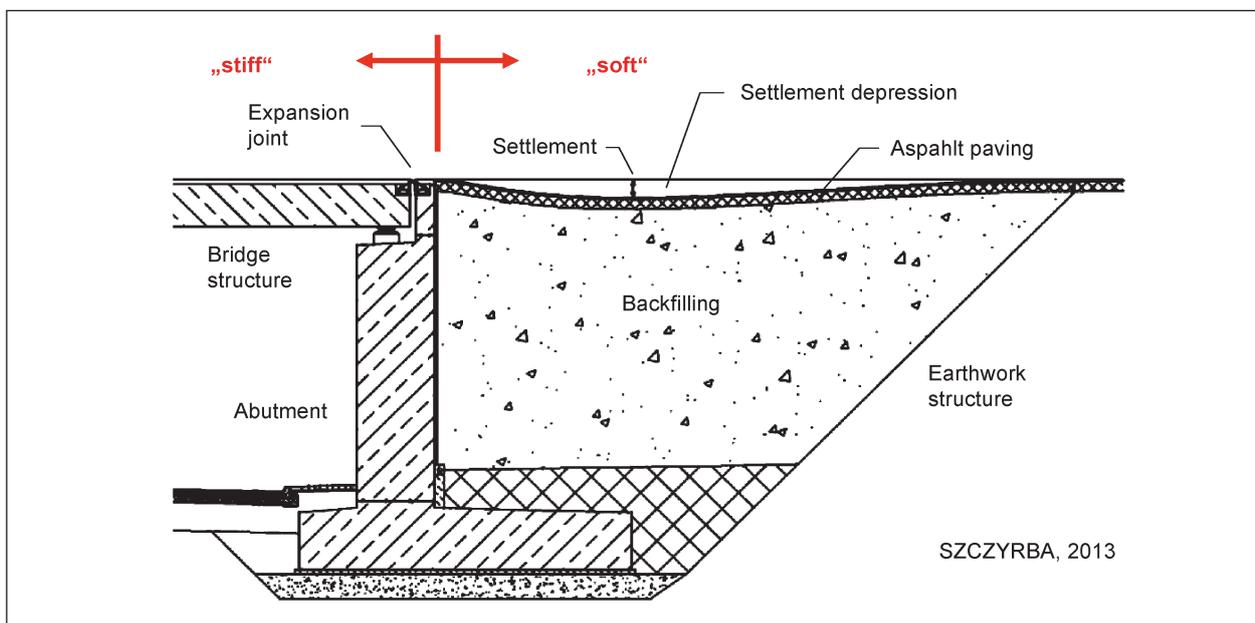


Fig. 1: Schematic illustration of the transition area from engineering structure to earthwork structure

Binder contents were each chosen with 3%, 5% and 7%. With this the scope of usually used binder quantities is covered.

An extensive laboratory programme with a total of approx. 360 laboratory tests – a combination of uniaxial compressive tests, CBR tests, triaxial tests, oedometric tests and other general tests – was performed on the soil-binder-mixtures in order to determine their properties with regard to strength and deformability. Prior to this these tests were also performed on the respective original soils, not only to determine the achievable mechanic properties but also to quantify the changes to mechanical properties after the addition of binders. In order to also acquire the development through time, samples of soil-binder-mixtures were analysed after various storage times, i.e. after 1 day, after 7 days, after 28 and after 28 days with an additional day in water immersion.

3 Analytical results

After the treatment with calcium hydroxide, soil TL shows an initial increase in uniaxial compressive strength and in California bearing ratio (CBR). An additional increase up to a storage time of 28 days could only be found for the uniaxial compressive strength. Furthermore, no significant development of the constrained modulus is happening. A distinct connection with binder content could not be found.

For soils treated with mixed binders with cement content, CBR values, uniaxial compressive strengths and constrained moduli were found, that were multiples times higher than those of the respective original soil before treatment. Here, higher binder quantities mostly achieved a higher CBR value and a higher uniaxial compressive strength, respectively. When comparing both test types, it is found that the CBR test after 28 days and

an additional day in water immersion shows no increased water content within the sample. Corresponding to this, a decrease of the CBR value after immersion in water is not measurable.

The constrained modulus of the original soils could only be increased slightly with the addition of binders. A dependency on binder type or quantity could not be observed here.

When determining shear parameters, it was found that just the addition of calcium hydrate causes a significant increase of cohesion and friction angle in case of soil TL. When soils are treated with mixed binders with cement content, an even higher increase can be noticed.

Analyses of equivalency in terms of a comparison of determined parameters with empirical values of shear parameters and constrained moduli of conventional, coarse grained backfill material were conducted with the tests. Since test results for the determination of the constrained modulus have not yielded complete equivalency with conventional backfill material, additional, exemplary settlement calculations were executed. The result was a settlement value resulting from heavy goods vehicle traffic of < 0,5 cm for each of the modelled and calculated backfill heights of 3 m, 5 m and 10 m.

With this, the following conclusions can be drawn from analyses of equivalency and a summary is given in table 1.

1. A low susceptibility to frost action can be proven for all soil-binder-mixtures.
2. Equivalent settlement behaviour, due to determined calculated settlements that are seen as not problematic, can be proven for all soil-binder-mixtures. An examination of the constrained modulus, however, did not yield a sufficient reason for the proof of an equivalent stiffness.

Original soil	Binder	Equivalency given with regard to			
		Susceptibility to frost action	Stiffness	Calculated settlement	Shear parameter
Soil (TL)	CL 90 S	yes (F3 → F2)	no	yes	yes (> GW/GI)
	MB 50/50	yes (F3 → F2)	yes (SE-GW/GI)	yes	yes (> GW/GI)
Soil (ST*)	MB 50/50	yes (F3 → F2)	limited (SE)	yes	yes (> GW/GI)
	MB 30/70	yes (F3 → F2)	limited (SE ^o)	yes	yes (> GW/GI)

Tab. 1: Summary of verifications of equivalency

3. Shear parameters of all tested soil-binder-mixtures highly exceed those taken as maximum requirement and significantly exceed those of the intermittently graded gravel (GW/GI), respectively.

Hence, an equivalency with soils permitted for the backfill area of structures can be assumed when a qualified ground improvement is performed with binders used here. However, it is pointed out that the improvement of material behaviour of mainly lime based binders depends considerably on the existence of reactive clay minerals in the ground.

4 Conclusions for the use in practice

Corresponding to the described laboratory tests and the analysis of equivalency, a great economic and ecological potential without losses of production quality exists when soils treated with binders are used in backfill areas as compared to delivered material and the thereby associated removal and possible disposal of present soils. This potential should be taken into account by all parties involved with the construction and maxed out.

In order to facilitate the use of soils treated with binders, recommended procedures for practice were developed within the scope of the research project. The technical test conditions require uniaxial compression tests that are to be conducted anyway for the determination of shear parameters and constrained moduli according to object-specific, soil static requirements and in addition the corresponding test types. Thanks to the developed recommendations, shear parameters and the constrained modulus can be derived based on uniaxial compression tests. Because of this, premium and time-consuming test series can be renounced for default rules.

For the derivation of these recommendations, empirical methods based on data gained through the here executed laboratory tests were used. Like this, in principal achievable shear parameters were determined for three areas that depend on uniaxial compressive strength and are irrespective of soil and binder type. For the derivation of the constrained modulus with uniaxial compression tests, an empirical reduction factor can be specified, with which a good approximation to the constrained

moduli determined with laboratory tests is possible when the theory of elasticity is applied.

Based on experiences during the work on the research project, the following recommendations for test instructions based on already existing technical test requirements are given:

- No adjustments are necessary for the mentioned tests in the technical test requirements for the analysis of original soils.
- Proctor tests for the determination of the modified workability of soil-binder-mixtures are productive and sufficient with the currently prescribed procedure.
- Uniaxial compression tests should be used for validation of the achieved material parameters of the qualified ground improvement. Here, the decrease in strength after immersion in water should also be analysed. No adjustments of the test procedure are necessary.

As it could be shown with test results that all uniaxial compressive strengths have a value of $\geq 500 \text{ kN/m}^2$ and that an equivalency to conventional coarse grained backfill material can be proved for these formulations, it is ultimately recommended to use the requirements of ZTV E-StB 09 regarding a minimum compressive strength of 5 N/mm^2 ($\triangleq 500 \text{ kN/m}^2$), which so far stands for a reduction of susceptibility to frost action, as a minimum criterion for a qualified ground improvement used for backfill areas. Furthermore, it is recommended to maintain the requirements for a maximum decrease in strength after immersion in water of 50%.

Inhalt

1	Aufgabenstellung und Motivation	9	6	Untersuchung der Eigenschaften der Boden-Bindemittel-Gemische	22
2	Literaturrecherche	9	6.1	Zustandsgrenzen	22
2.1	Allgemeines zur Literaturrecherche ...	9	6.2	Proctorversuche	23
2.2	Begriffe und Definitionen	9	6.3	California Bearing Ratio (CBR)	25
2.3	Wirkungsweisen von Bindemitteln ...	10	6.4	Einaxiale Druckfestigkeit	30
2.3.1	Baukalke	10	6.5	Steifemodul	33
2.3.2	Hydraulische Bindemittel	10	6.6	Scherparameter	36
2.3.3	Mischbindemittel	11	7	Gleichwertigkeitsbetrachtung zu herkömmlichem gemischt- und grobkörnigen Material	38
2.4	Qualifizierte Bodenverbesserung in Hinterfüllbereichen	11	7.1	Frostempfindlichkeit	38
2.5	Anforderungen an Eigenschaften für Hinterfüllmaterial	12	7.2	Vergleich mit Materialparametern.	39
2.6	Langzeiterfahrungen	13	7.2.1	Allgemeines	39
3	Untersuchungsumfang	14	7.2.2	Scherfestigkeit	39
4	Probenherstellung und Versuchsdurchführung	15	7.2.3	Steifemodul	42
4.1	Materialvorbereitung	15	7.2.4	Rechnerische Setzungen unter statischer Belastung aus Schwerlastverkehr	45
4.2	Bestimmung der Zustandsgrenzen ...	16	7.3	Fazit der Gleichwertigkeitsbetrachtung	46
4.3	Proctorversuche	16	8	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	46
4.4	CBR-Versuche	16	9	Handlungsempfehlung	48
4.5	Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit	17	9.1	Allgemeines und Erfahrung aus dem Forschungsvorhaben	48
4.6	Bestimmung des Steifemoduls	18	9.2	Ableitbare Aussagen aus der einaxialen Druckfestigkeit von Boden-Bindemittel-Gemischen	48
4.7	Bestimmung der Scherparameter ...	18	9.2.1	Scherparameter	48
5	Untersuchung der Eigenschaften der Ausgangsböden	18	9.2.2	Steifigkeit	52
5.1	Klassifikationsversuche Boden 1 (TL)	18			
5.2	Klassifikationsversuche Boden 2 (ST*)	20			

9.3	Empfehlungen für eine Prüfanleitung	53
	Literatur	54
	Bilder	56
	Tabellen	58

Anlagen A1 – A3

Die Anlagen zum Bericht sind im elektronischen
BAST-Archiv ELBA unter:

<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Aufgabenstellung und Motivation

Jährlich fallen bei Erdbauarbeiten mehrere Millionen Tonnen Bodenaushub an, die nicht wieder eingebaut werden. Die als bautechnisch ungeeignet eingestuftes Bodenmengen werden oft als mineralische Restmassen deponiert. Im Sinne einer nachhaltigen Wirtschaft und um dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz besser gerecht zu werden, ist der qualifizierte Wiedereinbau z. B. am Gewinnungsort anzustreben.

Der Hinterfüll- und Überschüttbereich von Bauwerken muss setzungsarm hergestellt werden. Daher war bis zur Einführung der „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau“ (ZTV E-StB 09) [53] die Wiederverwendung von fein- und gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm) > 15 M.-% für einen qualifizierten Wiedereinbau im Hinterfüllbereich von Ingenieurbauwerken nicht vorgesehen. Das führte in der Regel dazu, dass anstehendes Bodenmaterial der Bodengruppen TL, TM, UM und UL bzw. SU*, ST*, GU* und GT* nicht für Hinterfüll- und Überschüttbereiche genutzt und u. U. abtransportiert wurde. In diesen Fällen musste qualifiziertes Material (z. B. grobkörnige Böden) geliefert und eingebaut werden. Mit der Einführung der ZTV E-StB 09 sind nun auch die fein- und gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil > 15 M.-% in Kombination mit einer qualifizierten Bodenverbesserung für den Einsatz in Hinterfüll- und Überschüttbereichen verwendbar. Hierbei sind die Kriterien zum Nachweis der Eignung des Boden-Bindemittel-Gemisches für den Einzelfall nachzuweisen.

Je nach Bodentyp sind Zement, Baukalk oder Mischbindemittel (Zement und Baukalk in verschiedenen Verhältnissen) als Bindemittel zur Behandlung von Böden geeignet. Die Art und Menge der Bindemittel richtet sich nach dem Ausgangsboden und den gewünschten Bodeneigenschaften (z. B. WITT, 2012 [49]). Empfehlungen zu Bindemittelarten und -mengen bei qualifizierten Bodenverbesserungen sind in den ZTV E-StB 09 bzw. im Merkblatt [33] enthalten. Angaben zur Veränderung der bodenphysikalischen Parameter infolge Bindemittelzugabe (z. B. Scherfestigkeit, Steifemodul, Verformungs- und Langzeitverhalten) sind in den geltenden Regelwerken nicht aufgenommen. Dazu soll mit dem gegenständlichen Forschungsvorhaben

ein entsprechender Beitrag geleistet werden, in dem das Verhalten des Boden-Bindemittel-Gemisches bei feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden mit Feinkornanteilen > 15 M.-% durch ein intensives Laborprogramm untersucht und bewertet wird. Auf der Grundlage der Ergebnisse erfolgt auch eine Gleichwertigkeitsbetrachtung bezüglich herkömmlicher, insbesondere grobkörniger Hinterfüllmaterialien.

Diese Arbeit leistet somit einen Beitrag zur Verbesserung des Kenntnisstandes hinsichtlich erzielbarer mechanischer Eigenschaften bei bindemittelverbesserten fein- und gemischtkörnigen Böden mit einem Feinanteil > 15 M.-% im Hinterfüllbereich.

2 Literaturrecherche

2.1 Allgemeines zur Literaturrecherche

Für die Literaturrecherche wurden die im Literaturverzeichnis aufgeführten Normen, Richtlinien und Veröffentlichungen gesichtet und ausgewertet.

Im Verlauf der Literaturrecherche wurde deutlich, dass nur unzureichend Veröffentlichungen zu Parametern von Bodenbehandlungen existieren. Bei herkömmlichen Eignungsuntersuchungen zu qualifizierten Bodenverbesserungen werden lediglich Klassifikationsversuche und Proctorversuche durchgeführt und die einaxiale Druckfestigkeit bzw. der CBR-Wert bestimmt. Scherparameter für erdstatistische Berechnungen oder Erddruckermittlungen werden üblicherweise nicht ermittelt bzw. untersucht. Daher ist es mangels weitreichender veröffentlichter Erfahrungen nicht möglich, gesicherte Aussagen über erreichbare Materialparameter in Abhängigkeit von Bodengruppe, Bindemittelart und -menge zu treffen. Umso wichtiger sind Forschungsvorhaben, die den fehlenden allgemeinen Erfahrungsschatz erweitern können.

2.2 Begriffe und Definitionen

Bodenbehandlungen sind Verfahren, bei denen Böden so verändert werden, dass die geforderten Eigenschaften erreicht werden. Sie umfassen Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen [53].

Bodenverfestigungen sind Verfahren, bei denen die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegen Beanspru-

chungen durch Verkehr und Klima durch die Zugabe von Bindemitteln so erhöht wird, dass der Boden dauerhaft tragfähig und frostsicher wird [53].

Bodenverbesserungen sind Verfahren zur Verbesserung der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit von Böden und zur Erleichterung der Ausführung von Bauarbeiten [53].

Qualifizierte Bodenverbesserungen sind Bodenverbesserungen mit Bindemitteln, die erhöhte Anforderungen an bestimmte Eigenschaften erfüllen [53].

Bindemittel sind Zusätze, die durch Einmischen in den Baugrund mit diesem reagieren und zu gezielt veränderten Eigenschaften führen.

2.3 Wirkungsweisen von Bindemitteln

2.3.1 Baukalke

Weißkalke bzw. Weißkalkhydrate erhärten an der Luft unter Einwirkung des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids [3]. Die Zugabe erfolgt meist bei feinkörnigen oder gemischtkörnigen Böden. Die Scherfestigkeit, Quellfähigkeit und Plastizität dieser Böden werden in hohem Maße von der Wasseradsorption der Ton- und Schluffpartikel mit hoher spezifischer Oberfläche beeinflusst [3].

Bei der Bodenbehandlung mit Kalk lassen sich zwei zeitlich unterschiedlich ablaufende Reaktionen feststellen. Dabei handelt es sich zum einen um die Sofortreaktion, welche nach einigen Tagen abgeschlossen ist und die sich hauptsächlich auf die Verarbeitbarkeit des Bodens auswirkt und somit den gewünschten Effekt bei Bodenverbesserungen darstellt sowie zum anderen um die Langzeitreaktion, die für eine Bodenbehandlung maßgeblich sein und sich über Jahre erstrecken kann.

Mischt man Weißkalk mit einem feuchten Boden wird der Kalk gelöscht. Das bedeutet, der Kalk reagiert mit Wasser zu Weißkalkhydrat, wodurch Porenwasser gebunden und Wärme freigesetzt wird. Als Faustregel gilt, dass durch die Zugabe von Kalk die Porenwassermenge um das Zweifache des Gewichtes des Kalkes reduziert wird [3].

Weiterhin wird eine Umstrukturierung des Bodens bewirkt. Durch Ionenaustausch und Saugspannung aggregieren Ton- und Schluffpartikel zu größeren Körnern, die wiederum Wasser einschließen und eine innerliche Austrocknung des Bodens bewirken.

Dies resultiert in der erhöhten Ausrollgrenze des behandelten Bodens gegenüber dem Ausgangsmaterial. Das bedeutet, dass bei demselben Wassergehalt der unbehandelte Boden wesentlich weicher als der behandelte Boden ist. Zu sehen ist dieser Effekt auch anhand von Proctorkurven, bei denen sich mit zunehmendem Bindemittelgehalt auch der optimale Wassergehalt erhöht. Die größtmögliche Trockendichte nimmt dabei ab. Gleichzeitig wird die Wassergehaltsspanne zum Erreichen einer beispielhaft geforderten Verdichtung von 97 % der Proctordichte (D_{Pr}) breiter [3].

Die geringere Trockendichte resultiert aus der Bodenstrukturierung. Die bei der Sofortreaktion gebildeten Aggregate werden bei der Verdichtung nicht zerstört und sind somit als dauerhaft stabil anzusehen [3]. Aus der Bodenstrukturierung können auch eine geringere Kapillarität und damit eine geringere Frostempfindlichkeit folgen.

Langfristige Scher-, Druck- und Zugfestigkeitssteigerungen werden durch die puzzolanische Reaktion innerhalb der Bodenaggregate hervorgerufen. Wie ausgeprägt diese Reaktion abläuft, hängt vom Vorhandensein reaktionsfähiger Tonminerale im Boden ab [52].

In den Empfehlungen aus [33] werden für die qualifizierte Bodenverbesserung feinkörniger Böden 3 M.-% bis 4 M.-% Weißkalk bzw. 3 M.-% bis 5 M.-% Weißkalkhydrat angegeben. Für gemischtkörnige Böden gelten die gleichen Werte unter der Voraussetzung, dass genügend reaktionsfähige Stoffe im Boden vorhanden sind.

Mit Kalk qualifiziert verbesserte Böden weisen eine langfristige Zunahme der Festigkeit auf und sind dauerhaft tragfähig und frostsicher. Selbst bei Wasserlagerung behalten sie ihre Qualität bei, wo unbehandelte Boden schon zerfällt.

2.3.2 Hydraulische Bindemittel

Hydraulische Bindemittel werden häufig bei grobkörnigen und gemischtkörnigen Böden mit geringem Feinkornanteil eingesetzt, bei denen die Körner selbst bereits hohe Festigkeiten besitzen, mit dem Ziel, die Porenräume zu überbrücken und eine dichte und stabile Struktur zu erreichen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch Zugabe von Wasser, anders als Kalke, sowohl unter Wasser als auch an der Luft reagieren und dadurch erhärten. Durch Mischung von Wasser und Zement wird eine

exotherme Langzeitreaktion hervorgerufen, wobei Wasser verdunstet und chemisch gebunden wird. Während der Sofortreaktion, allgemein als Hydratation bezeichnet, bildet sich eine skelettartige Zementsteinmatrix aus, wodurch Porenräume überbrückt und Bodenpartikel fixiert werden. Dies hat einen raschen Festigkeitsanstieg zur Folge. Für die langfristige Festigkeitszunahme ist wiederum eine puzzolanische Reaktion verantwortlich [52]

Bei Sanden und Kiesen sind aufgrund der Härte der Körner und der geringen spezifischen Oberfläche 3 % bis 5 % Bindemittelgehalt oft ausreichend, während bei diesem Gehalt bei plastischen Tonen nur vernachlässigbar kleine Auswirkungen erreicht werden. Jedoch steigen auch bei Ton Festigkeit, Steifigkeit und Kohäsion bis zu einem Bindemittelgehalt von ca. 20 % proportional an [52]. Diese Entwicklung findet sich auch in den Empfehlungen des Merkblattes [33] wieder, wonach Bindemittelmengen für eine qualifizierte Bodenverbesserung grobkörniger Böden, gemischtkörniger Böden und feinkörniger Böden von jeweils 3 M.-% bis 6 M.-% empfohlen werden.

2.3.3 Mischbindemittel

Mischbindemittel vereinigen die positiven Eigenschaften von Kalken und Zementen. Der hydraulische Anteil bildet rasch das typische Skelettgefüge aus, während der beigefügte Kalk zu der Bildung der Bodenaggregate führt. Die Zementsteinmatrix umschließt dabei die Aggregate, wie Bild 1 verdeutlicht.

Wenn das Mischungsverhältnis hinsichtlich der unterschiedlichen Wirkungsweisen auf den jeweiligen Boden angepasst ist, zeichnen sich die Mischbindemittel durch den geringen Bindemittelbedarf aus [52]. Erfahrungswerte zur Mischbindemittelmenge liefern das „Merkblatt über Bodenverfestigungen

und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln“ [33] sowie das „Merkblatt zur Herstellung, Wirkungsweise und Anwendung von Mischbindemitteln“ [35]. Demnach werden analog zu den hydraulischen Bindemitteln Bindemittelmengen für eine qualifizierte Bodenverbesserung grob-, gemischt- und feinkörniger Böden von jeweils 3 M.-% bis 6 M.-% empfohlen.

Das Mischungsverhältnis richtet sich nach der Bodenzusammensetzung. Je feinkörniger der zu verbessernde Boden ist, desto größer sollte der Kalkanteil im Bindemittel gewählt werden.

2.4 Qualifizierte Bodenverbesserung in Hinterfüllbereichen

Bei Verkehrswegen sind zur Gewährleistung einer ebenen Fahrbahnoberfläche Steifigkeitssprünge, z. B. zwischen Brückenbauwerk und Hinterfüllbereich, zu vermeiden. Setzungen innerhalb des Hinterfüllbereichs wurden von verschiedenen Autoren als potenzielle Ursache für Fahrbahnunebenheiten identifiziert (z. B. GROSSMANN, 2001 [26] und VOGEL, 2003 [45]). Diese Schäden treten oft erst nach einer gewissen Verkehrsbelastung auf. Das unterstreicht die Bedeutung der Ausbildung des Hinterfüll- und Überschüttbereiches, die so erfolgen muss, dass Differenzsetzungen weitgehend begrenzt werden.

Fein- und gemischtkörnige Böden weisen im Vergleich zu grobkörnigen Böden eine geringere Scherfestigkeit und somit erhöhte Erddrücke auf. Das wirkt sich z. B. auf die Ausbildung der Stützkonstruktion und Fundamente aus. Als besonders nachteilig im Hinterfüllbereich erweisen sich die höhere Kompressibilität und das ungünstigere Zeit-Setzungs-Verhalten. Setzungen klingen in der Regel erst nach größeren Zeiträumen ab. Bei grob-

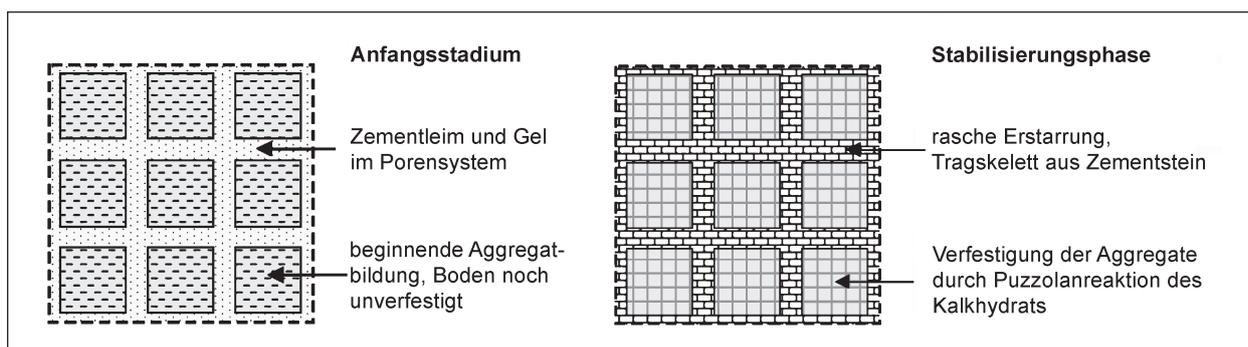


Bild 1: Wirkungsprinzip von Mischbindemitteln, Quelle: [52]

körnigen Böden hingegen ist der Großteil der Setzungen meist schon am Ende der Bauphase abgeklungen.

Die Anforderungen an die Ausbildung der Hinterfüll- und Überschüttbereiche sind im Straßenbau durch die ZTV E-StB 09 geregelt und in der Richtzeichnung „Entwässerung erdberührter Flächen und Hinterfüllung von Bauwerken“ (Was 7 in RiZ-ING [36]), wie z. B. in Bild 2 dargestellt, umgesetzt. Demnach wird ausdrücklich auf die Verwendbarkeit von gemischt- und feinkörnigen Böden im Zuge einer qualifizierten Bodenverbesserung hingewiesen.

Allgemeine Hinweise befinden sich im „Merkblatt über den Einfluss der Hinterfüllung auf Bauwerke“ [34]. Im Bahnbau ist die Ausführung von Hinterfüllbereichen im Regelwerk der Deutschen Bahn AG, Ril 836 [37] Modul 4106, mit einem Verweis auf die ZTV E-StB 09 geregelt.

Durch eine Behandlung der Böden mit Bindemitteln können fein- und gemischtkörnige Böden mit > 15 M.-% Feinkornanteil in ihren mechanischen Eigenschaften so verbessert werden, dass die projektspezifischen Anforderungen bzw. die Anforderungen gemäß Kapitel 2.5 erfüllt werden können. So wurden beispielsweise von SZCZYBRA, 2013 [39]

im Zuge eines Feldversuchs Setzungsmessungen an verschiedenen ausgebildeten Hinterfüllbereichen eines Brückenbauwerks durchgeführt. Demnach konnten für einen Hinterfüllbereich aus qualifiziert verbessertem, bindigen Material (Ausgangsmaterial: UL, SU*) im Vergleich zu einem Hinterfüllbereich aus grobkörnigen Material nur unwesentlich größere Setzungen nachgewiesen werden. Des Weiteren wurden in dem Feldversuch die einwirkenden Erd-drücke gemessen. Diese waren bei dem qualifiziert verbesserten, bindigem Boden (in Kombination mit vertikalem Expandiertem Polystyrol-Hartschaum) um das 3- bis 4-fache geringer als bei dem herkömmlichen, grobkörnigen Hinterfüllbereich.

2.5 Anforderungen an Eigenschaften für Hinterfüllmaterial

In den gängigen Regelwerken werden Anforderungen an mit Bindemitteln behandelte Böden zur Verwendung als Hinterfüllmaterial genannt.

In der ZTV E-StB [53] werden für die einaxiale Druckfestigkeit

- $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2 (\triangleq 500 \text{ kN/m}^2)$ nach 28 Tagen Lagerung und

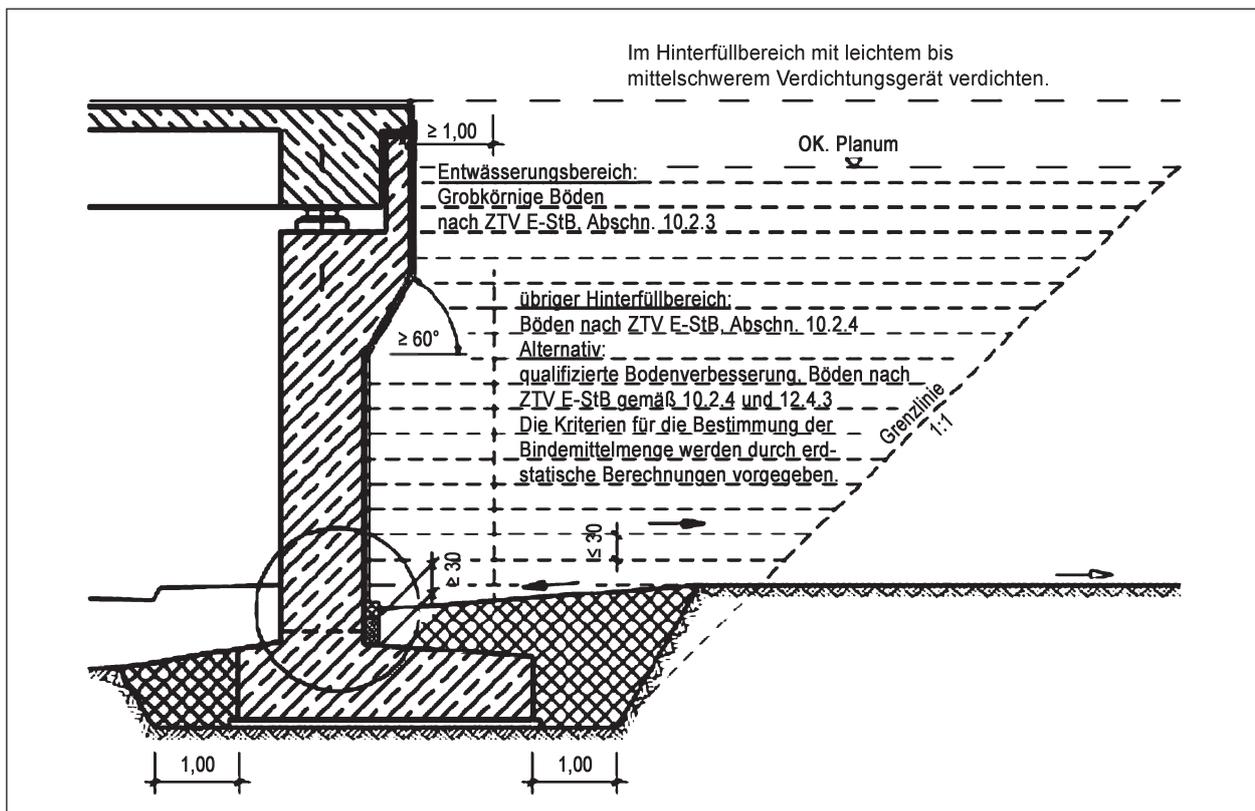


Bild 2: Beispielhafte Ausbildung des Hinterfüllbereichs in Anlehnung an RiZ-ING, Was 7 [36]

- $\leq 50\%$ Festigkeitsabfall nach 1 Tag Wasserlagerung

bzw. für den California Bearing Ratio (CBR)

- $\geq 40\%$ nach 28 Tagen Lagerung und
- $\leq 50\%$ Festigkeitsabfall nach 1 Tag Wasserlagerung

gefordert. Diese Anforderungen gelten für eine zulässige Verringerung der Frostempfindlichkeitsklasse des behandelten Bodens von F3 zu F2 bei der qualifizierten Bodenverbesserung des Planums.

In der Ril 836 [37] werden unterschiedliche Anforderungen in Abhängigkeit von der Oberbauform, der Höchstgeschwindigkeit und dem Kriterium Neubau bzw. Verbesserung für 2 grundsätzliche Hinterfüllbereiche (Zonen) festgelegt. Zur Verdeutlichung der Zonen dient Bild 3.

Es werden lediglich Anforderungen mit Bezug auf die einaxiale Druckfestigkeit genannt. Demnach werden für Zone I

- $\geq 1.000 \text{ kN/m}^2$ nach 28 Tagen Lagerung und
- $\leq 50\%$ Festigkeitsabfall nach 1 Tag Wasserlagerung

bzw. für Zone II

- $\geq 700 \text{ kN/m}^2$ nach 28 Tagen Lagerung und
- $\leq 50\%$ Festigkeitsabfall nach 1 Tag Wasserlagerung

gefordert.

Sowohl nach ZTV-E als auch nach Ril 836 können weitere Kriterien für die Bestimmung der Bindemittelmenge durch erdstatische Berechnungen projektbezogen und zweckgebunden vorgegeben werden.

2.6 Langzeiterfahrungen

Die in Kapitel 2.5 genannten, bisher festgeschriebenen Anforderungen an eine qualifizierte Bodenverbesserung werden an Probekörpern im Alter von maximal 28 Tagen geprüft. Längere Lagerungszeiten werden im Zuge von objektspezifischen Untersuchungen im Allgemeinen nicht durchgeführt. Anhand der in dem Kapitel 2.3 beschriebenen Wirkungsweise von Bindemitteln ist jedoch bekannt, dass sowohl bei der Verwendung von Kalk als auch bei der Verwendung von Zement und entsprechend auch bei Mischbindemitteln langfristige Festigkeitssteigerungen erreicht werden.

