

Ressourcenschonung

**Bedingungen für die Verwendung
organogener und weicher Böden
sowie von Sekundärbaustoffen
als Massenbaustoffe im Erdbau**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 137

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Ressourcenschonung

Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

von

Roberto Cudmani
Dirk Heyer

Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau,
Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität München

Jens Engel
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Fachbereich Geotechnik

Jürgen I. Schoenherr
TN – Institut für Verfahrensentwicklung,
Torf- und Naturstoff-Forschung
Hochschule Zittau/Görlitz

Sachbearbeitung:

Christoph Henzinger (TUM), Andromachi Koukoulidou (TUM),
Stefan Huber (TUM), Anett Kupka (iTN Zittau), Ilona Schönfelder (iTN Zittau),
Sebastian Wolter (HTW Dresden), Stefan Vogt (TUM), Emanuel Birle (TUM),
Orestis Papakyriakopoulos (TUM), Iman Bagherpour (TUM)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 137

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 05.0166/2011/ERB:
Ressourcenschonung - Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Fachbetreuung

Christine Kellermann-Kinner

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 978-3-95606-470-8

Bergisch Gladbach, November 2019



Kurzfassung – Abstract

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

Entsprechend dem Kreislaufwirtschaftsgesetz sollen bis 2020 mindestens 70 % der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle einer Vorbereitung zur Wiederverwendung, dem Recycling oder einer sonstigen stofflichen Verwertung zugeführt werden. Um dieses Ziel zu erreichen müssen Materialien, die bisher als mineralischer Abfall abgelagert wurden, deutlich stärker als Sekundärbaustoffe verwendet werden. Für drei dieser Stoffgruppen sollten durch dieses Forschungsprojekt die Grundlagen für eine nachhaltige Materialverwendung im Erdbau erweitert und Vorbehalte abgebaut werden. Bei den Stoffgruppen handelt es sich um: a) organogene Böden bzw. Böden mit organischen Bestandteilen, b) Böden mit geringer Konsistenz sowie c) Sekundärbaustoffe (RC-Baustoffe, Böden mit Fremdbestandteilen, industrielle Nebenprodukte).

Die Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung von organogenen Böden bzw. Böden mit organischen Bestandteilen wurden im ersten Teil des Projektes erörtert. Neben der umfassenden Auswertung von Literaturquellen stehen mit den eigenen Untersuchungen nun umfassende Ergebnisse und ein Schema für eine erste Beurteilung bautechnischen Verhaltens solcher Böden zur Verfügung.

Möglichkeiten zur Verbesserung und des Einsatzes von Böden mit geringer Konsistenz wurden im zweiten Teil dieses Projektes näher untersucht. Die Untersuchungen erfolgten anhand ausgewählter feinkörniger und gemischtkörniger Böden. Anhand der Ergebnisse wurden die möglichen Einsatzbereiche unterschiedlicher Strategien zur Verwendbarmachung (z. B. Bodenverbesserung, Entwässerung) bewertet und Hinweise auf Einschränkungen gegeben.

Im letzten Teil des Forschungsprojektes wurden die erdbautechnischen Eigenschaften von Recyclingmaterialien und HMV-Aschen untersucht. Grundsätzlich bestätigen die Untersuchungen die durchaus hochwertigen bautechnischen Eigenschaften dieser Materialien. Gleichzeitig zeigen Sie auch typische Schwächen solcher Materialien auf.

Conservation of resources – Conditions for the use of organogenic and soft soils and of secondary building materials as mass building materials in earthworks

According to German federal law (Recycling and Waste Management Act), unpolluted soil and mineral waste resulting from construction and demolition works has to be recycled, reused or prepared for reuse at a rate of at least 70% until 2020. To meet this requirement these materials will have to be used to a considerable extent as building materials for earthwork structures or, if necessary, have to be prepared for reuse. It was the key aim of the R & D study at hand to expand the foundations for the source efficient use of three materials in particular: a) organic soils with organic contents under 30 mass%, b) fine- and mixed-grained soils of low consistency and c) secondary materials.

The first part of this study was focused on the engineering properties of organic soils with organic contents under 30 mass%. From a thorough literature study and from results of this study, an evaluation scheme was developed. This scheme contains information about the engineering behaviour of such soils and is hoped to aid the initial assessment of a material at hand.

The second part of this study deals with different methods for utilisation of fine- and mixed-grained soils of low consistency. The findings on several exemplary soils were used to develop a scheme, from which the applicability of different methods of utilisation can be seen.

The final part of this study is focused on the engineering behaviour of secondary materials, in particular of recycled aggregates and ashes from incinerated domestic waste. The results show the typically good engineering behaviour but also point to areas where special care is advised.

Summary

Conservation of resources – Conditions for the use of organogenic and soft soils and of secondary building materials as mass building materials in earthworks

1 Introduction

According to the German federal law (Recycling and Waste Management Act), unpolluted soil and mineral waste resulting from construction and demolition works has to be recycled, reused or prepared for reuse at a rate of at least 70% until 2020. Landfilling or depositing of such materials should be avoided as much as possible. Looking at data from DEHOUST et al. (2008) for the years 2002/2003 it can be found that from 238 million tons of mineral wastes (soil, ashes, slags, mineral wastes), that have been accumulating during this period, only about 53% were used for high-grade applications (meaning the „use“ of these materials in landfills is excluded from category of „recycling“). According to the Waste Management Act mineral wastes are required to be used in the highest possible level of the five-level hierarchy of waste (prevention > preparation for recycling > recycling > other types of recovery, particularly use for energy recovery > disposal). To meet this requirement these materials will have to be used to a considerable extent as building materials for earthwork structures or, if necessary, have to be prepared for reuse. Up to now, such materials were often discarded because of their poor engineering behaviour or simply because of a lack of experience concerning their engineering properties. This was typically the case for organic soils (with organic contents below 30 mass%), fine- and mixed grained soils of low consistency and secondary materials (demolition waste and industrial by-products). One way to assist their acceptance in engineering practice may therefore be the investigation of their most important engineering properties, and, if necessary, of possibilities to improve those properties. Thus it is hoped that the presented results aid the acceptance of those mineral residues as possible construction materials in earthwork engineering. Thereby, it is oriented as a contribution towards the push for resource efficiency and the protection of primary raw resources. The study was divided into 3 parts:

- organic soils with organic contents under 30 mass%,
- fine- and mixed grained soils of low consistency,
- secondary materials.

The findings of the investigations done on these individual materials are described herein.

2 Organic soils

2.1 Research concept

Several natural organic soils from different regions of Germany were obtained, with organic contents (OC, measured by weight-loss on ignition LOI according to standard testing procedures) ranging from 5 to about 30 mass%. Those materials were subjected to laboratory tests concerning compaction-, shear- and compression behaviour. Additionally, a soil with high organic content (about 40 mass%) was mixed with sand to simulate different percentages of organic matter. These mixtures were only tested for their compaction behaviour.

Organic soils like this typically show in situ water contents above the optimum value for compaction. Therefore, the obtained natural soils were tested for their improvability by addition of binders. Quicklime and lignite fly-ash were used as additives for this purpose.

The results from all tests, in combination with the existing experience, were then used to produce an evaluation scheme. Typical engineering properties of such soils can be derived from this scheme by the use of the value for organic content (OC or rather LOI). It is meant to be used as a first tool to evaluate the technical usability of such soils for the use in earthwork structures. It is hoped to serve as an aid for builders and planners that are willing to consider organic soils as construction material.

2.2 Results

Compaction characteristics

Considering results from literature and from compaction tests it is possible to deduce a correlation between organic content and optimum compaction values. Optimum water content (OWC)

typically increases, and optimum dry density (ODD) decreases with increasing organic content. Since this correlation is weak, it is not possible to derive compaction characteristics by using only the value for organic content as index property. This value by itself does not include enough information about a soil to appropriately describe the engineering behaviour.

A selected soil with high organic content (about 30 mass%) was improved by the addition of quicklime and alternatively fly-ash. The results from these tests confirm the improvability of such soils with water contents above the respective optimum compaction water content.

Compression characteristics

Oedometric compression tests were conducted on samples prepared from the compacted natural soils (at OMC, ODD). Considering effective stresses between 100 and 200 kN/m², the saturated soils showed constrained modules between 2.5 and 17 MN/m², higher values being related to low organic contents and vice versa. Following pore pressure dissipation, the soils showed considerable secondary deformations. Creep coefficients were calculated from values obtained after 24 hours at constant load indicated values of C_{α} of about 0.001 and 0.04. The value C_{α} for each soil typically increased with loading and organic content.

Additional compression tests were conducted on compacted samples of the binder-improved soil. While one sample was loaded immediately, another sample was prepared and loaded after 7 days of mellowing. There was no noticeable hardening

taking place during the period of time. At the same, the addition of quicklime produced a much stiffer soil response due to changes in load.

Shear strength

Triaxial tests (consolidated, undrained) were conducted on compacted soil samples. In those tests specimens generally showed large deformations. Therefore the failure condition was defined by the shear stress at an axial strain of 4%. Except from two soils (both with substantial clay content), the samples did not show considerable cohesion. At the same time, they did exhibit remarkably high values for the (drained) friction angle. From these tests also undrained shear parameters were calculated. These calculations showed values between 40 and 160 kN/m². The lower boundary of this range can be attributed to soils with high organic contents tested at low confining pressures, the upper boundary to soils with low organic content tested at high confining pressures.

No distinct impact on strength was recognized for samples compacted and tested slightly on the wet side of the respective optimum values.

2.3 Evaluation scheme

From this results and previous experiences at the TU München a table with indicator values and an evaluation scheme were developed. The table containing indicator values shows characteristic values for shear strength and soil stiffness of organic soil specimens compacted at approximately optimum compaction values (table 1).

Organic content	Soil type acc. to DIN 18196	Drained shear strength		Undrained shear strength		Compacted dry density γ [kN/m ³]	Constrained modulus (at 100 kN/m ²) E_s [MN/m ²]	Constrained modulus (at 200 kN/m ²) E_s [MN/m ²]
		ϕ' [°]	c' [kN/m ²]	c_u [kN/m ²]	at σ_3 [kN/m ²]			
Group 1 5 to 10%	TA, TM, OT, OH	20 – 25	0 – 20	40 – 70 60 – 120	50 100	14 to 18	5 to 7	10 to 17
Group 2 10 to 30%	OT, OH	25 – 30	0 – 20	100 – 130 100 – 160	150 200	8 to 15	2,5 to 5	3 to 10
Group 3 above 30%	OT, HN, HZ	not reported						
Comment:								
<ul style="list-style-type: none"> - Values relate to samples of compacted (at approximately optimum compaction), saturated soil samples - Constrained modules E_s given for $\sigma' = 100$ to 200 kPa relate to measured compression values after 2 days of constant load (saturated and unsaturated samples were considered) 								

Tab. 1: Indicator values for soil mechanical properties of compacted organical soils

Organic content	Utilisation in earthworks like noise protection barriers and terrain modelling measures			Effectiveness of soil treatment using binders Can the engineering behaviour be improved?		
	OC	Compactability	Shear strength	Deformation	Compactability	Shear strength
Group 1 5 to 10%	•	•	•	/ • /	/ • /	/ • /
Group 2 10 to 30%	•	•	◐	/ • /	/ ◐ /	/ • /
Group 3 above 30%	◐	◐	○	/ ◐ /	/ ○ /	/ ◐ /
Comment: • requirements can be met ◐ only low requirements can be met ○ requirements can either be met only under certain circumstances (e.g. very low requirements, after improvement) or can not be met at all / • / positive influence of soil treatment on soil behaviour is expected / ◐ / positive or neutral influence of soil treatment on soil behaviour is expected / ○ / neutral influence of soil treatment on soil behaviour is expected						

Tab. 2: Evaluation scheme for the utilisation of organic soils in earthworks and effectiveness of soil treatment measures

The requirements for soil characteristics will vary depending on the structure to be built. Thereby, the usability of organic soils in earthwork construction can only be assessed qualitatively. Table 2 shows the evaluation scheme for organic soils that are classified into soil groups of different organic content. This table shows whether typical requirements concerning compaction, shear strength, deformation behaviour can be met. It also indicates whether the soil properties can be improved by soil treatment measures.

3 Fine- and mixed grained soils of low consistency

3.1 Research concept

Fine- and mixed-grained soils are typically deposited if they show water contents above the respective optimum value. Therefore, this part of this study was focused on soils of low soil-consistency. The application range of several utilisation techniques was tested using 4 selected soils (soil group TL, TA, ST* and GU* according to DIN 18196). The tests were designed to show how a wet soil can be made usable for earthwork construction. The techniques used to utilize soils at different water contents can be organized into two groups:

- Direct utilisation
 - cassette construction (tailings),

- sandwich construction,
- geotextile tubes (permanent).
- Indirect utilisation
 - soil improvement with binders,
 - mechanical soil improvement,
 - machine-based dewatering,
 - dewatering in geotextile tubes,
 - other dewatering methods.

Methods for direct utilisation can be considered as methods where the wet soil is utilized without the improvement of its properties (e.g. dewatering). On the other hand, indirect utilisation is characterized by the alteration of the soils properties to make them workable for typical earthwork equipment. This can be achieved by different means, depending on the natural water content of the soil and the soil itself. The use of soil improvement by addition of binders and the mechanical soil improvement by addition of recycled aggregates from demolition waste was investigated for water contents starting above the optimum value. For higher water contents the fine-grained soils were dewatered in chamber-filter-presses and by centrifuge.

The results of all tests were used to develop an evaluation scheme. This scheme illustrates, how fine-grained and mixed-grained soils of low consistency can be utilized for earthwork construction.

3.2 Description of results

Direct utilisation of wet soils

When wet soils are being deposited into areas enclosed by dams they do not have to show particular properties (cassette construction). The stability of the overall structure will be ensured by the impoundment dams. These dams have to be built using high-grade materials. As a consequence, the economic efficiency of cassette constructions will be governed by a ratio defined by the quantity of impounded material and the quantity of high-grade material used for dam construction. The total settlement of the material enclosed in cassettes will strongly depend on its water content and the type of soil.

Soils with high water contents may also be deposited permanently in geotextile tubes. As the geotextile ensures structural stability there may not be any special requirements for the soil properties itself. Again total settlement of the filled tubes will be depending on the initial soil water content and the type of soil.

Both of these described methods for direct utilisation can be favourable under certain circumstances. But in earthwork engineering a structure's stability will typically not be decoupled from the properties of the material from which it is built. In sandwich construction high-grade materials and low-grade materials are used in alternation. The low-grade material (soil of low consistency) therefore has to contribute to the stability of the overall structure. Because of this, such sandwich constructions in earthwork engineering will only be built when the respective low-grade material is not too "low grade". The use of soils of low consistency in sandwich constructions will therefore be limited to soils showing water contents only slightly above the respective optimum value.

Indirect utilisation of wet soils using methods typical for earthwork construction

According to the Additional Technical Conditions of Contract and Directives in Road Construction (ZTV E-StB 09) three of the selected soils for this study were principally suitable for soil treatment with binders (soil TL, soil ST* and soil GU*). The fourth material (soil TA) was to be considered as suitable for soil treatment subject to restrictions. These

specifications were affirmed by test results, as the properties of the soils TL, ST* and GU* could be improved over a wide range of water contents by addition of quicklime. Soil TA on the other hand could only be improved in a narrow range of water contents above its optimum value. Mechanical soil improvement by addition of recycled aggregates from construction waste showed promising results for the improvement of soil TL. Soil TA could not be improved to a considerable extent by this method.

Indirect utilisation of wet soils using machine based methods

Soils that are to be dewatered in centrifuges or in chamber-filter-presses have to show fluid-like behaviour in order to be pumpable. This may be the case for soils at water contents well above the respective liquid limit. Since mineral soils typically are encountered at water contents in the plastic range of soil consistency, water will usually have to be added to make them pumpable. Both fine-grained soils (TL and TA) were dewatered using this method. The results indicate that soils can not be directly compacted after being dewatered with these methods, because there is still too much water left in the soil. Such machine based methods for dewatering thereby have to be used in combination with, for example, soil improvement methods.

Indirect utilisation of wet soils using other dewatering methods

Thermal dewatering can be considered as a method working for all soils at any water content. The rate of thermal dewatering of a soil may be largely depending on temperature, humidity (development of humidity) and surface available for evaporation. Because clay minerals bind more water with higher intensity than silt grains do, all other factors being equal; silt will desiccate more easily and at a higher rate.

Open air drying of wet soils may be the method of choice under certain circumstances. It is time consuming and requires space available for the material to dry. Good weather conditions presumed, the procedure is very energy-efficient compared to other methods. In total, this method seems to be optimally applied in combination with soil improvement measures (beforehand) and with machine-based-dewatering methods (afterwards).

Dewatering in geotextile tubes can be considered for very wet soils as the soils have to be pumped into the tubes. The dewatering process is time consuming, but can deliver comparable results (with respect to water content) as machine-based methods of dewatering. This method also can be used in combination with other methods.

3.3 Evaluation scheme

Soils of low consistency can be made usable for earthwork engineering using different approaches. As an example, figure 1 shows the application range of all investigated methods of utilisation of soil TL (clay of low plasticity).

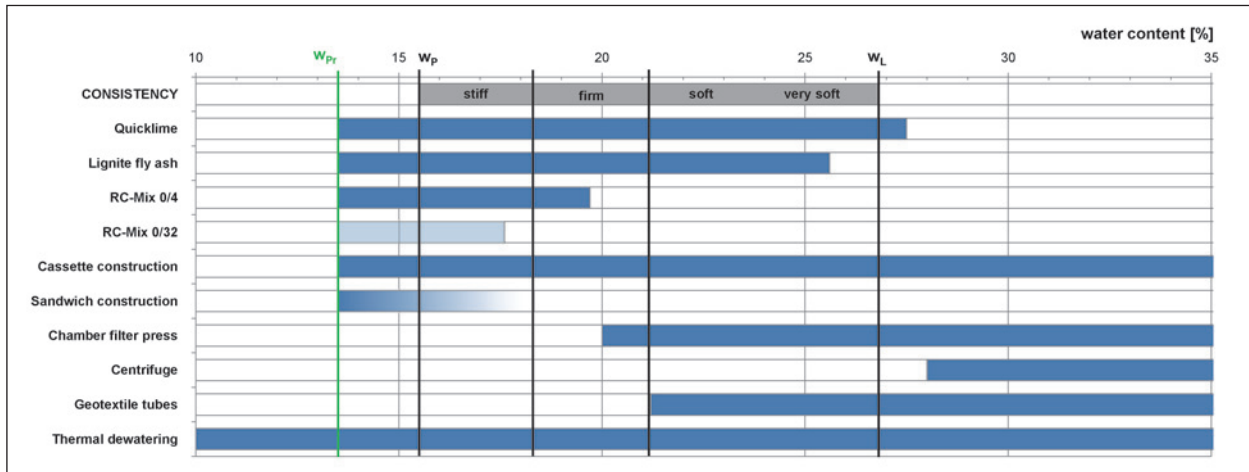


Fig. 1: Application range for utilisation methods of soils with low consistency by example of a clay of low plasticity (soil TL)

Utilisation	Soil group 1 Fine-grained soils, suitable soil groups according to ZTV E-StB (U, TL, TM)	Soil group 2 Fine-grained soils, suitable soil groups subject to restrictions according to ZTV E-StB (TA)	Soil group 3 Mixed-grained soils, suitable soil groups according to ZTV E-StB (ST*, GU*)	Conditions for usage
Direct Utilisation				
A Cassette construction	●	●	●	AS2/AV2
B Sandwich construction	○	○	○	AS1/AV1-2
C Geotextile tubes (permanent)	●	●	not reported	AS2/AV2
Indirect Utilisation (Improvement of engineering properties)				
D Soil improvement with binders	●	○ to ●	●	AS1/AV1
E Mechanical soil improvement using RC-aggregates	●	○	● to ●	AS1/AV1
F Machine based dewatering	●	●	not reported	KOM
G Dewatering in geotextile tubes	●	●	not reported	KOM
H Other dewatering methods (e.g. open air drying)	●	●	●	AS1/AV1
Comment: ○ Method practicable only slightly above the optimum compaction water content ● Method practicable for water contents $w > w_{pr}$ (plastic soil behaviour) ● Method practicable for water contents $w \gg w_{pr}$ (liquid-like soil behaviour) AS1 Material properties are expected to contribute to overall structural stability AS2 Material properties are not expected to contribute to overall structural stability AV1 Material is expected to show minor/some deformations AV2 Material is expected to show large/very large deformations KOM Method can be used at very high water contents and is able to result in water contents $w > w_{pr}$; method to be used in combination with other methods				

Tab. 3: Evaluation scheme for possible strategies for the utilisation of fine- and mixed-grained soils

The preferred approach (e.g. combination of methods) will have to be identified for each individual case, considering the boundary conditions of the construction project at hand. To aid the preliminary decisions, the findings of this study were developed into an evaluation scheme (table 3). Depending on the water content of a material in comparison to its optimum water content, this scheme shows the applicability of the investigated methods. It also describes the conditions for usage when employing those methods by commenting on the shear strength and the deformation behaviour of the material or whether a method can only be applied in combination with another method.

4 Secondary raw materials

4.1 Research concept

It is known that secondary raw materials quite often are not used as high grade material in earthwork engineering even if they exhibit adequate properties. This is especially the case if the material contains mineral impurities (like tiles) or non-mineral impurities. It can be presumed that the reason for this generally stems from a lack of experience with these materials. Therefore, this study is focused on the engineering behaviour of recycled aggregates from demolition waste and ashes from incinerated domestic waste.

Ashes from incinerated domestic waste were selected from two different plants in Germany. From each plant a relatively coarse and a relatively fine material was collected.

Because recycled aggregates are very likely to be deposited in the case that they can not meet the requirements for material composition stated in regulations (e.g. TL Gestein-StB 04), this study was aimed at such materials. Mineral impurities like tiles and non-mineral impurities like wood chips, plastic pellets and foamed plastic pellets were added to a concrete aggregate to simulate this type of material. A mixed material from construction waste was also collected and mixtures of these recycled materials with a fine-grained soil and a coarse-grained soil were produced. Again, relatively fine and relatively coarse materials were investigated comparatively.

The laboratory study included compaction tests, CBR-tests, triaxial compression tests, frost susceptibility tests and tests concerning long term

development of unconfined compressive strength and permeability. A large scale test was also set up. It was aimed to show whether indirect test procedures for the degree of compaction, defined in ZTV E-StB for natural soils, would also be valid for recycled aggregates from demolition waste.

4.2 Description of results

Recycled aggregates from demolition waste

The materials were tested in grainsize 0/4 mm and 0/32 mm. Neither the crushed concrete aggregate and the mixed aggregate nor the mix of crushed concrete aggregate containing 40 mass% (crushed) tiles showed typical compaction- and bearing behaviour. Dry density and the CBR-values seemed to be without reference to the water content (nearly constant values).

Mixtures of these recycled aggregates with fine-grained soils (clay of low plasticity) and coarse grained soils (gravel) were also evaluated in compaction- and CBR-tests. The mixtures were produced at a ratio of 70 mass% recycled aggregate and 30 mass% soil respectively. When the soil added to the recycled aggregate was coarse, the compaction characteristics shifted towards lower optimum water contents and higher dry densities. The CBR-values were typically higher than for recycled aggregates without soil (gravel). Both, compaction- and bearing behaviour of these were not significantly linked to water content. On the other hand, when the added soil was a fine-grained soil, the behaviour of the material changed more significantly: It was then linked to the water content. For the mixtures showing a fines-content of about 30 mass% this can be attributed to the fine grained soil matrix dominating the overall material behaviour. Findings from another R & D project finished at the TU München¹ confirm that the expected change from the behaviour of a coarse material to the behaviour of a fine-grained material (as for example stated in DIN 18196 or OSTERMAYER, 1976) will also approximately be valid for such mixtures.

¹ FE 05.0183/2013/CGB „Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% bzw. Massen-%-Grenzen bei Bodenmaterial“, R & D project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute (HENZINGER et al., 2015), report unpublished.

Therefore, the mechanical behaviour of recycled aggregates from demolition waste and mixtures of recycled aggregates with soils may be classified using DIN 18196 (see also BAUMGÄRTEL et al., 2009).

While tests on recycled aggregates and mixtures of recycled aggregates with soils generally illustrated the high grade compaction- and bearing behaviour of these materials, mixtures of recycled aggregates with non-mineral impurities showed problematic properties. The addition of only 0.2 mass% of foamed plastic pellets to the recycled aggregates significantly decreased the compaction dry density and the CBR-values.

Grain breakage is known to be an issue for recycled aggregates carrying material of low material strength (like some types crushed tiles). Particle size distributions were established on two parallel samples of selected mixtures. One sample was beforehand compacted in a Proctor mould (with standard compaction energy), simulating possible grain breakage attributed to the compaction process. The test results for the selected materials (including the mixture of 60 mass% crushed concrete with 40 mass% of crushed tiles) did not show a significant degradation of the material. Considering all tests the fines-content was increased by a maximum value of about 4 mass%.

The shear strength of such materials may also be of relevance. From the literature it is known that, using the Mohr-Coloumb failure criterion, recycled aggregates typically show high values for the drained friction angle and drained cohesion. In this study triaxial tests (consolidated, undrained) were conducted on some of the materials. These tests principally confirm the data from the literature. From this it could be deduced that the values for friction angles of recycled aggregates are comparable to those of natural soils of similar grainsize and form. It was also shown that recycled aggregates in mixtures with fine-grained soils may show lower values for shear strength. This will be expected if there is a fine-grained soil matrix and the soil behaves more like a fine-grained soil than a coarse-grained soil.

Tests for frost-susceptibility showed that recycled aggregates with a maximum grainsize of 4 mm were more prone to frost heave than coarser materials were. After freezing the finer material showed significantly lower CBR-values than before while the CBR-values of the coarse material even

increased slightly. Some samples of the coarse recycled aggregates were, after compaction, cured for 28 days in a moist chamber. Those samples showed smaller values for frost heave and higher CBR-values after freezing than non-cured samples. The mixtures of recycled aggregates with gravel also seemed to be positively influenced considering frost heave and CBR-values. It has to be mentioned, however, that the mechanism leading to increased CBR-values after freezing (despite loosening of the material due to frost heave) compared to samples tested without freezing is not understood.

It has been reported that recycled aggregates show distinct long term effects. To verify this, a series of tests was conducted in which samples of coarse mixed recycled aggregates from demolition waste (RC-Mix 0/32) were compacted and stored for up to one year either in water or in moist chambers. From the results of uniaxial strength tests conducted at different times a distinct increase in sample strength could be seen (for both types of storage). At the same time additional tests on these samples indicated a slight decrease in permeability.

As already mentioned, a field test was set up to validate whether indirect test procedures for the degree of compaction, as known from natural soils, were also allowable for recycled aggregates. From the results could be seen that the static plate load test produced values in accordance with the guide values given in ZTV E-StB. The result of the dynamic plate load test in relation to the results of the static plate load test showed a deviating ratio compared with the ratio typically known for several natural soils.

Ashes from incinerated domestic waste

Two ashes were tested, each one in grainsize 0/4 mm and 0/32 mm, for their compaction characteristics and bearing behaviour (CBR). Despite comparable grain-size distributions the materials showed varying results for dry density and CBR-values. In all, the compaction dry density of the ashes was not fundamentally linked to the respective water content. Higher CBR-values and dry densities (associated with lower water contents) could be seen for coarse ashes (0/32 mm) when compared to their finer (0/4 mm) counterparts.

The ashes were tested for degradation effects during compaction using the same procedure as for the recycled aggregates. The ash yielding higher

dry densities did not show significant grain breakage. The other ash, showing lower values for dry density in compaction tests, showed some degradation (maximum change in fines-content of about 4 mass% and a maximum change in the amount of particles smaller than 2 mm of about 6 mass%). As the grain-size distribution after compaction was still well graded the change was considered as noncritical.

The tests for frost susceptibility of compacted samples did show frost-heave values comparable to those of the recycled aggregates. Curing of samples in a moist chamber did not improve the results of frost heave- and subsequent CBR-tests.

Compacted samples of both ashes responded differently to long term storage (stored for up to one year either in water or moist chambers). One ash showed an increase in strength and permeability with time, whereas the other ash did not show any long term effects.

4.3 Evaluating the findings in the context of German road construction regulations

ZTV E-StB

According to the ZTV E-StB construction material can be categorized into three groups: soils, soils containing mineral impurities and recycled aggregates. A material can be classified into one of these three groups depending on the amount of soil and recycled aggregate.

Recycled aggregates exhibit properties deviating from natural soils, deviations typically stemming from their porous nature. Mixtures of soil and such recycled aggregates therefore show properties lying between the properties of the respective "pure" materials. The transition in behaviour with changing composition can be considered as smooth. Therefore, taking only mechanical properties into account, a sharp distinction between those abovementioned three groups is expected not to be necessary. This was also found to be valid by another R & D project recently completed at the TU München (HENZINGER et al., 2015). The classification of the mechanical behaviour of such materials for construction purposes according to DIN 18196 is considered as sufficient.

According to the ZTV E-StB the use of ashes from incinerated domestic waste is only allowed for specific applications, filter and drainage layers being excluded. The ashes from incinerated municipal waste principally showed good compaction- and bearing behaviour as well as potential for long term hardening. But the change in permeability of one ash over time confirms the given restrictions for possible fields of usage.

TL BuB E-StB 09

The regulatory TL BuB E-StB 09 sets standards for the composition of building materials used in earthwork engineering. Of particular interest for the use in earthworks are materials which do not qualify as materials for the use in superstructures. A recycled material from demolition waste, containing an amount of crushed tiles of more than 30 mass%, would typically classify as one of those materials. Tests done on such materials (containing about 40 mass% of crushed tiles) indicated good engineering behaviour. However, concerns about particle crushing (due to compaction) and the associated change in frost susceptibility may persist. In this case, following the argumentation of BAUMGÄRTEL et al. (2009), classification for frost susceptibility according to ZTV E-StB should be carried out on samples after laboratory compaction. BAUMGÄRTEL et al. (2009) also suggested a value for the maximum allowable amount of mineral impurities of low particle strength (like plaster and mortar) of 10 mass%.

The TL BuB E-StB 09 also regulates maximum allowable amounts of non-mineral impurities in recycled building materials from construction waste and soils carrying mineral impurities, if they are to be used in earthwork engineering. According to the TL BuB E-StB the permissible amount of those non-mineral impurities is limited to 0.2 vol%. The tests conducted on samples mixed with varying amounts of such impurities (wood chips, plastic pellets and foamed plastic pellets) did reveal that this value may be overly conservative for non-mineral impurities of high particle density. For non-mineral impurities of low particle density, however, this value can be considered as insufficient. Following the recommendation of BAUMGÄRTEL et al. (2009) an additional specification should be made for such materials. They suggest a maximum allowable amount of 10 vol% for impurities showing particle densities lower than 0.05 g/cm³.

Influence of impurities on the engineering behaviour of recycled materials from demolition waste and soils with mineral impurities

The technical bulletin M BomF (FGSV regulation) illustrates how mineral impurities can influence different engineering properties of soils. It is based on the findings of BAUMGÄRTEL et al. (2009). The information concerning possible influences is given only qualitatively. It is therefore suggested that the evaluation scheme given in M BomF can be generalized also for soils with mineral impurities and for recycled materials from demolition waste.

5 Conclusion

As can be deduced from the result of this investigation the use of organic soils (with OC < 30 mass%), fine- and mixed-grained soils of low consistency and secondary materials as construction material in earthwork engineering is far from unthinkable. This work is meant to give designers and builders a first impression of the construction properties of a material at hand. It is also meant to point out possibilities for the improvement of these properties. The final decision if a material can be used for construction use will still have to be made on a case by case basis.

Organic soils show a wide variety of engineering properties. The multitude of construction types for earthworks sets the scope for the flexibility that is needed if such materials are to be considered as construction material. Nonetheless, the results did not indicate that organic soils (with OC < 30 mass%) should categorically be excluded from the use as construction material.

The investigation on the utilisation of fine- and mixed-grained soils of low consistency illustrated that, from a technical point of view, even today these materials can be made usable at nearly any water content. As economical boundary conditions are bound to shift in the future the described utilisation methods may then possibly be used on a large scale.

The results also illustrated the high-grade properties of recycled material from demolition waste and ashes from incinerated municipal waste. At the same time the findings point to areas where special care is advised. Even at very low proportions non-

mineral impurities of low particle density will have adverse effects on construction properties of recycled aggregates. On the other hand, the properties of ashes from incinerated domestic waste can be negatively influenced on the long term by a lack in volumetric stability (an effect typically countered by maturing).

Literature

- BAUMGÄRTEL, T.; HEYER, D.; VOGT, N. (2009): Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1020, Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- DEHOUST, G.; KÜPPERS, P.; GEBHARDT, P.; RHEINBERGER, U.; HERMANN, A. (2008): Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle-Endbericht. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes. Öko-Institut e. V. Darmstadt
- HENZINGER, C.; BARKA, E.; BIRLE, E.; HEYER, D. (2015): Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% bzw. Massen-%-Grenzen bei Bodenmaterial. Forschungsbericht zu FE-Nr. 05.0183/2013/CGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, noch nicht veröffentlicht
- OSTERMAYER, H. (1976): Das Verhalten gemischtkörniger Böden im einachsigen Formänderungszustand. Mitteilungen aus dem Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität München. Diss. Technische Universität München, München

Inhalt

Vorwort	15	3.3.2 Verwendung in Sonderlösungen	46
1 Allgemeines und Ziel der Forschung	15	3.3.3 Bodenverbesserung durch Zugabe von gebranntem Kalk	48
2 Organogene Böden und Böden mit organischen Anteilen	16	3.3.4 Bodenverbesserung durch Zugabe von Braunkohlenflugasche ...	53
2.1 Einleitung	16	3.3.5 Mechanische Bodenverbesserung mit Recyclingmaterial	56
2.2 Untersuchungskonzept	17	3.3.6 Maschinentechnische Entwässerung	57
2.3 Grundlagen und Literaturauswertung	18	3.3.7 Thermische Entwässerung	59
2.3.1 Entstehung organischer Böden	18	3.4 Eigene Untersuchungen	61
2.3.2 Erdbautechnische Eigenschaften	18	3.4.1 Verwendung in Sonderlösungen	61
2.3.3 Bodenbehandlung von Böden mit organischen Bestandteilen	21	3.4.2 Bodenverbesserung im Labor	67
2.4 Eigene Untersuchungen	22	3.4.3 Bodenverbesserung im Großmaßstab	84
2.4.1 Material	22	3.4.4 Maschinentechnische Entwässerung	90
2.4.2 Verdichtungseigenschaften	24	3.4.5 Thermische Entwässerung	97
2.4.3 Last-Verformungseigenschaften	27	3.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	99
2.4.4 Scherfestigkeit und Druckfestigkeit ...	31	3.5.1 Allgemeines	99
2.5 Hinweise zur Eignungsprüfung	38	3.5.2 Ausgeprägt plastischer Ton (Ausgangsboden TA)	101
2.5.1 Homogenisierung	38	3.5.3 Leicht plastischer Ton (Ausgangsboden TL)	102
2.5.2 Last-Verformungsverhalten	38	3.5.4 Sand-Ton-Gemisch (Ausgangsboden ST*)	103
2.5.3 Scherfestigkeit	38	3.5.5 Kies-Schluff-Gemisch (Ausgangsboden GU*)	103
2.6 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	38	3.6 Strategien zur Weiterverwendung ...	104
2.6.1 Verdichtungseigenschaften	38	4 Sekundärbaustoffe	106
2.6.2 Last-Verformungseigenschaften	38	4.1 Einleitung	106
2.6.3 Scherfestigkeit	39	4.2 Untersuchungskonzept	107
2.7 Anhaltswerte zur Beurteilung der Eignung	39	4.3 Grundlagen und Literaturauswertung	109
3 Fein- und gemischtkörnige Böden mit geringer Konsistenz	41	4.3.1 Regelwerk der FGSV	109
3.1 Einleitung	41	4.3.2 Erdbautechnische Eigenschaften von RC-Material	114
3.2 Untersuchungskonzept	42		
3.3 Grundlagen und Literaturauswertung	43		
3.3.1 Grundlagen	43		

4.3.3	Erdbautechnische Eigenschaften von HMV-Aschen	116
4.4	Eigene Untersuchungen	117
4.4.1	RC-Baustoffe mit und ohne Bodenanteile	117
4.4.2	Versuche an RC-Materialien im Großmaßstab	136
4.4.3	HMV-Aschen	142
4.5	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	146
4.5.1	RC-Materialien mit und ohne Bodenanteile	146
4.5.2	Hausmüllverbrennungsasche	148
4.6	Beurteilung der Ergebnisse im Kontext des straßenbautechnischen Regelwerks	148
4.6.1	Vorgaben der ZTV E-StB 09	148
4.6.2	Vorgaben der TL BuB E-StB 09	149
4.6.3	Beurteilungsschema für Recyclingmaterialien mit und ohne Bodenanteile	149
5	Zusammenfassende Betrachtungen	151
6	Angaben zum Forschungsprojekt	152
6.1	Bearbeitung durch die Forschungsnehmer	152
6.2	Studenten-Abschlussarbeiten	152
6.3	Erwähnungen	153
	Literatur	153
	Bilder	162
	Tabellen	168

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:

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

Vorwort

Die Betreuung während der Bearbeitung erfolgte durch den von der BAST berufenen Betreuungsausschuss. Dieser setzte sich neben Frau Dr.-Ing. Kellermann-Kinner als Fachbetreuerin des Forschungsgebers und Herrn Dipl.-Ing. Hillmann auch aus Frau Dipl.-Ing. (FH) Schleiter und Herrn Dr.-Ing. Schüßler zusammen. Die Treffen erfolgten in regelmäßigen Abständen während der Bearbeitung und dienten der Vorstellung des jeweiligen Projektstandes. Der Dank der Autoren gilt allen Beteiligten, die zum Gelingen des Forschungsprojektes beigetragen haben.

1 Allgemeines und Ziel der Forschung

Entsprechend dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) § 14 sollen bis 2020 mindestens 70 % der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle einer Vorbereitung zur Wiederverwendung, dem Recycling oder einer sonstigen stofflichen Verwertung zugeführt werden. Es soll auf eine Deponierung (Verfüllung, Beseitigung) möglichst verzichtet werden¹.

Böden und Steine ohne gefährliche Stoffe (Abfallschlüssel 17 05 04 nach Abfallverzeichnisverordnung) sind lt. § 14, Abs. (3) zwar nicht in dieser Quotenvorgabe enthalten, fallen im Zuge von Baumaßnahmen aber in großen Mengen an und werden zu nicht unwesentlichen Teilen deponiert und verfüllt. So fielen beispielsweise nach einer Veröffentlichung des Umweltbundesamtes [31] 2002 etwa 141 Mio. t Bodenmaterial (Boden und Steine) an. Wird die Verwendung im Tagebau (Verfüllung, Oberflächengestaltung etc.) der Kategorie Beseitigung zugeordnet, so wurden davon etwa nur rund 32 % einer Wiederverwertung (Recycling) zugeführt. Auch für diese Stoffgruppe ist nach KrWG § 8 eine möglichst hochwertige Verwertung vorzusehen.

Bei Betrachtung der nach DEHOUST et al. [31] im Beobachtungszeitraum 2002/2003 angefallenen Gesamtmenge an mineralischen Abfällen von 238 Mio. t (diese umfasst zusätzlich zum Bodenmaterial auch noch Aschen, Schlacken aus Steinkohle, HMVA, Metallschlacken sowie Bau- und Abbruchabfälle), ergibt sich dort ebenfalls bei Zuordnung der Verwendung im Tagebau zur Kategorie Beseitigung eine Gesamtrecyclingquote von etwa 53 %².

¹ Im Falle, dass eine Verfüllung von Abfällen als Ersatz für anderes Material erfolgt, entspricht dies einer sonstigen stofflichen Verwendung im Rahmen des Gesetzes und ist somit in der Recyclingquote enthalten.

² Die Zuordnung der von DEHOUST et al. [31] verwendeten Kategorie „Einsatz im Tagebau“ zu „Beseitigung“ oder „Recycling“ ist für Boden und Steine bezogen auf das KrWG zwar eindeutig (sonstige stoffliche Verwertung, wenn als Ersatz für anderes Material), im Gesamtkontext aber streitbar. Der „Einsatz im Tagebau“ ist in [31] definiert als: Sicherung von Böschungen, Anlage und Unterhalt von Förder- und Verkehrswegen, Beeinflussung von geochemischen und hydrochemischen Vorgängen (Pufferung), Verfüllung, Oberflächenmodellierung sowie Restlöcher- und Haldengestaltung. Dabei werden hochwertige Verwertungswege wie z. B. Sicherung von Böschungen und Verkehrswegebau gemischt mit geringwertigen Verwertungswege wie Verfüllung oder Haldengestaltung, welche praktisch einer Beseitigung entsprechen.

Bezugnehmend auf das KrWG § 6, Abs. (2), Kapitel 2. ist u. a. das „Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen“ bei der Bewertung einer Maßnahme zu berücksichtigen und nach § 8, Abs. (1), der hochwertigste Verwertungsweg zu wählen. So ergibt sich die Frage, ob durch die Erweiterung der technischen Möglichkeiten der hochwertigen Verwendung, also durch die Etablierung geeigneter Verfahren, nicht eine noch höhere Quote der Wiederverwendung und des Recyclings vor allem von Bodenmaterial, aber auch von mineralischen Abfällen im Gesamten, mit dem Ziel der Schonung von Primärrohstoffen möglich ist.

Einen Großteil der bisher abgelagerten mineralischen Stoffe stellen

- organogene Böden bzw. Böden mit organischen Bestandteilen,
- Böden mit geringer Konsistenz sowie
- Sekundärbaustoffe (RC-Baustoffe, Böden mit Fremdbestandteilen, industrielle Nebenprodukte)

dar, da Vorbehalte gegenüber deren Verwendung im Erdbau bestehen.

Ziel dieser Forschung war es, die Grundlagen für eine nachhaltige Materialverwendung im Erdbau für drei im Kontext der Ressourcenschonung maßgebliche Stoffgruppen zu erweitern und Vorbehalte abzubauen. Die Möglichkeiten und Grenzen zur Ausnutzung der jeweiligen Eigenschaften der Materialien und Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Eigenschaften sollten aufgezeigt werden. Damit sollte letztlich ein Beitrag dazu geleistet werden, den Verbrauch von Primärrohstoffen im Sinne einer nachhaltigen Materialverwendung zu reduzieren und bisher abgelagerte mineralische Stoffe im Erdbau als wirtschaftliche und technisch sinnvolle Alternativen ins Spiel zu bringen.

Henzinger, C.

Birle, E.

Bagherpour, I. (Mitarbeit bei Kap. 2.4.3)

Wolter, S. (Mitarbeit bei Kap. 2.4.1 und 2.4.2)

2 Organogene Böden und Böden mit organischen Anteilen

2.1 Einleitung

Organogene Böden und Böden mit organischen Anteilen fallen bei vielfältigen Erdbaumaßnahmen z. B. als Oberboden oder als geologisch junge Sedimente (Auelehme, Seetone, Mudde, Klei, Schlick) an. Bisher werden sie aufgrund ihrer bodenmechanisch oft ungünstigen Eigenschaften fast ausschließlich abgelagert. Es ist derzeit in der Regel einfacher, Primärrohstoffe als Ersatz für diese Materialien zu verwenden. Einzelne Pilotprojekte zeigen jedoch, dass derartige Materialien in untergeordneten Erdbauwerken (z. B. Lärm- und Sichtschutzwälle) durchaus zum Einsatz kommen können. So wurden im Zusammenhang mit Planungen zum Bau einer dritten Start- und Landebahn am Münchner Flughafen in den vergangenen Jahren durch das Zentrum Geotechnik der TU München umfangreiche Untersuchungen zur Einsetzbarkeit von organogenen Böden im Erdbau durchgeführt (BIRLE [15] und BIRLE et al. [17], [171], [170]). Die Untersuchungen belegen, dass organogene Böden im Erdbau eingesetzt werden können. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die bodenmechanischen Eigenschaften organogener Böden maßgeblich durch die organischen Bestandteile beeinflusst werden. So nimmt die Scherfestigkeit und Steifigkeit organogener Böden mit zunehmendem organischen Anteil ab. Für eine Beurteilung der Einsetzbarkeit von organogenen Böden im Erdbau ist die Höhe des organischen Anteils deshalb von großer Bedeutung. Entsprechend den Untersuchungen des Zentrum Geotechnik lassen sich organogene Böden bis zu einem Glühverlust von bis zu 30 % auch für Erdbauwerke mit Anforderungen an die Standsicherheit (z. B. Lärm- und Sichtschutzwälle) verwenden. Böden mit höheren organischen Anteilen können für Erdbauwerke im Rahmen von Geländemodellierungen verwendet werden, wenn keine besonderen Anforderungen an die Standsicherheit gestellt sind (z. B. flach geneigte

Erdbauwerke). Ebenso zeigen die Untersuchungen der TU München, dass auch die Verformungseigenschaften stark vom organischen Anteil beeinflusst werden. So nehmen die spannungs- und zeitabhängigen Verformungen mit zunehmendem organischem Anteil zu. Im Hinblick auf die Verdichtbarkeit ist zu beachten, dass die Proctordichte und der Proctorwassergehalt ebenfalls sehr stark vom organischen Anteil abhängen und bereits geringe Änderungen des organischen Anteils deutliche Dichteänderungen bei gleicher Verdichtungsenergie nach sich ziehen können. Dies hat besondere Auswirkung auf die Festlegung von Verdichtungsanforderungen sowie die durchzuführenden Verdichtungskontrollen.

Im Zusammenhang mit den Fragestellungen am Münchner Flughafen wurden durch das Zentrum Geotechnik der TU München zwar umfangreiche Untersuchungen zur Beurteilung der Verwendbarkeit des dort anstehenden Bodens mit organischen Anteilen für Erdbauwerke durchgeführt, zur Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf andere organische Böden lagen bisher aber noch keine Untersuchungen vor. Aufgabenstellung war also vorrangig die Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen zur Bestimmung der grundsätzlichen Eignung von organogenen Böden bzw. von Böden mit organischen Bestandteilen für die Verwendung im Erdbau. Zusätzlich sollte aufgezeigt werden, ob die bautechnischen Eigenschaften durch Bindemittelzugabe verbessert werden können.

2.2 Untersuchungskonzept

Die Untersuchungen bauen auf den vom Zentrum Geotechnik der TU München im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen ([170], [171]) zur Verwendbarkeit von organogenen Böden bzw. Böden mit organischen Anteilen im Erdbau auf.

Im ersten Schritt wurde anhand einer Literaturstudie der Wissensstand zum Einfluss des organischen Anteils auf die bodenmechanischen Eigenschaften von organogenen Böden bzw. Böden mit organischen Anteilen im verdichteten Zustand zusammengetragen. Dabei wurde besonders auf die Verdichtbarkeit, die Scherfestigkeit und die Verformungseigenschaften geachtet. Es liegen zwar zahlreiche Untersuchungen zum bodenmechanischen Verhalten von natürlich abgelagerten Böden mit organischen Anteilen vor; zur Eignung dieser Böden

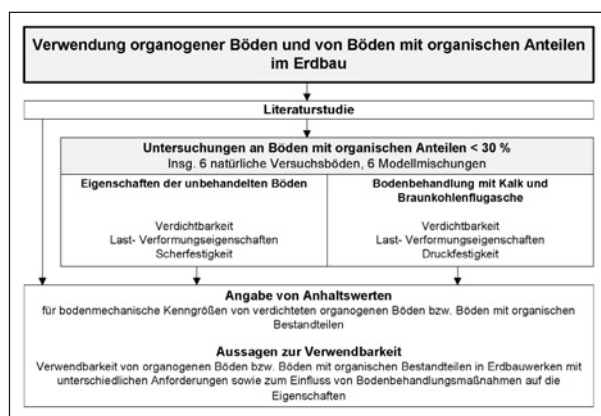


Bild 1: Untersuchungskonzept zur Verwendung organogener Böden bzw. von Böden mit organischen Anteilen im Erdbau

als Baustoff für Erdbauwerke gibt es abgesehen von den Untersuchungen der TU München derzeit allerdings beinahe keine systematischen Untersuchungen.

Im folgenden Schritt wurden mehrere Böden aus unterschiedlichen Regionen in Deutschland ausgewählt, an denen systematische Untersuchungen zum Einfluss des organischen Anteils auf die Verdichtungs-, Scherfestigkeits- und Verformungseigenschaften durchgeführt werden sollten. Zusätzlich wurde an einem der ausgewählten Böden mit hohem organischem Anteil genau dieser Anteil stufenweise über Zugabe von Sand reduziert (Variation des organischen Anteils). Mit den ausgewählten Böden und den erwähnten Mischungen mit Sand (Modellmischungen) wurden hierauf folgend Laboruntersuchungen zur Verdichtbarkeit, der Scherfestigkeit und den Verformungseigenschaften durchgeführt.

Die bereits vorliegenden Untersuchungen der TU München zeigen, dass der natürliche Wassergehalt der Böden aufgrund des hohen Anteils an organischer Substanz häufig über dem Proctorwassergehalt liegt. In solchen Fällen kann eine Bindemittelzugabe zur Reduzierung des Wassergehaltes zielführend sein. Für Böden mit hohen organischen Anteilen, welche geringe Scherfestigkeiten aufweisen, ist möglicherweise eine Bindemittelzugabe zusätzlich zur Verbesserung der Scherfestigkeitseigenschaften sinnvoll. Vor diesem Hintergrund wurde auch untersucht, inwieweit eine Bindemittelzugabe zu einer Reduzierung des Wassergehaltes und zu einer Verbesserung der Scherfestigkeitseigenschaften führt. Die Untersuchungen wurden exemplarisch an einem Boden, der einen organischen Anteil von etwa 30 % aufweist, durchgeführt. Als

Bindemittel wurden Weißfeinkalk (CaO) und Braunkohlenflugasche gewählt.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse und der bereits vorliegenden Erkenntnisse wurde abschließend ein Bewertungsschema entwickelt, in dem Anhaltswerte für die bodenmechanischen Kennwerte in Abhängigkeit vom organischen Anteil eines Bodens angegeben werden. Dieses soll als Hilfestellung zur Abschätzung der bautechnischen Eignung solcher Materialien dienen und führt im besten Fall dazu, dass diese öfter als bisher auch als Baustoff für Erdbauwerke in Betracht gezogen werden.

2.3 Grundlagen und Literaturlauswertung

2.3.1 Entstehung organischer Böden

Die Entstehung von Böden wird allgemein von unterschiedlichen zeitabhängigen Faktoren wie Klima, Wasserangebot, Flora, Fauna, Ausgangsgestein, Relief und menschlicher Tätigkeit beeinflusst. Dabei liefern das pflanzliche und tierische Leben im Bereich der Oberfläche (und darüber) in der Regel die Grundlage für den organischen Anteil dieser oberen Bodenzonen. Tier- und Pflanzenreste lagern sich an der Oberfläche ab. In den Schichten unter der Oberfläche liegen sie, abhängig von Umgebungsfaktoren, in verschiedenen Tiefenstufen unterschiedlich stark zersetzt vor. Unterhalb der Humusschicht, die noch maßgebliche Anteile an organischen Stoffen mit Gewebestruktur enthält, schließt der mineralische Oberboden an. Dieser besteht größtenteils aus den Zersetzungsprodukten der organischen Ausgangssubstanz und weist neben den mineralischen Abbauprodukten noch entsprechende organische Anteile (stark zersetzter, sogenannter „Feinhumus“ und durch Umwandlung entstandene Huminstoffe) auf. Wird die Zersetzung, Umwandlung und Mineralisierung durch die Anwesenheit von Wasser (Mangel an Sauerstoff; zum Beispiel Moore, Seehumus) verzögert, so resultieren die Moorböden mit den typisch hohen organischen Anteilen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL [131]).

2.3.2 Erdbautechnische Eigenschaften

Allgemeines

Zur Beurteilung der erdbautechnischen Verarbeitbarkeit eines Bodens sowie der Standfestigkeit und der Dauerhaftigkeit von daraus errichteten Bauwer-

ken sind vorrangig Kenntnisse zum Verdichtungsverhalten, zur Scherfestigkeit und dem Verformungsverhalten relevant. Über die erdbautechnischen Eigenschaften organogener Tone und von Tonen mit organischen Anteilen zwischen 5 und 30 M.-% ist in der Literatur allgemein wenig bekannt. Nach EDIL [49] werden die bodenmechanischen Eigenschaften eines Bodens durch organische Anteile im Bereich von 6 bis 20 M.-% zwar beeinflusst, dieser verhält sich jedoch noch wie ein mineralischer Boden. Über 20 M.-% organische Anteile in Böden führen dazu, dass diese die bodenmechanischen Eigenschaften zunehmend dominieren.

Verdichtungsverhalten

Das Verdichtungsverhalten von Böden wird durch organische Anteile, zusammengefasst nach SOA-NE [138], über folgende Eigenschaften und Mechanismen beeinflusst, die je nach Art und Menge des organischen Materials einen unterschiedlich starken Einfluss auf dieses nehmen:

- Bindungskräfte zwischen Bodenpartikeln
Die organische Substanz beeinflusst die Bindung der Bodenpartikel aneinander durch die Form ihrer Moleküle (Kettenmoleküle) sowie durch Beeinflussung kapillarer Bindungskräfte. Dies führt im bodenmechanischen Verhalten zu einer Erhöhung der Kohäsion zwischen einzelnen Partikeln.
- Elastizität des organischen Materials
Organisches Material weist im Vergleich zu mineralischem Material höhere Elastizitäten auf und beeinflusst so die Gesamtelastizität des Bodens.
- Verringerung der mittleren Korndichte
Da die Korndichte von organischem Material niedrigere Werte einnimmt als die von mineralischem, wird die bei der Verdichtung erreichbare Trockendichte allein dadurch bereits verringert.
- Fasern des organischen Materials
Befinden sich faserige Bestandteile im Boden, so können diese durch Aufnahme von Zugkräften der Verformung und Verdichtung des Bodens entgegenwirken.
- Änderung der Oberflächenkräfte
Durch die Anlagerung von organischen Molekülen an der Mineraloberfläche (zum Ausgleich der permanenten Oberflächenladungen) können die

zwischen den Bodenpartikeln wirkenden Kräfte beeinflusst werden.

Zusätzlich bindet mineralischer Boden in der Regel weniger Wasser als organisches Material (siehe zum Beispiel MALKAWI et al. [101]). Auch dadurch wird die erdbautechnische Verdichtungscharakteristik eines Bodens mit nennenswerten organischen Anteilen beeinflusst.

Erste Untersuchungen zu Böden mit maßgeblichen Anteilen an organischem Material als Baustoff wurden in Deutschland von BRÜGGEMANN & MORITZ [20] durchgeführt. Die Ergebnisse aus Versuchen an künstlichen Mischungen aus unterschiedlichen Böden und Torf (Mischungen mit bis zu etwa 20 M.-% an organischen Anteilen) zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Verdichtungsverhaltens vom organischen Anteil. Es wird von abnehmenden Trockendichten und steigenden optimalen Wassergehalten mit steigendem organischem Anteil berichtet. MALKAWI et al. [101] untersuchten ebenfalls gezielt hergestellte, künstliche Mischungen bis zu organischen Anteilen von mehr als 20 M.-% (Illit/Smektit-Wechsellagerungsmineral und Torf). Die Ergebnisse zeigen die gleichen Tendenzen wie die Untersuchungen von BRÜGGEMANN & MORITZ [20].

Von FRANKLIN et al. [72] wurden natürliche Böden mit organischen Anteilen (Oberböden) und künstliche Mischungen (Mischung aus Tonen und Torf) hergestellt und untersucht. Auch die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen die oben beschriebenen Tendenzen, wobei das Verdichtungsverhalten der künstlich hergestellten Mischungen und der natürlichen Proben bei vergleichbarem Mineralbestand der anorganischen Anteile (aber abweichender Herkunft des organischen Anteils) von den Autoren als sehr ähnlich bezeichnet wird.

Untersuchungen am Zentrum Geotechnik der TU München bestätigen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Verdichtungsverhalten und organischem Anteil (vgl. HEYER et al. [83] und BIRLE et al. [16]). Es handelte sich bei den untersuchten Böden hauptsächlich um organogene Tone aus der Münchner Schotterebene. In Bild 2 ist der in den Untersuchungen ermittelte Proctorwassergehalt in Abhängigkeit vom organischen Anteil dargestellt.

Zusammenfassend können für die Verdichtung folgende Tendenzen aus den Literaturwerten abgelesen werden: Mit steigendem organischem Anteil

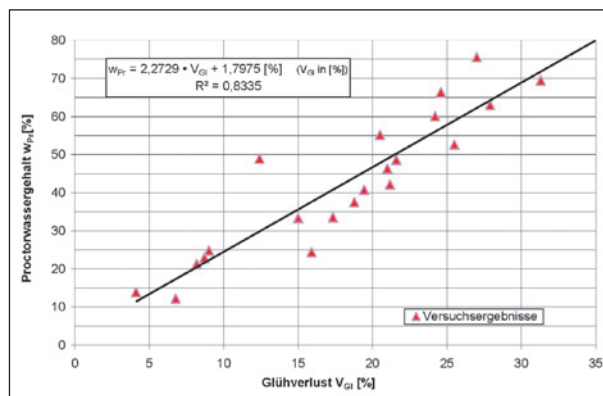


Bild 2: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Proctorwassergehalt nach BIRLE et al. [16]

- nimmt die bei der Verdichtung erreichbare Trockendichte ab und
- steigt der optimale Wassergehalt für die Verdichtung.

Scherfestigkeit und Tragfähigkeit

BRÜGGEMANN & MORITZ [20] untersuchten die oben genannten, künstlichen Mischungen aus Sand oder Ton mit Torf auch auf deren Scherfestigkeit. Bei steigendem organischem Anteil nahmen der Reibungswinkel des Sand-Torf-Gemisches ab und der des Ton-Torf-Gemisches zu. Bei beiden Böden stellte sich ab 20 M.-% an organischem Material ein Grenzwert zwischen 20° und 30° ein.³ Dieses Ergebnis passt zur Beobachtung von FRANKLIN et al. [72], die unter einem organischen Anteil von 20 M.-% die Festigkeit weniger durch das organische Material, als durch die anorganischen Anteile und strukturellen Unterschiede in den Böden bestimmt sehen. Gleichzeitig mit steigendem organischem Anteil wurden von BRÜGGEMANN & MORITZ [20] auch eine ansteigende Kohäsion zwischen 10 und 40 kN/m² dokumentiert.

Während die Kohäsion in den Untersuchungen von HEYER et al. [83] bzw. BIRLE et al. [16] für die von ihnen untersuchten Böden, unabhängig vom organischen Anteil, Werte zwischen $c' = 14$ kN/m² und 27 kN/m² annahm, ergaben sich für organische Anteile bis $V_{Gl} \approx 25$ M.-% Reibungswinkel von 20° bis 25° . Bei Boden mit noch höheren Glühverlusten wird über ein Absinken der Werte für die Reibungs-

³ Die Einbaubedingung für die Scherversuche wird durch die Autoren nicht genannt.

winkel berichtet. Die genannten Werte beziehen sich auf Proben, die im Bereich des Proctoroptimums hergestellt wurden.

Die von MALKAWI et al. [101] untersuchten, künstlich hergestellten Böden mit organischen Anteilen bis etwa 21 M.-% zeigen bei steigenden organischen Anteilen fallende Werte für die einaxiale Druckfestigkeit. Die Autoren schreiben dies der durch die Verdichtung zunehmend niedrigeren erreichbaren Trockendichte zu. Da die Versuche an den Proben aus den Verdichtungsversuchen durchgeführt wurden, konnte die Festigkeit als Funktion des Wassergehaltes ausgewertet werden. Während sich das Maximum der Werte mit steigenden organischen Anteilen weiter hin zu höheren Wassergehalten verschob, wurde es, bezogen auf die jeweils zugehörige Verdichtungskurve, auf der trockenen Seite des Verdichtungsoptimums angetroffen. Wiederum passen diese Beobachtungen von MALKAWI et al. [101] zu jenen von FRANKLIN et al. [72]. Die Untersuchungen von BIRLE et al. [16] an Böden mit Glühverlusten bis etwa 50 M.-% zeigen ebenfalls auf der nassen Seite des Verdichtungsoptimums einen Abfall der einaxialen Druckfestigkeiten. Bei Böden mit hohen organischen Anteilen (etwa 50 M.-%) wurde kein ausgeprägtes Maximum der einaxialen Druckfestigkeit mehr dokumentiert. Die undrainierten Scherfestigkeiten an im Proctoroptimum verdichteten Proben mit $V_{GI} < 25$ M.-% erreichen Werte von $c_u > 50$ kN/m².

Zusammenfassend können folgende Punkte aus der angegebenen Literatur für die gegebene Spanne an organischen Anteilen im Boden festgehalten werden: Bei steigendem organischen Anteil des Bodens

- steigt der Einfluss des organischen Materials auf den Reibungswinkel an (je nach anorganischem Material bzw. Struktur kann dieser steigen oder fallen),
- ist der Wert der Kohäsion noch von weiteren Faktoren abhängig. Bei sonst gleichen Bedingungen und alleiniger Variation des organischen Anteils steigt die Kohäsion wahrscheinlich an,
- nimmt die einaxiale Druckfestigkeit ab, wobei im Bereich des jeweiligen Verdichtungsoptimums (trockene Seite) eines Bodens mit organischen Anteilen ein Maximum auftritt. Insbesondere auf der nassen Seite des Proctoroptimums fallen die einaxialen Druckfestigkeiten stark ab.

Verformungsverhalten

BRÜGGEMANN & MORITZ [20] führten an den von ihnen hergestellten Mischungen aus Sanden und Tonen mit Humus Druckversuche mit behinderter Seitenstauchung (Oedometerversuche) durch.⁴ Die Auswertung der Ergebnisse bei einer Spannung von 300 kPa zeigen einen starken Abfall der Steifigkeiten des Sand-Torf-Gemisches mit zunehmendem organischen Anteil (etwa 45 MN/m² bei 0 M.-% organischer Anteil bis < 5 MN/m² bei etwa 18 M.-% organischer Anteil). Weniger stark beeinflusst zeigte sich das Ton-Torf-Gemisch, dessen Steifigkeit bei der genannten Spannung von etwa 10 MN/m² (0 M.-% organischem Anteil) auf etwa 5 MN/m² (etwa 25 M.-% organischer Anteil) abnahm. Von HEYER et al. [83] und BIRLE et al. [16] wurden auch Versuche zum Verformungsverhalten verdichteter Böden mit unterschiedlichen organischen Anteilen durchgeführt. Sie weisen auf die Abhängigkeit des erreichbaren Steifemoduls vom organischen Anteil hin und geben für die untersuchten Böden mit Glühverlusten von $V_{GI} = 5$ M.-% und den Spannungsbereich $\sigma' = 100 - 300$ kPa etwa Werte von $E_S = 6$ bis 10 MN/m² an, für Böden mit $V_{GI} = 60$ M.-% und dem gleichen Spannungsbereich Werte von $E_S = 2$ bis 4 MN/m². Der organische Anteil, aber auch der Einbauwassergehalt beeinflusst nach HEYER et al. [83] und BIRLE et al. [16] das zeitabhängige Verformungsverhalten, wobei der Kriechbeiwert nach den Autoren mit steigendem organischem Anteil zu- und von der nassen Seite des Verdichtungsoptimums zum trockenen hin abnimmt.

Die Versuche zum Sackungs- und Schwellverhalten bei 97 % der Proctordichte (trockene und nasse Seite) und einer Auflastspannung von 25 kPa und 50 kPa von HEYER et al. [83] und BIRLE et al. [16] zeigten jeweils keine nennenswerten Verformungen. MALKAWI et al. [101] untersuchten das freie Schwellen und stellten einen Zusammenhang zwischen organischem Anteil und freiem Schwellen fest. Dabei stieg das Ausmaß der Schwellung mit steigendem organischem Anteil der Proben an.

Weitere Veröffentlichungen

THIYAKKANDI & ANNEX [151] führten Versuche an in der Probenvorbereitung ofengetrockneten Böden (Kaolinite, Illite) mit organischen Anteilen durch.

⁴ Die Einbaubedingungen für die Versuche sind nicht bekannt.