Quantifizierbare Langzeiterfahrungen liegen überwiegend mit kalkbasierten Bindemitteln vor. So ergaben Untersuchungen mit Feld-CBR-Versuchen, die an Straßen mit Kalk behandeltem Planum und an Straßen mit unbehandeltem Planum, jeweils nach mehreren Jahren in Betrieb, durchgeführt wurden, deutlich größere Werte in den behandelten Bereichen. Die Ausgangsböden waren dabei zu meist leicht bis ausgeprägt plastische Tone. Während unbehandelte Tone CBR-Werte überwiegend im einstelligen Bereich lieferten, wurde an behandelten Tonen CBR-Werte bis $> 100\%$, jedoch stark schwankend, nach WICHTER, LOTTMANN, 2004 [46] festgestellt.

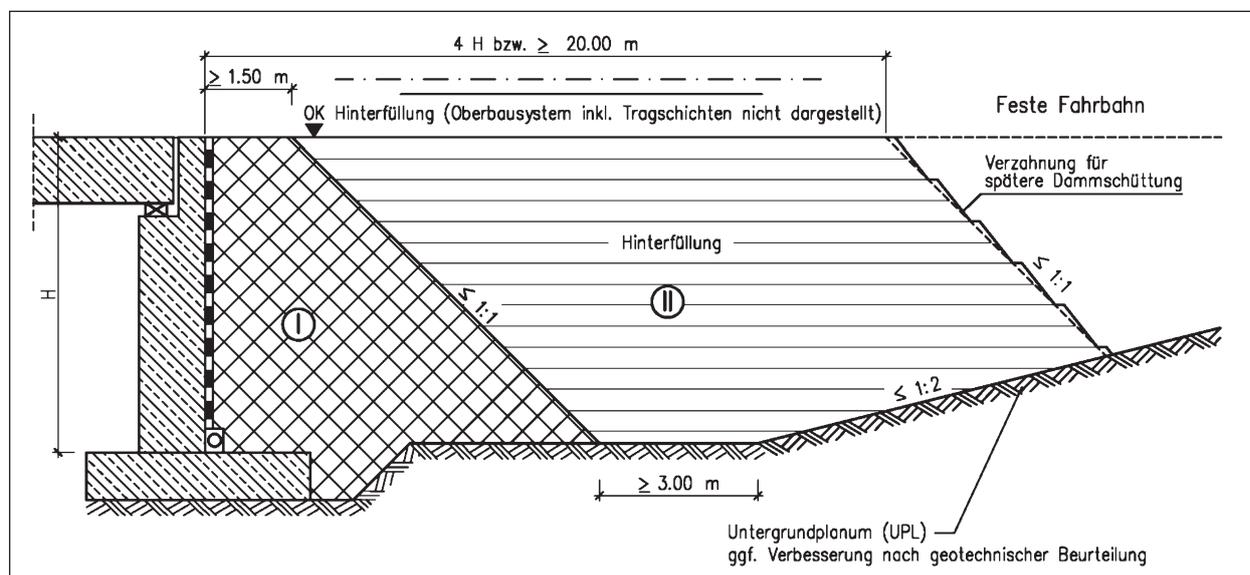


Bild 3: Zonen I und II im Hinterfüllbereich gemäß Ril 836 [37]

CBR-Versuche im Labor an Proben bis zu 270 Tagen Lagerungszeit nach der Behandlung mit Kalk zeigen nach LOTTMANN, WIENBERG, KÖNIG, 2008 [32] eine zum Teil deutliche Zunahme der CBR-Werte um den Faktor 3 im genannten Zeitraum.

Durch JESSBERGER, JORDAN, EBEL, 1988 [29] dokumentierte Versuche zeigen ebenfalls eine konstante Zunahme der einaxialen Druckfestigkeit, der Steifigkeit und der Scherparameter eines mit Kalk behandelten, leicht plastischen Schluffes bis zu einem maximalen Probenalter von 360 Tagen.

Diese Entwicklung wird jedoch maßgeblich durch das Vorhandensein reaktionsfähiger Tonminerale beeinflusst, wodurch große Schwankungen in den dokumentierten Forschungsergebnissen von Bodenbehandlungen mit Kalk vorhanden sind.

Empirische Erfahrungen zur Dauerhaftigkeit von qualifizierten Bodenverbesserungen im Bereich von Erdbauwerken und Hinterfüllbereichen im Verkehrswegebau liegen an Neubaustrecken der Deutschen Bahn AG vor, bei denen ein Großteil der Erdbauwerke und die Hinterfüllbereiche von Überführungsbauwerken mit qualifizierten Bodenverbesserungen, sowohl mit Kalk- als auch mit Zementbestandteilen, ausgeführt wurden. Direkte Untersuchungen nach dem mehrjährigen Betrieb der Strecken an diesen qualifiziert verbesserten Materialien wurden nicht durchgeführt. Die Bauwerke zeigen jedoch keine Einschränkung oder Unterhaltungsmaßnahmen unter Betrieb.

3 Untersuchungsumfang

Sämtliche Laboruntersuchungen wurden vom Zentrum für angewandte Forschung und Technologie e. V. an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden durchgeführt.

Für die Laboruntersuchungen wurden 2 Ausgangsböden (TL und ST* gemäß DIN 18196) gemäß Kapitel 5 ausgewählt und abgestimmt. An diesen Böden wurden zunächst die Klassifikationsversuche gemäß Tabelle 1 durchgeführt.

Folglich werden insgesamt 34 (17 Versuche x 2 Böden) Klassifikationsversuche an den Ausgangsböden durchgeführt.

Für die 2 Ausgangsböden sind Untersuchungen mit je 2 Bindemittelarten zu je 3 Bindemittelgehalten

(3 %, 5 %, 7 %) vorgesehen. Somit ergeben sich 12 Versuchsprogramme wie sie in Tabelle 2 dargestellt sind.

Abstimmungsgemäß wurden für die Laborversuche am Boden-Bindemittel-Gemisch folgende Bindemittel gewählt:

- Boden 1 (TL)
 - Weißkalkhydrat CL 90 S,
 - Mischbindemittel 50/50 (gemischt aus 50 % Weißkalkhydrat CL 90 S und 50 % Zement CEM II 32,5 R).
- Boden 2 (ST*)
 - Mischbindemittel 50/50 (gemischt aus 50 % Weißkalkhydrat CL 90 S und 50 % Zement CEM II 32,5 R),
 - Mischbindemittel 30/70 (gemischt aus 30 % Weißkalkhydrat CL 90 S und 70 % Zement CEM II 32,5 R).

Aufgrund von unplausiblen Ergebnissen und dem untergeordneten Stellenwert mit Bezug auf die Gleichwertigkeitsbetrachtung wurde das Versuchsprogramm an Boden 1 (TL) abstimmungsgemäß nachträglich und abweichend von Tabelle 2 um die statischen CBR-Versuche mit 1 Tag Lagerung sowie nach 28 Tagen + 1 Tag Wasserlagerung reduziert. Stattdessen wurden am Boden 2

Laborversuch	Regelwerke	Anzahl der Versuche
Nat. Wassergehalt	DIN EN ISO 17892-1	1
Organischer Bestandteil	DIN 18128	1
Korndichte	DIN EN ISO 17892-3	1
Kornverteilung	DIN EN ISO 17892-4	3
Zustandsgrenzen	DIN 18122 und DIN EN ISO 17892-12 (Entwurf)	1
Proctorversuch	DIN 18127 und TP BF-StB Teil B 11.3	1
Einaxialer Druckversuch	DIN 18136 und TP BF-StB Teil B 11.3	3
Ödometerversuch mit 6 Laststufen	DIN EN ISO 17892-5	1
CBR, statisch	TP BF-StB Teil B 11.3 und TP BF-StB Teil B 7.1 bzw.	2
CBR, dynamisch	TP Gestein-StB Teil 5.6	2
Triaxialversuch	DIN 18137-2	1
Summe		17

Tab. 1: Klassifizierungsversuche je Boden

Laborversuch	Regelwerke	Anzahl der Versuche
Zustandsgrenzen	DIN 18122 und DIN EN ISO 17892-12 (Entwurf)	1
Proctorversuch	DIN 18127 und TP BF-StB Teil B 11.3	1
Einaxialer Druckversuch, nach 1 d		3
Einaxialer Druckversuch, 7 d Feuchtraum		3
Einaxialer Druckversuch, 28 d Feuchtraum		2
Einaxialer Druckversuch, 28 d Feuchtraum und 1 d Wasserlagerung	DIN 18136 und TP BF-StB Teil B 11.3	2
Einaxialer Druckversuch, 28 d Feuchtraum, mit Querdehnung		1
Einaxialer Druckversuch, 28 d Feuchtraum, 1 d Wasserlagerung, mit Querdehnung		1
Ödometerversuch mit 6 Laststufen, 28 d Feuchtraum	DIN EN ISO 17892-5	2
CBR, statisch, 1 d Feuchtraum		2
CBR, statisch, 7 d Feuchtraum		2
CBR, statisch, 28 d Feuchtraum		2
CBR, statisch, 28 d Feuchtraum und 1 d Wasserlagerung	TP BF-StB Teil B 11.3 und TP BF-StB Teil B 7.1 bzw. TP Gestein-StB Teil 5.6	2
CBR, dynamisch, 1 d Feuchtraum		1
CBR, dynamisch, 7 d Feuchtraum		1
CBR, dynamisch, 28 d Feuchtraum		1
CBR, dynamisch, 28 d Feuchtraum und 1 d Wasserlagerung		1
Triaxialversuch, 28 d Feuchtraum	DIN 18137-2	2
	Summe	30

Tab. 2: Versuche je Boden, je Bindemittelart und je Bindemittelgehalt

(ST*) zusätzliche einaxiale Druckversuche im Alter von 28 d durchgeführt. Für diese zusätzlichen Versuche wurde dem Mischbindemittel in den bereits genannten Verhältnissen CL 90 Q (Weißkalk) anstatt des ursprünglich verwendeten CL 90 S (Weißkalkhydrat) zugemischt. Um unterschiedliche Auswirkungen zwischen der Verwendung von Weißkalkhydrat und Weißkalk feststellen zu können.

Folglich wurden insgesamt ca. 360 (30 Laborversuche x 12 Versuchsprogramme) Versuche an Boden-Bindemittel-Gemischen durchgeführt.

4 Probenherstellung und Versuchsdurchführung

4.1 Materialvorbereitung

Das angelieferte Probenmaterial (Ausgangsböden) wurde zunächst von Hand homogenisiert und bei 60 °C im Ofen getrocknet. Die erreichte Homogenität wurde mit der Durchführung von 3 Kornverteilun-

gen je Material überprüft. Bei beiden Böden wurden Überkornfraktionen abgesiebt.

Als Überkorn wurde

- bei Boden 1 (TL) die Kornfraktion ≥ 4 mm,
- bei Boden 2 (ST*) die Kornfraktion ≥ 20 mm

definiert.

Verbackene bzw. verkittete Bereiche wurden schonend zerkleinert.

Das vorbereitete Probenmaterial wurde anschließend in luftdicht abgeschlossenen Tonnen gelagert.

Die Bestimmung der Masse des je Bindemittelgehalt zuzugebenden Bindemittels wurde anhand der Trockenmasse des Probematerials bestimmt. Der einzustellende Wassergehalt wurde in Abhängigkeit der Bindemittelart und des Bindemittelgehaltes anhand der Ergebnisse der Proctorversuche gemäß Kapitel 6.2 ermittelt. Das zuzugebende Wasser wurde 24 Stunden vor Probenherstellung eingemischt.

Nach dem Einmischen des Bindemittels wurde die Probe in Abhängigkeit der Bindemittelart für

- 2 Stunden (Weißkalkhydrat) und
- 4 Stunden (Mischbindemittel)

entsprechend TP BF-StB Teil B 11.3, Tabelle 3, gelagert und anschließend erneut durchmischt. Nach dem jeweiligen Mischvorgang wurden die Wassergehalte des Materials kontrolliert. Für die Auswertung der Versuche wurde jeweils der Wassergehalt nach dem 2. Mischvorgang verwendet.

In den Kapiteln 4.2 bis 4.7 werden die Probenherstellung und Versuchsdurchführung der Laborversuche an mit Bindemitteln behandelten Böden kurz erläutert. Die Klassifikationsversuche gemäß Kapitel 3, Tabelle 1, wurden entsprechend des jeweils gültigen Regelwerkes durchgeführt. Es handelt sich dabei um in der Praxis häufig durchgeführte Laborversuche. Die Klassifikationsversuche werden daher nicht näher erläutert.

4.2 Bestimmung der Zustandsgrenzen

Die Bestimmung der Zustandsgrenzen der Ausgangsböden 1 (TL) und 2 (ST*) und der Boden-Bindemittel-Gemische mit Boden 1 (TL) wurde entsprechend der DIN 18122-1 [7] (Fließgrenze mit Casagrande-Schale) mit dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Mischvorgang und unter Berücksichtigung der Reaktionszeit durchgeführt.

Die Bestimmung der Fließgrenze der Boden-Bindemittel-Gemische mit Boden 2 (ST*) wurden entsprechend der DIN EN ISO 17892-12 [24] (Fließgrenze mit Fallkegel) durchgeführt, da hier die Bestimmung der Fließgrenze mit der Casagrande-Schale versuchsstechnisch nicht möglich war.

4.3 Proctorversuche

Grundlage für die Bestimmung der Proctordichte und des optimalen Wassergehaltes von Boden-Bindemittel-Gemischen bilden die DIN 18127 [9] und die TP BF-StB Teil B 11.3 [41].

Die Herstellung des Boden-Bindemittel-Gemischs erfolgte individuell je Wasser- und Bindemittelgehalt mit dem unter Kapitel 4.1 beschriebenen Mischvor-

gang und unter Berücksichtigung der Reaktionszeit. Danach erfolgte die Versuchsdurchführung entsprechend der genannten Vorschriften.

4.4 CBR-Versuche

Grundlage für die Bestimmung des CBR-Wertes von Boden-Bindemittel-Gemischen bilden die TP BF-StB Teil B 11.3 [41] und die TP BF-StB Teil B 7.1 [42] (statischer CBR-Versuch) bzw. die TP Gestein-StB Teil 5.6 [44] (dynamischer CBR-Versuch).

Die Herstellung des Boden-Bindemittel-Gemischs erfolgte individuell je Probekörper. Die Prüfkörper wurden bei optimalem Wassergehalt mit Proctordichte im Proctorversuchsstand in 3 Schichten mit dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Mischvorgang und unter Berücksichtigung der Reaktionszeit hergestellt. Eine Verbindung zwischen den einzelnen Schichten wurde durch Aufrauen des Materials sichergestellt. Die Abmessungen der Prüfkörper betragen in der Höhe 120 mm und im Durchmesser 150 mm.

Die Lagerung der Probekörper erfolgte im Feuchtraum bis zum vorgesehenen Prüfzeitpunkt. Falls der Festigkeitsabfall an den Proben untersucht wurde, erfolgte die Lagerung während der letzten 24 Stunden vor der Prüfung im Wasserbad.

Statischer CBR-Versuch

Bei der Bestimmung des statischen CBR-Wertes erfolgte die Prüfung gemäß TP BF-StB Teil B 7.1 weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit des Stempels von 1,27 mm/min. Es wurden der zurückgelegte Weg und die Eindringkraft des Stempels aufgezeichnet und für die Berechnung des CBR-Wertes verwendet. Der Versuchsaufbau zur Bestimmung des statischen CBR-Wertes ist in Bild 4 dargestellt.

Dynamischer CBR-Versuch

Bei der Bestimmung des dynamischen CBR-Wertes gemäß TP Gestein-StB Teil 5.6 erfolgt die impulsartige Belastung des Probekörpers über ein 5 kg schweres Fallgewicht entsprechend der Belastungsvorrichtung des Leichten Fallgewichtsgerätes gemäß TP BF – StB Teil B 8.3 [43] anstelle der statischen Vorrichtung (s. Bild 4) verwendet. Dabei wird die Beschleunigung des Laststempels

nach einem einmaligen Vorbelastungsstoß erfasst. Die gemessene Beschleunigung wird als Eingangswert für die Berechnung des dynamischen CBR-Wertes verwendet. Der Versuchsaufbau zur Bestimmung des dynamischen CBR-Wertes ist in Bild 5 dargestellt.

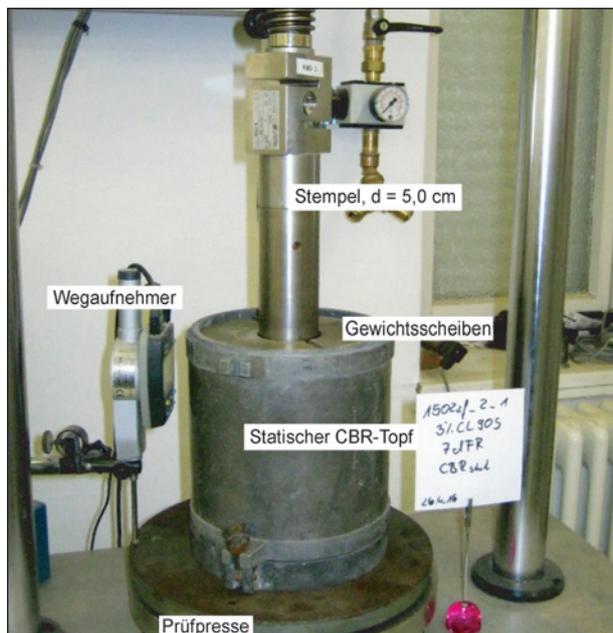


Bild 4 : Versuchsaufbau – statischer CBR-Versuch

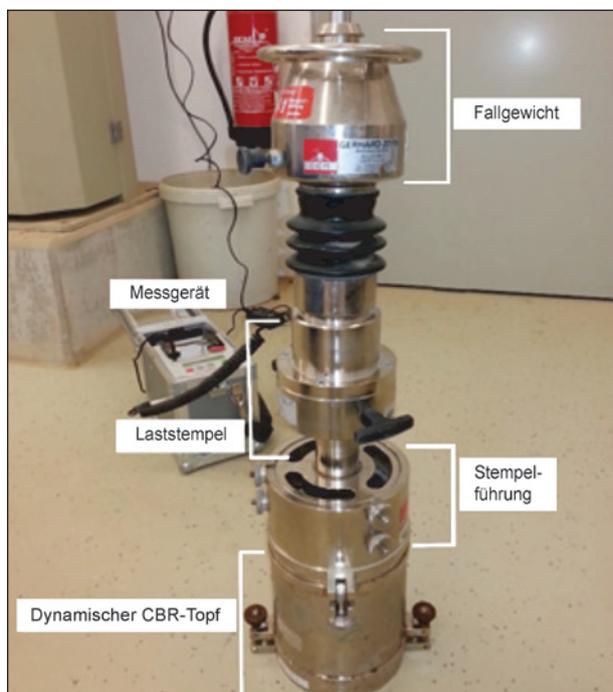


Bild 5: Versuchsaufbau – dynamischer CBR-Versuch

4.5 Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit

Grundlage für die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit von Boden-Bindemittel-Gemischen bilden die DIN 18136 [11] und die TP BF-StB Teil B 11.3 [41].

Die Herstellung des Boden-Bindemittel-Gemischs erfolgte individuell je Bindemittelgehalt. Die Prüfkörper wurden bei dem optimalen Wassergehalt der jeweiligen Mischung mit Proctordichte im Proctorversuchsstand in 3 Schichten mit dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Mischvorgang und unter Berücksichtigung der Reaktionszeit hergestellt. Eine Verbindung zwischen den einzelnen Schichten wurde durch Aufrauen des Materials sichergestellt.

Die Abmessungen der Prüfkörper betragen in der Höhe 120 mm und im Durchmesser 100 mm.

Die Lagerung der Probekörper erfolgte entformt im Feuchtraum bis zum vorgesehenen Prüfzeitpunkt. Falls der Festigkeitsabfall an den Proben untersucht wurde, erfolgte die Lagerung während der letzten 24 Stunden vor der Prüfung im Wasserbad.

Die Prüfung selbst erfolgte weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min. Dabei wurden Vertikalverformungen samt zugehöriger Kraft aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist in Bild 6 dargestellt.

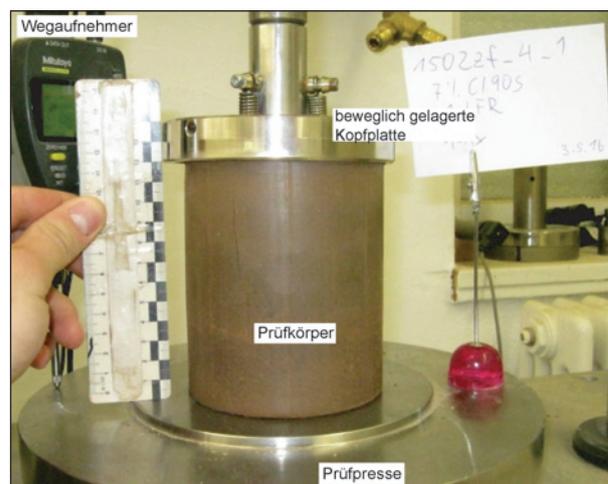


Bild 6: Versuchsaufbau – einaxialer Druckversuch

4.6 Bestimmung des Steifemoduls

Grundlage für die Bestimmung des Steifemoduls von Boden-Bindemittel-Gemischen bildet die DIN EN ISO 17892-5 [23].

Die Herstellung des Boden-Bindemittel-Gemischs erfolgte individuell je Bindemittelgehalt.

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte im Ödometerring. Hierbei wurde jeder Prüfkörper durch Einstampfen einzeln hergestellt. Anschließend erfolgte die Lagerung der Probe im Ödometerring in einem Feuchtraum ohne direkten Kontakt zu Wasser. Zur Prüfung wurde der Prüfkörper mit dem Ödometerring in das Kompressionsgerät eingebaut und geprüft. Die Wasserzugabe erfolgte ab ca. 25 kN/m² Auflast.

Die Versuchsdurchführung erfolgte nach 28 Tagen Feuchtraumlagerung. Es wurden jeweils 7 Laststufen mit einer Dauer von je 24 Stunden mit Auflastspannungen zwischen 50 kN/m² und 1.000 kN/m² aufgebracht.

4.7 Bestimmung der Scherparameter

Die Bestimmung der Scherparameter erfolgte mittels Triaxialversuchen nach DIN 18137-2 [12].

Die Herstellung des Boden-Bindemittel-Gemischs erfolgte individuell je Bindemittelgehalt. Die Prüfkörper wurden bei optimalem Wassergehalt mit Proctordichte im Proctorversuchsstand in 3 Schichten mit dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Mischvorgang und unter Berücksichtigung der Reaktionszeit hergestellt. Eine Verbindung zwischen den einzelnen Schichten

wurde durch Aufrauen des Materials sichergestellt. Die eigentlichen Probekörper wurden im Anschluss mit einem geführten Ausstechzylinder entnommen. Die Abmessungen der Prüfkörper betragen in der Höhe 100 mm und im Durchmesser 50 mm. Im Anschluss erfolgte die Lagerung der Probekörper im Feuchtraum bis zum jeweiligen Prüfzeitpunkt.

Vor der Versuchsdurchführung wurde die Probe im Versuchsstand bei einem Sättigungsdruck von 500 kN/m² gesättigt. Die Versuchsdurchführung erfolgte weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit von ca. 0,05 mm/min unter undrainierten Randbedingungen. Während des Versuchs wurden die Vertikalverformung samt zugehöriger Kraft und die erzeugten Porenwasserdrücke gemessen und dokumentiert.

5 Untersuchung der Eigenschaften der Ausgangsböden

5.1 Klassifikationsversuche Boden 1 (TL)

Der Ausgangsboden 1 (TL) wurde am Ortsrand Rothenstein südlich von Jena im Zuge einer vorhandenen Straßenbaustelle oberflächennah aus dem Anstehendem entnommen. Der Boden kann regionalgeologisch dem Hang-/Gehängelehm zugeordnet werden. Der Boden wurde per Hand als Schluff, stark sandig, schwach tonig bis tonig spezifiziert. Es wurden die Klassifizierungsversuche gemäß Kapitel 3 durchgeführt.

Die in der Tabelle 3 enthaltenen Ergebnisse dienen der Erfassung der Eigenschaften des Ausgangs-

Laborversuch	Versuchsergebnis	Zugehörige Anlage
Nat. Wassergehalt	im Mittel: 5,9 %	A 1.1
Organischer Bestandteil	im Mittel: 3,0 %	
Korndichte	2,64 g/cm ³	
Kornverteilung	Sand (40 % – 45 %), Schluff (36 % – 42 %), Ton (12 % – 17 %), Kies (2 % – 3 %) (s. Bild 7)	
Zustandsgrenzen	w _L = 28,9 %, w _P = 12,7 %, I _P = 16,3 % (s. Bild 8)	
Proctorversuch	ρ _{Pr} = 1,958 g/cm ³ , w _{Pr} = 10,3 % (s. Bild 9)	
Einaxialer Druckversuch	331,6 kN/m ² ... 349,7 kN/m ²	
Ödometerversuch mit 7 Laststufen	s. Bild 10	
CBR, statisch	25,6 % ... 26,4 %	
CBR, dynamisch	29,0 % ... 31,0 %	
Triaxialversuch	φ' = 32,5°, c' = 24,0 kN/m ²	

Tab. 3: Boden 1 (TL) – Ergebnisse der Klassifizierung

bodens, um die Entwicklung der jeweiligen Eigenschaften unter Bindemittelzugabe in den Kapiteln 6.1 bis 6.6 beschreiben und quantifizieren zu können. Auf eine detaillierte Beschreibung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Aufgrund der Kornverteilung (Bild 7) und der Zustandsgrenzen (Bild 8) wird Boden 1 der Boden-
gruppe TL gemäß DIN 18196 [14] zugeordnet. Die Versuchsergebnisse des Glühverlusts bescheini-

gen Boden 1 einen mittleren organischen Bestandteil von 3,0 %. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es bei der Ermittlung des Glühverlusts teilweise auch zu einem Verlust von Kalk oder in den Tonmineralen gebundenem Wasser gekommen ist, so dass unter Umständen nicht der gesamte Gewichtsverlust auf organisches Material zurückzuführen ist. Zusätzliche Untersuchungen hierzu wurden nicht durchgeführt.

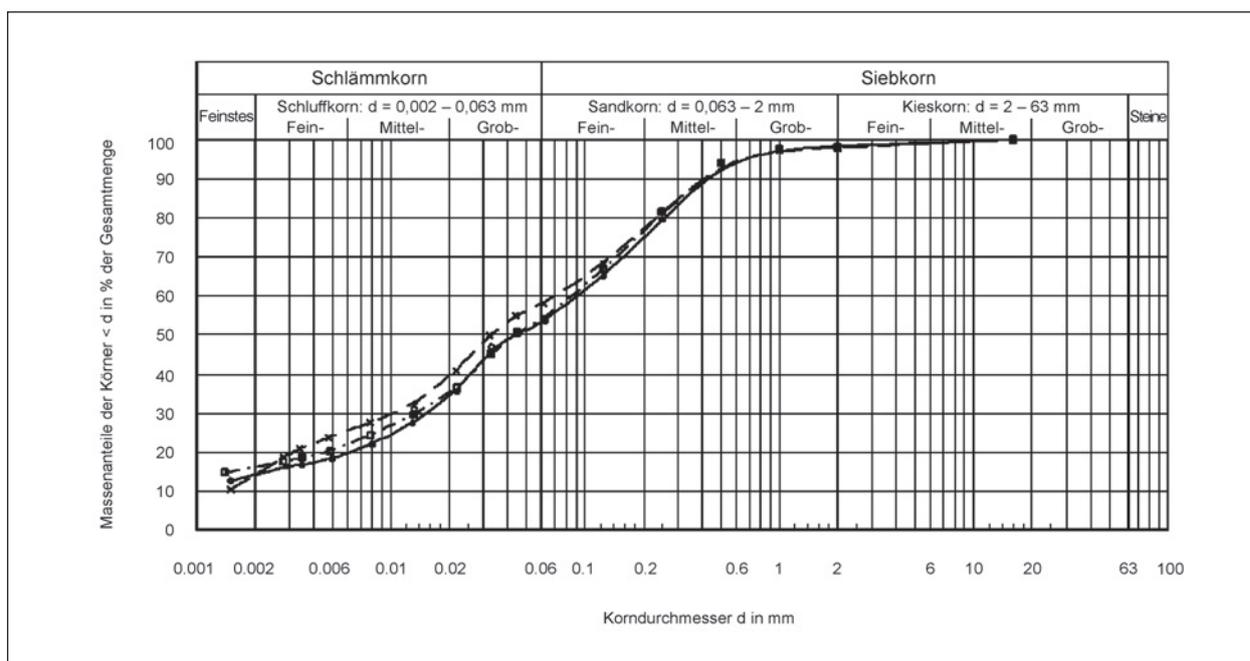


Bild 7: Kornverteilung von Ausgangsboden 1 (TL)

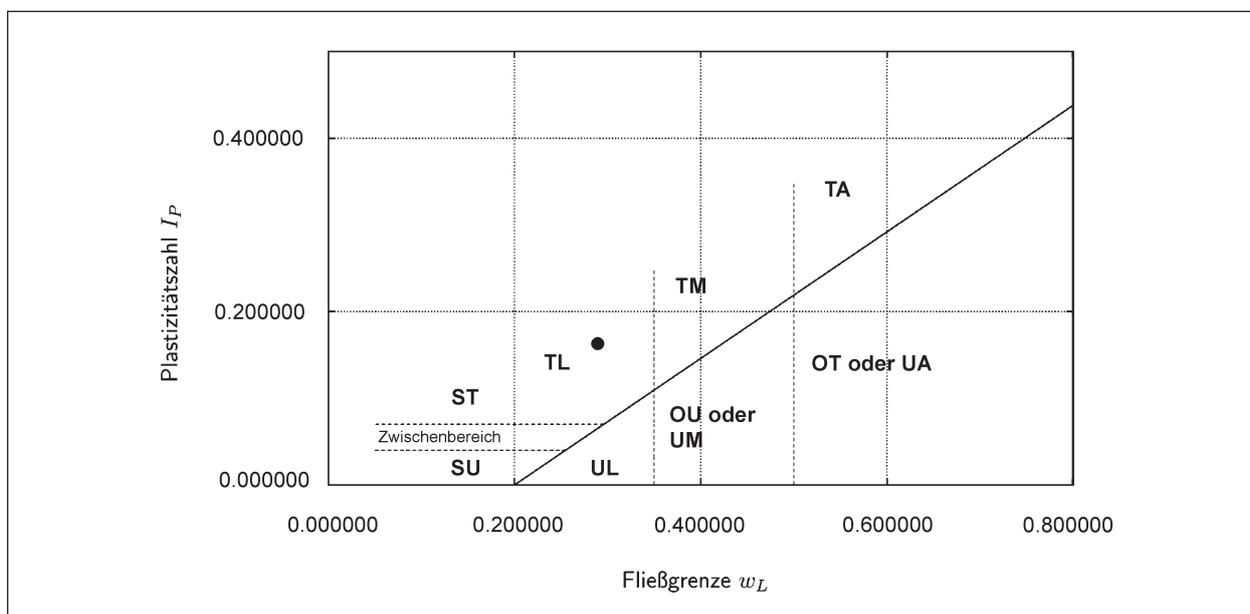


Bild 8: Plastizitätsdiagramm von Ausgangsboden 1 (TL)

In Bild 9 ist das Ergebnis des Proctorversuchs mit der erreichten Trockendichte über dem zugehörigen Wassergehalt dargestellt. Die in Tabelle 3 enthaltene Proctordichte und der optimale Wassergehalt entsprechend dem Hochpunkt der hier dargestellten Kurve „TL“. Der horizontale Abstand der Kurve „TL“ zur Sättigungslinie „Sr = 1“ ist ein Maß für den Luftporenanteil innerhalb der Probe.

Auffallend ist die große Streuung der in Bild 10 dargestellten Versuchsergebnisse. Zugehörigen

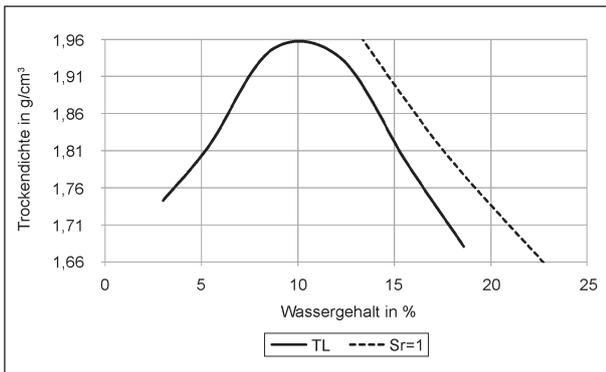


Bild 9: Proctorkurve und Sättigungslinie von Ausgangsboden 1 (TL)

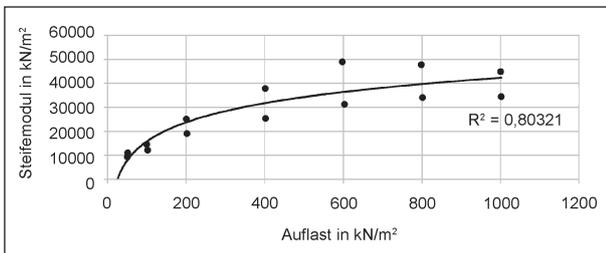


Bild 10: Ergebnisse des Ödometersversuchs an Ausgangsboden 1 (TL)

Laborprotokolle (A 1.1) zeigen jedoch quasi identische Ein- und Ausbaubedingungen zwischen den beiden Versuchsreihen. Eine logarithmische Approximationskurve weist ein Bestimmtheitsmaß von 80 % auf. Auch die Abnahme der Steifemodule einer Versuchsreihe ab einer Auflast von 800 kN/m² konnte nicht geklärt werden und wird auf Streuungen zurückgeführt.

Fazit

Die Bodengruppe entspricht den für das Forschungsvorhaben relevanten Böden und wurde abstimmungsgemäß für umfangreiche Laboruntersuchungen mit den gewählten Bindemitteln gemäß Kapitel 3 verwendet.