Der bei der Trocknung bei 105 – 110 °C verlorene Anteil an Organik wurde über die Zugabe von Harnstoff nachträglich ausgeglichen, außerdem wurde der organische Anteil durch diese Zugabe in weiteren Grenzen variiert. Die durch die Trocknung entstehenden Böden unterschieden sich in ihren Eigenschaften maßgeblich von den ursprünglichen Böden (Fließ- und Ausrollgrenze wurden durch die Trocknung in etwa halbiert und die Sandfraktion stieg bei sinkendem Feinteilgehalt durch den Trockenvorgang von 3 auf 15 %). An diesen künstlich hergestellten Böden wurden im Verdichtungsoptimum anschließend Versuche durchgeführt. Zusammenfassend werden folgende Ergebnisse beschrieben:

- leicht abnehmende Trockendichte und steigen der optimaler Wassergehalt bei steigendem organischen Anteil (Versuche bis etwa 8 M.-% Organik),
- abnehmende einaxiale Druckfestigkeiten und undrainierte Scherfestigkeiten sowie zunehmend duktiler Verhalten mit steigendem organischen Anteil (Versuche bis etwa 14 M.-% Organik),
- abnehmender Reibungswinkel bei steigendem organischen Anteil (Versuche bis etwa 17 M.-% Organik),
- abnehmende Porenzahl (e) mit steigender Spannung und abnehmendem organischen Anteil im Oedometerversuch. Der Kompressionsbeiwert (C_c) steigt dabei ab etwa 10 M.-% organische Anteile mit zunehmendem organischen Anteil nur mehr schwach (Versuche bis etwa 20 M.-% Organik),
- Konsolidationsbeiwert (C_v) nimmt ab und Kriechbeiwert (C_{α}) steigt mit zunehmendem organischen Anteil des Bodens (Versuche bis etwa 20 M.-% Organik).

Inwiefern von den Ergebnissen dieser künstlichen organischen Böden mit der starken Änderung der Eigenschaften durch den durchgeführten Trocknungsvorgang Rückschlüsse auf die bodenmechanischen Eigenschaften natürlicher organischer Böden zulässig sind, ist nicht geklärt. Eine im Aufbau und Darstellung praktisch identische Studie von ADEJUMO [1] liefert sehr ähnliche Ergebnisse, trotz Unterschiede im Mineralbestand (anorganisches Material hauptsächlich Kaolinit/Montmorillonit).

Da in beiden Veröffentlichungen auch wichtige Fragen zur Probenvorbereitung (Warum wurde der Boden nicht schonend bei niedrigeren Temperaturen getrocknet?) und zu den festgelegten Einbaubedingungen (Warum werden die Verdichtungsoptima der Böden mit über 8 M.-% Organik nicht angegeben?) offen bleiben, sind diese Veröffentlichungen nur mit Vorbehalten zu berücksichtigen und werden an dieser Stelle absichtlich nicht mit den übrigen genannt.

Zusammenfassende Betrachtung

Die Zusammenschau der oben beschriebenen Untersuchungen legt unterschiedliche Schlussfolgerungen nahe. Mit steigendem Anteil an organischem Material nimmt gleichzeitig der Einfluss des anorganischen Anteils ab und schließlich wird das Verhalten mehr und mehr vom organischen Anteil dominiert. Dieser Übergangsbereich ist fließend und noch stark durch die Eigenschaften des anorganischen Materials beeinflusst (zum Beispiel Tonmineralart). Die Untersuchungen von FRANKLIN et al. [72] deuten darauf hin, dass die Herkunft des organischen Materials (Oberboden oder Gemische aus Ton und Torf) in dem Bereich, der noch vom mineralischen Anteil eines Bodens maßgeblich beeinflusst wird, von untergeordneter Bedeutung ist.

2.3.3 Bodenbehandlung von Böden mit organischen Bestandteilen

Die Bodenverbesserung von zu nassen Böden hat im Gegensatz zur Bodenverfestigung und qualifizierten Bodenverbesserung rein die Verbesserung der Verarbeitbarkeit zum Ziel. Dieses Ziel ist in der Regel am einfachsten über die Reduzierung des Wassergehaltes erreichbar. Ist eine Trocknung nicht möglich, so bietet sich die Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk (CaO) an. Diese wirkt einerseits über die chemische Bindung von Wasser durch die Umwandlung von CaO in Ca(OH)_2 und andererseits durch Verdunstung von Wasser als Folge der freier werdenden Hydratationsenergie in Form von Wärme. Von BIRLE et al. [16] wurden dazu Ergebnisse zu organogenen Tonen (siehe Bild 3: Boden B – $V_{\text{GI}} \approx 25$ M.-%, Boden D – $V_{\text{GI}} \approx 17$ M.-%) veröffentlicht. Die Ergebnisse des verbesserten Tones mit $V_{\text{GI}} \approx 17$ M.-% zeigen für die Kalkverbesserung typische Proctorkurven mit sinkender Trockendichte bei steigender Zugabemenge. Die Verdichtungskurven des Bodens B mit $V_{\text{GI}} \approx 25$ M.-% lassen ein abweichendes Verhalten erkennen. Hier ergaben sich bei stei-

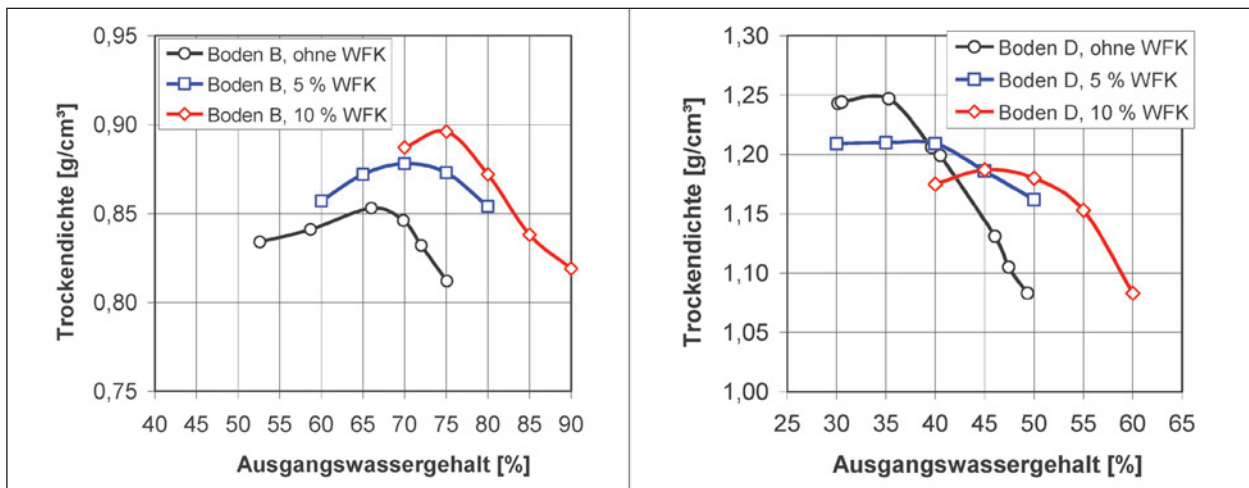


Bild 3: Verbesserung von Böden mit organischen Anteilen nach BIRLE et al. [16]

gender Zugabemenge auch steigende Proctordichten. Dies ist im Sinne einer klassischen Verbesserung mit Weißfeinkalk untypisch. Die Verarbeitbarkeit des Bodens konnte aber in beiden Fällen verbessert werden. Bei beiden Böden ist auf der nassen Seite der Proctorkurve eine Wassergehaltsreduzierung von etwa 1 M.-% pro 1 M.-% zugegebenem CaO dokumentiert.

Soll ein Boden mit organischen Anteilen mit Bindemitteln verfestigt werden, so besteht oft Zweifel daran, ob eine Verfestigungsreaktion unter Einfluss des sauren Milieus im Boden mit organischen Anteilen in ausreichendem Maße stattfinden kann. Was JESSBERGER [88] hierzu zur Verbesserung mit Kalk angemerkt hat, gilt wohl auch für andere Bindemittel: es ist keine allgemein gültige Aussage möglich; die organischen Bestandteile hemmen zwar die Verfestigungsreaktion, unterbinden sie aber nicht unbedingt. Die theoretisch möglichen Einflüsse organischer Bestandteile auf die Verfestigungsreaktion wurden in einem Bericht von TASTAN et al. [146] anschaulich zusammengefasst. Ihre Studie über die Verfestigung organischer Böden mit Flugasche zeigt, dass unterschiedliche Faktoren wie organischer Anteil des Bodens, Art und Menge der zugemischten Flugasche, Einbauwassergehalt etc. eine Rolle spielen. Eine Studie aus Schweden (AXELSSON et al. [8]) an unterschiedlichen organischen Böden (Torf/peat und Mudde/gyttja) mit organischen Anteilen zwischen 8 und 99 M.-% dokumentiert die Wirksamkeit unterschiedlicher Bindemittel wie Zement, Kalk, Flugasche und Hochofenschlacke. Obwohl die verschiedenen, verwendeten Bindemittel zu entsprechend unterschiedlichen Ergebnissen führen, kommen die Autoren doch zum Ergebnis, dass die untersuchten

Böden grundsätzlich verfestigt werden konnten. TIMONEY et al. [153] versuchen anhand einer Datenbank zur Verbesserung von organischen Böden (Torf/peat und Mudde/gyttja) Zusammenhänge zwischen Festigkeitsentwicklung und unterschiedlichen Kennwerten des organischen Bodens herauszuarbeiten. Auch von ihnen wurden Unterschiede in der Verfestigung je nach verwendetem Bindemittel festgestellt. YUNUS et al. [168] berichten über die Kalkstabilisierung eines Tons mit unterschiedlichen Anteilen an eingemischter Huminsäure als Reaktionshemmer. Sie zeigen, dass Langzeitreaktionen in Abhängigkeit vom organischen Anteil (Huminsäureanteil) das kurzfristig erreichte Ausmaß der Bodenverbesserungsmaßnahme wieder negativ beeinflussen können (durch Abfallen des pH-Wertes der Bodenlösung). Von TREMBLAY et al. [154] wurde der Einfluss unterschiedlicher organischer Stoffe im zementstabilisierten, feinkörnigen Boden untersucht. Zusammenfassend deuten sie aus den Ergebnissen, dass organische Anteile, die in der Porenlösung einen pH-Wert < 9 bedingen, die Verfestigungsreaktion sehr stark hemmen und dadurch kein Festigkeitszuwachs erzielt werden kann. Bei anderen untersuchten Huminstoffen im Boden wurde die Verfestigung entweder nur verzögert oder gar nicht beeinflusst.

2.4 Eigene Untersuchungen

2.4.1 Material

Natürliche organogene Böden

Nach Abklärung der Eigenschaften von infrage kommenden Böden aus ganz Deutschland wurden

letztlich Bodenproben aus dem Bundesland Brandenburg (Landkreis Barnim, Landkreis Oberhavel und Landkreis Spree-Neiße), aus dem Bundesland Niedersachsen (Landkreis Stade) sowie aus dem Bundesland Bayern (Landkreis Straubing-Bogen) beschafft. Der organische Anteil dieser Böden variiert von etwa 6 bis etwa 28 %.

In Bild 4 sind die verwendeten Böden im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196 zusammenfassend dargestellt. Die angegebenen Werte für die plastischen Eigenschaften beziehen sich auf den jeweiligen Anteil < 0,4 mm. Die Korngrößenverteilungen der einzelnen Böden sind in Bild 5 abgebildet. Die Ergebnisse aus den Versuchen zur Klassifizierung der Böden sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Bei der Mudde aus Jänschwalde (MuJä) handelt es sich um eine Kalkmudde bezogen aus dem Tagebauvorfeld des Tagebau Jänschwalde im Landkreis Spree-Neiße. Die Probenahme erfolgte oberflächennah in ca. 0,40 m Tiefe. Von den beschafften Versuchsböden liegt dieser Boden mit etwa $V_{GI} = 7\%$ an der unteren Grenze des vorgegebenen organischen Anteils von 5 %. Der Boden weist einen Kalkgehalt von $V_{Ca} = 50,6$ bis $67,4\%$ auf.

Die beiden Bodenproben KIBu1 und KIBu2 entstammen einer Straßenbaumaßnahme in der Nähe

von Hamburg und werden allgemein als Klei angesprochen. Aus dem vor Ort aufliegenden Material wurden zwei sich im organischen Anteil augenscheinlich unterscheidende Bodenproben entnommen.

Der organische Boden Schwanebeck (BoSc) stammt aus dem Landkreis Barnim und wurde auf dem Betriebsgelände der Firma TBS Rinne GmbH

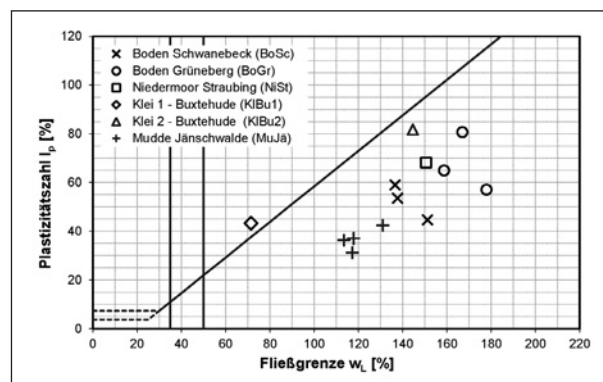


Bild 4: Untersuchte Böden im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196⁵

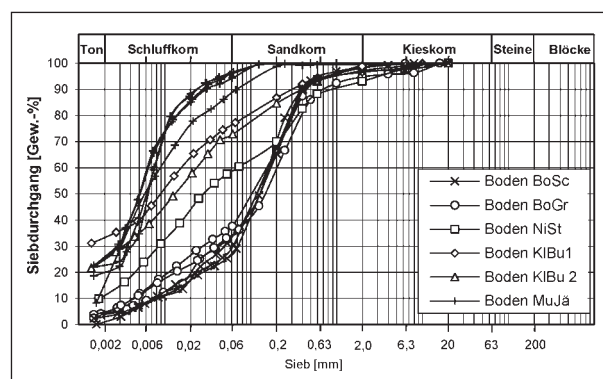


Bild 5: Sieblinien der natürlichen Böden

⁵ Das Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196 umfasst streng genommen nur Böden bis zu einer Fließgrenze von maximal $w_L = 80\%$ und Plastizitätszahl von $I_p = 50\%$.

⁶ Bei Angabe eines Wertebereiches wurden mehrere Einzelversuche durchgeführt. Die Angabe der Fließ- und Ausrollgrenze erfolgt für den Anteil < 0,4 mm.

Kennwert	Boden	MuJä ¹	KIBu1	KIBu2	BoSc	BoGr	NiSt
	[EH]						
Fließgrenze w_L [DIN 18122]	[%]	114 – 131	72	145	137 – 151	159 – 178	151
Ausrollgrenze w_P [DIN 18122]	[%]	77 – 89	28	63	78 – 107	86 – 121	83
Plastizitätszahl I_p [DIN 18122]	[%]	31 – 42	43	82	45 – 59	57 – 81	68
Korndichte ρ_S [DIN 18124]	[g/cm ³]	2,48 – 2,55	2,56	2,29	2,21 – 2,26	2,14 – 2,20	2,18
Kornanteil [DIN 18123]							
≤ 0,002 mm	[%]	15 – 26	33	25	1 – 4	4 – 5	11
≤ 0,06 mm	[%]	88 – 97	76	77	27 – 33	34 – 37	59
≤ 0,4 mm	[%]	100	92	90	89 – 91	81 – 89	83
≤ 2 mm	[%]	100	97	99	97 – 98	95 – 98	93
Glühverlust V_{GI} [DIN 18128]	[%]	6,1 – 7,3	7,2	19,8	19,6 – 20,7	24,1 – 26,3	27,0 – 28,2
Bodengruppe nach DIN 18196			TA	OT	OH	OH	OT

¹ Die Fließ- und Ausrollgrenze wurde mit der Einpunkt-Methode nach DIN 18122-1 bestimmt

Tab. 1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an den natürlichen Böden⁶

in Schwanebeck als gemischtkörniger Boden mit Beimengungen humoser Art aus einer Tiefe von ca. 1,40 m entnommen.

Der organische Boden aus Grüneberg (BoGr) wurde bei einer Baumaßnahme der Deutschen Bahn AG im Ort Grüneberg (Landkreis Oberhavel) bezogen. Bei diesem Boden handelt es sich vorwiegend um einen gemischtkörnigen Boden mit Beimengungen humoser Art. Er wurde oberflächennah aus einer Tiefe von 0,20 bis 0,60 m entnommen.

Bei der Entnahmestelle der Bodenprobe aus Straubing, genannt Niedermoor Straubing (NiSt), handelt es sich um ein trockengelegtes Niedermoor im Landkreis Straubing-Bogen. Der Boden wurde oberflächennah (unter der Grasnarbe) in einer Tiefe von etwa 0,3 bis 0,6 m entnommen.

Modellmischungen

Zur systematischen Untersuchung der Abhängigkeit der bodenmechanischen Eigenschaften von organischen Beimengungen wurden zusätzlich zu den Untersuchungen an natürlichen Böden auch Versuche an gezielten Mischungen aus organischen und anorganischen Böden durchgeführt. Als Basis für die Modellmischungen diente ein organischer Boden aus Reichwalde mit einem organischen Anteil von über 40 %. Ausgehend von diesem Boden wurden die organischen Anteile schrittweise durch Zugabe eines enggestuften Sandes reduziert. Die zwei verwendeten Basismaterialien und die ersten Modellmischungen sind nachfolgend beschrieben.

Als Basis für den mineralischen Anteil der künstlichen Modellmischungen wurde ein enggestufter Sand (SE) aus dem Kieswerk Ottendorf-Okrilla mit einem Feinkornanteil von etwa 0,5 % gewählt. Die Proctordichte dieses Bodens beträgt 1,699 g/cm³ und der Proctorwassergehalt 11,09 %. Beim organischen Basismaterial handelt es sich um einen Boden aus dem Tagebauvorfeld des Tagebau Reichwalde im Landkreis Görlitz. Die Probenahme erfolgte oberflächennah in ca. 0,20 – 0,50 m Tiefe. Der Glühverlust liegt bei etwa 42 bis 43 %.

Die Materialien wurden, wie bereits erwähnt, zu unterschiedlichen Anteilen gemischt. Die Eigenschaften der entstandenen Modellmischungen sind in Tabelle 2 zusammenfassend veranschaulicht.

Zugabematerial für die Bodenbehandlung

Als Zugabematerial zur Bodenbehandlung wurde einerseits ein Weißfeinkalk der Kategorie CL 90-Q (R5, P1), andererseits eine kalkreiche Braunkohlenflugasche aus Mitteldeutschland gewählt. Die genauen Angaben zu den Materialien sind in Kapitel 3.4.2 ausführlich dargestellt.

2.4.2 Verdichtungseigenschaften

Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Bei der Probenvorbereitung für Verdichtungsversuche an organischen Böden ist im Allgemeinen mit spezieller Vorsicht vorzugehen. Die Proben wurden entweder bei Raumtemperatur oder im Trockenschrank bei 60 °C auf den niedrigsten Wassergehalt getrocknet, der für die Durchführung der Verdichtungsversuche erforderlich war. Anschließend erfolgte eine Wasserzugabe zu den einzelnen Pro-

⁷ Die Angabe der Fließ- und Ausrollgrenze erfolgt für den Anteil < 0,4 mm.

Modellmischung		MM05	MM10	MM15	MM20	MM25	MM30
Kennwert	[EH]						
Fließgrenze w_L [DIN 18122]	[%]	-	-	-	136,0	187,6	174,5
Ausrollgrenze w_P [DIN 18122]	[%]	-	-	-	90,8	117,9	116,4
Plastizitätszahl I_P [DIN 18122]	[%]	-	-	-	45,2	69,7	58,0
Korndichte ρ_S [DIN 18124]	[g/cm ³]	2,538	2,475	2,351	2,241	2,097	2,029
Kornanteil [DIN 18123]							
≤ 0,002 mm	[%]	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
≤ 0,06 mm	[%]	5	8	14	22	29	35
≤ 0,4 mm	[%]	16	33	41	54	61	70
≤ 2 mm	[%]	95	96	96	97	98	98
Glühverlust V_{Gl} [DIN 18128]	[%]	5,1 – 5,7	8,2 – 11,8	14,8 – 15,0	18,8 – 20,2	22,6 – 25,0	29,9 – 32,0
Bodengruppe nach DIN 18196		OH	OH	OH	OH	OH	OH

Tab. 2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an den Modellmischungen⁷

ben, um den jeweils gewünschten Versuchswassergehalt zu erreichen. Die Proben wurden zur Homogenisierung des Wassergehaltes mindestens 24 Stunden in geschlossenen Behältern aufbewahrt. Die Verdichtungsversuche wurden im Anschluss gemäß DIN 18127 im Proctortopf \varnothing 10 cm durchgeführt.

Der natürliche Boden mit dem höchsten Anteil an organischem Material (NiSt) wurde mit dem Ziel einer Bodenverbesserung (Verbesserung der Verarbeitbarkeit) mit je 10 M.-% Weißfeinkalk bzw. 20 M.-% Braunkohlenflugasche behandelt. Das Bindemittel wurde dem Boden mittels Zwangsmischer (Kutter) zugemischt (Mischung für etwa 2 Minuten) und im Anschluss in geschlossenen Behältern bei 20 °C für 24 Stunden gelagert. Nach dem Öffnen der Behälter wurde ein weiterer Mischdurchgang durchgeführt und der behandelte Boden daraufhin verdichtet.

Verdichtungseigenschaften

Allgemein lässt sich bei der Zusammenschau der Ergebnisse der Verdichtungsversuche eine deutliche Tendenz erkennen. Dazu ist in Bild 6 der Zusammenhang zwischen Glühverlust und optimalem Wassergehalt für die einzelnen Böden dargestellt. Zusätzlich wurden im Diagramm die Ergebnisse von BIRLE et al. [16] aufgenommen. Als Ausreißer zeigt sich nur die Kalkmudde MuJä, die mit sehr niedrigem Glühverlust einen sehr hohen optimalen Wassergehalt aufweist. Die Kalkmudde lag vor dem Verdichtungsversuch stückig, in leicht verkitteten Großaggregaten (bis mehrere Zentimeter) vor. Da auch die in situ – Trockenrohdichten solcher Böden sehr niedrig sind (siehe zum Beispiel CHMIELESKI [27]), könnte sich die stark vom Durchschnitt abweichende Verdichtungscharakteristik daraus erklären.

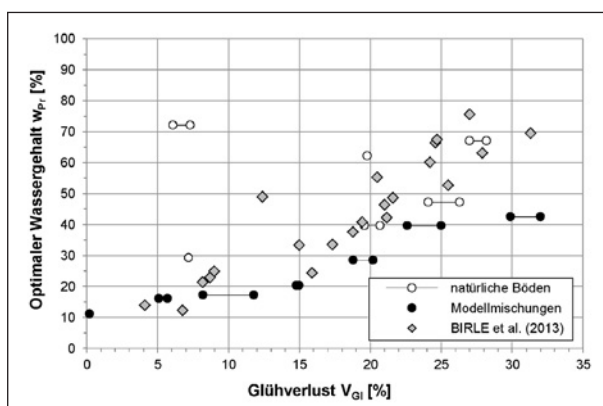


Bild 6: Zusammenhang zwischen Glühverlust und optimalem Wassergehalt mit den Werten von BIRLE et al. [16]

Der Feinteilgehalt der Modellmischungen entstammt nur aus dem Boden BoRe, der den organischen Anteil der Modellmischungen liefert. Der zugemischte Sand 0/2 mm weist keinen Anteil $< 0,06$ mm auf. Die Vermutung liegt nahe, dass die Werte der Modellmischungen am unteren Rand des erkundeten Spektrums auch damit zusammenhängen, dass die Mischungen einen niedrigen Feinteilgehalt und/oder der anorganische Anteil der jeweiligen Modellmischungen eine niedrige Plastizität aufweist.

Es ist bekannt, dass die Verdichtungseigenschaften anorganischer feinkörniger Böden maßgeblich von den plastischen Eigenschaften beeinflusst werden (zum Beispiel SOOS & ENGEL [141]). Des Weiteren ist leicht vorstellbar, dass der Mengenanteil des Feinkornes sehr maßgeblich zur Wasserbindung und damit zum messbaren Wert des optimalen Verdichtungswassergehaltes beiträgt. Trägt man nun für alle an der TU München vorhandenen Untersuchungsergebnisse als vereinfachten Indexwert das Produkt aus Feinkornanteil ($< 0,06$ mm) und Ausrollgrenze (bestimmt am Anteil $< 0,4$ mm) gegen den optimalen Verdichtungswassergehalt nach Proctor auf, so ergibt sich der Zusammenhang in Bild 7. Es ist dabei darauf hinzuweisen, dass auch der Ausreißer in Bild 6, die Kalkmudde MuJä, sich in dieser Zusammenstellung gut einordnet.

Der Vergleich mit Werten aus der Literatur gestaltet sich schwierig. Die Versuchsrandbedingungen weichen in den verschiedenen veröffentlichten Untersuchungen voneinander ab. Berücksichtigt man bei der Auswertung trotzdem auch Ergebnisse aus anderen Veröffentlichungen (mit ggf. nicht übereinstimmenden Versuchsanordnungen), so ergibt sich

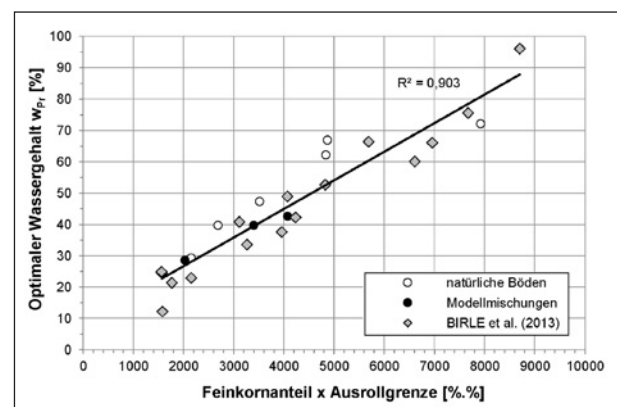


Bild 7: Zusammenhang zwischen dem Produkt aus Feinkornanteil ($< 0,06$ mm) und Ausrollgrenze (bestimmt am Anteil $< 0,4$ mm) zum optimalen Verdichtungswassergehalt für Boden mit organischen Anteilen

die Darstellung zum Zusammenhang von optimalem Verdichtungswassergehalt zum organischen Anteil (siehe Bild 8).

Dabei ist zu beachten, dass MALKAWI et al. [101] künstliche Mischungen aus einem Illit/Smektit-Wechselagerungsmineral und Torf herstellten. Unter anderem untersuchten sie den Einfluss der Trockentemperatur vor Bestimmung des Glühverlustes auf die Ergebnisse. De KIMPE et al. [30] untersuchten natürliche Böden, FRANKLIN et al. [72] natürliche Böden und künstliche Mischungen und THIYYAKKANDI & ANNEX [151] künstlich hergestellte Mischungen (siehe auch Kapitel 2.3.2).

Vergleicht man die Ergebnisse der Untersuchungen von MALKAWI et al. [101] an künstlichen Mischungen mit jenen im Rahmen der vorliegenden Forschung untersuchten Böden und künstlichen Mischungen, dann sind deutliche Unterschiede erkennbar. So zeigen die Ergebnisse von MALKAWI et al. [101] bei niedrigen Anteilen an organischem Material bereits deutlich größere Wassergehalte im Verdichtungsoptimum, was wahrscheinlich nicht nur auf das von den eigenen Versuchen abweichende Verdichtungsverfahren, sondern vor allem auf den Anteil an Wechselagerungsmineralen im Gemisch (anorganischer Anteil) zurückgeführt werden kann. Bei Böden mit niedrigen organischen Anteilen ist davon auszugehen, dass vorrangig der mineralische Anteil das Verdichtungsverhalten bestimmt.

Das Bestehen eines Zusammenhanges zwischen optimalem Verdichtungswassergehalt und dem organischen Anteil kann zusammenfassend bestätigt werden. Insgesamt beinhaltet der Glühverlust als Indexwert aber wohl zu wenig Information über einen Boden, als dass ein allgemein gültiger, direkter

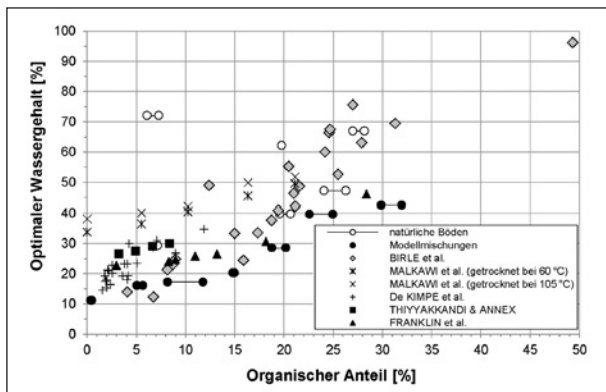


Bild 8: Zusammenhang zwischen organischem Anteil und optimalem Verdichtungswassergehalt (beide Werte ermittelt nach unterschiedlichen Verfahren)

Zusammenhang zum optimalen Verdichtungswassergehalt festgestellt werden könnte.

Bodenbehandlung mit Bindemitteln

Die Ergebnisse der Versuche zur Bodenverbesserung durch Bindemittelzugabe sind in Bild 9 und Bild 10 dargestellt. Zur Vereinfachung der Beurteilung der Wirksamkeit der jeweiligen Maßnahme wurde zusätzlich zur Verdichtungskurve des Ausgangsbodens (ohne Maßnahme) und der Verdichtungskurve des behandelten Bodens auch die Verdichtungskurve des behandelten Bodens, bezogen auf den jeweiligen Wassergehalt des Bodens vor der Bindemittelzugabe, dargestellt.

Beide Zugabematerialien bewirken, dass der Boden bei höheren Ausgangswassergehalten verdichtet werden kann. Zusätzlich wurden im Vergleich zum unbehandelten Boden höhere Trockendichten festgestellt. Wie aus Bild 9 und Bild 10 ersichtlich, blieb der Charakter der Verdichtungskurve des Ausgangsmaterials aber erhalten.

Grundsätzlich lassen sich Tone mit organischen Beimengungen also durchaus verbessern. Das Ausmaß der Verbesserung richtet sich aller Wahr-

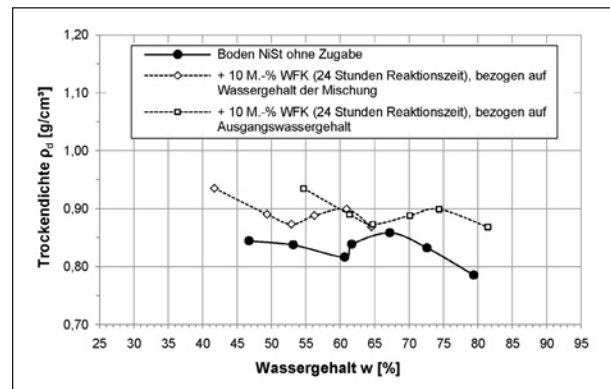


Bild 9: Boden NiSt, verbessert mit 10 M.-% WFK

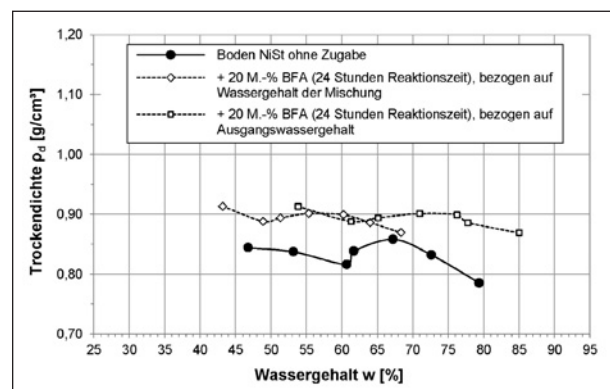


Bild 10: Boden NiSt, verbessert mit 20 M.-% BFA

scheinlichkeit nach der Art und Menge des zugegebenen Bindemittels. Die Schwierigkeit im Vergleich zum anorganischen Boden besteht in der Regel darin, dass organische Böden sehr viel höhere Wassergehalte aufweisen. Gleichzeitig ist die Kapazität der Bindemittel Wasser chemisch zu binden und/oder zu verdampfen (wie bei der Zugabe von gebranntem Kalk) im Vergleich dazu sehr begrenzt.

2.4.3 Last-Verformungseigenschaften

Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Für die natürlichen Böden wurde jeweils das spannungs- und zeitabhängige Verformungsverhalten nach DIN 18135 im Proctoroptimum und bei $D_{Pr} = 97\%$ (nasse Seite), jeweils mit und ohne Wassersättigung, untersucht. Zur Durchführung der Versuche wurden Teilproben der 6 natürlichen Böden durch Lufttrocknung auf deren jeweiligen optimalen Wassergehalt (aus Verdichtungsuntersuchungen, siehe Kapitel 2.4.2) getrocknet. Für die Versuche auf der nassen Seite des Proctoroptimums wurde anschließend die entsprechende Wassermenge zugegeben und der Boden zur Homogenisierung des Wassergehaltes mindestens 24 Stunden in geschlossenen Behältern gelagert. Die Verdichtung erfolgte für jede Einzelprobe separat, statisch im Zylinder. Anschließend wurde jede einzelne Probe für die Oedometeruntersuchungen aus diesen verdichteten Proben herausgearbeitet und im Metallring in das Versuchsgerät eingebaut.

Die Versuchsanordnung und die Laststufen der je vier Proben eines Bodens sind in Tabelle 3 dargestellt. In der Regel wurde jede zweite Laststufe zur Ermittlung des Kriechbeiwertes länger gehalten. Außerdem wurde für jede Einbaubedingung zusätzlich eine Probe hergestellt, die bei einer Auflastspannung von 50 kN/m^2 gesättigt wurde. Dies er-

Probe	EB	Sätt.	Laststufen [kN/m ²]
1	EB 1	Nein	8/15/25/50/100/200/400/E
2	EB 1	Ja	8/15/25/50//S//100/200/400/E
3	EB 2	Nein	8/15/25/50/100/200/400/E
4	EB 2	Ja	8/15/25/50//S//100/200/400/E
EB 1 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 100\%$			
EB 2 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 97\%$ (nasse Seite)			
S Wassersättigung der Proben			
E Entlastung [200/50/5 kN/m ²]			

Tab. 3: Versuchsanordnung der Oedometerversuche an den unbehandelten Böden

folgte, um Hinweise auf mögliche Sackungs- und Quellerscheinungen zu erhalten.

Es ist anzumerken, dass sich die nachfolgend angegebenen Kriechbeiwerte (C_α) auf einen Zeitpunkt von einem Tag nach Lastaufbringung beziehen. Bei den Versuchen an gesättigten und ungesättigten Proben ist danach in der Regel auch eine weitere Erhöhung der Kriechbeiwerte dokumentiert (der lineare Teil der $e/\log t$ -Kurven wurde bei den einzelnen Laststufen also in der Regel nicht erreicht). Ähnliches wurde in der Literatur auch bei Versuchen an ungestörten Bodenproben mit hohen organischen Anteilen berichtet (zum Beispiel DHOWIAN & EDIL [32]).

An einem Boden mit hohem organischem Anteil (NiSt) wurden Versuche zum Verformungsverhalten nach einer Bodenbehandlung mit Bindemitteln durchgeführt. Dazu wurde dem feuchten Boden Weißfeinkalk (Zugabemenge 10 M.-% bezogen auf die Trockenmasse Boden) und Braunkohlenflugasche (Zugabemenge 20 M.-% bezogen auf die Trockenmasse Boden) mittels Zwangsmischer (Kutter) beigemischt. Zwischen Mischung und Verdichtung wurde eine Reaktionszeit von 24 Stunden eingehalten und die Proben währenddessen in geschlossenen Behältern bei etwa 20°C gelagert. Vor der Herstellung der Probekörper (Verdichtung) wurde ein erneuter Mischvorgang durchgeführt (analog wie bei den Verdichtungsversuchen, siehe Kapitel 2.4.2). Je Einbaubedingung wurden zwei Probekörper hergestellt. Einer dieser Probekörper wurde luftdicht verpackt und bei etwa 20°C für 7 Tage lang gelagert (Aushärtung). Der zweite Probekörper wurde umgehend nach seiner Herstellung im Belastungsrahmen eingebaut und belastet. Sämtliche Versuche zur Bodenbehandlung wurden ohne Aufsättigung durchgeführt. Die Versuchsanordnung für die Oedometerversuche an den behandelten Böden sind in Tabelle 4 dargestellt.

Probe	EB	Aus- härtung	Laststufen [kN/m ²]
1	EB 1	Ja	8/15/25/50/100/200/400/E
2	EB 1	Nein	8/15/25/50/100/200/400/E
3	EB 2	Ja	8/15/25/50/100/200/400/E
4	EB 2	Nein	8/15/25/50/100/200/400/E
EB 1 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 100\%$			
EB 2 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 97\%$ (nasse Seite)			
E Entlastung [200/50/5 kN/m ²]			

Tab. 4: Versuchsanordnung der Oedometerversuche an den behandelten Böden

Last-Verformungseigenschaften

Die Zusammenfassung der ermittelten Steifigkeiten bei unterschiedlichen Laststufen, jeweils bezugnehmend auf die Verformung nach einem Tag, ist für alle untersuchten Böden in Bild 11 dargestellt. Vor allem bei hohen Spannungen zeigt sich die Abnahme der Steifigkeiten mit steigendem Anteil an organischem Material im Boden. Bei niedrigen Spannungen ist die Spreizung der Steifigkeit vergleichsweise gering.

Der Vergleich der Kriechbeiwerte für die Einbaubedingung im Proctoroptimum (EB 1) ohne Aufsättigung zeigt keine eindeutige Ordnung (siehe Bild 12). Es wird vermutet, dass bei den ungesättigten Proben die Austrocknung (Schrumpfung) während der Versuchsdurchführung einen bedeutenden Ein-

fluss, vor allem auf die ermittelten Sekundärverformungen, hatte.

Vergleicht man dazu die Kriechbeiwerte der Proben in EB 1 jedoch mit Aufsättigung, so ergibt sich folgendes Diagramm im Bild 13. Es ist zu erkennen, dass bei den gesättigten Proben der Kriechbeiwert tendenziell mit steigender Last und steigendem organischen Anteil zunimmt.

Die in Bild 14 dargestellte Zusammendrückung unter den verschiedenen Lasten (nach je 1 Tag) zeigt für die Böden mit organischen Anteilen > 10 M.-% (Glühverlust) hohe Werte, aber ohne besondere Ordnung. Bis zu einer Spannung von etwa 200 kN/m² (kPa) wurden maximale Zusammendrückungen bis 9 %, bei einer Spannung von etwa 400 kN/m² (kPa) maximale Werte bis 14 % Zusammendrückung dokumentiert.

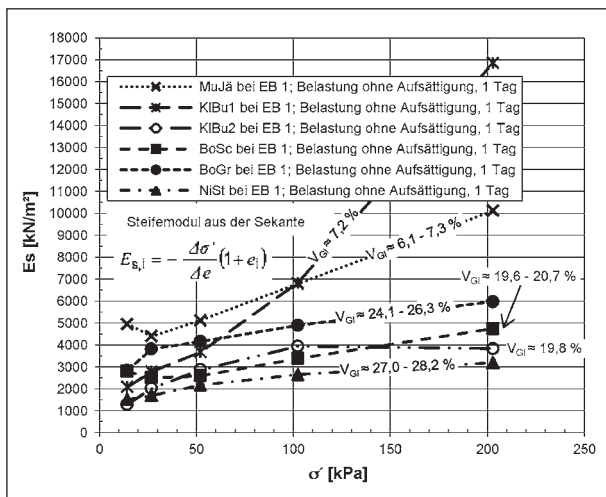


Bild 11: Vergleich der Steifigkeiten der Böden mit organischen Anteilen im Proctoroptimum

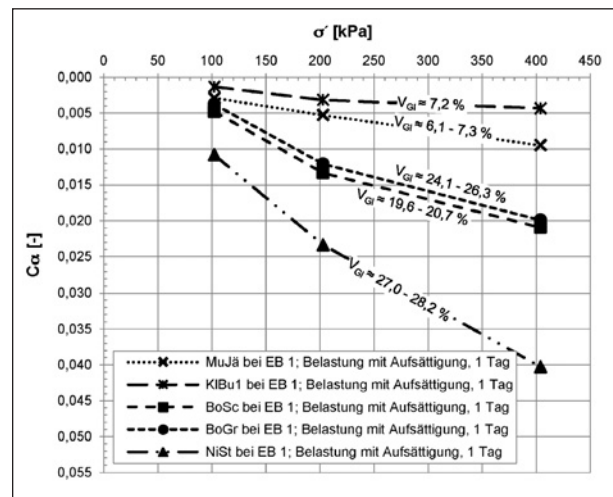


Bild 13: Vergleich der Kriechbeiwerte der gesättigten Böden mit organischen Anteilen im Proctoroptimum (nach 1 Tag)

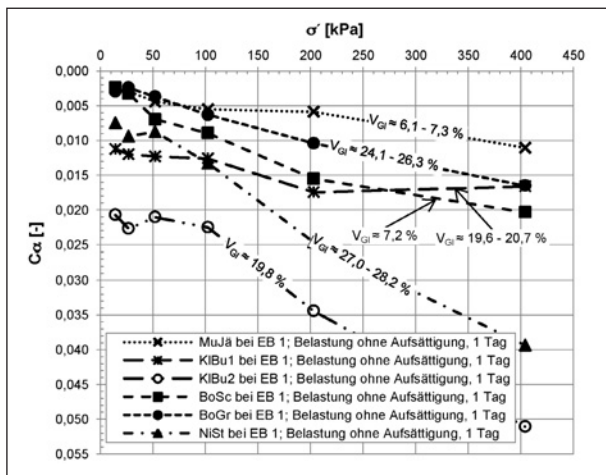


Bild 12: Vergleich der Kriechbeiwerte der ungesättigten Böden mit organischen Anteilen im Proctoroptimum (nach 1 Tag)

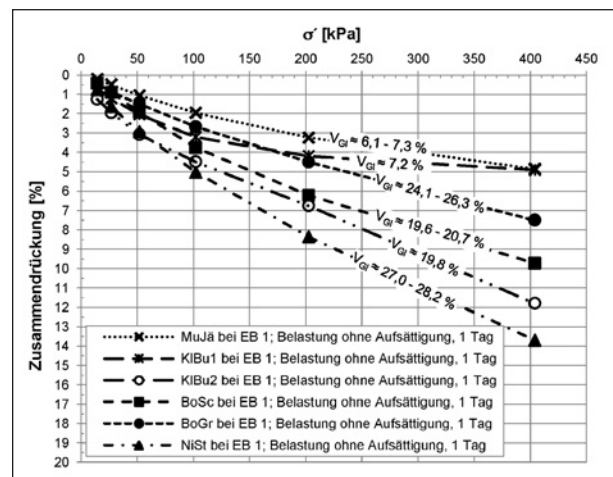


Bild 14: Vergleich der Zusammendrückung der Böden mit organischen Anteilen im Proctoroptimum (nach 1 Tag)

In Tabelle 5 ist der in den Versuchen dokumentierte Verhältniswert C_α/C_C für beide Einbaubedingungen dargestellt. Dieses Verhältnis bleibt nach MESRI & GODLEWSKI [105] unabhängig von Zeit, Porenzahl und Laststufe konstant. C_C wird als Kompressionsbeiwert bezeichnet und beschreibt die Neigung der Last-Setzungs-Linie am Erstbelastungsast im Spannungs-Porenzahl-Diagramm ($C_C = -\Delta e/\Delta \ln \sigma'$). C_α wird als Kriechbeiwert bezeichnet und beschreibt die Neigung der Zeit-Setzungs-Linie im Zeit-Porenzahl-Diagramm ($C_\alpha = -\Delta e/\Delta \ln t$). Wurde das Verhältnis C_α/C_C für eine Laststufe ermittelt, so kann der Kriechbeiwert (C_α) daraus bei jeder beliebigen anderen Laststufe errechnet werden. Aus den eigenen Versuchen wurde dieser Verhältniswert bei einer Auflastspannung von 400 kN/m² ermittelt. Man erkennt in Tabelle 5, dass mit steigendem organischem Anteil (Glühverlust) auch dieser Wert tendenziell ansteigt. Die aus den eigenen Versuchen ermittelten Verhältnisse liegen allgemein innerhalb des von MESRI & CASTRO [104] angegebenen Wertebereichs.

Gemäß den durchgeführten Kompressionsversuchen weisen die untersuchten Böden im verdichteten Zustand im Spannungsbereich zwischen 100 und 200 kN/m² Steifemoduln im Bereich zwischen 2,5 und 17 MN/m² auf. Die hohen Werte sind dabei tendenziell für die Böden mit niedrigen organischen Anteilen und die niedrigen Werte für die Böden mit hohen organischen Anteilen bis ca. 30 % zu erwarten. Sackungen oder maßgebliche Schwellungen wurden im Versuchsverlauf nicht dokumentiert.

Die untersuchten Böden weisen ausgeprägte Sekundärverformungen auf. Die aus den Verformungskurven bei einer Versuchsdauer von 1 Tag abgeleiteten Kriechbeiwerte C_α liegen für die gesättigten Proben zwischen 0,001 und 0,04 und nehmen da-

Boden	Glühverlust	C_α/C_C	
		EB 1	EB 2
MuJä	6,1 – 7,3 %	0,06	0,06
KIBu1	7,2 %	0,04	0,04
KIBu2	19,8 %	0,08	0,08
BoSc	19,6 – 20,7 %	0,08	0,08
BoGr	24,1 – 26,3 %	0,08	0,08
NiSt	27,0 – 28,2 %	0,10	0,09
EB 1 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 100\%$			
EB 2 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 97\%$ (nasse Seite)			

Tab. 5: C_α/C_C der gesättigten Proben bei der höchsten Laststufe (400 kN/m² nach 1 Tag)

bei mit zunehmender Spannung und zunehmendem organischem Anteil zu.

Bodenbehandlung mit Bindemitteln

Die vergleichende Auswertung erfolgt für beide Bindemittel getrennt, jeweils im Vergleich zum Boden ohne Verbesserungsmaßnahme. Verglichen werden die Steifigkeiten und Kriechbeiwerte. In Bild 15 und Bild 16 sind die Einbaubedingungen für die nachfolgend beschriebenen Versuchsergebnisse dargestellt.

Da den Böden jeweils eine erhebliche Menge an Bindemitteln zugegeben wurde, war die Verwendung der Korndichte des Bodens ($\rho_s \approx 2,18 \text{ g/cm}^3$) zur Auswertung der Oedometerversuche streng genommen nicht mehr möglich. Auch eine rechnerische Korrektur der Korndichte um einen entsprechenden Anteil des trockenen Bindemittels ist in solchen Fällen nicht zielführend, da das mineralische Gerüst des Bindemittels im Kontakt mit Wasser nicht stabil ist⁸. Findet eine Verfestigungsreaktion statt, so kann wahrscheinlich auch nicht davon ausgegangen werden, dass die gemessene Korndichte über die Beobachtungszeit konstant ist (Zementphasen-neubildung unter Einbindung von Wassermolekülen). Am Anfang, etwa in der Mitte und am Ende der Ver-

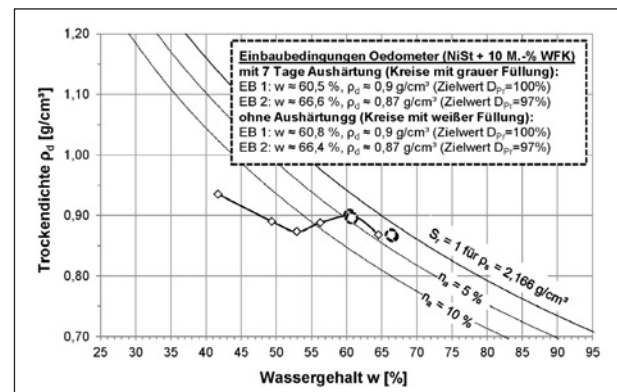


Bild 15: Einbaubedingungen für Oedometerversuche am Boden NiSt + 10 M.-% WFK

⁸ Erfahrungen am ZG TUM haben gezeigt, dass bei der Bodenbehandlung mineralischer Böden (siehe auch Kapitel 3.4.2, Absatz „Beurteilung der Laborergebnisse“) mit ähnlich hohen Bindemittelmengen deutliche Unterschiede zwischen den jeweiligen Korndichten bestehen. Die Korndichte des Ausgangsbodens, die rechnerische Korndichte durch mathematische Vermengung unter Berücksichtigung der Werte der trockenen Einzelmaterialien und die versuchstechnisch ermittelte Korndichte am feucht gemischten und anschließend getrockneten Material entsprechen einander im Allgemeinen nicht.

suchsdurchführung der Oedometerversuche wurden Messungen der Korndichte mit dem Gaspyknometer (an Parallelproben) durchgeführt. Die untersuchten Bodenproben wurden aus dem Rest des Materials zur Probenherstellung gewonnen und bis zur Korndichtebestimmung in geschlossenen Behältern gelagert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt. Da die Unterschiede der gemessenen Korndichten von beschränktem Ausmaß sind, wurde für die Auswertung der Oedometerversuche der jeweilige Mittelwert der drei Messungen verwendet.

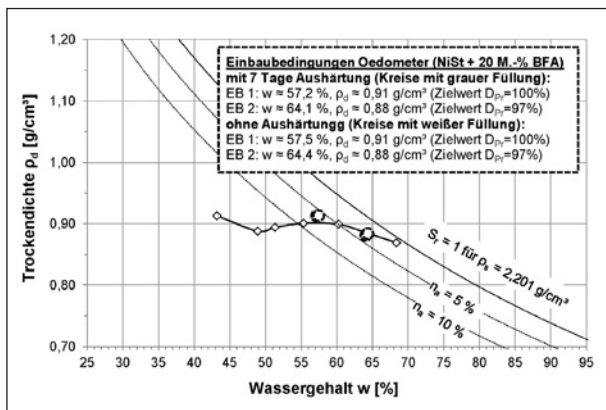


Bild 16: Einbaubedingungen für Oedometerversuche am Boden NiSt + 20 M.-% BFA

Probe	EB	Anfang ρ_s [g/cm ³]	Mitte ρ_s [g/cm ³]	Ende ρ_s [g/cm ³]
1	EB 1	2,159	2,169	2,171
2	EB 1	2,160	2,167	2,176
3	EB 2	2,156	2,169	2,168
4	EB 2	2,157	2,167	2,172

EB 1 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 100 \%$
 EB 2 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 97 \%$ (nasse Seite)

Tab. 6: Korndichte der behandelten Bodenproben (NiSt + 10 M.-% WFK)

Probe	EB	Anfang ρ_s [g/cm ³]	Mitte ρ_s [g/cm ³]	Ende ρ_s [g/cm ³]
1	EB 1	2,200	2,201	2,201
2	EB 1	2,201	2,204	2,202
3	EB 2	2,196	2,202	2,201
4	EB 2	2,199	2,204	2,205

EB 1 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 100 \%$
 EB 2 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 97 \%$ (nasse Seite)

Tab. 7: Korndichte der behandelten Bodenproben (NiSt + 20 M.-% BFA)

Die Steifigkeit des mit Weißfeinkalk behandelten Bodens ist deutlich höher als jene des unbehandelten Bodens (Bild 17). Die erreichbare Steifigkeit hängt unter sonst gleichen Verdichtungsbedingungen mit steigender Last zunehmend vom Wassergehalt und Dichte des behandelten Bodens ab.

Während die Steifigkeit des Bodens stark beeinflusst wird, ist der Einfluss auf die Kriechbeiwerte nur gering. Trotzdem ist in Bild 18 tendenziell eine Verringerung der Kriechbeiwerte durch die Bindemittelbehandlung erkennbar.

Auch nach der Zugabe von Braunkohlenflugasche verhält sich der Boden steifer als ohne Bodenbehandlungsmaßnahme (Bild 19). Die Erhöhung der Steifigkeit fällt für die Einbaubedingungen unterschiedlich stark aus und ist insgesamt deutlich weniger stark ausgeprägt als bei der Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk (siehe Bild 17).

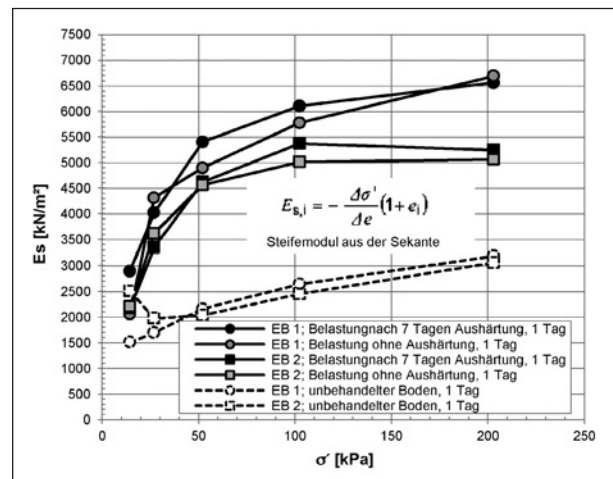


Bild 17: Steifemodul für Boden NiSt mit und ohne Behandlung mit 10 M.-% WFK (Einbaubedingung EB 1 und EB 2)

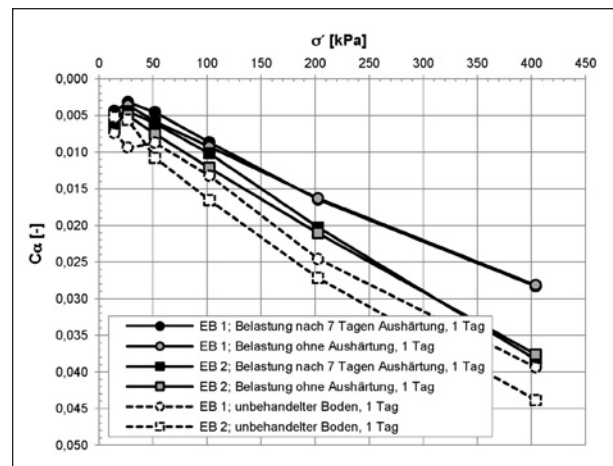


Bild 18: Kriechbeiwerte für Boden NiSt mit und ohne Behandlung mit 10 M.-% WFK (Einbaubedingung EB 1 und EB 2)

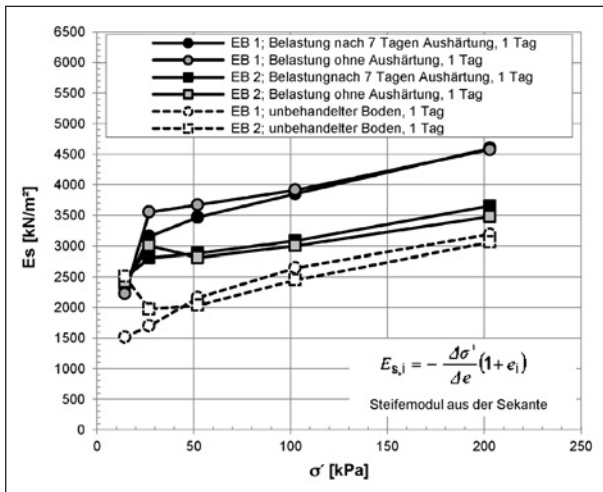


Bild 19: Steifemodul für Boden NiSt mit und ohne Behandlung mit 20 M.-% BFA (Einbaubedingung EB 1 und EB 2)

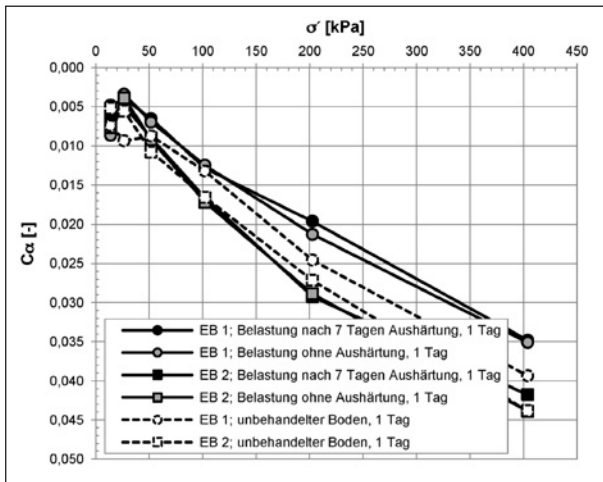


Bild 20: Kriechbeiwerte für Boden NiSt mit und ohne Behandlung mit 20 M.-% BFA (Einbaubedingung EB 1 und EB 2)

Die in Bild 20 dargestellten Kriechbeiwerte zeigen keine maßgebliche Änderung durch die Zugabe von Braunkohlenflugasche.

Zusammenfassend wirkt sich die Bodenbehandlung positiv auf das Last-Verformungs-Verhalten aus. Zwar wurde keine chemische Verfestigung im Sinne einer Erhärtung der Proben festgestellt (vgl. auch Ergebnisse der einaxialen Druckversuche in Kapitel 2.4.4), die Steifigkeit des Materials ließ sich allerdings im Vergleich zum Boden ohne Behandlungsmaßnahme deutlich erhöhen.

2.4.4 Scherfestigkeit und Druckfestigkeit

Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der dränierten Scherparameter der natürlichen Böden wurden dreiaxiale Druckver-

Probe	EB	Konsolidation $\sigma_3 = \sigma_1$ [kN/m ²]	Abscheren σ_3 [kN/m ²]
MuJä	EB 1	300	50/100/150/200
MuJä	EB 2	300	50/100/150/200
MuJä	EB 3	300	50/100/150/200
KIBu1	EB 1	300	100/150/200
KIBu2	EB 1	300	50/100/200
BoSc	EB 1	300	50/100/150/200
BoGr	EB 1	300	50/100/150/200
NiSt	EB 1	300	50/100/150/200
NiSt	EB 2	300	50/100/150/200

EB 1 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 100\%$ (bei w_{Pr})
 EB 2 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 97\%$ (nasse Seite)
 EB 3 Einbaubedingung; Zielwert $D_{Pr} = 98\%$ (bei w_{Pr})

Tab. 8: Triaxialversuche (CU) an den unbehandelten Böden

suche als CU-Versuche durchgeführt. Dabei wurden die Proben durch statische Verdichtung hergestellt, bei einem Porenwasserdruck von 500 kN/m² gesättigt und im Anschluss unter einer isotropen Belastungsspannung von $\sigma_3' = \sigma_1' = 300$ kN/m² konsolidiert. Das Abscheren der Einzelproben erfolgte unter Steigerung der Vertikalspannung σ_1 bei unterschiedlichen Seitendrücken. In der Regel wurden die Seitendrücke $\sigma_3 = 50, 100, 150$ und 200 kN/m² verwendet. Die Proben wurden mit einer Vorschubgeschwindigkeit zwischen 0,01 und 0,016 mm/min abgeschert. Das gesamte Versuchsprogramm ist in Tabelle 8 dargestellt.

Aus den Spannungsverläufen der CU-Versuche wurde die undränierete Scherfestigkeit der untersuchten Proben der natürlichen Böden in Abhängigkeit vom Seitendruck σ_3 ermittelt. Als undränierete Scherfestigkeit wurde dabei die bei einer axialen Stauchung von 4 % aufgetretene Spannung $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ herangezogen.

Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgte am bindemittelbehandelten Boden NiSt. Mischungen des Bodens mit 10 M.-% Weißfeinkalk bzw. 20 M.-% Braunkohlenflugasche wurden entsprechend dem Vorgehen für die Verdichtungsversuche (siehe Kapitel 2.4.2) vorbereitet und im Metallzylinder ($d = 5$ cm, $h = 10$ cm) statisch verdichtet. Die zur Aushärtung vorgesehenen Proben wurden im Anschluss in Plastiktüten luftdicht verpackt und bei etwa 20 °C bis zur Prüfung in einem Behälter mit hoher Luftfeuchtigkeit (etwa 90 % rel. LF) gelagert. Die Prüfung erfolgte zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten: umgehend nach Verdichtung, nach 6 Tagen und nach 28 Tagen an jeweils drei Probekör-

pern. Die Verformungsgeschwindigkeit betrug bei der Prüfung 0,2 % der Anfangshöhe des Probekörpers pro Minute.

Scherfestigkeit

Die Spannungspfade der untersuchten Proben weisen in vielen Fällen nicht auf eine drainierte Kohäsion hin, sämtliche Proben zeigten ein ausgeprägt duktilen Verhalten mit hohen axialen Stauchungen. Aus Gründen der Verformungsbeschränkung wurden die Bruchgeraden, die nach dem Ansatz von Mohr-Coloumb bestimmt wurden, jeweils für eine axiale Stauchung von 4 % am kritischsten Spannungspfad ermittelt (konservative Herangehensweise für hohe Seitendrücke).

Die drei am Boden MuJä (Kalkmudde) untersuchten Einbaubedingungen unterscheiden sich in den Ergebnissen nicht maßgeblich (Bild 21, Bild 22 und Bild 23). Die vertikale Stauchung vor Abbruch der Einzelversuche betrug bei allen Proben ca. 16 %. Die Wölbung der Spannungspfade weist auf die Entstehung von Porenwasserüberdrücken hin. Während jeweils bei der niedrigsten Stufe der Span-

nungspfad durch die vorangegangene Konsolidierung bei 300 kN/m² Effektivspannung noch auf negative Porenwasserdrücke hinweist, zeigen die weiteren Spannungspfade unter höheren Seitendrücken die beim Auftreten von Porenwasserüberdrücken typische Wölbung nach links.

Die Auswertung der Versuche am Boden MuJä bei EB 1 liefert bei einer vertikalen Probenstauchung von $\epsilon = 4\%$ der Anfangshöhe in der ersten Laststufe einen Reibungswinkel ϕ' von etwa 28° und keine drainierte Kohäsion. Als undrainierte Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde für den Versuch mit einem Seitendruck $\sigma_3 = 50$ kN/m² bei einer vertikalen Stauchung von 4 % eine Spannung von 64 kN/m² ermittelt. Mit zunehmendem Seitendruck nimmt die undrainierte Scherfestigkeit auf ca. 154 kN/m² bei $\sigma_3 = 200$ kN/m² zu.

Die Auswertung der Versuche am Boden MuJä bei EB 3 liefert bei einer vertikalen Probenstauchung von $\epsilon = 4\%$ der Anfangshöhe in der dritten Laststufe einen Reibungswinkel ϕ' von etwa 31° und keine drainierte Kohäsion. Als undrainierte Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde für den Versuch mit einem

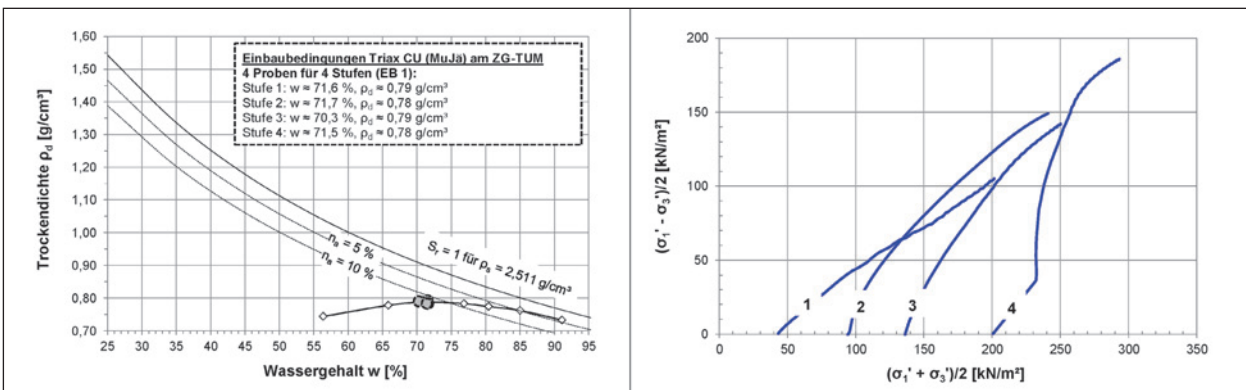


Bild 21: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der drainierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden MuJä bei EB 1

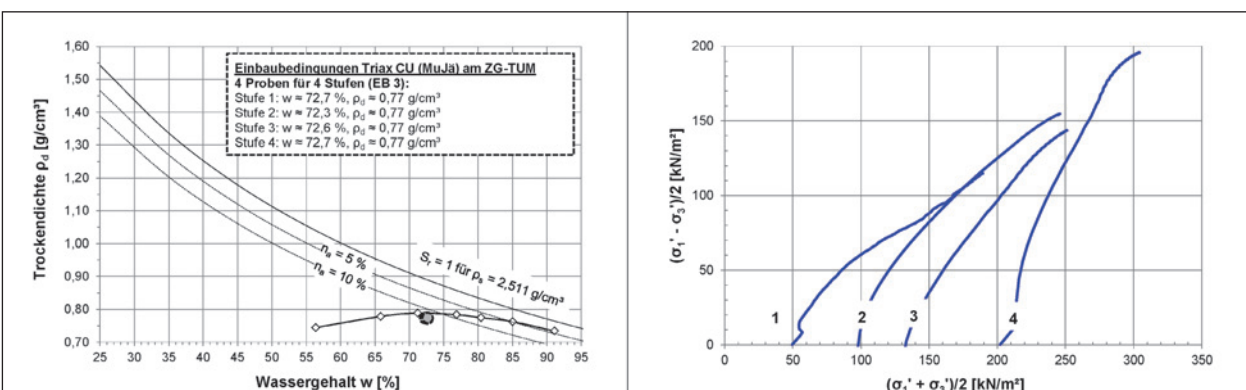


Bild 22: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der drainierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden MuJä bei EB 3

Seitendruck $\sigma_3 = 50 \text{ kN/m}^2$ bei einer vertikalen Stauchung von 4 % eine Spannung von 76 kN/m^2 ermittelt. Mit zunehmendem Seitendruck nimmt die undrÄnrierte Scherfestigkeit auf ca. 167 kN/m^2 bei $\sigma_3 = 200 \text{ kN/m}^2$ zu.