5.2 Klassifikationsversuche Boden 2 (ST*)

Der Ausgangsboden 2 (ST*) wurde von einer Baustoffhofhalde in Heidenau entnommen. Der Boden ist somit anthropogen beeinflusst. Der Boden wurde per Hand als Sand, stark schluffig, schwach kiesig, schwach tonig spezifiziert. Die Klassifizierungsversuche wurden gemäß Kapitel 3 durchgeführt.

Die in Tabelle 4 enthaltenen Ergebnisse dienen der Erfassung der Eigenschaften des Ausgangsbodens, um die Entwicklung der jeweiligen Eigenschaften unter Bindemittelzugabe in den Kapiteln 6.1 bis 6.6 beschreiben und quantifizieren zu können. Auf eine detaillierte Beschreibung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Laborversuch	Versuchsergebnis	Zugehörige Anlage
Nat. Wassergehalt	im Mittel: 12,2 %	A 1.2
Organischer Bestandteil	im Mittel: 1,6 %	
Korndichte	2,66 g/cm ³	
Kornverteilung	Sand (57 % – 58 %), Schluff (26 % – 29 %), Kies (8 % – 10 %), Ton (5 % – 6 %), (s. Bild 11)	
Zustandsgrenzen	w _L = 23,9 %, w _P = 12,4 %, I _P = 11,5 % (s. Bild 12)	
Proctorversuch	ρ _{Pr} = 2,004 g/cm ³ , w _{Pr} = 9,2 % (s. Bild 13)	
Einaxialer Druckversuch	160,3 kN/m ² ... 190,5 kN/m ²	
Ödometersversuch mit 6 Laststufen	s. Bild 14	
CBR, statisch	34,1 % ... 39,1 %	
CBR, dynamisch	41,0 % ... 43,0 %	
Triaxialversuch	φ' = 37,5°, c' = 5,0 kN/m ²	

Tab. 4: Boden 2 (ST*) – Ergebnisse der Klassifizierung

Aufgrund der Kornverteilung (Bild 11) und der Zustandsgrenzen (Bild 12) wird Boden 2 der Bodengruppe ST* gemäß DIN 18196 [14] zugeordnet. Die Bestimmung der Zustandsgrenzen dient der Einordnung der Eigenschaften der Körnung $\leq 0,4$ mm. Diese entsprechen den plastischen Eigenschaften eines leichtplastischen Tons.

Die Versuchsergebnisse des Glühverlusts bescheinigen Boden 2 (ST*) einen mittleren organischen Bestandteil von 1,6 %.

In Bild 13 ist das Ergebnis des Proctorversuchs mit der erreichten Trockendichte über dem zugehörigen Wassergehalt dargestellt. Die in Tabelle 4 enthaltene Proctordichte und der optimale Wassergehalt entsprechend dem Hochpunkt der hier dargestellten Kurve „ST*“. Der horizontale Abstand der Kurve „ST*“ zur Sättigungslinie „ $S_r = 1$ “ ist ein Maß für den Luftporenanteil innerhalb der Probe.

Auch bei den in Bild 14 dargestellten Versuchsergebnissen wird mit zunehmender Auflast eine

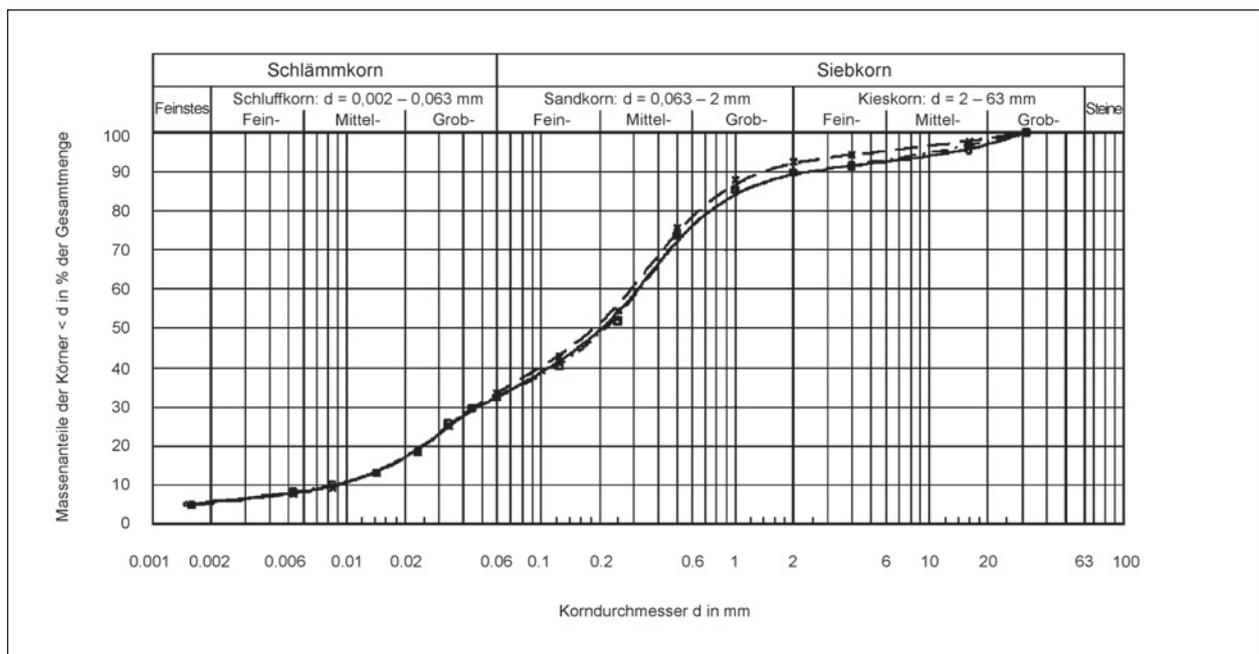


Bild 11: Kornverteilung von Ausgangsboden 2 (ST*)

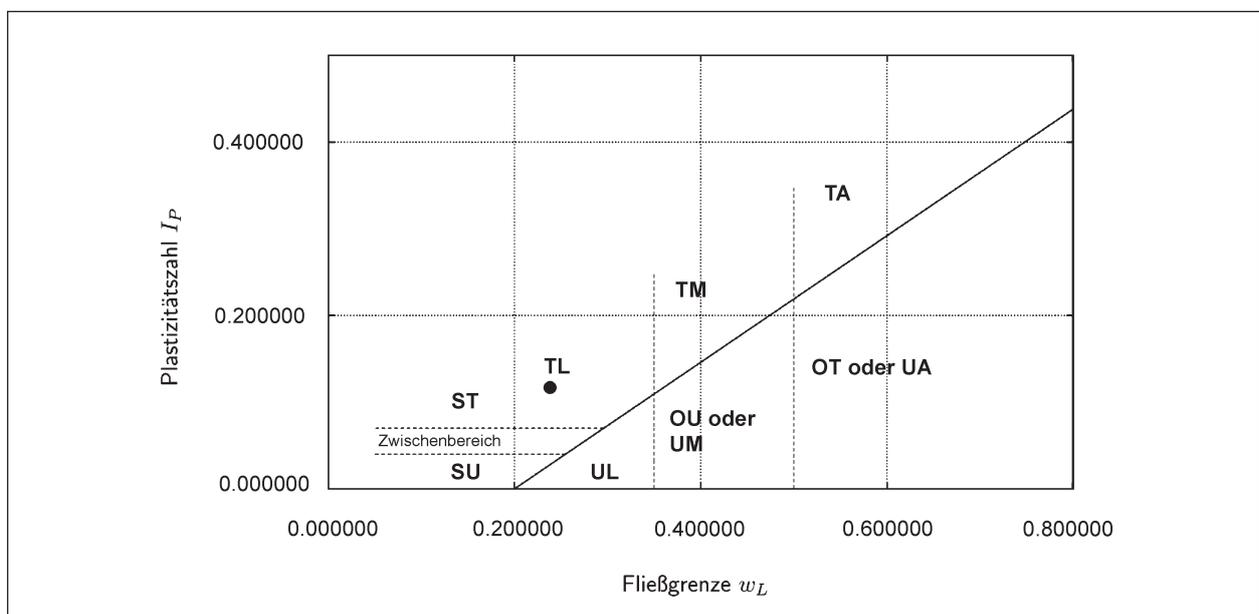


Bild 12: Plastizitätsdiagramm von Ausgangsboden 2 (ST*)

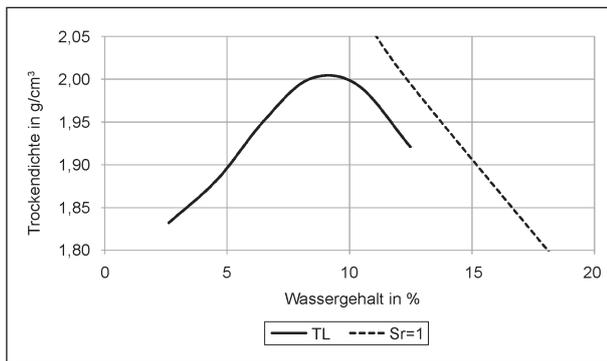


Bild 13: Proctorkurve und Sättigungslinie von Ausgangsboden 2 (ST*)

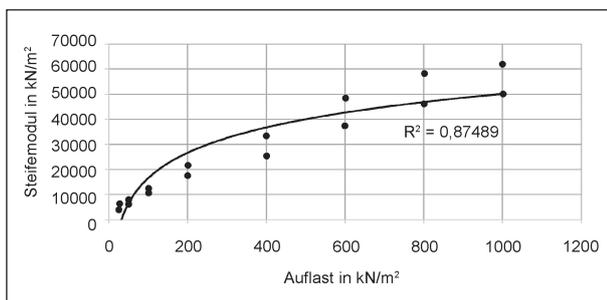


Bild 14: Ergebnisse des Ödometersversuchs an Ausgangsboden 2 (ST*)

größere Streuung festgestellt. Die logarithmische Approximationskurve weist ein Bestimmtheitsmaß von 87 % auf.

Fazit

Die Bodengruppe entspricht den für das Forschungsvorhaben relevanten Böden und wurde abstimmungsgemäß für umfangreiche Laboruntersuchungen mit den gewählten Bindemitteln gemäß Kapitel 3 verwendet.

6 Untersuchung der Eigenschaften der Boden-Bindemittel-Gemische

6.1 Zustandsgrenzen

Die Protokolle zur Bestimmung der Zustandsgrenzen der Boden-Bindemittel-Gemische mit Ausgangsboden 1 (TL) befinden sich in A 2.1. Die Protokolle zu Ausgangsboden 2 (ST*) befinden sich in A 3.1.

In Bild 15 ist die Entwicklung der Plastizitätsgrenzen des Ausgangsbodens 1 bei Hinzugabe der ge-

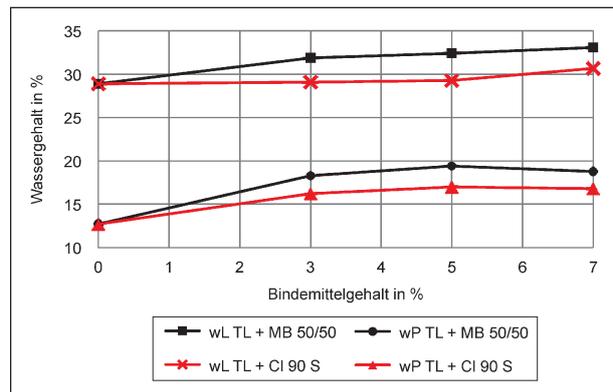


Bild 15: Entwicklung der Plastizitätsgrenzen der Boden-Bindemittel-Gemische mit Boden 1 (TL)

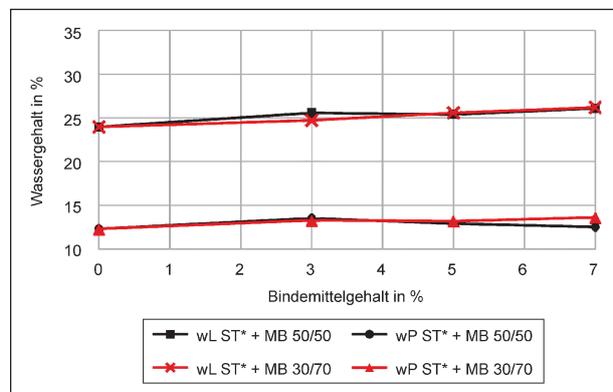


Bild 16: Entwicklung der Plastizitätsgrenzen der Boden-Bindemittel-Gemische mit Boden 2 (ST*)

wählten Bindemittel in Abhängigkeit des Bindemittelgehaltes dargestellt.

Es zeigt sich, dass sowohl die Fließgrenze w_L als auch die Ausrollgrenze w_P des Boden-Bindemittelgemisches einen erhöhten Wassergehalt gegenüber dem Ausgangsboden 1 (TL) aufweist. Dabei wird der Plastizitätsbereich des Bodens 1 (TL) geringfügig geringer. Der Einfluss des Mischbindemittels mit 50 % Kalk und 50 % Zement ist dabei größer als der des reinen Kalkes. Auch der bindemittelgehaltsabhängige Anstieg der Fließ- und Ausrollgrenze ist bei dem Mischbindemittel größer.

Die Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass die Auswirkungen des Zementes auf die Veränderung der Plastizitätseigenschaften größer sind als die des Weißkalkhydrates.

Der Plastizitätsbereich des Bodens 2 bleibt unter Zugabe der Mischbindemittel 50/50 und 30/70 nahezu unverändert (s. Bild 16).

6.2 Proctorversuche

Die Protokolle der Proctorversuche an den Boden-Bindemittel-Gemischen mit Ausgangsboden 1 (TL) sind in A 2.2 enthalten. Die Protokolle mit Ausgangsboden 2 (ST*) sind in A 3.2 enthalten.

Die Ergebnisse je Ausgangsboden sind in Tabelle 5 bzw. Tabelle 6 zusammengefasst. Die Beschreibung der Feststellungen erfolgt anhand von Bild 17 bis Bild 20, in denen die Entwicklung der Proctordichte und des für die Verdichtung optimalen Wassergehaltes bei den jeweiligen Boden-Bindemittel-Gemischen dargestellt ist. Die dargestellten Wassergehalte sind nach der Versuchsdurchführung bestimmt worden.

Es wird deutlich, dass die Zugabe von kalkhaltigem Bindemittel eine Reduktion der Proctordichte bei gleichzeitiger Erhöhung des optimalen Wassergehaltes zur Folge hat, wie dies bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben wurde. Bei reinem Kalkhydrat ist dieser Effekt am deutlichsten (s. Bild 17). Bei Zugabe des Mischbindemittels tritt diese Tendenz ebenfalls, jedoch in abgeschwächter Form, auf.

Die deutlichste Reduktion findet mit beiden Bindemitteln an beiden Ausgangsböden bereits bei einer Zugabe von 3 % statt. Eine weitere Erhöhung des Bindemittelgehaltes wirkt sich in weitaus geringerem Maße auf die Proctordichte und den optimalen

Parameter	TL	TL mit CL 90 S			TL mit MB 50/50		
		3 %	5 %	7 %	3 %	5 %	7 %
Wassergehalt w_{Pr} [%]	10,25	14,76	15,11	16,04	15,33	15,61	15,89
Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]	1,958	1,828	1,812	1,781	1,828	1,826	1,813

Tab. 5: Proctorwerte an Boden-Bindemittel-Gemischen – Boden 1 (TL)

Parameter	ST*	ST* mit MB 50/50			ST* mit MB 30/70		
		3 %	5 %	7 %	3 %	5 %	7 %
Wassergehalt w_{Pr} [%]	9,15	11,56	11,75	11,61	11,46	11,49	11,53
Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]	2,004	1,963	1,937	1,936	1,966	1,954	1,950

Tab. 6: Proctorwerte an Boden-Bindemittel-Gemischen – Boden 2 (ST*)

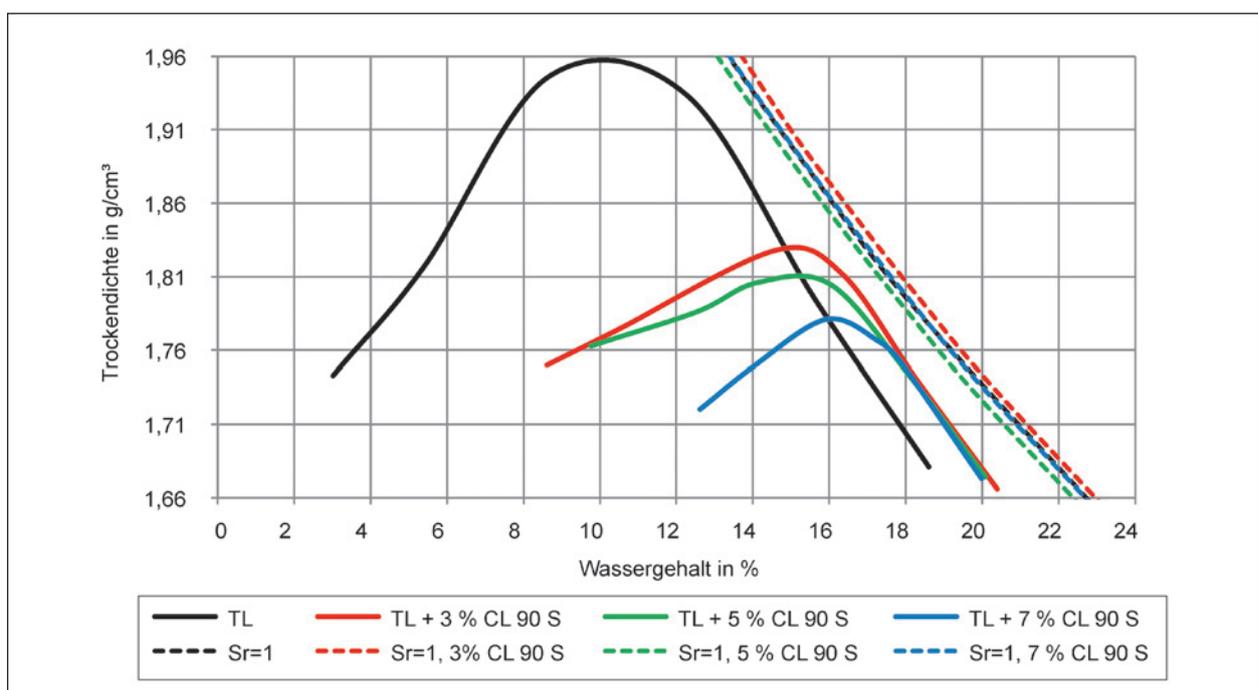


Bild 17: Proctorkurven und Sättigungslinien von Boden 1 (TL) mit CL 90 S

Wassergehalt aus, wie auch in [31] festgestellt wurde. Je größer der Zementanteil im Bindemittel desto geringer sind die Auswirkungen, wie anhand

der erreichten Proctordichten in Tabelle 6 erkennbar ist.

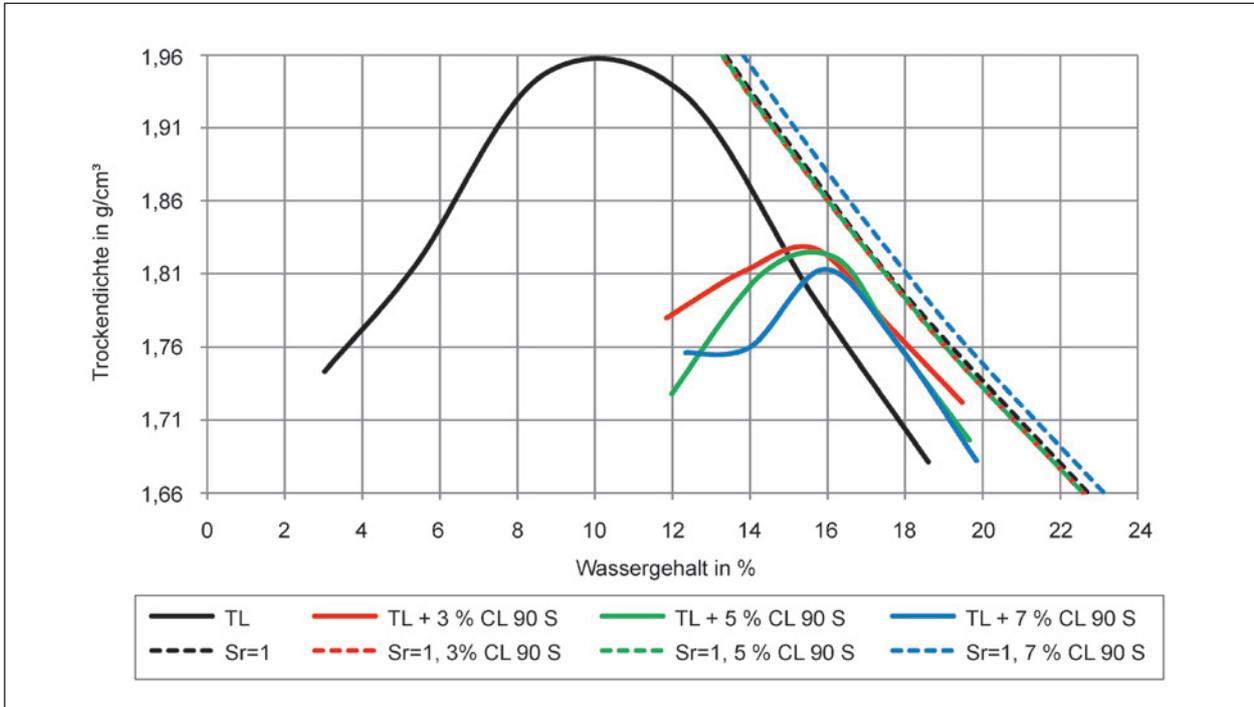


Bild 18: Proctorkurven und Sättigungslinien von Boden 1 (TL) mit Mischbindemittel 50/50

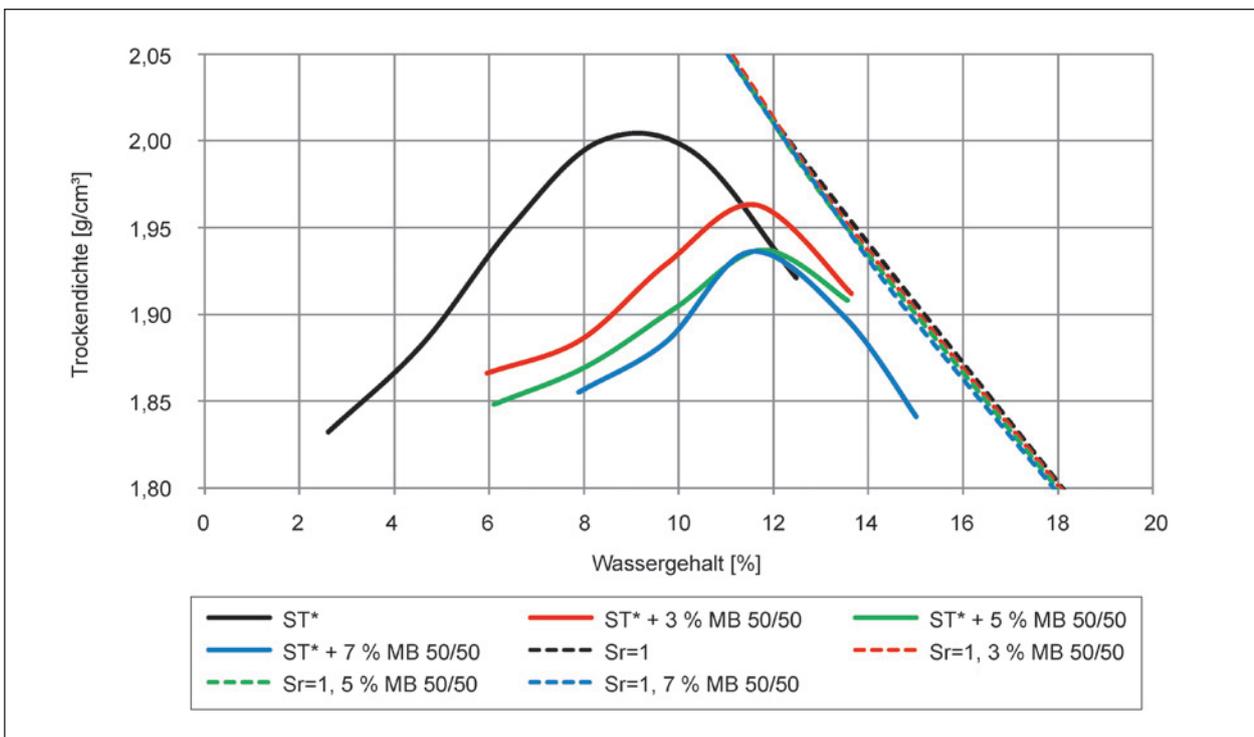


Bild 19: Proctorkurven und Sättigungslinien von Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 50/50

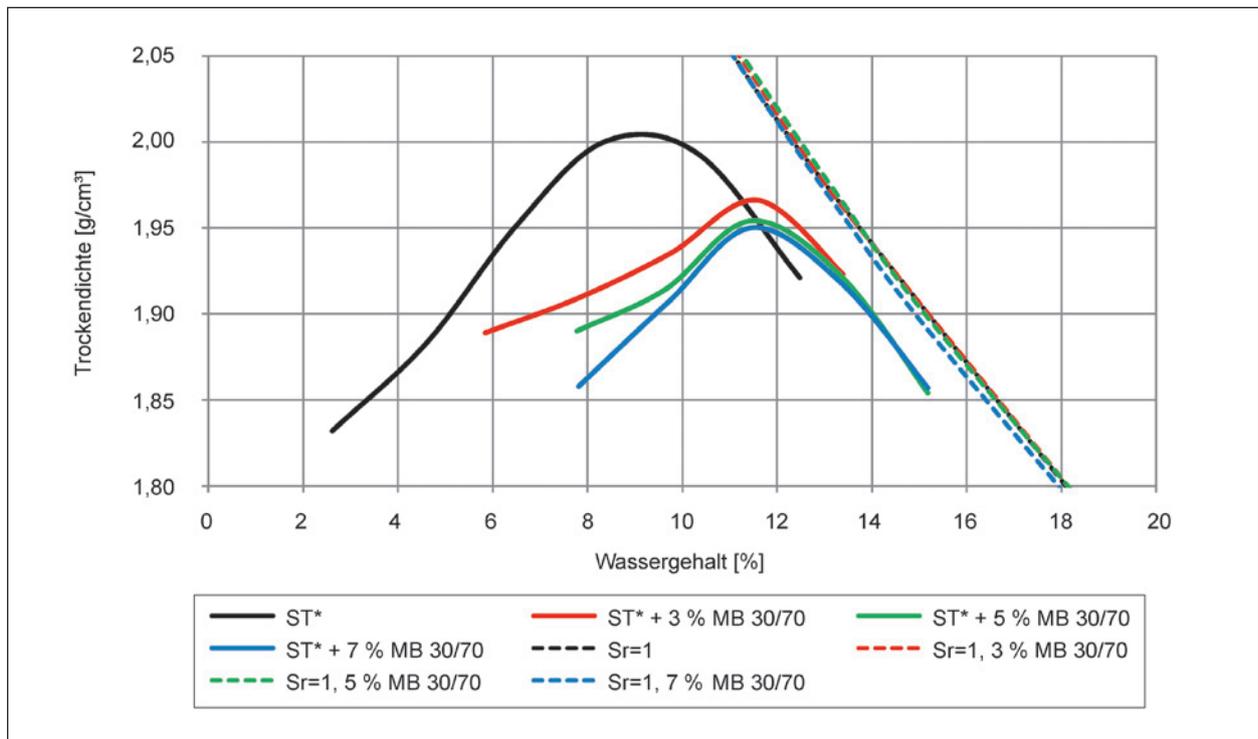


Bild 20: Proctorkurven und Sättigungslinien von Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 30/70

6.3 California Bearing Ratio (CBR)

Statische CBR-Versuche

Die Versuchsergebnisse der statischen CBR-Versuche an den Boden-Bindemittel-Gemischen mit Ausgangsboden 1 (TL) sind in A 2.3 enthalten. Die Versuchsergebnisse auf Basis von Ausgangsboden 2 (ST*) sind in A 3.3 dokumentiert.

Die Ergebnisse der an Ausgangsboden 1 (TL) und den darauf basierenden Boden-Bindemittel-Gemischen durchgeführten statischen CBR-Versuche mit dem Bindemittel CL 90 S sind in Bild 21 enthalten.

Die Zugabe von reinem Weißkalkhydrat bewirkt eine Festigkeitssteigerung bzw. hier eine Erhöhung des CBR-Wertes gegenüber dem Ausgangsboden 1 (TL). Nach der anfänglichen Erhöhung des CBR-Wertes durch die Bindemittelzugabe nach 7 Tagen wurde mit den Proben nach 28 Tagen Lagerung zumeist keine weitere Festigkeitssteigerung erreicht. Unabhängig vom Bindemittelgehalt, Lagerungszeit und Wasserlagerung bewegen sich die CBR-Werte zwischen ca. 40 % und ca. 80 %. Über die Zeit und nach Wasserlagerung wurden sowohl

Zunahmen als auch Abnahmen des CBR-Wertes festgestellt. Dies resultiert aus einer großen relativen Streuung der Ergebnisse. Eine bindemittel- oder zeitabhängige Festigkeitsentwicklung ist so nicht feststellbar.

Dies entspricht auch den Feststellungen von KRAJEWSKI, KUHL, 2005 [31], wonach mit dem auch hier verwendeten Weißkalkhydrat CL 90 S mit einem Boden der Bodengruppe TL/UL erst ab 6 Monaten überhaupt eine signifikante Erhöhung des CBR-Wertes festgestellt werden konnte. Auch hier entsprechen die CBR-Werte der Prüfkörper mit Wasserlagerung denen der Prüfkörper ohne Wasserlagerung bzw. sind teilweise größer. Eine bindemittelgehalt-abhängige Steigerung des CBR-Wertes wurde erst mit Probekörpern mit einer Lagerungszeit ab 6 Monaten festgestellt.

Die untersuchten Probekörper der Boden-Bindemittel-Gemische mit Zementanteil weisen ein Vielfaches der Festigkeit des jeweiligen Ausgangsbodens auf. Sowohl die Bindemittel- als auch die zeitliche Abhängigkeit der Festigkeitsentwicklung weisen, trotz der bereits beschriebenen Streuung, teils deutliche Tendenzen auf, wie in Bild 22 bis Bild 24 erkennbar ist.

Auch hier kann teilweise eine Steigerung der Festigkeit nach Wasserlagerung festgestellt werden. Bei der Überprüfung der Ergebnisse wurde festgestellt, dass mit Wasserlagerung keine wesentliche Erhöhung des Wassergehaltes innerhalb der Probe stattgefunden hat. Somit entspricht die Wasserlage-

rung lediglich einer Verlängerung der Lagerungszeit um 1 Tag. Dieser Einfluss ist jedoch geringer als die Varianz der Ergebnisse, wodurch eine Steigerung des CBR-Wertes im Wesentlichen der Streuung der Versuchsergebnisse zugeschrieben wird.

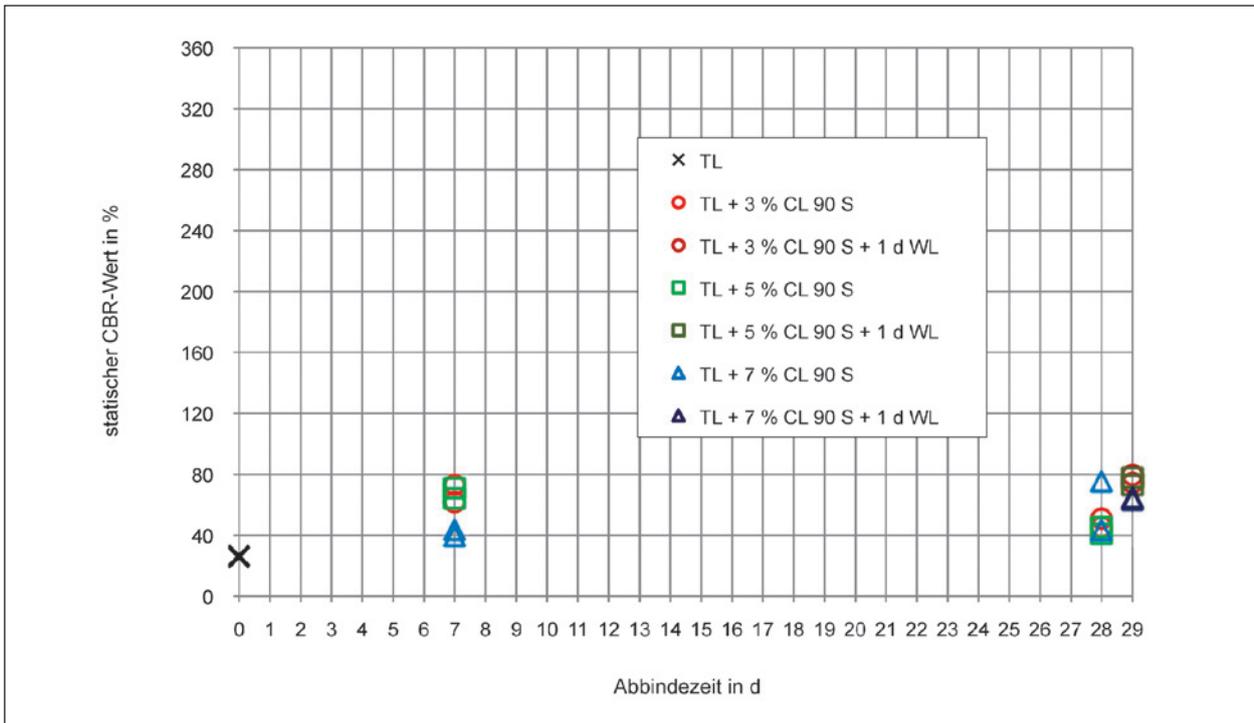


Bild 21: Statische CBR-Werte für Ausgangsboden 1 (TL) mit CL 90 S

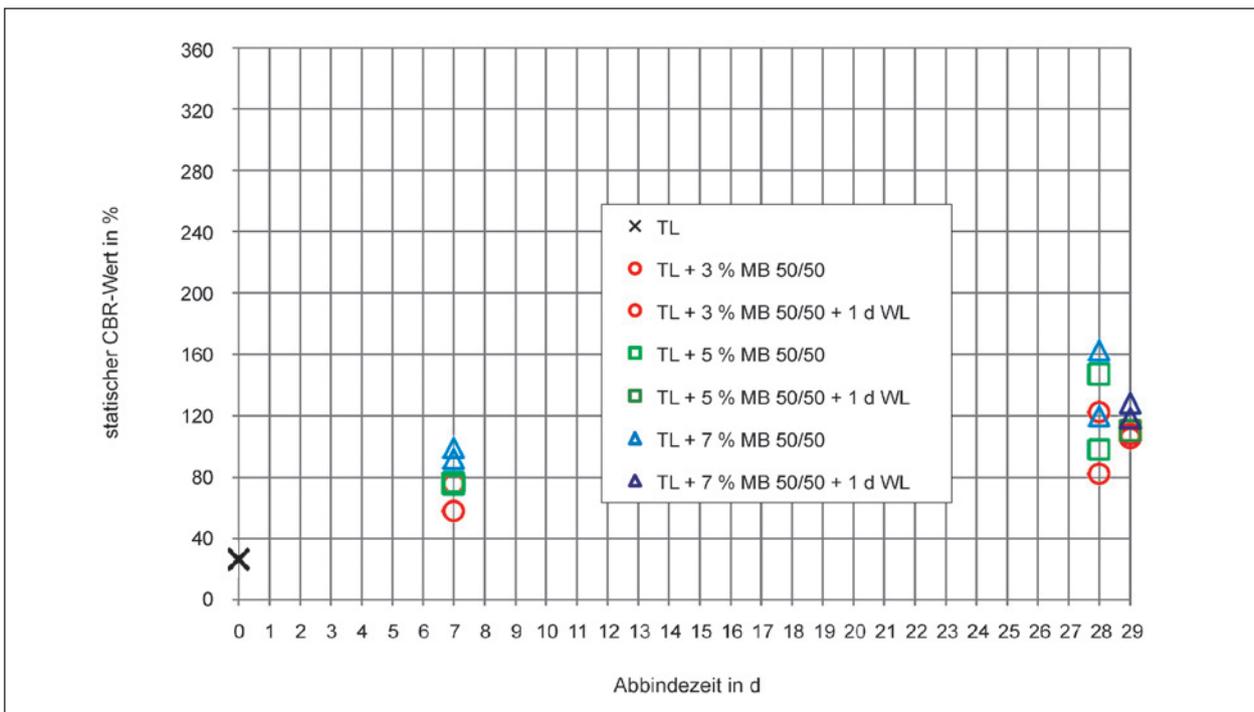


Bild 22: Statische CBR-Werte für Ausgangsboden 1 (TL) mit MB 50/50

Festzustellen ist jedoch auch, dass alle untersuchten Proben der beiden Ausgangsböden den Anforderungen der ZTV E-StB 09 [53] zur Verringerung der Frostempfindlichkeit wie in Kapitel 2.5 beschrieben entsprechen.

Dynamische CBR-Versuche

Die Versuchsergebnisse der dynamischen CBR-Versuche an den Boden-Bindemittel-Gemischen mit Ausgangsboden 1 (TL) sind in A 2.4 dokumen-

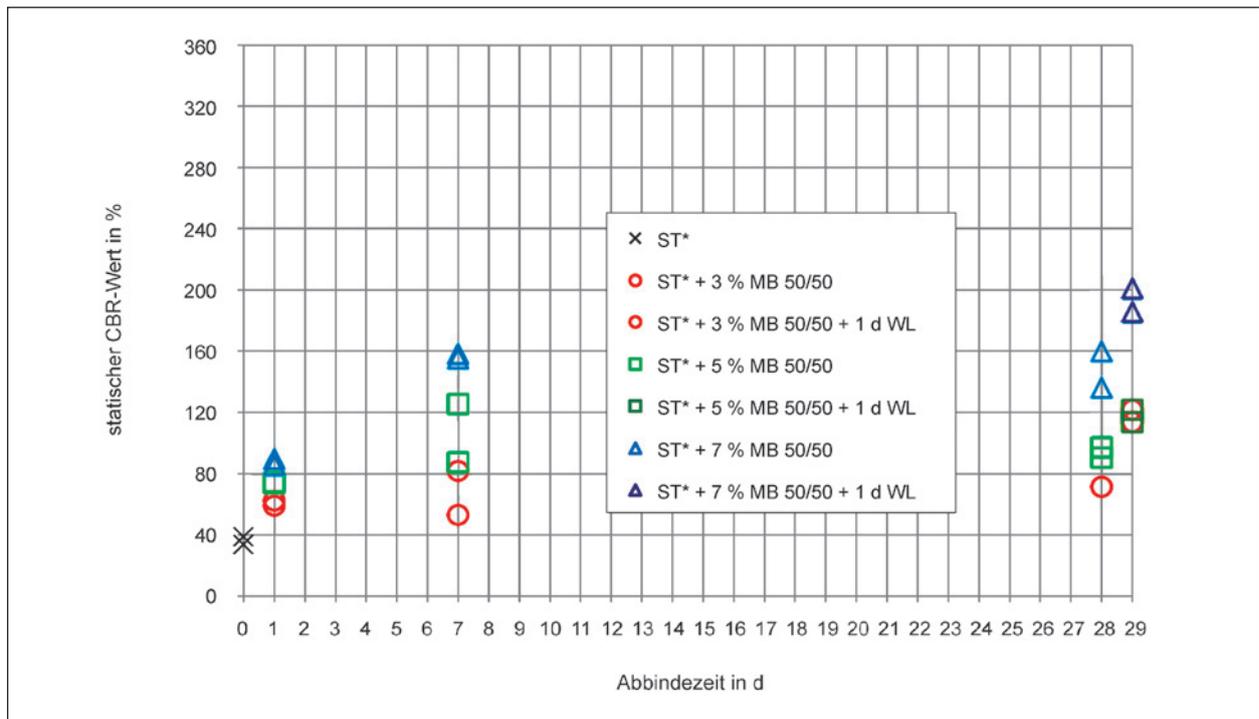


Bild 23: Statische CBR-Werte für Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 50/50

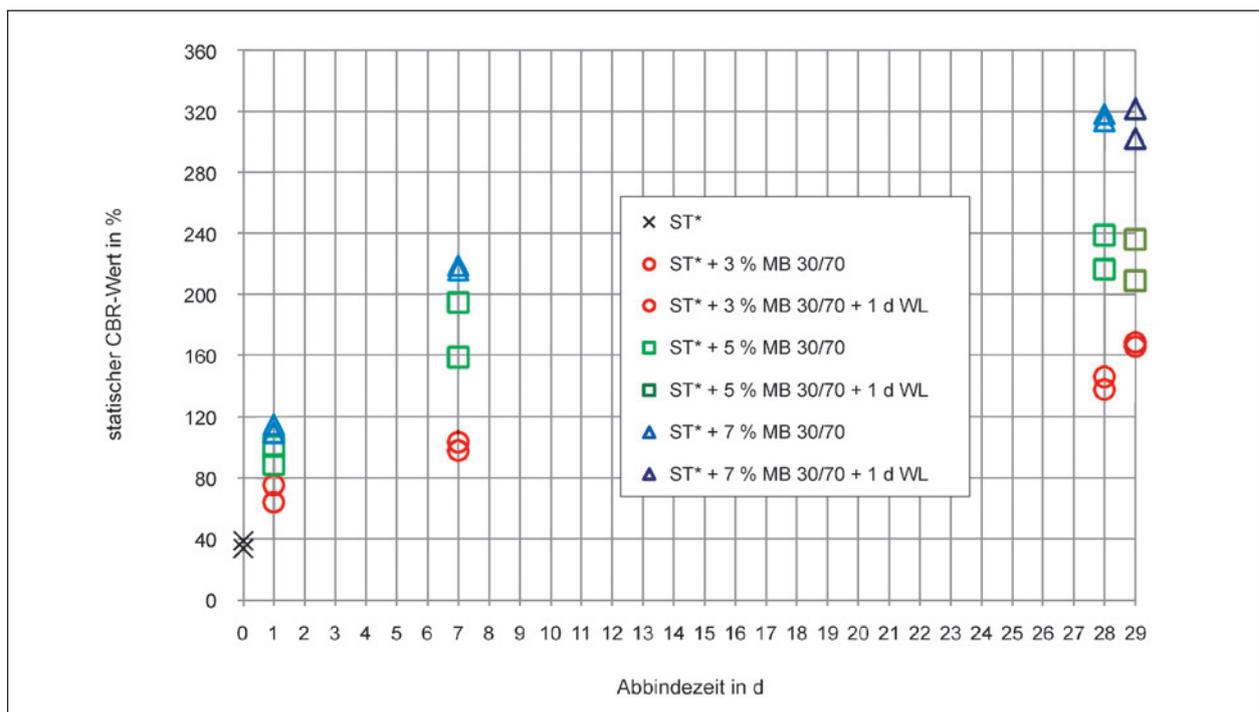


Bild 24: Statische CBR-Werte für Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 30/70

tiert. Die Protokolle mit Ausgangsboden 2 (ST*) sind in A 3.4 enthalten.

In Bild 25 sind die Ergebnisse der dynamischen CBR-Versuche mit Weißkalkhydrat dargestellt. Die Versuchsergebnisse zeigen im Vergleich zu den Versuchsergebnissen der statischen CBR-Versuche eine zeitliche Abhängigkeit bei der Festigkeits-

entwicklung. Auch in Bild 26 bis Bild 28 scheint eine Zeit- und Bindemittelgehaltabhängigkeit der Festigkeitsentwicklung zu bestehen.

Wie bereits bei den statischen CBR-Versuchen, wurde eine Zunahme der dynamischen CBR-Werte nach Wasserlagerung festgestellt. Dies ist, wie bereits beschrieben, der mangelnden Wasseraufnahme und

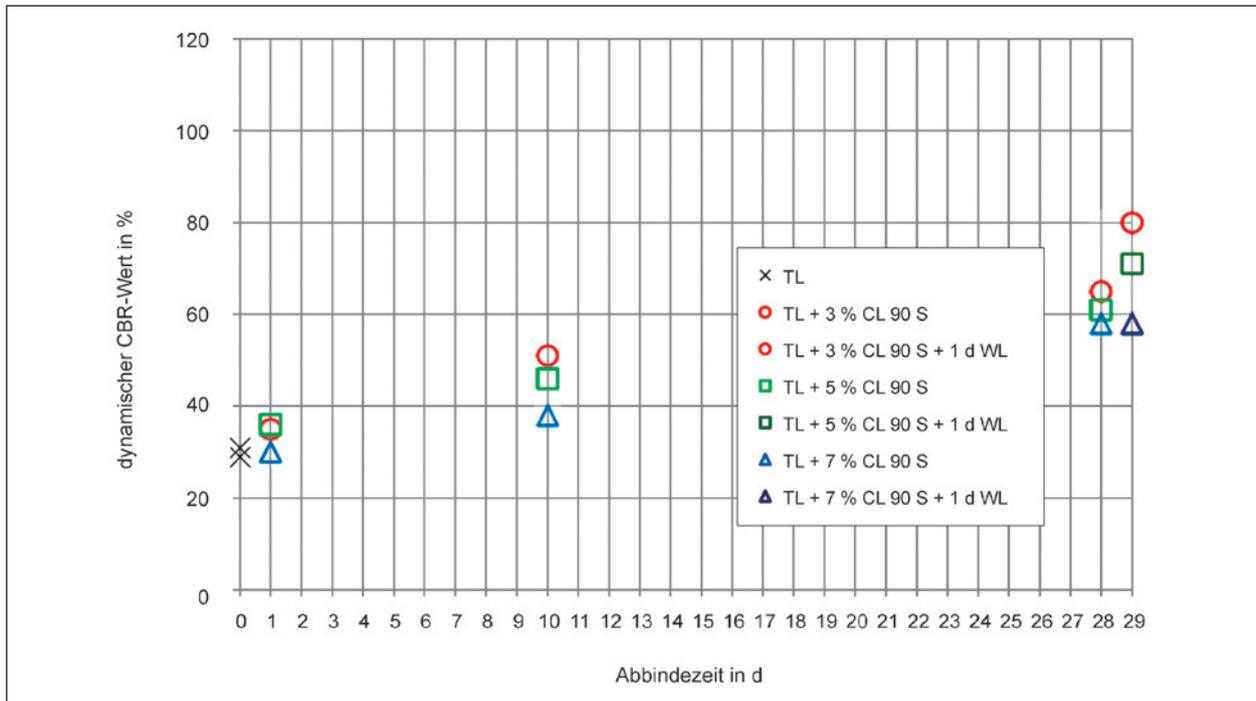


Bild 25: Entwicklung der dynamischen CBR-Werte von Boden 1 (TL) mit CL 90 S

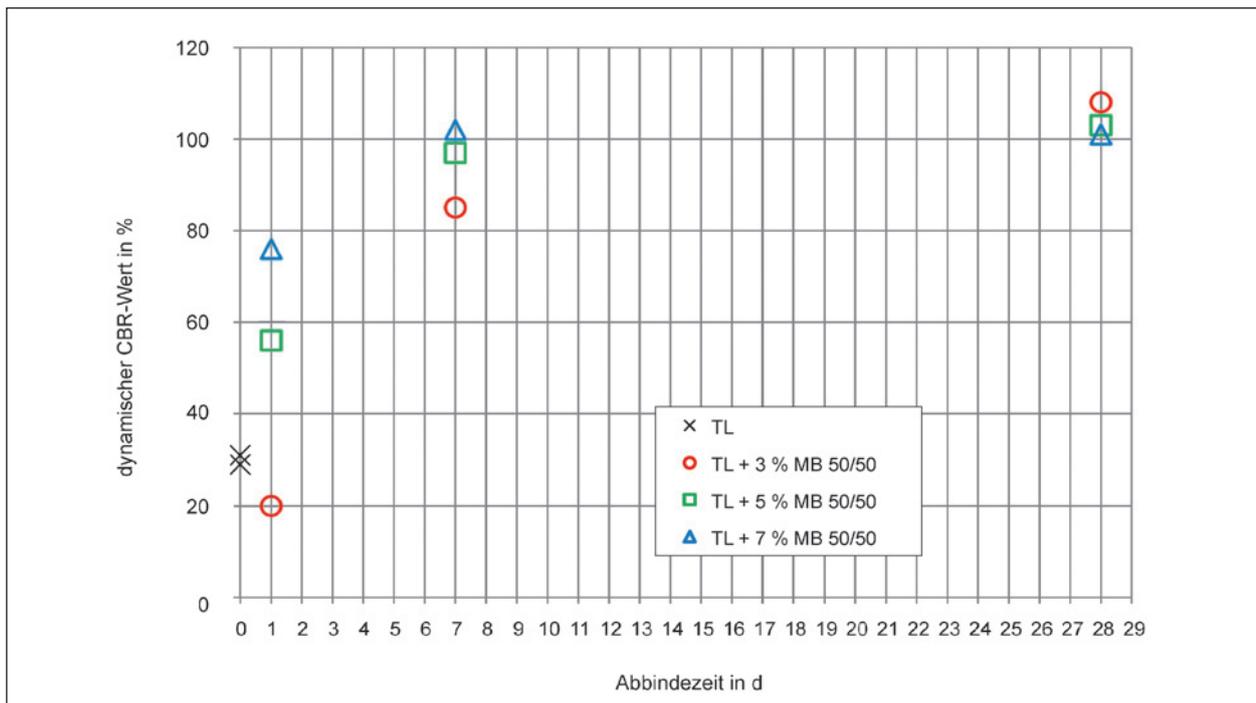


Bild 26: Entwicklung der dynamischen CBR-Werte von Boden 1 (TL) mit MB 50/50

daher der Streuung der Versuchsergebnisse zuzuschreiben. Dies trifft ebenfalls auf die Versuchsreihen zu, bei denen die dynamischen CBR-Werte (mit Bindemittel) nach 1 Tag Lagerung die des Ausgangsbodens, trotz ausreichender Einbaudichte, unterschritten haben. Dies wird als weiterer Indikator für die große Streuung der Versuchsergebnisse gewertet.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die quantitative Zunahme der dynamischen CBR-Versuchen geringer ist als bei den statischen CBR-Versuchen. Während die unterschiedlichen Versuchsorten an Boden 1 (TL) mit CL 90 S noch einheitliche Ergebnisse bis 80 % stat. CBR bzw. dyn. CBR liefern, steigen die dynamischen CBR-Werte auf

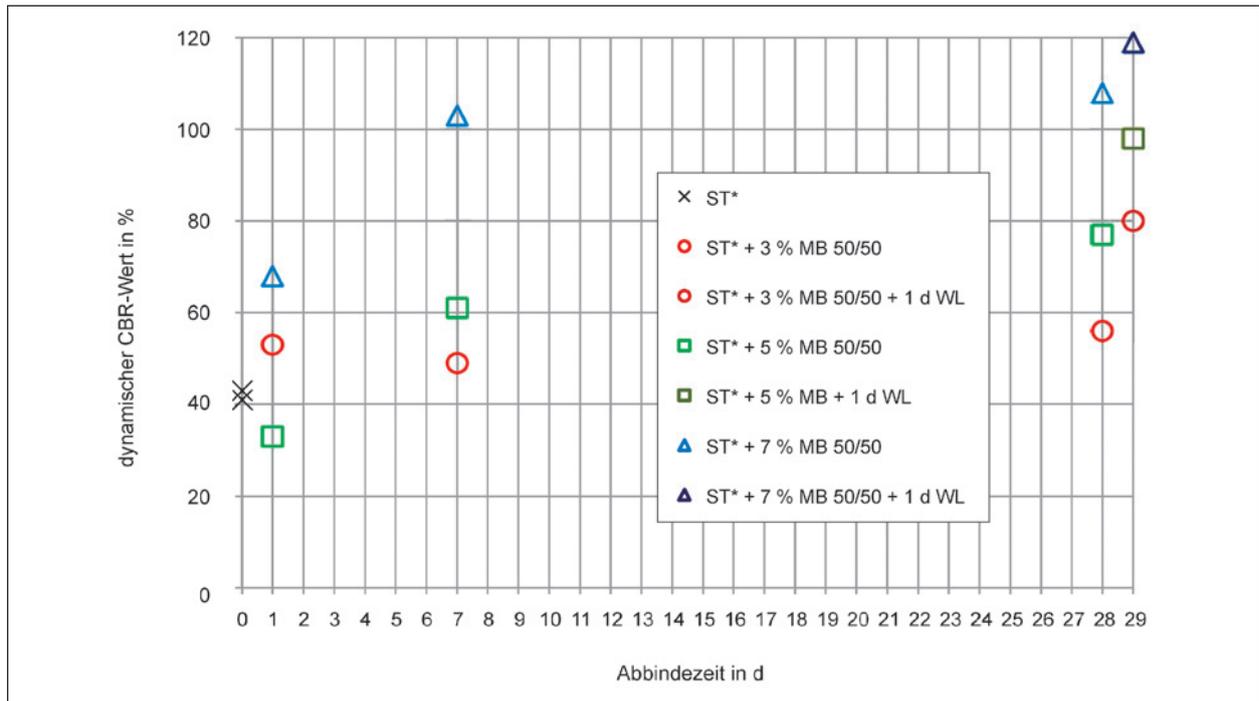


Bild 27: Entwicklung der dynamischen CBR-Werte von Boden 2 (ST*) mit MB 50/50

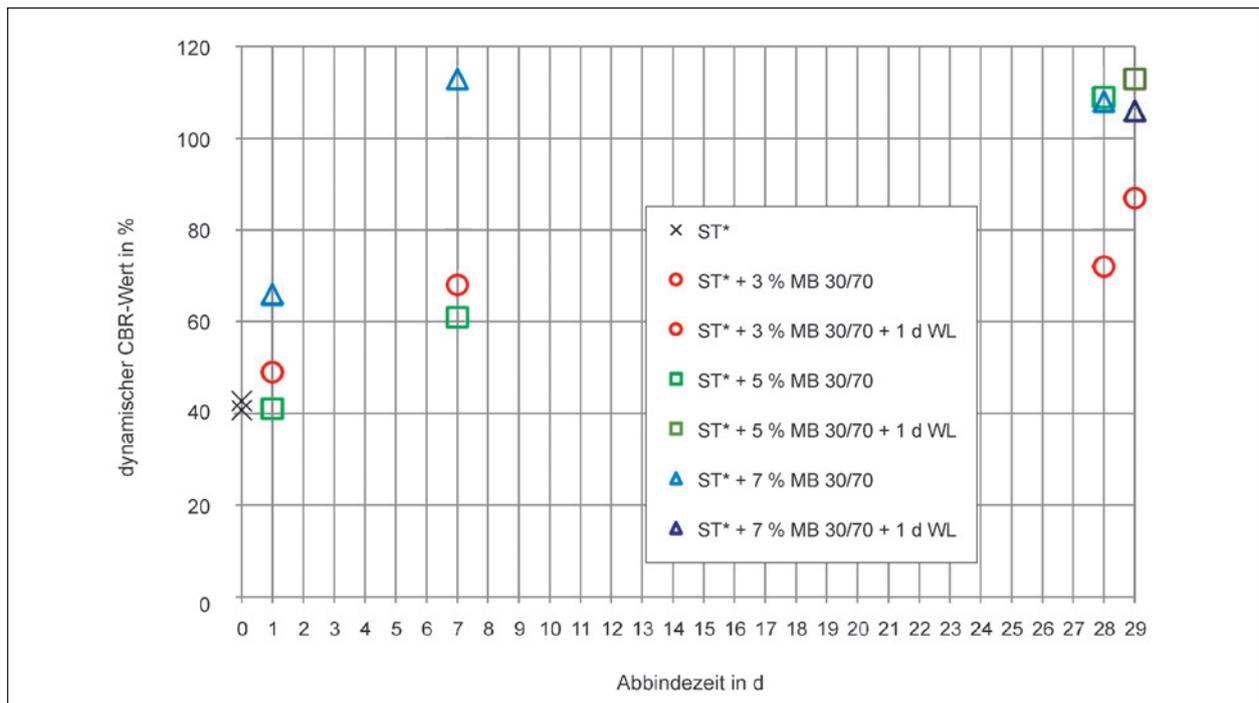


Bild 28: Entwicklung der dynamischen CBR-Werte von Boden 2 (ST*) mit MB 30/70

maximal 120 % an, während die statischen CBR-Werte einen Wert von 320 % erreichen. Daraus ergibt sich auch, dass bei den dynamischen CBR-Versuchen an den Boden-Bindemittel-Gemischen mit Boden 2 (ST*) zwischen den beiden verwendeten Bindemitteln kaum quantitative Unterschiede bei den Ergebnissen festgestellt werden können. Dagegen liefern die statischen CBR-Werte hier quantitative Differenzen mit einem Faktor von ca. 2.

6.4 Einaxiale Druckfestigkeit

Die Protokolle der einaxialen Druckversuche an den Boden-Bindemittel-Gemischen mit Ausgangsboden 1 (TL) befinden sich in A 2.3. Die Protokolle zu Ausgangsboden 2 (ST*) befinden sich in A 3.3.

In Bild 29 sind die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche des Boden-Bindemittel-Gemisches auf Basis von Ausgangsboden 1 (TL) mit Weißkalkhydrat dargestellt. Weiterhin sind die Druckfestigkeiten des Ausgangsbodens 1 ohne Bindemittel enthalten.

Besonders auffällig ist, dass Proben mit einem Bindemittelgehalt von 7 % mit einer Abbindezeit von 7 Tagen durchgehend geringere Festigkeiten aufweisen als die untersuchten Probekörper mit einer Abbindezeit von 1 Tag. Generell weisen die Beträge der erreichten Druckfestigkeiten mit unterschied-

lichen Bindemittelgehalten nur geringe Differenzen auf. Diese Tendenz wurde ebenfalls durch WITT, DAMASCHKE, 2013 [48] festgestellt. Der Einfluss der Streuung der durchgeführten einaxialen Druckversuche ist demnach größer als der der Festigkeitsentwicklung bei einer Bodenbehandlung mit Weißkalkhydrat, so dass bis zu einer Lagerungszeit von 7 Tagen keinen Tendenzen ableitbar sind. Die Entwicklung der Festigkeit mit zunehmender Abbindezeit ist erst ab 28 Tagen ersichtlich, jedoch sind keine bindemittelgehalts-abhängigen Entwicklungen feststellbar. Dies entspricht ebenfalls den Feststellungen aus den CBR-Versuchen gemäß Kapitel 6.3.

Die untersuchten Probekörper der Boden-Bindemittel-Gemische mit Zementanteil (s. Bild 30 bis Bild 32) weisen eine deutlich höhere Festigkeit im Vergleich zu den jeweiligen Ausgangsböden auf. Sowohl die Bindemittel- als auch die zeitliche Abhängigkeit der Festigkeitsentwicklung treten, bis auf einzelne Abweichungen deutlich hervor.

Bereits nach 1 Tag Lagerung weisen die Proben mit 7 % Bindemittelgehalt den größten und die Proben mit 3 % Bindemittelgehalt den geringsten Festigkeitszuwachs auf. Ab einem Probenalter von 7 Tagen steigt die Festigkeit immer noch weiter an, jedoch nicht mehr so stark. Dies spiegelt die in Kapitel 2.3.2 beschriebene Wirkungsweise von Zement wieder. Die Festigkeitsentwicklung mit dem

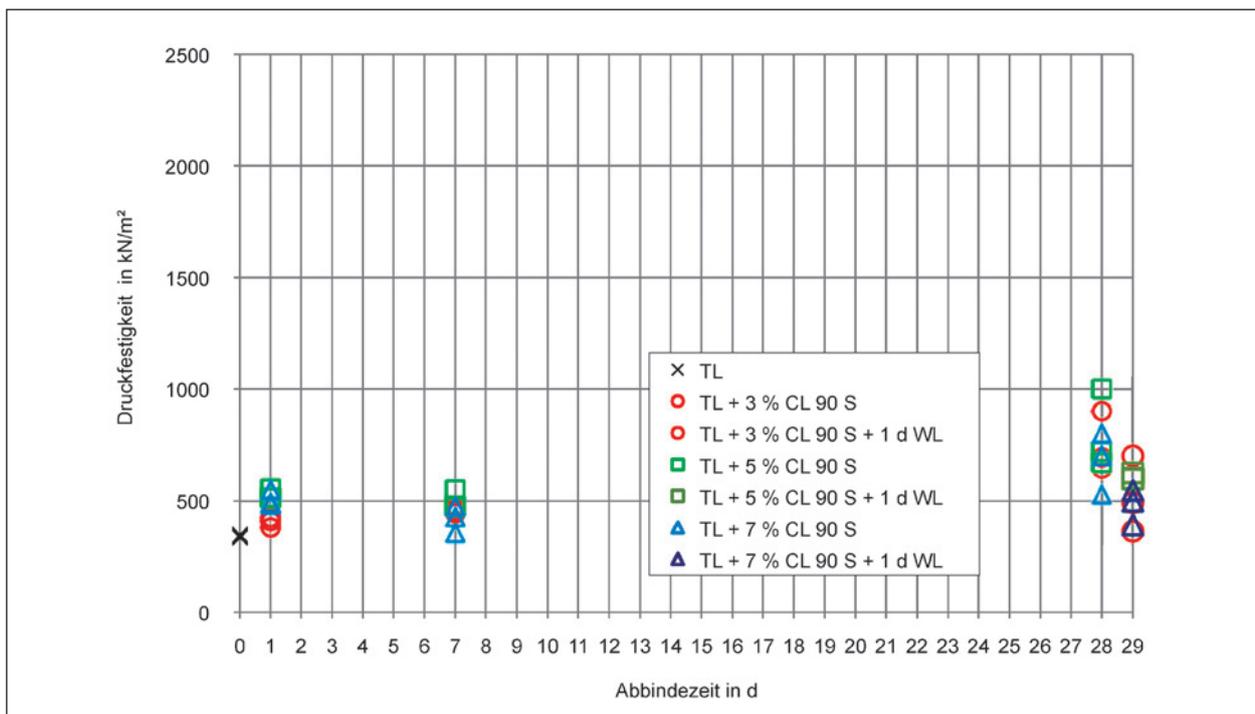


Bild 29: Einzelversuche zur einaxialen Druckfestigkeit von Boden 1 (TL) mit CL 90 S

Mischbindemittel 30/70 ist gegenüber dem Mischbindemittel 50/50 erwartungsgemäß deutlicher ausgeprägt.

Der Abfall der mittleren Druckfestigkeit nach 1 Tag Wasserlagerung entsprechend der Versuchsergebnisse an Ausgangsboden 1 (TL) in Tabelle 7 mit

dem Mischbindemittel 50/50 geringer als mit Weißkalkhydrat. Bei Ausgangsboden 2 (ST*) (Tabelle 8) ist der Festigkeitsabfall mit dem Bindemittel 30/70 geringer. Anhand der Ergebnisse ist bei höherem Zementanteil innerhalb der Probe mit einem geringeren Festigkeitsabfall nach Wasserlagerung zu rechnen.