Die Auswertung der Versuche am Boden MuJÄ bei EB 2 liefert bei einer vertikalen Probenstauchung von $\varepsilon = 4 \%$ der Anfangshöhe in der ersten Laststufe einen Reibungswinkel φ' von etwa 29° und keine drÄnrierte Kohäsion. Als undrÄnrierte Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde für den Versuch mit einem Seitendruck $\sigma_3 = 50 \text{ kN/m}^2$ bei einer vertikalen Stauchung von 4 % eine Spannung von 72 kN/m^2 ermittelt. Mit zunehmendem Seitendruck nimmt die undrÄnrierte Scherfestigkeit auf ca. 141 kN/m^2 bei $\sigma_3 = 200 \text{ kN/m}^2$ zu.

Die am Boden KIBu1 (ausgeprÄgt plastischer Ton) durchgefÄhrten CU-Triaxialversuche zeigen einen raschen Aufbau von PorenwasserdrÄcken vor dem Bruch (siehe dazu auch Bild 24). Insgesamt wurden die Versuche bis zu einer axialen Stauchung von etwa 17 % der Anfangshöhe aufgezeichnet.

Die Auswertung der Versuche am Boden KIBu1 bei EB 1 unter BerÄcksichtigung des Verlaufes der Spannungspfade (der Bruch trat in Stufe 1 bereits unter einer axialen Stauchung von 0,4 % ein), lÄsst fÄr die Scherfestigkeit Werte zwischen $\varphi' = 20^\circ$ und 25° und eine drÄnrierte Kohäsion von etwa 0 bis 20 kN/m^2 erwarten. Als undrÄnrierte Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde fÄr den Versuch mit dem geringsten Seitendruck $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$ bei der dem Bruch (etwa bei $\varepsilon = 0,4 \%$) entsprechenden vertikalen Stauchung eine Spannung von ca. 66 kN/m^2 ermittelt.

Die Spannungspfade des Bodens KIBu2 (Ton mit organischen Beimengungen) zeigen vor allem bei der dritten Probe den starken Anstieg des Porenwasserdruckes vor dem Bruch. Insgesamt wurden die Versuche bis zu einer axialen Stauchung von maximal etwa 18 % der Anfangshöhe aufgezeichnet. Diese Probe weicht auch bei der Einbaubedingung leicht von den restlichen Proben ab (siehe dazu auch Bild 25).

Die Auswertung der Versuche am Boden KIBu2 bei EB 1 bei einer vertikalen Probenstauchung von

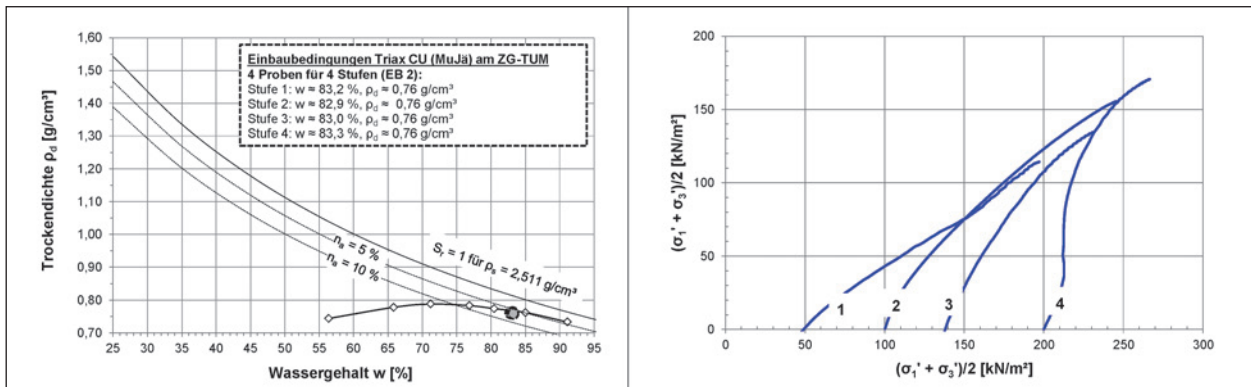


Bild 23: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der drÄnrierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden MuJÄ bei EB 2

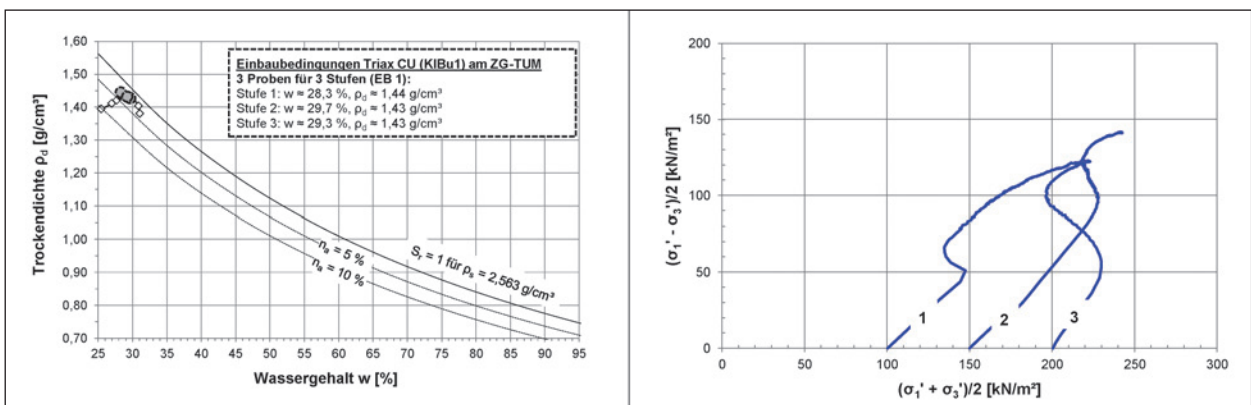


Bild 24: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der drÄnrierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden KIBu1 bei EB 1

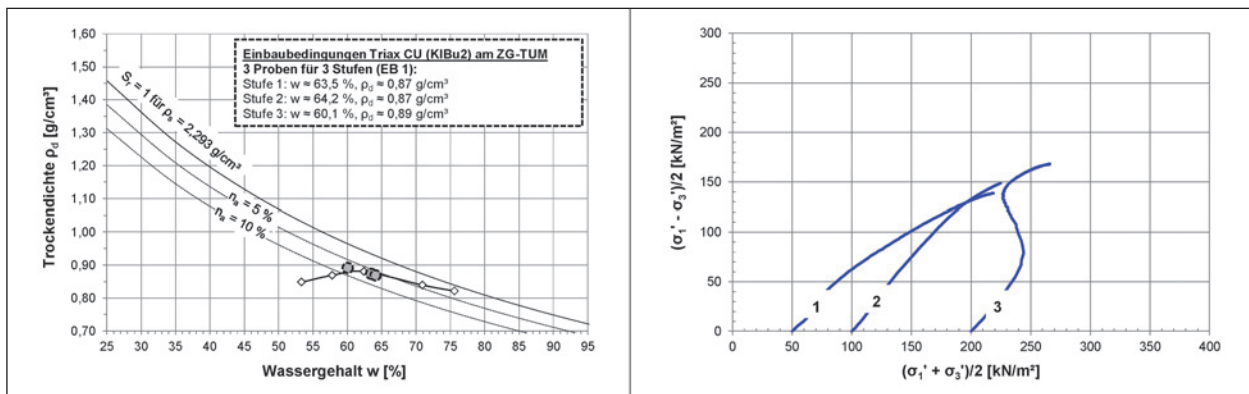


Bild 25: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränenen Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden KIBu2 bei EB 1

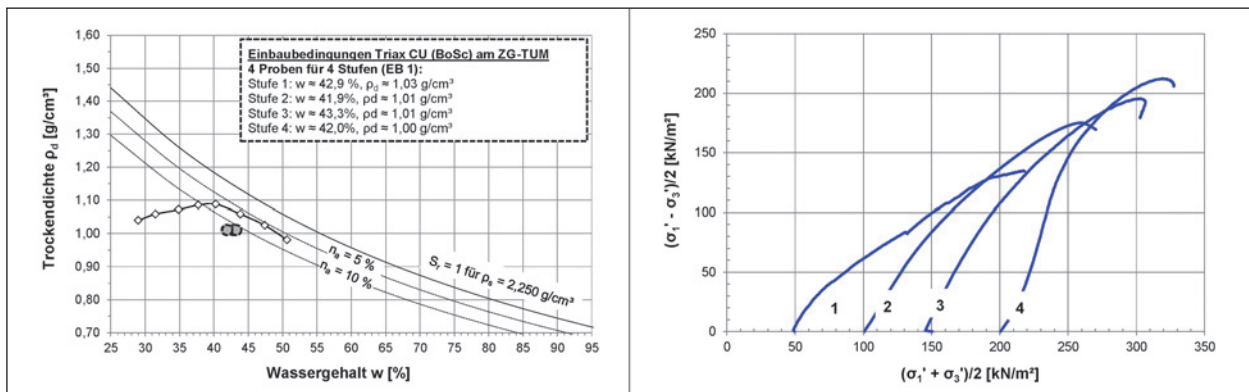


Bild 26: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränenen Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden BoSc bei EB 1

$\varepsilon = 4\%$ der Anfangshöhe, lässt für die Scherfestigkeit Werte zwischen $\varphi' = 30^\circ$ und 35° und eine dränenen Kohäsion von etwa 10 bis 20 kN/m^2 erwarten. Als undränenen Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde für den Versuch mit einem Seitendruck $\sigma_3 = 50\text{ kN/m}^2$ bei einer vertikalen Stauchung von 4% eine Spannung von 108 kN/m^2 ermittelt. Mit zunehmendem Seitendruck nimmt die undränenen Scherfestigkeit auf ca. 144 kN/m^2 bei $\sigma_3 = 200\text{ kN/m}^2$ zu.

Die Einbaubedingungen beim gemischtkörnigen Boden mit humosen Beimengungen BoSc weichen vom Zielwert ab. Die Spannungspfade wurden bis zu einer axialen Verformung von maximal etwa 20% aufgezeichnet und zeigen den langsamen Aufbau des Porenwasserdruckes während des Versuches. Die Einbaubedingungen und Spannungspfade sind in Bild 26 dargestellt.

Die Auswertung der Versuche am Boden BoSc bei EB 1 liefert bei einer vertikalen Probenstauchung von $\varepsilon = 4\%$ der Anfangshöhe in der ersten Laststufe einen Reibungswinkel φ' von etwa 37° und keine dränenen Kohäsion. Als undränenen Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde für den Versuch mit einem

Seitendruck $\sigma_3 = 50\text{ kN/m}^2$ bei einer vertikalen Stauchung von 4% eine Spannung von 68 kN/m^2 ermittelt. Mit zunehmendem Seitendruck nimmt die undränenen Scherfestigkeit auf ca. 159 kN/m^2 bei $\sigma_3 = 200\text{ kN/m}^2$ zu.

Der Boden aus Grünwald BoGr (gemischtkörniger Boden mit humosen Beimengungen) wurde anhand von 4 Proben untersucht. Die Einbaubedingungen und Spannungspfade sind in Bild 27 dargestellt. Der Höchstwert der maximalen Stauchung vor Versuchsabbruch betrug etwa 17%.

Die Auswertung der Versuche am Boden BoGr bei EB 1 liefert bei einer vertikalen Probenstauchung von $\varepsilon = 4\%$ der Anfangshöhe in der ersten Laststufe einen Reibungswinkel φ' von etwa 31° und keine dränenen Kohäsion. Als undränenen Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde für den Versuch mit einem Seitendruck $\sigma_3 = 50\text{ kN/m}^2$ bei einer vertikalen Stauchung von 4% eine Spannung von 54 kN/m^2 ermittelt. Mit zunehmendem Seitendruck nimmt die undränenen Scherfestigkeit auf ca. 164 kN/m^2 bei $\sigma_3 = 200\text{ kN/m}^2$ zu.

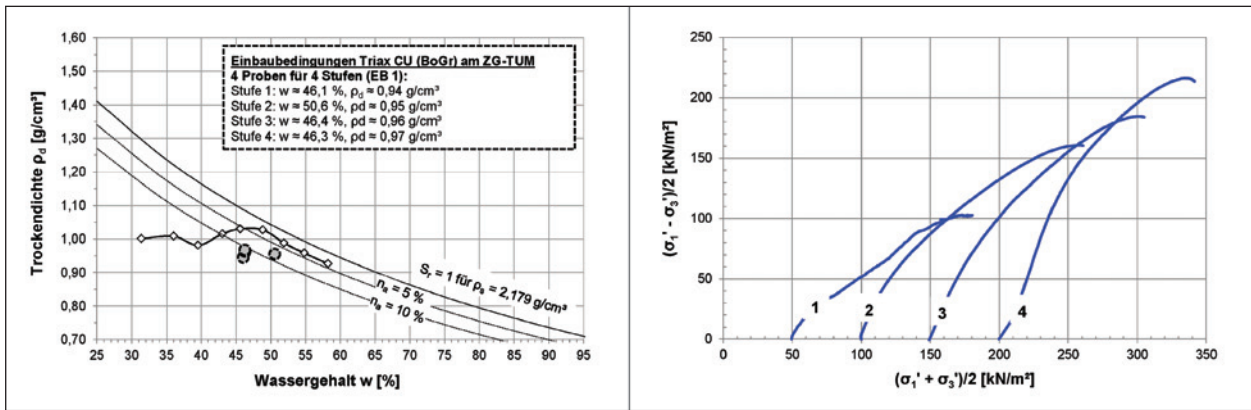


Bild 27: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden BoGr

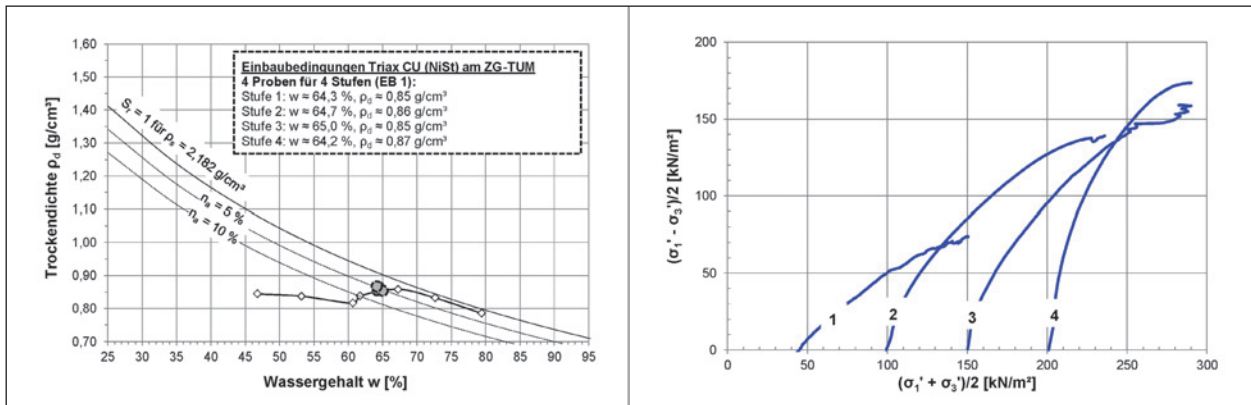


Bild 28: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden NiSt bei EB 1

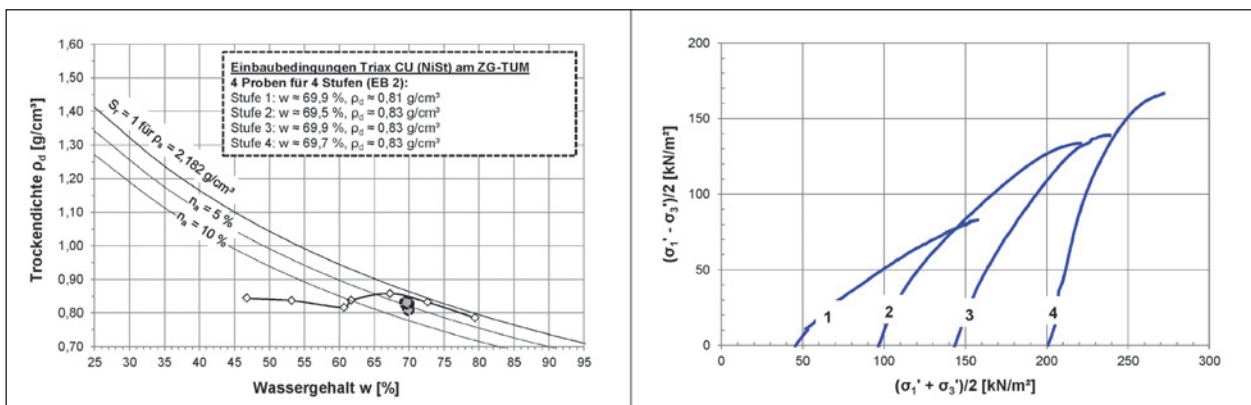


Bild 29: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden NiSt bei EB 2

Der organische Ton aus dem Raum München (NiSt) wurde anhand von 2 Einbaubedingungen untersucht. Diese sind mit den zugehörigen Spannungspfaden der Triaxialversuche (CU) in Bild 28 und Bild 29 dargestellt. Die axialen Stauchungen der Proben vor Versuchsabbruch betrugen zwischen 15 und 18 %.

Die Auswertung der Versuche am Boden NiSt bei EB 1 liefert bei einer vertikalen Probenstauchung

von $\epsilon = 4 \%$ der Anfangshöhe in der ersten Laststufe einen Reibungswinkel ϕ' von etwa 28° und keine dränierte Kohäsion. Als undränierte Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde für den Versuch mit einem Seitendruck $\sigma_3 = 50 \text{ kN/m}^2$ bei einer vertikalen Stauchung von 4 % eine Spannung von 47 kN/m^2 ermittelt. Mit zunehmendem Seitendruck nimmt die undränierte Scherfestigkeit auf ca. 133 kN/m^2 bei $\sigma_3 = 200 \text{ kN/m}^2$ zu.

Boden	EB	Einbau		Dränrierte SP ¹		Undrännierte SP ¹			
		D _{Pr} [%]	ρ _d [g/cm ³] Mittelwert	φ' [°]	c' [kN/m ²]	c _u [kN/m ²] (σ ₃ = 50 kN/m ²)	c _u [kN/m ²] (σ ₃ = 100 kN/m ²)	c _u [kN/m ²] (σ ₃ = 150 kN/m ²)	c _u [kN/m ²] (σ ₃ = 200 kN/m ²)
MuJä	EB 1	99 – 101	0,76 – 0,79 ³	28	0	64	117	103	154
	EB 2	96 – 97		29	0	72	126	102	141
	EB 3	98		31	0	76	127	109	168
KIBu1	EB 1	100 – 101	1,43	(20 – 25) ²	(0 – 20) ²	-	66 ²	118	98
KIBu2	EB 1	99 – 101	0,88 ³	30 – 35	10 – 20	108	130	-	144
BoSc	EB 1	93	1,01	37	0	68	124	138	159
BoGr	EB 1	91 – 94	0,96 ³	31	0	54	115	128	164
NiSt	EB 1	99 – 100	0,81 – 0,87 ³	28	0	47	99	113	133
	EB 2	94 – 97		30	0	51	99	105	143

¹ Aus den Daten der CU-Versuche bei einer axialen Stauchung von ε = 4 % ermittelt (Ausnahme siehe²)
² Ermittelt unter Einbezug der Daten des CU-Versuchs an Boden KIBu1 mit Seitendruck σ₃ = 100 kN/m bei einer axialen Stauchung von etwa ε = 0,4 % (Bruch)
³ Verdichteter Boden würde unter Wasser aufschwimmen

Tab. 9: Zusammenfassung der Ergebnisse der Triaxialversuche CU zur Bestimmung der Scherparameter (SP)

Die Auswertung der Versuche am Boden NiSt bei EB 2 liefert bei einer vertikalen Probenstauchung von ε = 4 % der Anfangshöhe in der ersten Laststufe einen Reibungswinkel φ' von etwa 30° und keine dränrierte Kohäsion. Als undrännierte Scherfestigkeit $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ wurde für den Versuch mit einem Seitendruck σ₃ = 50 kN/m² bei einer vertikalen Stauchung von 4 % eine Spannung von 51 kN/m² ermittelt. Mit zunehmendem Seitendruck nimmt die undrännierte Scherfestigkeit auf ca. 143 kN/m² bei σ₃ = 200 kN/m² zu.

Die bei den CU-Versuchen aufgezeichneten, großen Stauchungen ohne markanten Bruch erfordern die Festlegung einer Bruchstauchung als Versagenskriterium. Die durchgeführten Triaxialversuche wurden bei einer axialen Stauchung von 4 % ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten der untersuchten Böden keine dränrierte Kohäsion bzw. nur geringe Werte aufwiesen. Gleichzeitig zeigen die dränrierten Reibungswinkel vergleichsweise hohe Werte. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Auswertung zusammengestellt.

Die im Rahmen der Untersuchung durchgeführten triaxialen Scherversuche weisen nicht auf einen markanten Einfluss der Einbaubedingungen (zwischen D_{Pr} = 100 % und D_{Pr} = 97 % auf der nassen Seite) hin. Die jeweiligen Spannungspfade der unterschiedlichen Versuche am Boden MuJä (siehe Bild 21, Bild 22 und Bild 23) und Boden NiSt (siehe Bild 28 und Bild 29) zeigen keine über die Versuchungenauigkeiten hinausgehenden Abweichungen,

die auf die unterschiedlichen Einbaubedingungen zurückgeführt werden könnten. Es fällt aber auf, dass ausgerechnet die Böden mit sehr niedrigen Verdichtungsgraden (BoSc und BoGr) sehr hohe dränrierte Reibungswinkel aufweisen. Es wird vermutet, dass diese Werte auf den hohen Sandanteil dieser Materialien zurückgeführt werden können (vgl. Bild 5) und der negative Einfluss des niedrigen Verdichtungsgrades, wie beschrieben, hier wohl nicht in den Vordergrund rückt.

Die an den natürlichen Böden im verdichteten Zustand bestimmten Werte der undrännierten Scherfestigkeit werden maßgeblich vom Spannungszustand beeinflusst. Bei einem Seitendruck von 50 kN/m² wurden Werte der undrännierten Scherfestigkeit zwischen etwa 45 kN/m² und 110 kN/m² ermittelt. Bei einem Seitendruck von 200 kN/m² dagegen liegen die Werte zwischen etwa 100 kN/m² und 165 kN/m². Die höheren Werte in den angegebenen Spannen sind dabei eher den Böden mit geringem organischem Anteil und die niedrigeren Werte den Böden mit höheren organischen Anteilen bis max. 30 % zuzuordnen (siehe dazu auch Tabelle 9).

Bodenbehandlung mit Bindemitteln

In Bild 30 (links) und Bild 31 (links) sind die Einbaubedingungen für die einaxialen Druckversuche am behandelten Boden NiSt dargestellt. Es wurde jeweils ein Wert beim Verdichtungsoptimum angestrebt.

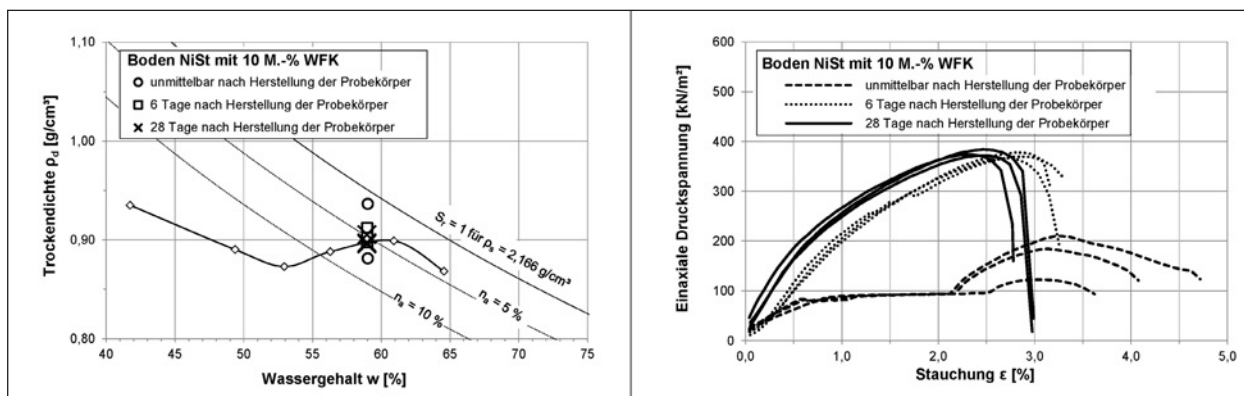


Bild 30: Einaxiale Druckversuche; Einbaubedingung und Ergebnisse des mit WFK behandelten Boden NiSt

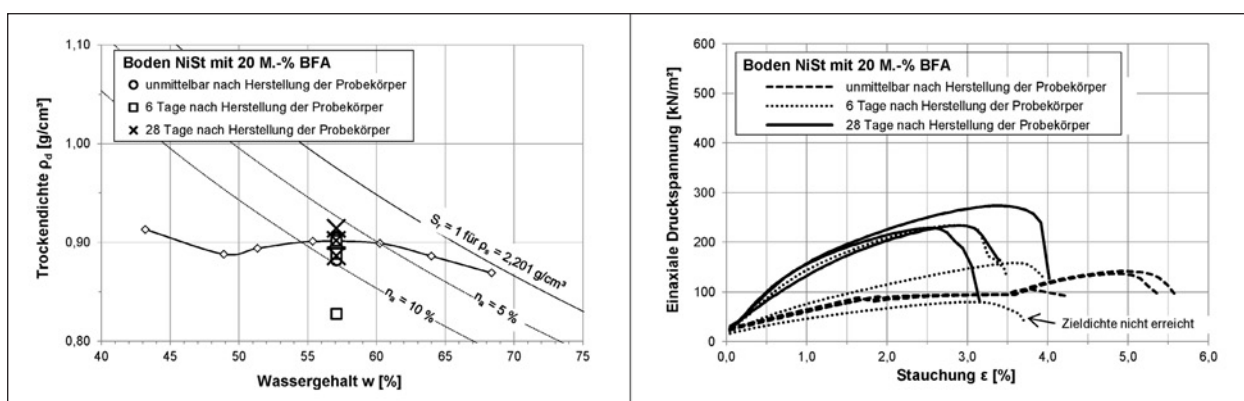


Bild 31: Einaxiale Druckversuche; Einbaubedingung und Ergebnisse des mit BFA behandelten Boden NiSt

Bei der Serie zur umgehenden Prüfung nach Probenherstellung wurde beim Ausformen die Entstehung kleiner horizontaler Risse in der Oberfläche der Probekörper beobachtet. Diese Risse wurden auf die weiche Struktur und Wandreibung des Zylinders für die Probenherstellung zurückgeführt und äußern sich in den Versuchsergebnissen, wie in Bild 30 (rechts) und Bild 31 (rechts) dargestellt. Nach der ersten Serie wurden die Probekörper für die beiden weiteren Serien in einem anderen Zylinder hergestellt, um die Bildung solcher Risse möglichst zu unterbinden. Die Probekörper der Serien zur Prüfung nach 6 bzw. 28 Tagen weisen dementsprechend unauffällige Kraft-Verformungs-Bilder auf.

In Bild 30 (rechts) sind die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am mit Weißfeinkalk verbesserten Boden dargestellt. Während die Prüfung unmittelbar nach Herstellung der Probekörper keine belastbaren Ergebnisse liefert (siehe einleitende Anmerkung), zeigen die Ergebnisse der Prüfung nach 6 und 28 Tagen jeweils konsistente Ergebnisse. Da die Form der Kurven bis auf eine untergeordnete Nullpunkts-Verschiebung sehr ähnlich sind (ähnliche Druckfestigkeit bei ähnlicher Bruchstauchung),

kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Zeitraum keine Verfestigung stattgefunden hat.

Wie auch bei der Behandlung des Bodens NiSt mit Weißfeinkalk liefern auch die umgehend nach Herstellung geprüften Proben zur Bodenbehandlung mit Braunkohlenflugasche keine belastbaren Ergebnisse (siehe Bild 31, rechts). Die diskontinuierlichen Kraft-Verformungs-Linien weisen auf Probleme bei der Versuchsdurchführung hin (Schließen der bei der Probekörperherstellung entstandenen Risse). Die Kurven für die Prüfungen nach 6 Tagen schwanken auf niedrigem Druckfestigkeitsniveau. Nach 28 Tagen wurden sehr ähnliche Verläufe der einaxialen Druckspannungen ermittelt. Schließt man die Probe mit offensichtlich falscher Trockendichte aus (vgl. Bild 31, links und rechts), so ergibt sich auch für die Behandlung mit Braunkohlenflugasche im beobachteten Zeitraum keine eindeutige Aushärtungsreaktion.

Zusammenfassend hatte die Bodenbehandlung im untersuchten Zeitraum keinen Einfluss auf die einaxiale Druckfestigkeit und damit die Scherfestigkeit. Dies deutete sich auch durch die ebenfalls durchgeführten Oedometerversuche bereits an (siehe Kapi-

tel 2.4.3). Aus derzeitiger Sicht führen beide verwendeten Bindemittel, Weißfeinkalk und Braunkohlenflugasche, beim untersuchten Boden und in den zugegebenen Mengen nicht zur chemischen Verfestigung.

2.5 Hinweise zur Eignungsprüfung

2.5.1 Homogenisierung

Wassergehalt und Glühverlust können in Böden mit organischen Anteilen bereits auf engem Raum stark variieren. Da die Verdichtungseigenschaften vom Glühverlust sehr stark beeinflusst werden, können solche Schwankungen dazu führen, dass die Ergebnisse bodenmechanischer Untersuchungen nicht vergleichbar sind und die Versuchsergebnisse nur schwer zu deuten sind. Während diese Heterogenität bei der Verwendung derartiger Böden als Baustoff als charakteristische Bodeneigenschaft anzusehen ist, ist für die Durchführung von Eignungsprüfungen eine möglichst gute Homogenisierung des zu verwendenden Bodenmaterials anzustreben.

2.5.2 Last-Verformungsverhalten

Um den Einfluss einer Wasserzugabe auf die bodenmechanischen Eigenschaften der Böden abschätzen zu können, sollten Versuche zum Last-Verformungs-Verhalten an Böden mit organischen Anteilen möglichst immer an gesättigten und ungesättigten Proben erfolgen. Bei der Angabe von Kennwerten, insbesondere zum Langzeitverhalten, sollte beachtet werden, dass ungesättigte Proben während des Versuches austrocknen und schrumpfen können. Bei gesättigten Proben können Schwellhebungen der Zusammendrückung durch Lastaufbringung entgegenwirken.

Bei der Untersuchung von Bodenbehandlungsmaßnahmen mit Bindemitteln sollte die Ermittlung der Porenzahl e anhand einer versuchstechnisch ermittelten Korndichte des Gemisches aus Boden und Bindemittel erfolgen. Handelt es sich um Langzeitversuche, so sollte die Korndichte an Parallelproben (gleiche Lagerung wie die Versuchsproben) zu unterschiedlichen Zeitpunkten überprüft werden (siehe dazu auch die Anmerkungen in Kapitel 2.4.3).

2.5.3 Scherfestigkeit

Große Verformungen bis zum endgültigen Bruch erzwingen in der Regel die Festlegung einer Bruchstauchung zur Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter. In den eigenen Untersuchungen wurde mit einer Stauchung von 4 % gearbeitet.

2.6 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

2.6.1 Verdichtungseigenschaften

Fasst man die Erkenntnisse aus der Literatur und den eigenen Versuchen zusammen, so kann ein Zusammenhang zwischen organischem Anteil und optimalem Verdichtungswassergehalt bestätigt werden. Je höher der organische Anteil eines Bodens, desto niedriger wird die durch Verdichtung erzielbare Trockendichte und desto höher der optimale Verdichtungswassergehalt. Die Verdichtungscharakteristika (optimaler Wassergehalt und Trockendichte) können aber nicht allgemeingültig auf den Glühverlust allein reduziert werden, da dieser Wert allein zu wenig Information über die Eigenschaften eines Bodens zur Verfügung stellt.

Die untersuchten Böden mit organischen Anteilen konnten alle verdichtet werden und wiesen alle ein eindeutiges Verdichtungsoptimum auf.⁹

Die Verdichtungseigenschaften des Bodens NiSt wurden durch die Zugabe von Weißfeinkalk bzw. Braunkohlenflugasche verbessert. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein starker Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Verbesserung und der Zugabemenge an Bindemittel besteht.

2.6.2 Last-Verformungseigenschaften

Gemäß den durchgeführten Kompressionsversuchen weisen die untersuchten Böden im verdichteten Zustand im Spannungsbereich zwischen 100 und 200 kN/m² Steifemoduln im Bereich zwischen 2,5 und 17 MN/m² auf. Die hohen Werte sind dabei tendenziell für die Böden mit geringen organischen

⁹ Siehe auch Kapitel 2.5.1.

Anteilen und die niedrigen Werte für die Böden mit hohen organischen Anteilen bis ca. 30 % zu erwarten.

Die untersuchten Böden weisen ausgeprägte Sekundärverformungen auf. Die aus den Verformungskurven bei einer Versuchsdauer von 1 Tag abgeleiteten Kriechbeiwerte C_α liegen für die gesättigten Proben zwischen 0,001 und 0,04 und nehmen dabei mit zunehmender Spannung und zunehmendem organischem Anteil zu.

Die Bodenbehandlung wirkt sich positiv auf das Last-Verformungs-Verhalten aus. Zwar wurde keine chemische Verfestigung im Sinne einer Erhärtung der Proben festgestellt (vgl. auch Ergebnisse der einaxialen Druckversuche), die Steifigkeit des Materials ließ sich allerdings im Vergleich zum Boden ohne Behandlungsmaßnahme deutlich erhöhen.

2.6.3 Scherfestigkeit

Die hohe Duktilität der untersuchten Proben führt in der Regel zu hohen axialen Verformungen bei zunehmender Deviatorspannung im Triaxialversuch. Im Sinne einer Verformungsbeschränkung ist die Festlegung einer Bruchstauchung sinnvoll. Die durchgeführten Triaxialversuche wurden bei einer axialen Stauchung von 4 % ausgewertet und zeigen bis auf Ausnahmen (bei Böden mit hohen Tonanteilen) keine dränierte Kohäsion und vergleichsweise hohe dränierte Reibungswinkel (siehe Tabelle 9).

Die an den natürlichen Böden im verdichteten Zustand bestimmten Werte der undrännierten Scherfestigkeit werden maßgeblich vom Spannungszustand beeinflusst. Bei einem Seitendruck von 50 kN/m² wurden Werte der undrännierten Scherfestigkeit zwischen etwa 45 kN/m² und 110 kN/m² ermittelt. Bei einem Seitendruck von 200 kN/m² dagegen liegen die Werte zwischen etwa 100 kN/m² und 165 kN/m². Die höheren Werte in den angegebenen Spannen sind dabei eher den Böden mit geringem organischem Anteil und die niedrigeren Werte den Böden mit höheren organischen Anteilen bis max. 30 % zuzuordnen.

Die Bodenbehandlung hatte im untersuchten Zeitraum keinen Einfluss auf die einaxiale Druckfestigkeit. Aus derzeitiger Sicht führen beide verwendeten Bindemittel, Weißfeinkalk und Braunkohlenflugasche, beim untersuchten Boden und in den zugegebenen Mengen nicht zur chemischen Verfestigung.

2.7 Anhaltswerte zur Beurteilung der Eignung

Aus den durchgeführten Untersuchungen und bisherigen Erfahrungen mit Böden mit organischen Anteilen an der TU München konnte in Tabelle 10 mit Anhaltswerten für bodenmechanische Kenn-

¹⁰ Anhaltswerte ohne Berücksichtigung der Kalkmudde (MuJä).

Organischer Anteil	Typ. Bodenart nach DIN 18196	Effektive Scherparameter		Undrännierte Scherfestigkeit		Trockenwichte (verdichtet) γ [kN/m ³]	Steifemodul (bei 100 kN/m ²) E_s [MN/m ²]	Steifemodul (bei 200 kN/m ²) E_s [MN/m ²]
		ϕ' [°]	c' [kN/m ²]	c_u bei σ_3				
Gruppe 1 5 bis 10 %	TA, TM, OT, OH	20 – 25	0 – 20	40 – 70	50	14 bis 18	5 bis 7	10 bis 17
				60 – 120	100			
Gruppe 2 10 bis 30 %	OT, OH	25 – 30	0 – 20	100 – 130	150	8 bis 15	2,5 bis 5	3 bis 10
				100 – 160	200			
Gruppe 3 über 30 %	OT, HN, HZ	ohne Angabe						

– Werte beziehen sich auf etwa im Proctoroptimum verdichtete, wassergesättigte Proben
– Steifemodul E_s zwischen $\sigma' = 100 - 200$ kPa bezogen auf die Zusammendrückung nach 1 Tag (Berücksichtigung gesättigter und ungesättigter Proben)

Tab. 10: Anhaltswerte für bodenmechanische Kenngrößen von verdichteten Böden mit organischen Bestandteilen¹⁰

Organischer Anteil	Verwendung in Erdbauwerken wie Schutzwällen und Geländemodellierungen			Wirksamkeit einer Bodenbehandlung mit Bindemitteln		
	Verdichtbarkeit	Scherfestigkeit	Verformungsverhalten	Verdichtbarkeit	Scherfestigkeit	Verformungsverhalten
Gruppe 1 5 bis 10 %	•	•	•	/●/	/●/	/●/
Gruppe 2 10 bis 30 %	•	•	◐	/●/	/◐/	/●/
Gruppe 3 über 30 %	◐	◐	○	/◐/	/○/	/◐/
<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen können erfüllt werden ◐ niedrige bis sehr niedrige Anforderungen können erfüllt werden ○ Anforderungen können nur unter Umständen (z. B. sehr niedrige Anforderungen und hoher Zusatzaufwand) oder nicht erfüllt werden /●/ positiver Einfluss auf die Eigenschaften erwartbar /◐/ positiver bis neutraler Einfluss auf die Eigenschaften erwartbar /○/ neutraler Einfluss auf die Eigenschaften erwartbar 						

Tab. 11: Verwendbarkeit von organogenen Böden der Gruppen 1, 2 und 3 in Erdbauwerken mit unterschiedlichen Anforderungen sowie Einfluss einer Bodenbehandlungsmaßnahme auf die Bodeneigenschaften

größen von etwa im Verdichtungsoptimum verdichteten Böden mit organischen Bestandteilen erstellt werden.

Soll die Verwendbarkeit solcher Böden in Erdbauwerken wie Schutzwällen und Geländemodellierungen (in Gruppe 1 möglicherweise sogar auch in Straßendämmen) in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Bauwerk dargestellt werden, so kann dies nur qualitativ erfolgen. In Tabelle 11 wurde versucht, zusätzlich dazu auch die Eignung von Bodenbehandlungsmaßnahmen zur Verbesserung der Bodeneigenschaften aufzunehmen.

Henzinger, C.
Schönfelder, I. und Kupka, A.
 (Kap. 3.3.6 und 3.3.7, Kap. 3.4.4 und 3.4.5)
Papakyriakopoulos, O. und Vogt, S. (Kap. 3.4.1)
Wolter, S. (Mitarbeit bei Kap. 3.4.2)

3 Fein- und gemischtkörnige Böden mit geringer Konsistenz

3.1 Einleitung

Fein- und gemischtkörnige Böden, deren Wassergehalt weit über dem optimalen Wassergehalt liegt, kommen für eine Verwendung im Erdbau des Verkehrswegebau oder für landschaftsgestalterische Baumaßnahmen kaum in Betracht. Dabei stellen weiche Böden, die etwa bei der Bautätigkeit während der Erstellung von Baugruben, Bodenaustauschmaßnahmen oder maschinell aufgefahrenen Tunneln anfallen, einen äußerst relevanten Massenstrom dar. Ferner fallen weiche Böden deutschlandweit in sehr großen Mengen im Bereich des Wasserbaus an, wobei für diese Stoffströme verschiedene Konzepte der Weiternutzung in modellhaften Studien oder bei einzelnen Projekten unter wissenschaftlicher Begleitung untersucht wurden¹¹. Auch können bei verschiedenen Prozessen der Rohstoffgewinnung in größeren Mengen weiche feinkörnige Böden anfallen. Hierzu seien insbesondere die Gewinnung mineralischer Baustoffe (Feinkornanteil aus der Kieswäsche) und die bei der Weiterverarbeitung landwirtschaftlicher Produkte anfallenden Waschabfälle genannt.

Die Konsistenzzahl I_C eines feinkörnigen Bodens gibt im Wesentlichen die Möglichkeiten der erdbau-technischen Nutzbarkeit fein- und gemischtkörniger Böden wieder. Dabei werden im Erdbau mit konventionellen Techniken der Einbau und die Verdichtung erfolgreich bis zu einem maximalen Wassergehalt praktiziert, der nur wenig über dem optimalen Wassergehalt liegt. Es muss für den Erdbau im Straßenbau gemäß ZTV E-StB 09 [67] für fein- und gemischtkörnige Böden ein Verdichtungsgrad von

$D_{Pr} \geq 97 \%$, der auch bei Wassergehalten auf der nassen Seite des Proctoroptimums erreicht werden kann, nachgewiesen werden. Weist der einzubauende Boden einen noch höheren Wassergehalt auf, so kann dieser durch Bindemittelbehandlung oder mechanische Bodenverbesserung eingebaut und gemäß den technischen Regelwerken verdichtet werden.

Bei geeigneter Entwässerung kann jeder Boden ohne umweltrelevante Eigenschaften direkt einer Verwendung zugeführt werden. Insbesondere für das im Wasserbau anfallende Baggergut existieren etablierte Arbeitstechniken zur Wassergehaltsreduzierung. Diese sehen im Wesentlichen drei Methoden vor [103]:

- **Natürliche Entwässerung**
Trocknung auf sogenannten Spül- bzw. Trockenfeldern. Diese Möglichkeit ist stark witterungsabhängig.
- **Mechanische Entwässerung**
Trocknung über gerätetechnisch-mechanische Prozesse (Zentrifugen, Bandfilterpressen, Schneckenpressen oder Kammerfilterpressen).
- **Thermische Entwässerung**
Trocknung durch Verdunstung des Wassers im (hier) Baggergut. Diese Art der Trocknung ist im Erdbau am ehesten als Mischung aus natürliche Entwässerung/thermische Entwässerung mittels Auflockerung (z. T. durch mehrmaliges Umlagern oder Fräsen des Materials) und Belüften (ggfs. unter Witterungsschutz und unter Zufuhr von Wärme) denkbar.

Der Aufwand einer Wassergehaltsreduktion kann verringert werden, wenn die Zielgröße des zu erreichenden Wassergehaltes erhöht werden kann. Dies ist im Erdbau möglich, indem dem Boden nach seiner Wassergehaltsreduktion weitere Stoffe zugefügt und eingemischt werden. Hierzu ist zunächst die mechanische Bodenverbesserung zu nennen, bei der neben natürlichen Gesteinskörnungen auch industriell hergestellte Gesteinskörnungen oder RC-Baustoffe zugemischt werden können. Auch ist eine Bodenverbesserung mittels Zugabe von Bindemitteln (Zement, Kalk etc.) denkbar.

Auf eine Wassergehaltsreduktion kann unter Umständen ebenfalls verzichtet werden, wenn der Wassergehalt des Ausgangsmaterials den Einsatz in Sonderbauweisen zulässt (vgl. RIZKALLAH &

¹¹ Vgl. <http://www.dredging-in-germany.de>

BLÜMEL [126], WEIGAND & MARB [160]). Diese umfassen im Wesentlichen:

- Kassettenbauweisen, bei denen weiches Bodenmaterial gegen einen standfesten Böschungswall geschüttet wird,
- Sandwichbauweisen, bei der schichtweise weicher Boden und grobkörniges Material aufgebaut wird und
- geotextile Container, die das weiche Material ohne nennenswerte zusätzliche Bodenstützung aufnehmen.

Die erforderliche minimale Konsistenzzahl I_C , ab welcher Boden in Sonderbauweisen nutzbar ist, hängt stark von der Bauweise und der Dimensionierung z. B. der Bewehrung aus Geokunststoffen oder der Böschungsneigung ab. Da die eingebauten weichen Böden zwangsläufig zu größeren Verformungen führen, ist die Leistungsfähigkeit des Bauwerkes insbesondere im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit eingeschränkt. Daher ist es plausibel, derartige Sonderbauweisen nur in Verbindung mit einer entsprechenden Nutzung des Bauwerkes in Betracht zu ziehen. Dies ist insbesondere bei untergeordneten Erdbauwerken (Lärmschutz- und Sichtschutzwälle, Landschaftsbauwerke) möglich, da hier Verformungen in gewissem Maße toleriert werden können.

Ein Fortschritt im Sinne des KrWG in Bezug auf die Weiterverwendung weicher, fein- und gemischtkörniger Böden, wäre die Erweiterung des Wissensstandes zu den Grenzen der Verwendbarkeit und den Grenzen der Möglichkeiten zur Verbesserung der Eigenschaften solcher Böden. Eben dieses Ziel sollte mit den Untersuchungen verfolgt werden.

3.2 Untersuchungskonzept

In einem dem experimentellen Versuchsteil voranstehenden Abschnitt erfolgte die vertiefende Auswertung von Literaturquellen. Ein Hauptaspekt der Recherche lag darin, bisher noch wenig beachtete Verfahren zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit fein- und gemischtkörniger Böden in den Blickpunkt zu rücken. Für die in den eigenen Untersuchungen angewandten Methoden sollten in der Literaturstudie verstärkt jene Parameter herausgearbeitet werden, die das jeweilige Verfahren, im Hinblick auf die in diesem Forschungsvorhaben gestellten Fragen, maßgeblich beeinflussen.

Grundannahme für die eigenen Untersuchungen war, dass ein Ausgangsboden vor Ort mit zu hohem Wassergehalt vorliegt und ohne weitere Zusatzaßnahme erdbautechnisch nicht verarbeitet werden kann. Durch Anwendung unterschiedlicher Verfahren sollten die Grenzen der Verwendbarkeit und Verbesserbarkeit unterschiedlicher Böden versuchstechnisch bestimmt werden. Als zu verbessernde Ausgangsböden wurden 2 feinkörnige Böden (TL und TA gemäß DIN 18196) und 2 gemischtkörnige Böden (ST* und GU* gemäß DIN 18196) ausgewählt. An diesen Ausgangsböden wurde exemplarisch geklärt, mit welchen Verfahren diese erdbautechnisch verwendbar gemacht werden können und welche Grenzen den angewandten Verfahren innewohnen. Die in diesem Bericht betrachteten Verfahren können entsprechend ihres Charakters zu den folgenden zwei Kategorien zusammengefasst werden.

Verfahren zur direkten Verwendung

- Kassettenbauweisen,
- Sandwichbauweisen,
- dauerhafte Verbringung des Materials in geotextile Schläuche (Verbleib des Materials im Schlauch).

Verfahren zur indirekten Verwendung

- Bodenverbesserung mit Bindemitteln,
- mechanische Bodenverbesserung,
- maschinentechnische Entwässerung,
- Entwässerung in geotextilen Schläuchen,
- thermische Entwässerung (Trocknung).

Bei den Verfahren zur direkten Verwendung wird der Boden im zu nassen Zustand verwendet. Die Randbedingungen des Verfahrens müssen daher auf die Eigenschaften des jeweiligen zu nassen Bodens abgestimmt werden (z. B. Umschließung des Materials in Kassetten zur Gewährleistung der Standsicherheit des Bauwerkes). Die Verfahren zur indirekten Verwendung umfassen unterschiedliche Möglichkeiten, um die mechanischen Eigenschaften eines zu nassen Bodens zu verbessern.

Es wurden gezielt innovative Verfahren ausgewählt, um nicht den Grenzen der derzeitigen Erdbaupraxis zu unterliegen (siehe dazu auch Bild 32). Die Versuche bilden die Grundlagen zur Bewertung der Nutz-

barmachung der Versuchsböden im Sinne einer konventionellen Verdichtung in Erdbauwerken.

Böden, welche für die Bindemittelbehandlung oder mechanische Bodenverbesserung zu nass sind, können mittels Wassergehaltsreduktion über Trocknung oder maschinentechnische Entwässerung dem konventionellen Erdbau zugeführt werden. Es ist zu erwarten, dass der Aufwand, der zur Wassergehaltsreduktion nötig ist, um sehr nasse Böden – z. B. Ausgangsmaterialien mit einer flüssigen Konsistenz – einer Verwendung als Erdbaustoff mit dem Ziel der konventionellen Verdichtung zuführen zu können, unter bestimmten Randbedingungen vergleichsweise hoch ist. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn aufgrund kleinerer Mengen des anfallenden Ausgangsmaterials eine maschinentechnische Wassergehaltsreduktion nicht wirtschaftlich ist oder der Zeit- und Platzaufwand für eine Lufttrocknung nicht gerechtfertigt ist. So wurde zusätzlich versucht abzugrenzen, ab welcher Konsistenz (bzw. ab welchem Wassergehalt) der Ausgangsboden ohne weitere Behandlung in Sonderbauweisen einer erdbautechnischen Nutzung zugeführt werden kann.

Die Beurteilung der Verarbeitbarkeit erfolgt im Erdbau anhand jener Anforderungen, die sich aus der Handhabung (Lösen, Laden, Transport, Verdichtung) ergeben. Die Verwendbarkeit eines Materials als Baustoff entscheidet sich letztendlich aber aus den Anforderungen des damit zu errichtenden Bauwerkes an Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. Für die Beurteilung der Untersuchungsergebnisse zur indirekten Verwendung wurde die Verdichtbarkeit als Maßstab für die Verarbeitbarkeit verwendet und die jeweilige Tragfähigkeit über Stempelleindringversuche (CBR) an den verdichte-



Bild 32: Untersuchungskonzept zur Verwendung von zu nassen, fein- und gemischtkörnigen Böden geringer Konsistenz im Erdbau

ten Proben bestimmt. Die Beurteilung zur direkten Verwendbarkeit erfolgt anhand der anwendungsspezifischen Charakteristika.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in ein Schema eingearbeitet, in dem die unterschiedlichen Strategien zur direkten oder indirekten Weiterverwendung von zu nassen, fein- und gemischtkörnigen Böden abhängig von den Bodeneigenschaften bewertet sind.

3.3 Grundlagen und Literaturlauswertung

3.3.1 Grundlagen

Verdichtungsverhalten

Die Verdichtung dient im Erdbau zur Verringerung des Porenanteils bzw. Erhöhung der Dichte eines Bodens und zur damit einhergehenden Erhöhung der Scherfestigkeit. Verdichtungsversuche im Labor dienen in der Regel dazu, die bei einer festen Verdichtungsarbeit erreichbare Trockendichte und den dazugehörigen optimalen Wassergehalt zu bestimmen. Die Angaben dienen als Referenzwert der auf der Baustelle zu erreichenden Werte. Zwischen den unterschiedlichen Bodenarten bestehen charakteristische Unterschiede in der Verdichtbarkeit, die schematisch in Bild 33 dargestellt sind.

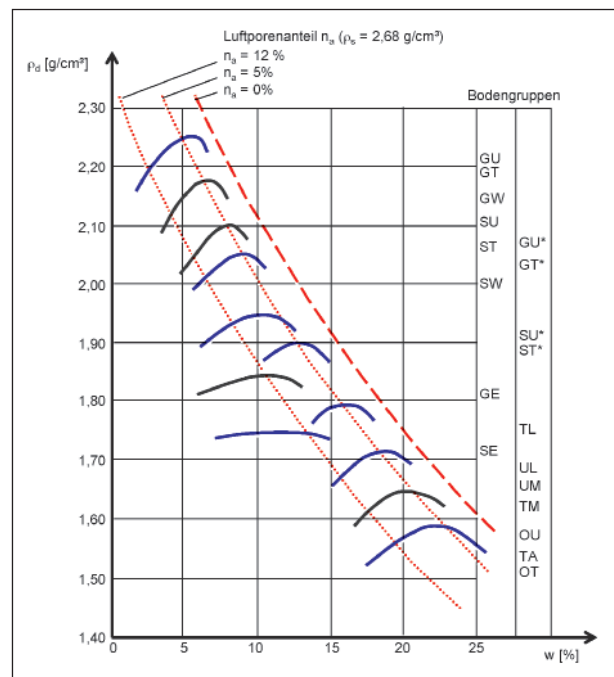


Bild 33: Typische Proctorkurven unterschiedlicher Böden nach VOSS & FLOSS [158] und SOOS [139] (aus BAUM-GÄRTEL et al. [10])

Die durch Verdichtung erreichbare Trockendichte ist bei natürlichen, mineralischen Böden vom Wassergehalt und der Verdichtungsarbeit abhängig. Bei gleichbleibender Verdichtungsarbeit ergibt sich der optimale Verdichtungswassergehalt dort, wo die besten Bedingungen zur Verringerung der Porenräume zwischen den Bodenteilchen herrschen. Am steigenden Ast der Verdichtungskurve bewirkt ein Mehranteil an Wasser, dass die der Verdichtung entgegenstehenden Kräfte zwischen den Teilchen kleiner werden. Dementsprechend lässt sich der Boden mit steigendem Wassergehalt besser verdichten. Auf der nassen Seite des Proctroptimums behindert das in zunehmendem Maße die Porenfüllende Wasser die Verdichtung, also die Verdrängung von Luft aus dem Gemenge. Durch einen bei der Verdichtung praktisch immer vorhandenen Restanteil an luftgefüllten Poren verläuft die Verdichtungskurve dort ungefähr parallel zur Sättigungslinie (zum Beispiel SOOS & ENGEL [141]).

Während bei Böden ohne Tonanteile das Bodenwasser nur den Raum zwischen den Partikeln ausfüllen kann, ist bei feinkörnigen Böden der Wasserhaushalt etwas komplizierter. Je nachdem, ob quellfähige Minerale im Boden vorhanden sind, kann anteilig Wasser zwischen den Elementarschichten der Tonminerale eingelagert werden. Da sich die Anwesenheit solcher Mineralen unter anderem in den Plastizitätseigenschaften eines Materials niederschlägt (vgl. JASMUND & LAGALY [87] oder HEIM [78]), lassen sich für feinkörnige Böden Zusammenhänge, wie in Bild 34 gezeigt, zur Abschätzung der

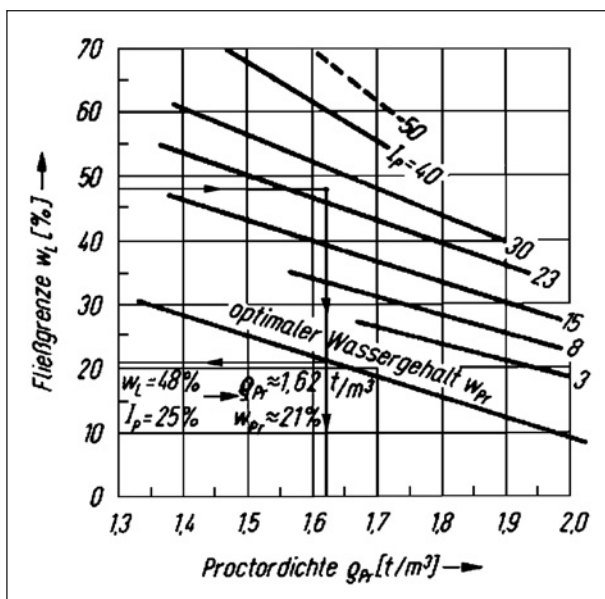


Bild 34: Zusammenhang Plastizitätsgrenzen/Proctorkennwerte (aus SOOS [140])

Verdichtungskennwerte darstellen. Als Faustregel ist im Erdbau bekannt, dass der Proctorwassergehalt etwa im Bereich der Ausrollgrenze (w_p) eines Bodens liegt.

Tragfähigkeit

Unter der Tragfähigkeit eines Bodens wird im Allgemeinen sein Widerstand gegen Bruch oder eine unzulässige Verformung verstanden¹². Je nachdem, ob es sich um einen grob-, gemischt- oder feinkörnigen Boden handelt, sind unterschiedliche Eigenschaften wie zum Beispiel Lagerungsdichte, Reibung und Kohäsion für das jeweilige Verhalten verantwortlich. Es bestehen unterschiedliche Verfahren die Tragfähigkeit eines Bodens zu untersuchen, eines davon ist der CBR-Versuch, wie er zum Beispiel in TP BF-StB 7.1 [60] beschrieben ist.

Beim CBR-Versuch (California Bearing Ratio) handelt es sich um einen im deutschsprachigen Raum nicht sehr verbreiteten Tragfähigkeitsversuch. Dabei wird ein zylindrischer Stempel mit 5 cm Durchmesser mit einer festen Vorschubgeschwindigkeit in eine Probe gedrückt und die dazu erforderliche Kraft dokumentiert. Die entstehende Kraft-Eindringungs-Kurve wird für eine definierte Eindringtiefe des Stempels mit der Kurve eines Standardbodens verglichen. Der so ermittelte CBR-Wert stellt einen Vergleichswert (Versuchswert Boden zu Wert Standardboden) dar und wird in Prozent angegeben.

$$CBR = \frac{F}{F_s} \cdot 100 \text{ [%]}$$

F Stempelkraft beim Versuchsboden

F_s Stempelkraft beim Standardboden

Typische CBR-Werte für unterschiedliche Lockergesteine sind in Bild 35 dargestellt.

Großer Vorteil des Versuchs bei der Laborprüfung ist die schnelle Durchführbarkeit direkt im Anschluss an einen Verdichtungsversuch. Ein Nachteil des Versuches ist die Schwierigkeit, die ermittelten Vergleichswerte in Steifigkeitsangaben (E_{v1} - und E_{v2} -

¹² Die Definition nach TERZAGHI & JELINEK [149] im Standardwerk „Theoretische Bodenmechanik“ (S. 120 und 121) lautet hierzu: „Die zur Erzeugung des Bruchzustandes im tragenden Boden erforderliche Last wird Grenzlast oder maximale Tragfähigkeit genannt. Die mittlere Grenzlast pro Flächeneinheit [...] nennen wir Tragfähigkeit eines Bodens.“

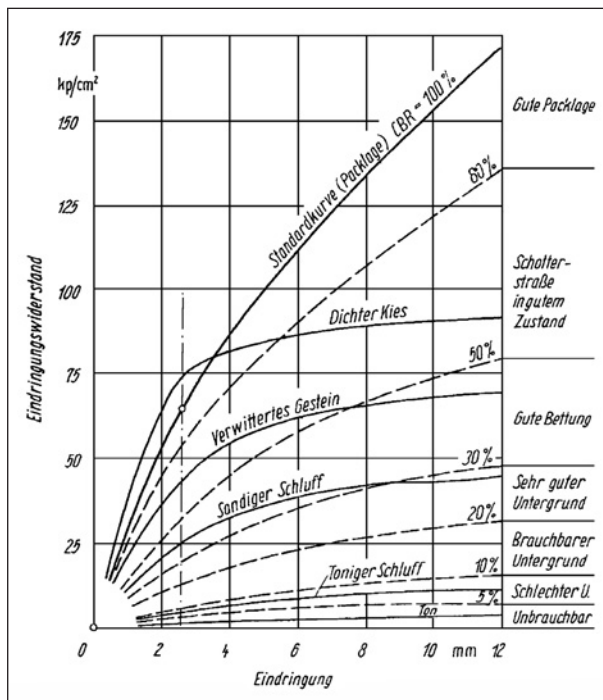


Bild 35: Typische CBR-Kurven (aus KÉZDI [89])

Werte) zu übersetzen, die in den ZTV E-StB [67] als Anforderung an verdichtete Oberflächen festgelegt sind und auf der Baustelle zum Beispiel mithilfe von statischen Plattendruckversuchen nachgewiesen werden können. Nach FLOSS [69] wird bei diesen zwei Versuchsanordnungen der Boden unterschiedlich beansprucht (Scherbeanspruchung aufgrund der großen Verformungen beim CBR-Versuch, Kompression beim Plattendruckversuch). Damit wirken sich die jeweiligen Bodeneigenschaften unterschiedlich auf die aus den Versuchen erhaltenen Kennwerte aus. FLOSS [69] führt weiter aus, dass bei nichtbindigen Böden die Tragfähigkeitskennwerte hauptsächlich durch die Dichte des Materials bestimmt werden, sodass dafür CBR und E_{V1} - bzw. E_{V2} -Werte recht gut umrechenbar sind. Bei bindigem Material bestimmen die Eigenschaften Bodenart (Plastizität), Dichte, Wassersättigung bzw. Luftgehalt, Konsistenz und Kohäsionsfestigkeit die Kennwerte, wobei er angibt, dass ab einer Sättigung von etwa $S_r \geq 90\%$ die Kennwerte aus CBR- und Plattendruckversuch nur mehr vom Wassergehalt und der Dichte abhängen und somit die Gültigkeit der Umrechnung zwischen den Kennwerten beider Versuche auf diesen Sättigungsbereich beschränkt ist.

Es gibt eine Reihe von Ansätzen zur Umrechnung der Werte. In der Arbeit von LOTTMANN [99] sind die gängigen Relationen zwischen CBR-Werten und E_{V1} - bzw. E_{V2} -Moduln zusammengestellt. Bei-

2 – 4 %	Sehr schlechter Untergrund
4 – 7 %	Schlechter Untergrund
7 – 15 %	Mittelmäßiger Untergrund
15 – 40 %	Guter Untergrund
40 – 100 %	Ausgezeichneter Untergrund

Tab. 12: Baugrundgüte nach SCHULTZE & MUHS [134]

spielhaft kann nach FLOSS [69] einem E_{V2} -Wert von 45 MN/m^2 bei bindigen Böden ein CBR-Wert von $13,6\%$, bei nichtbindigen Böden ein CBR-Wert von $5,6\%$ zugeordnet werden.

Nach SCHULTZE & MUHS [134] können Baugrundgüten in Abhängigkeit vom CBR-Wert angegeben werden (Tabelle 12).

Die Genauigkeit des CBR-Versuches wird von FLOSS [69] als „mittlere Streuung des Einzelwertes“ mit $\pm 2\%$ für bindige Böden und $\pm 9\%$ für nichtbindige Böden angegeben. KÉZDI [89] gibt eine maximale Abweichung vom Mittelwert von $\pm 4\%$ an und weist darauf hin, dass die Genauigkeit des CBR-Versuches nach Wasserlagerung aufgrund zunehmender Inhomogenitäten an der Probenoberfläche stark abnehmen kann.

Anforderungen des Erdbaus im Straßenbau

Die Anforderungen für Erdarbeiten im Straßenbau sind in den Regelwerken der FGSV durch die ZTV E-StB [67] geregelt. Darin werden, abhängig von der Bodenart, Anforderungen an den Verdichtungsgrad, den Luftporenanteil und den Verformungsmodul formuliert. Für fein- und gemischtkörnige Böden (wie auch TL, TA, ST* und GU*) ist zwischen Planum und Dammsohle ein Verdichtungsgrad $D_{Pr} \geq 97\%$ und ein zulässiger Luftporenanteil von $n_a \leq 12\%$ einzuhalten. Ohne Verfestigungsmaßnahme oder qualifizierte Verbesserung wird die Einhaltung eines zulässigen Luftporenanteils von $n_a \leq 8\%$ empfohlen. Zusätzlich wird für frostempfindliche Böden ein erforderliches Verformungsmodul im Unterbau von $E_{V2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ gefordert¹³. Bei vom Straßendamm baulich abgekoppelten Schutzwällen gelten die Anforderungen $D_{Pr} \geq 95\%$ und $n_a \leq 12\%$.

Um fein- und gemischtkörnige Böden im Erdbau mit herkömmlichem Gerät verarbeiten zu können, müs-

¹³ Kommt eine qualifizierte Bodenverbesserung zur Ausführung, so erhöht sich diese Anforderung auf $E_{V2} \geq 70 \text{ MN/m}^2$.