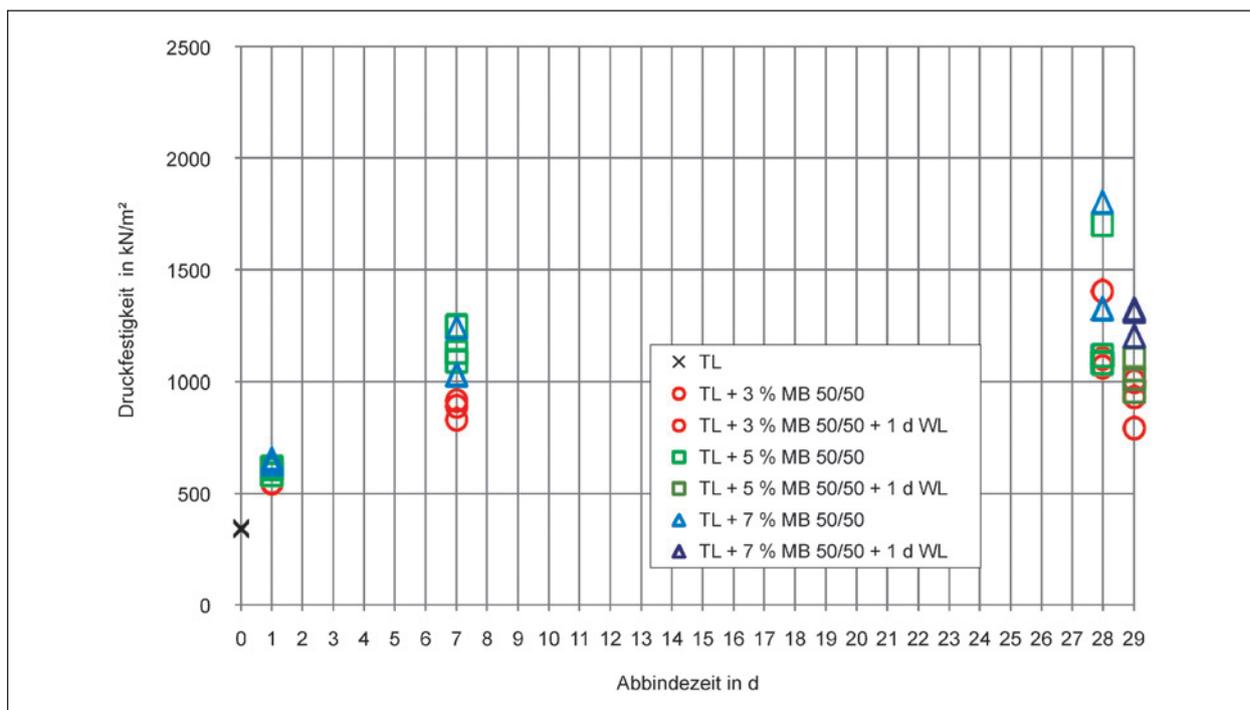


Bild 30: Einzelversuche zur einaxialen Druckfestigkeit von Boden 1 (TL) mit MB 50/50

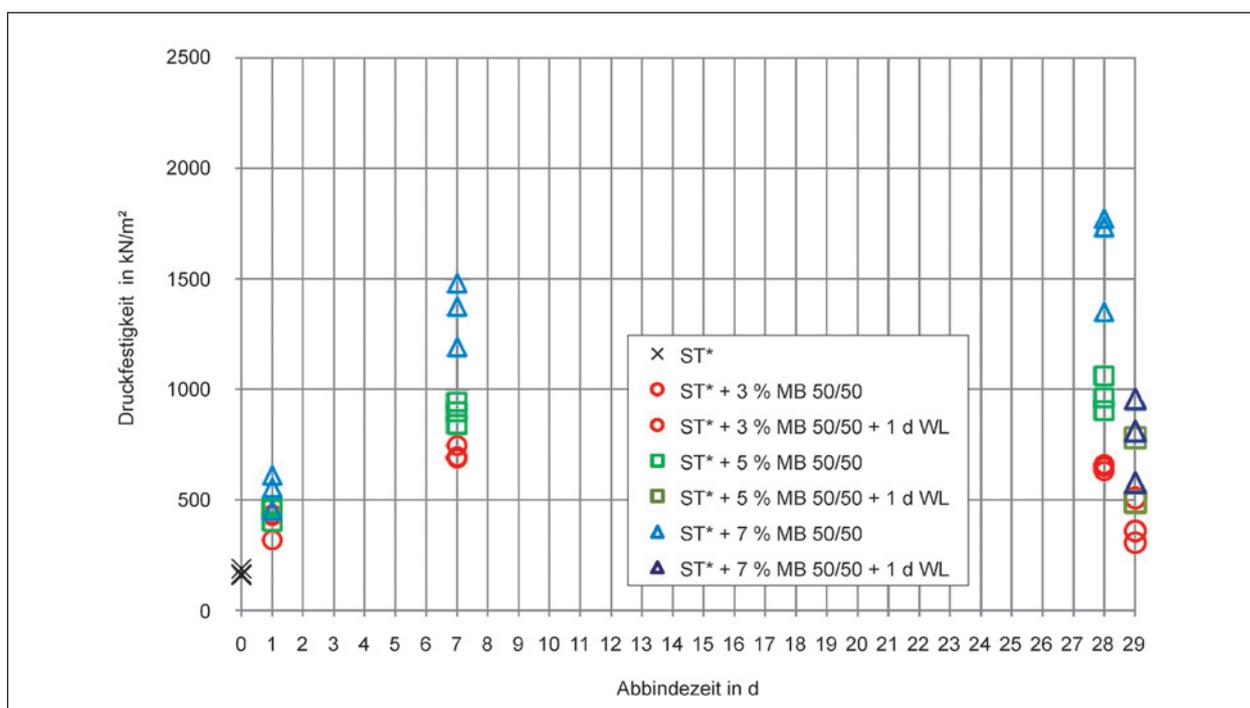


Bild 31: Einzelversuche zur einaxialen Druckfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit MB 50/50

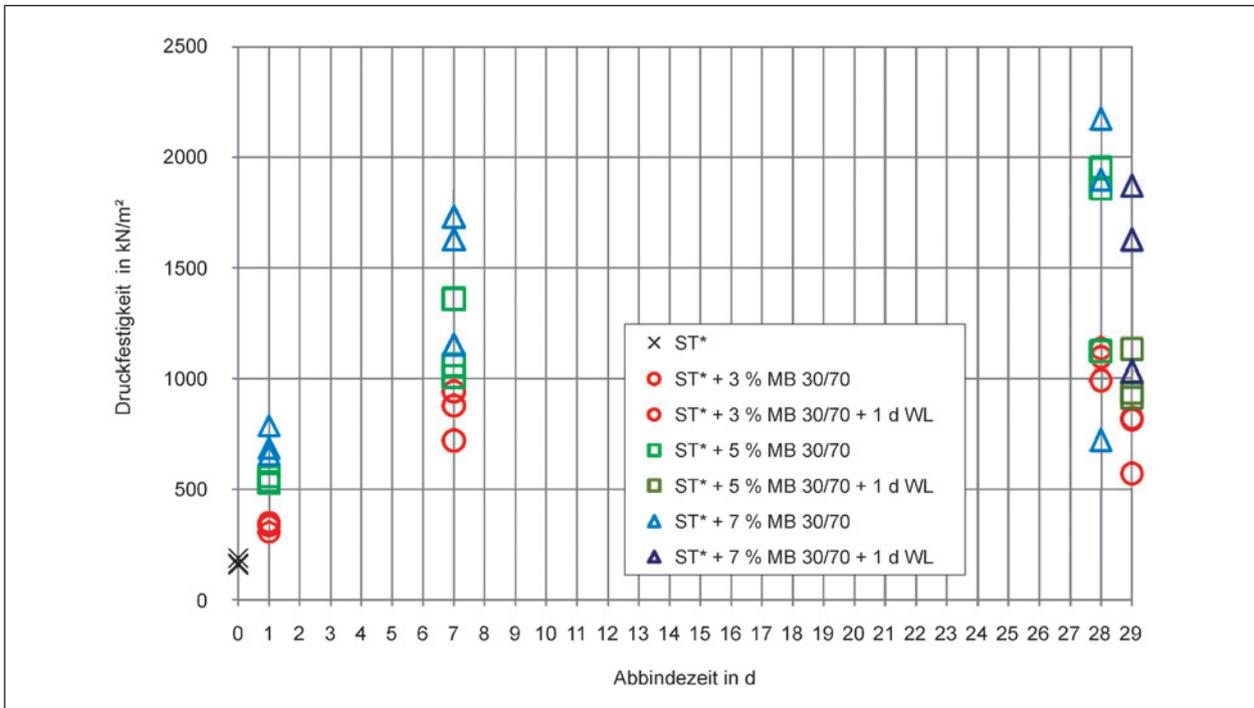


Bild 32: Einzelversuche zur einaxialen Druckfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit MB 30/70

Parameter	TL mit CL 90 S			TL mit MB 50/50		
	3 %	5 %	7 %	3 %	5 %	7 %
Mittlere Festigkeit nach 28 d [kN/m²]	745,9	796,4	676,4	1.187,7	1.297,0	1.482,1
Mittlere Festigkeit nach 28 d + 1 d W _L [kN/m²]	518,7	607,4	479,1	906,3	1.023,1	1.277,1
Mittlerer Festigkeitsabfall n. Wasserlagerung [%]	30,5	23,7	29,2	23,7	21,1	13,8

Tab. 7: Mittlerer Festigkeitsabfall nach Wasserlagerung von Boden 1 (TL) mit Bindemittel

Parameter	ST* mit MB 50/50			ST* mit MB 30/70		
	3 %	5 %	7 %	3 %	5 %	7 %
mittlere Festigkeit nach 28 d [kN/m²]	647,6	975,6	1.619,2	1.072,5	1.642,5	2.035,7
mittlere Festigkeit nach 28 d + 1 d W _L [kN/m²]	393,0	587,1	782,9	734,1	991,2	1.509,7
mittlerer Festigkeitsabfall n. Wasserlagerung [%]	39,5	39,8	51,7	31,6	39,7	25,8

Tab. 8: Mittlerer Festigkeitsabfall nach Wasserlagerung von Boden 2 (ST*) mit Bindemittel

Dies trifft auch bei höherem Bindemittelgehalt anhand der Ergebnisse auf Basis von Ausgangsboden 1 (TL) zu. Die Variation des Bindemittelgehaltes bei Ausgangsboden 2 (ST*) zeigte dagegen teilweise einen größeren Festigkeitsabfall mit zunehmendem Bindemittelgehalt. Da auch diese Proben mit Proctordichte eingebaut worden sind, ist dies nur durch Streuungen bei der Versuchsdurchführung zu erklären.

Im Verlauf der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurde vereinbart, die Wirkungsweise der ur-

sprünglich ausgewählten Bindemittel CL 90 S und CEM II/A-LL 32,5 R mit einem Weißkalk CL 90 Q bei unveränderter Zementart als Mischbindemittel entsprechend der bereits verwendeten Mischungsverhältnisse (Kennzeichnung: „neu“) an einaxialen Druckversuchen im Alter von 28 Tagen an Boden-Bindemittel-Gemischen auf Basis von Ausgangsboden 2 (ST*) zu untersuchen.

In Bild 33 und Bild 34 wird deutlich, dass zwischen den verwendeten Bindemitteln kein Unterschied bzgl. der einaxialen Druckfestigkeit ersichtlich ist.

Dies entspricht einer der wesentlichen Schlussfolgerungen nach KRAJEWSKI, KUHL [31], wonach zumindest die unterschiedlichen Kalksorten keinen wesentlichen Einfluss auf die Versuchsergebnisse besitzen.

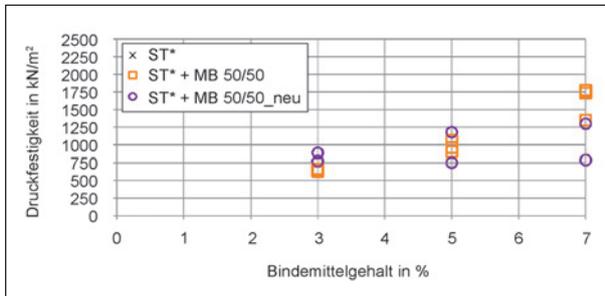


Bild 33: Vergleich der Druckfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit unterschiedlichen MB 50/50 (28 d)

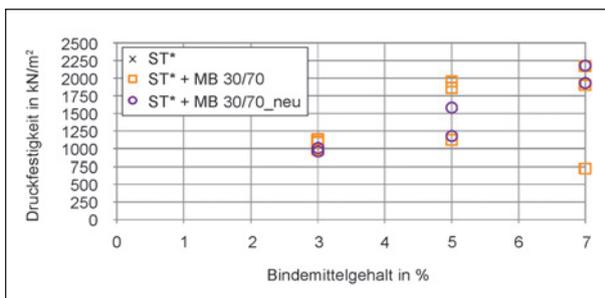


Bild 34: Vergleich der Druckfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit unterschiedlichen MB 30/70 (28 d)

6.5 Steifemodul

Die Protokolle der Ödometerversuche an den Boden-Bindemittel-Gemischen mit Ausgangsboden 1 (TL) befinden sich in A 2.6. Die Protokolle zu Ausgangsboden 2 (ST*) befinden sich in A 3.6.

Wie bereits bei den CBR-Versuchen gemäß Kapitel 6.3 und bei den einaxialen Druckversuche gemäß Kapitel 6.4 festgestellt, hat bei dem verwendeten Boden 1 (TL) die Zugabe von Weißkalkhydrat lediglich geringe Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse im Vergleich zu Boden 1 (TL) ohne Weißkalkhydrat entsprechend Bild 35. Bei den Ödometerversuchen stellte sich heraus, dass im Belastungsbereich von 50 kN/m² bis 100 kN/m² die erreichten Steifemoduln der Boden-Bindemittel-Gemische 20 % bis 30 % über denen des Ausgangsbodens liegen. Bei höheren Belastungsstufen befinden sich die Steifemoduln der Boden-Bindemittel-Gemische zwischen den festgestellten Grenzen der Steifemoduln des Ausgangsbodens. Dabei wird die Steifigkeitsreduzierung des Ausgangsbodens bei einem Teilversuch ab einer Auflast von 800 kN/m² nicht gewertet. Die Ursache für diese Unplausibilität konnte nicht geklärt werden.

Die Boden-Bindemittel-Gemische mit Zementanteil (s. Bild 36 bis Bild 38) weisen erwartungsgemäß wesentlich größere Steifemoduln als der jeweilige

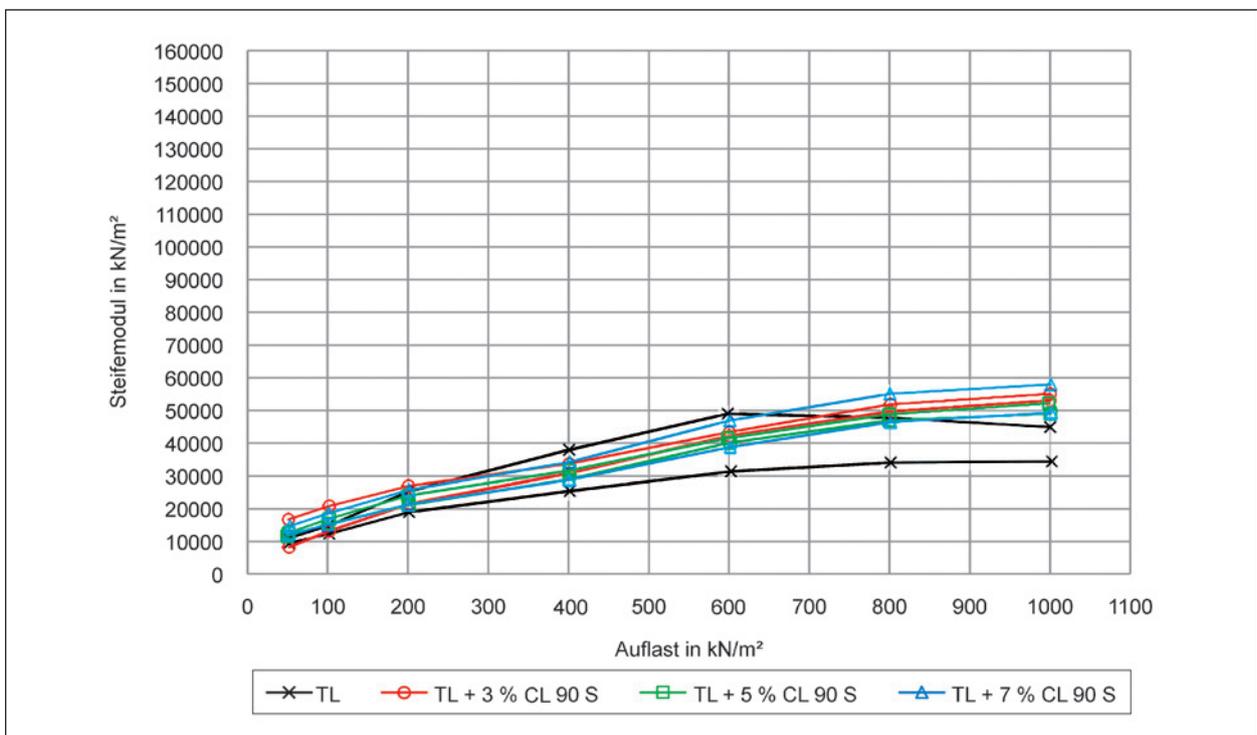


Bild 35: Einzelversuche von Boden 1 (TL) mit CL 90 S

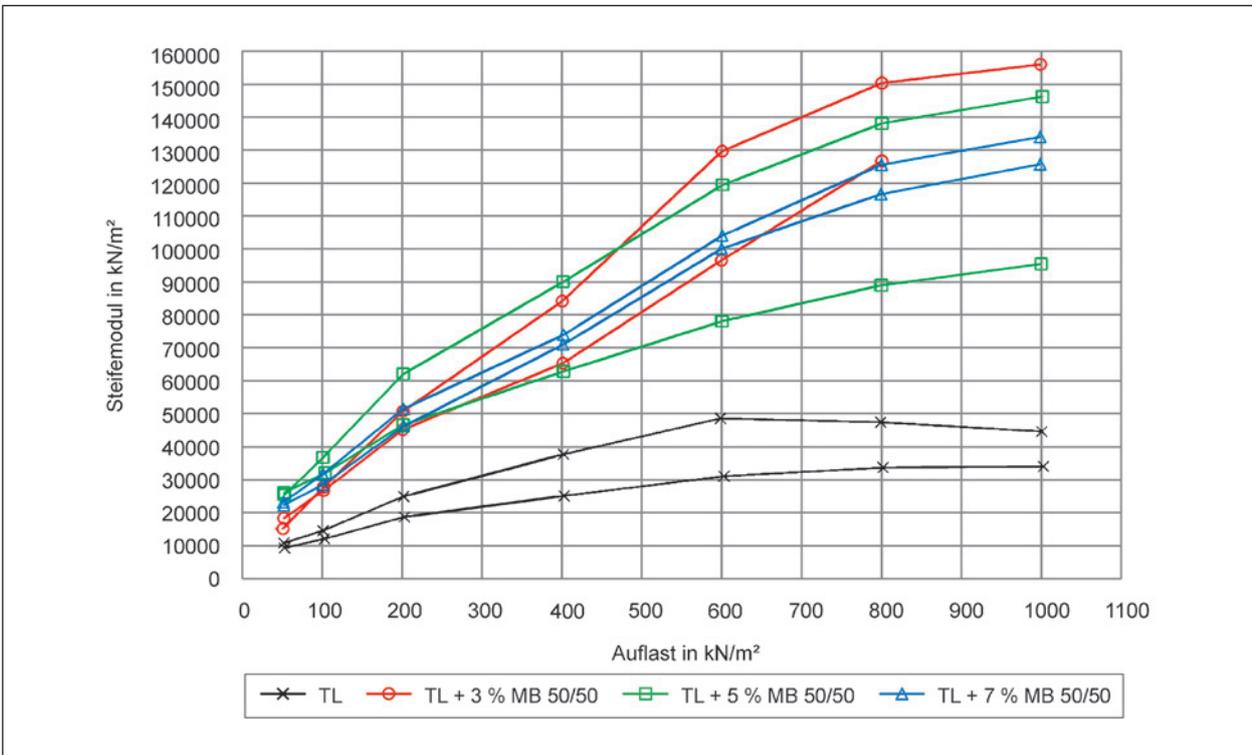


Bild 36: Einzelversuche von Boden 1 (TL) mit MB 50/50

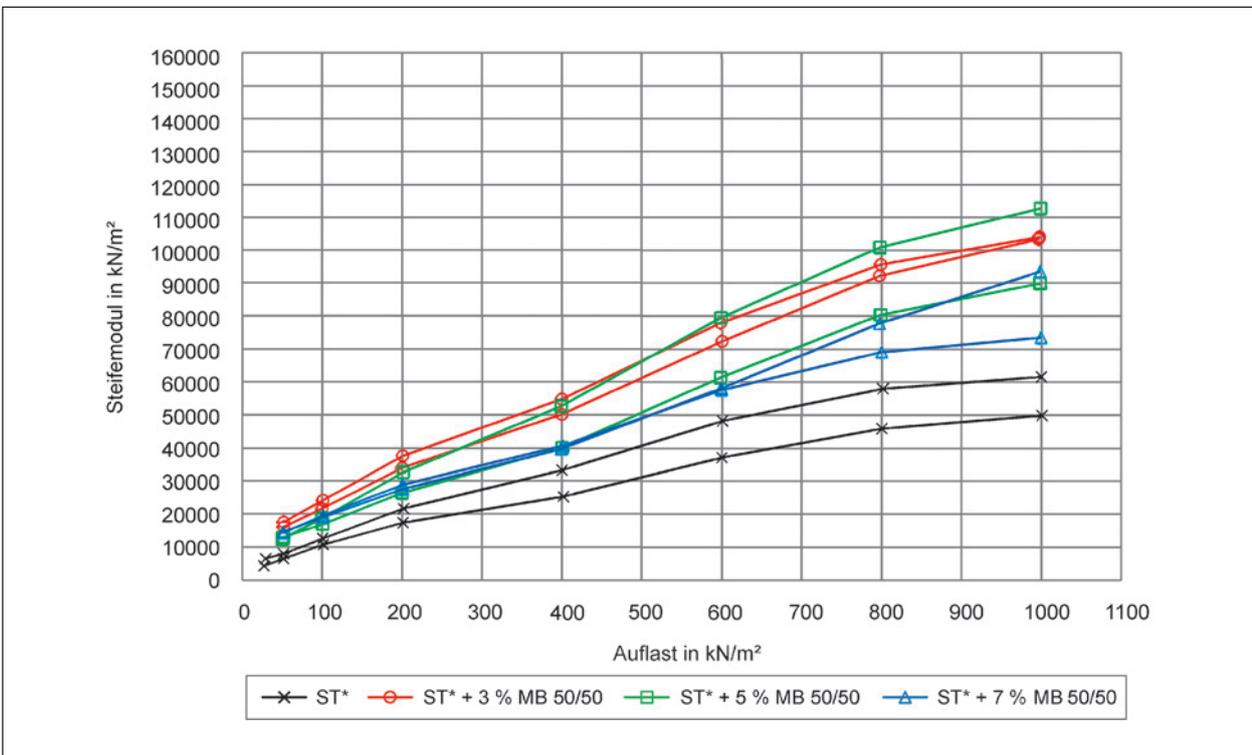


Bild 37: Einzelversuche von Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 50/50

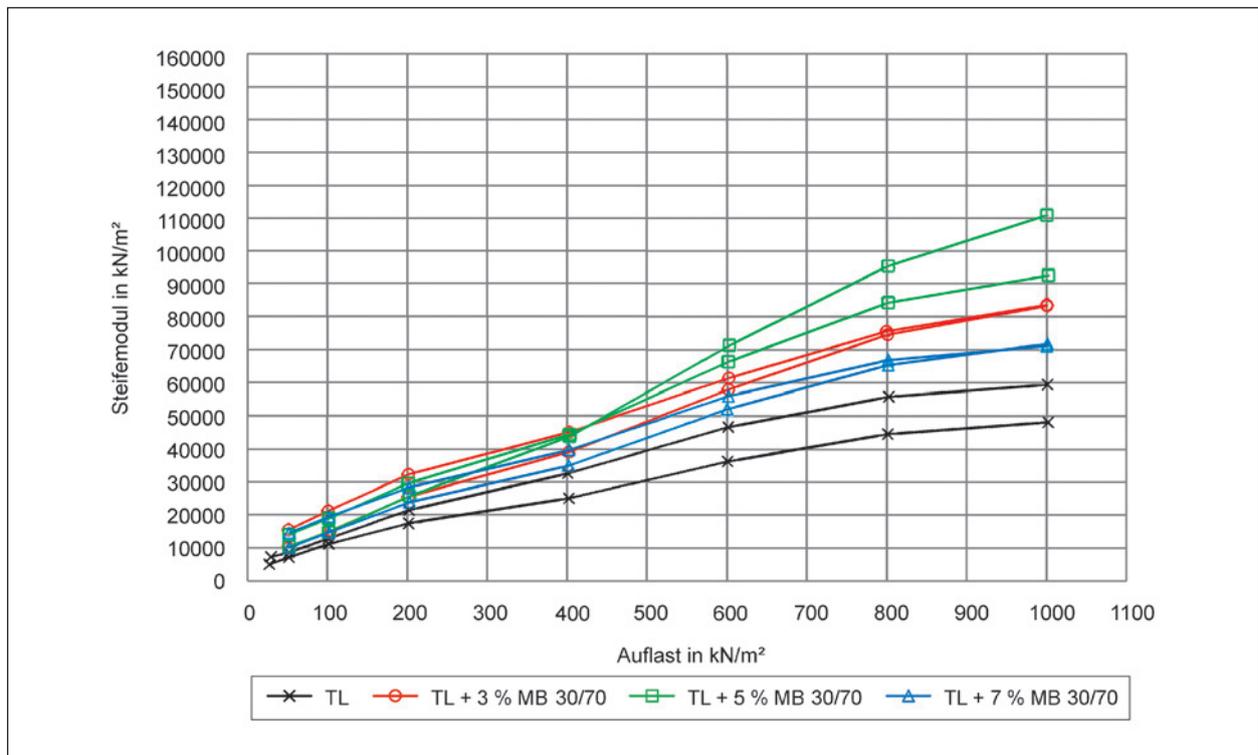


Bild 38: Einzelversuche von Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 30/70

Ausgangsboden auf. Eine klare bindemittelgehalt-abhängige Entwicklung lässt sich dabei jedoch nicht feststellen. Alle 3 Versuchsreihen liefern mit 7 % Bindemittelgehalt unerwartet geringe Steifemoduln. Dies kann allerdings auch mit der aufgrund des höheren Bindemittelgehaltes geringen Proctordichte entsprechend Kapitel 6.2 zusammenhängen.

Beim Vergleich der auf Boden 2 (ST*) basierenden Boden-Bindemittel-Gemische lassen sich kaum Unterschiede zwischen den beiden angewendeten Mischungsverhältnissen (50/50 und 30/70) der Mischbindemittel feststellen. Bezüglich des Steifemoduls entsprechen die Ergebnisse daher nicht den bereits beschriebenen Erkenntnissen.

Weiterhin auffällig ist, dass der Steifemodul zwischen Laststufen mit einer Auflast von 400 kN/m² und 600 kN/m² stärker ansteigt als zwischen 200 kN/m² und 400 kN/m². Am deutlichsten tritt dieser Effekt

an Ausgangsboden 2 (ST*) mit dem Mischbindemittel 30/70 auf (s. Bild 38), konnte jedoch bei den meisten durchgeführten Versuchen inkl. den Versuchen am Ausgangsboden beobachtet werden.

Bei sehr kleinen Änderungen zwischen dem Anstieg der Steifemoduln (z. B. bei den Versuchen an den Ausgangsböden) kann es sich um versuchsbedingte Streuungen handeln. Bei größeren Änderungen wurden jeweils Proben der Boden-Bindemittel-Gemische untersucht. Ein Teil der in Kapitel 2.3 beschriebenen Wirkungsweise der Bindemittel besteht darin, dass durch die Bindemittelzugabe eine Umstrukturierung des Bodens durch die Bildung von Aggregaten erfolgt. Es ist möglich, dass durch die Belastung zunächst Umlagerungen zwischen den entstandenen Aggregaten erfolgen. Mit zunehmender Belastung (hier ab ca. 400 kN/m²) werden Änderungen innerhalb der Aggregate bedingt, was folglich in einem leicht veränderten Steifigkeitsverhalten resultiert.

6.6 Scherparameter

Die Protokolle der Triaxialversuche an den Boden-Bindemittel-Gemischen mit Ausgangsboden 1 (TL) befinden sich in A 2.7. Die Protokolle zu Ausgangsboden 2 (ST*) befinden sich in A 3.7.

Die Darstellung in Bild 39 bis Bild 42 enthält zum einen die je Probe ermittelte maximale Scherfestigkeit aufgetragen als maximale deviatorische Belastung über der isotropen Belastung. Zum anderen sind die gemittelten Ausgleichsgeraden der ermittelten Scherparameter der jeweiligen Versuchsreihe dargestellt. Die ersichtliche Diskrepanz zwischen den Einzelwerten und den Ausgleichsgeraden kommt dabei durch die Versuchsauswertung zu Stande. Die Scherparameter wurden nicht anhand der maximalen Scherfestigkeit, sondern anhand einer umhüllenden Ausgleichgeraden ermittelt.

Wie in Bild 39 ersichtlich, verändern sich die Scherfestigkeiten der Boden-Bindemittel-Gemische aus Ausgangsboden 1 (TL) bereits durch die Zugabe des Weißkalkhydrats deutlich. Bereits bei einer Zugabe von 3 % wird die Kohäsion sprunghaft um ein Vielfaches erhöht (Tabelle 9). Der Reibungswinkel ist erst ab 5 % Bindemittelgehalt merklich ange-

stiegen. Durch die Zugabe von zementhaltigem Bindemittel können entsprechend der durchgeführten Laborversuche noch deutlich höhere Scherfestigkeiten mit entsprechend höheren Scherparametern erreicht werden, wie Bild 40 und Tabelle 9 zeigen.

Selbiges ist ebenfalls an den Boden-Bindemittel-Gemischen auf Basis von Ausgangsboden 2 (ST*) feststellbar (s. Bild 41 und Bild 42 bzw. Tabelle 10). Hier wird durch den höheren Zementanteil im Mischbindemittel 30/70 im Vergleich zum Mischbindemittel 50/50 eine höhere Kohäsion erreicht. Der Reibungswinkel nimmt mit zunehmender Bindemittelmenge bei beiden Bindemitteln 50/50 und 30/70 in nahezu gleichem Maße zu.

Bindemittelgehalt [%]	Bindemittel CL 90 S		Bindemittel MB 50/50	
	ϕ' [°]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]	c' [kN/m ²]
0	32,5	24,0	32,5	24,0
3	32,0	115,5	44,7	200,1
5	37,0	150,0	40,1	230,0
7	39,2	127,5	42,6	271,0

Tab. 9: Mittlere Scherparameter von Boden 1 (TL) mit Bindemittel

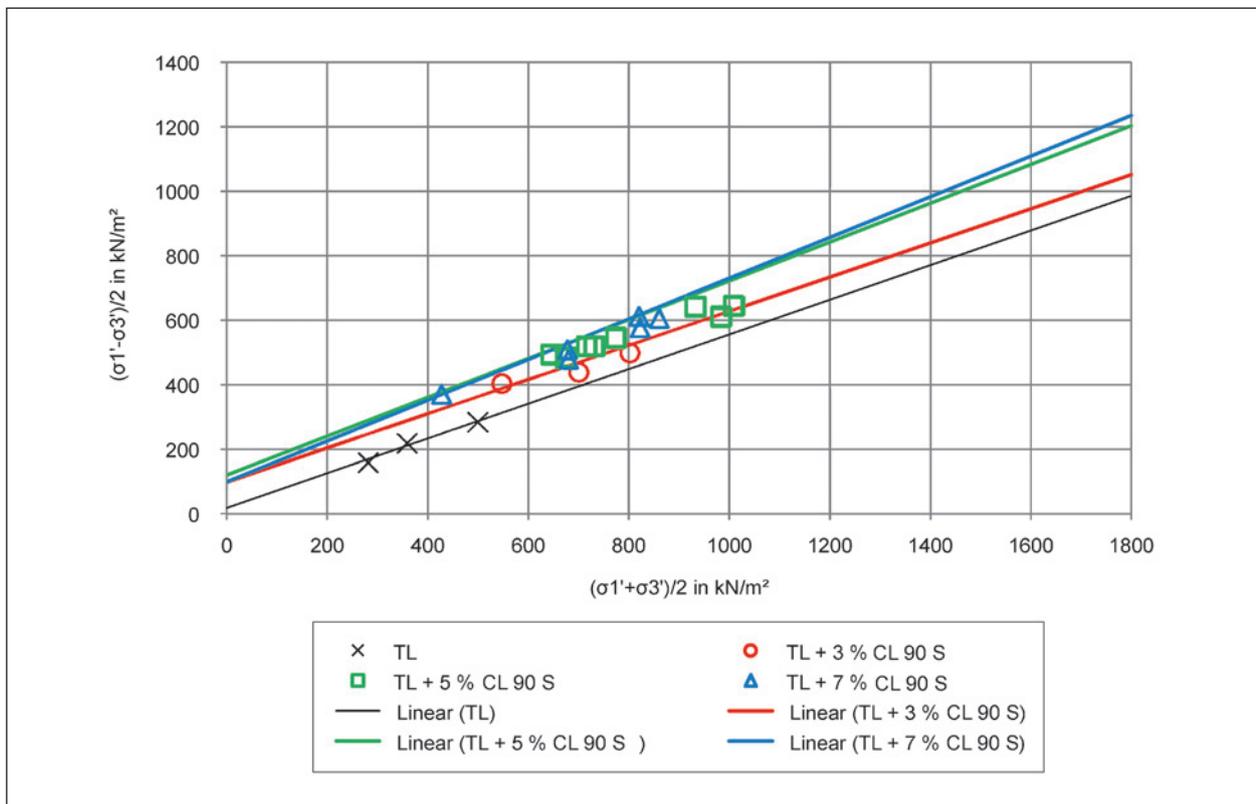


Bild 39: Entwicklung der Scherfestigkeit von Boden 1 (TL) mit CL 90 S

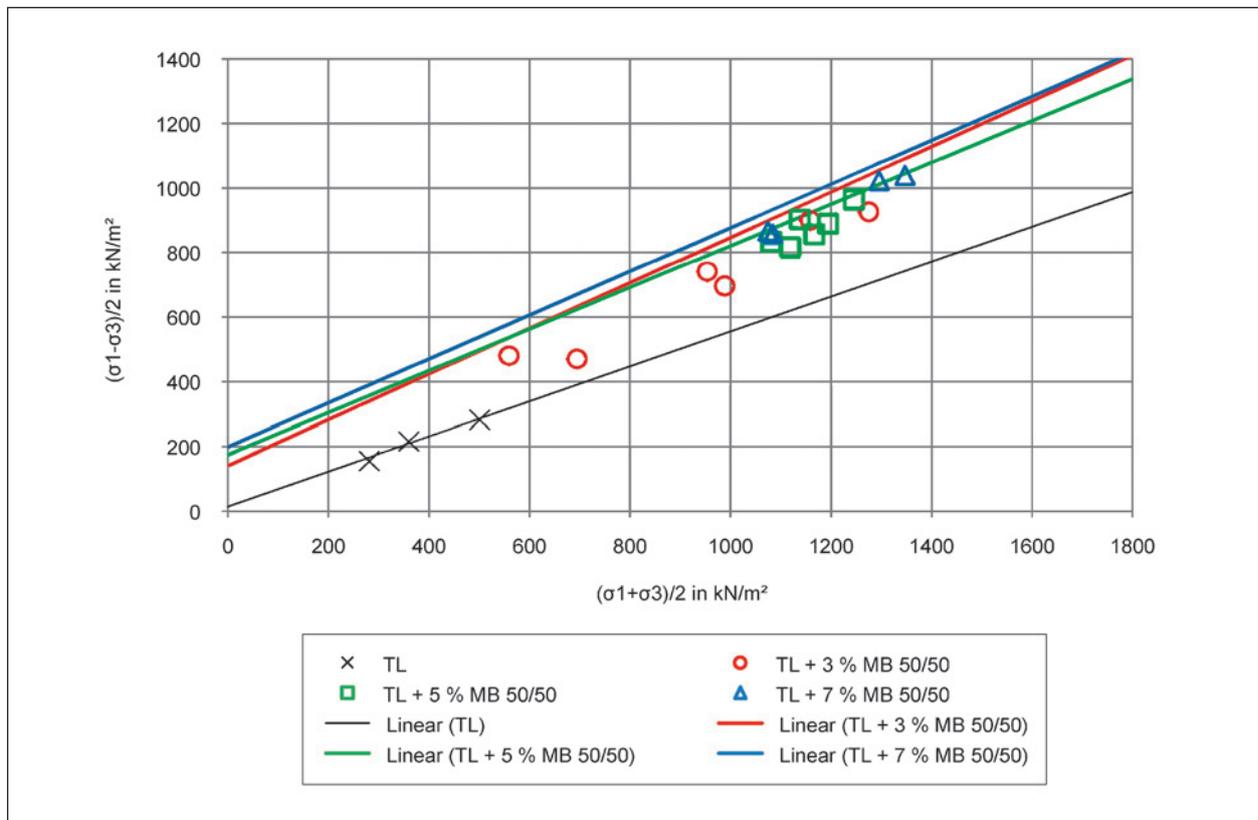


Bild 40: Entwicklung der Scherfestigkeit von Boden 1 (TL) mit MB 50/50

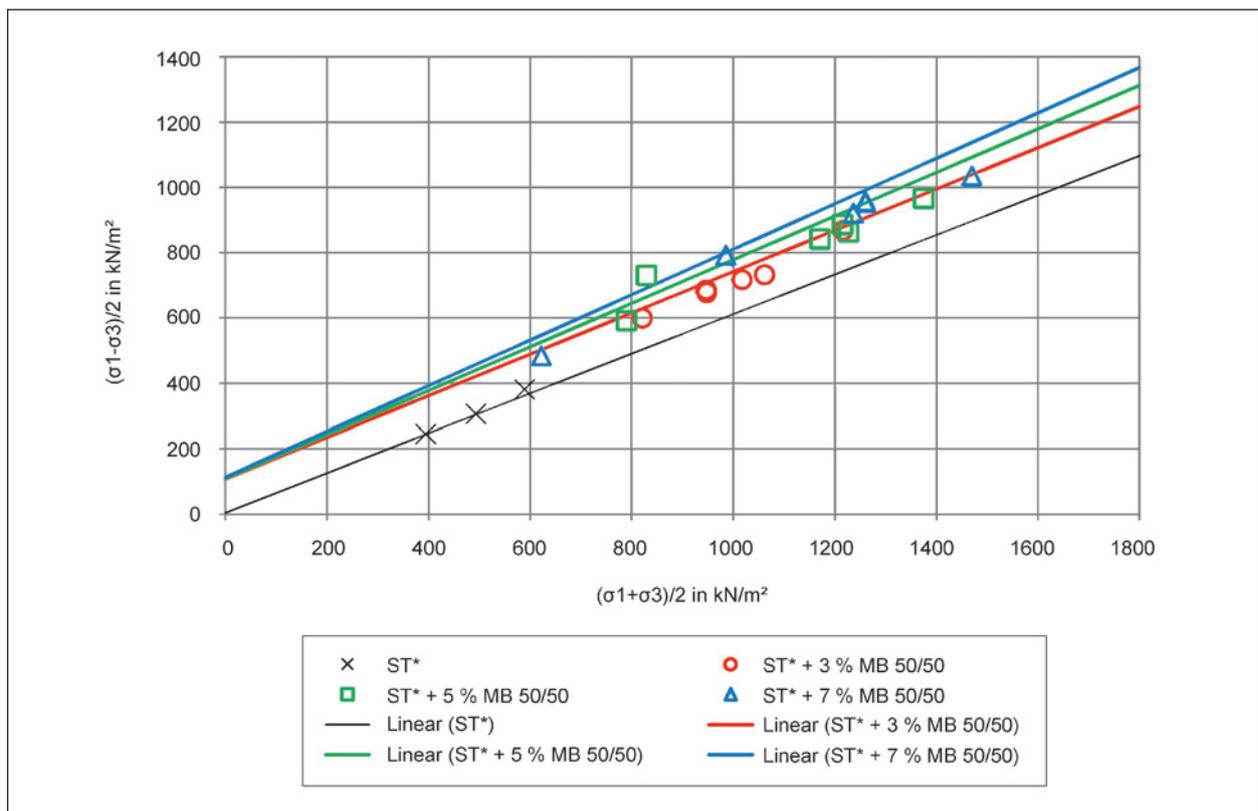


Bild 41: Entwicklung der Scherfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit MB 50/50