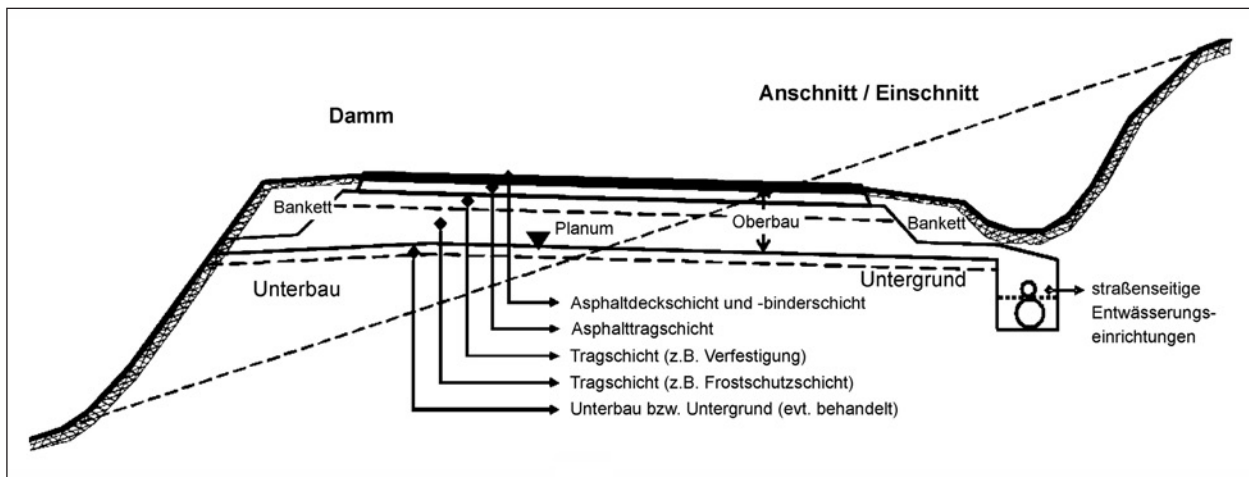


Bild 36: Begriffsbestimmungen nach ZTV E-StB (aus ZTV E-StB 09 [67])

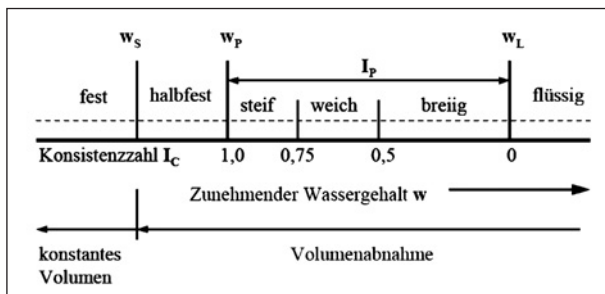


Bild 37: Konsistenzbalken (aus BOLEY [19])

sen diese einen Wassergehalt nahe dem optimalen Wassergehalt aufweisen. Fein- und gemischtkörnige Böden, deren Wassergehalt oberhalb ihrer Verarbeitbarkeitsgrenze liegt, können mit unterschiedlichen Verfahren verbessert, entwässert oder in Sonderbauweisen verwendet werden.

Kommt bei der Errichtung des Erdbauwerkes Material zum Einsatz, welches umweltrelevante Inhaltsstoffe aufweist, so kann als weitere Anforderung die Durchlässigkeit dieses Materials hinzukommen. Das Merkblatt M TS E [56] (Ausgabe 2009) zeigt unterschiedliche Möglichkeiten zu technischen Sicherungsmaßnahmen bzw. Bauweisen für Erdbauwerke mit solchen umweltrelevanten Inhaltsstoffen auf. Unter anderem bestimmt dort die Durchlässigkeit dieses Materials, welche der vorgeschlagenen Bauweise zu wählen ist. Zum Beispiel kann ab einer Durchlässigkeit des Dammbaustoffes von $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s der gesamte Damm aus dem infrage stehenden Material erstellt werden. Die technischen Sicherungsmaßnahmen halten sich dabei mit oberflächlicher Witterungsschicht und Dränmatte zur Abführung von Oberflächenwässern in Grenzen.

3.3.2 Verwendung in Sonderlösungen

Kassetten- und Sandwichbauweisen

Weist einzubauendes Material eine derart niedrige Scherfestigkeit (zum Beispiel aufgrund eines zu hohen Wassergehaltes) auf, dass nur sehr flache Böschungen damit hergestellt werden könnten, so bietet sich die Einfassung dieses Materials in sogenannten Kassetten an. Die Kassetten können in Form von Dämmen aus hochwertigem Erdbaumaterial hergestellt werden und gewährleisten die äußere Standsicherheit des Bauwerkes (Sicherheit gegen Böschungsbruch). Dadurch können die bautechnischen Anforderungen an das darin verfüllte Material stark gesenkt werden. So ist es unter Umständen auch möglich, Material mit flüssiger Konsistenz zu verwenden.

Bei Sandwichbauweisen erfolgt ein abwechselnder Einbau von weichen, feinkörnigen Böden mit tragfähigem, drainagefähigem Material. Nach PLACZEK [122] ist dabei auf die Filterstabilität der beiden Materialien zu achten. Das weiche Material muss für den Einbau in handhabbarer Konsistenz vorliegen (Transport, Einbau und Verdichtung) und hat zur Gesamttragfähigkeit und zur Böschungsbruchsicherheit des Gesamtpaketes beizutragen. Deshalb ist die sinnvolle Anwendung der Bauweise auf Material beschränkt, dessen Wassergehalt nicht zu weit oberhalb des Verdichtungsoptimums liegt.

Beide Bauarten können kombiniert werden und sind aufgrund der Tatsache, dass sie ohne besondere Erdbaugeräte herstellbar sind, unter Umständen attraktive Alternativen zu anderen Bodenverbesserungsmaßnahmen (vgl. PLACZEK [122]). Leider sind keine Erfahrungsberichte in der Literatur dokumentiert.

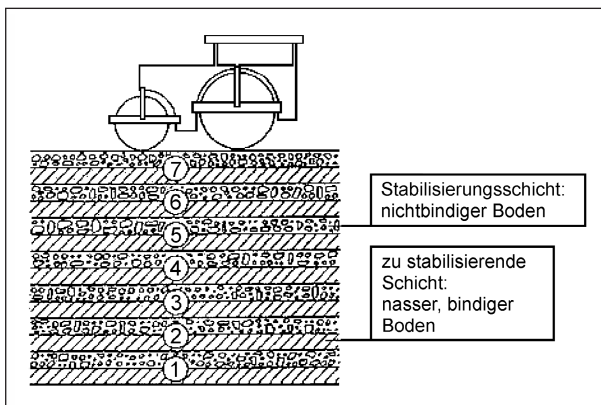


Bild 38: Schnitt durch eine Sandwichbauweise (aus PLACZEK [122])

Geotextile Schläuche

Bei diesem Verfahren wird Schlamm in geotextile Schläuche gepumpt, und entwässert dort, während die Feststoffe von der Geotextilhülle zurückgehalten werden. Die Menge der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Erfahrungsberichte zum Verfahren zeichnen das Bild eines international etablierten Verfahrens.

Die Entwässerung erfolgt zusammenfassend über (durch Verkürzung der Dränwege optimierte) Konsolidation. Die Dränzeit ist demnach unter anderem über die Querschnittsdimension des Schlauches beeinflussbar. Tendenziell sind im Zuge der Entwässerung in der Mitte eines Schlauches höhere Wassergehalte als an den Rändern zu erwarten (GAFFNEY et al. [73]). Die Maßnahme gilt in der Regel als abgeschlossen, wenn das zu entwässernde Material eine „stichfeste“ Konsistenz aufweist. Das Material kann dann entweder aus dem Container entnommen werden oder, falls gewünscht, dauerhaft darin verbleiben (WILKE & HANGEN [163]).

Damit die Entwässerung in geotextilen Schläuchen aber überhaupt gelingt, müssen mehrere Teilaspekte vorab aufeinander abgestimmt und bemessen werden. Die Bemessung der erforderlichen Zugfestigkeit des Geotextils kann mittlerweile relativ einfach über Softwarelösungen erfolgen (siehe WILKE & HANGEN [163]). Die Auswahl des Geotextilmaterials in Bezug auf die Filterwirkung gestaltet sich bereits anspruchsvoller. Filterkriterien für solche Anwendungen können zum Beispiel in WILKE & HANGEN [163], MUTHUKUMARAN & ILAMPARUTHI [116], LESHCHINSKY et al. [97] nachgelesen werden. Geflochtene Geotextilien, die die herkömmlichen Filterkriterien nicht erfüllen, erfüllen durch



Bild 39: Gefüllter Geotextil-Container (aus WILKE & HANGEN [163])

Filterkuchenbildung in der Regel ebenfalls die erforderliche Materialrückhaltungswirkung (vgl. MOO-YOUNG et al. [114], GAFFNEY et al. [73]).

Auch die Eigenschaften der Suspension haben weitreichenden Einfluss auf den Entwässerungsverlauf; die Filterbemessung reicht allein nicht aus, um den Entwässerungserfolg zu prognostizieren (vgl. MOO-YOUNG et al. [114]). Die Durchlässigkeit des Paketes ist abhängig von der Öffnungsweite des Geotextils, dem zurückzuhaltenden Boden sowie dessen Wassergehalt und wird mit der Zeit durch das Verlegen der der Poren kleiner (vgl. NANDHITHA & ILAMPARUTHI [137], MUTHUKUMARAN & ILAMPARUTHI [116]).

Die Verwendung von Flockungsmitteln kann unter Umständen sinnvoll sein, da durch die Ausflockung und Bildung von größeren Aggregaten auch gröbere Geotextilien verwendet werden können und dadurch eine schnellere Entwässerung möglich wird. Flockungshilfsmittel sind grundsätzlich auch mit Trinkwasserzulassung beziehbar, sodass das gefilterte Wasser (vorausgesetzt es handelt sich um nicht kontaminierte zu entwässernde Mineralstoffe) in die Vorflut abgeleitet werden kann (vgl. CANTRÉ & SCHULZ [22]). In der Regel werden Vorversuche zur Auswahl des Materials und des Flockungsmittels durchgeführt. Solche Versuche sind zum Beispiel der Hanging Bag Test oder ein Druckfiltrations-test (vgl. WILKE & HANGEN [163], KOERNER & KOERNER [94]).

Die Einsatzmöglichkeiten für geotextile Schläuche zur Behandlung weicher, feinkörniger Böden sind umfangreich. So wird in der Literatur über Anwendung bei der Behandlung von Fließ- und Stillwassersedimenten (zum Beispiel GAFFNEY et al. [73], GAFFNEY & MOO-YOUNG [73], COULET et al. [28], CANTRÉ & SCHULZ [22], WORTELBOER [167], GEIßLER et al. [75]), über die Verwendung bei

der Aufbewahrung kontaminierter Böden (zum Beispiel GAFFNEY et al. [73], LESHCHINSKY et al. [97], WORTELBOER [167]), über die Verwendung im Deichbau (zum Beispiel LESHCHINSKY et al. [97], WORTELBOER [167]), über die Verwendung von gefüllten Schläuchen als Bauteile zum Schutz gegen Ufer- und Küstenerosion (zum Beispiel LESHCHINSKY et al. [97], COULET et al. [28], WORTELBOER [167], SAATHOFF et al. [128]) und über die Verwendung bei Landgewinnungsmaßnahmen (zum Beispiel WORTELBOER [167]) berichtet.

3.3.3 Bodenverbesserung durch Zugabe von gebranntem Kalk

Allgemeines

Die Bodenbehandlung mit Kalk ist im Erdbau ein etabliertes Verfahren. Dabei ist streng zu unterscheiden in der Behandlung mit gebranntem oder gelöschtem Kalk. Maßgeblicher Unterschied zwischen beiden ist die noch nicht oder bereits abgelaufene Hydratationsreaktion.

- Bodenbehandlung mit gebranntem Kalk (Brantkalk, Weißfeinkalk)

Ungelöschter Kalk liegt in der Form von Kalziumoxid (CaO) vor und bindet bei Kontakt chemisch Wasser. Der ungelöschte Kalk wird dadurch in Kalkhydrat (genauer Kalziumhydroxid) umgewandelt. Durch diese Hydratationsreaktion wird Energie in Form von Wärme frei und Bodenwasser kann dadurch zusätzlich verdunsten. Durch die chemische Bindung und Verdunstung von Wasser können geeignete Böden bis deutlich über ihrem optimalen Wassergehalt verarbeitet werden. In weiterer Folge ist eine Konsistenzänderung und Verfestigungsreaktion analog bei der Bodenbehandlung mit Kalkhydrat möglich.

- Bodenbehandlung mit gelöschtem Kalk (Kalziumhydroxid)

Gelöschter Kalk ist im Lieferzustand bereits hydratisiert ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und ist nicht in der Lage, Wasser chemisch zu binden oder zu verdunsten. Seine Wirkung in der Bodenbehandlung beruht vor allem auf der adsorptiven Bindung von Wasser, der erzielbaren Konsistenzänderung des Bodens durch Austauschvorgänge im Adsorptionskomplex der Tonminerale (Verbesserungs-

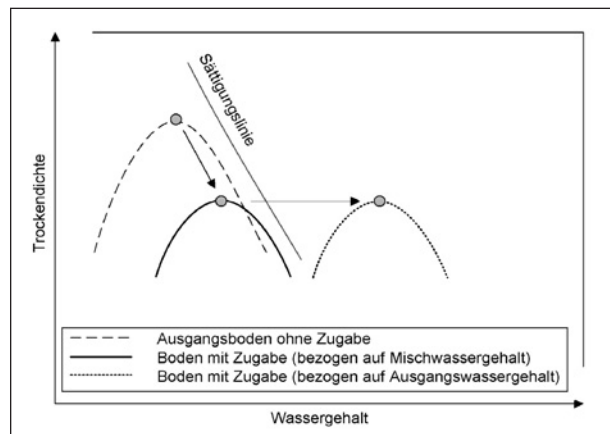


Bild 40: Änderung des Verdichtungsverhaltens durch Zugabe von ungelöschtem Kalk

wirkung durch Änderungen im Bodengefüge) sowie mittel- bzw. langfristig einer puzzolanischen Reaktion.

Die bei der Zumischung von Kalk (allgemein) ablaufenden chemischen Reaktionen sind im deutschsprachigen Raum zum Beispiel in MEIHORST [102], LINEMANN [98], JESSBERGER [88], KÉZDI [91] und in neuerer Zeit in WITT [165], [166] ausreichend beschrieben und werden im Folgenden nur zusammenfassend dargelegt.

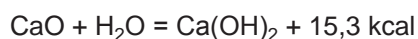
Gemäß KÉZDI [91] können die durch Einmischung eines Kalkes (allgemein) in einen Boden ablaufenden Reaktionen in vier Phasen (Anfangsstadium, Gel-Stadium, Neolithstadium, Karbonatstadium) eingeteilt werden, wobei für die Beurteilung von Bodenverbesserungsmaßnahmen hauptsächlich der Zeitraum zwischen Einmischung des Bindemittels und der Verdichtung des Gemisches, also das Anfangsstadium und Teile des Gel-Stadiums, relevant sind. In diesen zeitlichen Rahmen fallen bei der Bodenverbesserung mit gebranntem Kalk vor allem das Ablöschen des Kalkes (chemische Bindung von Wasser, Verdunstung) und die darauf folgende Konsistenzänderung des Bodens. Die in den Folgephasen ablaufenden chemischen Prozesse haben zwar einen Einfluss auf die endgültigen Eigenschaften des (verdichteten) Boden-Bindemittel-Gemisches, sind aber für die Änderungen bei der Verarbeitbarkeit und Verdichtung nicht ausschlaggebend.

Zu den Einflüssen auf die Ausbildung der Verbesserungsmaßnahme zählen Faktoren wie der Tonmineralanteil, die Tonmineralart und dessen Kationenaustauschvermögen. Der pH-Wert der Porenlösung und organische Anteile sind vor allem für die Verfestigungsreaktion relevant. Weitere Einflussfaktoren

ergeben sich aus der Zugabemenge, der gewährten Reaktionszeit zwischen Mischung und Verdichtung, den Witterungsbedingungen (Lagerungsbedingungen) zwischen Mischung und Verdichtung und der Art und Dauer, bzw. dem Erfolg der Einmischung (Homogenisierung).

Anfangsstadium/Gel-Stadium

Nach dem Einmischen des Bindemittels beginnt als Sofortreaktion die Hydratation, das Löschen des gebrannten Kalkes durch die Bodenfeuchtigkeit und unter Freisetzung von Energie in Form der Hydratationswärme. Es wird also einerseits das Wasser chemisch gebunden, andererseits erfolgt ein Wasserentzug durch Verdunstung (zum Beispiel WINTERKORN & AICHHORN [164]).



Ein weiterer Effekt, welcher dem Anfangsstadium zugeordnet werden kann, ist die Strukturumwandlung des Bodens in Form von Aggregatbildung und eine damit einhergehende Änderung der plastischen Eigenschaften des Gemisches im Vergleich zum Ausgangsboden. Dabei aggregieren im Zuge der oben beschriebenen Verringerung des Wassergehaltes und der dadurch bedingten Erhöhung der Saugspannungen sowie des beginnenden Kationenaustausches und den daraus folgenden Effekten an den Tonmineraloberflächen die Bodenpartikel zu größeren Kornaggregaten (zum Beispiel WITT [165]).

Gleichzeitig zum Beginn des Ionenaustauschs verliert das durch die Ablöschung des gebrannten Kalkes entstandene Ca(OH)_2 größtenteils seine kristalline Form, wird zu einer amorphen Substanz (Kalkhydratgel) und kennzeichnet so den Übergang zum sogenannten Gelstadium (KÉZDI [91]).

Durch diese Veränderung der Bodenstruktur (Aggregatbildung) wird eine Verkleinerung der durch Verdichtung erreichbaren Trockendichte bewirkt (zum Beispiel LINEMANN [98]). Gleichzeitig bedingt die chemische und adsorptive Bindung sowie Verdunstung von Wasser eine Wassergehaltsreduzierung. Daraus folgt insgesamt, dass die erreichbare Trockendichte im Proctoroptimum eines Boden-Bindemittel-Gemisches in der Regel geringer ist, als die des Bodens ohne Kalkzugabe. Gleichzeitig ist die Verarbeitbarkeit (Verdichtung) noch bei Wassergehalten möglich, bei denen der Boden ohne Zugabe nicht verarbeitet werden könnte.

Einflüsse auf die Entwicklung in der Anfangsphase

Im Folgenden wird näher auf diejenigen Faktoren eingegangen, die bei der Bodenverbesserung mit gebranntem Kalk auf die Entwicklungen im Zeitraum zwischen Einmischung und Verdichtung Einfluss nehmen.

a) Organische Bestandteile

Die Bodenverbesserung mit gebranntem Kalk erfolgt größtenteils durch Wassergehaltsreduzierung (chemische Bindung von Wasser und dessen Verdunstung). Es ist eine begründete Vermutung, dass dieser Effekt nicht maßgeblich vom organischen Anteil des Bodens abhängig ist. Über den Einfluss von organischen Anteilen auf die kalkbedingte Änderung der Plastizität und Aggregatbildung gibt die Literatur jedenfalls keinen Aufschluss.

b) Kalkmenge und Reaktionszeit

In LINEMANN [98] wird als Schätzwert von einer Wasserbindung (chemisch und adsorptiv) des gebrannten Kalkes und einer Verdunstung von etwa 50 M.-% des Kalkgewichtes ausgegangen. Rechnerisch beträgt die chemische Bindung von Bodenwasser hierbei 30 M.-% des Eigengewichtes des gebrannten Kalkes und der restliche Anteil setzt sich aus adsorptiver Wasserbindung und Verdunstung zusammen. WITT [165] gibt an, dass der Wassergehalt des Bodens pro zugegebenem 1 M.-% gebranntem Kalk um etwa 1 M.-% reduziert werden kann (Anteil chemisch gebundenes Wasser etwa 300 g pro 1.000 g CaO).

Für Kalkhydrat gilt Folgendes: JESSBERGER [88], aber auch WITT [165] weisen darauf hin, dass eine Grenze besteht, ab der für jeden Boden die Verbesserung der Eigenschaften nur mehr in untergeordnetem Maße oder gar nicht mehr stattfindet. Diese Grenze fällt mit dem von BELL [13] beschriebenen „lime fixation point“ zusammen. Sie ist demnach erreicht, wenn der Ionenaustausch an den Bodenteilchen abgeschlossen ist und kann mit etwa 1 bis 3 M.-% an Kalkhydrat angegeben werden. Über diesen Punkt hinaus steht im Gemisch vorhandener Kalk für die Langzeitverfestigung zur Verfügung¹⁴.

¹⁴ Diese Tatsache wird im Verfahren nach EADES & GRIM [47] oder in überarbeiteter Fassung nach ROGERS & GLENDINNING [127] zur Bestimmung der zur Verfestigung des Boden-Bindemittel-Gemisches erforderlichen Kalkzugabemenge ausgenützt.

WITT [165] gibt dazu eine Kalkhydratmenge von etwa 2 bis 3 M.-% an, JESSBERGER [88] 5 bis 7 M.-%.

Ob nun dem Boden in Form von gebranntem Kalk oder (ohne die Vorteile der chemischen Wasserbindung und Verdunstung) gleich in Form von Kalkhydrat zugegeben wird, kann der nun im Bodengemenge vorliegende gelöschte Kalk in weiterer Folge noch die Plastizität des Materials verändern. Da in der Re-

gel größere Mengen an Kalkhydrat dem Boden zugegeben werden, als zur reinen Ca-Absättigung des Adsorptionskomplexes (= Gesamtheit der adsorbierten Ionen am Bodenteilchen) benötigt werden, bewirkt der restliche Anteil in der Anfangsphase wahrscheinlich eine Verkittung der durch Koagulation entstandenen Sekundärteilchen. Ein Überangebot an Kalkhydrat in einem Boden erzeugt außerdem einen zusätzlichen Effekt: die Teilchen des Kalkpulvers finden im freien Bodenwasser nicht ausreichend Wassermoleküle, um eine Wasserhülle aufzubauen und nehmen das Hydratationswasser der aneinandergelagerten Bodenteilchen (Sekundärteilchen) in Anspruch. Dies erhöht die Koagulationswirkung, da dadurch der Hydratationsgrad der Bodenteilchen verringert wird (vgl. MEIHORST [102]).

In einer von SCHADE [129] durchgeführten Studie wurden die Wassergehalte unterschiedlicher Böden vor Einmischung des ungelöschten Kalkes und die nach der Einmischung (bzw. nach bestimmten Reaktionszeiten) ermittelbaren Wassergehalte dokumentiert. Eine Auswertung dieser Daten zeigt die Wassergehaltsreduzierung in Abhängigkeit von der Zugabemenge und vom Ausgangswassergehalt des jeweiligen Bodens (siehe Bild 41 und Bild 42)¹⁵.

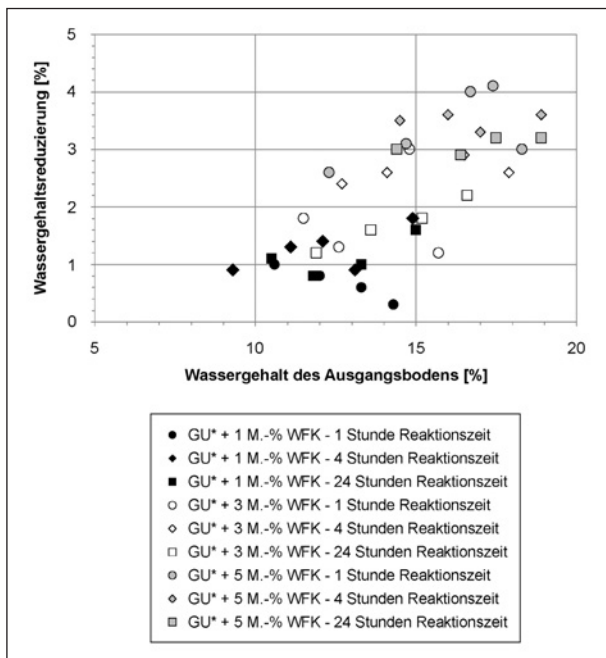


Bild 41: Wassergehaltsreduzierung durch Zugabe von ungelöschtem Kalk aus Versuchen von SCHADE [129]

¹⁵ In der Veröffentlichung werden keine Angaben über die Lagerungsbedingungen der Proben während der Reaktionszeit (zum Beispiel offen/geschlossen etc.) gemacht.

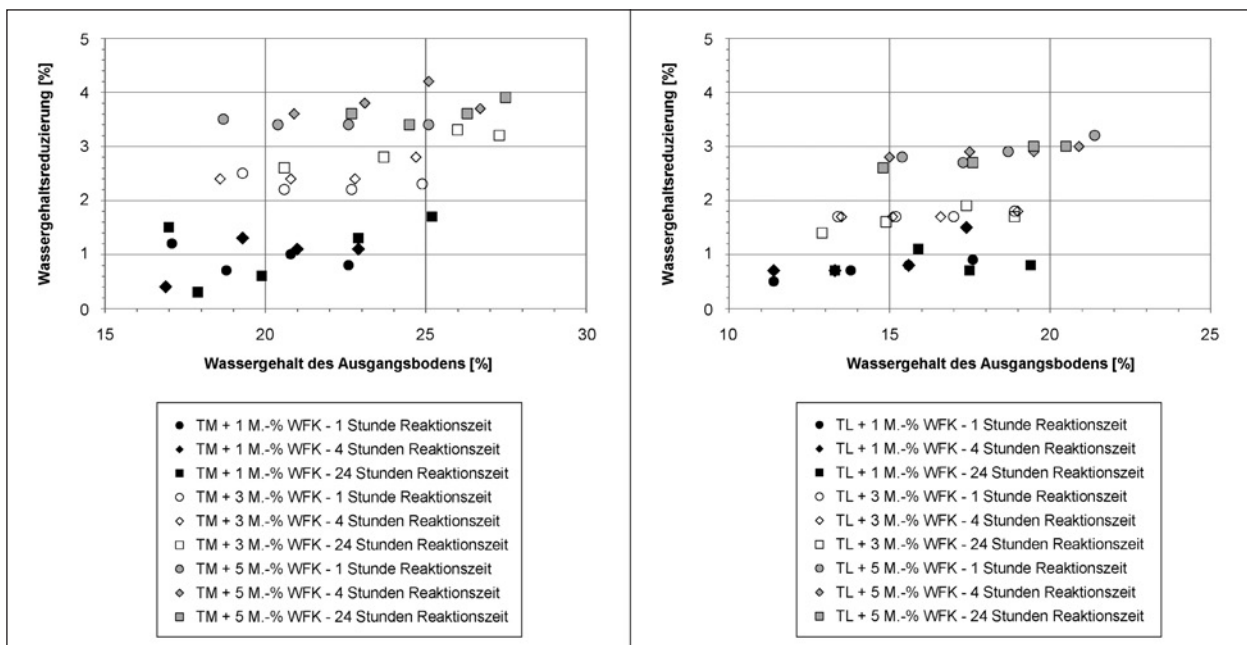


Bild 42: Wassergehaltsreduzierung durch Zugabe von ungelöschtem Kalk aus Versuchen von SCHADE [129]

In derselben Studie wurde auch der Einfluss der Reaktionszeit vor Verdichtung, vor allem auf die Verdichtungscharakteristik unterschiedlicher Böden untersucht. Anhand von Verdichtungsversuchen stellte SCHADE [129] fest, dass bei steigender Reaktionszeit der optimal verarbeitbare Wassergehalt des Ausgangsbodens steigt und die erreichbare Trockendichte sinkt. Dieser Effekt war bei einem leicht plastischen Schluff weniger stark ausgeprägt, als bei einem mittelplastischen Ton.

c) Bodenart

Es ist zu erwarten, dass die plastischen Eigenschaften eines bindigen Erdstoffes die Sofortwirkung der Bindemittelzugabe beeinflussen. In der Literatur werden zur Beschreibung der Reaktion auf die Kalkzugabe die Ausgangsböden einerseits in Schluffböden ($I_p < 15$) und andererseits in Tonböden ($I_p > 15$) unterteilt (vgl. MEIHORST [102] bzw. WINTERKORN & AICHHORN [164]).

Abhängig davon, wie groß die freie Ladung an der Oberfläche der Minerale (abhängig vom Mineralaufbau) ist, werden dort Ionen zum Ladungsausgleich angelagert. Diese Ionen wiederum binden in Kontakt mit Wasser Wassermoleküle (Dipole) und bilden so eine Hydratationshülle. Unterschiedliche Ionen (z. B. aus Na- oder Ca-Ionen) binden dabei unterschiedlich viel Wasser. Tone mit geringer Oberflächenladung (z. B. Kaolintone) und Teilchen mit geringer spezifischer Oberfläche (fallende Relevanz der Oberflächenkräfte im Vergleich zur Masse, z. B. Schluff) weisen dadurch eine niedrige Kationenaustauschfähigkeit auf, die Wasserbindefähigkeit ist schwach (außerdem besitzen solche Böden nur äußere Oberflächen und sind nicht quellbar). Montmorillonittonen weisen hohe spezifische Oberflächen (innere und äußere Mineraloberfläche, quellbar) und darauf größere freie Ladungen auf. Sie besitzen insgesamt größere Mengen austauschbarer Ionen und eine entsprechend hohe Wasserbindefähigkeit (KÉZDI [90]).

Die Wirkung der Oberflächenkräfte, die die Kationenaustauschkapazität bedingen, ist bei Schluffen (diese stellen meist mechanisch verwitterte Reste des Ausgangsgesteins dar) allgemein weniger ausgeprägt als bei Tonen. Tone sind Neu- und Umbildungen der durch chemische Verwitterung zerkleinerten Mineralteilchen und weisen strukturbedingt höhere Oberflächenkräfte (Kationenaustauschfähigkeit) und eine höhere spezifische Oberfläche auf (vgl. HEIM [78] oder JASMUND & LAGALY [87]).

Hieraus erklärt sich die durch MEIHORST [102] bzw. WINTERKORN & AICHHORN [164] beschriebene Einteilung in Schluff- und Tonböden.

Während die Kationenaustauschkapazität an sich auf die Langzeitwirkung (Verfestigung des Boden-Bindemittel-Gemisches, puzzolanische Reaktion) keinen entscheidenden Einfluss hat (vgl. JESSBERGER [88] oder BELL [13]), spielt sie bei der Sofortwirkung eine wesentliche Rolle. Wie bereits beschrieben, beginnt bei der Einmischung von Kalk in einen Boden ein chemischer Prozess, im Zuge dessen Ionen im Adsorptionskomplex der Bodenteilchen durch andere ausgetauscht werden. Dadurch ändert sich unter anderem auch die Stärke der Hydrathüllen. Diese Änderungen äußern sich auch im Verhalten des Teilchengefüges. Die Sofortwirkung von Kalkhydrat bei der Bodenverbesserung, also die Koagulation und Änderung der Konsistenz, wird im Allgemeinen dem Ionenaustausch zugeschrieben. Sobald eine Absättigung der Bodenteilchen mit Ca-Ionen erreicht ist, findet demnach keine weitere maßgebliche Änderung der Konsistenzgrenzen mehr statt (BELL [13]). KÉZDI [91] weist allerdings darauf hin, dass der Ionenaustausch nicht die einzige Ursache für die Koagulation sein kann, da die selben Effekte auch bei Böden beobachtet wurden, die schon vor Kalkzugabe eine Sättigung mit Ca-Ionen aufwiesen.¹⁶ Dieser Hinweis deckt sich mit den Angaben von MEIHORST [102] (s. o.), dass das zugemischte Kalkpulver dem Boden auch das an den Bodenteilchen adsorbierte Wasser entziehen kann um zu hydratisieren. Damit trägt es durch die Verringerung der Hydrathülle der Bodenteilchen zur Koagulation bei.

Tonmineralart und Menge spielen vor allem bei der Änderung der Fließgrenze (durch Kalkzugabe) eine maßgebliche Rolle. Ist der Ausgangsboden vor Kalkzugabe ein Boden ohne hohe Ionenaustauschkapazität, so wird dieser an den Teilchenoberflächen nur wenige Ionen in Ca-Ionen eintauschen und aufgrund seiner grundsätzlich geringeren Fä-

¹⁶ An dieser Stelle kann noch angemerkt werden, dass nicht nur die Art und Anzahl der adsorbierten Ionen an den Mineraloberflächen, sondern auch die Ionenkonzentration in der Porenlösung die Dicke der Hydrathülle eines Mineralteilchens beeinflusst (osmotische Quellung). Die Zugabe von Kalk führt auch zu einer erhöhten Elektrolytkonzentration (Ca^{2+}) im Porenwasser und dadurch zu einer Verkleinerung der angelagerten Wasserschicht. Siehe dazu zum Beispiel HEIM [78] oder JASMUND & LAGALY [87].

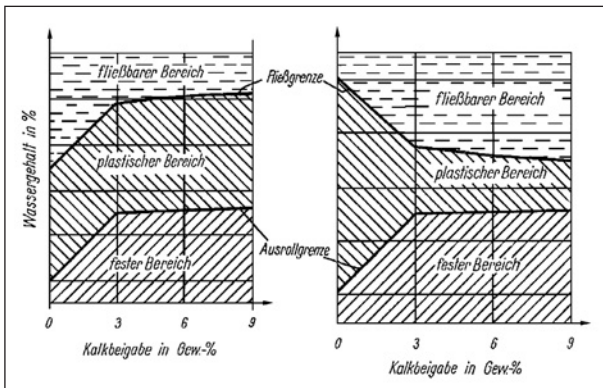


Bild 43: Änderung der Konsistenzgrenzen bei Kalkzugabe; links Schluff, rechts Ton (aus JESSBERGER [88])

higkeit zur Wasserbindung (geringe spezifische Oberfläche, geringe Ladung an den Teilchenoberflächen, niedere Fließgrenze) auch nur untergeordnete Änderungen in den Wasserhüllen der Bodenteilchen zeigen (vgl. BELL [13] bzw. DASH/HUSSAIN [29]). Die trotzdem in Bild 43 (links) ersichtliche und in Versuchen gezeigte Erhöhung der Fließgrenze wenig plastischer Tone und Schluffe bei Zugabe von Kalk führt MEIHORST [102] darauf zurück, dass die Bodenstruktur dieser Böden mehr durch Strukturänderung (Koagulation) als durch die adsorptive Wasserbindung beeinflusst wird. Dabei wird im Zuge der Aggregatbildung das Porenvolumen des Boden-Bindemittel-Gemisches und somit sein Wasseraufnahmevermögen erhöht. Dieses Erklärungsmodell wird auch von DASH & HUSSAIN [29] herangezogen.

Weisen die Tonminerale des zu verbessernden Bodens im Gegensatz dazu als Ausdruck einer großen spezifischen Oberfläche und entsprechenden Oberflächenladung eine hohe Kationenaustauschkapazität auf, so werden die an den Teilchenoberflächen des Bodens adsorbierten Ionen gegebenenfalls durch höhervalente Ca-Ionen ersetzt. Die Bodenteilchen erzielen dadurch einen vorteilhafteren Ladungsausgleich und die nun mit Ca-Ionen besetzten Teilchenoberflächen hydratisieren insgesamt weniger stark, die Wasserhüllen der Minerale verkleinern sich. Die Fähigkeit des Bodens Wasser zu binden sinkt. Überwiegt dieser Effekt der oben genannten Erhöhung der Fließgrenze durch Krümelbildung, so resultiert daraus insgesamt eine Verringerung der Fließgrenze (vgl. MEIHORST [102] bzw. DASH & HUSSAIN [29]).

An der Ausrollgrenze führt der durch Zugabe von Kalk bedingte Kationenaustausch und die Reduzierung der Stärke der (an den Bodenteilchen) adsorbierten Wasserschicht zu einer Steigerung der

Tonmineral	Kationenaustauschkapazität [mval/100g]
Kaolinit	3 – 15
Montmorillonit	80 – 150
Vermiculit	100 – 150
Illit	10 – 40
Chlorit	10 – 40

Tab. 13: Typische Kationenaustauschkapazitäten (Werte aus MITCHELL & SOGA [113])

Ionenkonzentration in den Wasserhüllen der Teilchen. Dies hat eine weitere Erhöhung der Viskosität dieses Wassers und somit eine Erhöhung des Scherwiderstandes zwischen den Einzelkörnern zur Folge. Dieser Effekt und die Krümelbildung bewirken im Allgemeinen eine Erhöhung des Wassergehaltes an der Ausrollgrenze für kalkverbesserte bindige Böden (DASH & HUSSAIN [29]).

Zusammenfassend ist vor allem die Zusammensetzung des Bodens aus Sicht der Korngrößen, der Mineralogie und gegebenenfalls die entsprechend den verschiedenen Tonmineralen sehr unterschiedliche Kationenaustauschkapazität in Verbindung mit dem (vor Behandlung) adsorbierten Ionenkomplex ein ausschlaggebender Faktor für das Verhalten des Boden-Bindemittel-Gemisches nach der Einmischung von Kalk.

Streng genommen ist der Kationenaustausch von mehreren Faktoren wie z. B. Temperatur, Druck, pH-Wert sowie der chemischen und biologischen Zusammensetzung des Wassers abhängig (MITCHELL & SOGA [113]). So können die in der Literatur zahlreich angeführten Werte für unterschiedliche Böden schwanken. Typische Werte für gängige Tonminerale sind in Tabelle 13 dargestellt.

Die chemisch-physikalischen Details des Kationenaustausches, der Aggregation und anderen mineralogischen Fragestellungen sind in der tonmineralogischen Standardliteratur ausführlich beschrieben. Siehe dazu zum Beispiel HEIM [78] oder JASMUND & LAGALY [87].

d) Nachbehandlung (vor Verdichtung)

Bei der Bodenverbesserung mit ungelöschem Kalk leuchtet es ein, dass ein maßgeblicher Faktor für die Entwicklung der Eigenschaften des Gemisches die Möglichkeit zur Verdunstung von Wasser im Zuge der exothermen Reaktion (Löschen des Kalles) darstellt. Die Temperatur ist grundsätzlich

wichtig für chemische Reaktionen, so auch für die Reaktion zwischen Bindemittel und Boden. Für die Entwicklung der Eigenschaften eines Boden-Bindemittel-Gemisches in der Anfangsphase wird unter anderem auch relevant sein, wie gut oder schlecht der Kalk in den Boden eingearbeitet werden kann (Mischerfolg) und wie lange der Zeitraum zwischen dem Einmischen und der Verdichtung (dem Einbau) gewählt wird.

Bezogen auf die Anwendung der Bodenverbesserung mit gebranntem Kalk in der Baupraxis bedeutet dies eine Abhängigkeit von der Witterung (Niederschlag, Temperatur, Wind etc.) und den zeitlichen und maschinellen Randbedingungen des Bauvorhabens. Siehe dazu auch Merkblatt über Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln [51].

3.3.4 Bodenverbesserung durch Zugabe von Braunkohlenflugasche

Allgemeines

Wie schon für die Bodenverbesserung mit Kalk dargestellt (siehe Bild 40) ist auch bei der Zugabe von Braunkohlenflugasche eine Verschiebung der Verdichtungskurve, also Erweiterung der Verarbeitbarkeit auf höhere Wassergehalte, zu erwarten. Im Vergleich zur Kalkverbesserung werden bei dieser Art der Verbesserung aber in der Regel größere Mengen an Flugasche mit latent hydraulischen oder hydraulischen Eigenschaften zugegeben und so setzt sich die Verschiebung der Verarbeitbarkeit auch aus mehreren Komponenten zusammen. Einerseits verändert der vergleichsweise große Anteil an zugemischtem Material die Körnung sowie den mittleren Wassergehalt und die (je nach Flugasche) rasch einsetzende Verfestigungsentwicklung ändert das Bodengefüge. Dabei bindet die zugegebene (trockene) Flugasche einerseits adsorptiv Wasser. Andererseits ist die chemische Bindung und Verdunstung von Wasser durch das Ablöschen von enthaltenem ungelöschtem Kalk und die Bildung von Hydratphasen möglich. So ergeben sich je nach Randbedingungen unterschiedliche Möglichkeiten, wie sich die Verdichtungskurve im Vergleich zur Kurve des Ausgangsbodens verhält (siehe Bild 44). Wird zwischen Mischung und Verdichtung auch eine Reaktionszeit gewährt, so kommen auch Einflüsse aus der Erhärtung der Aggregate hinzu.

Flugasche ist nach ihrer Zusammensetzung grundsätzlich einzuteilen in kieselsäurereiche oder kalk-

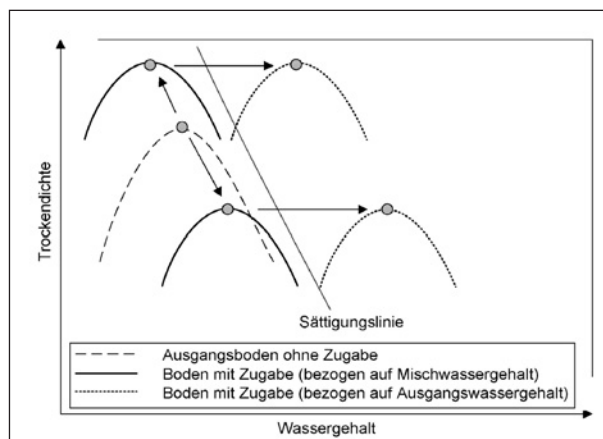


Bild 44: Änderung des Verdichtungsverhaltens durch Zugabe von Braunkohlenflugasche (ohne Reaktionszeit)

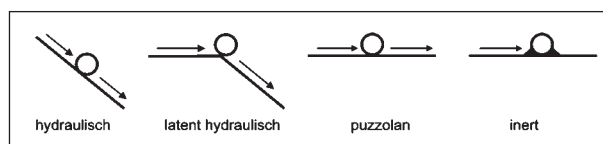


Bild 45: Charakterisierung von Bindemitteln (aus THIENEL [150])

reiche Flugasche. Während die kieselsäurereiche Asche keine selbstverfestigende Eigenschaften aufweist, ist die kalkreiche Flugasche in der Regel auch zur hydraulischen Erhärtung fähig (vgl. Bild 45). Flugasche wird in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung aufgrund ihrer Eigenschaften auch als Zusatzstoff in der Betonherstellung eingesetzt (BENEDIX [14]).

Braunkohlenflugasche wird in der Betontechnologie als latent hydraulisches Bindemittel mit puzzolanischen Eigenschaften eingestuft. Gemäß M KNP [54] erhärten Braunkohlenflugaschen aus dem Rheinland und aus Mitteldeutschland aufgrund ihrer Zusammensetzung (hoher Anteil an reaktionsfähigem Kalk, Anteile an gebranntem Kalk) selbstständig. Bei Braunkohlenflugaschen aus dem Lausitzer Revier ist in der Regel die Aktivierung mittels Kalk (CaO) erforderlich.

Ab einem Kalkanteil von 5 M.-% (reaktionsfähiger Kalk) wird die Asche gem. DIN EN 14227-4 [46] als kalkreich bezeichnet. Bei Werten darunter werden ihr hauptsächlich puzzolanische Eigenschaften zugeschrieben. Aus verständlichen Gründen kann die Verfestigung nur dann stattfinden, wenn die dafür erforderlichen Reaktionspartner in der Flugasche vorhanden sind. Daher werden auch noch andere Anforderungen an die Zusammensetzung der Asche definiert (z. B. Anteil an SiO₂, siehe KNOB-

LAUCH & SCHNEIDER [93] oder TL BuB E-StB [57]).

Dass der zeitliche Verlauf und das Ausmaß der Verfestigungsreaktion der Flugaschen (ohne Mischung mit Boden) trotz ähnlich zusammengesetzter Flugaschen sehr unterschiedlich sein kann, zeigen zum Beispiel Untersuchungen von WHITE et al. [162].

Sofortreaktion

BALLMANN et al. [9] definieren drei Abschnitte für die Sofortreaktion des Bodens auf die Zumischung von Flugasche. So führt erstens eine Vergrößerung der Oberfläche durch Einmischen der feinen Flugasche zu einem erhöhten Wasserbedarf (im Vergleich zum Boden ohne Zugabe). Gleichzeitig setzt die Umwandlung von CaO in Kalkhydrat ein. Zweitens ändert sich die Bodenstruktur durch Krümelbildung und im dritten Abschnitt erfolgen der Ionenaustausch und die Verfestigungsreaktion. Die Verfestigungsreaktion wird durch die Verdichtung nicht unterbrochen.

Nach dem Einmischen der Flugasche in den Boden beginnen also einerseits die Umwandlung des gegebenenfalls enthaltenen Kalziumoxides in Kalkhydrat (chemische Bindung und Verdunstung von Wasser) und andererseits der Feuchtigkeitsaustausch zwischen trockener Flugasche und feuchtem Boden. Die sofortige Wassergehaltsreduktion (Wassergehalt des Ausgangsboden abzüglich des Wassergehaltes der Mischung) entspricht also nicht der reinen Massebilanz zwischen Wasser und Feststoff, es wird darüber hinaus in der Hydratationsreaktion auch Wasser chemisch gebunden (vgl. WHITE et al. [162]). Durch die Mischung ändern sich wie bei der Zumischung von Kalk die Plastizitätseigenschaften des Bodens, der Plastizitätsindex wird in der Regel im Vergleich zum Boden geringer (vgl. ISMAIEL [85]; VUKIĆEVIĆ et al. [159]; NALBANTOĞLU [117]). Nicht geklärt ist, inwieweit dieser Effekt einem Kationenaustausch an der Mineraloberfläche und/oder der Änderung der Zusammensetzung (Zugabe einer feinen Fraktion zum Boden) zuzuschreiben ist. Wahrscheinlich ist es eine Mischung aus beidem. Es ist möglich, in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Flugasche, relativ schnell eine Verfestigung zu beobachten (zum Beispiel MISRA et al. [112]). Die chemische Verbindung (Verfestigungsreaktion) der Minerale könnte mit ein Grund für die Zeitabhängigkeit der Änderung Plastizitätseigenschaften, wie sie von WHITE et al. [162] beschrieben wird (sinkende Plastizität mit steigender Reaktionszeit), sein.

Die Reaktionszeit zwischen Mischung und Verdichtung ist nun eine Möglichkeit, die Verarbeitbarkeit des Materials bei konstanter Zugabemenge zu beeinflussen. Je länger die Reaktionszeit zwischen Mischung und Verdichtung, desto höhere Wassergehalte können verarbeitet werden. Je weiter die Verfestigung vor Verdichtung aber fortgeschritten ist, desto mehr Energie muss bei der Verdichtung für die plastische Verformung der Krümel und Aggregate aufgebracht werden (vgl. MACKIEWICZ & FERGUSON [100]). Bei der Bodenverbesserung mit Flugasche gilt es, das Optimum zwischen zulässigem Wassergehalt und erreichbarer Trockendichte, zulässigem Luftporenanteil sowie Tragfähigkeit zu erreichen. Je mehr Aushärtungszeit gewährt wird, desto geringer wird die erreichbare Trockendichte und desto geringer wird auch die Endfestigkeit und Endtragfähigkeit (vgl. LINEMANN [98], WHITE et al. [162], BALLMANN et al. [9]). Bei sofortiger Verdichtung ergeben sich durch die dichtere Lagerung des Bodens (viele Berührungsflächen, kurze Lösungswege) auch bessere Randbedingungen für die Verfestigungsreaktion (BALLMANN et al. [9]).

Einflüsse auf die Entwicklung in der Anfangsphase

Bei der Bodenverbesserung mit Braunkohlenflugasche wird trockene Flugasche in den feuchten Boden eingemischt, und es erfolgt ein Feuchtigkeitsaustausch. Die erreichbare Wassergehaltsreduzierung hängt somit direkt mit der zugegebenen Menge an Asche zusammen. Das Gemisch entwickelt aber aufgrund der möglicherweise schnellen Verfestigungsreaktion eine Verdichtungscharakteristik, die stark von jener des Ausgangsmaterials abweichen kann. Die Verfestigungsreaktion des Gemisches ist einerseits durch die Eigenschaften der Flugasche, andererseits durch Eigenschaften des Bodens und der Randbedingungen (Mischerfolg, Temperatur etc.) beeinflusst.

a) pH-Wert und organische Bestandteile

Organische Bestandteile im zu verbessernden Boden wirken sich auf die Verfestigungsreaktion negativ aus. Sie bewirken einen niedrigen pH-Wert der Porenlösung und reagieren mit dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ der Flugasche durch Bildung von nicht löslichen Verbindungen. Dies hat (bei Vorhandensein von ausreichend Kalziumhydroxid) zumindest eine Verzögerung der Verhärtung zur Folge (JANZ & JOHANSSON [86]). Eine Verzögerung der Erhärtung zwischen Mischung und Verdichtung ist unter Berücksichtigung

sichtigung der mit einer Aushärtung der Aggregate vor Verdichtung einhergehenden Begleiterscheinungen (s. o.) nicht zwangsweise von Nachteil.

Die chemischen Hintergründe der gehemmten Verfestigungsreaktion von flugaschebehandelten, organischen Böden wurden anschaulich von TASTAN et al. in [146] zusammengefasst dargestellt.

b) Menge und Eigenschaften der Asche, Reaktionszeit

Leider werden in der Literatur die Verdichtungseigenschaften grundsätzlich nicht auf den Wassergehalt des Bodens vor der Verbesserungsmaßnahme bezogen, sondern auf den reduzierten Wassergehalt des Gemisches. So ist es nicht möglich, Angaben über Verbesserung der Verarbeitbarkeit zu entnehmen.

Die Menge der zugegebenen Flugasche und der Anteil an freiem Kalk (in Form von CaO) beeinflussen, wie oben beschrieben, direkt den Wassergehalt des entstehenden Gemisches. Über den Einfluss der Zugabemenge auf die Lage der Proctorkurve des Gemisches (bezogen auf den reduzierten Wassergehalt) wird in der Literatur unterschiedliches berichtet:

- steigende Trockendichten bei steigender Zugabemenge, optimaler Wassergehalt des Gemisches ebenfalls bei steigender Zugabemenge zunehmend auf der trockenen Seite des optimalen Wassergehaltes des Ausgangsbodens (vgl. GE et al. [74] – sofortige Verdichtung ohne Reaktionszeit),
- höhere Trockendichte der Gemische und optimaler Wassergehalt leicht auf der nassen Seite des optimalen Wassergehaltes des Ausgangsbodens unabhängig von der Zugabemenge etwa konstant (vgl. BALLMANN et al. [9] – ohne Reaktionszeit zwischen Mischung und Verdichtung),
- sinkende Trockendichten bzw. sinkende und bei weiterer Zugabe wieder steigende Trockendichten bei steigender Zugabemenge, mit optimalem Wassergehalt des Gemisches auf der nassen Seite des Optimums des Ausgangsbodens (vgl. ISMAIEL [85] – Verdichtung nach 2 Stunden Reaktionszeit) und
- sinkende Trockendichten und steigende optimale Wassergehalte der Gemische bei steigender Zugabemenge an Flugasche (vgl. VUKIĆEVIĆ

et al. [159] – Verdichtung ohne Verzögerung nach dem Einmischen; SEZER et al. [136] – ohne Angabe zur Reaktionszeit; KOLIAS et al. [95] – 24 Stunden Reaktionszeit zwischen Mischung und Verdichtung, BALLMANN et al. [9] – 24 Stunden Reaktionszeit).

Aus dieser Zusammenstellung bietet sich folgende Deutung an: Bei sofortiger Verdichtung spielt die Verfestigungsreaktion noch keine maßgebliche Rolle. Das bei einer ideal homogenen Einmischung von Braunkohlenflugasche und Boden entstehende Korngemisch (Veränderung der Kornverteilung) weist eine eigene, vom Ausgangsboden abweichende, Verdichtungscharakteristik auf (vgl. BALLMANN et al. [9]). Für diese ist neben den Eigenschaften des Bodens auch die Menge, Kornverteilung und Korndichte der Flugasche entscheidend. Gleichzeitig ist der Anteil an freiem Kalk in der Flugasche von Bedeutung, da beim Kontakt mit Wasser und der Umwandlung von CaO in Kalziumhydroxid, wie bereits beschrieben, Wasser chemisch gebunden und verdampft wird und die Bodeneigenschaften geändert werden. Da bei der Bodenverbesserung eines weichen Bodens in der Praxis nicht mit einer ideal homogenen Mischung gerechnet werden kann, entscheidet der Mischerfolg zwischen Boden und Flugasche darüber, wie weit sich die Verdichtungseigenschaften des Gemisches gegenüber den getrennten Eigenschaften des Ausgangsbodens und der Flugasche durchsetzen können. Es ist nicht anzunehmen, dass eine ideal homogene Mischung einen analogen Zusammenhang zwischen Trockendichte und Wassergehalt liefert als ein Gemisch aus nur am Rande mit Flugasche umgebenen Aggregaten (unterschiedlicher Größe).

Mit steigender Reaktionszeit und Verfestigung der durch die Mischung entstandenen Bodenkrümel (unabhängig davon, ob ideal homogene oder nicht ideal homogene Mischung) muss in weiterer Folge die erzielbare Trockendichte sinken, da ein Teil der Verdichtungsenergie beim Aufbrechen der bereits zementierten Teilchenverbindungen umgewandelt wird und nicht für Verdichtung zur Verfügung steht (vgl. MACKIEWICZ & FERGUSON [100]).

Nach JANZ & JOHANSSON [86] sind für die Reaktivität einer Flugasche unterschiedliche Faktoren ausschlaggebend. Einerseits bestimmt das Verhältnis CaO/SiO₂ die Hydraulizität des Bindemittels. Andererseits ist die Feinheit der Flugasche (spezifische Oberfläche) ein ausschlaggebender Faktor für die Reaktivität sowie die Form, in der die Hydraulie-

faktoren (Silizium, Aluminium etc.) darin vorliegen. Wurde die Asche bei hohen Temperaturen gewonnen und schnell abgekühlt, so liegen die Flugaschepartikel eher in amorpher Form vor und sind so reaktiver als solche, die aufgrund langsamerer Auskühlung auskristallisieren konnten.

c) Bodenart

Da der in der Flugasche enthaltene Freikalk (CaO) nach Umwandlung in Kalkhydrat und nach Dissoziation in der Porenlösung am Kationenaustausch der Bodenminerale teilhaben kann, sind einerseits ähnliche Effekte wie bei der Bodenverbesserung mit gebranntem Kalk zu erwarten (siehe Kapitel 3.3.3; Böden mit hoher Kationenaustauschfähigkeit weisen größeres Potenzial zu Änderungen auf als Böden geringer Kationenaustauschfähigkeit). Es darf aber andererseits nicht vergessen werden, dass bei der Verbesserungsmaßnahme Braunkohlenflugasche in nicht zu vernachlässigenden Mengen eingemischt werden und dies die Plastizitätseigenschaften allein durch Änderung des Korngefüges (die der Flugasche eigene Plastizität) beeinflusst. Beide Effekte überlagern sich.

Die Angaben der Literatur bestätigen diese Überlegungen. So wird tendenziell über ähnliches Verhalten wie bei der Kalkverbesserung berichtet. Mittel- bzw. ausgeprägt plastische Tone und ausgeprägt plastische Schluffe (Böden, deren Wasserbindfähigkeit an der Mineraloberfläche wichtig für die Eigenschaften ist) liefern mit steigender Zugabemenge tendenziell sinkende Fließgrenzen, steigende Ausrollgrenzen und somit eine sinkende Plastizität. Demgegenüber weisen leicht plastische Tone und organische Schluffe bei steigender Zugabemenge gleichbleibende bis leicht steigende Fließgrenzen und tendenziell steigende Ausrollgrenzen und in Summe sinkende Plastizitätszahlen, auf (vgl. VUKIĆEVIĆ et al. [159], ISMAIEL [85] und NALBANTOĞLU [117]).

d) Nachbehandlung (vor Verdichtung)

Die Verfestigungsreaktion weist, wie bei einer chemischen Reaktion grundsätzlich zu erwarten, unterschiedliche Abhängigkeiten bezogen auf die Lagerungsbedingungen auf. Versuche zum Einfluss der unterschiedlichen Lagerung wurden zum Beispiel von WHITE et al. [162] durchgeführt. Diese beziehen sich zwar auf bereits verdichtete Proben, die Abhängigkeit der Festigkeitsentwicklung von der Lagerungstemperatur ist eingeschränkt allerdings

auch auf die Reaktionszeit vor Verdichtung übertragbar. MISRA et al. [112] stellten anhand des Vergleiches von Proben nach 7 und 28 Tagen folgende Reihung der Probelagerung nach fallender Festigkeit fest: 38 °C und Lagerung im verschlossenen Plastiksack > 80 % relative Luftfeuchtigkeit und 27 °C > Lagerung an der Luft.

Erfahrungen aus der Praxis

Obwohl die Bodenbehandlung mit Kohlenflugasche auch in Deutschland bereits seit geraumer Zeit bekannt ist und auch immer wieder zur Ausführung gelangt, werden Erfahrungen aus der Praxis selten veröffentlicht. Gleichzeitig gewinnt das Thema weltweit an Beachtung. So zeichnet sich vor allem im letzten Jahrzehnt immerhin in der wissenschaftlichen Literatur das international wachsende Interesse an der Verwendung von Flugasche für die Bodenverbesserung deutlich ab.

MIERTSCHINK & BUNZEL [110] berichten über die Verbesserung von Bodenausbruchmaterial bei der Herstellung des City-Tunnels Leipzig mit einer kalkreichen Flugasche. Der maschinelle Vortrieb erfolgte flüssigkeitsgestützt (Hydroschild). Nach Abtrennung der Stützflüssigkeit lag das Bodenmaterial (Lockergestein unterschiedlicher Körnungen; Maximumkorn bis etwa 63 mm), vor allem aber das Material aus den feineren erbohrten Schichten mit zu hohen Wassergehalten vor. Die Einmischung der Asche erfolgte vor Ort über eine dafür vor Ort einggerichtete Mischanlage in angepassten Mengenverhältnissen. Obwohl das behandelte Tunnelausbruchmaterial einer Deponie zugeführt wurde, konnten durch die Maßnahme doch die grundlegenden Anforderungen des Erdbaus an ein Material gewährleistet werden: die Handhabung und Verdichtbarkeit. Entsprechend positiv fällt die abschließende Beurteilung aus technischer und wirtschaftlicher Sicht im Bericht aus.

3.3.5 Mechanische Bodenverbesserung mit Recyclingmaterial

Allgemeines und Wirkungsweise

Über die Wirkungsweise von Recyclingmaterial zur Bodenverbesserung weicher, feinkörniger Böden ist derzeit wenig bekannt. Erfahrungen am Zentrum Geotechnik der TU München und ein Bericht über eine Baumaßnahme (MIFKA & THELEN [111]) legen aber nahe, dass ein Unterschied zur herkömmlichen mechanischen Bodenverbesserung besteht.

Unter mechanischer Bodenverbesserung wird die Veränderung der Kornverteilung und/oder des Wassergehaltes eines Bodens, durch Zugabe von grobem oder feinem Material, mit dem Ziel der Verbesserung des Tragverhaltens und der Verdichtbarkeit des Gemisches verstanden. Bis zu einem Feinkorngehalt ($< 0,063$ mm) von zwischen 30 M.-% und 40 M.-% des Trockengewichtes schwimmen die groben Körner in der feinkörnigen Matrix und erst ab einem Feinkorngehalt von 15 M.-% bis 25 M.-% werden eingetragene Lasten über das Grobkorngerüst abgetragen (vgl. OSTERMAYER [119])¹⁷.

Wie bei der herkömmlichen mechanischen Bodenverbesserung mit natürlichen Körnungen kann auch bei der Bodenverbesserung mit RC-Körnungen davon ausgegangen werden, dass Zugabemenge, Wassergehalt und Sieblinie des Zugabematerials sowie der Mischerfolg einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Bodenverbesserung hat. Aufgrund der Eigenschaften von RC-Körnungen (Porosität) ist es jedoch genau genommen zusätzlich zu erwarten, dass ein Feuchtigkeitsaustausch zwischen Boden und Recyclingkörnung stattfindet und so das Verdichtungsverhalten zusätzlich beeinflusst wird (MIFKA & THELEN [111]).

Erfahrungen in der Praxis

Ist die Verwendung von RC-Baustoffen im Straßenoberbau noch Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen, so ist im deutschsprachigen Raum über deren Verwendung bei der mechanischen Bodenverbesserung im Erdbau nur wenig bekannt. Auch international fand dieses Thema bis heute wenig Beachtung. Lediglich MIFKA & THELEN [111] liefern einen Erfahrungsbericht zu einer Baumaßnahme bei Koblenz. Sie berichten darin über die Verbesserung eines Sand-Schluff-Gemisches mittels Zugabe von RC-Beton (16/32 mm). Ziel der Maßnahme war eigentlich die herkömmliche mechanische Bodenverbesserung im Sinne einer Optimierung der Körnungsverteilung. Zusätzlich wurde dabei aber beobachtet, dass durch die Zumischung des porösen Recycling-Baustoffes der zu verbessernde Boden auch bei höheren Wassergehalten, allerdings bei niedrigerer Trockendichte, verdichtet

werden konnte. Letztlich wurde bei dieser Maßnahme in einer stationären Mischanlage der Ausgangsboden (nasse Seite der Proctorkurve) mit 20 bis 30 M.-% RC-Beton (16/32 mm) vermischt und dadurch die Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit maßgeblich verbessert. Etwa 40.000 Tonnen dieses Dammbaustoffes wurden auf diese Weise erfolgreich hergestellt und eingebaut.

3.3.6 Maschinentechnische Entwässerung¹⁸

Allgemeines

Im Rahmen der Literaturrecherche war festzustellen, dass das Innovationspotenzial der Firmen derzeit im Bereich der Feinstseparation im Nanometerbereich für Biotechnologie und Pharmaindustrie zu finden ist. Im Bereich der Rohstoffindustrie sind in den letzten Jahren kaum neue Verfahren entwickelt worden bzw. sind kaum Veröffentlichungen zu diesem Thema zu finden.

Mechanische Verfahren

Die geeigneten mechanischen Verfahren beruhen im Wesentlichen auf den Prinzipien der Sedimentation und der Filtration (HESS [82]). Dabei entwässern mechanische Entwässerungseinrichtungen wie Zentrifugen, Kammerfilterpressen, Siebbandpressen und Schneckenpressen den Schlamm vor einer weiteren Nachbehandlung bzw. Verwertung. Im Folgenden wird auf die für feinkörnige Böden möglichen Entwässerungsverfahren und Apparate näher eingegangen.

a) Sedimentationsverfahren

Bei den sedimentierenden Verfahren vollzieht sich die Trennung aufgrund des Dichteunterschiedes von Feststoff und Flüssigkeit im Erdschwere- oder Zentrifugalfeld bzw. aufgrund magnetischer oder elektrischer Eigenschaften des Feststoffes in einem Magnet- bzw. elektrischen Feld.

Die Sedimentationsverfahren lassen sich durch die entgegengesetzt gerichtete Bewegung von Feststoff und Flüssigkeit charakterisieren. Die Effektivität der Trennung wird durch die Stärke des Kraftfeldes, die Höhe des Dichteunterschiedes von Feststoff und Flüssigkeit sowie der Partikelgröße und der Viskosität der Flüssigkeit bestimmt.

Durch Sedimentation kann die Flüssigkeit bis zu jenem Grad abgetrennt werden, bis zu dem sich das

¹⁷ Dieser Ansatz spiegelt sich grob auch in der Bodeneinteilung nach DIN 18196 wider.

¹⁸ Bearbeitung durch das iTN Zittau.

Hohlraumvolumen zwischen den abgeschiedenen Feststoffpartikeln vermindern lässt. Eine weitere Reduzierung der Zwischenraumflüssigkeit in den Poren des Haufwerks lässt sich damit nicht realisieren.

Sedimentationsverfahren werden dort filtrierenden Verfahren vorgezogen, wo sich sehr dichte, undurchlässige Ablagerungen bilden, deren hoher Durchströmungswiderstand eine Filtration unmöglich macht (HESS [82]).

Geeignete Geräte für die mechanische Entwässerung von Bodensuspensionen, basierend auf dem sedimentierenden Verfahren im Zentrifugalfeld, sind Vollmantel-Schneckenzenrifugen. Hier wären u. a. die Dekanter der Fa. Flottweg zu nennen, welche es in verschiedenen Baugrößen für den Einsatz im Technikum bis zur industriellen Großproduktion gibt.

Über den Zulauf kann das zu verarbeitende Trennmedium zentral in den Einlaufraum der Schnecke gelangen und schonend beschleunigt werden. Über Austragsbuchsen (Öffnungen am konischen Ende der Trommel) schleudert der Dekanter die geförderten Feststoffe ab. Das Trennmedium erreicht in der Dekantertrommel die maximale Drehzahl und bewirkt, dass sich die Feststoffe an der Trommelinnenwand absetzen. Kennzeichnend für die Trommel ist ihre zylindrisch-konische Form. Die Schnecke bildet das Förderwerkzeug einer Dekanterzentrifuge. Sie dreht sich mit einer Differenzdrehzahl (in Bezug auf die Trommel) und fördert die abgesetzten Feststoffe in Richtung des konisch verengten Trommelendes. Die geklärte Flüssigkeit fließt zum zylindrischen Trommelende der Dekanterzentrifuge und läuft dort über Öffnungen im Trommeldeckel ab. In diesen Öffnungen befinden sich exakt einstellbare Wehrscheiben/Wehrplatten, mit denen sich die Teichtiefe in der Trommel einstellen lässt. Die geklärte Flüssigkeit läuft drucklos ins Ablaufgehäuse der Zentrifuge ab (siehe z. B.: FLOTTWEG Separation Technology [71]).

b) Filtrationsverfahren

Filterverfahren werden sowohl nach der Art der Feststoffabscheidung in kuchenbildende Filtration, Querstromfiltration und Tiefenfiltration unterschieden als auch nach der Art des treibenden Potentials für die Trennung in Vakuumfilter, Pressfilter, Überdruckfilter sowie Zentrifugalfilter. Allen Prozessen gleich ist der Einsatz eines Filtermittels, wel-

ches nur für die Flüssigkeit aber nicht für den feuchten Feststoff durchlässig ist. Verfahren der Querstromfiltration werden häufig im Bereich der Mikro- und Ultrafiltration genutzt, wohingegen die Tiefenfiltration ein typisches Verfahren zur Klärung von sehr feinkörnigen Suspensionen mit kleiner Feststoffkonzentration darstellt, beide sollen deshalb an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden.

Für eine Entwässerung von Böden ist als treibendes Potenzial die Druckkraft am besten geeignet, hier kann in der Gasphase über der Suspension ein gegenüber der Atmosphäre frei einstellbarer Überdruck (ca. 10 – 20 bar üblich) gewählt werden. Die abzutrennende Flüssigkeit wird durch ein poröses Filtermedium abgeführt und die noch zwischen den Feststoffteilchen befindliche Flüssigkeit kann unter der Wirkung eines treibenden Potentials durch ein anderes Fluid (in der Regel Luft) verdrängt werden. Dadurch ist bei den filtrierenden Verfahren gegenüber der Sedimentation eine weitergehende Entfeuchtung durch teilweise Verdrängung möglich. Die Bewegung von Feststoff und Flüssigkeit erfolgt bei der Filtration in die gleiche Richtung (HESS [82]).

Kammerfilterpressen sind für die Entwässerung feinkörniger Böden (z. B. Kaolin) sehr verbreitet. Die Produktübersicht reicht auch hier von Kleinstanlagen für das Technikum bis hin zu Anlagen mit 20.000 l Fassungsvermögen. Mobile Anlagen werden ebenfalls angeboten, so zum Beispiel von der Fa. MSE die Mobile-Membran-Kammerfilterpresse (3.000 Liter).

Filterpressen sind diskontinuierlich arbeitende Druckfilter zur Fest-Flüssig-Trennung von Suspensionen. Als Apparate zur Kuchenfiltration besitzen sie ein durch Filterplatten gebildetes Filterpaket in einem Gestell, das zwischen einem festen Deckel und einem beweglichen Deckel angeordnet ist. Zwischen den einzelnen Filterplatten befinden sich Filtermittel (Gewebe oder Membrane). Über eine hydraulische Anpressvorrichtung, die in der Brücke integriert ist und auf den beweglichen Deckel wirkt, wird das Filterpaket angepresst. Die Anpressdrücke liegen zwischen 250 und 600 bar. Durch diese hohen Drücke wird die Dichtigkeit des Filterpakets gewährleistet. Die Verrohrung für die Zuleitungen der Suspension ist im festen Deckel integriert. Die Durchlassöffnung für die Suspension innerhalb des Filterpakets befindet sich in der Mitte der Filterplatten. In den Filterkammern wird mittels einer Pumpe die Suspension mit 10 – 20 bar gegen die Filter-

tücher gepumpt. Die Flüssigkeit passiert das Filtermittel und verlässt die Presse über Ablaufkanäle. Die festen Teile der Suspension bleiben am Filtermittel zurück und bilden den Filterkuchen. Nach Beendigung des Filtrationszyklus wird die Presse geöffnet und der Kuchen entnommen. Soweit die Presse dies nicht automatisch erledigt (selbstreinigende Kammerfilterpresse), wird der Druck dazu langsam abgelassen, die Filterpresse geöffnet und der Kuchen von den Filtertüchern manuell entfernt.

3.3.7 Thermische Entwässerung¹⁹

Allgemeines

Als thermisches Trennverfahren sind alle Trennverfahren zu bezeichnen, die auf der Einstellung eines thermodynamischen Phasengleichgewichtes beruhen. Die Trocknung ist eins der häufigsten thermischen Trennverfahren. Dabei stellt sich ein Verteilungsgleichgewicht zwischen einer Flüssigkeit im Kontakt mit einem Feststoff und in der Gasphase ein (DIALER et al. [33]).

Unter Trocknung versteht man also den Entzug von Flüssigkeiten aus dem Trockengut durch Verdunstung bzw. Verdampfung, eine in der Regel thermisch-physikalische Phasenumwandlung der Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand. Thermische Verfahren werden nach der Art der Wärmezufuhr (Konvektion, Kontakt, Strahlung) eingeteilt.

Mithilfe thermischer Verfahren lässt sich in Abhängigkeit von der Methode eine vollständige bzw. nahezu vollständige Trennung von Feststoff und Flüssigkeit realisieren. Da diese Verfahren jedoch sehr energieintensiv sind, ist es wirtschaftlich unter Umständen sinnvoll, bei Ausgangsmaterialien mit hohen Wassergehalten eine mechanische Entwässerung vorzuschalten.

In der Praxis werden vor allem bei der Klärschlamm-trocknung sowie bei der Trocknung von Baggergut diese genannten Verfahren angewendet, aber auch bei der Trocknung von Rohbraunkohle für die Beheizung von Kraftwerken fallen große Massenströme an, bei denen eine Wassergehaltsreduzierung erfolgen muss. Dabei werden meist, in Abhängigkeit von dem benötigten Endwassergehalt, mehrere Verfahren miteinander kombiniert, um bei einem

optimalen Energieverbrauch die notwendigen Werte zu erreichen. So kommen in Klärwerken bspw. Schlamm-trocknungslinien zum Einsatz, bei denen der anfallende Schlammstrom durch Zentrifugen oder Siebbandpressen entwässert wird. Nach der Entwässerung verfügt der Schlamm über einen typischen Trockensubstanzgehalt von ungefähr 20 bis 30 Masseprozent, welcher sehr gut für eine nachfolgende Wärmebehandlung geeignet ist.

Konvektive Trocknung

Bei konvektiven Trocknungsverfahren wird die erforderliche thermische Energie durch einen Gasstrom zugeführt. Dieser ist in den meisten Fällen Umgebungsluft, die durch Brenner oder Dampfwärmetauscher auf eine möglichst hohe Temperatur gebracht wird. Die Kosten des Verfahrens hängen unmittelbar vom erforderlichen Gasmassenstrom ab, dieser bestimmt die Größe des Trockners und der Peripherie. Je höher die gewählte Gas-Eintrittstemperatur ist, desto kleiner ist der erforderliche Gasmassenstrom. Der Festlegung der Gas-Eintrittstemperatur kommt demzufolge bei der Auslegung des Verfahrens eine zentrale Bedeutung zu. Konvektive Trocknungsverfahren werden häufig für die kontinuierliche Trocknung bei großen Durchsätzen eingesetzt (SCHÖNHERR [133]).

Kontakt-trocknung

Bei der Kontakt-trocknung sind keine großen Luftmengen erforderlich, denn die Wärme wird durch den Kontakt zwischen feuchtem Produkt und einer beheizten Fläche zugeführt. Oft wird nur ein minimaler Schleppegasstrom zum Abtransport des Dampfes vorgesehen. Das bringt im Vergleich zur konvektiven Trocknung den Vorteil, dass der Aufwand zur Abluftreinigung geringer ist. Eine kontinuierliche Fahrweise ist möglich, allerdings ist dieses Verfahren vor allem für einen geringen Durchsatz geeignet (SCHÖNHERR [133]).

Strahlung-trocknung

Das Kennzeichen der Strahlung-trocknung besteht darin, dass dem Feuchtprodukt die zur Trocknung notwendige Wärme über Strahlung zugeführt wird. Allgemein bekannte Beispiele für die Wärmezufuhr durch Strahlung sind die Sonnenstrahlung, elektrisch oder mit Brenngas betriebene Infrarot-Strahler sowie die Mikrowellenstrahlung (SCHÖNHERR [133]).

¹⁹ Bearbeitung durch das iTN Zittau.

Das Trockengut absorbiert die von den Strahlungsquellen emittierte elektromagnetische Strahlung. Die Aufheizung und Verdampfung erfolgt dabei nicht nur an der Oberfläche des Gutes, sondern auch in seinem Innern.

Schaufeltrockner

Nach der mechanischen Entwässerung ist zum Beispiel die weitere Trocknung in einem Schaufeltrockner (basierend auf dem Prinzip der Kontakt-trocknung) möglich. Hier sind verschiedene Firmen auf dem Markt, u. a. Geräte der Firma ANDRITZ Separation. Die ANDRITZ Gouda Schaufeltrockner zeichnen sich durch einstufiges Durchtrocknen aus, welches komplett ohne Rückmischung auskommt. Dieses Verfahren ist sehr gut für zentralisierte Trocknungsanlagen geeignet. Da eine Rückmischung nicht erforderlich ist, kann jede für das Endprodukt nötige Restfeuchte ausgewählt werden. Der ANDRITZ Gouda Schaufeltrockner ist in verschiedenen Größen erhältlich. Die Auswahl reicht dabei von einer Pilotanlage mit 1,5 Quadratmeter Wärmeübertragungsfläche bis zu einem Mega-Prozessor mit 300 Quadratmetern und einer Wasserverdampfungsleistung von sechs Tonnen pro Stunde (ANDRITZ Separation [2]).

Bandtrocknungsanlagen

Eine weitere mögliche Trocknungsart in Verbindung mit einer mechanischen Vorentwässerung stellen Niedertemperatur Bandtrocknungsanlagen (beispielsweise der Fa. STELA) dar. Dabei wird der Boden/Klärschlamm, abhängig vom anstehenden Wassergehalt, auf 20 – 30 % Trockensubstanz-Gehalt vorentwässert und auf einem Extruder in eine Strangform gepresst. Anschließend werden diese Pellets auf einem perforierten Förderband, wo sie ein gut durchlüftetes Haufwerk bilden, in den Trocknertunnel gefahren, von Warmluft durchströmt und dabei getrocknet. Dieses System trocknet ebenfalls in einem Durchlauf bis zur gewünschten Endfeuchte (STELA [142]).

Wirbelschichttrocknung

Das Verfahren der Wirbelschichttrocknung ist ebenso zur Nachtrocknung von sprühgetrockneten bzw. sprühgranulierten, extrudierten oder im Mischer hergestellten Produkten mit hoher Restfeuchte geeignet.

Die Vorteile der Wirbelschichttrocknung bestehen im Trocknen von feuchten Partikeln bei definierten

Temperaturen, um die gewünschte Restfeuchte zu erreichen, bei einer Verdampfung großer Wassermengen in relativ kurzer Zeit. Dieses Verfahren wird u. a. in der Kraftwerkstechnik zur Trocknung der Rohbraunkohle eingesetzt (KLUTZ et al. [92]).

Entwässerung in Trocknungshallen

Die Sonne liefert in unseren Breiten 1.000 bis 1.100 kWh pro m² horizontaler Grundfläche. Rein rechnerisch entspricht dies einem Energieäquivalent von 100 – 110 l Heizöl pro m². Diese Strahlungsenergie bildet den Hauptteil der für die Wasserverdunstung notwendigen Energie (0,682 kWh/kg). Solange die Luft noch Wassermoleküle aufnehmen kann, spricht man von einem Sättigungsdefizit. Das Ziel der solaren Trocknung ist es, möglichst viel der Strahlungsenergie und des Sättigungsdefizits in die Verdunstung von Schlammwasser umzusetzen. Das wird dadurch erreicht, dass erstens die Strahlung möglichst direkt auf die Schlammoberfläche auftritt und zweitens möglichst große Volumina von ungesättigter Luft über die Schlammoberfläche streichen. Die Strahlung wird an der dunklen Oberfläche absorbiert. Dadurch kommt es zum gewünschten Anstieg der Schlammtemperatur und einem Anstieg der Wasserdampfdruckdifferenz zwischen Schlamm und der Umgebungsluft. Die Wassermoleküle in der Luft müssen so schnell wie möglich aus der Trocknungshalle entfernt werden, damit dort im Inneren der partielle Gegendruck nicht zu hoch ansteigt. Das Wasser wird mit der Luft entweder unsichtbar oder als Nebel ins Freie getragen. Die pro Zeiteinheit ausgetragene Wassermenge ist dabei saisonabhängig. Die Grenze der natürlichen Trocknung liegt über 90 % Trockensubstanz. Die natürliche Trocknung ermöglicht in unserem Klima eine jährliche Verdunstung um 800 kg Wasser pro m² Trocknerfläche. Ergänzend werden Verfahren zum Wenden und Vertikutieren des Klärschlammes eingesetzt, um den Trocknungsprozess effizient zu unterstützen (Chemie.de [25]).

Zum Wenden und Vertikutieren sind verschiedene vollautomatische Verfahren auf dem Markt, wie beispielsweise der „Wendewolf“ der IST Anlagen GmbH und die „Elektrischen Schweine“ der Firma Thermo-System Industrie- und Anlagentechnik GmbH.

Weitverbreitet ist der Einsatz thermischer Energie für die massenstromrelevante Trocknung von Klärschlamm, in weitaus geringerem Maße auch von Baggergut, in Trocknungshallen. Hier spielen vor al-

lem wirtschaftliche Faktoren eine Rolle. Während es für den Klärschlamm verschiedene Verwertungsmöglichkeiten gibt, welche eine Trocknung lukrativ machen, wie Einsatz als Energieträger zur Verbrennung oder Vergasung bzw. als Dünger in der Landwirtschaft, wird bisher nur ein geringer Teil der im Wasserbau anfallenden bindigen Böden einer weiteren Nutzung zugeführt (ATV-DVWK-M 362-2 [7]). Demnach stellt die Umlagerung von Baggergut derzeit die wirtschaftlichste Form der Unterbringung dar.

3.4 Eigene Untersuchungen

3.4.1 Verwendung in Sonderlösungen

Während die sich die Anwendungsgrenzen zur direkten Verwendung von zu nassem Bodenmaterial in Kassettenbauweisen oder Geotextilen Schläuchen aus den Randbedingungen des Verfahrens ergeben, wurde eine Kombination aus Sandwich- und Kassettenbauweise auch rechnerisch näher untersucht.

Kassettenbauweise

Wie bereits in Kapitel 3.3.2 beschrieben, wird bei der Kassettenbauweise keine besondere Anforderung an das Material gestellt. Die Standsicherheit wird durch die das Material umschließende Kasette gewährleistet, die Entwässerung durch Konsolidation bestimmt das Ausmaß der Setzung der Oberfläche. Aus technischer Sicht kann in solchen Maßnahmen auch Material mit sehr hohen Wassergehalten untergebracht werden.

Das Verfahren kann wirtschaftlich nur bei Maßnahmen angewendet werden, bei denen das Mengenverhältnis zwischen standfestem Material (zur Erstellung der Kassetten) und weichem Material (zur Ablagerung in den Kassetten) deutlich in Richtung des weichen Materials ausfällt. Dies ist bei flächigen Bauwerken zu erwarten.

Geotextile Schläuche

Für die Befüllung von geotextilen Schläuchen muss das Material in pumpbarer Form vorliegen (siehe Kapitel 3.3.2). Nach der Befüllung entwässert das Material unter Eigengewicht, das Ausmaß der Verformung und die zeitliche Entwicklung hängt dabei maßgeblich von den Bodeneigenschaften ab. Die Wahrung der Schlauchform und Gewährleistung

der inneren Standsicherheit wird vor allem in der Anfangsphase durch das Geotextil gewährleistet.

Da als Grundvoraussetzung das Material in pumpbarer Form vorliegen muss, ist das Verfahren vor allem bei sehr hohen Wassergehalten sinnvoll einsetzbar. Das Material kann entweder im Schlauch verbleiben (direkte Verwendung des Materials in geotextilen Schläuchen) oder das Verfahren wird nur zur Entwässerung eingesetzt (indirekte Verwendung des Materials nach Entwässerung in geotextilen Schläuchen).

Sandwichbauweisen

Hintergrund der Untersuchungen zur Verwendung von feinkörnigem Material in Sandwichbauweisen war der Gedanke, dass diese Art der Verwendung bei Nebenbauwerken kleiner und mittlerer Baustellen möglicherweise die einzig wirtschaftliche Alternative zur Bodenverbesserung mit Bindemitteln oder mechanischen Bodenverbesserung darstellen kann. Die Wirtschaftlichkeit wird auch bei dieser Bauweise maßgeblich bestimmt durch die erforderlichen Mengenverhältnisse zwischen weichem und tragfähigem Boden. Es sollte daher vorerst nur geklärt werden, welche Eigenschaften das weiche Material aufweisen muss, um in dieser Bauweise verwendet werden zu können. Hierzu wurde ein einfaches Modell einer Sandwichbauweise, bei der schichtweise weiches und tragfähiges Material aufgebaut wird, mittels Berechnungen untersucht. Der Aufbau der Sandwichbauweise erfolgt entsprechend der in Bild 46 maßgebenden Phasen.

Einerseits erfolgten Berechnungen für ausgewählte Stoffmodellparameter mit dem Finite-Elemente Programm PLAXIS 2D, Version 2015. Die FE-Berechnungen wurden an einem Versuch im Technikumsmaßstab validiert und mit Ergebnissen aus der Berechnung mit analytischen Verfahren verglichen. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Ergebnisse von numerischer Simulation und analytischen Verfahren wurden die Berechnungen mithilfe der analytischen Verfahren auf ein weiteres Spektrum an Bodenparametern erweitert und vergleichend ausgewertet.

Kernidee der Berechnungen zu den Sonderbauweisen ist die Analyse der verschiedenen Bauphasen. Die erste Phase zur Herstellung der Sonderbauweise beinhaltet das Abladen des weichen bis flüssigen Bodens von einem Dumper oder Radlader (Bild 46, linke Abbildung). Anschließend wird eine Schicht

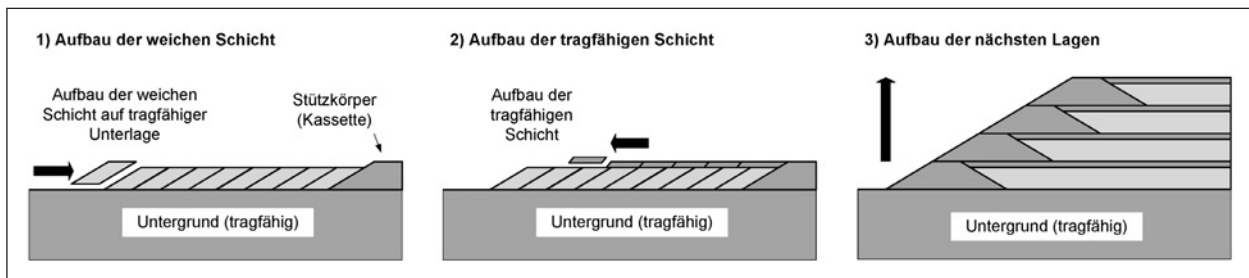


Bild 46: Aufbau der Sandwichbauweise

aus tragfähigerem grob- bzw. gemischtkörnigem Material mit der Hilfe einer Planierraupe mit Kettenfahrwerk über dem weichen bis flüssigen feinkörnigen Boden aufgebaut (Bild 46, mittlere Abbildung). Auf der tragfähigeren Zwischenschicht wird erneut weiches Material aufgebracht. Je nach Standsicherheit, Ziel der Baumaßnahme und wirtschaftlichen Randbedingungen können eine unterschiedliche Anzahl an Schichtpaketen, bestehend jeweils aus einer weichen feinkörnigen Bodenschicht und einem tragfähigeren Material, hergestellt werden (Bild 46, rechte Abbildung).

Aus diesen Bauphasen ergaben sich folgende Einzelmodelle (Lastfälle) zur Untersuchung:

- Befahrbarkeit auf flächiger Tragschicht,
- Befahrbarkeit am Rand der Tragschicht,
- Aufbau der Folgeschicht aus weichem Material und
- Gesamtstandsicherheit.

Eine Recherche zur Beanspruchung aus unterschiedlichen Arbeitsfahrzeugen stellt die Grundlage für die Beurteilung der Tragfähigkeit dar. In einer Internetrecherche wurden Fahrzeug- und Einsatzgewichte sowie die Rad- und Kettendimensionen für die Abschätzung von Kontaktspannungen gesammelt. Für Kettenfahrzeuge ergeben sich Werte zwischen 30 und 150 kN/m², für Radfahrzeuge typischerweise Werte über 100 kN/m².

Für alle Berechnungsmodelle wurden mittels FE-Modellierung analytisch drei modellhafte Böden untersucht, die jeweils einen leicht-, mittel- und ausgeprägt plastischen feinkörnigen Boden ohne signifikante organische Bestandteile wiedergeben. Den Böden wurden typische Eigenschaften zugewiesen; es wurde angenommen, dass Boden W1 eine Fließgrenze von $w_L = 30\%$, der Boden W2 eine Fließgrenze von $w_L = 45\%$ und der Boden W3 eine Fließgrenze von $w_L = 60\%$ hat. Für die zur FE-Berechnung erforderlichen Eingabeparameter wurde

auf Korrelationen aus eigenen Versuchen an solchen Böden und Angaben der Literatur zurückgegriffen.

Auch die Parameter der in den Berechnungen verwendeten grobkörnigen Böden, die gegenüber W1, W2 und W3 eine deutlich höhere Tragfähigkeit und Steifigkeit aufweisen, wurden variiert. Den Böden wurden typische Eigenschaften für grob- bzw. gemischtkörnige Böden zugewiesen (für T1 wurde $c' = 0$ kN/m² und $\varphi' = 30^\circ$ gewählt, für T2 wurde $c' = 5$ kN/m² und $\varphi' = 40^\circ$ unterstellt).

Die Simulation des tragfähigeren Bodens (Böden T1 und T2) erfolgte in der FE-Berechnung mit dem Stoffmodell Hardening Soil [130]. Der weiche feinkörnige Boden wurde mit dem Stoffmodell Soil Creep abgebildet [156]. Die Höhe der tragfähigen Schicht wurde in den Berechnungen von $H = 0,3$ m bis $H = 1,3$ m variiert. Die Schichtdicke des weichen Bodens wurde zur Abbildung der Einzelschichten einheitlich mit $h = 2$ m festgelegt. Zur Wiedergabe unterschiedlicher Konsistenzen des einzubauenden weichen Bodens wurde die undrainierte Scherfestigkeit mit 4 kN/m², 8 kN/m² und 16 kN/m² variiert. Diese Scherfestigkeit wurde direkt als Eingabeparameter des Soft-Soil Creep Modells eingegeben. Die Kettenfahrwerke bzw. Reifen wurden als biegesteife Platten mit einer Breite $B = 0,5$ m und einer Länge $L = 3,5$ m (typisch für Kettenraupen) abgebildet. Durch Definition einer konstanten Setzungsrate im Bereich der Ketten bzw. Reifen wird für die Modelle zur Analyse der Befahrbarkeit das System bis zum Versagen beansprucht.

Das verwendete analytische Verfahren beruht auf dem Verhalten eines Fundamentes auf einem zweischichtigem Untergrund (grobkörniges Material auf weichem Boden) und wurde ausführlich von MEYERHOFF [109] und MEYERHOFF und HANNA [77] beschrieben. Das Versagen des Systems wird durch das Versagen des weichen Bodens nach PRANDTL [124] bestimmt, während im grobkörnigen Material eine gekrümmte Versagensebene an-

genommen wird. Die Gesamttragfähigkeit q_u des Systems kann nicht höher als die Tragfähigkeit des grobkörnigen Bodens q_t sein, die aus den analytischen Formeln nach TERZAGHI [148] oder MEYERHOF ([107] und [108]) berechnet werden kann ($q_u \leq q_t$).

Der Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen an den FEM-Modellen mit den analytischen Ansätzen nach TERZAGHI [148], PRANDTL [124], HANNA & MEYERHOF [77], MEYERHOF [107], [108], [109] und VESIC [157] zeigten für alle Einzelmodelle (Lastfälle) eine gute Übereinstimmung. Eine erste Abschätzung zur Anwendbarkeit des Verfahrens ist also im Allgemeinen über die analytischen Verfahren möglich. Diese Erkenntnis wurde dazu verwendet, den Umfang der für die Berechnungen verwendeten Bodenparameter zu erweitern. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden nachfolgend dargestellt.

Wie bereits erläutert wurde, ist zur Analyse der Sandwichbauweise das Gesamtsystem zunächst entsprechend der Arbeitsschritte, die für den Bau notwendig sind, in einzelne Modelle unterteilt worden. Dabei stellt das Modell „Befahrbarkeit am Rand der Tragschicht“ im Hinblick auf die Herstellung das erste untersuchte Teilmodell dar. Dabei wurde die Tragfähigkeit des Systems errechnet, wenn die Fahrzeuglasten nur am Rand der tragfähigen Schicht wirken (Einschieben der tragfähigen Schicht). Bild 47 zeigt die Situation.

Dass die tragfähige Schicht in diesem Modell auf Seite der Belastung wirkt, schlägt sich in den Ergebnissen in Bild 48 und Bild 49 deutlich nieder. Die Tragfähigkeit des Systems sinkt dabei, je stärker die tragfähige Schicht ausgebildet wird.

Dabei stellt das Modell „Befahrbarkeit auf einer flächigen Tragschicht“ im Hinblick auf die Herstellung das zweite untersuchte Teilmodell dar. In diesem Modell wird die Standsicherheit eines Arbeitsgerätes auf einer fertig gestellten Tragschicht, die durch die Parametervarianten T1 und T2 beschrieben wird, untersucht. Während der Herstellung der Schicht aus tragfähigerem Boden über den weichen feinkörnigen Böden wird das System im Wesentlichen in zwei Dimensionen belastet. Die Wirkung des Fahrzeugs wird mit dem in Bild 50 beschriebenen Modell analysiert. Der Vergleich der FE-Berechnungen mit den analytischen Berechnungen hat gezeigt, dass der Einfluss der benachbarten Belastung auf die zulässige Grenzlast q_{ult} für übliche

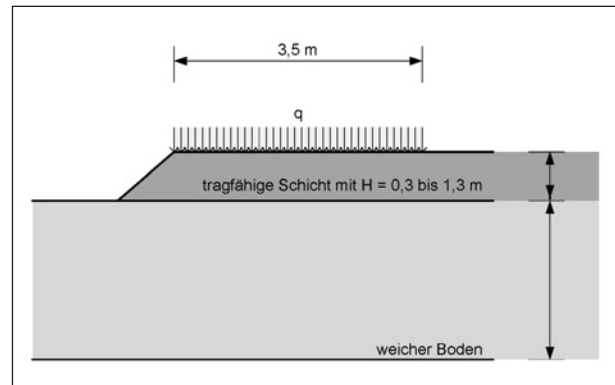


Bild 47: Befahrbarkeit am Rand der Tragschicht

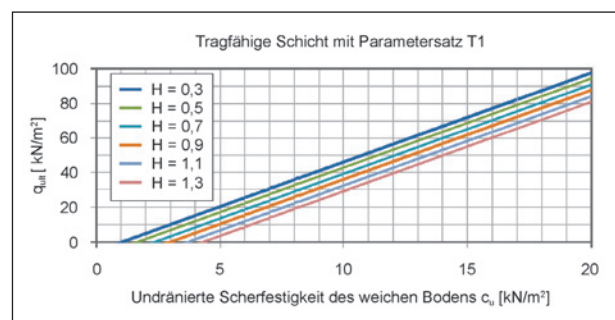


Bild 48: Befahrbarkeit am Rand der Tragschicht (T1); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln

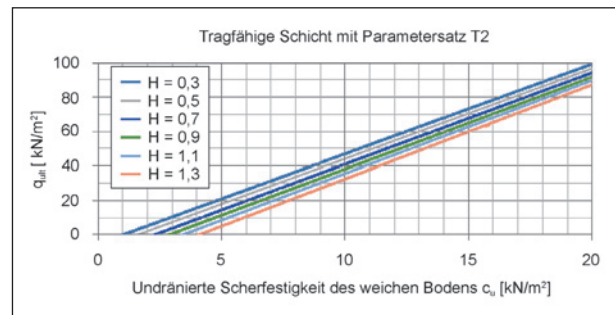


Bild 49: Befahrbarkeit am Rand der Tragschicht (T2); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln

Achsabstände der Baufahrzeuge vernachlässigbar ist.

Aus den Berechnungen zur „Befahrbarkeit auf flächiger Tragschicht“ gemäß Bild 50 ergeben sich die in Bild 51 und Bild 52 dargestellten, zulässigen Belastungen des Systems. Man erkennt, dass auch die bodenmechanischen Eigenschaften und Dicke der tragfähigen Schicht einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamttragfähigkeit q_{ult} [kN/m²] nehmen.

Im nächsten Schritt wird das weiche Material der nächsten Lage auf der fertig gestellten, tragfähigen Schicht zugeliefert. Die in Bild 53 dargestellte Situ-

ation zeigt den untersuchten Lastfall zum Aufbau der Folgeschicht.

Der Versagensmechanismus bildet sich im Allgemeinen zur linken Seite hin aus. Die Böschung des weichen Materials bleibt von der Belastung des Arbeitsfahrzeuges unbeeinflusst, das System muss allerdings die Last des aufgebracht Materials tragen. Ist die untere Sandwichlage dazu nicht in der Lage, so erfolgt ein Versagen alleine durch das Eigengewicht des aufzubringenden weichen Bodens.

Im Lastfall „Aufbau der Folgeschicht (oben)“ wurde jene sich einstellende Grenzlast untersucht, die sich durch das neu aufgebrachte Material auf das

untere System ergibt. Zusätzlich wurde eine zusätzliche Auflast berücksichtigt, die entweder einer Fahrzeuglast oder einer Überschüttung zugeordnet werden kann.

Wie im vorigen Berechnungsschritt ergibt sich auch hier die Möglichkeit des Versagens durch Eigenlast bei undrännierten Scherfestigkeiten des weichen Bodens von weniger als 6 kN/m². Die FE-Berechnungen haben verdeutlicht, dass der Böschungsbruch nur in der oberen weichen Schicht stattfindet, wenn die Tragfähigkeit des Zwischenschichtmaterials sehr viel größer ist als jene des weichen Bodens ($q_t \gg q_w$). Liegen die Tragfähigkeiten der einzelnen

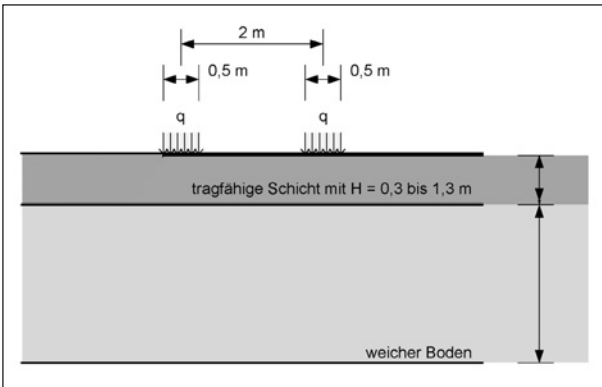


Bild 50: Befahrbarkeit auf flächiger Tragschicht

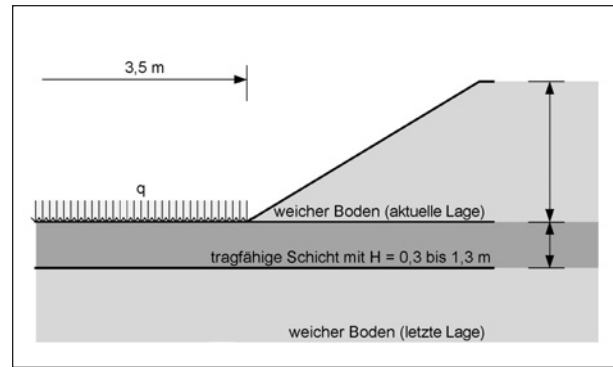


Bild 53: Aufbau der Folgeschicht (unten)

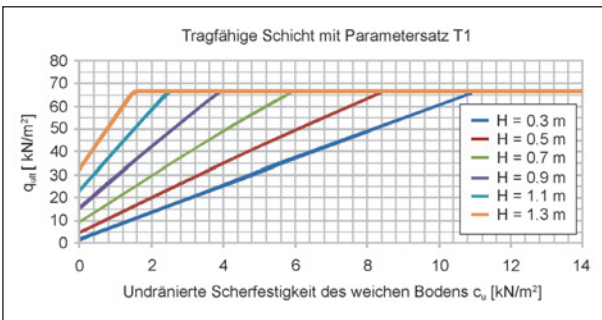


Bild 51: Befahrbarkeit auf flächiger Tragschicht (T1); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln

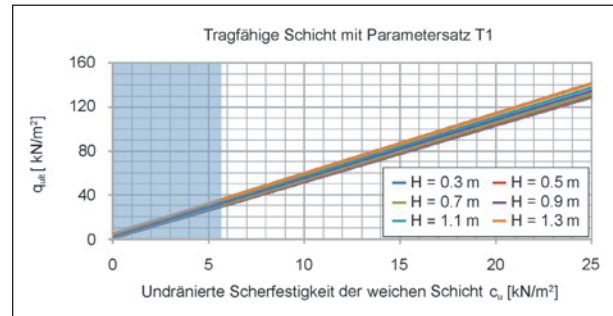


Bild 54: Aufbau der Folgeschicht (unten; T1); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln (blauer Bereich = Versagen durch Eigengewicht der neuen Schicht)

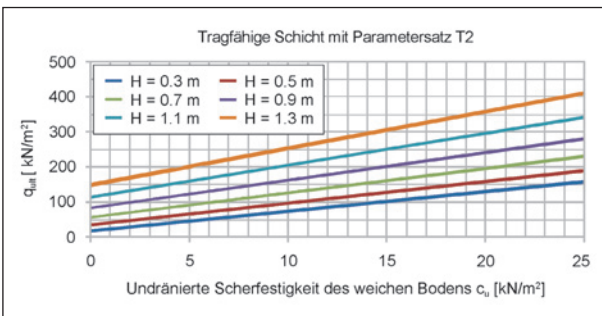


Bild 52: Befahrbarkeit auf flächiger Tragschicht (T2); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln

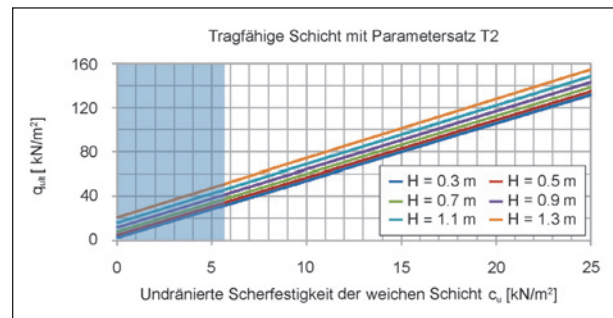


Bild 55: Aufbau der Folgeschicht (unten; T2); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln (blauer Bereich = Versagen durch Eigengewicht der neuen Schicht)

Materialien nahe aneinander ($q_w \leq q_t \leq q_w$), so kann sich ein Geländebruch durch die tragfähige Schicht ausbilden, der in die untere, weiche Schicht greift. Die untere weiche Schicht weist in diesem Modell

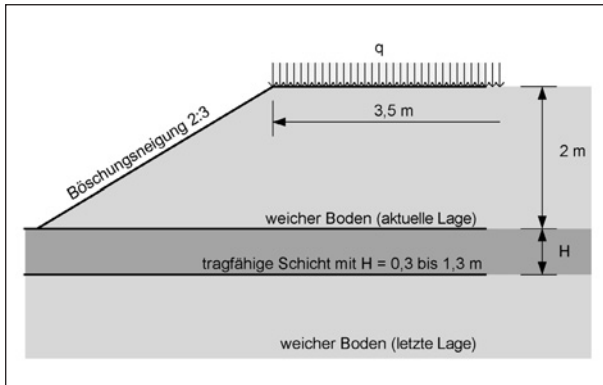


Bild 56: Aufbau der Folgeschicht (oben)

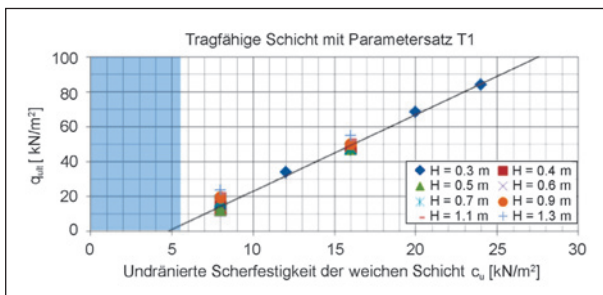


Bild 57: Aufbau der Folgeschicht (oben; T1); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln (blauer Bereich = Versagen durch Eigengewicht der neuen Schicht)

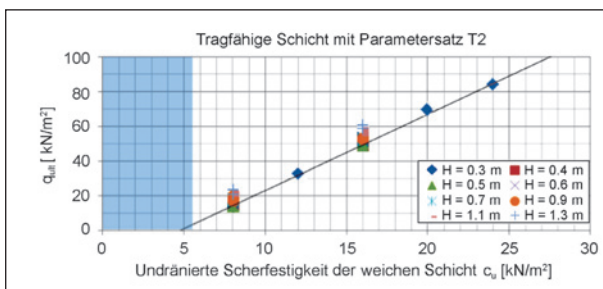


Bild 58: Aufbau der Folgeschicht (oben; T2); Zulässige Belastungen aus den FE-Berechnungen und analytischen Formeln (blauer Bereich = Versagen durch Eigengewicht der neuen Schicht)

die gleichen Eigenschaften auf wie die obere weiche Schicht.

Grundlage der nachfolgenden Berechnungen zur Gesamtstandsicherheit sind Standsicherheitsuntersuchungen, die einen phasenweisen Bauprozess wiedergeben. Es wurden so lange Schichten auf das Böschungssystem aufgebracht, bis Versagen eintrat. Die Untersuchungen beschreiben ausschließlich den ideal undrainierten Fall. Dabei spielen Konsolidationseffekte, die sich etwa durch unterschiedlich rasche Bauphasen ergeben würden, keine Rolle. Die undrainierte Scherfestigkeit wurde in dieser Analyse als Eingabeparameter vorgegeben, so konnte auf eine Variationsrechnung, welche die unterschiedlichen Parametervarianten des weichen Bodens wiedergeben, verzichtet werden. Der Einfluss der Steifigkeit des weichen Bodens auf die Standsicherheit des Systems ist nur von untergeordneter Bedeutung.

Es wurden drei Modelle vergleichend untersucht. Die wesentlichen geometrischen Eigenschaften dieser Modelle sind in Bild 59 dargestellt. Dabei ist die Reihenfolge der Erstellung markiert (Bauphasen). Jede Schicht weist eine Höhe von 2,5 m auf, die Einbauhöhe des weichen Materials je Lage ergibt sich als Differenzbetrag aus dieser Höhe abzüglich der Höhe der tragfähigen Schicht ($H = 0,3$ bis $1,3$ m).

Die Neigung der Böschungen wurde für alle Fälle zu 1 : 2 gewählt, da Voruntersuchungen zeigten, dass bereits bei einer Böschungseigung von 1 : 1,5 die Standsicherheit bereits nach zwei Schichtlagen erschöpft war. Durch breitere Stützkörper aus tragfähigeren Böden – charakterisiert durch die Stoffmodellparametervarianten T1 und T2 kann die Standsicherheit deutlich verbessert werden (Modell B). Ergänzend wurde der Fall untersucht, dass nur der unterste Stützkörper eine Breite der Krone von 4 m aufweist. Die darüber liegenden Stützkörper wurden mit Kronenbreiten von jeweils 2 m abgebildet.

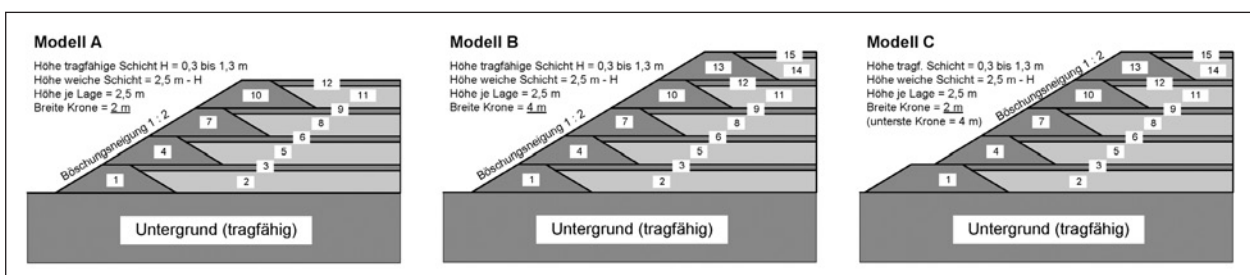


Bild 59: Untersuchung der Gesamtstandsicherheit der beispielhaften Sandwich/Kassettenbauweise

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um die im Bau maximal erreichbare Phase (gemäß der Nummerierung in Bild 59) vor Versagen des Gesamtsystems.

Beurteilung der Ergebnisse

Die Durchführbarkeit des Verfahrens wird durch den ungünstigsten Lastfall bestimmt. Die in den oben dargestellten Diagrammen angegebenen zulässigen Druckspannungen q_{ult} beziehen sich auf den Bruchzustand ohne Anwendung eines Sicher-

		Modell A		Modell B		Modell C	
		T1	T2	T1	T2	T1	T2
Tragf. Schicht H [m]	Weicher Bod. c_u [kN/m ²]	Max. Phase	Max. Phase	Max. Phase	Max. Phase	Max. Phase	Max. Phase
0,3	4	2	2	9	9	2	2
	8	5	6	9	9	5	5
	16	8	9	9	9	8	8
	20	8	9	9	9	8	9
	25	12	12	12	12	12	12
0,5	4	2	2	9	9	2	2
	8	5	8	9	9	5	5
	16	8	9	9	9	8	8
	20	8	9	9	12	8	8
	25	12	12	12	12	12	12
0,7	4	2	6	9	9	2	4
	8	5	8	9	12	6	8
	16	8	9	9	12	9	12
	20	8	9	9	12	9	12
	25	12	12	12	12	12	12
0,9	4	2	8	9	9	2	8
	8	5	8	9	12	8	12
	16	8	12	9	12	12	12
	20	9	12	9	12	12	12
	25	12	12	12	12	12	15
1,1	4	2	8	9	9	2	8
	8	8	9	9	12	8	12
	16	9	9	9	12	12	12
	20	9	12	9	12	12	15
	25	12	12	12	12	12	15
1,3	4	8	9	9	9	9	9
	8	9	12	9	12	12	15
	16	12	12	9	12	12	15
	20	12	2	12	12	12	15
	25	12	6	12	12	12	15

H Höhe der tragfähigen Schicht je Lage (Variation 0,3 bis 1,3 m)

T1, T2 Parameter der tragfähigen Schicht (siehe Abschnitt „Sandwichbauweisen“ in Kapitel 3.4.1)

Max. Phase Maximal erreichbare Phase vor Systemversagen (Nummerierung siehe Bild 59)

Tab. 14: Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen am Gesamtsystem

heitsfaktors und ohne Reduzierung zur Verformungsbeschränkung.

Es kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Machbarkeit des Verfahrens zwar von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst wird (Fahrzeuglasten, Höhenverhältnis der weichen und tragfähigen Schicht und die Eigenschaften dieser Schichten), sich das Verfahren wohl überhaupt erst ab einer undrännierten Scherfestigkeit des weichen Bodens von mindestens 15 bis 25 kN/m² einsetzen lässt. Das wird vor allem deutlich, wenn man die Tragschichtparameter T1 als realistische Parameter für eine nicht bis schlecht verdichtbare Tragschicht ansetzt. Vereinfacht bedeutet das, dass das Verfahren „Sandwichbauweise“ nur im Bereich leicht auf der nassen Seite des Proctoroptimums anwendbar ist.

3.4.2 Bodenverbesserung im Labor

Material

Für die eigenen Untersuchungen zur Bodenverbesserung (Methoden des Erdbaus) wurden unterschiedliche fein- und gemischtkörnige Böden ausgewählt, die als Ausgangsböden im Sinne dieses Kapitels zu verstehen sind. Die nachfolgend vorgestellten Ausgangsböden werden im Bericht anhand ihrer Gruppensymbole gem. DIN 18196 [45] bezeichnet.

Beim untersuchten ausgeprägt plastischen Ton (TA) handelt es sich um einen aus Kemmlitz stammenden Boden, der auch kommerziell vertrieben wird (Tonindustrie, Papierherstellung etc.). Als leicht plastischer Ton (TL) wurde ein der Kieswäsche entstammender, feinkörniger Boden aus einer Anlage

in der Nähe von München gewählt. Die Böden ST* und GU* wurden aus Mischungen anderer Körnungen, die in ausreichendem Umfang und in entsprechend gleichbleibender Qualität am Zentrum Geotechnik vorlagen, gemischt. Die Ergebnisse der Kornverteilungsanalysen nach DIN 18123 [38] sind in Bild 60 dargestellt. In dieser Abbildung ebenfalls enthalten sind Ergebnisse aus Versuchen mittels Laserbeugungsspektrometer am leicht plastischen und am ausgeprägt plastischen Ton.²⁰

Am Anteil < 0,002 mm und der Gesamtprobe der Böden TL und TA wurden Untersuchungen zur mineralogischen Zusammensetzung durchgeführt²². Bei den Ergebnissen zum TL fällt auf, dass vor allem die Minerale Quarz, Dolomit und Kalzit, die in der Gesamtprobe noch große Anteile annehmen und wahrscheinlich die nicht vollständig zersetzten Teile des ursprünglichen Festgesteines²³ darstellen, bei der Analyse des Tonanteils (< 0,002 mm) fehlen (siehe auch Tabelle 15).

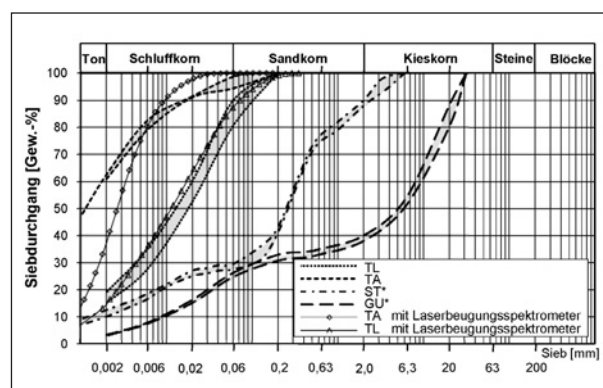


Bild 60: Sieblinienbänder der Ausgangsböden

Bestandteil	TL		TA	
	Gesamt [M.-%]	Tonfraktion [M.-%]	Gesamt [M.-%]	Tonfraktion [M.-%]
Quarz	20	-	30	-
Kaolinit	2	20	55	66
Albit	3	-	5	-
Muscovit (Illit)	2	-	4	-
ML Illit/Smektit	-	-	6	9
Illit	-	40	-	25
Dolomit	44	-	-	-
Kalzit	27	-	-	-
Chlorit	2	40	-	-

Tab. 15: Ergebnisse der Mineralanalyse an der Gesamtprobe und am Anteil < 0,002 mm der Böden TL und TA²¹

²⁰ Die Untersuchungen erfolgten an nassen, dispergierten Proben mittels Laserbeugungsspektrometer (Gerät Sympatec HELOS(H0735) mit Nassdispergierer QUIXEL-R4) durch die TU Bergakademie Freiberg.

²¹ Gemäß Bild 60 beträgt der Anteil < 0,002 mm beim TL zwischen 15 und 20 M.-%, beim TA zwischen etwa 60 und 65 M.-% bzw. etwa 35 M.-% bei der Untersuchung mittels Laserbeugungsspektrometer.

²² Die Untersuchungen erfolgten mittels Röntgen-Diffraktometrie durch das GeoZentrum Nordbayern der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

²³ Die Isar, aus der dieses Material stammt, entspringt den nördlichen Kalkalpen und transportiert auf ihrem Fließweg Richtung Norden so die stark kalkhaltigen Gesteinsteile flussabwärts. Der feinkörnige Anteil im bewegten Material entsteht dabei vorrangig durch mechanische Zerkleinerung.

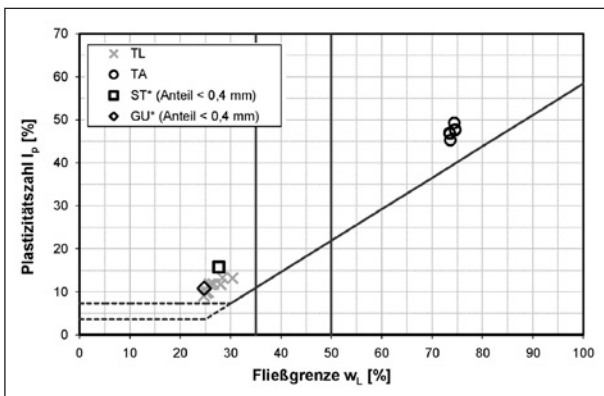


Bild 61: Ausgangsböden im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196²⁴

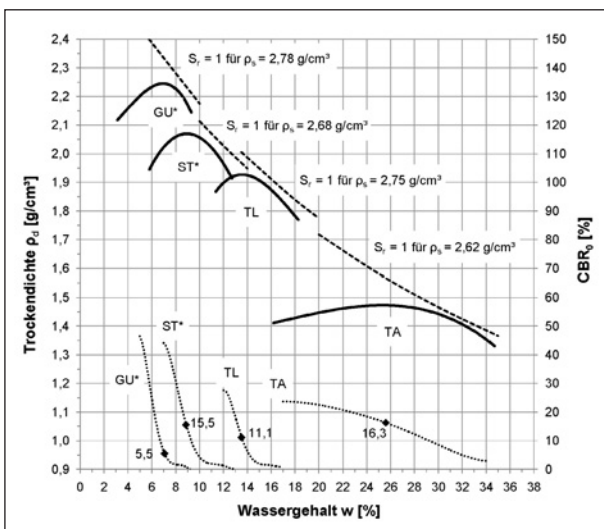


Bild 62: Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften (CBR) der Ausgangsböden

Die feinkörnigen Böden TL und TA sind im Plastizitätsdiagramm in Bild 61 dargestellt. Die Versuche wurden nach DIN 18122-1 [37] und auch an den gemischtkörnigen Böden ST* und GU* durchgeführt (Fraktion < 0,4 mm)²⁵. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Nur an den feinkörnigen Böden (TL, TA) durchgeführt wurden Versuche zum Wasseraufnahmevermögen nach Enslin-Neff (DIN 18132 [42]). Zu den Ergebnissen siehe ebenfalls Tabelle 16.

Die Ausgangsböden wurden Verdichtungsversuchen nach DIN 18127 [40] unterzogen. Die Verdichtung erfolgte mit 0,6 MNm/m³ (Standard-Proctor) für alle Böden im Proctortopf mit einem Durchmesser von 15 cm, um im Anschluss CBR-Versuche nach [60] durchführen zu können. Die Ergebnisse der Verdichtungsversuche an den Ausgangsböden sind in Bild 62 zusammengefasst.

Auch an den Ausgangsböden wurden etwa beim optimalen Wassergehalt verdichtete Probekörper einer 7-tägigen Wasserlagerung unterzogen. Die Ergebnisse dieser Schwellversuche sind in Bild 63 dargestellt.

²⁴ Das Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196 umfasst streng genommen nur Böden bis zu einer Fließgrenze von maximal $w_L = 80\%$ und Plastizitätszahl von $I_p = 50\%$.

²⁵ Gemäß Bild 60 beträgt der Anteil > 0,4 mm beim ST* etwa 35 M.-%, beim GU* ungefähr 65 M.-%.

Kennwert	Boden	TA	TL	ST*	GU*
	[EH]				
Fließgrenze ¹ w_L [DIN 18122]	[%]	74,1	26,8	27,7	24,8
Ausrollgrenze ² w_P [DIN 18122]	[%]	26,9	15,5	12,0	14,0
Plastizitätszahl ³ I_p [DIN 18122]	[%]	47,2	11,3	15,7	10,8
Korndichte ρ_s [DIN 18124]	[g/cm ³]	2,62	2,75	2,68	2,78
Kornanteil [DIN 18123]					
≤ 0,002 mm	[%]	60 – 63	15 – 19	10 – 13	ca. 3
≤ 0,06 mm	[%]	94 – 99	81 – 90	28 – 30	25 – 26
≤ 2 mm	[%]	100	100	88 – 90	38 – 40
Proctordichte ρ_{Pr} [DIN 18127]	[g/cm ³]	1,47	1,93	2,08	2,24
optimaler Wassergehalt w_{Pr} [DIN 18127]	[%]	25,6	13,5	8,9	7,1
Wasseraufnahme [DIN 18132]	[%]	132,5	39,8	74,1	44,0
Durchlässigkeit ⁴ [DIN 18130-1]	[m/s]	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-9}$	$8,1 \cdot 10^{-9}$	$6,8 \cdot 10^{-10}$

¹ Am Anteil < 0,4mm; bei TA und TL Mittelwert aus mehreren Versuchen

² Am Anteil < 0,4mm; bei TA und TL Mittelwert aus mehreren Versuchen

³ Am Anteil < 0,4mm; bei TA und TL Mittelwert aus mehreren Versuchen

⁴ Jeweils Mittelwert aller durchgeführten Messungen an einem Boden etwa in w_{Pr} . Einzelwerte siehe Anhang A 2 bis A 5

Tab. 16: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen

Die Durchlässigkeit der Böden (an etwa im Proctroptimum verdichteten Proben) wurde nach DIN 18130-1 [41] bestimmt und ist zusammenfassend mit anderen charakteristischen Werten in Tabelle 16 ausgewiesen.

Zur Bodenverbesserung mittels Kalkzugabe wurde ein Produkt der Firma Märker Kalk verwendet, das laut technischem Datenblatt der Kategorie CL 90-Q (R5, P1)²⁶ zuzuordnen ist. Weitere Angaben sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Zur Bodenverbesserung wurde auch eine Braunkohlenflugasche aus dem mitteldeutschen Braunkohlerevier verwendet. Diese zeichnet sich ihrer Herkunft entsprechend durch einen hohen Gehalt an reaktivem Kalk aus. Siehe dazu auch Tabelle 18, in der die wichtigsten Bestandteile der verwendeten Asche angeführt sind.

Wie bereits in BALLMANN et al. [9] beschrieben ist die Bestimmung der Korngrößenverteilung mittels Sedimentationsanalyse aufgrund der Struktur der

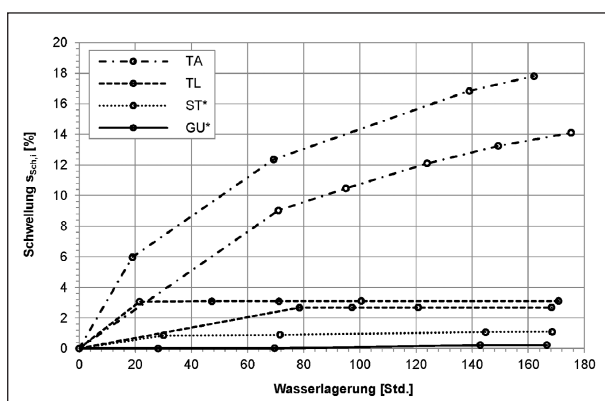


Bild 63: Schwellversuche (7-tägige Wasserlagerung) der Ausgangsböden im CBR-Topf

Bestandteil	Wert	Anm.
CaO	92	[M.-%]
MgO	1	[M.-%]
CO ₂	3	[M.-%]
SiO ₂	2	[M.-%]
Fe ₂ O ₃	0,5	[M.-%]
Al ₂ O ₃	0,8	[M.-%]
SO ₃	0,4	[M.-%]
Gehalt an wasserlöslichem CaO nach DIN EN 12518	87	[M.-%]
Siebrückstand 0,09 mm Sieb	4	[M.-%]
Nasslöschkurve T ₆₀	< 3	[min]

Tab. 17: Datenzusammenstellung Weißfeinkalk²⁷

Braunkohlenflugasche (kleine Hohlkugeln) nicht möglich, eine Luftstrahlsiebung nach TP Gestein-StB Teil 4.1.3 wurde nicht durchgeführt. Die Korngrößenanalyse erfolgte im Zuge der Qualitätssicherung des Herstellers mittels Laserbeugungsspektrometer (Bild 64). Die Untersuchung im Gaspynometer nach DIN 18124 [39] lieferte eine Kornwichte von 2,93 g/cm³.

Bei der verwendeten Braunkohlenflugasche werden die Anforderungen in TL BuB-E StB 09 [57] bezüglich des Sulfatgehaltes und Glühverlustes eingehalten (vgl. Tabelle 18). Im Zuge der Untersuchungen wurden keine Eluate zur Bestimmung umweltrelevanter Merkmale hergestellt. Die Ergebnisse aus der chemischen Analyse der Asche (nach DIN 51729-10) sind in Tabelle 19 dargestellt.²⁸

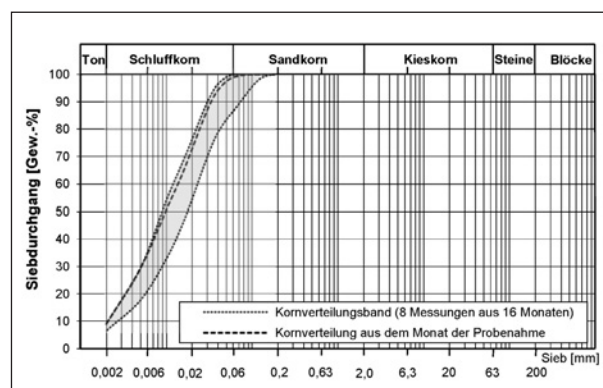


Bild 64: Kornverteilung der Braunkohlenflugasche

Bestandteil	Wert	Anm.
Trockenrückstand	99,5	[M.-% Originalsubstanz] gem. DIN 12880
Freikalk CaO	2,89	[M.-% Trockenrückstand] gem. DIN 450
Reaktionsfähiges Calciumoxid CaO	31,7	[M.-% Trockenrückstand] gem. LV ifn FTZ/DIN 196-2
Sulfatgehalt	7,35	[M.-% Trockenrückstand] gem. DIN 196-2
SiO ₂ (reaktionsfähig)	25,4	[M.-% Trockenrückstand] gem. LV ifn FTZ/DIN 196-2

Tab. 18: Datenzusammenstellung der Braunkohlenflugasche

²⁶ Nach DIN EN 459 und DIN EN 12518.

²⁷ Daten entnommen aus dem Datenblatt der Firma Märker für Weißfeinkalk CL 90-Q (R5, P1), Stand 02/2012.

²⁸ Untersuchungen durchgeführt durch die ifn – Forschungs- und Technologiezentrum GmbH, Tröglitz 2013 (Anm.: Die Untersuchungen wurden teilweise nach einem nichtakkreditierten Prüfverfahren bestimmt).

Bestandteil	Wert	Anm.
MgO	2,7	[M.-% Trockenrückstand]
Al ₂ O ₃	14,5	[M.-% Trockenrückstand]
SiO ₂	27,3	[M.-% Trockenrückstand]
SO ₃	9,7	[M.-% Trockenrückstand]
CaO	34,6	[M.-% Trockenrückstand]
Fe ₂ O ₃	9,2	[M.-% Trockenrückstand]
K ₂ O	0,6	[M.-% Trockenrückstand]
TiO ₂	0,82	[M.-% Trockenrückstand]
P ₂ O ₅	< 0,01	[M.-% Trockenrückstand]
Na ₂ O	< 0,21	[M.-% Trockenrückstand]

Tab. 19: Ergebnisse der Ascheoxidanalyse nach DIN 51729-10

Material	Wert	Anm.
RC-Mix 0/4 mm	2,67 g/cm ³	Gaspyknometer gem. DIN 18124
RC-Mix 0/32 mm	2,65 g/cm ³	Luftpyknometer gem. TP BF-StB Teil B 3.3

Tab. 20: Kornwichten des zur mechanischen Bodenverbesserung verwendeten RC-Materials

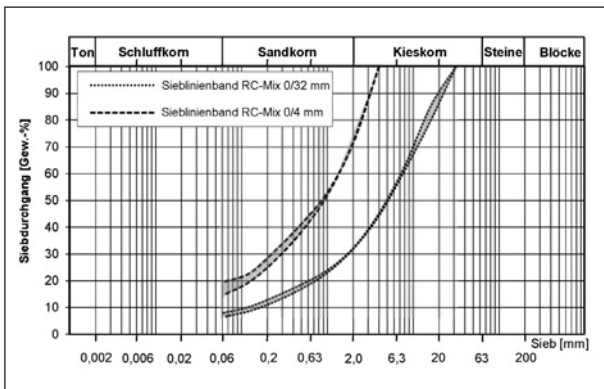


Bild 65: Sieblinien der Recyclingmaterialien

Das zur Bodenverbesserung ebenfalls verwendete Recyclingmaterial wurde von zwei Unternehmen aus dem Großraum München bezogen. Da das Recycling-Gemisch RC-Mix nur in der Körnung 0/56 mm bezogen werden konnte, wurden die Versuchsmaterialien RC-Mix 0/4 mm und 0/32 mm entsprechend daraus abgesiebt. Es handelt sich bei beiden um dasselbe Ausgangsmaterial.

In Tabelle 20 sind die ermittelten Kornwichten für die Materialien dargestellt. Die Korndichte des Materials mit Größtkorn 4 mm wurde im Gaspyknometer, jene des größeren Materials (Größtkorn 32 mm) wurde im Luftpyknometer bestimmt.

Bestandteil	Anteil in Kornklasse 4/32 [M.-%]
Beton, Betonprodukte, Mauersteine aus Beton, zementgebundene Gesteinskörnung	49,21
Natürliche und industriell hergestellte Gesteinskörnung	29,06
Klinker, Ziegel und Steinzeug	16,25
Kalksandstein, Mörtel und ähnliche Stoffe	4,10
Mineralische Leichtbau- und Dämmstoffe, nicht schwimmender Porenbeton und Bims	0,11
Keramik, Steinzeug, Fliesen und Glas	0,74
Asphaltgranulat	0,00
Gipshaltige Baustoffe	0,00
Nicht schwimmende Fremdstoffe wie Gummi, Kunststoffe, Textilien, Pappe und Papier	0,15
Eisen/nichteisenhaltige Metalle	0,00
Schwimmendes Material	0,13

Tab. 21: Zusammensetzung des RC-Mix 4/32 mm

Anhand einer repräsentativen Teilprobe erfolgte eine händische Auszählung getrennt nach den Kornklassen 4/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm nach TP Gestein-STB Teil 3.1.5 [66]. Das Ergebnis der Auszählung ist in Tabelle 21 zusammenfassend für die Korngruppe 4/32 mm dargestellt.

Allgemeine Angaben zur Probenvorbereitung

Zur Herstellung der Mischungen aus Boden und Zugabe wurde für den Hauptteil der Versuche ein Knetmischer aus der Teigwarenherstellung (Hersteller Fa. REGO – Rich.Hofheinz & Co. Maschinenfabrik, Typ SM 3) auf mittlerer Umdrehungsstufe (etwa 110 Rotationen pro Minute) verwendet. Die Auslenkung des Knethakens ist händisch regelbar, der Haken erreicht den gesamten Mischbehälter.

An ausgewählten Mischungen wurden Vergleichsversuche durchgeführt, bei denen das Zugabematerial mittels Kutter (Hersteller Fa. Eduard Müller, ohne Typenbezeichnung) eingemischt wurde (siehe dazu auch Bild 67).

Unabhängig vom verwendeten Mischgerät wurde die Mischzeit bei jeder Mischung in Anlehnung an die Technische Prüfvorschrift für Eignungsprüfungen bei Bodenverbesserungen mit Bindemitteln [64] mit 120 Sekunden eingehalten.



Bild 66: Knetmischer (Hersteller Fa. REGO)



Bild 67: Kutter (Hersteller Fa. Eduard Müller)

Für die Bodenverbesserung mit Weißfeinkalk und Braunkohlenflugasche wurde eine Reaktionszeit zwischen Mischung und Verdichtung von 24 Stunden, für die Bodenverbesserung mit Recycling-Baustoffen eine Reaktionszeit von 0 Stunden gewählt. Die Variation der Reaktionszeiten erfolgte an ausgewählten Mischungen. Die Lagerung der Proben während dieser Reaktionszeit erfolgte in verschlossenen Eimern in einem temperierten Raum bei etwa 20 °C.

Verdichtung und Tragfähigkeit

Die Proctor-Versuche wurden in Anlehnung an DIN 18127 [40] bzw. TP BF-StB Teil B 11.3 – Eignungsprüfung bei Bodenverbesserungen mit Bindemitteln [64] durchgeführt. Für jeden Punkt der Proctorkurve wurde neues Probematerial vorbereitet und zum gegebenen Zeitpunkt die Zugabe (Weißfeinkalk, Braunkohlenflugasche, RC-Material), wie oben beschrieben, zugemischt. Die Verdichtung erfolgte

für alle Proben im CBR-Zylinder mit Durchmesser 150 mm, da an jedem Verdichtungsversuch auch ein Tragfähigkeitsversuch (CBR) angeschlossen wurde.

Die Versuche wurden dem Forschungsziel entsprechend an sehr feuchten Böden durchgeführt. Bei den Arbeiten im weichen bis breiigen Konsistenzbereich sind die Anforderungen an Krümelgrößen, wie sie in DIN 18127 [40] und TP BF-StB Teil B 11 [64] formuliert sind, nicht immer einhaltbar. So lassen sich die Böden am nassen Ast der Proctorkurve und bei hohen Zugabemengen von Bindemittel oft nicht mehr zu Krümeln zerkleinern. Des Weiteren wurden sämtliche Versuche an den fein bzw. gemischtkörnigen Böden und Gemischen in der Regel ohne Stahlplatte durchgeführt und auf Zylinderhöhe abgezogen.