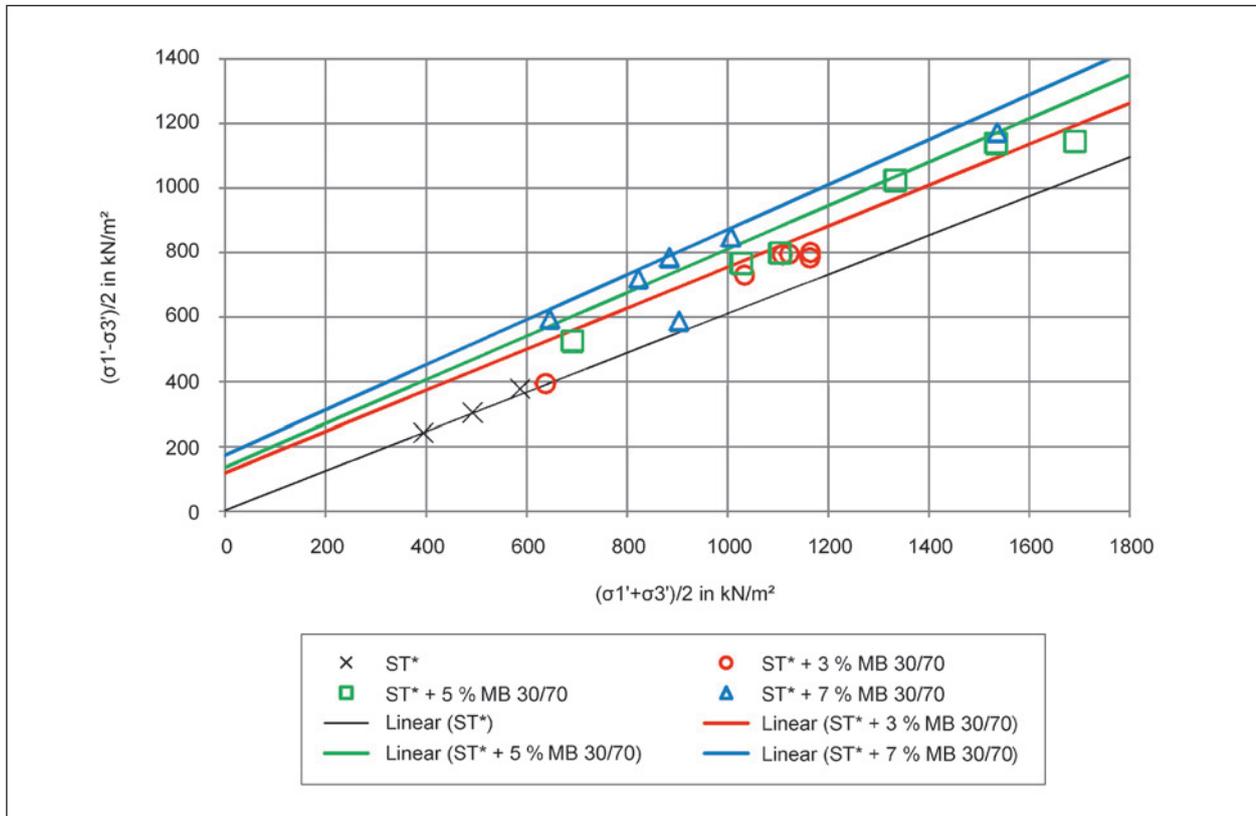


Bild 42: Entwicklung der Scherfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit MB 30/70

Bindemittel- gehalt	Bindemittel MB 50/50		Bindemittel MB 30/70	
	φ' [°]	c' [kN/m²]	φ' [°]	c' [kN/m²]
0	37,5	5,0	37,5	5,0
3	39,4	135,0	39,5	155,0
5	42,1	142,5	42,5	185,0
7	44,4	152,5	44,3	242,5

Tab. 10: Mittlere Scherparameter von Boden 2 (ST*) mit Bindemittel

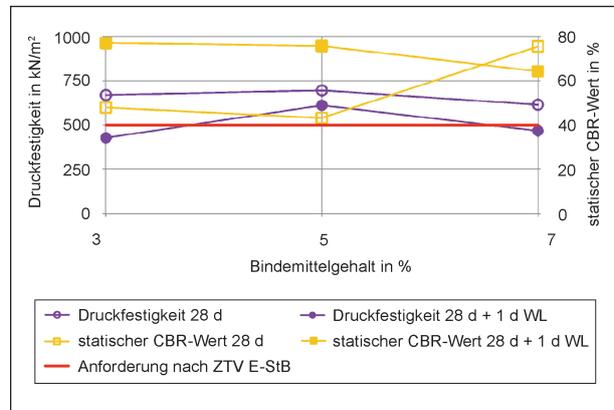


Bild 43: Verringerte Frostempfindlichkeit, Boden 1 (TL) mit CL 90 S

7 Gleichwertigkeitsbetrachtung zu herkömmlichem gemischt- und grobkörnigen Material

7.1 Frostempfindlichkeit

Entsprechend Kapitel 2.5 können zur Bewertung der Frostempfindlichkeit sowohl CBR-Versuche als auch einaxiale Druckversuche herangezogen werden. Beide Versuchsarten wurden im Verlauf der Erarbeitung des Forschungsberichtes durchgeführt. In Bild 43 bis Bild 46 sind die Mittelwerte beider Versuchsarten nach 28 Tagen Lagerungszeit und nach

28 Tagen Lagerungszeit und 1 Tag Wasserlagerung für die jeweiligen Boden-Bindemittel-Gemische dargestellt. Die Skalierung der Achsen wurde so gewählt, dass die jeweilige Anforderung nach ZTV E-StB 09 [53] (s. Kapitel 2.5) mit einer Horizontalen Linie (rot) dargestellt werden kann.

Es wurde festgestellt, dass sämtliche Versuche zur Bestimmung des statischen CBR-Wertes bzw. der einaxiale Druckfestigkeit die gemäß Kapitel 2.5 genannten Anforderungen von 40 % (CBR-Wert)

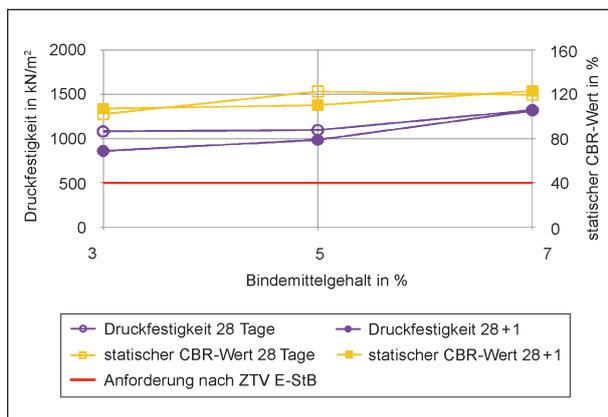


Bild 44: Verringerte Frostempfindlichkeit, Boden 1 (TL) mit MB 50/50

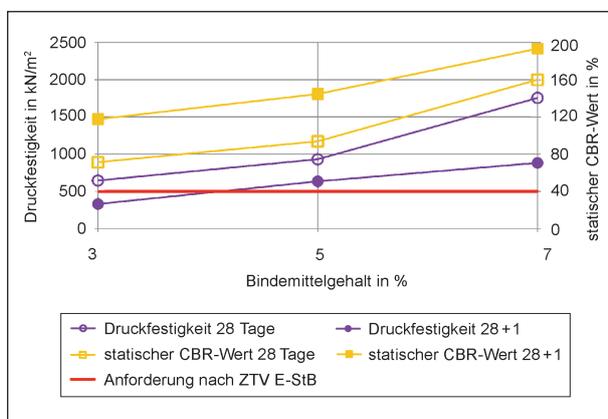


Bild 45: Verringerte Frostempfindlichkeit, Boden 2 (ST*) mit MB 50/50

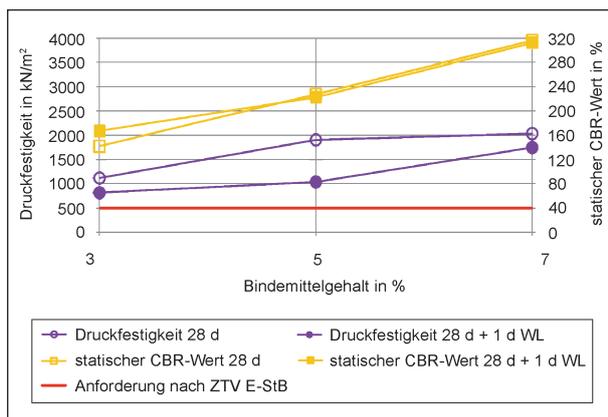


Bild 46: Verringerte Frostempfindlichkeit, Boden 2 (ST*) mit MB 30/70

bzw. 500 kN/m² (einaxialer Druckversuch) und jeweils max. 50 % Festigkeitsabfall nach Wasserlagerung (mit Ausnahme einzelner Ausreißer) erfüllen, wie in dargestellt. Folglich ist eine Anhebung der Frostempfindlichkeitsklasse von F3 zu F2 möglich.

Damit sind die qualifiziert verbesserten Böden zwar nicht gleichwertig mit den grobkörnigen Bodengruppen GE, GW, GI sowie SW, SE, SI mit Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm) kleiner 5 M.-% gemäß DIN 18196, jedoch mit den ebenfalls für den Einbau im Hinterfüllbereich ohne Bodenbehandlung zugelassenen gemischtkörnigen Böden der Bodengruppen GT, GU sowie ST, SU mit Feinkornanteilen von max. 15 M.-%.

Folglich ist bzgl. der Frostempfindlichkeit eine Gleichwertigkeit mit einem Teil der zugelassen Böden gegeben.

7.2 Vergleich mit Materialparametern

7.2.1 Allgemeines

Die Gleichwertigkeitsbetrachtung der qualifiziert verbesserten und untersuchten Böden mit den herkömmlichen, zugelassenen Böden erfolgt durch den Vergleich der erreichten Materialparameter. Die maßgebenden und vergleichbaren Materialparameter sind dabei die Scherparameter und der Steifemodul.

Hierzu werden die Erfahrungswerte nach Paul v. SOOS gemäß Grundbautaschenbuch, Band 1, 7. Auflage [47] herangezogen. Diese wurden über viele Jahre hinweg über eine Vielzahl an Untersuchungen und Veröffentlichungen zusammengetragen und bilden daher eine plausible Grundlage für die Gleichwertigkeitsbetrachtung.

Betrachtet wurden die Referenzbodengruppen gemäß DIN 18196 „GW/GI“ als Höchstanforderung bzw. „SE“ als Mindestanforderung für den Nachweis der Gleichwertigkeit der verbesserten Böden. Zusätzlich sind die Bodengruppen der jeweiligen Versuchsböden (TL bzw. ST*) entsprechend der Erfahrungswerte nach v. SOOS dargestellt, um den direkten Vergleich zwischen den Erfahrungswerten und den Laborversuchen herzustellen.

7.2.2 Scherfestigkeit

In Bild 47 und Bild 48 sind die Versuchsergebnisse der Triaxialversuche an Ausgangsboden 1 (TL) sowie an den darauf basierenden Boden-Bindemittel-Gemischen entsprechend der in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Vorgehensweise dargestellt. Aufgrund der Versuchsergebnisse wurde an dieser Stelle die obere und untere Grenze „GW/GI“ als Höchstanfor-

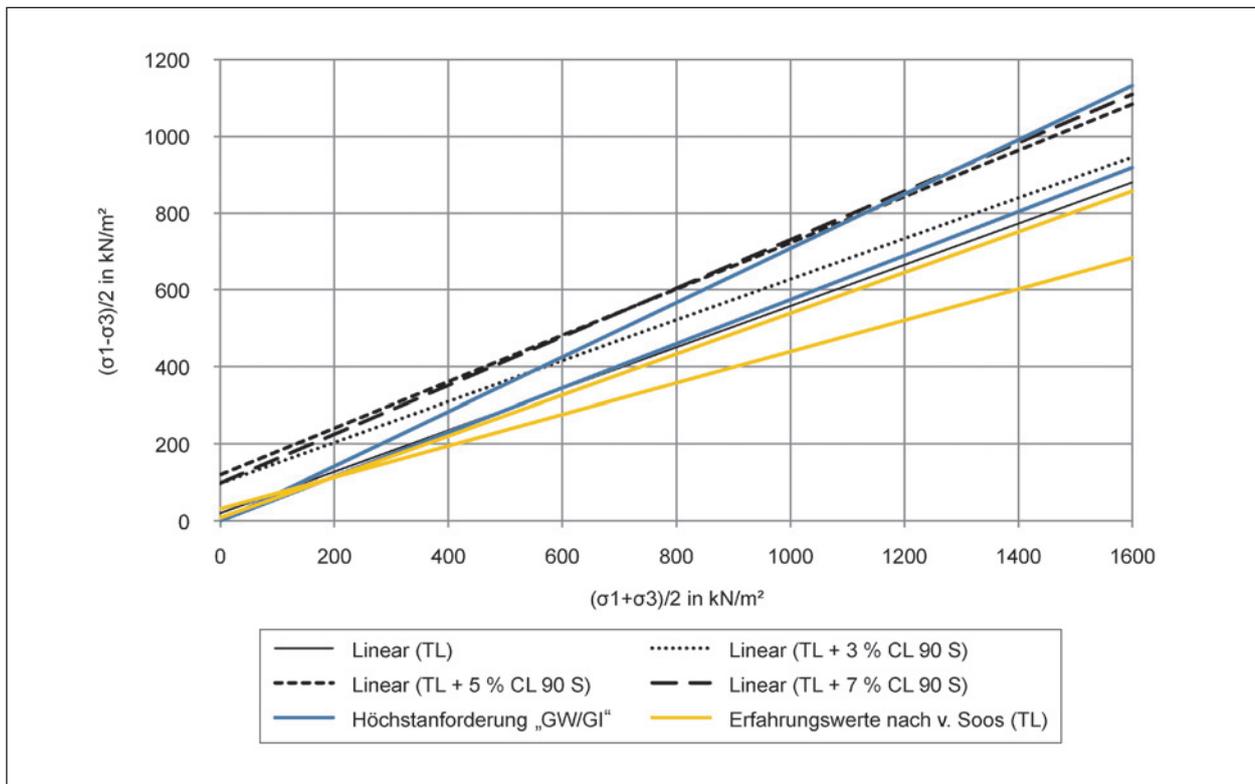


Bild 47: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Scherparameter), Boden 1 (TL) mit CL 90 S

derung dargestellt und auf eine Mindestanforderung „SE“ für die Gleichwertigkeitsdefinition verzichtet. Es wurde wiederum die Spanne der Scherfestigkeit der jeweiligen Versuchsböden dargestellt. Dies gilt analog für Bild 49 und Bild 50 mit Ausgangsboden 2 (ST*).

Schon die Versuchsergebnisse am Ausgangsboden 1 (TL) liegen oberhalb des Grenzbereichs der Erfahrungswerte nach Paul v. SOOS der zugehörigen Bodengruppe und somit fast im Bereich des herkömmlichen Hinterfüllmaterials der Bodengruppe GW/GI. Durch die Zugabe des Bindemittels CL 90 S wird eine mit dem GW/GI-Material gleichwertige Scherfestigkeit aufgrund der deutlich erhöhten Kohäsion selbst im Bereich großer Spannungen erreicht.

Mit den untersuchten, zementhaltigen Mischbindemitteln wird selbst das hochwertige GW/GI-Material mit beiden Ausgangsböden noch deutlich übertroffen, wie Bild 48 bis Bild 50 zeigen.

Die Gleich- bzw. Höherwertigkeit eines Boden-Bindemittel-Gemisches gegenüber herkömmlichen Hinterfüllmaterialien ist bzgl. der Scherparameter wesentlich einfacher zu erreichen und nachzuwei-

sen, als bei dem Steifemodul entsprechend Kapitel 7.2.3.

Untersucht wurden jedoch lediglich die Scherparameter im Alter von 28 Tagen, so dass die ermittelten Scherparameter für den erhärteten Zustand nach dem Einbau und der Verdichtung gelten. Erfahrungsgemäß ist jedoch die Belastung des hinterfüllten Bauwerkes durch den Einbau der Hinterfüllung und dem damit verbundenen Erddruck aus der Verdichtungsenergie größer als die Belastung durch den Erdruck im Endzustand. Daher wird an dieser Stelle kein Vergleich der Erddruckbeiwerte durchgeführt.

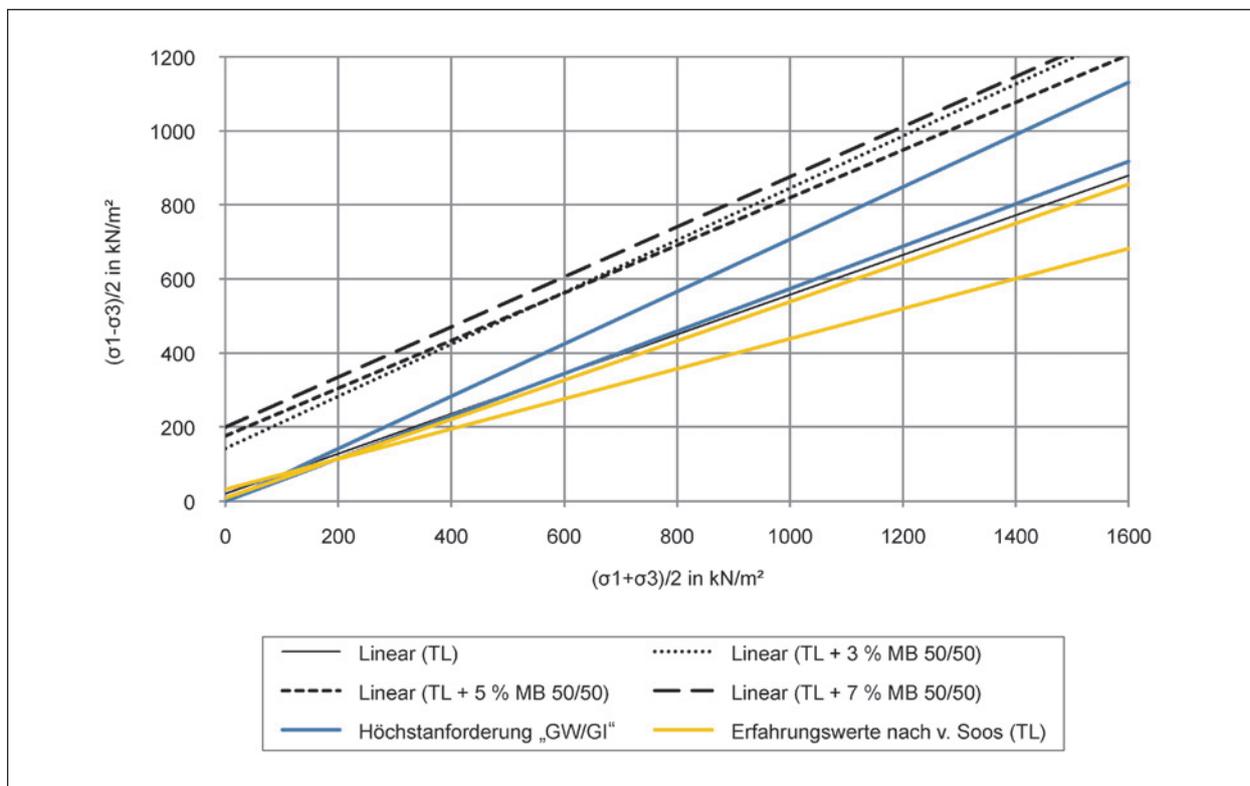


Bild 48: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Scherparameter), Boden 1 (TL) mit MB 50/50

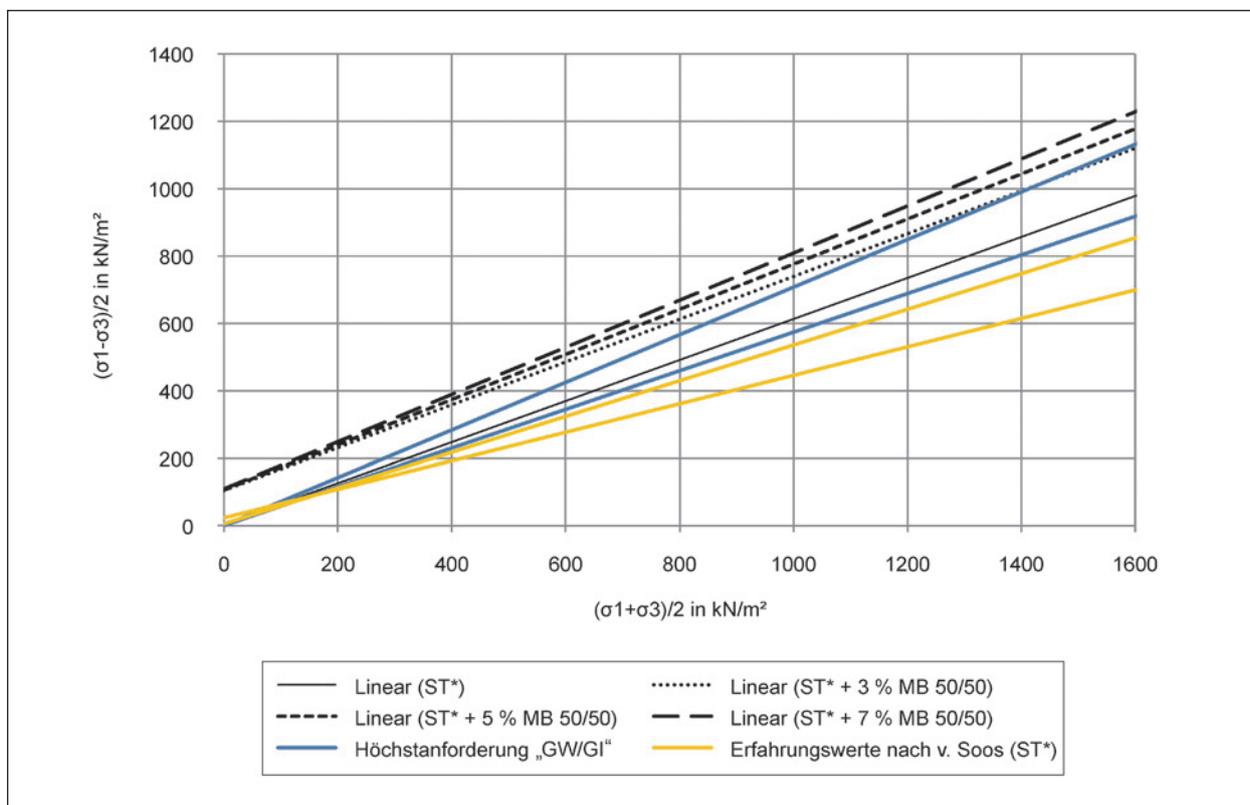


Bild 49: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Scherparameter), Boden 2 (ST*) mit MB 50/50

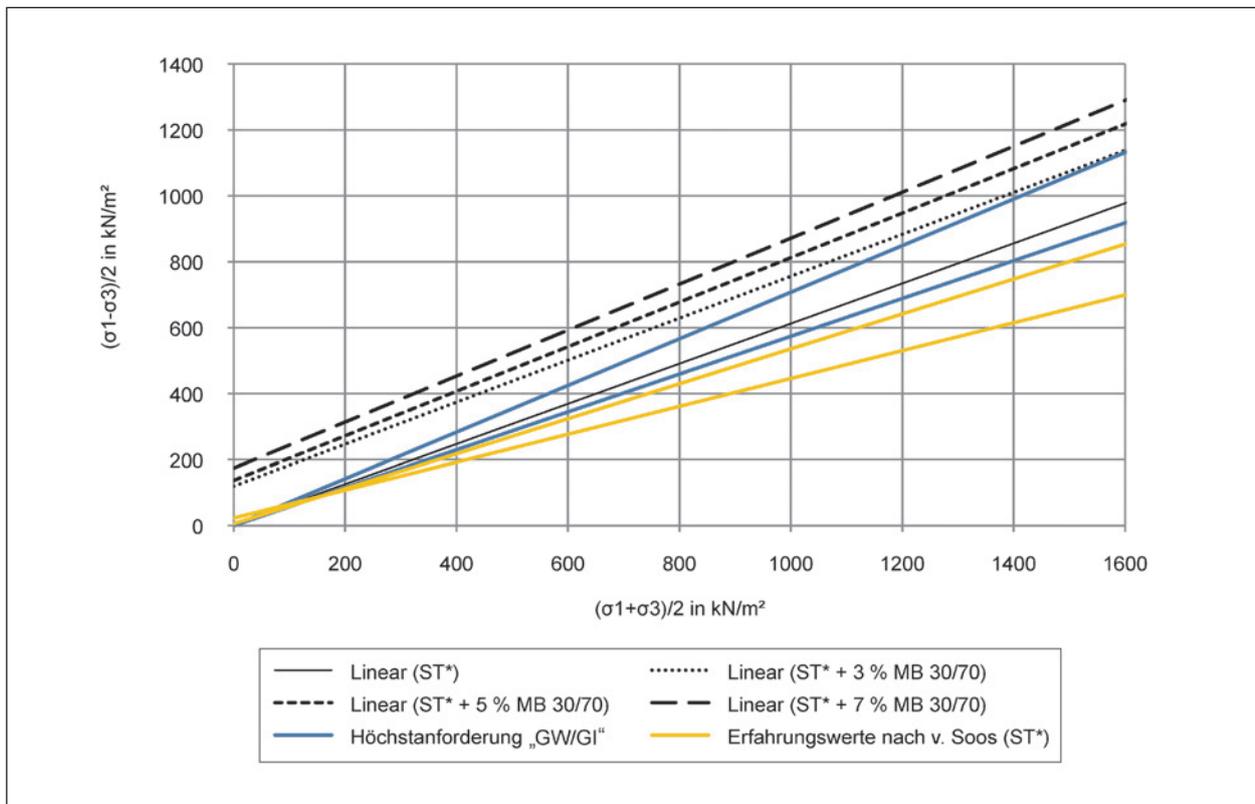


Bild 50: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Scherparameter), Boden 2 (ST*) mit MB 30/70

7.2.3 Steifemodul

In Bild 51 bis Bild 54 sind die Versuchsergebnisse der Ödometerversuche an den jeweiligen Ausgangsböden TL und ST* sowie an den darauf basierenden Boden-Bindemittel-Gemischen entsprechend der in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Vorgehensweise dargestellt.

Für die Gleichwertigkeitsbetrachtung mit den Referenzbodengruppen ist in Bild 51 bis Bild 54 die Höchstanforderung „GW/GI“ (blau) und die Mindestanforderung „SE“ (rot) dargestellt. Zusätzlich ist die Spanne des Steifemoduls der jeweiligen Ausgangsböden nach v. SOOS (gelb) dargestellt. Die Darstellung enthält einen Spannungsbereich bis 400 kN/m² und deckt damit den realistisch zu erwartenden Spannungsbereich für Hinterfüllungen ab.

Aus Bild 51 ist zunächst ersichtlich, dass sich die Steifemoduln des Ausgangsbodens 1 (TL) schon deutlich oberhalb der Erfahrungswerte nach v. SOOS befinden. Dies ist dem Einbau der Probe mit Proctordichte (Überkonsolidierung) geschuldet. Die Erfahrungswerte nach v. SOOS berücksichtigen jedoch den Einbau der (unbehandelten) Probe mit wesentlich geringerer Dichte (Erstbelastung).

Wie bereits in Kapitel 6.5 beschrieben, wird durch Zugabe von reinem Weißkalkhydrat bei Boden 1 (TL) lediglich eine geringe Steigerung des Steifemoduls im dargestellten Spannungsbereich erzielt. Im Wesentlichen liegt Boden 1 (TL) im Bereich der Mindestanforderung „SE“ für die Gleichwertigkeitsbetrachtung. Nur zum Teil überschreiten die Versuchsergebnisse diese Anforderung.

Unter Berücksichtigung des gegenüber den Erfahrungswerten erhöhten Steifemoduls des Ausgangsbodens und der allgemein geringen Steigerung des Steifemoduls bei Weißkalkhydratzugabe kann jedoch nicht von einer generellen Gleichwertigkeit von Ausgangsboden 1 (TL) mit Weißkalkhydrat und herkömmlichen Hinterfüllmaterialien ausgegangen werden.

Gemäß Kapitel 6.5 und Bild 52 bewirkt dagegen die Zugabe von Mischbindemittel 50/50 deutlich erhöhte Steifemoduln, welche sogar annähernd denen des GW/GI-Materials entsprechen. Eine Gleichwertigkeit zwischen den Boden-Bindemittel-Gemischen und herkömmlichen Hinterfüllmaterial ist daher naheliegend, da die Versuchsergebnisse in jedem Fall deutlich höher als die der Mindestanforderung „SE“ sind.