Die Tragfähigkeitsversuche mittels CBR-Versuch wurden in Anlehnung an TP BF-StB, Teil B 7.1 – Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio) [60] durchgeführt. Entsprechend der Fragestellung des Vorhabens wurde abweichend von den Vorgaben dieser Prüfvorschrift beim Kies-Schluff-Gemisch (GU*) und bei Mischungen aus Boden und RC-Material 0/32 mm die Vorgaben an das zulässige Größtkorn von 22,4 mm nicht eingehalten. Erfahrungen am Zentrum Geotechnik der TU München zeigen, dass unter Berücksichtigung einer steigenden Schwankungsbreite der Ergebnisse auch gröbere Körnungen verwendet werden können. Sämtliche CBR-Versuche wurden mit einer Auflast von 5 kg durchgeführt (4 Belastungs-Halbscheiben zu je 1,25 kg). Die Last-Stempeleindringungs-Kurve wurde manuell korrigiert.

Die Ergebnisse zur Kalkverbesserung der Böden sind in Bild 68 zusammenfassend dargestellt. Den Böden wurden Kalkmengen zwischen 5 und 15 M.-% zugegeben und damit bewusst die üblichen Zugabemengen überschritten. Während durch die Zugabe von Weißfeinkalk beim ausgeprägt plastischen Ton (TA) ab 5 M.-% keine weitere Verschiebung des Proctroptimums erreicht werden konnte, zeigen die Ergebnisse zu den Mischungen am leicht plastischen Ton (TL) und am Sand-Ton-Gemisch (ST*) bis zur jeweilig höchsten Zugabemenge noch eine weitere Verschiebung des optimalen Ausgangswassergehaltes. Die Verbesserung des Kies-Schluff-Gemisches (GU*) konnte für eine Zugabemenge von 5 M.-% Weißfeinkalk noch ohne besondere Auffälligkeiten erfolgen (gepunktete

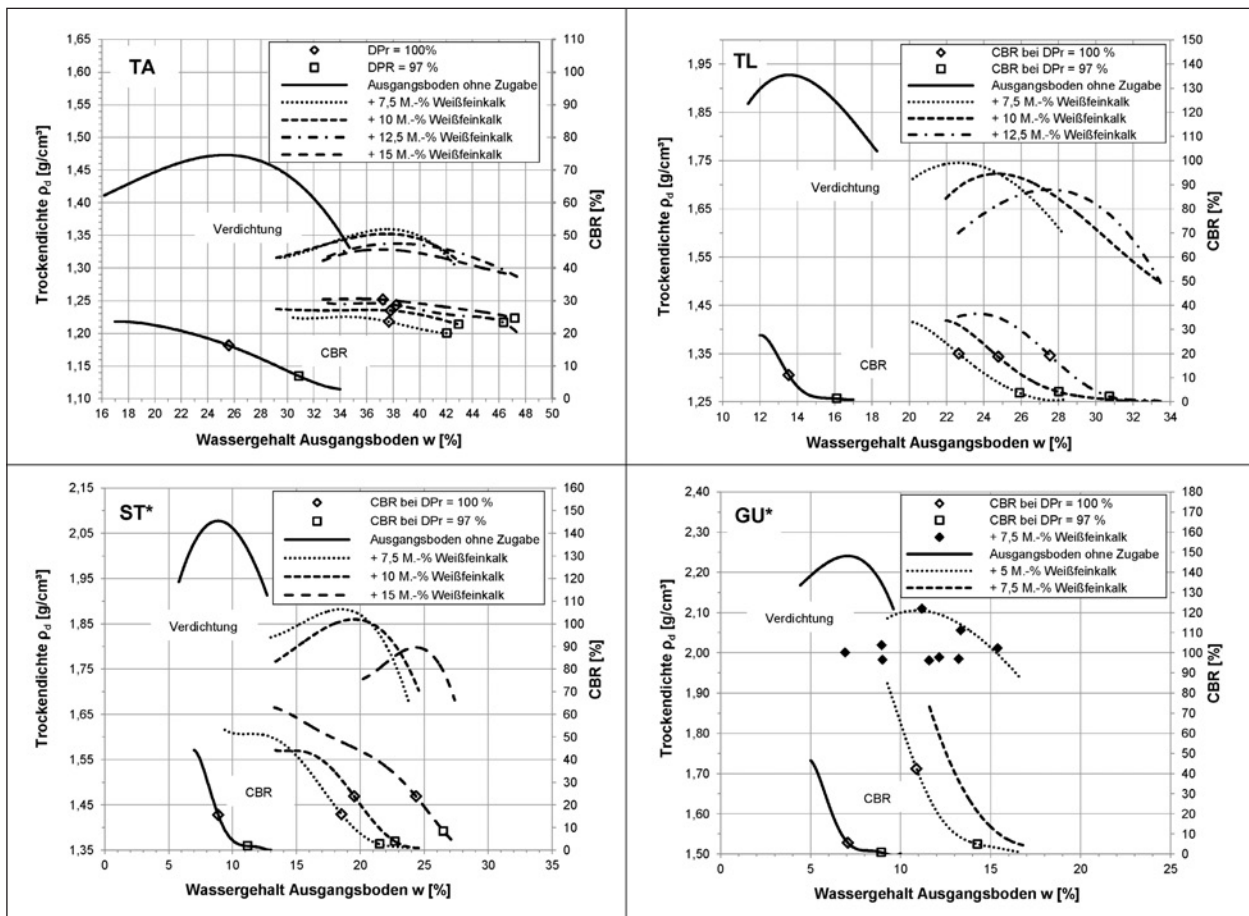


Bild 68: Verdichtung und Tragfähigkeit; Boden TA, TL, ST* und GU* mit WFK (Mischung im Knetmischer)

te Kurven in Bild 68, rechts unten). Die Zugabe von 7,5 M.-% Weißfeinkalk führte allerdings bereits dazu, dass die Trockendichte der verdichteten Mischungen keine eindeutige Abhängigkeit vom Wassergehalt mehr aufwies (schwarze Punkte in Bild 68, rechts unten). Für die Tragfähigkeit dieser Mischungen konnte hingegen vor allem auf der nassen Seite noch ein Zusammenhang zum Wassergehalt festgestellt werden. Dieser ist im entsprechenden Bild zum Boden GU* in Bild 68 als gestrichelte Linie eingezeichnet (ohne Kennzeichnung von D_{Pr} = 100 % und 97 %, da Verdichtung ohne ausgeprägtes Optimum). Die so dargestellten Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich die Verbesserung mit mehr als 5 M.-% Weißfeinkalk wohl hauptsächlich noch in der Änderung der Tragfähigkeiten niederschlägt.

Die Tragfähigkeiten der Gemische aller Böden mit Weißfeinkalk zeigen im Verdichtungsoptimum höhere Werte als die jeweiligen Ausgangsböden (im Optimum).

Die Ergebnisse der Bodenverbesserung mit Braunkohlenflugasche (Verdichtung und Tragfähigkeit)

sind zusammenfassend in Bild 69 dargestellt. Die kalkreiche Flugasche wurde den Böden in vergleichsweise hohen Mengen, zwischen 10 und 50 M.-%, zugegeben. Der ausgeprägt plastische Ton (TA) konnte auch bei hohen Zugabemengen nicht deutlich verbessert werden. Der optimal verarbeitbare Wassergehalt blieb etwa konstant, durch die Zugabe wurde hauptsächlich eine Abflachung der Kurven erreicht. Die hydraulischen Eigenschaften der Braunkohlenflugasche führten bei einigen der untersuchten Mischungen zu ungewöhnlichen Verdichtungs- und CBR-Kurven (vor allem bei Boden TL und ST*). Es ist anzunehmen, dass die Form der Kurven auf die Erhärtung der Flugasche im Boden zurückgeführt werden kann (24 Stunden Reaktionszeit zwischen Mischung und Verdichtung). Die Ergebnisse der Versuche am Ausgangsboden GU* weisen, wie bereits auch bei der Verbesserung mit Weißfeinkalk, auf Besonderheiten hin. So konnte bei der Verbesserung mit 20 M.-% BFA eine Abhängigkeit der Trockendichte und der Tragfähigkeit (CBR) vom Wassergehalt der verdichteten Proben festgestellt werden. Bei der Verbesserung des Bodens mit 10 M.-% Braun-

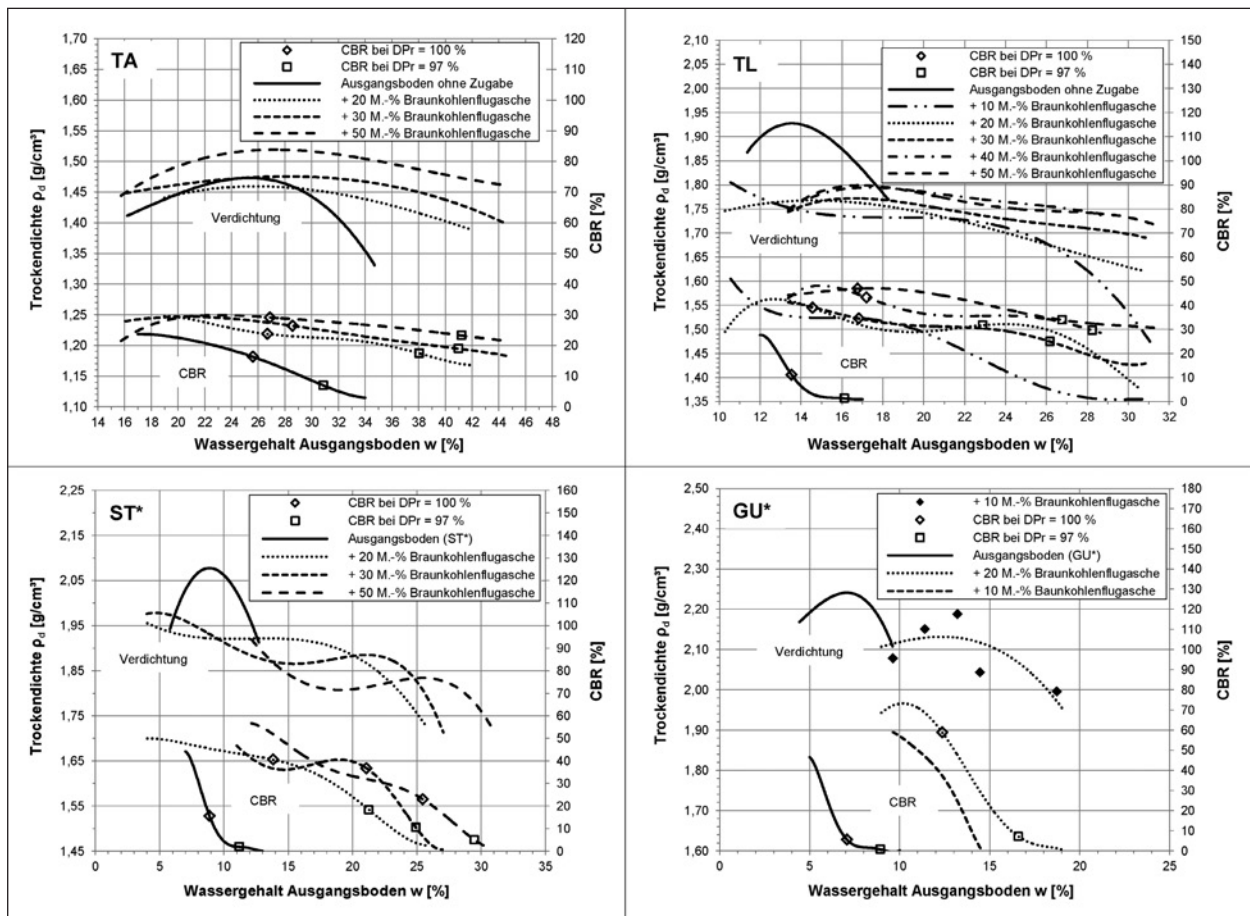


Bild 69: Verdichtungskurven; Boden TA, TL, ST* und GU* mit BFA (Mischung im Knetmischer)

kohlenflugasche erlaubten die Werte zwar die Deutung eines Zusammenhangs zwischen der Tragfähigkeit zum Wassergehalt (gestrichelte Linie in Bild 69, rechts unten), die Trockendichte wies allerdings keinen markanten Zusammenhang zum Wassergehalt der verdichteten Proben auf. Die Verdichtungsergebnisse dieser Versuche sind daher in Bild 69 als einzelne schwarze Punkte dargestellt. Die Lage dieser Punkte im Vergleich zur Verdichtungskurve bei 20 M.-% Zugabemenge weist darauf hin, dass die Erhöhung der Zugabemenge von 10 auf 20 M.-% vor allem eine Verbesserung der Tragfähigkeit mit sich bringt.

Die Tragfähigkeiten der Gemische aller Böden mit Braunkohlenflugasche zeigen im Verdichtungsoptimum deutlich höhere Werte als die jeweiligen Ausgangsböden (im Optimum).

Das Verdichtungsergebnis und die Tragfähigkeit der Gemische mit Boden TL wird deutlich von den Versuchsrandbedingungen bestimmt (Reaktionszeit, Mischerfolg). Siehe dazu zum Beispiel Bild 70, in dem das Verdichtungsergebnis (bei 24 Stunden Reaktionszeit zwischen Mischung und Verdichtung)

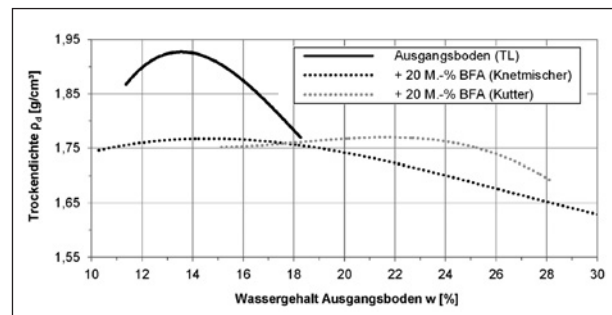


Bild 70: Proctorkurven bei Mischung mit Knetmischer bzw. Kutter und 24 Stunden Reaktionszeit (Boden TL + 20 M.-% BFA)

für zwei unterschiedliche Mischarten (Homogenisierungsgrade) dargestellt ist. Details zu den Einflüssen der Versuchsrandbedingungen auf die Verdichtungsergebnisse und Tragfähigkeiten können für die hier untersuchten Materialien in HENZINGER & HEYER [80] nachgelesen werden.

Die feinkörnigen Ausgangsböden (TA und TL) wurden auch durch Zugabe von RC-Materialien unterschiedlicher Korngröße verbessert. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Bild 72 zusammenfassend dargestellt. Die Zugabe von RC-Mix führt dabei zu

sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Dass die Verbesserung mit Recyclingmaterialien in den gegebenen Zugabemengen nicht als klassische mechanische Bodenverbesserung angesehen werden kann, veranschaulicht beispielhaft Bild 71. Der in Kapitel 3.3.5 erwähnte Übergangsbereich, ab dem das Grobkorn im Gemisch zunehmend für die Lastabtragung bestimmt wird (Anteil < 0,063 mm zwischen 30 M.-% und 40 M.-% des Trockengewichtes) und vor allem jener Bereich, ab dem die groben Körner

vollständig das tragende Gerüst bilden (Anteil < 0,063 mm zwischen 15 M.-% bis 25 M.-%), wird durch die jeweilige Einmischung von RC-Material (für die Böden TA und TL) bei weitem nicht erreicht.

Ähnlich wie bei der Verbesserung des Ausgangsbodens TA mit RC-Mix der Körnung 0/32 mm ist auch bei der Körnung 0/4 mm nur eine sehr untergeordnete Verschiebung des optimalen Wassergehaltes des Ausgangsbodens sichtbar (Bild 72, links oben und links unten). Der leicht plastische Ton (TL) lässt sich vor allem durch die Zugabe von RC-Mix 0/4 bis weit über seinen optimalen Wassergehalt verdichten (siehe Bild 72, rechts oben).

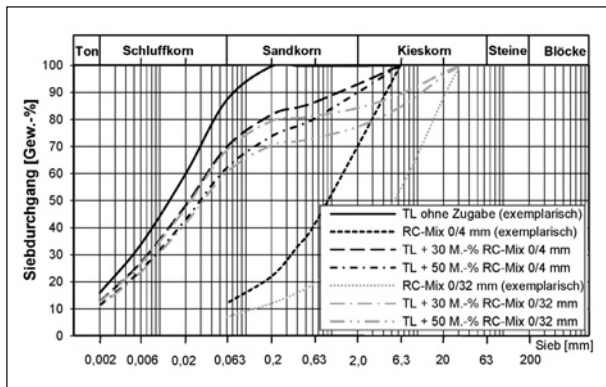


Bild 71: Rechnerische Sieblinie der Mischungen aus Boden TL und RC-Mix 0/32 mm und 0/4 mm

Die Tragfähigkeiten im jeweiligen Verdichtungsoptimum steigen leicht für Mischungen mit Boden TA. Die Tragfähigkeiten des verbesserten Bodens TL weisen im Verdichtungsoptimum etwa ähnliche Werte aus, wie der Boden ohne Verbesserungsmaßnahme (im Optimum).

Zusätzliche Untersuchungsergebnisse zur Bodenverbesserung mit RC-Materialien (Einfluss der stofflichen Zusammensetzung und der Eigenfeuchte des zugemischten RC-Materials) sind für die hier

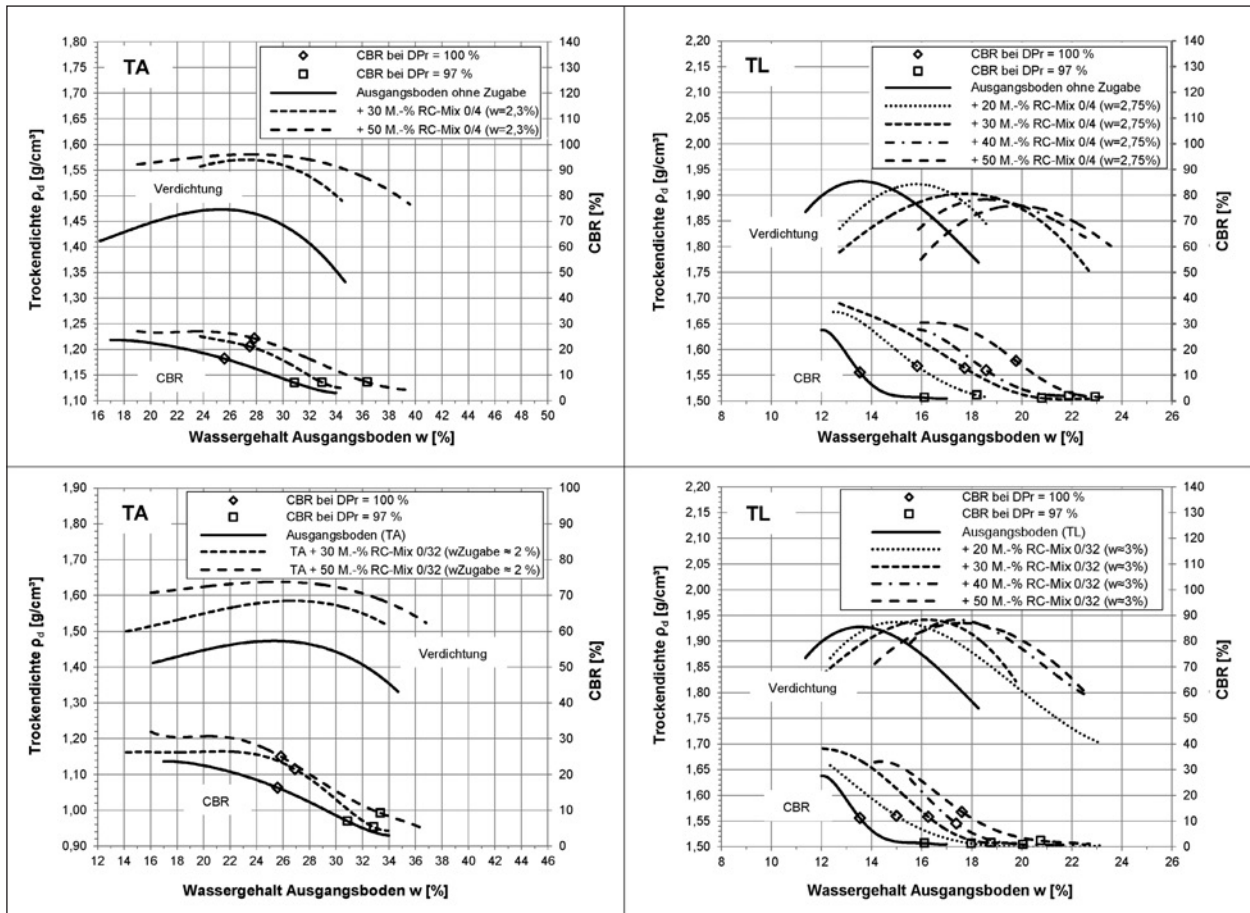


Bild 72: Verdichtungskurven; Boden TA und TL mit RC-Mix 0/4 und 0/32 mm

dargestellten Ausgangsböden in HENZINGER & HEYER [81] beschrieben. Die Einzelergebnisse zu den verschiedenen Variationen am Zugabematerial sind auch im Anhang diesem Bericht beigefügt.

Wasserlagerung

Um die Tragfähigkeitsentwicklung der Gemische bei Wasserlagerung bestimmen zu können, wurden im Proctoroptimum nachträglich je zwei zusätzliche Probekörper hergestellt. Einer davon wurde sofort nach Herstellung mittels Stempel Eindringversuch geprüft (CBR_0), der andere einer 7-tägigen Wasserlagerung unterzogen und erst im Anschluss geprüft (CBR_W). Die Änderung der CBR-Werte während der Wasserlagerung ergibt sich aus der Differenz dieser beiden Einzelwerte, wobei positive Werte eine Erhöhung der Tragfähigkeit bedeuten und negative Werte eine Verringerung.

$$\Delta CBR = CBR_0 - CBR_W$$

Während des Zeitraums der Wasserlagerung wurde das Schwellverhalten der Proben aufgezeichnet. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden alle Proben 7 Tage im Wasser gelagert, ohne Berücksichtigung eines Grenzswellmaßes für den Versuchsabbruch. Die Wasserlagerung erfolgte bei Raumtemperatur in einem nicht klimatisierten Raum bei einer Wassertemperatur von etwa 20 °C. Für die Wasserlagerung wurde außer der gelochten Deckplatte zur Aufnahme des Messuhrbolzens (Gewicht etwa 1,1 kg) keine Auflast aufgebracht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Schwellhebung nach Bodenverbesserung mit gebranntem Kalk (Tabelle 22) weisen vor allem für die Böden TA und TL eine deutliche Verbesserung aus. Die Schwellhebungen der gemischtkörnigen Böden ST*

Zugabe WFK	Swellmaß $s_{Sch,w}$			
	TA	TL	ST*	GU*
ohne Zugabe	14,1 – 17,8 %	2,7 – 3,1 %	1,1 %	0,2 %
5 M.-%	-	-	-	0,4 %
7,5 M.-%	1,7 %	0,4 %	-	-
10 M.-%	1,8 %	0,6 %	0,7 %	-
12,5 M.-%	1,9 %	0,8 %	-	-
15 M.-%	2,5 %	-	0,6 %	-

Tab. 22: Verbesserung mit WFK; Schwellwerte nach 7-tägiger Wasserlagerung im CBR-Topf (Proben bei etwa w_{Pr} , ohne Auflast)

und GU* wurden in untergeordnetem Maß beeinflusst, wobei vor allem für Boden GU* bereits ohne Zugabe nur eine untergeordnete Schwellhebung dokumentiert wurde.

Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsversuche im Anschluss an diese Wasserlagerung (dargestellt in Bild 73 als ΔCBR) weisen bei den Mischungen mit Boden TA darauf hin, dass der Tragfähigkeitsverlust durch die Schwellhebung bei einer Weißfeinkalk-Zugabe zwischen 0 und 7,5 M.-% am geringsten ausfällt, darüber aber wieder ansteigt. Die Tragfähigkeit (CBR) des verbesserten Bodens TL zeigt sich durch die Weißfeinkalkzugabe zunehmend weniger anfällig auf den Einfluss von Wasser. Der gemischtkörnige Boden ST* weist im behandelten wie im unbehandelten Zustand vergleichbare CBR-Werte aus. Die deutliche Beeinflussung des gemischtkörnigen Bodens GU* kann wahrscheinlich auch auf einen mangelhaften Vergleichswert (CBR_0) zurückgeführt werden. Dieser lag leicht auf der nassen Seite der Probe zur Ermittlung von CBR_w (steil abfallende Tragfähigkeitskurve im Bereich des Optimums (vgl. Bild 68)).

Wurde Braunkohlenflugasche als Bindemittel zur Verbesserung der Böden verwendet, so sind unterschiedliche Tendenzen zur Schwellhebung nach der Wasserlagerung erkennbar (siehe Tabelle 23). Vor allem bei den gemischtkörnigen Böden wurden im Vergleich zum unbehandelten Ausgangsboden höhere Schwellhebungen dokumentiert.

Die hydraulischen Eigenschaften der Braunkohlenflugasche führt, wie in Bild 74 dargestellt, vorrangig beim feinkörnigen Boden TL und gemischtkörnigen Boden GU* zu einer deutlichen Verfestigung der Proben während der Wasserlagerung.

Die durch Zumischung von RC-Material der Körnungen 0/4 und 0/32 mm verbesserten feinkörnigen Böden wurden ebenfalls für 7 Tage im Wasser gela-

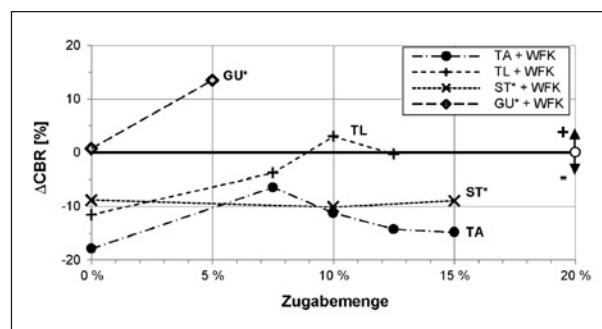


Bild 73: ΔCBR -Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit WFK

Zugabe BFA	Schwellmaß $s_{Sch,w}$			
	TA	TL	ST*	GU*
ohne Zugabe	14,1 – 17,8 %	2,7 – 3,1 %	1,1 %	0,2 %
10 M.-%	-	0 %	-	0,3 %
20 M.-%	7,3 – 8,3 %	1,3 %	-	3,2 %
30 M.-%	6,5 %	3,2 %	5,5 %	-
40 M.-%	-	6,3 %	-	-
50 M.-%	9,1 %	7,4 %	4,7 %	-

Tab. 23: Verbesserung mit BFA; Schwellwerte nach 7-tägiger Wasserlagerung im CBR-Topf (Proben bei etwa w_{Pr} , ohne Auflast)²⁹

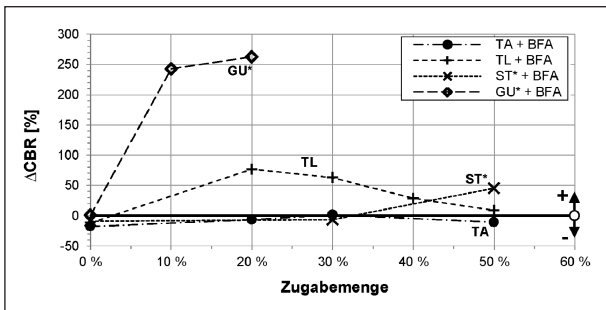


Bild 74: ΔCBR-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit BFA³⁰

Zugabe RC-Mix	Schwellmaß $s_{Sch,w}$			
	TA+RC-Mix 0/32	TL+RC-Mix 0/32	TA+RC-Mix 0/4	TL+RC-Mix 0/4
ohne Zugabe	14,1 – 17,8 %	2,7 – 3,1 %	14,1 – 17,8 %	2,7 – 3,1 %
20 M.-%	-	0,2 %	-	0,2 %
30 M.-%	11,9 %	0,2 %	14,2 %	0,2 %
40 M.-%	-	0,2 %	-	0,1 %
50 M.-%	11,6 %	0,4 %	12,9 %	0,7 %

Tab. 24: Verbesserung mit RC-Mix 0/4 und 0/32 mm; Schwellwerte nach 7-tägiger Wasserlagerung im CBR-Topf (Proben bei etwa w_{Pr} , ohne Auflast)

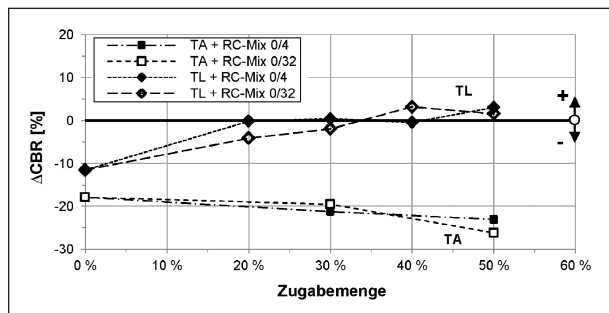


Bild 75: ΔCBR-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit RC-Mix 0/4 und 0/32

gert. Die dabei dokumentierten Schwellhebungen sind in Tabelle 24 zusammengefasst. Die Schwellereigenschaften des leicht plastischen Tons (TL) wurden durch die Zumischung entweder nicht beeinflusst oder verbessert. Beim ausgeprägt plastischen Ton (TA) sind die Auswirkungen eher von untergeordnetem Ausmaß.

Tendenziell wurden für den verbesserten Boden TA nach Wasserlagerung leicht schlechtere Werte für die Tragfähigkeit aufgezeichnet, als für den Boden ohne Verbesserung. Gleichzeitig wird die Tragfähigkeit des verbesserten Bodens TL weniger durch die Wasserlagerung beeinflusst als die Tragfähigkeit des unverbesserten Bodens (siehe dazu Bild 75).

Durchlässigkeit

Zur Beurteilung der Änderung des Durchlässigkeitsbeiwertes der verdichteten Gemische im Vergleich zum unbehandelten Ausgangsboden wurden Durchlässigkeitsversuche durchgeführt. Dazu wurden nachträglich Proben im jeweiligen Verdichtungsoptimum der Gemische hergestellt, die im Anschluss gem. DIN 18130-1 [41] in der Triaxialzelle durchströmt wurden. Zur Verhinderung der Umläufigkeit wurde bei den Versuchen in der Zelle ein Druck von 0,5 bar eingehalten.

Die Versuche an den mit Weißfeinkalk verbesserten Böden weisen tendenziell auf eine Erhöhung der Durchlässigkeit mit steigender Zugabemenge (siehe Bild 76) hin.

Auch die Verbesserung mit Braunkohlenflugasche führt im Vergleich mit dem unverbesserten Ausgangsböden jeweils zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit. Die verbesserten Böden weisen Durchlässigkeiten zwischen $1 \cdot 10^{-9}$ und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s auf (siehe Bild 77).

Die Böden TA und TL zeigen mechanisch verbessert in der Regel höhere Durchlässigkeiten als un-

²⁹ Festgelegte Einbaubedingungen, wenn die Verdichtung ohne ausgeprägtes Optimum: ST* + 30 M.-% BFA: $w = 15,1 \%$; $\rho_d = 1,844 \text{ g/cm}^3$; ST* + 50 M.-% BFA: $w = 23,4 \%$; $\rho_d = 1,839 \text{ g/cm}^3$; GU* + 10 M.-% BFA: $w = 11,4 \%$; $\rho_d = 2,150 \text{ g/cm}^3$.

³⁰ Festgelegte Einbaubedingungen, wenn die Verdichtung ohne ausgeprägtes Optimum: ST* + 30 M.-% BFA: CBR_0 : $w = 14,8 \%$; $\rho_d = 1,848 \text{ g/cm}^3$, CBR_w : $w = 15,1 \%$; $\rho_d = 1,844 \text{ g/cm}^3$; ST* + 50 M.-% BFA: CBR_0 : $w = 23,8 \%$; $\rho_d = 1,876 \text{ g/cm}^3$, CBR_w : $w = 23,4 \%$; $\rho_d = 1,839 \text{ g/cm}^3$; GU* + 10 M.-% BFA: CBR_0 : $w = 13,2 \%$; $\rho_d = 2,188 \text{ g/cm}^3$; CBR_w : $w = 11,4 \%$; $\rho_d = 2,150 \text{ g/cm}^3$.

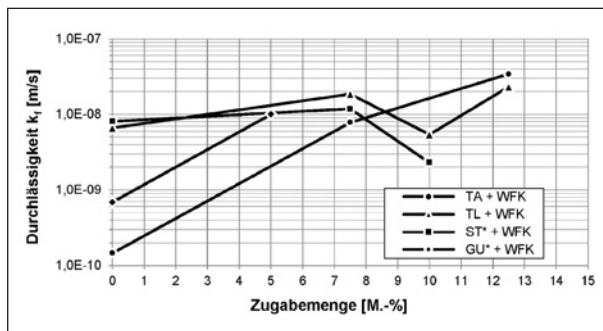


Bild 76: Durchlässigkeits-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit WFK

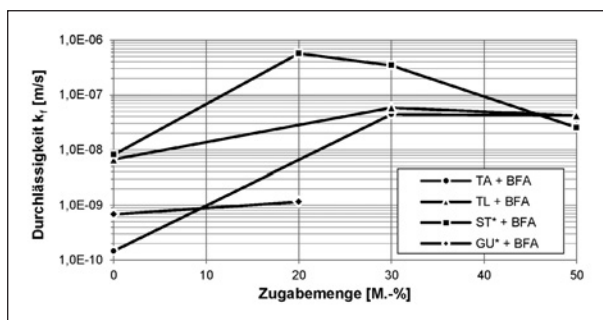


Bild 77: Durchlässigkeits-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit BFA³¹

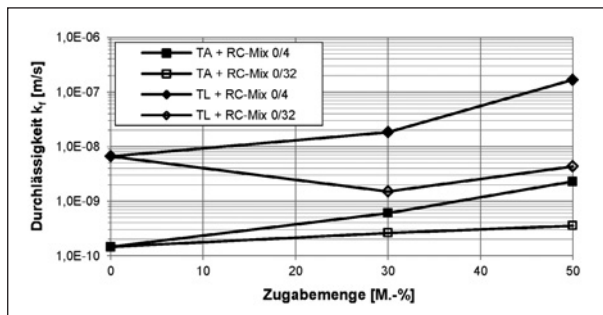


Bild 78: Durchlässigkeits-Werte; Böden TA und TL mit RC-Mix 0/4 und 0/32

behandelt. Ausnahme stellt die Verbesserung des leicht plastischen Tons TL mit RC-Mix der Körnung 0/32 dar (siehe Bild 78).

Frostversuche³²

Für die Durchführung von Frosthebungsversuchen an Böden und RC-Baustoffen liegt in Deutschland

³¹ Festgelegte Einbaubedingungen: ST* + 20 M.-% BFA: $w = 14,0 \%$; $\rho_d = 1,927 \text{ g/cm}^3$; ST* + 30 M.-% BFA: $w = 15,2 \%$; $\rho_d = 1,921 \text{ g/cm}^3$; ST* + 50 M.-% BFA: $w = 24,3 \%$; $\rho_d = 1,885 \text{ g/cm}^3$.

³² Bearbeitung durch die HTW Dresden, überarbeitet durch das ZG TUM.

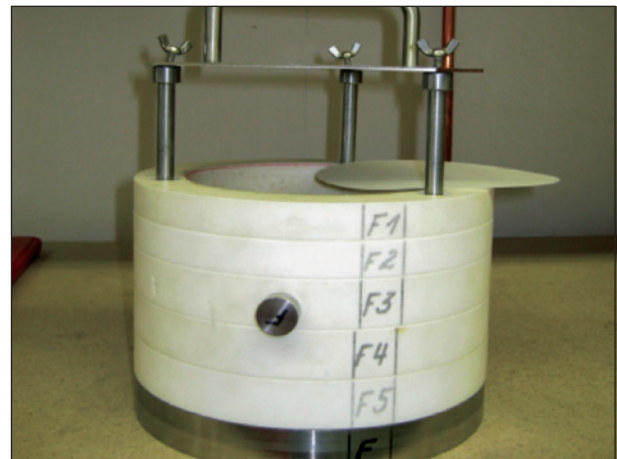


Bild 79: Prüfzylinder mit Einbauhilfe, gelochter Grundplatte und Filterpapier



Bild 80: Frosthebungstischgerät FHT W5/DM

derzeit keine bindende Prüfvorschrift vor. Im Rahmen eines Ringversuches „Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten“ (BLUME [18]) wurde der Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau, Teil „Frosthebungsversuch“ (TP-BF StB „Frosthebungsversuch“ [61]) vorgestellt. Die hier durchgeführten Frosthebungsversuche erfolgten in Anlehnung an diesen Entwurf, weisen stellenweise aber Abweichungen in der Versuchsdurchführung auf (siehe Tabelle 25). Abweichend von dem Entwurf der Technischen Prüfvorschrift erfolgte die Herstellung der Prüfkörper mit vorgegebenem Proctorwassergehalt und Proctordichte (Trockendichte). Die Ermittlung des Ausbauwassergehaltes erfolgte unmittelbar nach dem Versuchsende aus Probenkopf, -mitte und Probenfuß. In Bild 79 und Bild 80 sind der Prüfzylinder aus Teflon und das verwendete Frosthebungsgerät abgebildet.

Zulässiges Größtkorn	< 31,5 mm
Herstellung des Prüfkörpers	auf Zielwert Trockendichte (im Verdichtungsoptimum bei Proctorverdichtung)
Aufbau des Prüfgerätes	5 Ringscheiben aus Teflon
Abmessungen des Probekörpers	h = 125 mm d = 150 mm
Auflast	5 kN/m ²
Homogenisierung Prüfmaterial	24 h
Versuchsablauf	<p>Temperierungsphase (Tag 0 bis 1): In dieser Phase werden die Prüfkörper und das Wasserbad auf + 1,5 °C ± 0,1 K temperiert.</p> <p>Absenkphase (Tag 1 bis 5): Die Regelung der Temperatur erfolgte so, dass sich am vierten Tag die 0 °C-Isotherme in einer Tiefe von 57,5 mm ± 2,5 mm einstellt. Die Frosteindringungsgeschwindigkeit entspricht ca. 14,4 mm/d.</p> <p>Befrostungsphase (Tag 5 bis 8): Die 0 °C-Isotherme ist drei Tage lang in einer Tiefe von 57,5 mm ± 2,5 mm konstant zu halten.</p> <p>Auftauphase (Tag 8 bis 9): Am Ende des Versuchsablaufs erfolgte der 24-stündige Auftauprozess. Die Kühlkopf-temperatur beträgt + 10 °C ± 0,5 K. Die Wasserbadtemperatur bleibt unverändert bei + 1,5 °C ± 0,1 K.</p>
Höhe des Wasserbades	10 mm ± 2,5 mm über der Unterkante des Prüfkörpers
Zu bestimmende Parameter	<ol style="list-style-type: none"> (1) Hebung in der Temperierungsphase (2) Maximale Frosthebung (3) Verbleibende Resthebung (4) Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit

Tab. 25: Randbedingungen und Ablauf des Frosthebungsversuches

Die Masse der einzelnen Teilproben der untersuchten Materialien betrug ca. 6,5 kg Trockenmasse. Diese Menge war ausreichend, um die Prüfkörper herstellen zu können, sowie eine ausreichende Menge für die Wassergehaltsbestimmung nach DIN 18121-1 entnehmen zu können.

Der Probeneinbau erfolgte mit vorgegebener Trockendichte und Einbauwassergehalt. Diese waren genau einzustellen, da die Versuchsergebnisse allgemein sehr sensibel auf Schwankungen reagieren. Das Anmischen auf den erforderlichen Wassergehalt der Proben (w_A) erfolgte mit ofentrockenem Material (Trocknung bei 60 °C).

Nach Zugabe von entionisiertem Wasser wurde die Probe von Hand homogenisiert, mit einem feuchten Tuch abgedeckt und in einem verschlossenen Gefäß für 24 Stunden gelagert. Die Prüfkörper wurden im Anschluss an die 24 stündige Homogenisierungszeit hergestellt.

Anhand ausgewählter Mischungen (verbessertes Boden TL) wurden Frosthebungsversuche durchgeführt. Es sollte geklärt werden, ob die verwendeten innovativen Verbesserungsverfahren und hohen

Zugabemengen an Bindemittel Auffälligkeiten zeigen. In Bild 81 sind die Ergebnisse der Frosthebungsversuche am unverbesserten Boden TL sowie am Bindemittel-verbesserten leicht plastischen Ton (TL) mit und ohne Feuchtraumlagerung vor Befrostung dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass beide Bindemittelarten eine Reaktionszeit vor dem Frosthebungsversuch benötigen, um sich positiv auf das Frostverhalten auszuwirken. Vor allem jene Proben, die durch Zugabe von Braunkohlenflugasche behandelt wurden, zeigen nach Aushärtung nahezu keine Frosthebungen mehr.

Die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit (dargestellt in Bild 82) sinkt deutlich durch die Verbesserungsmaßnahmen mit Bindemitteln.

In Bild 83 sind die Versuchsergebnisse des Frosthebungsversuches an dem mit RC-Mix 0/4 verbesserten Boden TL dargestellt. Mit zunehmender Zugabemenge ist eine Reduzierung der maximalen Frosthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit zu beobachten. Die verbleibende Resthebung blieb bei den Versuchen mit steigender Zugabemenge nahezu konstant.

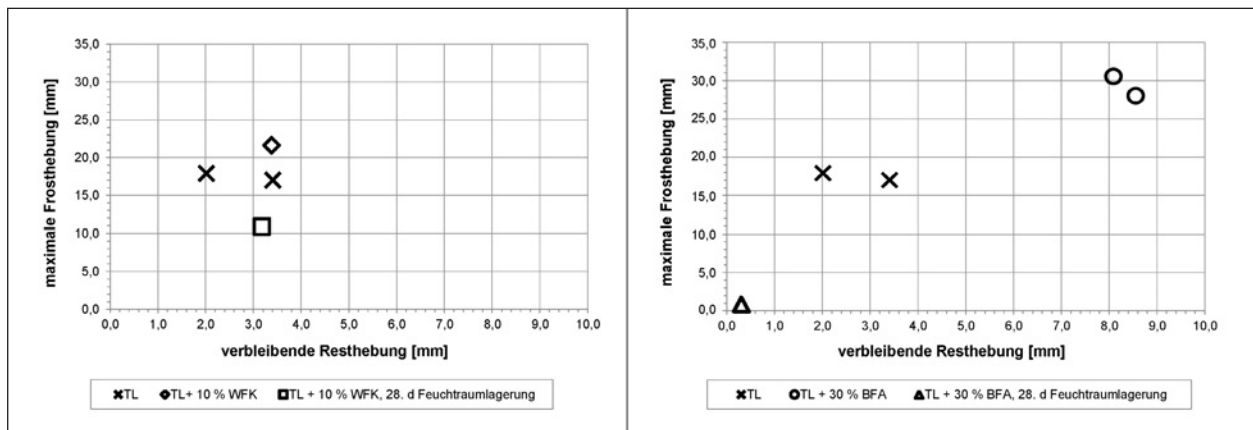


Bild 81: Maximale Frosthebung und verbleibende Resthebung; links für TL mit WFK, rechts für TL mit BFA

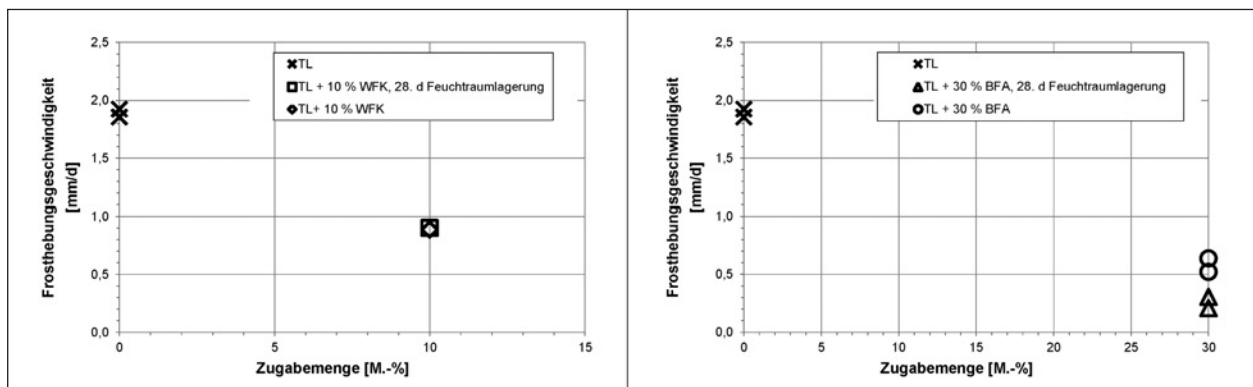


Bild 82: Frosthebungsgeschwindigkeit der verbesserten Böden; links für TL mit WFK, rechts für TL mit BFA

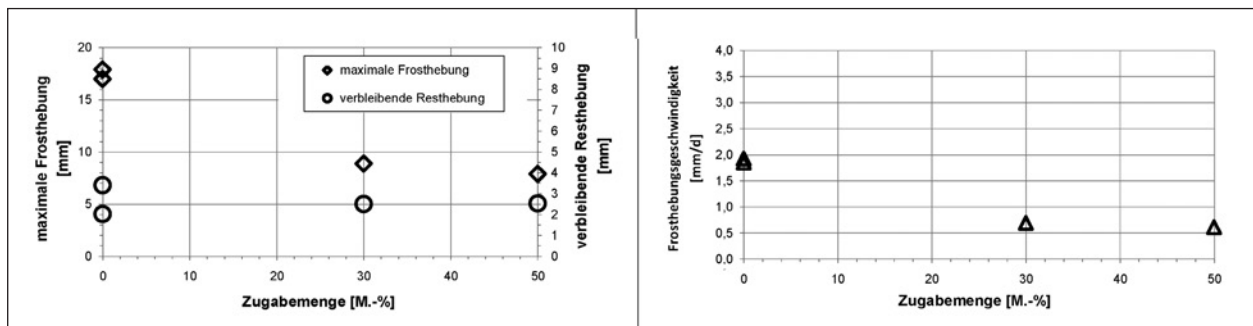


Bild 83: Entwicklung der maximalen Frosthebung, der verbleibenden Resthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zugabemenge des Baustoffes RC-Mix 0/4

Zyklische Destabilisierung³³

Die nach dem oben beschriebenen Verfahren hergestellten Proben (siehe Frosthebungsversuche; $d = 10 \text{ cm}$, $h = 20 \text{ cm}$) des verbesserten Bodens TL wurden in einem elektromechanischen, zyklischen

Triaxialgerät geprüft. Nach dem Einbau wurden die Proben gesättigt und konsolidiert. Die zyklische vertikale Spannung ohne Schubumkehr wurde mit einer Frequenz von 1 Hz unter undrainierten Bedingungen aufgebracht. Die Durchführung der Versuche erfolgte als Mehrstufentest, in dem die Amplitude nach 20 Zyklen stufenweise erhöht wurde. Bei der unbehandelten Probe war die Beaufschlagung der Probe mit einer Amplitude von maximal 90 kN/m^2 möglich. Die mit Braunkohleflugasche verbesserte

³³ Bearbeitung durch die HTW Dresden, überarbeitet durch das ZG TUM.

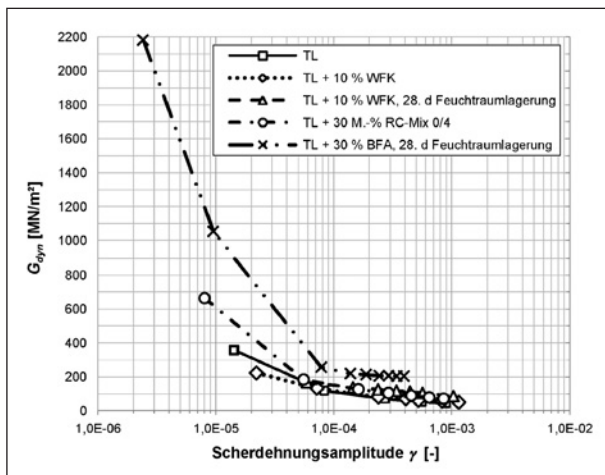


Bild 84: Dynamisches Schermodul des verbesserten Bodens TL in Abhängigkeit von der Scherdehnungsamplitude

Probe wurde bis zu einer Amplitude von 165 kN/m² geprüft. Beim Erreichen der größten vertikalen Verformungsamplituden erfolgte der Abbruch der Versuche. Bei keiner der Proben wurde der Bruchzustand erreicht. Die Auswertung erfolgte grafisch.

Vergleichend werden in Bild 84 die Ergebnisse der Untersuchungen am verbesserten leicht plastischen Ton dargestellt. Während der unbehandelte leicht plastische Ton ein maximales dynamisches Schermodul von 358 MN/m² aufweist, zeigt der mit Weißfeinkalk verbesserte Boden (mit Feuchtraumlagerung) mit 166 MN/m² das geringste maximale dynamische Schermodul der untersuchten Proben. Ohne Feuchtraumlagerung lag bei der mit Weißfeinkalk verbesserten Probe das maximale dynamische Schermodul bei 224 MN/m². Die Bodenverbesserung mit RC-Mix 0/4 zeigt einen maximalen dynamischen Schermodul von 662 MN/m². Die Bodenbehandlung mit Braunkohlenflugasche (mit 28-tägiger Feuchtraumlagerung) zeigte in den Versuchen die deutlichste Verbesserung. Das maximale dynamische Schermodul stieg auf 2.181 MN/m².

Beurteilung der Laborversuchsergebnisse

Bezugnehmend auf die in Kapitel 3.3.1 dargestellten Anforderungen des Erdbaus werden für die nachfolgende Beurteilung der Versuchsergebnisse die Grenzwerte aus Tabelle 26 für eine positive Beurteilung festgelegt.

Zur Beurteilung des Luftporenanteils von Mischungen mit Bindemitteln in hohen Mengenverhältnissen ist anzumerken, dass die messbare Korndichte keinen aus dem Mischungsverhältnis (und den einzelnen Korndichten) errechenbaren Wert darstellt.

Bezeichnung	Wert	
Verdichtungsgrad	D_{Pr}	$\geq 97 \%$
Luftporenanteil	n_a	$\leq 12 \%$
Tragfähigkeit	CBR	$\geq 15 \%$

Tab. 26: Kennwerte zur Beurteilung der Ergebnisse

Aus den chemischen Reaktionen des Bindemittels mit dem Wasser und letztlich dem Boden ergeben sich zeitabhängige Strukturveränderungen. Anhand unverdichteter Proben ausgewählter Mischungen wurde die Entwicklung der Korndichte mittels Untersuchungen im Gaspyknometer innerhalb der ersten 72 Stunden dokumentiert.

Für die in Bild 85 dargestellten Versuchsergebnisse wurde der Boden und das Bindemittel im angegebenen Mischungsverhältnis trocken gemischt (ideal homogene Mischung) und darauf folgend Wasser per Hand eingemischt. Die Wassermenge entsprach dabei einem Wassergehalt des Ausgangsbodens von $w_{TL} = 13,5 \%$ und $w_{TL} = 16 \%$. Die Ermittlung der Korndichten der einzelnen Ausgangsmaterialien erfolgte mittels Gaspyknometer. Die Versuche ergaben für den leicht plastischen Ton (TL) eine Korndichte von $\rho_{S,TL} = 2,7595 \text{ g/cm}^3$, für die Braunkohlenflugasche eine Korndichte von $\rho_{S,BFA} = 2,9397 \text{ g/cm}^3$ und für den Weißfeinkalk eine Korndichte von $\rho_{S,WFK} = 2,8845 \text{ g/cm}^3$. Die rechnerische Korndichte der Gemische ist in Bild 85 ebenfalls dargestellt und wurde aus den jeweiligen Einzelkorndichten und dem Mischungsverhältnis ermittelt.

Aus Bild 85 ist ersichtlich, dass bei Bodenverbesserungen mit Bindemitteln in hohen Mischungsverhältnissen der Luftporenanteil nicht vereinfachend auf die Korndichte des Ausgangsbodens oder auf die rechnerische Mischkorndichte bezogen errechnet werden darf. Das bedeutet, dass die Beurteilung des Luftporenanteils solcher Mischungen nicht ohne weiteres möglich ist und somit nachfolgend unterbleibt. Auch bei der Bodenverbesserung mit RC-Material sollte der Korndichte besondere Aufmerksamkeit zukommen. Die Korndichtermittlung von RC-Material führt, je nach Ausbreitung der Prüflüssigkeit im porösen RC-Korn, zu unterschiedlichen Ergebnissen. Mit dem Gas- oder Luftpymeterverfahren werden in der Regel scheinbare Kornrohndichten (siehe DIN EN 1097-6:2013) ermittelt, da die Prüflüssigkeit weit in die wasserzugänglichen Poren eindringen kann. Auf der sicheren Seite liegend kann zur Beurteilung

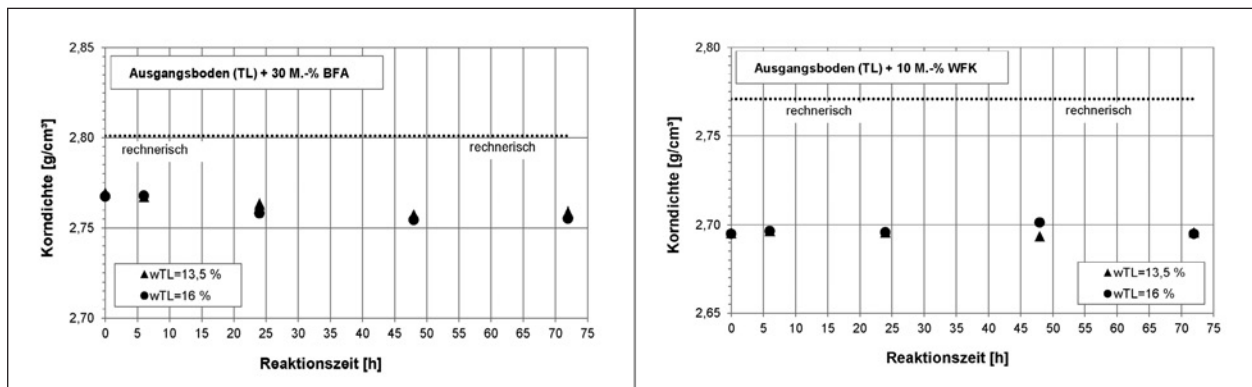


Bild 85: Korndichten am leicht plastischen Ton (TL) mit BFA bzw. WFK

Mischung	$D_{Pr} = 100 \%$					$D_{Pr} = 97 \%$			
	[M.-%]	Δw [%]	I_C [%]	n_a [%]	CBR [%]	Δw [%]	I_C [%]	n_a [%]	CBR [%]
TA	ohne		1,03	+	+		0,92	+	-
	7,5	12,1	0,77	//	+	11,2	0,68	//	+
	10	12,2	0,77	//	+	12,1	0,66	//	+
	12,5	12,6	0,76	//	+	15,5	0,59	//	+
	15	11,7	0,78	//	+	16,3	0,57	//	+
TL	ohne		1,18	+	-		0,95	+	-
	7,5	9,1	0,37	//	+	9,8	0,08	//	-
	10	11,2	0,18	//	+	11,9	-0,11	//	-
	12,5	14,0	-0,07	//	+	14,6	-0,35	//	-
ST*	7,5	9,7		//	+	10,3		//	-
	10	10,7		//	+	11,5		//	-
	15	15,5		//	+	15,3		//	-
GU*	5	3,8		//	+	5,4		//	-
	7,5	k. A.		k. A.	k. A.	k. A.		k. A.	k. A.

Δw Verschiebung der opt. Verarbeitbarkeit im Vergleich zum Ausgangsboden
 I_C Konsistenz des Bodens, bei der dieser unter Anwendung der Verbesserungsmaßnahme optimal verdichtet werden konnte
 k. A. keine Auswertung möglich
 // keine Beurteilung möglich (siehe Anfang des Kapitels)
 + Anforderung erfüllt ($n_a \leq 12 \%$ bzw. $CBR_0 \geq 15 \%$)
 - Anforderung nicht erfüllt ($n_a > 12 \%$ bzw. $CBR_0 < 15 \%$)

Tab. 27: Beurteilung der Ergebnisse zur Verbesserung mit Weißfeinkalk (Knetmischer, 24 Stunden Reaktionszeit)

des Luftporenanteils von Gemischen aus Böden und RC-Materialien die Mischkorndichte aus den so ermittelten Korndichten ermittelt werden.

Die Ergebnisse zur Verbesserung der Böden mit Weißfeinkalk sind in Tabelle 27 zusammengefasst und aus Sicht des Erdbaus beurteilt. Die zusätzlichen Untersuchungen zur Schwellhebung und dem Tragfähigkeitsverlust durch Wasserlagerung zeigen auch bei hohen Zugabemengen keine negative Beeinflussung. Die Untersuchungen zur

Durchlässigkeit weisen darauf hin, dass der verbesserte Boden tendenziell höhere Durchlässigkeiten aufweist als der jeweilige Ausgangsboden. Das Frosthebungsverhalten kann, vor allem nach ausreichender Reaktionszeit des Kalkes im Boden, positiv beeinflusst werden. Die Ergebnisse aus den Versuchen zur zyklischen Destabilisierung weisen darauf hin, dass das maximale dynamische Schermodul durch die Zugabe von Kalk, im Vergleich zum unverbesserten Ausgangsboden, absinken kann.

Mischung		D _{Pr} = 100 %				D _{Pr} = 97 %			
		[M.-%]	Δw [%]	I _C [%]	n _a [%]	CBR [%]	Δw [%]	I _C [%]	n _a [%]
TA	ohne		1,03	+	+		0,92	+	-
	20 ¹	1,1	1,00	//	+	7,2	0,76	//	+
	20 ²	0,1	1,02	//	+	5,8	0,79	//	+
	20 ³	-0,9	1,04	//	+	2,3	0,87	//	+
	30 ¹	3,0	0,96	//	+	10,1	0,70	//	+
	30 ²	1,1	1,00	//	+	8,9	0,73	//	+
	50 ¹	1,3	1,00	//	+	10,3	0,70	//	+
TL	ohne		1,18	+	-		0,95	+	-
	10 ¹	k. A.	k. A.	//	k. A.	k. A.	k. A.	//	k. A.
	20 ¹	1,0	1,08	//	+	6,8	0,35	//	+
	20 ²	8,0	0,46	//	+	11,0	-0,03	//	-
	20 ³	3,7	0,85	//	+	5,1	0,50	//	+
	30 ¹	3,3	0,88	//	+	10,1	0,05	//	+
	30 ²	10,2	0,27	//	+	13,7	-0,27	//	-
	40 ¹	3,7	0,85	//	+	12,1	-0,13	//	+
50 ¹	3,2	0,89	//	+	10,7	0,00	//	+	
ST*	20 ¹	5,0		//	+	10,1		//	+
	30 ¹	12,2		//	+	13,7		//	-
	50 ¹	16,6		//	+	18,3		//	-
GU*	10 ¹	k. A.		//	k. A.	k. A.		//	k. A.
	20 ¹	5,3		//	+	7,7		//	-

¹ Mischung im Knetmischer (24 Stunden Reaktionszeit)
² Mischung im Kutter (24 Stunden Reaktionszeit)
³ Mischung im Kutter (0 Stunden Reaktionszeit)
Δw Verschiebung der opt. Verarbeitbarkeit im Vergleich zum Ausgangsboden
I_C Konsistenz des Bodens, bei der dieser unter Anwendung der Verbesserungsmaßnahme optimal verdichtet werden konnte
k. A. keine Auswertung möglich
// keine Beurteilung möglich (siehe Anfang des Kapitels)
+ Anforderung erfüllt (n_a ≤ 12 % bzw. CBR₀ ≥ 15 %)
- Anforderung nicht erfüllt (n_a > 12 % bzw. CBR₀ < 15 %)

Tab. 28: Beurteilung der Ergebnisse zur Verbesserung mit Braunkohlenflugasche³⁴

Die Ergebnisse zur Verbesserung der Böden mit Braunkohlenflugasche sind in Tabelle 28 zusammengefasst und aus Sicht des Erdbaus beurteilt. Die zusätzlichen Untersuchungen zur Schwellhebung und dem Tragfähigkeitsverlust durch Wasserlagerung zeigen bodenabhängig unterschiedliche Ergebnisse. Die verbesserten Böden weisen in der Regel höhere Durchlässigkeiten auf als unbehan-

deltete Böden. Die hydraulischen Eigenschaften der Braunkohlenflugasche können nach ausreichender Aushärtung zur deutlichen Verbesserung des Frosthebungsverhaltens und zu deutlich höheren maximalen dynamischen Schermodulen führen.

Die Ergebnisse zur Verbesserung der RC-Materialien mit Braunkohlenflugasche sind in Tabelle 29 und Tabelle 30 zusammengefasst und aus Sicht des Erdbaus beurteilt. Die zusätzlichen Untersuchungen zur Schwellhebung und dem Tragfähigkeitsverlust durch Wasserlagerung zeigen unterschiedliche Ergebnisse, je nach Zugabematerial und Boden. Die Verarbeitbarkeit des ausgeprägt plastische

³⁴ Einzelergebnisse, die in Tabelle 28 angeführt sind, aber im Text nicht erwähnt werden, sind diesem Bericht im Anhang beigelegt.

Mischung		$D_{Pr} = 100 \%$				$D_{Pr} = 97 \%$			
	[M.-%]	Δw [%]	I_C [%]	n_a [%]	CBR [%]	Δw [%]	I_C [%]	n_a [%]	CBR [%]
TA	ohne		1,03	+	+		0,92	+	-
	30	1,3	1,00	+	+	2,0	0,87	+	-
	50	0,2	1,02	+	+	2,5	0,86	+	-
TL	ohne		1,18	+	-		0,95	+	-
	20	1,5	1,04	+	-	1,9	0,78	+	-
	30	2,7	0,93	+	-	2,7	0,35	+	-
	40	3,9	0,83	+	-	3,9	0,60	+	-
	50	4,1	0,81	+	-	4,6	0,53	+	-

Δw Verschiebung der opt. Verarbeitbarkeit im Vergleich zum Ausgangsboden
 I_C Konsistenz des Bodens, bei der dieser unter Anwendung der Verbesserungsmaßnahme optimal verdichtet werden konnte
k. A. keine Auswertung möglich
// keine Beurteilung möglich (siehe Anfang des Kapitels)
+ Anforderung erfüllt ($n_a \leq 12 \%$ bzw. $CBR_0 \geq 15 \%$)
- Anforderung nicht erfüllt ($n_a > 12 \%$ bzw. $CBR_0 < 15 \%$)

Tab. 29: Beurteilung der Ergebnisse zur Verbesserung mit RC-Mix 0/32 mm

Mischung		$D_{Pr} = 100 \%$				$D_{Pr} = 97 \%$			
	[M.-%]	Δw [%]	I_C [%]	n_a [%]	CBR [%]	Δw [%]	I_C [%]	n_a [%]	CBR [%]
TA	ohne		1,03	+	+		0,92	+	-
	30	1,9	0,99	+	+	2,1	0,87	+	-
	50	2,3	0,98	+	+	5,5	0,80	+	-
TL	ohne		1,18	+	-		0,95	+	-
	20	2,3	0,97	+	-	2,1	0,76	+	-
	30	4,2	0,80	+	-	4,7	0,53	+	-
	40	5,1	0,73	+	-	5,8	0,43	+	-
	50	6,2	0,62	+	+	6,8	0,34	+	-

Δw Verschiebung der opt. Verarbeitbarkeit im Vergleich zum Ausgangsboden
 I_C Konsistenz des Bodens, bei der dieser unter Anwendung der Verbesserungsmaßnahme optimal verdichtet werden konnte
k. A. keine Auswertung möglich
// keine Beurteilung möglich (siehe Anfang des Kapitels)
+ Anforderung erfüllt ($n_a \leq 12 \%$ bzw. $CBR_0 \geq 15 \%$)
- Anforderung nicht erfüllt ($n_a > 12 \%$ bzw. $CBR_0 < 15 \%$)

Tab. 30: Beurteilung der Ergebnisse zur Verbesserung mit RC-Mix 0/4 mm

Tons konnte mit diesem Verfahren nicht bzw. kaum verbessert werden. Beim leichtplastischen Ton (TL), dessen Verarbeitbarkeit mit diesem Verfahren deutlich erweitert werden konnte, wurden das Schwellungsverhalten und die Tragfähigkeit nach Wasserlagerung sowie das Frosthebeverhalten durch die Zugabe positiv beeinflusst. Dabei wiesen mit RC-Mix 0/32 verbesserte Proben tendenziell höhere Durchlässigkeiten auf als der unbehandelte Boden selbst, durch die Zugabe von RC-Mix 0/4 wurden im Vergleich zum Ausgangsboden niedrige-

re Durchlässigkeiten dokumentiert. Die Zugabe von RC-Mix der Körnung 0/4 mm führte in den Versuchen auch zu einer Erhöhung der maximalen dynamischen Schermodule.