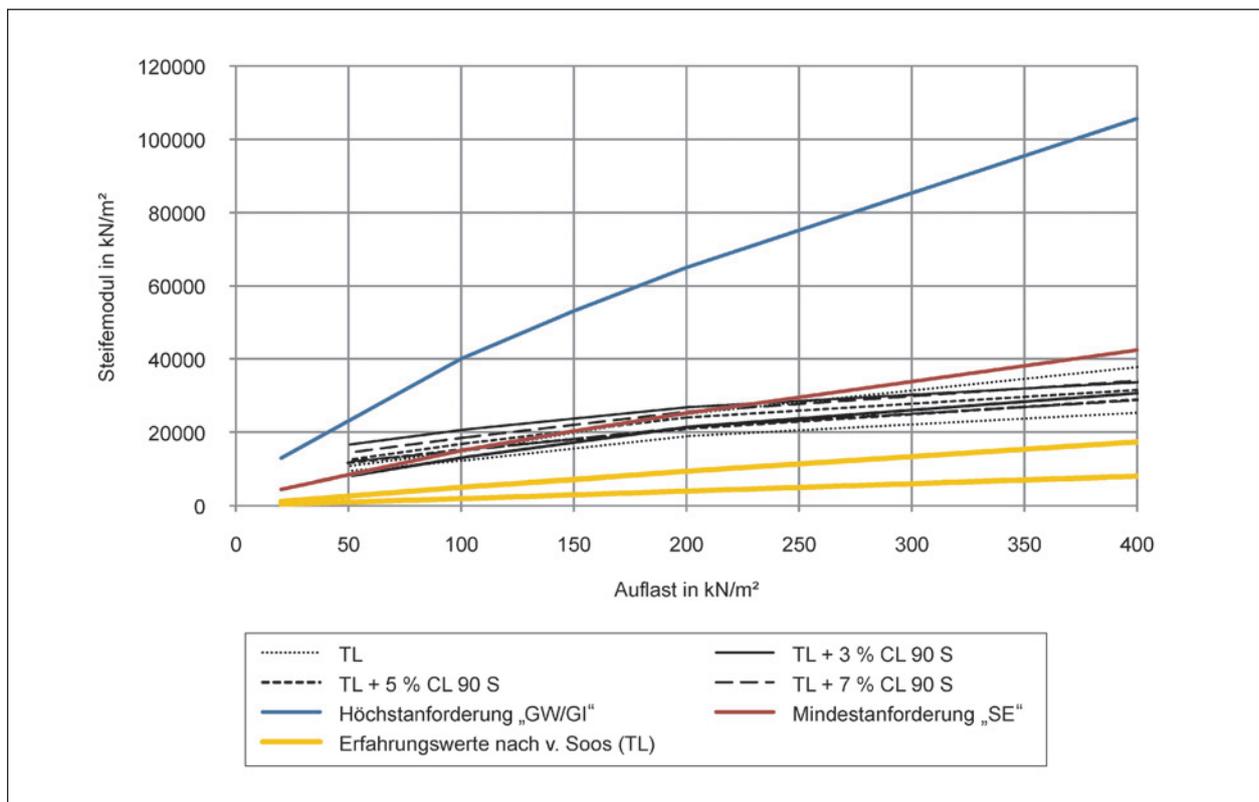


Bild 51: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Steifemodul), Boden 1 (TL) mit CL 90 S

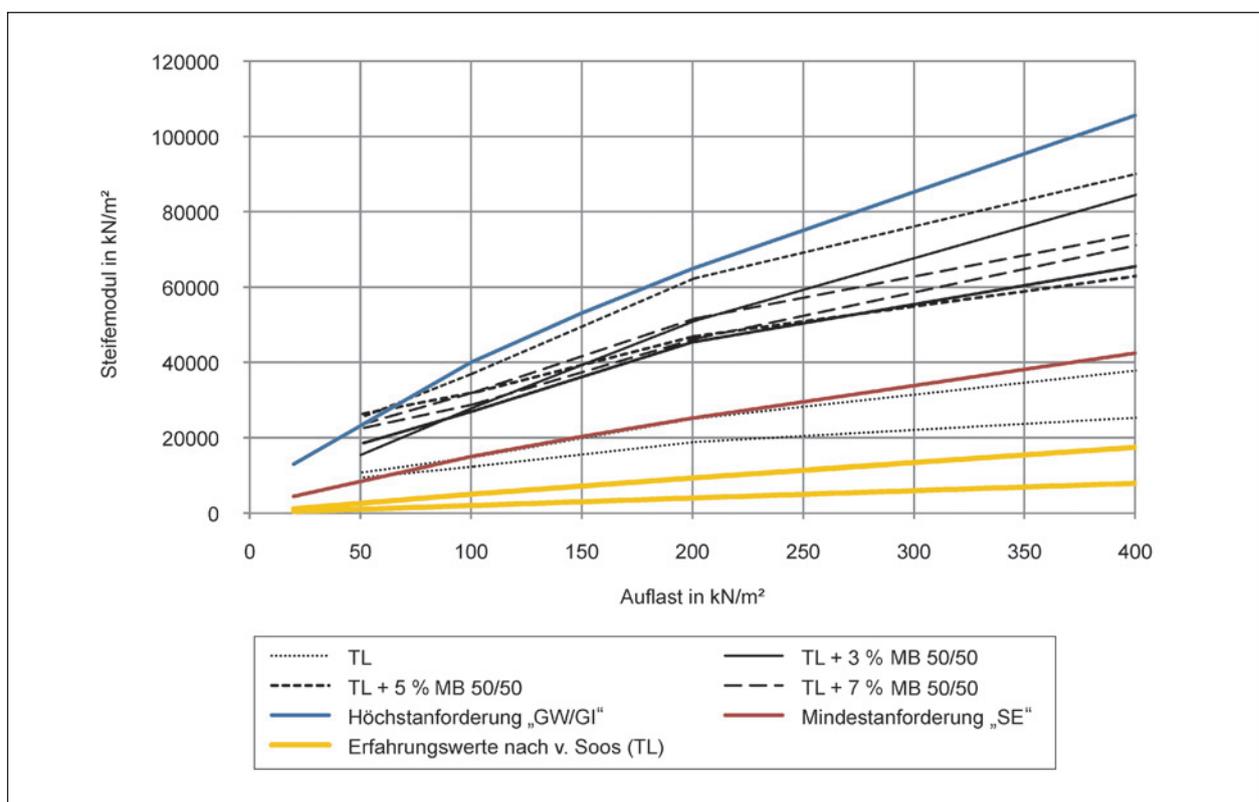


Bild 52: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Steifemodul), Boden 1 (TL) mit MB 50/50

In Bild 53 und Bild 54 erfolgt die Gleichwertigkeitsbetrachtung bzgl. des Steifemoduls auf Basis von Ausgangsboden 2 (ST*). Die Spanne der Erfahrungswerte des Ausgangsbodens 2 (ST*) ist hier

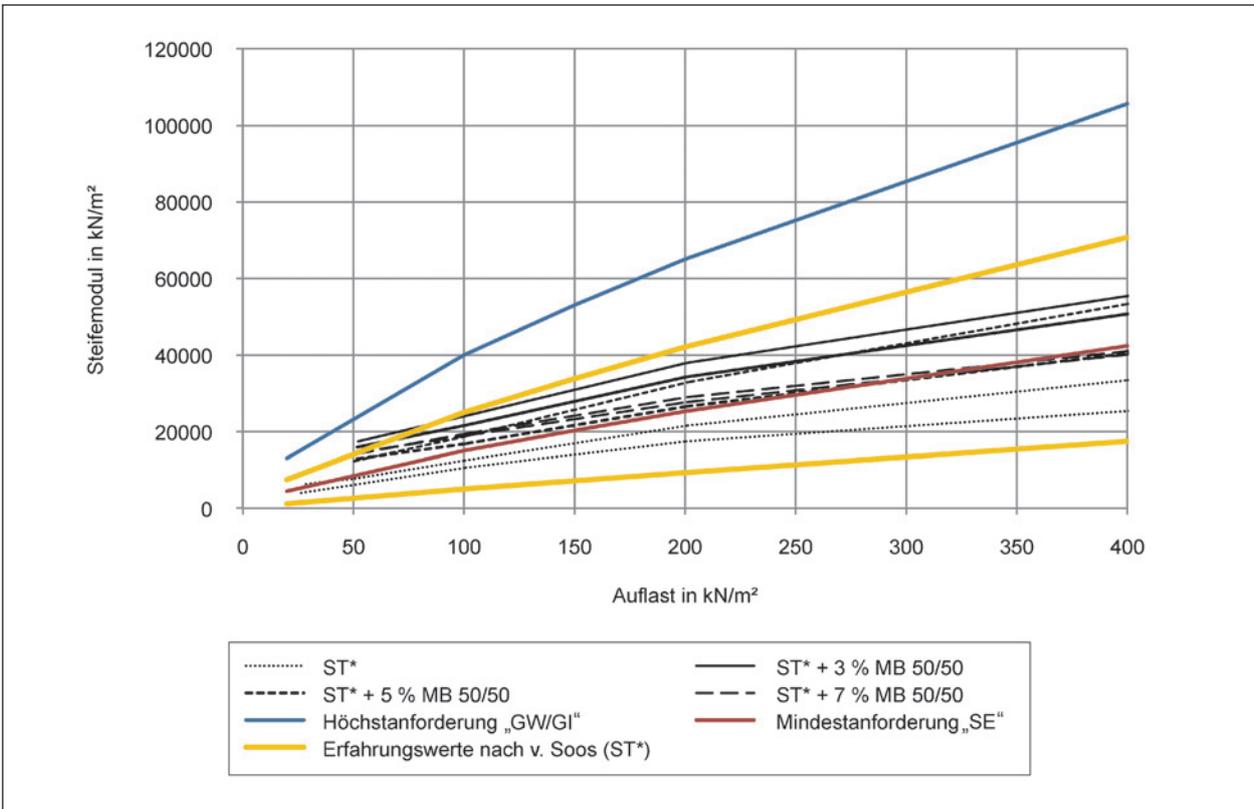


Bild 53: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Steifemodul), Boden 2 (ST*) mit MB 50/50

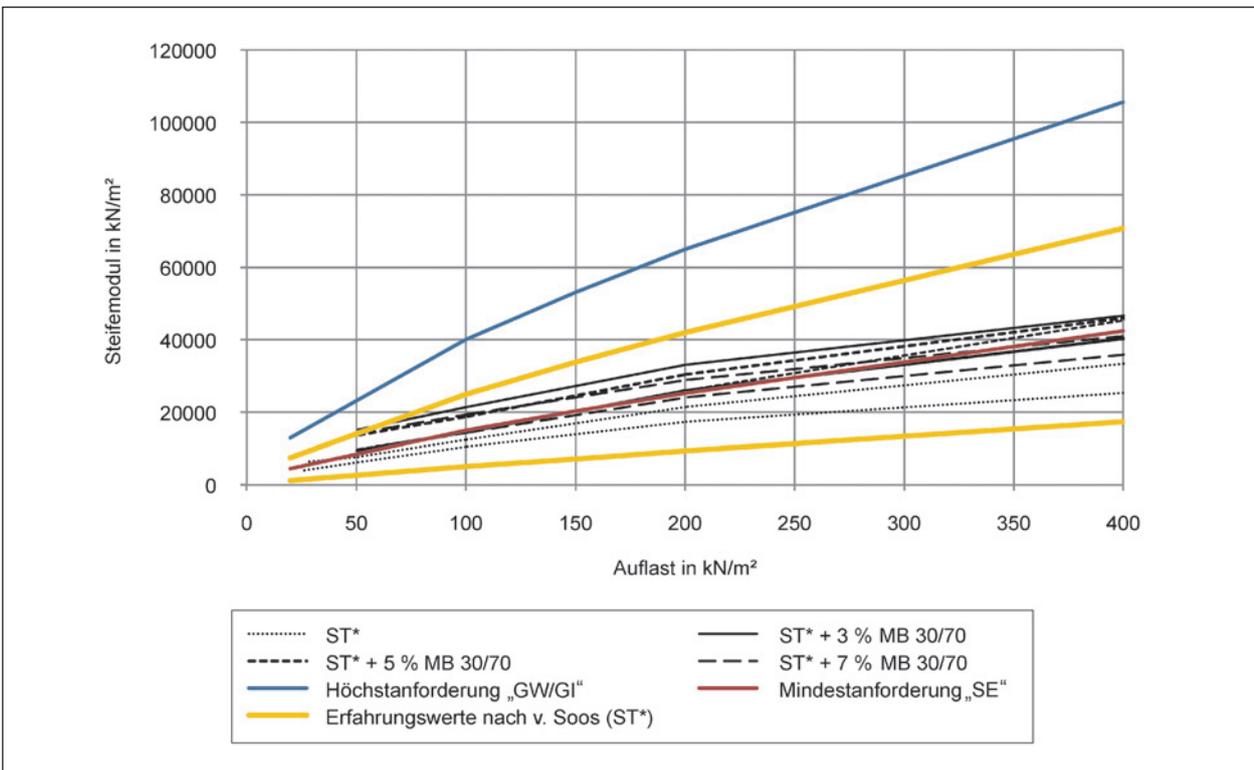


Bild 54: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Steifemodul), Boden 2 (ST*) mit MB 30/70

wesentlich größer als bei dem zuvor betrachteten Ausgangsboden 1 (TL). Die Spanne der Erfahrungswerte nach v. SOOS ist hier so groß, dass auch die Steifemoduln der untersuchten Boden-Bindemittel-Gemische innerhalb dieses Bereiches liegen. Es wurde jedoch nahezu mit jedem Versuch der definierte Mindestanforderung „SE“ des Steifemoduls bzgl. der Gleichwertigkeitsbetrachtung überschritten. Die Höchstanforderung „GW/GI“ erreichen die Versuchsergebnisse nicht.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Proben für den Ödometerversuch in auf Proctordichte verdichtetem Zustand eingebaut worden sind und die hier verwendete Mindestanforderung „SE“ der Erfahrungswerte nach v. SOOS einer locker eingebauten Probe bzw. mit einem Wassergehalt entsprechend der Fließgrenze eingebauten Probe entsprechen, kann daher nur bedingt von einer Gleichwertigkeit ausgegangen werden.

7.2.4 Rechnerische Setzungen unter statischer Belastung aus Schwerlastverkehr

Da die Versuchsergebnisse zur Ermittlung des Steifemoduls nur bedingt mit den Erfahrungswerten der herkömmlichen Hinterfüllmaterialien gleichwertig sind, wird in diesem Kapitel eine rechnerische Abschätzung der Setzung aus Schwerlastverkehr durchgeführt, um so den Einfluss des Steifemoduls im Hinterfüllbereich abschätzen zu können.

Dabei wurden die Randbedingungen so gewählt, dass lediglich der Hinterfüllbereich selbst betrachtet wurde. Folgende Vereinfachungen wurden für die Berechnung angenommen:

- Dynamische Belastungen wurden nicht berücksichtigt. Die Belastung aus Verkehr wurde als 100 % setzungswirksame statische Belastung modelliert.
- Sowohl die Gründung des hinterfüllten Bauwerkes als auch die Unstetigkeit zwischen Widerlager und Hinterfüllung wurden vernachlässigt.
- Es wurde ein quasi unverformbarer Untergrund angenommen ($E_S = 999.999 \text{ MN/m}^2$).
- Der Oberbau oberhalb des Hinterfüllmaterials wurde vernachlässigt.

Die angesetzte Belastung wurde entsprechend dem im Erdbau üblichen Lastansatz für Schwerlastverkehr im Straßenbau gemäß ATV 127 [1] gewählt.

Die hier enthaltene maximale Belastung beträgt 600 kN auf einer Fläche von 3 m x 6 m. Folglich wurde für die Setzungsberechnung eine Belastung aus Verkehr von 33,3 kN/m² angesetzt.

Die Hinterfüllung wurde mit einem mittleren Steifemodul entsprechend der angesetzten Belastung und unter Berücksichtigung des bereits vorhandenen, mittleren Spannungszustandes aus dem Eigengewicht belegt. Der mittlere Spannungszustand resultierend aus Eigengewicht mit 20 kN/m³ bei den 3 untersuchten Hinterfüllhöhen beträgt

- 30 kN/m² für 3 m Höhe,
- 50 kN/m² für 5 m Höhe und
- 100 kN/m² für 10 m Höhe.

Das Eigengewicht der Hinterfüllung wurde bei der Berechnung nicht als setzungswirksame Belastung angesetzt, sondern lediglich bei der Ermittlung des spannungsabhängigen Steifemoduls als während der Bauphase erzeugter Spannungszustand in dem Hinterfüllmaterial berücksichtigt.

Da die Ödometerversuche an Boden 1 (TL) mit dem Bindemittel CL 90 S die geringsten und mit dem Mischbindemittel 50/50 die größten Steifemodule lieferten, wurden die Ergebnisse dieser Rezepturen gewählt um den gesamten Ergebnisbereich der vorliegenden Untersuchungen zu erfassen.

Die Scherparameter wurden einheitlich zu $\varphi' = 35^\circ$ und $c' = 100 \text{ kN/m}^2$ festgelegt, da diese das Ergebnis der Setzungsberechnung nicht beeinflussen. Die Querdehnzahl wurde jeweils zu 0,3 abgeschätzt.

Die zugehörigen Eingangswerte entsprechend der beschriebenen Annahmen sind in Tabelle 11 dargestellt. Ebenfalls in Tabelle 11 dargestellt, sind die einaxialen Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen, welche an den Boden-Bindemittel-Gemischen auf Basis von Boden 1 (TL) ermittelt wurden.

Boden	Bindemittel	Höhe [m]	Steifemodul [MN/m ²]	Rechnerische Setzung [cm]
Boden 1 (TL)	CL 90 S	3	12,5	0,37
		5	15,0	0,41
		10	20,0	0,40
Boden 1 (TL)	MB 50/50	3	22,5	0,20
		5	27,5	0,22
		10	35,0	0,23

Tab. 11: Übersicht über Setzungsberechnungen

Die Setzungsberechnungen weisen alle Setzungen im Bereich von $< 0,5$ cm aus. Dies entspricht auch den Ergebnissen von SZCZYRBA [39], wonach für einen mit reinem Zement verbesserten Boden der Bodengruppen UL, ST* gemäß DIN 18196 mit einer Druckfestigkeit nach 28 Tagen von 1.260 kN/m^2 bis 1.680 kN/m^2 im Hinterfüllbereich einer Autobahnbrücke ebenfalls Setzungen der Fahrbahnoberfläche $< 0,5$ cm gemessen wurden. An dem gleichen Bauwerk wurde auch ein Referenzhinterfüllbereich nach den Anforderungen der ZTV E-StB mit grobkörnigem Material hergestellt. Die hier gemessenen Setzungen lagen sogar leicht über denen im Hinterfüllbereich mit dem bindemittelbehandelten Boden, betrug jedoch ebenfalls $< 0,5$ cm.

Unter Berücksichtigung der eingangs getroffenen Annahmen und der Messungen von SZCZYRBA, 2013 [39], wird eingeschätzt, dass die ermittelten Setzungen unproblematisch sind und eine Gleichwertigkeit zu herkömmlichen Hinterfüllmaterialien gegeben ist.

7.3 Fazit der Gleichwertigkeitsbetrachtung

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse entsprechend der Kapitel 7.1 und 7.2 ist in Tabelle 12 enthalten. Es wird eine Gleichwertigkeitsbetrachtung zu herkömmlichen gemischtkörnigen Hinterfüllmaterialien mit geringen Feinkornanteilen ($\leq 15 \text{ M.-%}$) und grobkörnigen Hinterfüllmaterialien hergestellt.

Es konnte für alle Boden-Bindemittel-Gemische eine geringere Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB [53] nachgewiesen werden.

Es konnte für alle Boden-Bindemittel-Gemische ein gleichwertiges Setzungsverhalten, aufgrund der als unproblematisch eingeschätzten rechnerischen

Setzungen, nachgewiesen werden. Die Betrachtung des Steifemoduls ergab jedoch keinen hinreichenden Anlass für den Nachweis einer gleichwertigen Steifigkeit.

Die Scherparameter aller untersuchten Boden-Bindemittel-Gemische übertreffen die des als Höchstanforderung angenommenen weit bzw. intermittierend gestuften Kieses (GW/GI) deutlich.

Folglich kann bei Anwendung einer qualifizierten Bodenverbesserung mit den hier angewendeten Bindemitteln von einer Gleichwertigkeit zu den für den Hinterfüllbereich von Bauwerken zugelassenen Böden ausgegangen werden. Es wird jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Verbesserung des Materialverhaltens bei maßgeblich kalkbasierten Bindemitteln wesentlich vom Vorhandensein von reaktionsfähigen Tonmineralen im Boden abhängt.

8 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Für die Untersuchung der Eigenschaften von mit Bindemittel qualifiziert verbesserten Böden und deren Eignung zur Anwendung im Hinterfüllbereich von Bauwerken wurden ein fein- und ein gemischtkörniger Boden ausgewählt und anhand von Klassifizierungsversuchen den Bodengruppen TL (Boden 1) bzw. ST* (Boden 2) gemäß DIN 18196 zugeordnet.

Beide Böden wurden unter Verwendung von je 2 Bindemittelarten untersucht. Die Untersuchungen an Boden 1 (TL) erfolgten mit einem Weißkalkhydrat sowie einem Mischbindemittel 50/50 (50 % Weißkalkhydrat/50 % Zement). Boden 2 (ST*) wurde mit den Mischbindemitteln 50/50 und 30/70 untersucht. Zusätzlich wurden stichprobenartig

Ausgangsboden	Bindemittel	Gleichwertigkeit vorhanden, in Bezug auf			
		Frostempfindlichkeit (Kapitel 7.1)	Scherparameter (Kapitel 7.2.2)	Steifigkeit (Kapitel 7.2.3)	rechnerische Setzung (Kapitel 7.2.4)
Boden 1 (TL)	CL 90 S	ja (F3 → F2)	ja ($> \text{GW/GI}$)	nein	ja
	MB 50/50	ja (F3 → F2)	ja ($> \text{GW/GI}$)	ja (SE-GW/GI)	ja
Boden 2 (ST*)	MB 50/50	ja (F3 → F2)	ja ($> \text{GW/GI}$)	bedingt (SE)	ja
	MB 30/70	ja (F3 → F2)	ja ($> \text{GW/GI}$)	bedingt (SE)	ja

Tab. 12: Zusammenfassung der Gleichwertigkeitsbetrachtung

Mischbindemittel 50/50 sowie 30/70 auf Basis von Weißkalk verwendet, um die Wirkung der Bindemittelarten zu vergleichen.

Es wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm mit ca. 360 Laborversuchen an den Boden-Bindemittel-Gemischen durchgeführt, um die folgenden Eigenschaften zu bestimmen, welche zuvor ebenfalls für die jeweiligen Ausgangsböden bestimmt worden sind:

- Plastizitätsgrenzen,
- Proctordichte und optimaler Wassergehalt,
- California Bearing Ratio (CBR), statisch und dynamisch,
- einaxiale Druckfestigkeit,
- lastabhängiger Steifemodul,
- Scherparameter mittels Triaxialversuchen.

Die maximale Lagerungszeit im Feuchtraum betrug 28 Tage. Teilweise wurde die zeitliche Entwicklung der mechanischen Eigenschaften durch Versuchsdurchführung nach 1 Tag und nach 7 Tagen Feuchtraumlagerung untersucht.

Zusammenfassend konnten folgende Veränderung bzgl. der genannten Eigenschaften festgestellt werden:

1. Die Wassergehalte der Plastizitätsgrenzen wurden bei dem Boden mit maßgebend plastischen Eigenschaften (Boden 1 (TL)) durch die Bindemittelzugabe deutlich erhöht (bis ca. 6%-Punkte), bei gleichzeitiger Reduzierung der Plastizität. Die Plastizität bei Boden 2 (ST*) ohne maßgeblich plastische Eigenschaften wurde diese durch die Bindemittelzugabe entsprechend geringfügig beeinflusst.
2. Der für eine Verdichtung optimale Wassergehalt wurde durch die Bindemittelzugabe bei Boden 1 (TL) um bis ca. 6%-Punkte erhöht, bei Boden 2 (ST*) lediglich um ca. 2%-Punkte (vgl. vorhergehenden Absatz).
3. Mit Weißkalkhydrat konnte bei Boden 1 (TL) eine anfängliche Steigerung der einaxialen Druckfestigkeit und des CBR-Wertes erreicht werden. Ein weiterer Festigkeitszuwachs bis zu einer Lagerungszeit von 28 Tag war lediglich bei der einaxialen Druckfestigkeit feststellbar. Weiterhin findet keine signifikante Entwicklung des

Steifemoduls statt. Ein eindeutiger Zusammenhang zum Bindemittelgehalt wurde nicht beobachtet.

4. Mit den Mischbindemitteln mit Zementanteil wurden CBR-Werte, einaxiale Druckfestigkeiten und Steifemoduln festgestellt, die ein Vielfaches des jeweiligen Wertes des jeweiligen Ausgangsbodens betragen. Dabei erzielten größere Bindemittelmengen zumeist einen höheren CBR-Wert bzw. eine größere einaxiale Druckfestigkeit.
5. Der Steifemodul der Ausgangsböden konnte durch die Bindemittelzugabe meist nur in geringem Maße erhöht werden. Eine Abhängigkeit von der Bindemittelart oder -menge konnte hier nicht beobachtet werden.
6. Bei der Ermittlung der Scherparameter wurde festgestellt, dass es bereits bei Zugabe von Weißkalkhydrat bei Boden 1 (TL) zu einer erheblichen Steigerung der Kohäsion und des Reibungswinkels kommt. Bei Mischbindemitteln mit Zementanteil wird diese Entwicklung noch übertraffen.
7. Der Vergleich der Mischbindemittel mit Weißkalk und Weißkalkhydrat im einaxialen Druckversuch macht deutlich, dass bzgl. der erreichbaren Festigkeiten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bindemittelarten bestehen.

Mit diesen Ergebnissen wurde ein Vergleich der Boden-Bindemittel-Gemische mit herkömmlichen Hinterfüllmaterialien (Bodengruppen SE und GW/GI gemäß DIN 18196) vorgenommen. Es wurde gezeigt, dass bei Anwendung einer qualifizierten Bodenverbesserung mit den hier angewendeten Bindemitteln und Böden deutlich günstigere Scherparameter zu den für den Hinterfüllbereich von Bauwerken zugelassenen, herkömmlichen grobkörnigen Böden ausgegangen werden.

Bei Betrachtung der erreichten Steifemoduln konnte eine Gleichwertigkeit nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Um die Auswirkungen dessen weiter zu Untersuchungen, wurden Setzungsberechnungen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass für die im Labor ermittelten Steifemoduln bei allen Modellierungen rechnerische Setzungen innerhalb des Hinterfüllbereichs von < 0,5 cm vorliegen, welche als unproblematisch eingeschätzt wurden. Daher ist auch hier eine Gleichwertigkeit gegeben.

9 Handlungsempfehlung

9.1 Allgemeines und Erfahrung aus dem Forschungsvorhaben

Für die Eignungsuntersuchung existieren bereits die folgenden Technischen Prüfvorschriften:

- TP BF-StB Teil B 11.1 [40] für Bodenverfestigungen mit Bindemittel,
- TP BF-StB Teil B 11.3 [41] für Bodenverbesserungen mit Bindemittel.

Neben dem Proctorversuch, zur Bestimmung der veränderten Verarbeitbarkeit des Boden-Bindemittel-Gemisches, sind besonders einaxiale Druckversuche zur Bestimmung der erreichbaren Qualität der Bindemittelbehandlung bzw. der erforderlichen Bindemittelmenge für das Erreichen der projektspezifischen Anforderungen in den genannten Technischen Prüfvorschriften enthalten. Nach TP BF-StB Teil B 11.3 [41] können alternativ statische CBR-Versuche zur Prüfung bei qualifizierten Bodenverbesserungen angewendet werden.

Wie in bereits in Kapitel 7.1, Bild 43 bis Bild 46 zu erkennen, befinden sich die gemittelten Ergebnisse der statischen CBR-Versuche weit oberhalb der Anforderung von 40 %. Die einaxialen Druckversuche liegen wesentlich näher an der dargestellten Anforderung von 500 kN/m² und werden somit als auf der sicheren Seite liegend bewertet. Des Weiteren ist eine Abnahme des CBR-Wertes nach Wasserlagerung, wie in Kapitel 6.3 dargestellt, quasi nicht vorhanden. Bei den einaxialen Druckversuchen wird bei der Wasserlagerung eine entsprechende Wasseraufnahme ermöglicht, wodurch die Probe eine geringere einaxiale Druckfestigkeit aufweist. Daher liegen auch hier die einaxialen Druckversuche auf der sicheren Seite.

Weitere Versuche wie Bestimmung der Steifigkeit oder Bestimmung der Scherparameter werden in den aufgeführten Technischen Prüfbedingungen zwar genannt, jedoch nicht weiter ausgeführt. Auch in den jeweiligen Versuchsnormen werden keine Hinweise für die Untersuchung von Boden-Bindemittel-Gemischen gegeben. Anhand der Erfahrung der hier durchgeführten Laborversuche kann jedoch die Aussage getroffen werden, dass sich die in den Kapiteln 4.6 und 4.7 beschriebene Vorgehensweise bewährt hat.

9.2 Ableitbare Aussagen aus der einaxialen Druckfestigkeit von Boden-Bindemittel-Gemischen

9.2.1 Scherparameter

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit anhand der einaxialen Druckfestigkeit die Scherparameter über die Fließbedingung nach Mohr-Coulomb zu ermitteln. Dies geschieht über die Beziehung nach Gleichung (1).

$$c = 0,5 \cdot q_u \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \right) \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei sind

c die Kohäsion,

q_u die einaxiale Druckfestigkeit und

φ der Reibungswinkel.

Zur Lösung der Gleichung wird üblicherweise der effektive Reibungswinkel φ' angenommen. In der Praxis wird nicht selten ein Reibungswinkel des Ausgangsbodens innerhalb der Spanne der Erfahrungswerte gewählt und unverändert auf das Boden-Bindemittel-Gemisch übertragen. Dass diese Annahme von dem tatsächlichen Materialverhalten abweicht, konnte bereits in Kapitel 6.6 mit der Dokumentation des deutlichen Anstiegs des Reibungswinkels gezeigt werden. Ein geringer gewählter Reibungswinkel wirkt sich als entsprechend überhöhte Kohäsion aus.

Ein weiterer Grund für ein überhöhtes Resultat bei der Ermittlung der Kohäsion, ist die Art der Versuchsdurchführung. Infolge der Belastungsgeschwindigkeit entstehen in der Regel Porenwasserüberdrücke in der teilgesättigten Bodenprobe. Diese Porenwasserüberdrücke werden bei dem einaxialen Druckversuch nicht erfasst. Diese Porenwasserüberdrücke wirken aber der aufgebrachten Belastung entgegen, wodurch eine größere einaxiale Druckfestigkeit ermittelt wird, als dies bei vollständig drainierten Verhältnissen der Fall wäre. Werden also aus dieser einaxialen Druckfestigkeit die Scherparameter ermittelt, handelt es sich dabei in der Regel nicht um die effektiven Scherparameter. Die in statischen Bemessungen anzusetzenden, effektiven Scherparameter sind teilweise deutlich kleiner.

In Tabelle 13 und Tabelle 14 ist die rechnerisch ermittelte Kohäsion für die einaxialen Druckfestigkei-

Boden- Bindemittel- Gemisch	Einaxiale Druckfestigkeit	Mittlerer Reibungs- winkel gemäß Labor	Mittlere Kohäsion gemäß Labor	Rechnerische Kohäsion
	[kN/m ²]			[°]
Boden 1 (TL) + 3 % CL 90 S	643,0	32,0	115,5	178,2
	694,7			192,5
	900,0			249,4
Boden 1 (TL) + 5 % CL 90 S	669,4	37,0	150,0	166,9
	719,8			179,4
	1.000,0			249,3
Boden 1 (TL) + 7 % CL 90 S	528,5	39,2	127,5	125,5
	700,8			166,4
	800,0			189,9
Boden 1 (TL) + 3 % MB 50/50	1.063,0	44,7	200,1	221,8
	1.100,0			229,5
	1.400,0			292,1
Boden 1 (TL) + 5 % MB 50/50	1.079,3	40,1	230,0	251,1
	1.111,5			258,6
	1.400,0			395,5
Boden 1 (TL) + 7 % MB 50/50	1.322,4	42,6	271,0	290,2
	1.324,0			290,6
	1.700,0			395,1

Tab. 13: Übersicht der Ergebnisse der rechnerischen Ermittlung der Kohäsion, Boden 1 (TL)

Boden- Bindemittel- Gemisch	Einaxiale Druckfestigkeit	Mittlerer Reibungs- winkel gemäß Labor	Mittlere Kohäsion gemäß Labor	Rechnerische Kohäsion
	[kN/m ²]			[°]
Boden 2 (ST*) + 3 % MB 50/50	630,3	39,4	135,0	149,0
	662,5			156,6
	650,0			153,6
Boden 2 (ST*) + 5 % MB 50/50	904,4	42,1	142,5	200,9
	962,4			213,7
	1.060,0			235,4
Boden 2 (ST*) + 7 % MB 50/50	1.734,3	44,4	152,5	364,5
	177,4			372,7
	1.350,0			283,7
Boden 2 (ST*) + 3 % MB 30/70	1.094,8	39,5	155	258,2
	1.132,7			267,1
	990,0			233,5
Boden 2 (ST*) + 5 % MB 30/70	1.858,1	42,5	185,0	408,8
	1.949,5			428,9
	1.120,0			246,4
Boden 2 (ST*) + 7 % MB 30/70	1.898,7	44,3	242,5	400,0
	2.172,8			457,8
	720,0			151,7

Tab. 14: Übersicht der Ergebnisse der rechnerischen Ermittlung der Kohäsion, Boden 2 (ST*)

ten der jeweiligen Boden-Bindemittel-Gemische im Alter von 28 Tagen dargestellt. Dabei wurde der im Labor ermittelte, mittlere Reibungswinkel für die Berechnung verwendet. Die im Labor ermittelten, mittleren Scherparameter (Reibungswinkel und Kohäsion) sind ebenfalls in Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt. Es wird deutlich, dass zwischen der im Labor ermittelten Kohäsion und der rechnerischen Kohäsion teilweise deutliche Abweichungen aus den bereits genannten Gründen bestehen. Die Abweichungen nehmen mit steigender Druckfestigkeit zu, wie Bild 55 deutlich zeigt.

Die Berechnung der Kohäsion unter Vernachlässigung der Porenwasserüberdrücke der teilgesättigten Probe liegt demnach auf der unsicheren Seite. Da die Probe allerdings nur teilgesättigt ist, sind die Porenwasserüberdrücke geringer als bei einer vollgesättigten Probe. Folglich liegt die Ermittlung der undrainierten Kohäsion c_u durch geringere Porenwasserüberdrücke und einer damit geringeren gemessenen einaxialen Druckfestigkeit auf der sicheren Seite. Mit einem undrainierten Reibungswinkel $\varphi_u = 0^\circ$ ergibt sich die undrainierte Kohäsion auf Basis von Gleichung (1) aus Gleichung (2).

$$c_u = 0,5 \cdot q_u \quad (\text{Gl. 2})$$

In Bild 56 sind die Verhältnisse der rechnerischen undrainierten Kohäsion zu der im Labor ermittelten effektiven Kohäsion des jeweiligen Boden-Bindemittel-Gemisches in Abhängigkeit der Druckfestigkeit dargestellt. Es wurden überwiegend Verhältnisse zwischen 2 und 4 ermittelt. Auch hier, analog zu Bild 55, steigt das Verhältnis mit zunehmender Druckfestigkeit auf bis zu 6 an.

Für die Ermittlung der effektiven Scherparameter wurde aus den oben genannten Gründen die Möglichkeit einer empirischen Vorgehensweise unter-

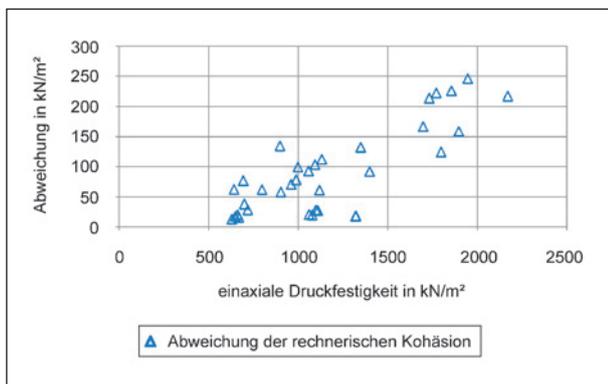


Bild 55: Abweichungen der rechnerischen Kohäsion von der im Labor ermittelten Kohäsion

sucht. Die Grundlage bilden die Ergebnisse der Laborversuche im Zuge dieses Forschungsvorhabens.