Zwar weisen die Tragfähigkeitsversuche im jeweiligen Optimum der Mischungen mit Boden TL meist nicht die hier geforderten $CBR_0 \geq 15 \%$ auf, doch wurden größtenteils Werte $CBR_0 \geq 10 \%$ gemessen. Bei $D_{Pr} = 97 \%$ (nasse Seite) sind hingegen nur mehr sehr niedrige Tragfähigkeiten dokumentiert.

3.4.3 Bodenverbesserung im Großmaßstab

Allgemeines

Da die Bodenverbesserung mit RC-Körnungen noch kein im Erdbau etabliertes Verfahren darstellt und die Laborversuche für den leicht plastischen Ton vielversprechende Ergebnisse gezeigt hatten, wurden großmaßstäbliche Versuche zur praktischen Durchführbarkeit des Verfahrens durchgeführt. Diese wurden im Sommer 2015 in einer Grube nordwestlich von München realisiert und erfolgten in Zusammenarbeit mit einem lokalen Recyclingunternehmen, der Firmengruppe Ettengruber.

Untersuchungskonzept und Versuchsmaterialien

In Anlehnung an die Laborversuche zur Bodenverbesserung mit RC-Material (siehe Kapitel 3.4.2) sollte ein Boden mit RC-Mix 0/8 mm verbessert werden. Das Material wurde getrennt voneinander in Lagen aufgebracht und im Anschluss durch eine Erdbaufräse vermischt. Der Schichtaufbau des Materials vor dem Fräsen ist in Bild 87 dargestellt. Die dem feinkörnigen Boden unterliegende Schicht aus RC-Mix 0/8 diente in den Versuchen als Pufferschicht zum Untergrund (Frästiefe).

Zwei Probefelder wurden aufeinanderfolgend hergestellt (Versuch 1 und Versuch 2). Bei Versuch 1 wurden zwei Fräsdurchgänge durchgeführt (Fräse Typ CAT RM 500, max. Frästiefe etwa 0,5 m (siehe Bild 87) und die danach verdichtete Oberfläche (Walze Typ BOMAG BW 156 D-3) zusätzlich nach 3 und 6 Walzen-Überfahrten³⁵ untersucht. Da beim ersten Versuch zwischen erstem und zweitem Fräsdurchgang augenscheinlich keine maßgebliche Änderung der Aggregatgrößen erkennbar war, wurde bei Versuch 2 auf den zweiten Fräsdurchgang verzichtet.

Die vorliegenden Untersuchungen am gefrästen und verdichteten Paket umfassen statische Lastplattenversuche, dynamische Lastplattenversuche, dynamische CBR-Versuche und Densitometerversuche zur Bestimmung der Trockendichte. Die Versuchspunkte für die beprobten Oberflächen (Ver-



Bild 86: Die Fräse CAT RM 500 beim durchgeführten Großversuch (Versuch 1); Bewegung von links nach rechts

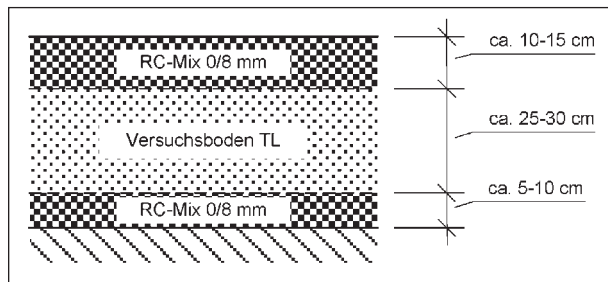


Bild 87: Aufbau des Schichtpaketes vor dem Fräsdurchgang für beide Versuche (Versuch 1 und Versuch 2)

such 1 mit 3 Überfahrten, Versuch 1 mit 6 Überfahrten und Versuch 2 mit 6 Überfahrten) sind in Bild 92 und Bild 96 dargestellt.

Material

Als Versuchsboden wurde ein Material ähnlich jenem aus den Laboruntersuchungen (Versuchsboden TL) verwendet, beide Materialien entstammen der Kieswäsche und wurden mittels Kammerfilterpresse entwässert. Der in den Großversuchen verwendete Boden weist allerdings im Vergleich zu jenem in den Laborversuchen verwendeten Ton (TL) eine höhere Fließgrenze auf und nähert sich somit den Eigenschaften eines mittelplastischen Tons. Zugemischt wurde diesem Boden ein RC-Mix der Körnung 0/8 mm. Die Sieblinien der Materialien und die Einordnung des Versuchsbodens im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196 sind in Bild 88 dargestellt.

Der verwendete RC-Mix 0/8 entspricht bis auf das Größtkorn dem in den Laborversuchen (siehe Kapitel 3.4.2) verwendeten Material. Untersuchungen eines externen Prüfinstitutes (im Auftrag des Herstellers) zufolge handelt es sich um Material der Güteklasse RW1 (offener Einbau; uneingeschränkt verwertungsfähiges Material unter Beachtung der im Leitfaden aufgeführten Bedingungen) gemäß Leitfaden des Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz zu

³⁵ Der Begriff „Überfahrt“ entspricht dabei einer tatsächlichen Überfahrt (Hin- oder Rückfahrt) mit dynamischer Verdichtung.

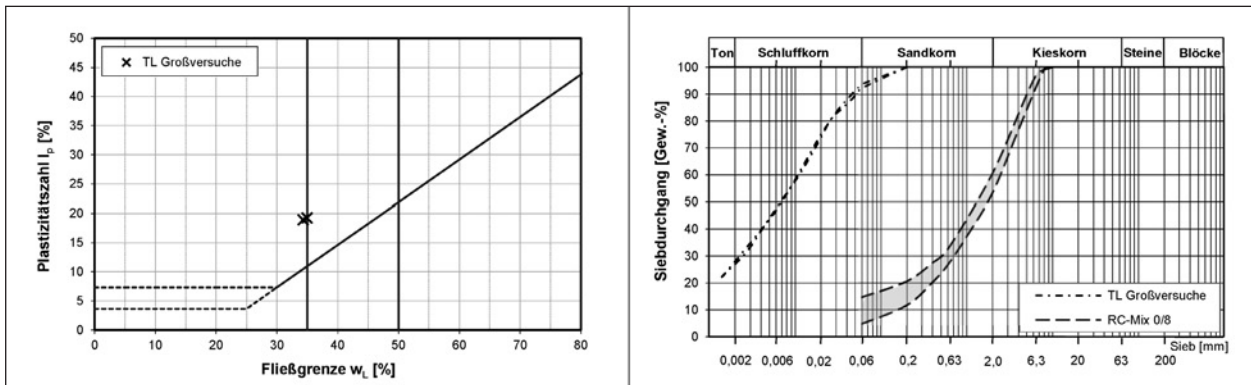


Bild 88: Versuchsboden im Plastizitätsdiagramm und Sieblinien der Materialien

Anforderungen an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken [11].

Untergrund

Vorab wurden auf der Versuchsfläche (verdichteter RC-Beton 0/45 mm auf Auffüllung) erkundende Versuche durchgeführt. Die vier im Nahbereich der Versuchsfläche realisierten Rammsondierungen (leichte Rammsonde; DPL-5) wiesen durchwegs hohe bis sehr hohe Schlagzahlen aus (mind. 15 Schläge, größtenteils aber über 50 Schläge) und mussten bei 60 bis 120 cm Rammtiefe abgebrochen werden. Ebenfalls im Bereich des Versuchsfeldes durchgeführte statische Lastplattenversuche (2 Stk.) weisen E_{v1} -Werte zwischen etwa 60 und 85 MN/m² und E_{v2} -Werte zwischen etwa 430 und 600 MN/m² auf. Mittels dynamischer Lastplatte wurden 6 Versuche im Bereich des Versuchsfeldes durchgeführt und E_{vd} -Werte zwischen 105 und 133 MN/m² dokumentiert. Die erzielten Werte des dynamischen Plattendruckversuch überschreiten dabei den in TP BF-StB Teil 8.3 [63] für diesen Versuch angegebenen Gültigkeitsbereich (15 bis 70 MN/m²).

Versuch 1

Beim ersten Versuch lag der leicht plastische Boden mit einem Wassergehalt von etwa 18 % vor (vgl. Bild 91). Das damit aufgebaute Schichtpaket (Bild 87) wurde in zwei Fräsübergängen vermischt (Bild 86). Zwischen dem ersten und zweiten Übergang der Fräse wurde keine augenscheinlich auffällige Änderung der Aggregatgrößen erkannt. Die maximale Aggregatgröße betrug in beiden Fällen etwa 20 bis 30 mm (siehe Bild 89).

Die dynamische Verdichtung erfolgte direkt im Anschluss an den zweiten Fräsdurchgang mit erst

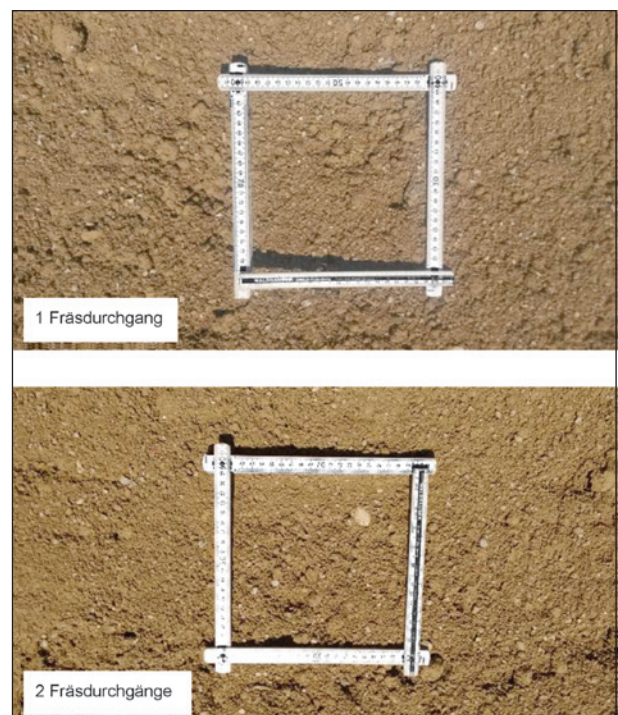


Bild 89: Das Ergebnis der Fräsung im Versuch 1 nach 1 und 2 Fräsdurchgängen



Bild 90: Verdichtung des gefrästen Schichtpaketes

drei Verdichtungsübergängen (siehe Bild 90) und nach Beprobung drei weiteren Verdichtungsübergängen.

Das tatsächliche Mischungsverhältnis des Gemisches konnte vorab nur geschätzt werden und wurde nach den Versuchen aus den Sieblinien der Ausgangsmaterialien und des Gemisches rekonstruiert. Demnach entspricht das Mischungsverhältnis einem Verhältnis Boden zu Zugabe von etwa 100 : 125, bezogen auf die jeweiligen Trockenmassen. Das verdichtete Gemisch wies bei diesem hohen Mischungsverhältnis immer noch einen Feinanteil von über 40 M.-% auf. Es war also nicht von einem tragenden Grobkorngerüst auszugehen (siehe Kapitel 3.3.5).

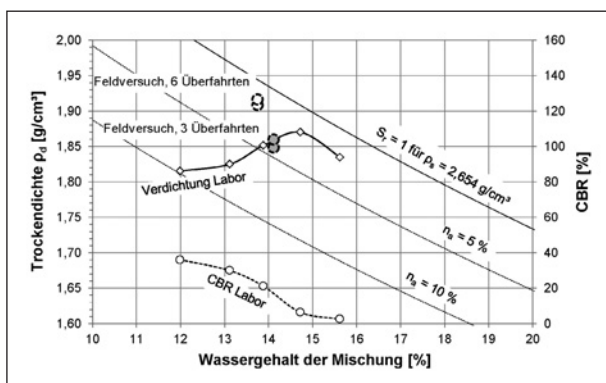


Bild 91: Verdichtungskurve des verbesserten Bodens und erreichte Verdichtung im Großversuch

Mit dem ermittelten Mischungsverhältnis wurde nachträglich im Labor die zugehörige Proctorkurve erstellt. Diese ist in Bild 91 mit den Ergebnissen der Densitometerversuche und Wassergehaltsbestimmungen dargestellt.

Die Beprobung des Versuchsfeldes wurde im Anschluss an die jeweiligen Verdichtungsüberfahrten durchgeführt. Die Aufteilung der Versuchspunkte erfolgte so, dass kein Punkt planmäßig zweimal zu beproben war. Das Versuchsfeld und der zugehörige Versuchsraster sind in Bild 92 dargestellt.

Nach 3 Walzenüberfahrten wurden an den Versuchspunkten A2 und G2 Dichtebestimmungen mittels Densitometer durchgeführt. Die ermittelten Trockendichten (ρ_d) können mit 1,85 g/cm³ (A2) und 1,86 g/cm³ (G2) angegeben werden. Die Ergebnisse von zwei Lastplattenversuchen auf der Oberfläche der verdichteten Schicht sind in Tabelle 31 dargestellt.

Gleichzeitig erfolgten Versuche mit dynamischer Lastplatte auf der verdichteten Ebene. Die Ergebnisse der 5 Versuche schwanken zwischen 14 und 27 MN/m². Die Einzelergebnisse sind in Tabelle 32 zusammengefasst.

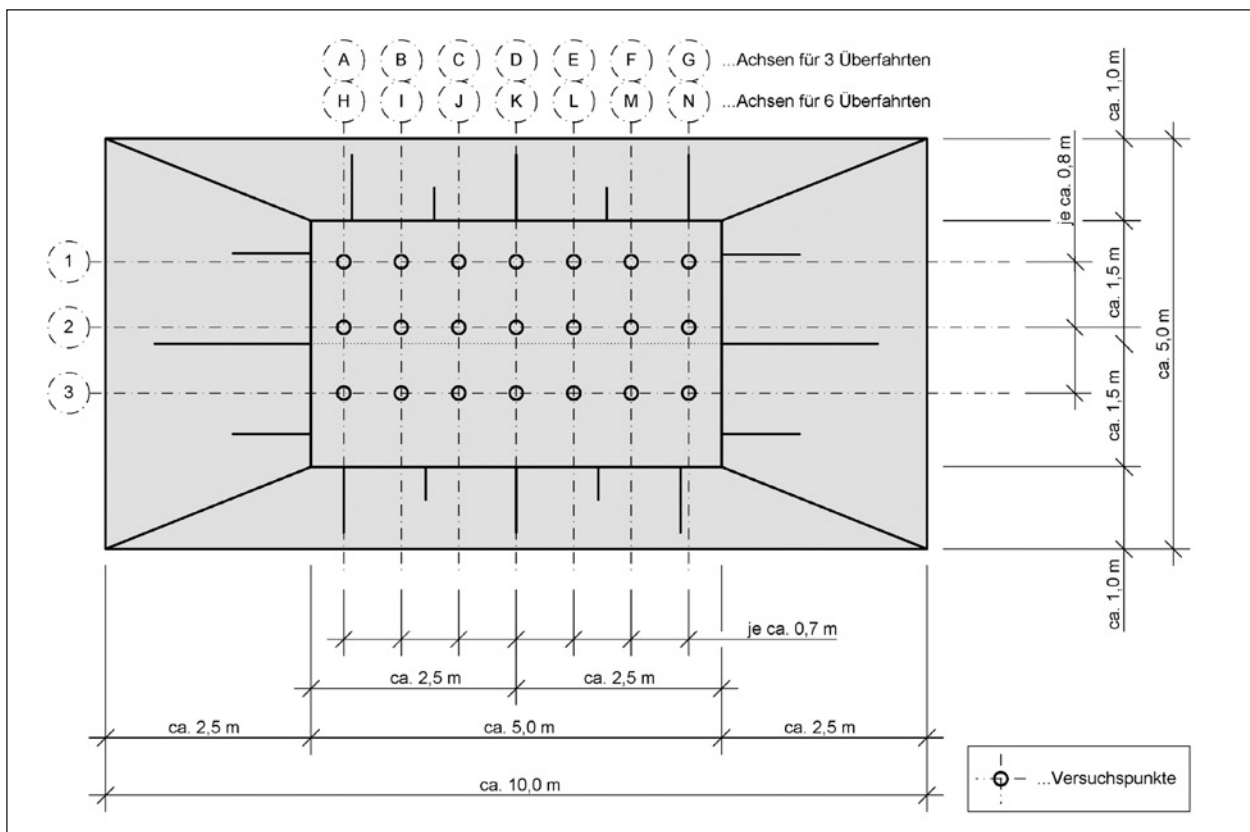


Bild 92: Versuchsraster zu Versuch 1 der Großversuche zur Bodenverbesserung um RC-Mix 0/8 mm

Nach 3 weiteren Walzenüberfahrten (also insgesamt 6 Walzenübergängen) wurden an den Versuchspunkten J2 und L2 weitere Dichtebestimmungen mittels Densitometer durchgeführt. Die ermittelten Trockendichten (ρ_d) können mit $1,92 \text{ g/cm}^3$ (J2) und $1,91 \text{ g/cm}^3$ (L2) angegeben werden (dargestellt in Bild 91). Die Ergebnisse der Lastplattenversuche auf der Oberfläche der verdichteten Schicht sind in Tabelle 33 dargestellt.

Gleichzeitig erfolgten wiederum Versuche mit dynamischer Lastplatte. Die Ergebnisse der 4 Versuche

Versuchspunkt	statische Lastplatte		
	E_{v1} [MN/m ²]	E_{v2} [MN/m ²]	E_{v2}/E_{v1} [-]
G3	9,7	49,1	5,1
A3	11,4	53,5	4,7

Tab. 31: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 3 Walzenübergängen

Versuchspunkt	dynamische Lastplatte		
	s_{max} [mm]	s_{max}/v_{max} [s]	E_{vd} [MN/m ²]
C1	0,961	4,604	23,9
E1	1,604	5,676	14,0
G2	1,576	5,967	14,3
B3	0,850	4,377	26,5
F3	1,217	4,392	18,5

Tab. 32: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 3 Walzenübergängen

Versuchspunkt	statische Lastplatte		
	E_{v1} [MN/m ²]	E_{v2} [MN/m ²]	E_{v2}/E_{v1} [-]
J3	13,9	54,0	3,9
L3	9,5	35,1	3,7

Tab. 33: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen

Versuchspunkt	dynamische Lastplatte		
	s_{max} [mm]	s_{max}/v_{max} [s]	E_{vd} [MN/m ²]
K1	1,859	5,385	12,1
H1	0,943	4,229	23,9
K3	1,258	5,292	17,9
N1	1,499	6,001	15,0

Tab. 34: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen

schwanken zwischen 12 und 24 MN/m². Die Einzelergebnisse sind in Tabelle 34 zusammengefasst.

Durch die zusätzlichen 3 Walzenübergänge konnte eine weitere Erhöhung der Trockendichte erzielt werden. Warum die Versuchswerte der Lastplattenversuche gleichzeitig eher absinken, ist schwer zu deuten. Es wird vermutet, dass die durch die starke Sonneneinstrahlung bedingte Austrocknung der Oberfläche zwischen den ersten 3 Walzenübergängen und den weiteren Walzenübergängen zu den dokumentierten Ergebnissen führte.

Versuch 2

Für Versuch 2 wurde abermals die Unterlage aus RC-Mix 0/8 aufgebracht und darauf der leicht plastische Ton ausgelegt. Im Anschluss daran erfolgte die Zugabe von Wasser zur Erhöhung des Ausgangswassergehaltes (Bild 93, oben) und in zwei Durchgängen das Einfräsen dieses Wassers in den Boden (Bild 93, unten). Der feinkörnige Boden wies nach der Bewässerung einen Wassergehalt von etwa 21,9 % auf (deutlich auf der nassen Seite seines Verdichtungsoptimums, vgl. Bild 95).

Nach dem zweiten Fräsdurchgang wurde die Geometrie des Versuchsfeldes durch den Hydraulikbagger wieder hergestellt und die obere Lage RC-Mix 0/8 gemäß dem in Bild 87 dargestellten Schichtpa-



Bild 93: Wasserzugabe zum leicht plastischen Ton und Einfräsen des zugegebenen Wassers mit 2 Fräsdurchgängen

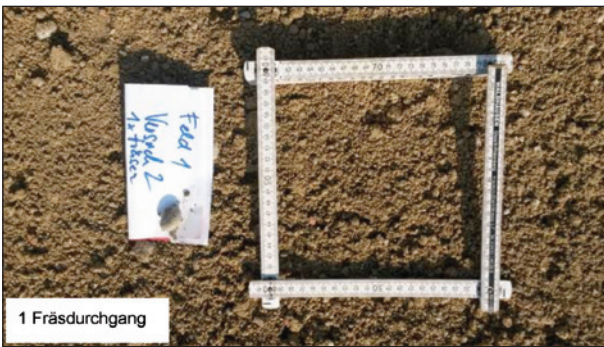


Bild 94: Das Ergebnis der Fräsung im Versuch 2 nach 1 Fräsdurchgang

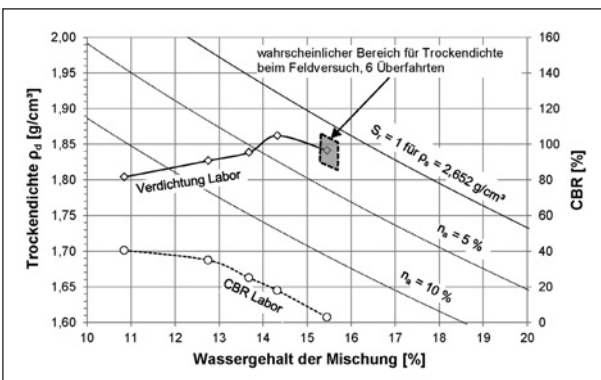


Bild 95: Verdichtungskurve des verbesserten Bodens und erreichte Verdichtung im Großversuch

ket aufgetragen. Im Anschluss erfolgte der Fräsdurchgang, bei dem die Materialien des Schichtpaketes miteinander vermischt wurden.

Die dynamische Verdichtung erfolgte direkt im Anschluss an den Fräsdurchgang mit 6 Verdichtungsübergängen. Das tatsächliche Mischungsverhältnis des Gemisches konnte vorab nur geschätzt werden und wurde nach den Versuchen aus den Sieblinien der Ausgangsmaterialien und des Gemisches rekonstruiert. Demnach entsprach das Mischungsverhältnis einem Verhältnis Boden zu Zugabe von etwa 100:135, bezogen auf die jeweiligen Trockenmassen. Das verdichtete Gemisch wies bei diesem hohen Mischungsverhältnis immer noch einen Feinanteil von über 40 M.-% auf. Es war also wiederum nicht von einem tragenden Grobkorngerüst auszugehen (siehe Kapitel 3.3.5).

Mit dem ermittelten Mischungsverhältnis wurde nachträglich im Labor die zugehörige Proctorkurve erstellt. Diese ist in Bild 95 dargestellt.

Die Beprobung des Versuchsfeldes wurde im Anschluss an die Verdichtungsüberfahrten durchgeführt. Das Versuchsfeld und der zugehörige Versuchsraster sind in Bild 96 dargestellt.

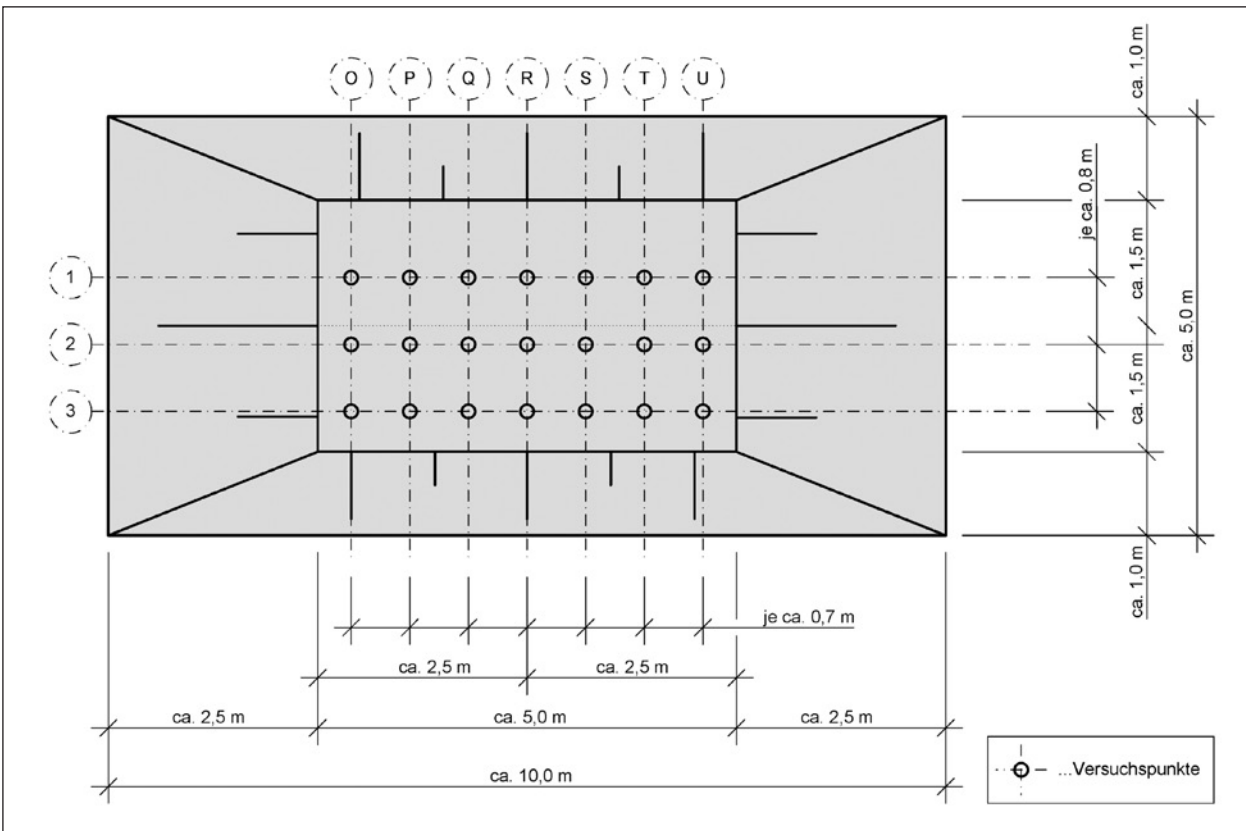


Bild 96: Versuchsraster zu Versuch 2 der Großversuche zur Bodenverbesserung um RC-Mix 0/8 mm

Versuchspunkt	statische Lastplatte		
	E_{v1} [MN/m ²]	E_{v2} [MN/m ²]	E_{v2}/E_{v1} [-]
S3	6,7	38,3	5,7
Q3	11,4	47,8	4,2

Tab. 35: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen

Versuchspunkt	dynamische Lastplatte		
	s_{max} [mm]	s_{max}/v_{max} [s]	E_{vd} [MN/m ²]
O3	1,958	6,956	11,49
P1	1,81	6,541	12,43
P3	1,736	5,887	12,96
R1	1,828	5,916	12,31
T1	3,175	6,931	7,09
T3	1,52	5,168	14,8

Tab. 36: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen

Die mittels Densitometerversuch ermittelten Trockendichten konnten aufgrund eines Ablesefehlers leider nicht ausgewertet werden. Der am Gemisch bestimmte Wassergehalt des Gemisches liegt bei etwa 15,4 % und weist im Zusammenhang mit der eingebrachten Verdichtungsenergie (6 Walzenübergänge, vgl. Bild 91) aber darauf hin, dass bei der Verdichtung eine Trockendichte nahe der Sättigungstrockendichte erreicht wurde. Die Ergebnisse von zwei Lastplattenversuchen auf der Oberfläche der verdichteten Schicht sind in Tabelle 35 dargestellt.

Gleichzeitig erfolgten Versuche mit dynamischer Lastplatte auf der verdichteten Ebene. Die Ergebnisse der 6 Versuche schwanken zwischen 7 und 15 MN/m² und bewegen sich damit unterhalb des Anwendungsbereichs dieses Verfahrens (15 bis 70 MN/m²). Die Einzelergebnisse sind in Tabelle 36 zusammengefasst.

Nach 3 Wochen offener Liegezeit (Juli 2015; Hitzeperiode mit sporadischen Wärmegewittern) wurde die Oberfläche erneut mittels statischem und dynamischem Lastplattengerät untersucht. Die Versuchspunkte lagen dabei jeweils in der Mitte eines Feldes, das durch vier Punkte des Punktrasters in Bild 96 aufgespannt wird. Die nachfolgende Zuordnung der Versuchspunkte erfolgt über die Angabe dieser 4 Punkte. In Tabelle 37 sind die Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche zusammengefasst.

Versuchspunkt	statische Lastplatte		
	E_{v1} [MN/m ²]	E_{v2} [MN/m ²]	E_{v2}/E_{v1} [-]
Q1, Q2, R1, R2	45,7	251,2	5,5
T2, T3, U2, U3	44,7	200,6	4,5
O1, O2, P1, P2	44,7	203,6	4,6

Tab. 37: Nachuntersuchung zu Versuch 2; Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche

Versuchspunkt	dynamische Lastplatte		
	s_{max} [mm]	s_{max}/v_{max} [s]	E_{vd} [MN/m ²]
T1, T2, U1, U2	0,2135	2,067	95,74
T2, T3, U2, U3	0,207	2,342	108,7
S1, S2, T1, T2	0,187	2,264	120,32
S2, S3, T2, T3	0,285	2,234	78,95
P1, P2, Q1, Q2	0,2	2,217	112,5
P2, P3, Q2, Q3	0,355	2,289	63,38

Tab. 38: Nachuntersuchung zu Versuch 2; Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche

Die im Vergleich zur sofortigen Beprobung stark angestiegenen Tragfähigkeiten werden auf die Abtrocknung des Materials im Laufe der Liegezeit zurückgeführt. Das Material lag im Versuchsquerschnitt zwar immer noch „erdfeucht“ vor, dürfte aber zum Versuchszeitpunkt einen Hauptteil seiner Bildsamkeit verloren haben. Die durchgeführten Versuche mit dem leichten Fallgewichtsgerät (Tabelle 38) zeigen größtenteils Werte über dem gültigen Anwendungsbereich dieses Verfahrens (15 bis 70 MN/m²).

Beurteilung der Großversuche

Die Verdichtung des gemischten Materials erfolgte nach Bild 91 und Bild 95 bei beiden Versuchsfeldern ausreichend nahe am Verdichtungsoptimum; die Anforderungen an den Verdichtungsgrad und den Luftporenanteil wurden eingehalten (siehe Kapitel 3.3.1). Auffällig sind jedoch die Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche als indirektes Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle. Vor allem die dokumentierten Erstverformungsmoduln (E_{v1}) der direkt im Anschluss an die Verdichtung durchgeführten Versuche zeigen niedrige Werte zwischen 8 und 14 MN/m². Da für die Zweitverformungsmoduln (E_{v2}) aber jeweils Werte zwischen 35 und 54 MN/m² ermittelt wurden, ergaben sich insgesamt sehr hohe Werte für E_{v2}/E_{v1} von 3,7 bis 5,7. Es fällt außerdem auf, dass dieses Charakteristikum auch bei der

Nachuntersuchung (3 Wochen nach Verdichtung) erhalten blieb. Worauf diese hohen Verhältniswerte zurückgeführt werden können oder ob diese ein Charakteristikum der vorliegenden Struktur solcher Mischungen ist, ist derzeit nicht geklärt.

Zusammenfassend kann die praktische Mischbarkeit von RC-Material und Boden anhand der durchgeführten der Großversuche bestätigt werden. Der Boden konnte mit und ohne Zugabe von RC-Material gefräst werden. Es wurden insgesamt mehrere Fräsdurchgänge zum Einfräsen des Wassers nach Bewässerung und auch mehrere Fräsdurchgänge zur Einmischung von großen Mengen an RC-Material ohne besondere Auffälligkeiten durchgeführt. Der dabei dokumentierte Mischerfolg ist mit dem aus den Laborversuchen augenscheinlich vergleichbar.

3.4.4 Maschinentechnische Entwässerung³⁶

Allgemeines und Material

Für die Untersuchungen von Böden hinsichtlich ihrer maschinentechnischen Entwässerbarkeit wurden nach Durchführung einer Reihe von Tastversuchen und der Auswertung einer diesbezüglichen Literaturrecherche ein leicht und ein ausgeprägt plastischer Boden (Böden TL und TA; siehe Kapitel 3.4.2) untersucht. Mechanische Entwässerungsversuche an gemischtkörnigen Böden wie einem GU*, welche angedacht waren, haben sich als technisch nicht machbar erwiesen, deshalb wurden zur Vervollständigung der Versuchsreihen weitere Böden mit in die Untersuchungen aufgenommen. Interessant und zielführend waren hier Böden mit einer geringeren Plastizität als der TA. Es wurden zusätzlich zwei Böden mittlerer Plastizität (jeweils TM gem. DIN 18196), nachfolgend TM1 und TM2 genannt, in das Versuchsprogramm aufgenommen. Die Ergebnisse der klassifizierenden Versuche an diesen Böden sind in Tabelle 39 zusammenfassend dargestellt, jene der Böden TA und TL sind in Kapitel 3.4.2 beschrieben.

Da die ablaufenden Prozesse (Flüssigkeitstransport, Wärmetransport, Bindung von Wasser) beim Entwässern von Böden sowohl von Stoffeigenschaften (Korngrößenverteilung, Kornform, Feststoffdichte, Fluidichte, Viskosität, Widerstand der

Boden	TM1	TM2
Kennwert	[EH]	
Fließgrenze w_L [DIN 18122]	36,8	44,33
Ausrollgrenze w_P [DIN 18122]	21,7	18,6
Plastizitätszahl I_P [DIN 18122]	15,1	25,6
Korndichte ρ_s [DIN 18124]	2,713	2,718
Kornanteil [DIN 18123]		
≤ 0,002 mm	10	31
≤ 0,06 mm	88	97
≤ 2 mm	99	100

Tab. 39: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an den zusätzlich untersuchten feinkörnigen Böden

durchströmten Schüttung) als auch von technischen Parametern (zum Beispiel Filtermittelwiderstand, Prozessraumgeometrie) abhängen, ist eine theoretische Betrachtung schwer möglich. Laborversuche waren notwendig, um die Machbarkeit nachzuweisen und Kenngrößen zu ermitteln, die eine Überführung der Prozesse in den technischen Maßstab ermöglichen. Um die Entwässerungsmöglichkeiten der Böden zu untersuchen, kam den Verfahren der Sedimentation im Zentrifugalfeld sowie der kuchenbildende Filtration eine besondere Bedeutung zu, da diese bei den Tastversuchen das größte Potenzial versprachen.

Dabei wurden sowohl bei der Zentrifugation als auch bei der Filtration Versuche im Labor- und im Technikumsmaßstab durchgeführt. Die Technikums-Versuche zur Filtration erfolgten im Technikum der Kaolinwerke Kemmlitz mit einer Kammerfilterpresse, die Zentrifugationsversuche wurden durch die Fa. Flottweg SE mit einer mobilen Anlage an der HS Zittau-Görlitz in Zittau durchgeführt. Im Labor kam das Gerät ROTINA 380 für die Zentrifugation zum Einsatz. Die Filtrationsversuche im Labor erfolgten mittels Handfilterplatte.

Sedimentation im Schwerkräftfeld

Bei der Sedimentation setzen sich die in einer Suspension enthaltenen Partikel unter der Wirkung der Schwerkraft ab und bilden einen Dickschlamm, den man, wie die geklärte Flüssigkeit, kontinuierlich oder diskontinuierlich abziehen kann. Untersucht wurde die Sedimentation im Gravitationsfeld. Die Bodenproben TA und TL wurden mit destilliertem Wasser zu einer Suspension mit einem Feststoffgehalt von 2 Vol.-% präpariert. Als Flockungsmittel

³⁶ Bearbeitung durch das iTN Zittau.

wurde ein Polyacrylamid (Synthofloc 5860V) eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein organisches Flockungsmittel, welches durch aktive Zentren an einem Makromolekül das Anhaften der Partikel ermöglicht und so zu Konglomeration führt. Nach Aufnahme der Sedimentationskurven konnte die Sedimentationsgeschwindigkeit ermittelt werden. Bei dem Boden TA hat das verwendete Flockungsmittel keinen Einfluss auf das Sedimentationsverhalten. Die ermittelten Sedimentationsgeschwindigkeiten lagen zwischen 0,71 und 0,75 m/s. Der mit Flockungsmittel versetzte Boden TL zeigt eine deutliche Flockenbildung und eine höhere Kompression im Vergleich zur unbehandelten Probe. Ohne Flockungsmittelzugabe konnte eine Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,60 m/s ermittelt werden. Durch die Zugabe von Flockungsmittel wurde sie auf 1,05 m/s erhöht.

Diese Ergebnisse zeigen eine prinzipielle Machbarkeit, Sedimentation im Schwerfeld als erste Entwässerungsstufe einzusetzen und durch weitere Entwässerungsstufen (Filtration, Zentrifugation) zu ergänzen. Um eine Optimierung der Sedimentationszeit zu erhalten, sind weitere Untersuchungen im Zentrifugalfeld durchgeführt worden.

Allgemeines zur Zentrifugierung

Bei dem Verfahren der Sedimentation im Zentrifugalkraftfeld (Zentrifugierung) arbeitet die Zentrifuge unter Ausnutzung der Massenträgheit, dabei wandern die Partikel mit höherer Dichte aufgrund ihrer höheren Trägheit nach außen. Dadurch verdrängen sie die Bestandteile mit niedrigerer Dichte, die hierdurch zur Mitte gelangen. Dieser Prozess ist gegenüber der Sedimentation durch die Schwerkraft wesentlich schneller bzw. wird überhaupt erst möglich. Gegenkräfte wie die Adhäsion, die thermische Molekularbewegung oder die Viskosität werden überwunden. Die Beschleunigung ist von der Dichte der Stoffe unabhängig. Jedoch ist die Zentripetalkraft umso größer, je höher die Dichte des Stoffes ist. Die Stofftrennung erfolgt aufgrund der Dichteunterschiede.

Zentrifugierung im Labormaßstab

Die Untersuchung der Wassergehaltsreduzierung für die zu untersuchenden Ausgangsböden TL, TM1, TM2 und TA mittels Zentrifugation mit dem Gerät Rotina 380R erfolgte durch eine Variation des Ausgangswassergehaltes, der Zentrifugalbeschleunigung sowie der Dauer der Zentrifugation.



Bild 97: Laborzentrifuge: Fa. Hettich, Typ Rotina 380R

Die Durchführung der Versuche erfolgte immer mit dem gleichem Bewegungsprofil 9/1 (Anfahrzeit 40 s, langsames Abbremsen), die Drehzahl wurde in sechs Schritten auf eine maximale Zentrifugalbeschleunigung des 16.000-fachen der Erdbeschleunigung ($16.000 \cdot g$) gesteigert, wobei g für die Erdbeschleunigung steht, die Zeitintervalle betragen 5, 10 und 30 min. Das Gewicht der Probenmasse lag bei ca. 30 g und wurde in 50 ml Zentrifugenbehälter aus Kunststoff abgefüllt. Die Gewichtsbestimmung erfolgte mit der Waage Sartorius BL1500. Alle Versuche wurden unter der natürlichen Umgebungstemperatur der Halle von 20 – 22 °C durchgeführt.

Die Ausgangswassergehalte wurden in der 1. Versuchsreihe für alle Böden jeweils auf einen Wert von $w = 1,0 \cdot w_L$ bis $1,05 \cdot w_L$ gesetzt und entsprachen damit etwa einer Konsistenzzahl $I_C = 0$. Für die 2. Versuchsreihe wurden die Wassergehalte erhöht auf einen Wert, der etwa bei $w = 1,40 \cdot w_L$ und damit im leicht flüssigem Bereich lag. Die Zeitintervalle bei den ersten Versuchen, welche mit den Böden TL und TA durchgeführt wurden, betragen 5 und 10 min. Um den Einfluss der Zentrifugierdauer besser zu bestimmen, wurden bei allen Folgeversuchen die Intervalle auf 30 min erhöht.

Versuche mit geringeren Wassergehalten ($I_C > 0$), bei denen die Böden im plastischem Bereich liegen,

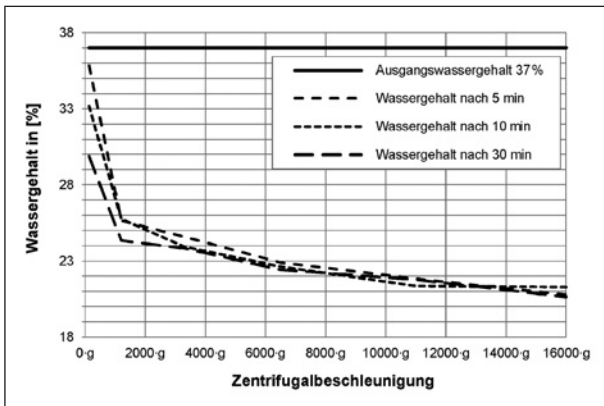


Bild 98: Entwässerung durch Zentrifugation Boden TL mit Anfangswassergehalt 37 % (Versuchsreihe 2)

sind im Labormaßstab zwar möglich, wurden hier aber nicht weiter untersucht, da Anlagen im Großmaßstab immer eine pumpfähige Suspension benötigen. So wurden bei den mechanischen Entwässerungsversuchen nur Böden untersucht, welche eine Konsistenzzahl $I_C \leq 0$ aufwiesen.

Für die Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten feinkörniger Böden mittels Laborzentrifuge wurden 22 Versuchsreihen mit jeweils 6 Versuchen durchgeführt und ausgewertet. Für jeden Versuch wurden 3 Proben untersucht, aus denen jeweils ein repräsentativer Mittelwert gebildet wurde.

Die Einzelergebnisse zu allen Versuchen sind im Anhang diesem Bericht beigefügt, dabei wird der Einfluss der Zentrifugalbeschleunigung, der Zentrifugierdauer und des Wassergehalts dargestellt. Dazu wurden für jeden Boden mit dem jeweilig definierten Wassergehalt und einer Dauer von 5, 10 und 30 min die Zentrifugation mit sechs verschiedenen Zentrifugalbeschleunigungen zwischen 130-g und 16.000 g durchgeführt. In Bild 98 wird beispielhaft das Entwässerungsverhalten des leichtplastischen Bodens TL mit einem Ausgangswassergehalt von 37 % in Abhängigkeit von der Dauer der Zentrifugation und der wirkenden Kraft dargestellt.

Generell kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass mit steigender Zentrifugalbeschleunigung der Wassergehalt des Probekörpers deutlich abnimmt, wobei leichtplastische Tone bereits bei geringen Drehzahlen ein gutes Entwässerungsverhalten zeigen, wohingegen die ausgeprägt plastischen Tone eine kontinuierlich zunehmende Entwässerung mit zunehmender Zentrifugalbeschleunigung aufweisen.

Die Dauer der Zentrifugation spielt ebenfalls eine Rolle, so wird mit Erhöhung der Zentrifugierdauer

Ausgangsboden	TL	TA	TM1	TM2
Versuchsreihe 1 mit $I_C = 0$				
Ausgangs-WG [%]	27	76	40	50
Zentrifugierdauer	Wassergehalte nach Zentrifugation [%]			
5 min	17	47	26	33
10 min	17	43	30	29
30 min	-	-	26	26
Versuchsreihe 2 mit $I_C < 0$				
Ausgangs-WG [%]	37	96	47	60
Zentrifugierdauer	Wassergehalte nach Zentrifugation [%]			
5 min	21	50	31	34
10 min	21	46	31	31
30 min	21	46	30	28

Tab. 40: Übersicht der Wassergehalte in Abhängigkeit von Ausgangswassergehalt und Zentrifugierdauer für den TL, TM1, TM2 und TA

ein definierter Wassergehalt bereits bei geringeren Drehzahlen erreicht. Auf den Endwassergehalt bei der maximalen Zentrifugalbeschleunigung von 16.000 · g hat die Dauer jedoch nur einen geringen Einfluss, hier bringt die Erhöhung auf 30 min keine zusätzliche Absenkung des Wassergehalts (siehe Tabelle 40). Eine längere Zentrifugierdauer bringt also vor allem bei niedrigen Drehzahlen einen Entwässerungseffekt.

Die durchgeführten Laborversuche haben gezeigt, dass die Zentrifugation ein mögliches Verfahren zur Entwässerung von Tonen darstellt. Das Produkt ist ein entwässertes und transportfähiger Boden, welcher einer weiteren Verwendung zugeführt werden kann. Allerdings liegen die erreichbaren Werte bei allen untersuchten Böden über dem Proctorwassergehalt. Dieser beträgt 13,5 % beim Ausgangsboden TL, durch das Zentrifugieren konnten Werte für den Wassergehalt von 17 % erreicht werden. Beim Ausgangsboden TA liegen die erreichten Werte bei 43 %, der Proctorwassergehalt beträgt hier 25,6 %.

Zentrifugierung im Technikumsmaßstab

Aufgrund der Ergebnisse bei der Entwässerung durch Zentrifugierung im Labormaßstab wurden die Untersuchungen auf Technikums-Ebene ausgeweitet. Hier wurden an den beiden Böden TL und TA Versuche hinsichtlich einer maximal möglichen Was-

sergehaltsreduzierung unter Bedingungen durchgeführt, welche auch bei einer Entwässerung im Rahmen einer Großproduktion möglich sind.

Unter den am Markt agierenden Herstellern von mechanischen Entwässerungsanlagen wurde eine Firma ausgewählt, welche in der Lage ist, mit einer mobilen Anlage die notwendigen Bedingungen zu realisieren. Für die Durchführung der Versuche wurde die Fa. Flottweg SE aus Vilsbiburg mit der Versuchsanlage Flottweg Dekanter Z23-3 beauftragt (siehe Bild 99).

Im Ergebnis der Voruntersuchungen, welche im Labor durchgeführt wurden um eine Optimierung des Entwässerungsprozesses zu erreichen, wurde eine Tonsuspension in einer Zulaufkonzentration von 10 bis 30 M.-% (Anteil Trockensubstanz an der Suspension) und einem geringen Einsatz von Flockungsmitteln als optimale Voraussetzung für die Zentrifugation ermittelt.

Um den Einfluss der einzelnen Parameter auf den Entwässerungsvorgang zu untersuchen, wurden an der mobilen Zentrifugiereinheit die Werte für den Wassergehalt der Zulauf suspension, die Trommeldrehzahl, sowie der Durchsatz pro Zeiteinheit im Rahmen von insgesamt 27 Versuchseinstellungen variiert. Außerdem wurden zum Vergleich einige Versuche unter Zugabe eines Flockungsmittels durchgeführt. Zur Beurteilung des Prozesses wurden je Versuchseinstellung repräsentative Proben des Zulaufs, des Ablaufs und des Feststoffaustrags genommen.

In Tabelle 41 sind die einzelnen Versuchseinstellungen und die zugehörigen Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. In den Versuchseinstellungen 1 – 9 kam der Boden TL zum Einsatz, bei welchem die Suspension in den Konzentrationen 35 und 9 M.-% angesetzt wurde. Die Chargen konnten gut entwässert werden. Es wurden Abscheidegrade von nahezu 100 % bei einer Feststoff-Trockensubstanz (TS) von bis zu 80 M.-% erreicht, was einem Wassergehalt (WG) von etwa 25 % entspricht³⁷. Mit der geringeren Feststoffkonzentration im Zulauf lie-



Bild 99: Mobile Versuchsanlage mit Flottweg Dekanter

ßen sich tendenziell die besseren Werte erreichen. Auf die Zugabe von Flockungsmitteln wurde bei diesem Boden verzichtet, da dies aufgrund des guten Entwässerungsverhalten und der ohnehin hohen Abscheidegrade nicht notwendig war.

In den Versuchseinstellungen 10 – 27 wurde mit dem Boden TA gearbeitet. Hierbei zeigte sich, dass mit einer Konzentration von 21 M.-% nur bei hoher Trommeldrehzahl (TDZ) und einem geringen Durchsatz eine akzeptable Trennung möglich ist. Mit einer geringen Zulaufkonzentration konnte bei hohen Drehzahlen und einem geringen Durchsatz ein Abscheidegrad um die 93 % bei einem Feststoff-TS-Wert bis zu 58 M.-% erreicht werden. Da in diesen Versuchen das Filtrat jederzeit deutliche Spuren von Feststoffpartikeln aufwies, kam für die nachfolgenden Versuche 20 – 27 das Flockungsmittel Magnafloc 155 zum Einsatz, dabei konnte der Abscheidegrad auf 98 % angehoben werden. Der Feststoffgehalt beträgt in den Versuchen bis zu 55 M.-%, was einem Wassergehalt w von etwa 80 % entspricht. Auch bei diesem Boden zeigt sich eine tendenziell bessere Entwässerung bei einer geringeren Feststoffkonzentration im Zulauf.

Die Ergebnisse der Versuche sind beispielhaft für den Boden TL in Bild 100 und für Boden TA in Bild 101 dargestellt.

Die Stammlösung des eingesetzten Flockungsmittels beinhaltete 10 l Wasser und 10 g des Polymers, sodass sich eine Konzentration von 0,1 M.-% ergab. Durch die Zugabe von Wasser kommt es zur Hydratation von „MagnaFloc“, sodass die Moleküle gestreckt und entknäult werden und die bindungsaktiven Zentren in der Suspension besser zugänglich sind. Der Verbrauch lag bei 100 g/m³. Es handelt sich um ein nichtionogenes Makromolekül aus

³⁷ Dabei ist der Abscheidegrad der Wirkungsgrad eines Filters, welcher die Abscheidung von Partikeln darstellt. Er ergibt sich aus dem Verhältnis der abgeschiedenen Masse zur zugeführten Masse in Prozent. Der Wassergehalt w wurde nach der DIN 18121 ermittelt und ergibt sich aus dem Verhältnis der Masse des Wassers zur Masse des trockenen Bodens.

Nr.	Boden	TS Zulauf [M.-%]	WG Zulauf [M.-%]	TS Austrag [M.-%]	WG Austrag [M.-%]	Trommel-drehzahl [1/min]	Abscheide-grad [%]	Durch-satz [m³/h]	Flockungs-mittel [kg/t TS]
1	TL	35,98	177,9	78,00	28,2	4.000	99,8	0,2	0,0
2	TL	35,98	177,9	78,14	28,0	4.000	99,7	0,2	0,0
3	TL	35,08	185,1	76,94	30,0	4.500	99,8	0,2	0,0
4	TL	35,08	185,1	79,34	26,0	5.000	99,8	0,2	0,0
5	TL	35,08	185,1	77,70	28,7	5.000	99,9	0,2	0,0
6	TL	35,54	181,4	77,57	28,9	5.000	99,7	0,3	0,0
7	TL	9,06	1003,8	75,73	32,0	5.000	99,6	0,2	0,0
8	TL	9,06	1003,8	80,11	24,8	5.000	99,3	0,4	0,0
9	TL	9,06	1003,8	79,08	26,5	4.500	99,2	0,4	0,0
10	TA	21,53	364,5	65,26	53,2	4.500	62,4	0,2	0,0
11	TA	21,53	364,5	67,10	49,0	5.000	60,3	0,2	0,0
12	TA	21,53	364,5	55,50	80,2	5.000	82,6	0,2	0,0
13	TA	21,53	364,5	50,05	99,8	5.000	95,3	0,1	0,0
14	TA	21,53	364,5	51,58	93,9	5.500	96,3	0,1	0,0
15	TA	21,53	364,5	49,05	103,9	5.000	97,0	0,1	0,0
16	TA	9,52	950,4	58,62	70,6	5.000	93,8	0,1	0,0
17	TA	9,52	950,4	56,22	77,9	5.000	92,4	0,1	0,0
18	TA	9,52	950,4	56,88	75,8	5.000	93,4	0,1	0,0
19	TA	9,52	950,4	58,52	70,9	5.000	88,7	0,2	0,0
20	TA	9,36	968,4	55,23	81,1	5.000	98,1	0,1	1,1
21	TA	9,36	968,4	55,69	79,6	5.000	98,3	0,1	1,1
22	TA	9,36	968,4	55,58	79,9	5.000	98,1	0,1	1,1
23	TA	11,02	807,4	53,19	88,0	5.000	97,0	0,2	0,9
24	TA	11,02	807,4	55,06	81,6	5.000	97,1	0,2	0,9
25	TA	19,70	407,6	52,11	91,9	5.000	98,1	0,1	1,0
26	TA	19,70	407,6	53,00	88,7	5.000	98,0	0,1	1,0
27	TA	19,70	407,6	55,68	79,6	5.000	96,9	0,2	1,0

TS Trockensubstanz (Feststoffanteil einer Suspension)
 WG Wassergehalt

Tab. 41: Übersicht Ergebnisse der Entwässerungsversuche mit Dekanter

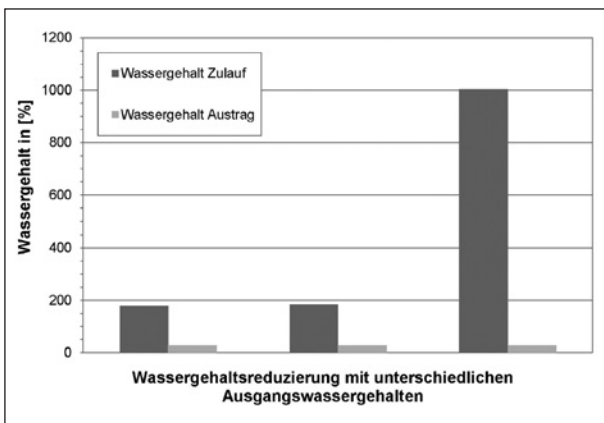


Bild 100: Grafische Darstellung der Wassergehalte nach Zentrifugation mittels Dekanter in Abhängigkeit vom Ausgangswassergehalt für den TL

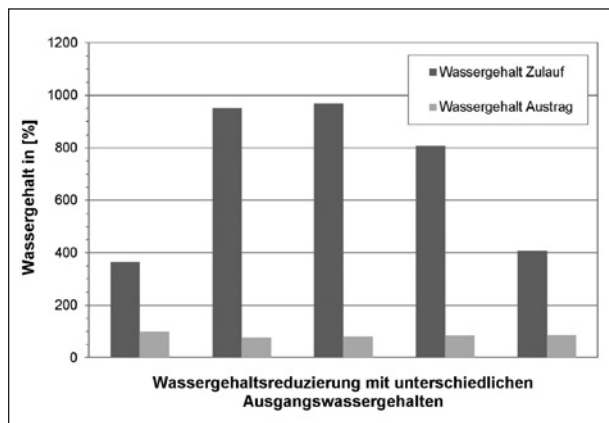


Bild 101: Grafische Darstellung der Wassergehalte nach Zentrifugation mittels Dekanter in Abhängigkeit vom Ausgangswassergehalt für den TA

den Monomeren des Acrylamids, welches gröbere und beständigere Flocken bildet als anionische Stoffe. Das Flockungsmittel verbleibt im entwässerten Boden. Über seine Abbaubarkeit und Langzeiteinflüsse auf die Bodenstruktur sind in der Literatur keine Angaben zu finden. „MagnaFloc“ wird laut Herstellerangaben zur Flockung von feinen Sanden und Tonen, Eisenoxiden in Kupfer-Kobald-Laugen, feinsten Kohle und Zinkschlämmen eingesetzt.

Für eine weiterführende Entwässerung durch das Verfahren der thermischen Trocknung im Anschluss an die Entwässerung durch Zentrifugation wurden für den TL und TA Proben aus dem Austrag des Dekanters in Laborschalen mit einer Größe von 32 x 42 x 12 cm ausgebracht. Die weitergehende Beschreibung dazu erfolgt in Kapitel 3.4.5.

Für den Energieverbrauch wurden durch die Fa. Flottweg unter den nachfolgend aufgeführten Annahmen und auf Basis der durchgeführten Versuche mit der mobilen Versuchsanlage Z23 im Technikum in Zittau folgende Angaben gemacht:



Bild 102: Behälter mit Feststoffaustrag Boden TL



Bild 103: Behälter mit Feststoffaustrag Boden TA

- Einsatz einer Anlage Z5E für die Großproduktion zur Realisierung einer Feststoffleistung von ca. 1 t TS/h,
- Produktzusammensetzung analog Ausgangsboden TA,
- Anmaischen auf 10 – 15 M.-% , max. 30 M.-%,
- Aufbereitung ohne Einsatz von Flockungsmitteln,
- Trommeldrehzahl der Z5E von 3.280 U/min und
- spezifischer Energiebedarf zwischen 30 – 37 kWh/t TS.

Dabei schwankt der spezifische Energiebedarf mit dem TS Gehalt in der zu entwässernden Suspension; das bedeutet: Der Energiebedarf ist bei einer dünneren Suspension aufgrund der höheren erforderlichen Beschleunigungsleistung an dem oberen Wert anzusiedeln. Dementsprechend verringert sich der spezifische Energiebedarf bei einem höheren TS-Gehalt in der zu entwässernden Suspension auf den unteren Bereich der angegebenen Schwankungsbreite. Auf Basis der durchgeführten Versuche sollte jedoch zur besseren Verarbeitung im Dekanter der Feststoffgehalt in der zu entwässernden Suspension im Bereich von 10 – 15 % angesetzt werden.

Allgemeines zur Filtration

Die Filtration ist ein mechanisches Verfahren zur Trennung oder Reinigung eines Mediums, meist einer Suspension, welches ausschließlich auf physikalischer Basis beruht. Dabei bilden die abfiltrierten Feststoffe eine Schicht auf dem Filtermedium, der sogenannte Filterkuchen, das filtrierte Wasser wird abgeleitet. Nach dem Aufbau eines ausreichend dicken Filterkuchens ist im Regelfall eine vollständige Abscheidung der Partikel gegeben, allerdings steigt auch der Strömungswiderstand des Filters deutlich an. Je nach Konzeption des Filters werden die Filterkuchen nach einer gewissen Zeit entfernt, beispielsweise durch Rütteln.

Filtration im Labormaßstab

Um die Entwässerung der Böden mittels Filtration zu untersuchen, wurden im Labor Versuche zur Saugfiltration (Handfilterplatte) durchgeführt. Der Filtriervorgang wurde mit einer Druckdifferenz von konstant 80 kPa ausgeführt. Der Ausgangswassergehalt wurde so bemessen, dass die Suspension ausreichend pumpfähig war. Der Wert lag für die

Ausgangsböden	Ausgangswassergehalt [%]	Endwassergehalt [%]
TL	167	22
TM2	163	17
TA	250	103

Tab. 42: Übersicht Wassergehaltsreduzierung für TL, TM2 und TA mittels Handfilterplatte im Labor

durchgeführten Versuche beim Ausgangsboden TL bei 167 %, und beim Ausgangsboden TA bei 250 %. Die Filtrationszeiten wurden variiert zwischen 6 und 30 Sekunden. Das Ziel der Filtration, das Trennen einer Suspension in die feste und die flüssige Phase, konnte für die Böden in unterschiedlichem Ausmaß erreicht werden. Nachdem sich ein ausreichender Filterkuchen aufgebaut hatte, konnte bei den untersuchten Böden ein feststofffreies Filtrat beobachtet werden. Der durch diese Filtration erreichbare Wassergehalt ging für die untersuchten Böden weit auseinander. Während für den TL ein durchschnittlicher Wassergehalt von 22 % (Werte zwischen 21 und 24 %) erreicht wurde, lag der durchschnittliche Wassergehalt für den TA bei 103 % (Werte zwischen 90 und 139 %), für den mittelplastischen Ton (TM2) konnte ein Wassergehalt von 17 % (Werte zwischen 16 und 19 %) durch diesen Laborversuch erzielt werden.

Als Ergebnis dieser Vorversuche wurde grundsätzlich die Möglichkeit einer Entwässerung beider Böden durch Filtration ausgewiesen, sodass weitere Untersuchungen in einem größeren Maßstab mittels Kammerfilterpressen durchgeführt wurden.

Filtration im Technikumsmaßstab

Die weiterführenden Entwässerungsversuche mit dem Verfahren der kuchenbildenden Filtration wurden im Technikum der Kaolinwerke Kemmlitz an einer Kammerfilterpresse mit nachfolgend aufgeführten Parametern durchgeführt:

- Plattengröße: 250 x 250 mm,
- Filterkuchenstärke: 20 mm,
- Anzahl Filterkuchen: max. 6 Stück,
- Suspensionsbehälter: 188 l (mit Druckluftanschluss) und
- Filtrationsdruck: max. 10 bar.

Für die Versuche kamen die zwei Ausgangsböden TA und TL zur Anwendung. Um eine Optimierung

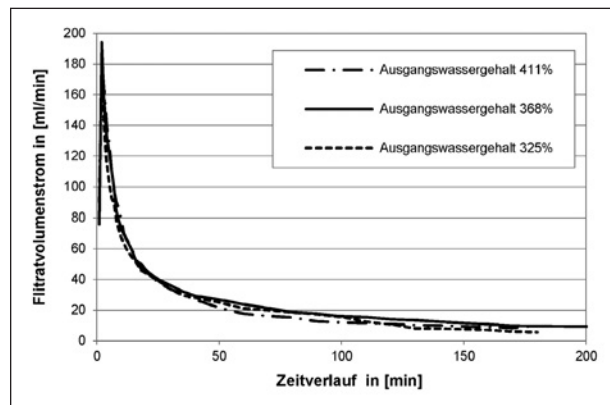


Bild 104: Zeitabhängige Darstellung des Volumenstroms für den Boden TA mit unterschiedlichen Ausgangswassergehalten

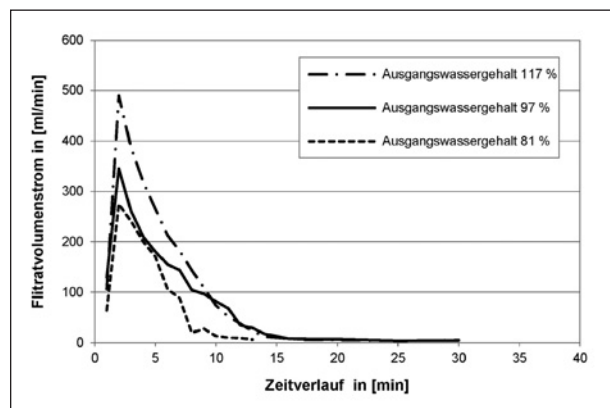


Bild 105: Zeitabhängige Darstellung des Volumenstroms für den Boden TL mit unterschiedlichen Ausgangswassergehalten

der Wassergehaltsreduzierung zu erreichen, erfolgte die Versuchsdurchführung für beide Böden mit jeweils drei unterschiedlichen Wassergehalten. Die Zeitdauer des Entwässerungsvorgangs ergab sich aus dem gemessenen Filtrat-Volumenstrom. Es wurde bei allen Versuchen ein Filtrationsdruck von 8 bar aufgebaut, wobei die technisch schnellstmögliche Drucksteigerung (innerhalb von ca. 5 min) erfolgte.

Beide Böden zeigten ein gutes Entwässerungsverhalten, wobei der maximale Volumenstrom bereits nach wenigen Minuten, noch vor Erreichen des Maximaldrucks, eintrat. Die Versuche zeigten, dass der Entwässerungsvorgang beim leichtplastischen Ton nach ca. 15 min beendet ist. Eine Verlängerung der Entwässerungszeit brachte keinen positiven Effekt hinsichtlich des erreichten Wassergehalts, welcher bei allen drei Versuchen bei 20 – 21 % lag.

In Bild 104 und Bild 105 ist der gemessene Filtrat-Volumenstrom für die Versuche an beiden Böden dargestellt.

Die Entwässerungsphase beim ausgeprägt plastischen Ton (TA) dauerte deutlich länger als beim leicht plastischen Ton (TL). Der Hauptentwässerungsanteil ist jedoch auch beim TA nach ca. 20 Minuten abgeschlossen, die Nachentwässerungszeit weist bei allen Versuchen einen ähnlichen Verlauf auf und wurde nach 3 Stunden beendet. Die erzielten Wassergehalte variieren für den TA zwischen 38 und 47 %. Bei der Durchführung der Versuche zeigte sich, dass der Ausgangswassergehalt in jedem Fall so bemessen sein muss, dass eine gut pumpfähige Suspension entsteht, da ansonsten kein optimaler Filtrationsvorgang möglich ist. Die hier verwendeten unteren Werte für den Ausgangswassergehalt beider Böden stellen dabei praktisch einen Grenzwert für die verwendete Versuchsanlage dar.

Die Ergebnisse der Entwässerungsversuche im Technikumsmaßstab sind in Tabelle 43 für unterschiedliche Ausgangswassergehalte der beiden Böden zusammengefasst. Die bei der Entwässerung entstandenen Filterkuchen wiesen für beide untersuchten Böden bei allen Versuchen eine steife Konsistenz auf, sodass eine Weiterverarbeitung bzw. ein Weitertransport möglich sein sollte.³⁸

In der Praxis werden für die verschiedenen, durch Kammerfilterpressen zu entwässernden Böden, ebenfalls Versuche auf Technikums-Ebene durchgeführt, um ein Optimum für den Wassergehalt in Abhängigkeit von der Entwässerungszeit zu erhalten. Dabei fließen auch wirtschaftliche Betrachtungen mit ein, sodass die tatsächlichen Filtrationszeiten beispielsweise in den Kaolinwerken Kemmlitz für einen ausgeprägt plastischen Boden bei ca. 15 – 20 min liegen.