Hierzu wurden zunächst alle ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen als Mittelwert für das jeweilige Boden-Bindemittel-Gemisch aufgetragen und anhand deren Verteilung in 3 Druckfestigkeitsbereiche unterteilt. Die untere Bereichsgrenze entspricht dabei den Anforderungen der ZTV E-StB von 500 kN/m² gemäß Kapitel 2.5. Diese Darstellung ist in Bild 57 enthalten.

Es ergeben sich nachfolgende Bereiche:

Bereich 1 ist gültig für eine Druckfestigkeit von 500 kN/m² bis 900 kN/m² und enthält die folgenden Boden-Bindemittel-Gemische:

- Boden 1 (TL), Bindemittel CL 90 S, Bindemittelgehalt 3 %, 5 %, 7 %,
- Boden 2 (ST*), Bindemittel MB 50/50, Bindemittelgehalt 3 %.

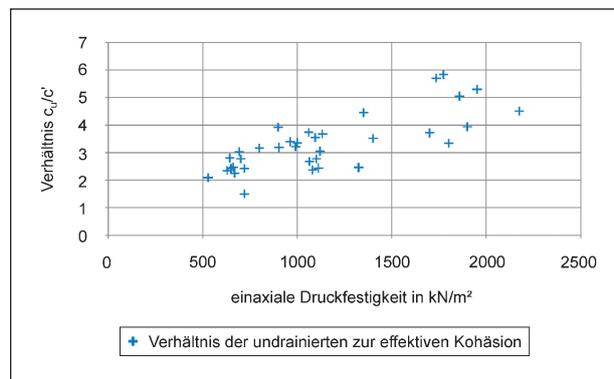


Bild 56: Verhältnis der rechnerischen undrainierten Kohäsion zur effektiven Kohäsion

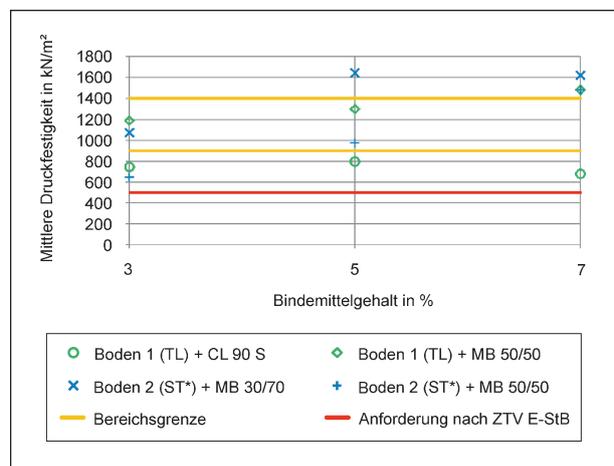


Bild 57: Definition der Druckfestigkeitsbereiche

Bereich 2 ist gültig für eine Druckfestigkeit von 900 kN/m² bis 1.400 kN/m² und enthält die folgenden Boden-Bindemittel-Gemische:

- Boden 1 (TL), Bindemittel MB 50/50, Bindemittelgehalt 3 %, 5 %,
- Boden 2 (ST*), Bindemittel MB 30/70, Bindemittelgehalt 3 %,
- Boden 2 (ST*), Bindemittel MB 50/50, Bindemittelgehalt 5 %.

Bereich 3 ist gültig für eine Druckfestigkeit größer 1.400 kN/m² und enthält die folgenden Boden-Bindemittel-Gemische:

- Boden 1 (TL), Bindemittel MB 50/50, Bindemittelgehalt 7 %,
- Boden 2 (ST*), Bindemittel MB 30/70, Bindemittelgehalt 5 %, 7 %,
- Boden 2 (ST*), Bindemittel MB 50/50, Bindemittelgehalt 7 %.

Darauf aufbauend, ist in Bild 58 die bereichsweise je Probe ermittelte maximale Scherfestigkeit als maximale deviatorische Belastung über der isotropen Belastung dargestellt. Zwischen den einzelnen

Boden-Bindemittel-Gemischen wurde dabei nicht unterschieden. Lediglich vereinzelte Ausreißer mit einer Abweichung von > 20 % von der ursprünglichen Trendlinie je Bereich wurden nicht in die Auswertung mit einbezogen. Diese sind ebenfalls in Bild 58 enthalten. Anhand dieser bereichsweisen, linearen Ausgleichsgeraden werden die Scherparameter für eine bestimmte Spanne der Druckfestigkeit abgeleitet.

Demnach können für die 3 Bereiche folgende Scherparameter abgeleitet werden:

- Bereich 1 (500 kN/m² bis 900 kN/m²):
 $\varphi' = 38,5^\circ$, $c' = 81,9$ kN/m²
- Bereich 2 (900 kN/m² bis 1.400 kN/m²):
 $\varphi' = 40,3^\circ$, $c' = 126,7$ kN/m²
- Bereich 3 (ab 1.400 kN/m²):
 $\varphi' = 38,9^\circ$, $c' = 209,8$ kN/m²

Die definierten Bereiche können ebenfalls auf die rechnerische undrainierte Kohäsion übertragen werden, wie in Bild 59 dargestellt ist. Daher können auch für die Verhältniszerte zwischen undrainierter und effektiver (drainierter) Scherfestigkeit einzelnen Druckfestigkeitsspannen zugeordnet werden.

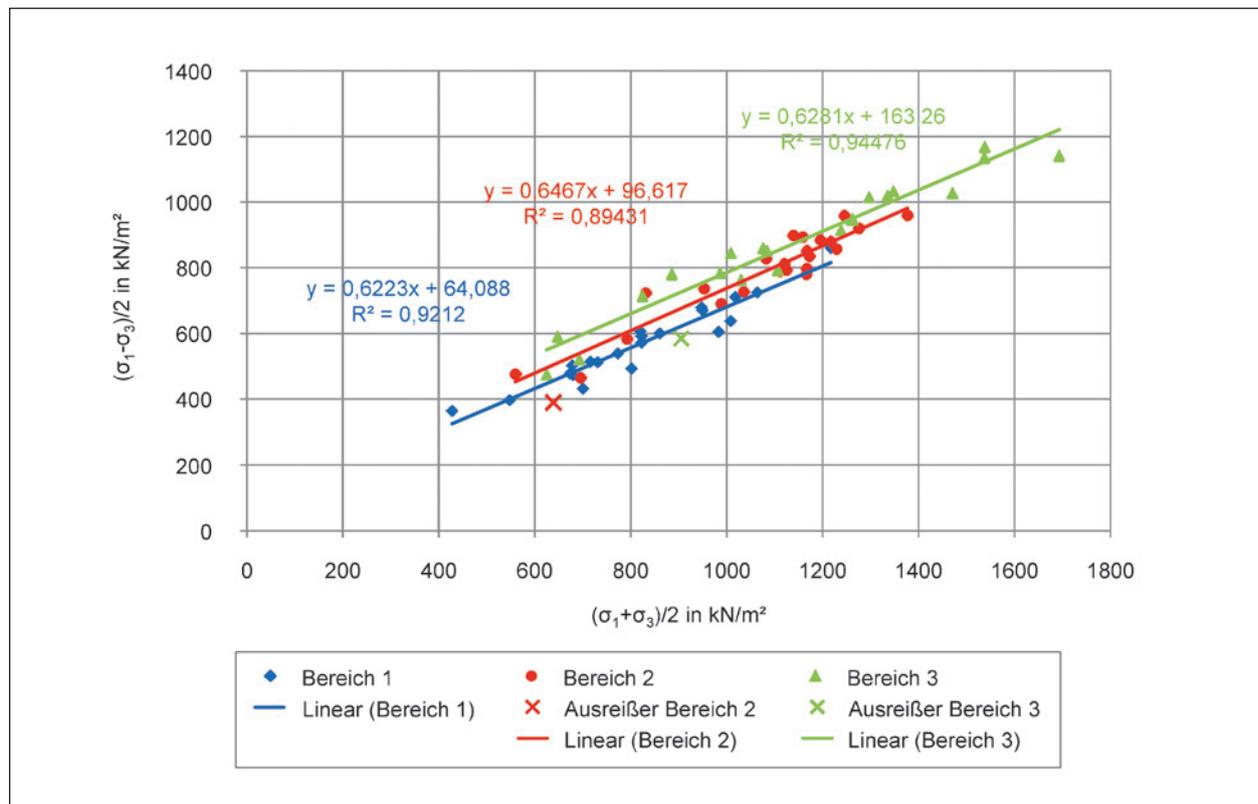


Bild 58: Bereichsweise Ermittlung der Scherparameter

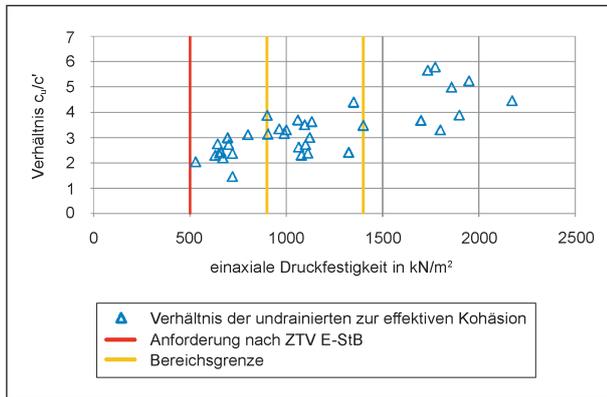


Bild 59: Bereichsweise Ermittlung der undrainierten Kohäsion

Unter Berücksichtigung der je Boden-Bindemittel-Gemisch ermittelten Scherparameter gemäß Kapitel 6.6 und der hier durchgeführten Versuche, werden für die 3 Druckfestigkeitsbereiche folgende Scherparameter als prinzipiell erreichbar angegeben:

- Bereich 1 (500 kN/m² bis 900 kN/m²):
 $\varphi' = 35^\circ$, $c' = 75 \text{ kN/m}^2$, $c_u/c' = 2$ bis 3
- Bereich 2 (900 kN/m² bis 1.400 kN/m²):
 $\varphi' = 36^\circ$, $c' = 120 \text{ kN/m}^2$, $c_u/c' = 2$ bis 4
- Bereich 3 (ab 1.400 kN/m²):
 $\varphi' = 38^\circ$, $c' = 200 \text{ kN/m}^2$, $c_u/c' = 3$ bis 6

9.2.2 Steifigkeit

Aufgrund der unterschiedlichen Beobachtungen zwischen den einaxialen Druckversuchen und in Ödometerversuchen (entsprechend der Kapitel 6.4 und 0) können keine direkten Rückschlüsse auf die Steifemoduln der Boden-Bindemittel-Gemische in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit gezogen werden.

Mit nachfolgender Vorgehensweise kann jedoch bei bekanntem Spannungs-Verformungs-Verlauf von einaxialen Druckversuchen der Steifemodul grob abgeschätzt werden:

- Die Steifemoduln aus den einaxialen Druckversuchen können mit Gleichung (3) überschlagen werden:

$$E_u = E_s \cdot \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) \quad (\text{Gl. 3})$$

Dabei sind:

- E_u der Steifemodul bei ungehinderter Seitendehnung,

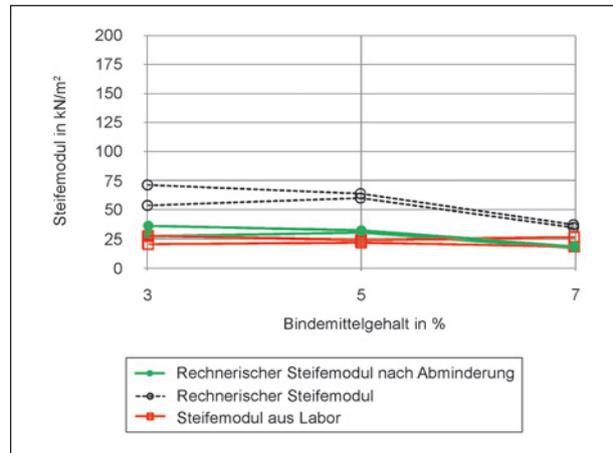


Bild 60: Rechnerische und labortechnisch ermittelte Steifemoduln, Boden 1 (TL) mit CL 90 S

- E_s der Steifemodul bei verhinderter Seitendehnung und
- ν die Querdehnzahl.
- E_u wird aus Anteilen der jeweiligen Bruchspannung und der zugehörigen Stauchung ermittelt. In [47] wird die Verwendung von 30 % der Bruchspannung genannt bzw. eine Bruchspannung in Abhängigkeit des Spannungs-Verformungs-Verlaufs.
- Die Querdehnzahl muss abgeschätzt werden. Hier wurde $\nu = 0,3$ gewählt.
- Da der einaxiale Druckversuch durch eine hohe Belastungsgeschwindigkeit, eine üblicherweise teilgesättigte Probe und einer ermöglichten Seitendehnung deutlich von den Randbedingungen des Ödometerversuchs abweicht, sollte der aus der einaxialen Druckfestigkeit ermittelte Steifemodul abgemindert werden. Hier wurde der Abminderungsfaktor 0,5 gewählt.

Der Vergleich der rechnerisch (entsprechend genannter Vorgehensweise) ermittelten Steifemoduln mit den im Labor ermittelten Steifemoduln erfolgt in Bild 60 bis Bild 63. Der in diesen Bildern dargestellte labortechnisch ermittelte Steifemodul wurde aus den Ödometerversuchen über Interpolation zwischen den nächstgelegenen Belastungsstufen ermittelt.

Es wird deutlich, dass für die hier verwendeten Boden-Bindemittel-Gemische mit der Ableitung des Steifemoduls aus den einaxialen Druckversuchen unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors von 0,5 in Bezug zu den im Labor ermittelten Steifemoduln überwiegend eine gute Näherung darstellt.

Daher wird dieses Vorgehen für eine grobe Abschätzung des Steifemoduls auf Basis von einaxialen Druckversuchen als geeignet angesehen.

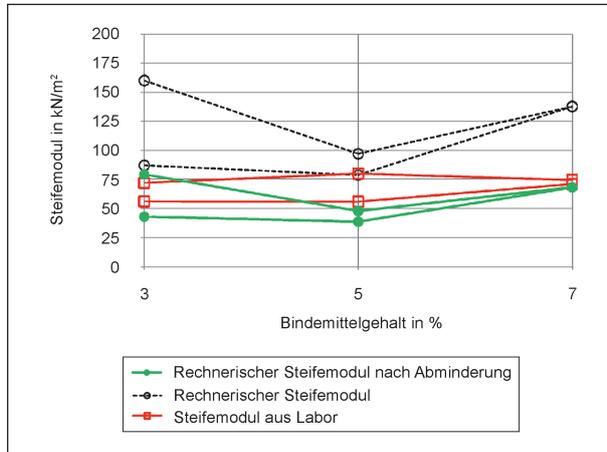


Bild 61: Rechnerische und labortechnisch ermittelte Steifemoduln, Boden 1 (TL) mit MB 50/50

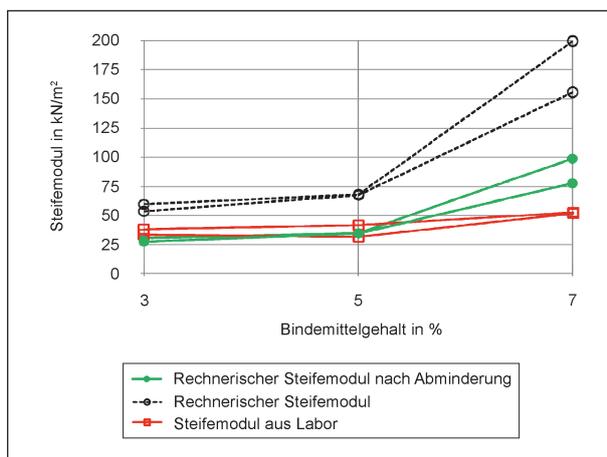


Bild 62: Rechnerische und labortechnisch ermittelte Steifemoduln, Boden 2 (ST*) mit MB 50/50

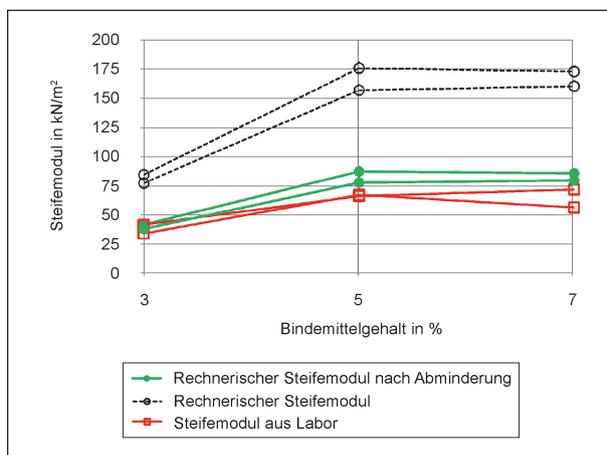


Bild 63: Rechnerische und labortechnisch ermittelte Steifemoduln, Boden 2 (ST*) mit MB 30/70

Bei hohen Druckfestigkeiten in Verbindung mit geringen Stauchungen, kann es sinnvoll sein, einen noch kleineren Abminderungsfaktor zu wählen. Darauf deutet die teils deutliche Überschätzung des aus den einaxialen Druckversuchen abgeleiteten Steifemoduls in Bild 62 (hier bei 7 % Bindemittelgehalt) und Bild 63 (hier bei 5 % und 7 % Bindemittelgehalt) hin. Bei diesen Rezepturen auf Basis Boden 2 mit einem Zementanteil von $\geq 3,5$ % bezogen auf das Bodenmaterial wurden Druckfestigkeiten > 1.700 kN/m² ermittelt.

9.3 Empfehlungen für eine Prüfanleitung

Auf Basis der Erfahrungen während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens, welche in Kapitel 9.1 nochmals dargestellt wurden, werden die folgenden Empfehlungen für eine Prüfanleitung basierend auf den TP BF-StB Teil B 11 ([40], [41]) gegeben.

- Bei den für die Untersuchung der Ausgangsböden genannten Prüfungen in den technischen Prüfvorschriften sind keine Anpassungen erforderlich.
- Proctorversuche für die Bestimmung der veränderten Verarbeitbarkeit der Boden-Bindemittel-Gemische sind mit der derzeit vorgeschriebenen Vorgehensweise zielführend und ausreichend.
- Für die Prüfung der erreichbaren Materialparameter der qualifizierten Bodenverbesserung, sollten einaxiale Druckversuche verwendet werden. Hierbei sollte der Festigkeitsabfall nach Wasserlagerung ebenfalls untersucht werden. Anpassungen an die Versuchsdurchführung sind nicht erforderlich.

Von der Durchführung der CBR-Versuche alternativ zu den einaxialen Druckversuchen wird, aus den in Kapitel 9.1 genannten Gründen, abgeraten.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass anhand der einaxialen Druckfestigkeit die Scherparameter und Steifemoduln plausibel abgeschätzt werden können, so dass die in Kapitel 9.2 erläuterten Vorgehensweisen für Standardfälle in der Praxis angewendet werden können.

Für eine sicherere Ableitung der Scherparameter und des Steifemoduls aus den einaxialen Druckver-

suchen besteht weiterhin die Möglichkeit der Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit bei der Durchführung von einaxialen Druckversuchen, um hohe Porenwasserüberdrücke zu vermeiden. Optimaler Weise würde sich hier die Vorschubgeschwindigkeit mit 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ im Bereich des erfahrungsgemäßen Durchlässigkeitsbeiwertes von 10^{-6} m/s bis 10^{-7} m/s von gemischtkörnigen Böden befinden.

Da mit den Versuchsergebnissen gezeigt werden konnte, dass alle einaxialen Druckfestigkeiten einen Wert von ≥ 500 kN/m² ausweisen und für diese Rezepturen eine Gleichwertigkeit zu den herkömmlichen grobkörnigen Hinterfüllmaterialien nachgewiesen werden konnte, wird abschließend empfohlen, die Anforderung der ZTV E-StB 09 bezüglich der Mindestdruckfestigkeit von 5 N/mm² (\cong 500 kN/m²), welche bisher für eine Verringerung der Frostempfindlichkeit gilt, als Mindestkriterium an eine qualifizierte Bodenverbesserung für den Einsatz im Hinterfüllbereich zu übernehmen. Weiterhin wird empfohlen, die Anforderung an den maximalen Festigkeitsabfall nach Wasserlagerung mit 50 % beizubehalten.

Literatur

- [1] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 „Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen“, 3. Auflage 08/2000
- [2] BOTOR, P. (2013): Projektarbeit zum Thema „Untersuchungen zum Materialverhalten und zur Tragfähigkeit von mit Bindemittel verfestigten Böden“, Technische Universität Dresden
- [3] Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V., 2004: Bodenverbesserung, Bodenverfestigung mit Kalk
- [4] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Ausgabe 08/2008
- [5] DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper; Ausgabe 06/1991
- [6] DIN 1164-10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften, 2013 (zurückgezogen)
- [7] DIN 18122-1: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze; Ausgabe 07/1997
- [8] DIN 18122-2: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Teil 2: Bestimmung der Schrumpfgrenze; Ausgabe 09/2000
- [9] DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch; Ausgabe 09/2012
- [10] DIN 18128: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Glühverlustes; Ausgabe 12/2002
- [11] DIN 18136: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Einaxialer Druckversuch, Ausgabe 11/2003
- [12] DIN 18137-2: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch; Ausgabe 04/2011
- [13] DIN 18137-3: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch; Ausgabe 09/2002
- [14] DIN 18196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke; Ausgabe 05/2011
- [15] DIN 18506: Hydraulische Boden- und Tragschichtbinder: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien, 2002 (zurückgezogen)
- [16] DIN EN 197-1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- [17] DIN EN 1991-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, 2010
- [18] DIN EN 459: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien, 2013
- [19] DIN EN ISO 14688-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung; Ausgabe 12/2013

- [20] DIN EN ISO 17892-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 1: Bestimmung des Wassergehaltes, Ausgabe 03/2015
- [21] DIN EN ISO 17892-3: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 3: Bestimmung der Korndichte, Ausgabe 06/2016
- [22] DIN EN ISO 17892-4: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Ausgabe 04/2017
- [23] DIN EN ISO 17892-5: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 5: Ödometerversuch mit stufenweiser Belastung, Ausgabe 08/2017
- [24] DIN EN ISO 17892-12 – Entwurf: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 12: Bestimmung der Zustandsgrenzen, Ausgabe 01/2017
- [25] DOMBROWSKI, K. (2003): Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton. Dissertation. F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar
- [26] GROßMANN, D. (2001): Bodenverfestigung im Bauwerkshinterfüllungsbereich; Vorschläge und Beispiele im Zuge des sechsstreifigen Ausbaues der BAB A 4. in 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau, Niederschrift der 37. Tagung am 3. und 4. Mai 2000 in Erfurt, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Straßenbau. Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wiss. Bremerhaven.
- [27] HERSEL, O.; DÜRRWANG, R.; HOTZ, C. (2007): Zementstabilisierte Böden, Anwendung, Planung, Ausführung. BetonMarketing Deutschland GmbH (Hrsg.), Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie
- [28] Holcim (Süddeutschland) GmbH (2010): Bodenbehandlung, Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln
- [29] JESSBERGER, H. L.; JORDAN, P.; EBEL, W. (1988): Verfestigung und Verbesserung feinkörniger Böden mit Kalk im Ingenieurbau, TIS 7/88
- [30] KUHL, O. (2009): Bodenbehandlung im Straßenbau Erfahrungen und Fortschreibung des Regelwerks, GBB 4. Fachtagung Zementstabilisierte Böden, Walsrode
- [31] KRAJEWSKI, W.; KUHL, O. (2005): Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 43
- [32] LOTTMANN, A.; WIENBERG, N.; KÖNIG, M. (2008): Verringerung der Frostempfindlichkeit von Böden durch die Behandlung mit Branntkalk und Kalkhydrat, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 990
- [33] Merkblatt über Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2004
- [34] Merkblatt über den Einfluss der Hinterfüllung auf Bauwerke, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1994
- [35] Merkblatt zur Herstellung, Wirkungsweise und Anwendung von Mischbindemitteln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2012
- [36] Richtzeichnungen für Ingenieurbauten RiZ-ING, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr.
- [37] Ril 836 – Erdbauwerk planen, bauen und instand halten, 4. Aktualisierung 2014, Deutsche Netz AG
- [38] SCHADE, H.-W. (2006): Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Mischbindemitteln zur Bodenbehandlung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 939
- [39] SZCZYRBA, S. (2013): Dissertation „Setzungsarme Bauweisen im Hinterfüllbereich von Brückenwiderlagern“, Technische Universität Bergakademie Freiberg
- [40] TP BF-StB Teil B 11.1: Eignungsprüfungen für Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2012
- [41] TP BF-StB Teil B 11.3: Eignungsprüfung bei Bodenverbesserungen mit Bindemitteln,

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2010

- [42] TP BF-StB Teil B 7.1: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), Ausgabe 2012
- [43] TP BF-StB Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgerät, Ausgabe 2012
- [44] TP Gestein-StB Teil 5.6: Bestimmung der Festigkeit – Dynamischer CBR-Versuch, Ausgabe 2008
- [45] VOGEL, W. (2003): Maßnahmen zur Setzungsverminderung an Brückenübergängen. In: Erd- und Grundbautagung 2003, Vorträge der FGSV-Tagung „Erd- und Grundbau“ am 12. und 13. März 2003 in Stade
- [46] WICHTER, L.; LOTTMANN, A. (2004): Einflüsse des Gebrauchsverhaltens kalkbehandelter frostempfindlicher Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen auf den frostsicheren Oberbau, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 895
- [47] WITT, K. J. (Hrsg.) (2008): Grundbau-Taschenbuch, Band 1: Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage, Verlag: Ernst & Sohn, Berlin
- [48] WITT, K. J.; DAMASCHKE, A. (2013): Dosis-effekt-Beziehung bei der Bodenbehandlung mit Mischbindemitteln, GBB 8. Fachtagung Bodenbehandlung mit Bindemittel, Magdeburg 01/2013
- [49] WITT, K. J.; KÖDITZ, J.; DAMASCHKE, A. (2014): Untersuchung der Eignung von Mischbindemitteln für Bodenverfestigungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1105, 02/2014
- [50] WITT, K. J. (2012): Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln. Vorträge zur 8. Erdbaufachtagung Leipzig, Bauakademie Sachsen, S. 181-194
- [51] WITT, K. J. (2012): Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln, 8. Erdbaufachtagung, Leipzig, 2012
- [52] WITT, K. J. (2002): Zement-Kalk-Stabilisierung von Böden. Geotechnikseminar Weimar 2002. In: SCHANZ, WITT (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik, Heft 7, S. 1-12. Bauhaus-Universität Weimar Universitätsverlag, 2002
- [53] ZTV E-StB 09: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Ausgabe 2009

Bilder

- Bild 1: Wirkungsprinzip von Mischbindemitteln, Quelle: [52]
- Bild 2: Beispielhafte Ausbildung des Hinterfüllbereichs in Anlehnung an RIZ-ING, Was 7 [36]
- Bild 3: Zonen I und II im Hinterfüllbereich gemäß Ril 836 [37]
- Bild 4: Versuchsaufbau – statischer CBR-Versuch
- Bild 5: Versuchsaufbau – dynamischer CBR-Versuch
- Bild 6: Versuchsaufbau – einaxialer Druckversuch
- Bild 7: Kornverteilung von Ausgangsboden 1 (TL)
- Bild 8: Plastizitätsdiagramm von Ausgangsboden 1 (TL)
- Bild 9: Proctorkurve und Sättigungslinie von Ausgangsboden 1 (TL)
- Bild 10: Ergebnisse des Ödometerversuchs an Ausgangsboden 1 (TL)
- Bild 11: Kornverteilung von Ausgangsboden 2 (ST*)
- Bild 12: Plastizitätsdiagramm von Ausgangsboden 2 (ST*)
- Bild 13: Proctorkurve und Sättigungslinie von Ausgangsboden 2 (ST*)
- Bild 14: Ergebnisse des Ödometerversuchs an Ausgangsboden 2 (ST*)
- Bild 15: Entwicklung der Plastizitätsgrenzen der Boden-Bindemittel-Gemische mit Boden 1 (TL)

- Bild 16: Entwicklung der Plastizitätsgrenzen der Boden-Bindemittel-Gemische mit Boden 2 (ST*)
- Bild 17: Proctorkurven und Sättigungslinien von Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 18: Proctorkurven und Sättigungslinien von Boden 1 (TL) mit Mischbindemittel 50/50
- Bild 19: Proctorkurven und Sättigungslinien von Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 50/50
- Bild 20: Proctorkurven und Sättigungslinien von Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 30/70
- Bild 21: Statische CBR-Werte für Ausgangsboden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 22: Statische CBR-Werte für Ausgangsboden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 23: Statische CBR-Werte für Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 50/50
- Bild 24: Statische CBR-Werte für Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 30/70
- Bild 25: Entwicklung der dynamischen CBR-Werte von Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 26: Entwicklung der dynamischen CBR-Werte von Boden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 27: Entwicklung der dynamischen CBR-Werte von Boden 2 (ST*) mit MB 50/50
- Bild 28: Entwicklung der dynamischen CBR-Werte von Boden 2 (ST*) mit MB 30/70
- Bild 29: Einzelversuche zur einaxialen Druckfestigkeit von Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 30: Einzelversuche zur einaxialen Druckfestigkeit von Boden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 31: Einzelversuche zur einaxialen Druckfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit MB 50/50
- Bild 32: Einzelversuche zur einaxialen Druckfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit MB 30/70
- Bild 33: Vergleich der Druckfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit unterschiedlichen MB 50/50 (28 d)
- Bild 34: Vergleich der Druckfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit unterschiedlichen MB 30/70 (28 d)
- Bild 35: Einzelversuche von Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 36: Einzelversuche von Boden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 37: Einzelversuche von Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 50/50
- Bild 38: Einzelversuche von Boden 2 (ST*) mit Mischbindemittel 30/70
- Bild 39: Entwicklung der Scherfestigkeit von Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 40: Entwicklung der Scherfestigkeit von Boden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 41: Entwicklung der Scherfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit MB 50/50
- Bild 42: Entwicklung der Scherfestigkeit von Boden 2 (ST*) mit MB 30/70
- Bild 43: Verringerte Frostempfindlichkeit, Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 44: Verringerte Frostempfindlichkeit, Boden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 45: Verringerte Frostempfindlichkeit, Boden 2 (ST*) mit MB 50/50
- Bild 46: Verringerte Frostempfindlichkeit, Boden 2 (ST*) mit MB 30/70
- Bild 47: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Scherparameter), Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 48: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Scherparameter), Boden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 49: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Scherparameter), Boden 2 (ST*) mit MB 50/50
- Bild 50: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Scherparameter), Boden 2 (ST*) mit MB 30/70
- Bild 51: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Steifemodul), Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 52: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Steifemodul), Boden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 53: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Steifemodul), Boden 2 (ST*) mit MB 50/50
- Bild 54: Gleichwertigkeitsbetrachtung (Steifemodul), Boden 2 (ST*) mit MB 30/70

- Bild 55: Abweichungen der rechnerischen Kohäsion von der im Labor ermittelten Kohäsion
- Bild 56: Verhältnis der rechnerischen undrainierten Kohäsion zur effektiven Kohäsion
- Bild 57: Definition der Druckfestigkeitsbereiche
- Bild 58: Bereichsweise Ermittlung der Scherparameter
- Bild 59: Bereichsweise Ermittlung der undrainierten Kohäsion
- Bild 60: Rechnerische und labortechnisch ermittelte Steifemoduln, Boden 1 (TL) mit CL 90 S
- Bild 61: Rechnerische und labortechnisch ermittelte Steifemoduln, Boden 1 (TL) mit MB 50/50
- Bild 62: Rechnerische und labortechnisch ermittelte Steifemoduln, Boden 2 (ST*) mit MB 50/50
- Bild 63: Rechnerische und labortechnisch ermittelte Steifemoduln, Boden 2 (ST*) mit MB 30/70
- Tab. 8: Mittlerer Festigkeitsabfall nach Wasserlagerung von Boden 2 (ST*) mit Bindemittel
- Tab. 9: Mittlere Scherparameter von Boden 1 (TL) mit Bindemittel
- Tab. 10: Mittlere Scherparameter von Boden 2 (ST*) mit Bindemittel
- Tab. 11: Übersicht über Setzungsberechnungen
- Tab. 12: Zusammenfassung der Gleichwertigkeitsbetrachtung
- Tab. 13: Übersicht der Ergebnisse der rechnerischen Ermittlung der Kohäsion, Boden 1 (TL)
- Tab. 14: Übersicht der Ergebnisse der rechnerischen Ermittlung der Kohäsion, Boden 2 (ST*)

Tabellen

- Tab. 1: Klassifizierungsversuche je Boden
- Tab. 2: Versuche je Boden, je Bindemittelart und je Bindemittelgehalt
- Tab. 3: Boden 1 (TL) – Ergebnisse der Klassifizierung
- Tab. 4: Boden 2 (ST*) – Ergebnisse der Klassifizierung
- Tab. 5: Proctorwerte an Boden-Bindemittel-Gemischen – Boden 1 (TL)
- Tab. 6: Proctorwerte an Boden-Bindemittel-Gemischen – Boden 2 (ST*)
- Tab. 7: Mittlerer Festigkeitsabfall nach Wasserlagerung von Boden 1 (TL) mit Bindemittel

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahn-deckenbetonen

Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung

Kemper, Schacht, Klapproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren

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

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel

Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt

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

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

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

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen

R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb

Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial

Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 – 2013

Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

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

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

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

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)

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

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen Schellenberg

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

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt

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

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxiserfahrenen Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

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

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

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

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

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

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherkenbach, Jansen

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

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

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

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

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

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

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

S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

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

2019

S 127: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton

Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

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

S 128: Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

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

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

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

S 131: Einfluss viskositätsverändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://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 <http://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 <http://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

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 03-63

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.