Der angegebene Verbrauch an Elektroenergie für die Großproduktion liegt hier bei ca. 22 kWh/t Feststoff. In diesem Wert ist nach Firmenangaben ne-

Ausgangsböden	Ausgangswassergehalt [%]	Endwassergehalt [%]
TL	81	20
TL	97	21
TL	117	20
TA	325	47
TA	368	38
TA	411	43

Tab. 43: Übersicht Wassergehaltsreduzierung für TL und TA mit unterschiedlichen Ausgangswassergehalten mittels Kammerfilterpresse im Technikum

ben der eigentlichen Presse und den Pumpen auch die zugeordnete Fördertechnik (Beschicker und Bänder) mit enthalten.

3.4.5 Thermische Entwässerung³⁹

Allgemeines und Material

Die Entfernung der Feuchtigkeit (Flüssigkeit) aus festen Stoffen wird als Trocknung bezeichnet. Die bei einer Trocknung durch aktive Wärmezufuhr aufzuwendenden Wärmemengen sind recht erheblich und können nur in den seltensten Fällen bei großem apparativem Aufwand teilweise zurückgewonnen werden. Eine solche Art der Trocknung stellt also ein sehr energieaufwendiges Verfahren dar und sollte nur dann angewandt werden, wenn die mechanischen Verfahren, wie Sedimentieren im Schwere- bzw. Zentrifugalfeld oder Filtration, die gewünschten Endwassergehalte nicht erreichen. Aus wirtschaftlichen Gründen ist genau zu prüfen, ob nicht mithilfe eines mechanischen Verfahrens das vorliegende Problem zu lösen bzw. eine Vorentfernung der Feuchtigkeit erreicht wird, ehe man das thermische »Verfahren Trocknung« auswählt.

Um das Verhalten der zu untersuchenden Böden bei thermischer Trocknung zu erkunden, wurden umfassende Versuche im Trockenschrank sowie in einer belüfteten Halle durchgeführt. Die Erfassung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit erfolgte dabei mit einem Datenlogger vom Typ PCE-HT71 alle 5 min über die gesamte Versuchsdauer. Ein repräsentabler Wert für den Energieverbrauch lässt sich aus den Versuchen zur thermischen Trocknung nicht ableiten.

Als Probematerial kamen die vier feinkörnigen Böden TL, TM1, TM2 und TA zum Einsatz, welche auch bei den mechanischen Entwässerungsversuchen verwendet wurden, um das weitere Trocknungsverhalten zu untersuchen (siehe Kapitel 3.4.2 und Kapitel 3.4.4). Variiert wurden Wassergehalt, Schichtdicke, Temperatur sowie Belüftung. So wur-

³⁸ In den Kaolinwerken Kemmlitz erfolgt nach dem Prozess der Filtration eine Zerkleinerung des Materials und anschließend eine weitere Entwässerung durch thermische Trocknung in einem Fließbettrockner bei einer Temperatur von 300 °C. Der Restwassergehalt für das dort entstehende Endprodukt liegt bei etwa 12 %.

³⁹ Bearbeitung durch das iTN Zittau.

den für alle 4 Böden Versuche im Trockenschrank mit Belüftungsstufe 3 (leichte Belüftung, konstanter Luftdurchsatz) und einer Temperatur von 25 °C sowie einer Schichtdicke von 2 cm durchgeführt, wobei der jeweilige Wassergehalt einer Konsistenzzahl von $I_c = 0$, $I_c = 0,25$ und $I_c = 0,5$ entsprach. Weitere Versuche erfolgten bei einer Temperaturerhöhung auf 30 °C und unter einer manuellen Auflockerung (Stückelung) der Böden.

Eine Übersicht über alle Versuche zur thermischen Trocknung unter Angabe der jeweiligen Parameter befindet sich in Tabelle 44.

Da in der Praxis oftmals eine Kombination aus mechanischer und thermischer Trocknung erfolgen muss, um den gewünschten Wert für die Endfeuchte zu erhalten, wurden, wie in Kapitel 3.4.4 beschrieben, im Anschluss an die mechanische Entwässerung durch Zentrifugation mittels dekanter Trocknungsversuche mit dem Dekanterausrüst für die Bö-

den TA und TL durchgeführt. Dazu wurden zwei Schalen mit dem vorentwässerten Boden mit einer Schichtdicke von 10 cm gefüllt und unter den Bedingungen einer belüfteten Halle weiter getrocknet.

Die Aufzeichnungen des Datenloggers über die gesamte Zeit des Trocknungsprozesses ergaben Temperaturen zwischen 18 und 28 °C, die Werte für die Luftfeuchtigkeit schwankten zwischen 30 und 68 %. Nach Versuchsende wurden aus den Schalen nochmals Proben entnommen, um den Restwassergehalt der Böden zu bestimmen. Der erreichte Wassergehalt lag für den TL bei 2,5 % und für den TA bei 4,5 %.

Um einen Überblick über den Einfluss der einzelnen veränderlichen Parameter zu erhalten, erfolgte eine Zusammenstellung aller Versuche für einen der Böden. Das Diagramm zeigt den zeitlichen Trocknungsverlauf für den TA für alle Versuche im Trockenschrank mit Lüftungsstufe 3 (leichte Belüftung,

	Schichtdicke [cm]	Konsistenz I_c [-]	Temp. [°C]	Belüftung
TL	2	0	25	Trockenschrank
	2	0	30	Trockenschrank
	2	0,25	25	Trockenschrank
	2	0,25	25	Trockenschrank + 1x tägl. auflockern
	2	0,5	25	Trockenschrank
	10	-0,25	25-30	belüftete Halle
TM1	2	0	25	Trockenschrank
	2	0	30	Trockenschrank
	2	0,25	25	Trockenschrank
	2	0,25	25	Trockenschrank + 1x tägl. auflockern
	2	0,5	25	Trockenschrank
TM2	2	0	25	Trockenschrank
	2	0	30	Trockenschrank
	2	0,25	25	Trockenschrank
	2	0,25	25	Trockenschrank + 1x tägl. auflockern
	2	0,5	25	Trockenschrank
	2	0,5	25	Trockenschrank
TA	2	0	25	Trockenschrank
	2	0	30	Trockenschrank
	2	0,25	25	Trockenschrank
	2	0,25	25	Trockenschrank + 1x tägl. auflockern
	2	0,5	25	Trockenschrank
	10	0,25	20-30	Belüftete Halle

Tab. 44: Übersicht der durchgeführten Versuche zur thermischen Trocknung

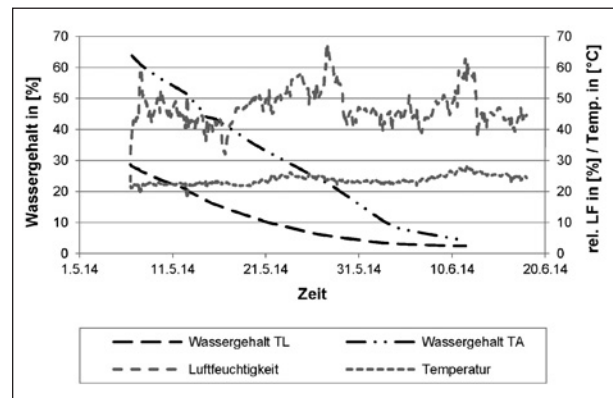


Bild 106: Zeitverlauf Wassergehaltsreduzierung durch thermische Trocknung in der Halle für die Böden TL und TA als Anschluss-trocknung

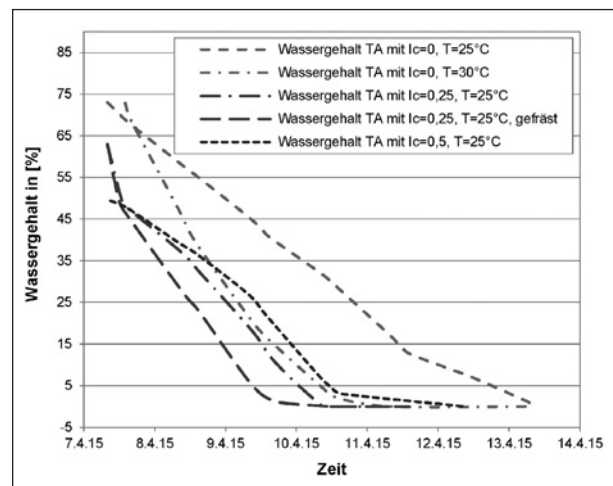


Bild 107: Zeitverlauf Wassergehaltsreduzierung durch thermische Trocknung im Trockenschrank für den TA unter verschiedenen Bedingungen

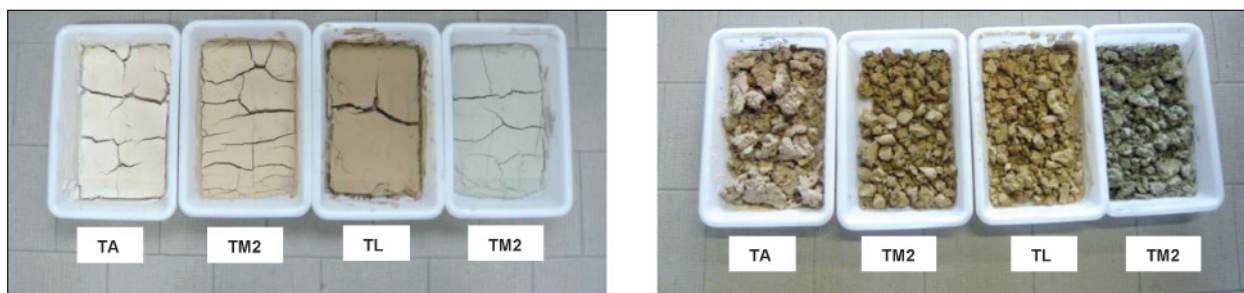


Bild 108: Schalen mit Bodenproben nach der Trocknung ohne (Bild links) und mit Auflockern (Bild rechts)

konstanter Luftdurchsatz) und einer Schichtdicke von 2 cm. Wie in der Darstellung zu erkennen, führt bereits eine Temperaturerhöhung um 5 °C zu einer deutlich schnelleren Wassergehaltsreduzierung. Ebenso zeigt eine Verbesserung der Belüftung durch einen Fräsvorgang pro Tag einen steileren Verlauf der zeitabhängigen Trocknungskurve. Temperatur und Belüftung stellen also neben dem Ausgangswassergehalt zwei maßgebende Faktoren bei der Wassergehaltsreduzierung durch thermische Trocknung dar.

Die Diagramme für alle durchgeführten Versuche zum Verfahren der thermischen Trocknung sind im Anhang zu diesem Bericht dargestellt, sie stellen jeweils die Abnahme des Wassergehalts für alle 4 Böden unter gleichen Bedingungen unter Angabe des Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverlaufes dar.

Bild 108 zeigt die verwendeten Trocknungsschalen für die Böden TA, TM2, TL und TM1 für die Wassergehaltsreduzierung im Trockenschränk für die Versuche mit und ohne manuelle Auflockerung.

Die Proben weisen während des Trocknungsprozesses eine starke Rissbildung auf. Durch diese Risse kommt es im Allgemeinen zur Vergrößerung der Trocknungsoberfläche und damit zu einer besseren Konvektion. Eine Zerkleinerung des Materials durch das Auflockern bewirkte eine zusätzliche Zunahme der Oberfläche, was für eine weitere Beschleunigung des Entwässerungsvorganges wirkt.

3.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

3.5.1 Allgemeines

In den nachfolgenden Kapiteln sind die Erkenntnisse aus der Literaturarbeit und den eigenen Untersuchungen zusammengefasst. Die in den Diagrammen dargestellten Anwendungsbereiche und Grenzen für jedes Verfahren⁴⁰ ergeben sich aus den An-

gaben in Kapitel 3.3.2 (Kassettenbauweisen und Geotextile Schläuche), Kapitel 3.4.2 (Erdbautechnische Methoden)⁴¹, Kapitel 3.4.4 (Maschinentechnische Entwässerung), Kapitel 3.3.7 und Kapitel 3.4.5 (Trocknung) und Kapitel 3.4.1 (Kombination aus Kassetten- und Sandwichbauweise).

Direkte Verwendung eines zu nassen Bodens in Sonderlösungen

Aus technischer Sicht ist die Verwendung in Kassettenbauweisen über den gesamten Wassergehaltsbereich für alle Böden möglich, da keine besonderen Anforderungen an die Eigenschaften des in den Kassetten eingeschlossenen Materials bestehen. Eine derartige Verwendung ist allerdings nur bei hohen Wassergehalten und flächigen Bauwerken sinnvoll. Der Aufwand an hochwertigen Stützmaterialien zur Gewährleistung der Standicherheit in den Randbereichen der Kassetten muss aus wirtschaftlicher Sicht abgestimmt sein auf die darin befindliche Gesamtkubatur an nassem Boden. Die Entwässerungssetzungen des Bauwerks erhöhen sich mit steigendem Wassergehalt des eingebrachten nassen Bodens.

Auch die Verwendung von nassen Böden in geotextilen Schläuchen (dauerhafter Verbleib des Materials im Schlauch) stellt keine besonderen Anforderungen an das Material, die Form des Schlauches muss durch das Geotextil gewährleistet werden.

⁴⁰ Die Balken bilden teilweise Grenzen der jeweiligen Verfahren ab, teilweise die Obergrenze der untersuchten Parameter (zum Beispiel die maximale Zugabemenge). Es wird auf die einzelnen Kapitel des Berichtes verwiesen.

⁴¹ Es wurden jeweils die maximalen Werte aus $D_{Pr} = 100\%$ und $D_{Pr} = 97\%$ je Zugabematerial verwendet, die bei der Beurteilung der Ergebnisse in Kapitel 3.4.2 (siehe Tabelle 27 bis Tabelle 30) den Anforderungen an Tragfähigkeit (CBR) und ggf. Luftporenanteil (n_a) entsprachen.

Der Konsolidation des Materials entsprechende Setzungsbeträge sind zu erwarten.

Bei kleineren Bauwerken kann aus Platzgründen in der Regel nur Material verwendet werden, dass mit seinen eigenen Schereigenschaften zur Standsicherheit des Bauwerks beiträgt. Deshalb erfordern Sandwichbauweisen bereits ein Mindestmaß an Scherfestigkeit des weichen Bodens. Es ist somit ein Verfahren, welches hauptsächlich bei Wassergehalten leicht oberhalb des Verdichtungsoptimums sinnvoll Anwendung finden kann. Die Grenze der technischen Machbarkeit einer Sandwichbauweise hängt aber von vielen Faktoren ab (siehe Kapitel 3.4.1). Der in den Bildern 109 bis 112 (s. Kapitel 3.5.2 bis 3.5.5) dargestellte farbliche Übergang soll die nicht auf einen einzelnen Wert festlegbare technische Grenze, zusammenfassend über diese Faktoren, andeuten.

Indirekte Verwendung eines zu nassen Bodens mit erdbautechnischen Verfahren

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen die Angaben in ZTV E-StB [67], Kapitel 12.3.1, zu geeigneten Baustoffen für die Bodenbehandlung mit Bindemitteln. Dort werden unter anderem leicht plastische Tone (TL), Sand-Ton-Gemische (ST*) und Kies-Schluff-Gemische (GU*) als uneingeschränkt geeignete Bodengruppen angegeben. Ausgeprägt plastische Tone (TA) werden als bedingt geeignet ausgewiesen.

Die Anwendungsgrenzen der Methoden des Erdbaus (Bodenverbesserung) liegen im plastischen Bereich eines Bodens (abhängig von den Eigenschaften des Bodens, des Zugabematerials und der Zugabemenge). Die nach ZTV E-StB zur Bodenbehandlung als uneingeschränkt geeignete Böden eingestuft untersuchten Böden (TL, ST* und GU*) konnten mittels Bindemittelbehandlung bis zu ihrer Fließgrenze, bzw. bis zu etwa dem höchsten erwartbaren Wassergehalt⁴², verbessert werden,

⁴² Es ist eine berechnete Annahme, dass der Hauptteil des Wassers eines gemischtkörnigen Bodens vom Feinanteil gehalten wird. Wassergehalte oberhalb der Fließgrenze des Feinanteiles werden unter üblichen Umständen mehr oder weniger schnell abgegeben (zum Beispiel durch Absetzen).

⁴³ Der dem Begriff „pumpbar“ zuordenbare Wassergehalt eines Bodens liegt oberhalb der Fließgrenze, hängt aber genau genommen von den Randbedingungen der jeweiligen Pumpe ab. Oft wird mit einem Mehrfachen des Wassergehaltes an der Fließgrenze gearbeitet.

der ausgeprägt plastische Ton nur innerhalb des steifen Konsistenzbereichs. Die Bodenverbesserung mit RC-Material führte beim ausgeprägt plastischen Ton (TA) zu keinem Erfolg, der leicht plastische Ton (TL) konnte damit bis in den weichen Konsistenzbereich verarbeitbar gemacht werden. Es wird erwartet, dass die erreichte Verbesserungswirkung durch höhere Zugabemengen auch noch weiter gesteigert werden kann.

Indirekte Verwendung eines nassen Bodens durch maschinentechnische Entwässerung

Für die maschinentechnische Entwässerung muss der zu entwässernde Boden in pumpbarer⁴³ Form vorliegen. In der Erdbaupraxis bedeutet das, dass solchen Boden vor ihrer mechanischen Trocknung aus verfahrenstechnischen Gründen gegebenenfalls noch Wasser zugegeben werden muss. Eine derartige Entwässerung kann dann in der Regel aber nicht bis zu jenem Punkt erfolgen, an dem der Boden ohne weitere Maßnahmen (wie zum Beispiel Bodenbehandlung) im Erdbau eingesetzt werden kann. Das Material muss also im Anschluss entweder weiter getrocknet werden oder bei dem vorhandenen Wassergehalt mittels Bodenverbesserung erdbautechnisch verwendbar gemacht werden.

Der Vergleich der Energieangaben der Hersteller (Energie pro m³ Feststoff) lässt erwarten, dass Kammerfilterpressen im Vergleich zu Zentrifugen die wirtschaftlichere Möglichkeit zur Entwässerung von Tonen darstellt. Da sehr viele Einzelfaktoren die Effektivität der Verfahren beeinflussen, ist ein detaillierter Vergleich mit der derzeitigen Datenlage aber letztlich nicht möglich.

Die Entwässerung mittels Zentrifugen ist ein kontinuierliches Verfahren, bei dem der zu entwässernde Boden in pumpbarer Form vorliegen muss. Dabei spielen neben den Eigenschaften der Böden selbst vor allem zwei Faktoren eine Rolle: die Umdrehungszahl und die Zentrifugierdauer. Während die Umdrehungszahl (also der zur Entwässerung entwickelte Druckgradient im Porenwasser) einen zentralen Einfluss auf das Entwässerungsergebnis nimmt, ist die Zentrifugierdauer nach einem Mindestbetrag, wenn überhaupt, nur bei niedrigen Umdrehungszahlen der Zentrifuge von ausgezeichneter Bedeutung.

Der Durchsatz des untersuchten leicht plastischen Tones (TL) betrug etwa das Vierfache des Durchsatzes bei den Untersuchungen am ausgeprägt

plastischen Ton (TA). Trotzdem konnten beide Böden bei den Versuchen im Technikumsmaßstab bis in ihren plastischen Bereich entwässert werden.

Die Entwässerung mittels Kammerfilterpressen liefert insgesamt sehr vielversprechende Ergebnisse, die durch die gängige Praxis in der Tonindustrie bestätigt werden. Dort werden auch ausgeprägt plastische Tone auf diese Weise entwässert. Der Boden muss aber, wie auch bei der Entwässerung mit Zentrifugen, in pumpbarer Form vorliegen. Über die Filter (Filterstabilität und hydraulische Wirksamkeit), die Filterkuchenstärke (Dränwege) und den Filtrationsdruck (Gradienten zur Entwässerung) kann das Verfahren gesteuert werden. Durchsatz und erreichbarer Wassergehalt sind so auf die Randbedingungen und Anforderungen abstimmbare. Die Versuche im Technikumsmaßstab haben zusammenfassend Folgendes gezeigt:

- Je feiner ein Boden, desto mehr Zeit (Energie) pro Mengeneinheit an Feststoff musste zur Entwässerung aufgewendet werden.
- Der Endwert der Entwässerung wurde beim leicht plastischen Ton nach etwa 15 Minuten, beim ausgeprägt plastischen Ton nach etwa dem 10-fachen dieser Zeit erreicht.
- Der Ausgangswassergehalt der zu entwässernden Suspension spielte beim ausgeprägt plastischen Ton aufgrund der höheren Entwässerungszeiten eine untergeordnete Rolle, beim leicht plastischen Ton wurde bei niedrigeren Ausgangswassergehalten der Endwassergehalt schneller erreicht.
- Beide Böden konnten bis in den steifen Konsistenzbereich verbessert werden.

Indirekte Verwendung durch Trocknung

Die Trocknung des Materials durch Verdunstung von Wasser weist den weitesten Einsatzbereich auf. Das Wasser kann aus dem Boden, je nach den Randbedingungen des Verfahrens, beinahe zur Gänze entfernt werden. Praktisch relevante Faktoren (neben den Eigenschaften des Bodens selbst) sind Temperatur, Luftfeuchtigkeit (Luftwechsel) und die zur Verfügung stehende Oberfläche, an der Wasser verdunstet werden kann. Da feine Böden das Bodenwasser stärker binden als grobe und gleichzeitig deren ungesättigte Wasserleitfähigkeit kleiner ist, läuft die Trocknung unter sonst gleichen Bedingungen bei feinen Böden langsamer ab. Das bestätigen auch die durchgeführten Versuche. In

vergleichenden Untersuchungen wurde der erhebliche Einfluss bereits kleiner Temperaturunterschiede und der Verdunstungsoberfläche auf den zeitlichen Verlauf der Verdunstung veranschaulicht. Gleichzeitig können feinkörnige Böden ungleich mehr Wasser speichern. So ist die zur Erreichung einer bestimmten Konsistenzänderung zu verdunstende Wassermenge bei plastischeren Böden größer als bei weniger plastischen Böden.

Die Trocknung von Bodenmaterial im Freien stellt (zumindest) ein zeit- und platzaufwändiges Verfahren dar, die Witterungsabhängigkeit macht es schwer kalkulierbar. Gleichzeitig ist die Trocknung im Freien und bei schönem Wetter sehr energieeffizient. Trocknet man Boden maschinell, so sind hohe Energieaufwendungen nötig. Das Verfahren sollte vor allem zur Erweiterung der Reichweite von erdbautechnischen Methoden (Trocknung vor Anwendung von Bodenverbesserungsmaßnahmen) und der maschinentechnischen Entwässerung (Trocknung nach Anwendung einer maschinentechnischen Entwässerung) angewendet werden.

Die Entwässerung in geotextilen Schläuchen kann vor allem bei sehr nassen Böden angewendet werden. Bei ausreichendem Platz- und Zeitangebot könnte dieses Verfahren eine wirtschaftliche Alternative zur maschinentechnischen Entwässerung sein. Je nach gewährter Entwässerungszeit (Konsolidation unter Eigengewicht) kann auch hier der Boden bis in seinen plastischen Bereich entwässert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die erreichbare stichfeste Konsistenz als Endwassergehalt bei der Entwässerung in Geotextilen Schläuchen etwa am Übergang vom breiigen in den weichen Konsistenzbereich (bei $I_C \approx 0,5$)⁴⁴ liegt. Das Verfahren ist gegebenenfalls mit anderen Verfahren zu kombinieren.

3.5.2 Ausgeprägt plastischer Ton (Ausgangsboden TA)

In Bild 109 sind die Erkenntnisse zum ausgeprägt plastischen Ton zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Verwendbarmachung mit erdbautechnischen Methoden nur bis in den steifen Konsistenzbereich (und von den untersuchten Zugabematerialien vor allem mit Bindemitteln) möglich ist.

⁴⁴ Eine eindeutige und fachlich begründete Zuordnung dieses Begriffes zu einer Konsistenzzahl ist den Autoren nicht bekannt.

In Kassettenbauweisen kann das Material auch bei hohen Wassergehalten und ohne besondere bautechnische Eigenschaften eingebracht werden. Dabei wächst die zu erwartende Konsolidationssetzung mit steigendem Wassergehalt. Die Verwendung in Sandwichbauweisen ist auf den Bereich leicht über dem Verdichtungsoptimum beschränkt; die technische Machbarkeit ist aber immer abhängig von einer Vielzahl an Faktoren. Bei hohen Wassergehalten kann das Material in pumpfähige Form gebracht werden (Wasserzugabe) und mittels Maschinentechnischer Entwässerung oder in Geotextilen Schläuchen bis in den plastischen Konsistenzbereich entwässert werden. Die Sedimentation und anschließende Trocknung ist grundsätzlich über den gesamten Wassergehaltsbereich möglich.

3.5.3 Leicht plastischer Ton (Ausgangsboden TL)

Bild 110 fasst die Erkenntnisse am Boden TL zusammen. Es zeigt sich, dass der leicht plastische Ton mittels Bindemittelverbesserung bis an seine Fließgrenze verbessert werden kann. Die Verbesserung durch Zumischung von RC-Mix 0/4 mm ist bis in den weichen Konsistenzbereich möglich. Da bei den Mischungen mit RC-Mix 0/32 mm knapp die in Kapitel 3.4.2 definierten Anforderungen an die Tragfähigkeit verfehlt wurden, ist der Balken nicht in Vollfarbe markiert. Bei der Verwendung eines solchen Bodens in Kassetten- und Sandwichbauweisen gelten die Anmerkungen analog zum ausgeprägt plastischen Boden (TA), siehe oben. Auch für die Maschinentechnische Trocknung, die Entwässerung in Geotextilen Schläuchen und die Sedimentation und Trocknung wird auf die Anmerkungen zu Boden (TA) verwiesen.

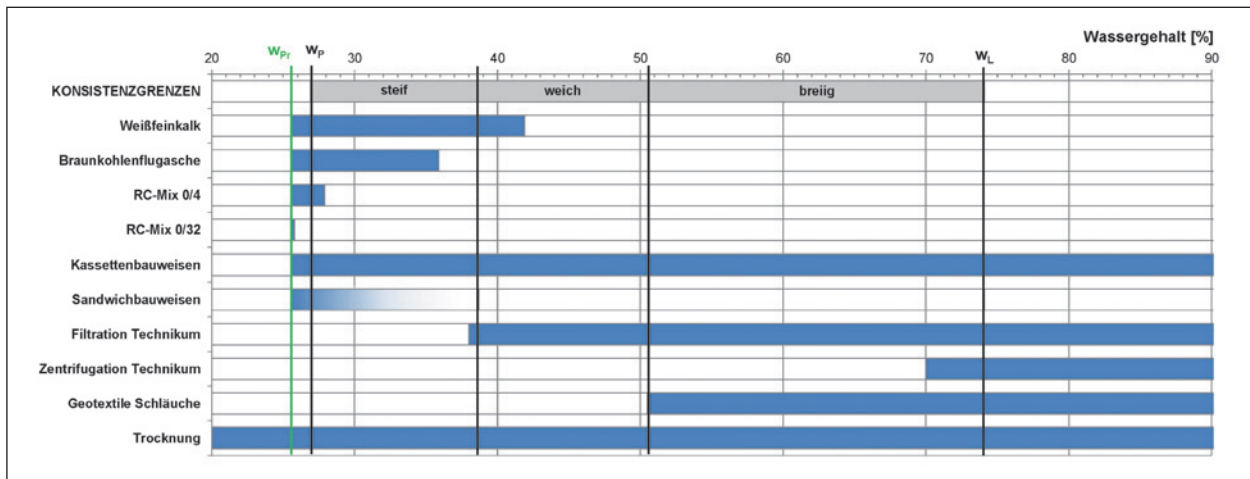


Bild 109: Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines ausgeprägt plastischen Tones (Ausgangsboden TA)

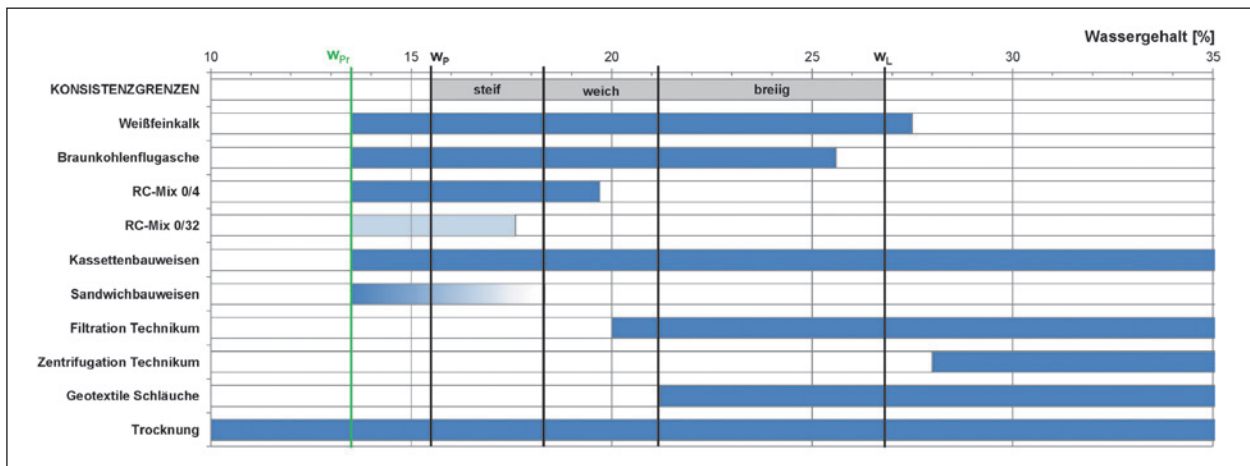


Bild 110: Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines leicht plastischen Tones (Ausgangsboden TL)

3.5.4 Sand-Ton-Gemisch (Ausgangsboden ST*)

Der Ausgangsboden ST* konnte im Allgemeinen mit Bindemitteln gut verbessert werden, und der verarbeitbare Wassergehalt bis weit oberhalb des Proctorwassergehaltes erweitert werden (siehe Bild 111). Es ist dabei anzumerken, dass der Boden bei einem Wassergehalt von etwa 25 % bereits in „flüssiger“ Form vorliegt (Fließgrenze w_L des Anteils < 0,4 mm liegt bei 27,7 %, der Anteil < 0,4 mm bei etwa 65 bis 67 M.-%; siehe Kapitel 3.4.2).

Die Verwendung in Kassettenbauweisen ist unabhängig von den Materialeigenschaften grundsätzlich möglich. Die Verwendung in Sandwichbauweisen ist vor allem im Bereich leicht über dem optimalen Wassergehalt denkbar. Je nach Feinkornanteil des Materials kann eine mechanische Bodenverbesserung aber zu besseren Ergebnissen führen

(ähnlicher Materialaufwand, durch die Durchmischung wird aber ein grobes Tragskelett hergestellt).

Eine maschinentechnische Entwässerung wurde aufgrund gerätetechnischer Einschränkungen im Zuge des Projektes nicht untersucht. Da solche Sand-Ton-Gemische mit entsprechenden Pumpen (Schlauchpumpen) noch gepumpt werden können, ist die Zentrifugation und Entwässerung in Geotextilen Schläuchen grundsätzlich denkbar.

3.5.5 Kies-Schluff-Gemisch (Ausgangsboden GU*)

Bild 112 zeigt die Zusammenfassung der Erkenntnisse am Kies-Schluff-Gemisch (GU*). Auch dieser gemischtkörnige Boden konnte mit Bindemitteln soweit verbessert werden, dass das Ausgangsmate-

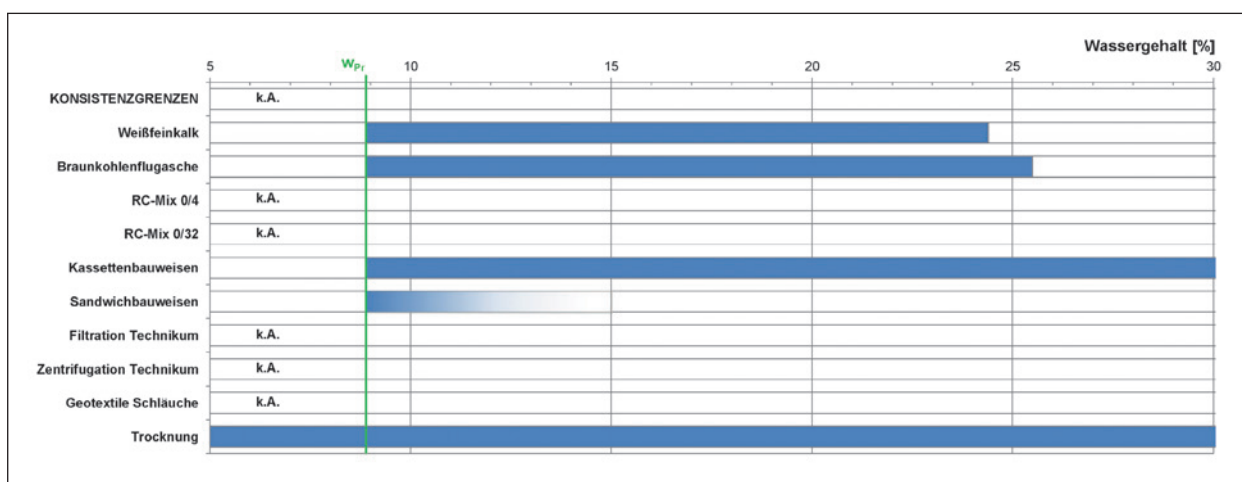


Bild 111: Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines Sand-Ton-Gemisches (Ausgangsboden ST*)

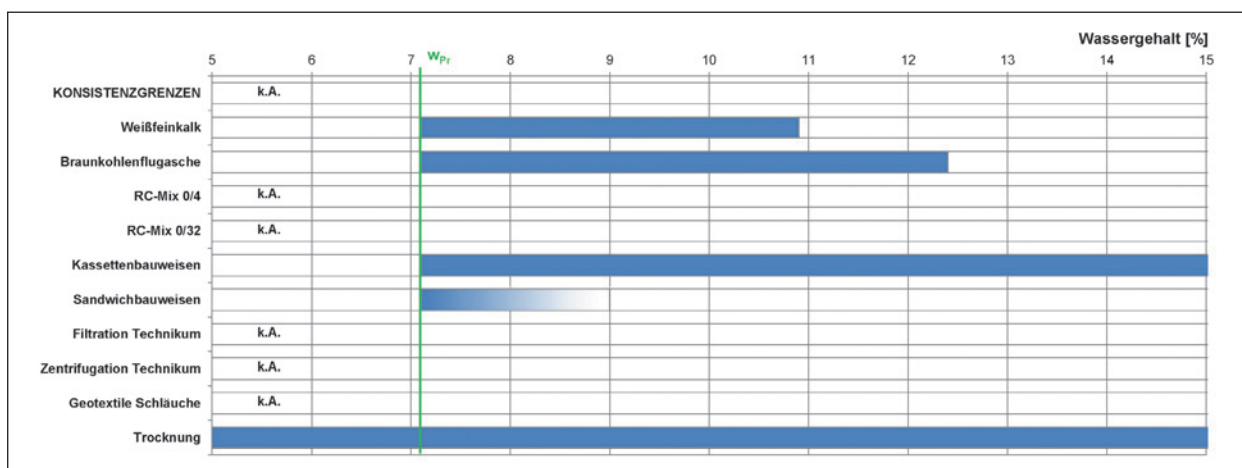


Bild 112: Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines Kies-Schluff-Gemisches (Ausgangsboden GU*)

rial vor erfolgreicher Verbesserung in sehr nasser Form vorlag (Fließgrenze w_L des Anteils $< 0,4$ mm liegt bei 24,8 %, der Anteil $< 0,4$ mm bei etwa nur 21 bis 23 M.-%; siehe Kapitel 3.4.2).

Für die Verwendung in Kassettenbauweisen und Sandwichbauweisen wird auf die Anmerkungen zu Ausgangsboden ST* verwiesen.

3.6 Strategien zur Weiterverwendung

Liegen fein- oder gemischtkörnige Böden mit zu hohem Wassergehalten vor, so können, je nach Wassergehalt, grundsätzlich mehrere Wege zum Ziel der erdbautechnischen Verwendbarkeit führen. Nun kann grob zwischen zwei Verfahrenswegen unterschieden werden:

- Direkte Verwendung unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften (Sonderbauweisen)

Einerseits besteht die Möglichkeit den (zu feuchten) Boden direkt unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften zu verarbeiten. So müssen zu nasse fein- und gemischtkörnige Böden bei der Verwendung als Baustoff etwa durch andere Elemente gestützt werden, um die Innere Standsicherheit des Bauwerkes zu gewährleisten (Kassetten, Geotextiler Schlauch). Gleichzeitig bewirkt die Entwässerung des Materials entsprechende Setzungen, die für Bauwerke mit Anforderungen an die Verformungsarmut nicht vereinbar sein können. Die Sandwichbauweise ist nur bei Wassergehalten leicht über dem optimalen Wassergehalt sinnvoll anwendbar. Herstellbarkeit, Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit werden allgemein dominiert von den Bodeneigenschaften des weichen Bodens, die Wirtschaftlichkeit ist aufgrund des Schichtenaufbaus und der Randeinfassung durch Kassetten (Materialaufwand hochwertiges Material) sehr schnell nicht mehr gegeben.

- Indirekte Verwendung durch Verbesserung der Bodeneigenschaften (Bodenverbesserung)

Insgesamt können höhere Anforderungen erfüllt werden, wenn die Eigenschaften des Materials verbessert werden. Dies kann über die erdbautechnischen Verfahren der Bodenverbesserung (z. B. Bindemittelverbesserung oder

mechanische Bodenverbesserung mit RC-Körnungen) erfolgen. Bei sehr hohem Wassergehalten ist der aktive Wasserentzug (z. B. maschinentechnische Entwässerung, Entwässerung in geotextilen Schläuchen, aktive thermische Entwässerung) bzw. passive Wasserentzug (z. B. Trocknung) als Bodenverbesserungsmaßnahme möglich. Dabei ist der aktive Wasserentzug mit maschinentechnischen Methoden (Zentrifugation, Filtration) in der Regel nicht soweit möglich, dass das Material ohne zusätzliche Maßnahme verwendet werden kann. Die Verwendung kann dann in Kombination mit einem anderen Verfahren (z. B. Trocknung oder erdbautechnische Bodenverbesserung) erfolgen.

Der tatsächliche Wassergehalt des Bodens sowie die bautechnischen und wirtschaftlichen Randbedingungen entscheiden im Einzelfall darüber, welches Verfahren oder welche Kombination aus Verfahren am einfachsten und wirtschaftlichsten zum Ziel der erdbautechnischen Verwertbarkeit führt. Dabei kann gelten: je feinkörniger ein Boden, desto schwieriger ist seine Verarbeitbarkeit erweiterbar und desto eher muss er bei höheren Wassergehalten über eine Entwässerung bzw. Trocknung verarbeitbar gemacht werden.

In Tabelle 45 sind die Strategien zur Weiterverwendung von zu nassen fein- und gemischtkörnigen Böden zusammenfassend und vereinfacht abgebildet. Eingangssparameter zur Anwendung der Tabelle ist der natürliche Wassergehalt des infrage stehenden Bodens (w) im Vergleich mit seinem optimalen Verdichtungswassergehalt (w_{Pr}). Welche Hinweise und Einschränkungen bei der Verwendung zu beachten sind wird in der letzten Spalte „Verwendungs-Gruppe“ beschrieben. Die darin angeführten Verwendungs-Gruppen lassen sich folgendermaßen einteilen:

- Anforderungen an die Standsicherheit (AS)

Diese Verwendungsgruppe bezeichnet, ob der gewählte Verwendungsweg (A bis H nach Tabelle 45) dazu führt, dass das Material im Rahmen seiner Eigenschaften selbst zur Standsicherheit des Bauwerkes beitragen kann (AS1) oder ob die Eigenschaften selbst beim Einbau einen aktiven Beitrag zur Gesamtstandsicherheit voraussichtlich nicht zulassen (AS2).

Verwendung	Bodengruppe 1 Feinkörnige Böden, zur Behandlung geeignete Bodengruppen nach ZTV E-StB (U, TL, TM)	Bodengruppe 2 Feinkörnige Böden, zur Behandlung bedingt geeignete Bodengruppen nach ZTV E-StB (TA)	Bodengruppe 3 Gemischtkörnige Böden, zur Behandlung geeignete Bodengruppen nach ZTV E-StB (ST*, GU*)	Verwendungs-Gruppe bei sinngemäßer Anwendung des Verfahrens
Direkte Verwendung				
A Kassettenbauweisen	●	●	●	AS2/AV2
B Sandwichbauweisen	○	○	○	AS1/AV1-2
C Geotextile Schläuche (mit Verbleib im Schlauch)	●	●	k. A.	AS2/AV2
Indirekte Verwendung (Verbesserung der Materialeigenschaften)				
D Bodenverbesserung mit Bindemitteln	●	○ bzw. ●	●	AS1/AV1
E Mech. Bodenverbesserung mit RC-Körnungen	●	○	● bzw. ●	AS1/AV1
F Maschinentechnische Entwässerung	●	●	k. A.	KOM
G Entwässerung in geotextilen Schläuchen	●	●	k. A.	KOM
H (Thermische) Entwässerung bzw. Trocknung	●	●	●	AS1/AV1
○ Verfahren nur leicht über dem optimalen Verdichtungswassergehalt eines Bodens anwendbar ● Verfahren bei $w > w_{Pr}$ (Bodenverhalten plastisch) anwendbar ● Verfahren bei $w \gg w_{Pr}$ (Bodenverhalten flüssig) anwendbar AS1 Anforderungen an die Standsicherheit können ab dem Einbau durch das Material selbst, im Rahmen seiner Eigenschaften, erfüllt werden AS2 Anforderungen an die Standsicherheit können beim Einbau durch das Material selbst NICHT erfüllt werden. AV1 Anforderungen an die Verformung (Setzung) können durch das Material, im Rahmen seiner Eigenschaften erfüllt werden. AV2 Anforderungen an die Verformung (Setzung) können durch das Material NICHT erfüllt werden. KOM Von der nassen Seite kommend ist die Verbesserung der Materialeigenschaften bis in den Bereich $w > w_{Pr}$ möglich; das Verfahren ist in Kombination anzuwenden.				

Tab. 45: Strategien zur Weiterverwendung zu nasser fein- und gemischtkörniger Böden

- Anforderungen an die Verformung (AV)

Diese Verwendungsgruppe beschreibt qualitativ zwei Klassen für Anforderungen an die Verformung (Setzung), die durch das Material bei einer bestimmten Verwendung (A bis H nach Tabelle 45) erfüllt werden können. Können Anforderungen an die Verformung im Rahmen der Materialeigenschaften grundsätzlich eingehalten werden, so gilt die Kategorie AV1. Sind die Eigenschaften derart ungünstig, dass keine Anforderungen an die Verformungen eingehalten werden können, so gilt Kategorie AV2.

- Anwendung nur in Kombination (KOM)

Die Kategorie KOM wird als Hinweis darauf verwendet, dass das Verfahren allein nicht zum Ziel der erdbautechnischen Verwendbarkeit führt. Von der nassen Seite kommend kann das Material aber soweit entwässert werden, dass es im Anschluss mit anderen Verfahren erdbautechnisch verarbeitbar gemacht werden kann. Für das dazu gewählte Verfahren gelten die entsprechenden Verwertungsgruppen.

Koukoulidou, A.
Huber, S.
Henzinger, C.
Wolter, S. (Mitarbeit bei Kap. 4.4.1 und Kap. 4.4.3)

4 Sekundärbaustoffe

4.1 Einleitung

Nach der eingangs erwähnten Studie des Bundesumweltamtes aus dem Jahr 2008 [31] fielen in Deutschland Anfang des neuen Jahrtausends pro Jahr etwa 240 Mio. Tonnen mineralische Abfälle an. Etwa 41 % davon setzt sich aus Bau- und Abbruchabfällen, Metallschlacken sowie Aschen und Schlacken aus Steinkohle und HMVA zusammen, wovon wiederum ein gewisser Teil auch derzeit nicht einer nachhaltigen Wiederverwendung (Recycling) zugeführt wird. Die Erhöhung der Recyclingquote von mineralischen Abfällen stellt für alle Beteiligten eine große Herausforderung dar. Fehlende Erfahrungswerte und Unsicherheiten seitens der Bauherren, der Planer und Behörden führen oft dazu, dass unter Umständen verwendbares Material nur abgelagert wird und an dessen Stelle Primärrohstoffe verwendet werden⁴⁵.

In Deutschland schreitet die Regelung solcher Abfälle zur Verwendung als Baustoffe dabei durchaus voran. Einhergehend zu den Neuerungen im erdbautechnischen Regelwerk, die die Verwendung von Sekundärrohstoffen im Erdbau des Straßenbaus seit Inkrafttreten der ZTV E-StB 09 und den TL BuB E-StB 09 regeln, wurde am Zentrum Geotechnik in den Jahren 2006 bis 2008 im Forschungsvorhaben „Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden und Fremdbestandteilen und von Bauschutt“ [10] die erdbautechnischen Eigenschaften einiger Sekundärbaustoffe objektiv und vergleichend beurteilt. Ein weiteres Forschungsprojekt zur „Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% bzw. Massen-%-Grenzen bei Bodenmaterial“ [79] wurde am Zentrum Geotechnik der TU München inzwischen ebenfalls abgeschlossen.

Das erdbautechnische Regelwerk trennt die Baustoffe „Boden, Boden mit Fremdbestandteilen und RC-Baustoff“ anhand des Anteils der enthaltenden Fremdbestandteile. Bei einem Gemisch aus Boden und Fremdbestandteilen liegt bis zu einem Anteil der Fremdbestandteile von 50 M.-% ein Boden mit Fremdbestandteilen vor, ab Anteilen an Fremdbestandteilen von 50 M.-% ein RC-Baustoff. Schwerpunkt der Forschungsarbeit „Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden und Fremdbestandteilen und von Bauschutt“ [10] war die erdbautechnische Beurteilung von Böden mit Fremdbestandteilen (also Gemische von Böden mit bis zu 50 M.-% Fremdbestandteilen). Die Auswahl der verwendeten Fremdbestandteile orientierte sich an einer Analyse von statistischen Daten zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Abfälle. Das bodenmechanische Verhalten war kein primäres Auswahlkriterium. Es wurden im Wesentlichen die Stoffgruppen Beton, Mauerwerk und Mörtel/Putz als maßgebliche Fremdbestandteile identifiziert, die mehrheitlich auch in Bauschutt enthalten und somit für daraus hergestellte RC-Baustoffe bestimmend sind. An grob-, gemischt- und feinkörnigen Böden mit Fremdbestandteilen wurden Untersuchungen zu Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften durchgeführt. In Referenzuntersuchungen wurden auch die zugegebenen Fremdbestandteile (ohne Bodenanteile) und einige industrielle Nebenprodukte (u. a. HMV-Asche) untersucht, sodass hieraus bereits grundlegende erdbautechnische Eigenschaften von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten abgeleitet wurden. Es wurde herausgearbeitet, wie die im Boden enthaltenen Fremdbestandteile in Abhängigkeit von der Menge und von der Art unterschiedlichen Einfluss auf die bautechnischen Eigenschaften des gesamten Gemisches (Boden mit Fremdbestandteilen) haben.

Aus den Untersuchungen wurden bereits maßgebliche Eigenschaften von Fremdbestandteilen, die von den Eigenschaften des Bodens abweichen können, aufgezeigt. Dies sind:

- Kornform (kantige oder raue Oberfläche),
- Gefüge (porig, porös oder wassersaugend),
- Kornfestigkeit (bei mechanischer Beanspruchung) und
- sonstige Eigenschaften (veränderlich feste Eigenschaften oder verwitterungsanfällig).

Aus den Ergebnissen konnte nur der Grad der zu erwartenden Beeinflussung der jeweiligen bautech-

⁴⁵ Eine Studie aus den Vereinigten Staaten von THOMPSON & BASHFORD [152] zeigt eindrücklich, dass diese genannten Faktoren sowie unzureichende technische Regelwerke in der Praxis oft bestimmend sind und dass finanzielle Vorteile einer Maßnahme oft auch hinter diese Unsicherheiten zurücktreten.

nischen Eigenschaften abgelesen werden. Eine eindeutige und umfassende fachtechnische Beurteilung, ob sich die Beeinflussung positiv oder negativ auf die erdbautechnischen Eigenschaften (Scherfestigkeit, Verdichtungsfähigkeit, Tragfähigkeit, Frostempfindlichkeit und Verwitterungsempfindlichkeit) auswirkt, konnte noch nicht erfolgen. Einige grundlegende Aussagen zur negativen Beeinflussung durch verwitterungsempfindliche Fremdbestandteile (z. B. Mörtel, Putz, Porenbeton) oder Fremdbestandteilen mit geringer Kornfestigkeit bei Verdichtung waren möglich.

Insbesondere durch die gezielte Mischung unterschiedlicher Anteile an Fremdbestandteilen mit feinkörnigen Böden wurde das deutliche Potenzial dieser Baustoffe zur mechanischen Bodenverbesserung belegt. Dies bestätigen auch Berichte aus der Erdbaupraxis (siehe MIFKA & THELEN [111]), wo ein Betonrecyclingmaterial zur mechanischen Verbesserung eines für den Erdbau zu nassen bindigen Bodens erfolgreich eingesetzt wurde.

Um den Wissensstand in Bezug auf das Verhalten solcher Sekundärbaustoffe und dessen Einflussfaktoren zu erweitern, war es sinnvoll die Untersuchungen von BAUMGÄRTEL et al. [10] zu erweitern und den Bodenanteil weiter (auf 30 M.-% sowie 0 M.-%) zu reduzieren, sodass der Einfluss der den RC-Baustoff zusammensetzenden Stoffgruppen auf die erdbautechnischen Eigenschaften des Gemisches weiter zunimmt. Für die abschließende Beurteilung können auch die Ergebnisse von HENZINGER et al. [79] einbezogen werden, die unter anderem das bautechnische Verhalten von Mischungen aus verschiedenen Böden und groben RC-Körnungen ausführlich untersucht haben.

Neben der Verwendung von RC-Baustoffen im Erdbau, stellt die Verwendung von Hausmüllverbrennungasche (HMVA) bei Baumaßnahmen ein weiteres, sich entwickelndes Feld dar. Die HMV-Aschen sind mit ca. 2 Mio. t jährlichen Anfalls eine maßgebliche Stoffgruppe innerhalb der industriellen Nebenprodukte. Ihre erdbautechnische Eignung wurde am Zentrum Geotechnik im Forschungsprojekt „Verwertung von Rostschlacken aus der thermischen Abfallbehandlung im Rahmen von Bauvorhaben: Geotechnische und umweltrelevante Eigenschaften des Schlackekörpers unter den in der Verwertungspraxis gängigen Einbaubedingungen“ [135] erstmalig untersucht. Auch in der Arbeit von OTT [120] ist das bodenmechanische Verhalten von verschiedenen HMV-Aschen grundlegend beschrieben.

In den letzten Jahren wurden weitere Anwendungsgebiete für den Einsatz von HMV-Aschen untersucht (STEUERNAGEL [143], MESTERS et al. [106]). So wird von STEUERNAGEL [143] die Einsetzbarkeit als Baustoff zur Herstellung von Hochwasserdeichen untersucht, was dem Baustoff ein weiteres Anwendungsgebiet im Erdbau eröffnet. Auch in der Forschungsarbeit von BAUMGÄRTEL et al. [10] wurde eine HMV-Asche exemplarisch in die Untersuchungen mit einbezogen, sodass auch im Vergleich zu den Böden mit Fremdbestandteilen und einigen RC-Baustoffen Erfahrungen zur erdbautechnischen Eignung in der vergleichenden Beurteilung vorliegen.

Noch zu vertiefende Aspekte bei HMV-Aschen sind die sekundären Verfestigungsprozesse während der Liegezeit und das Frostverhalten.

4.2 Untersuchungskonzept

Mit dem Ziel eines Beitrages zur weiteren Erhöhung der hochwertigen Verwertung von RC-Materialien, sollten vor allem Materialien untersucht werden, deren stoffliche Zusammensetzung (aufgrund mangelnder Erfahrungen zur Eignung) in der Regel zu ihrer Ablagerung führt. Es soll in Verbindung mit den Erkenntnissen von BAUMGÄRTEL et al. [10] die Wissensgrundlage zur Eignung solcher Materialien zur Verwendung im Erdbau deutlich erweitert werden. Ähnliches gilt für das Wissen zur bautechnischen Eignung von HMV-Aschen im Erdbau, wie sich auch im Untersuchungskonzept in Bild 113 widerspiegelt.

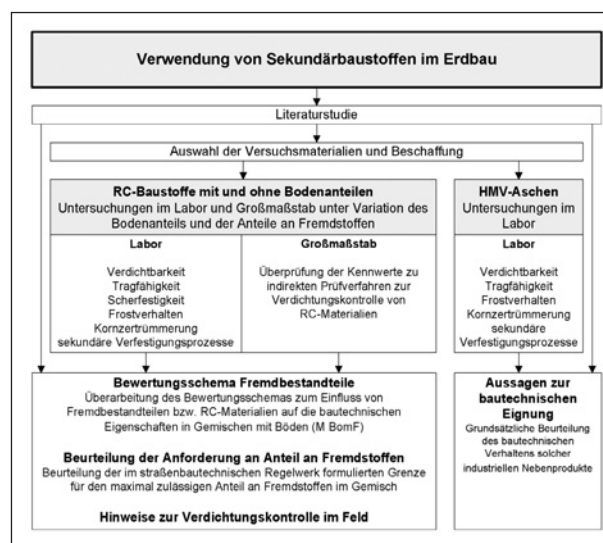


Bild 113: Untersuchungskonzept zur Verwendung von Sekundärbaustoffen im Erdbau

Die Untersuchungen zu den Recyclingmaterialien bauen auf den vom Zentrum Geotechnik der TU München im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens [10] durchgeführten Untersuchungen auf. Dabei wurden Böden mit einem Anteil an Fremdbestandteilen von bis zu 50 M.-% untersucht. Ab dieser Grenze handelt es sich nach dem erdbautechnischen Regelwerk um einen RC-Baustoff (mit Bodenanteilen). Mit einer Reduzierung der im RC-Baustoff enthaltenen Bodenanteile auf 30 M.-% werden die Eigenschaften des RC-Baustoffes dominant. Diese Eigenschaften sind maßgeblich von der Zusammensetzung aus unterschiedlichen mineralischen Komponenten abhängig. In einem ersten Schritt wurden daher anhand einer Literaturrecherche die Unterschiede dieser mineralischen Komponenten hinsichtlich erdbautechnischer und bodenmechanischer Eigenschaften näher betrachtet.

Bei der Auswahl der in den eigenen Untersuchungen zu verwendenden Materialien wurde davon ausgegangen, dass RC-Baustoffe für den Erdbau insbesondere dann von wirtschaftlichem Interesse sind, wenn die Anforderungen des Straßenoberbaus gemäß TL Gestein-StB 04 [58] nicht erfüllt werden, d. h. wenn im Kornanteil $> 4 \text{ mm}$ ⁴⁶.

- der Anteil an Fremdbestandteilen wie Klinker, Ziegel und Steinzeug $> 30 \text{ M.-%}$ ist und/oder
- der Anteil an Fremdbestandteilen wie Kalkstein, Putz und ähnliche Stoffe $> 5 \text{ M.-%}$ ist und/oder
- der Anteil an Fremdbestandteilen wie mineralische Leicht- und Dämmstoffe $> 1 \text{ M.-%}$ ist und/oder
- der Anteil an Fremdstoffen wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien $> 0,2 \text{ M.-%}$ beträgt.

Da für den erdbautechnischen Einsatz aber auch RC-Baustoffe mit Fremdbestandteilen im Kornbereich $\leq 4 \text{ mm}$ Verwendung finden können, wurden bei der Materialauswahl auch gezielt Fremdbestandteile im Schluff- und Sandkornbereich berücksichtigt, wie sie bei der Herstellung von RC-Baustoffen für den Straßenoberbau anfallen können.

Negative Auswirkungen von Fremdstoffen sind insbesondere bei Stoffen mit geringer Rohdichte zu erwarten, da bei solchen Materialien geringe Massenanteile bereits hohe Volumenanteile bedeuten. BAUMGÄRTEL et al. [10] kommen zum Schluss, dass insbesondere Fremdstoffe mit geringen Rohdichten $< 0,05 \text{ g/cm}^3$ bei Beachtung der Massenbeschränkung auf $0,2 \text{ M.-%}$ gemäß TL BuB E-StB 09 noch zu Problemen führen können. Entsprechend geringe Dichten weisen geschäumte Kunststoffe auf. Grundsätzlich wurden aber auch andere typische Fremdstoffe wie Holz und nicht geschäumte Kunststoffe, die in Böden enthalten sein können, in die Untersuchungen mit einbezogen.

Die Laboruntersuchungen an diesen Materialien umfassten Laboruntersuchungen zur Verdichtbarkeit, Tragfähigkeit, Scherfestigkeit und dem Verhalten bei Frosteinwirkung. Konzeptionell sind diese an das Forschungsvorhaben „Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt“ (BAUMGÄRTEL et al. [10]) angelehnt. Fremdbestandteile ohne Bodenanteil wurden sowohl in den Korngruppen 0/4 (Bodengruppe SW) und 0/32 (Bodengruppe GW) hinsichtlich der Verdichtungseigenschaften durch Proctorversuche und hinsichtlich der Tragfähigkeit durch CBR-Versuche untersucht. Dabei wurde ein RC-Baustoff-Gemisch, in dem Fremdbestandteile aus mehreren Stoffgruppen enthalten sind (RC-Mix), ein reiner RC-Beton sowie ein RC-Gemisch zur Untersuchung ausgewählt, bei dem der zulässige Anteil an Fremdbestandteilen (Ziegelbruch) über das regelkonforme Maß ($> 30 \text{ M.-%}$; siehe oben) hinausgeht. Die Versuche wurden auch genutzt, um die Kornzertrümmerung bei Verdichtung zu beurteilen. Die Untersuchungen wurden parallel auch an zwei ausgewählten HMV-Aschen durchgeführt.

Den RC-Baustoffen wurde anschließend je 30 M.-% Boden (TL und GW) zugegeben. Auch an diesen RC-Baustoffen mit 30 M.-% Bodenanteil wurden Proctorversuche und CBR-Versuche sowie Untersuchungen zur Kornzertrümmerung durchgeführt.

Um den Einfluss von Fremdstoffen zu identifizieren, wurden zwei RC-Gemische mit 30 M.-% Boden ausgewählt. Diesen RC-Gemischen wurden als Fremdstoffe

- Granulat aus Polystyrolschaum,
- Holzspäne und
- Kunststoffgranulat

⁴⁶ Die Anforderungen sind wohl aus praktischen Gründen auf den Anteil $> 4 \text{ mm}$ beschränkt, da die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung solcher Materialien am Anteil $> 4 \text{ mm}$ erfolgt und das Verfahren keine Aussage über die Zusammensetzung des Anteils $< 4 \text{ mm}$ zulässt.

in Mengen von 0,2 M.-%, 1 M.-% und 5 M.-% zugeben, um den Einfluss auf die Verdichtungseigenschaften und Tragfähigkeitseigenschaften zu untersuchen.

Zur Beurteilung der Scherfestigkeit wurden an ausgewählten Materialien Triaxialversuche durchgeführt. Es wurden zwei RC-Baustoffe in den Korngruppen 0/4 und 0/32 ohne und mit Bodenanteilen für die Triaxialversuche ausgewählt.

An ausgewählten RC-Materialien ohne Bodenanteile, den Gemischen aus RC-Baustoffen mit 30 M.-% Boden sowie den HMV-Aschen wurden zusätzlich Untersuchungen zur Beurteilung des Frosthebungsverhaltens durchgeführt. Aus den Ergebnissen wurde abgeleitet, ob eine maßgebliche negative Beeinflussung der erdbautechnischen Eigenschaften durch Frosteinwirkung zu erwarten ist. Neben den Messungen zur Frosthebung wurden an den Proben außerdem Versuche zur Ermittlung leicht bestimmbarer Festigkeitsparameter, z. B. CBR-Versuche, vor und nach Befrostung durchgeführt.

Sekundäre Verfestigungsprozesse wurden in einem weiteren Schritt an den beiden HMV-Aschen und einem RC-Baustoff mit nennenswerten Betonbruchanteilen (RC-Mix 0/32) untersucht. Es wurde die zeitliche Festigkeitszunahme nach einem, drei, sechs und zwölf Monaten durch einaxiale Druckversuche nach vorangegangener Feucht- und Wasserlagerung untersucht. Weiterhin wurde untersucht, ob sich durch sekundäre Verfestigungsprozesse die Durchlässigkeit verringert, was positive Auswirkungen auf einen evtl. Austrag von Stoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen hätte.

Exemplarisch wurden in einem letzten Schritt großmaßstäbliche Untersuchungen durchgeführt. Diese hatten zum Zweck, die Übertragbarkeit der in ZTV E-StB für natürliche Böden formulierten Kennwerte für indirekte Prüfmerkmale (E_{v2} und E_{vd}) auf die Verdichtungskontrolle von RC-Materialien zu überprüfen.

4.3 Grundlagen und Literaturauswertung

4.3.1 Regelwerk der FGSV

ZTV E-StB

In den ZTV E-StB 09 [67] ist auch die Verwendung von industriell hergestellten Gesteinskörnungen und rezyklierten Baustoffen im Erdbau geregelt. Bei

der Verwendung von Sekundärbaustoffen müssen die umwelttechnischen Anforderungen berücksichtigt werden und es muss die Verträglichkeit mit anderen Baustoffen bzw. Bauteilen nachgewiesen werden. Die Materialien müssen nach TL BuB E-StB [57] güteüberwacht werden und bei der Anlieferung einer organoleptischen Überprüfung unterzogen werden.

Die Verdichtungsanforderungen und die Einteilung in Frostempfindlichkeitsklassen, die für Böden gelten, sind ebenfalls für Sekundärbaustoffe (Tabelle 46 und Tabelle 47) zu berücksichtigen. Besonderes bei HMVA sind bei der Bestimmung des Verdichtungsgrades das Wasseraufnahmeverhalten und die Veränderung der Kornzusammensetzung des Materials zu berücksichtigen. Die Frostbeständigkeit wird nach TL Gestein-StB [58] bestimmt.

Die Verwendung von Sekundärbaustoffen in Sickeranlagen und Filterschichten ist nur nach entsprechenden Eignungsprüfungen erlaubt. Gemäß ZTV E-StB 09 dürfen Stahlwerksschlacken, Hüttenmineralstoffgemische, HMV-Aschen, Gießereirückstände, Bentonitanteile und Waschberge in diesen Be-

Bereich	Boden- gruppe	D_{Pr} [%]	n_a [Vol.-%]
Planum bis 1,0 m Tiefe bei Dämmen und bis 0,5 m Tiefe bei Einschnitten	GW, GI, GE, SW, SI, SE, GU, GT, SU, ST	100	-
1,0 m unter Planum bis Dammsohle	GW, GI, GE, SW, SI, SE, GU, GT, SU, ST	98	
Planum bis Dammsohle und bis 0,5 m Tiefe bei Einschnitten	GU*, GT*, SU*, ST*, U, T, OU, OT	97	12

Tab. 46: Anforderungen an Böden und Sekundärbaustoffen für den Verdichtungsgrad D_{Pr} und den Luftporenanteil n_a

Klasse	Frostempfindlichkeit	Bodengruppe (DIN 18196)
F 1	nicht frostempfindlich	GW, GI, GE, SW, SI, SE
F 2	gering bis mittel frostempfindlich	TA, OT, OB, OK, ST, GT, SU ¹ , GU ¹
F 3	sehr frostempfindlich	TL, TM, UL, UM, UA, OU, ST*, GT*, SU*, GU*

¹ Zu F 1 gehörig bei einem Anteil an Korn < 0,063 mm von 5,0 M.-% bei $C_U \geq 15,0$ oder 15,0 M.-% bei $C_U \leq 6,0$. Im Bereich $6,0 < C_U < 15,0$ kann der für eine Zuordnung zu F 1 zulässige Anteil an Korn < 0,063 mm linear interpoliert werden.

Tab. 47: Klassifikation von Bodengruppen nach Frostempfindlichkeit

reichen nicht verwendet werden; zudem dürfen Waschberge, HMV-Aschen und Gießereirestsande auch in Leitungszonen nicht eingebaut werden.

Als Material für Hinterfüllungen sowie für Überschüttungen können auch RC-Baustoffe (außer Hüttenmineralstoffgemische) entsprechend den hierfür geeigneten Bodengruppen nach ZTV E-StB 09 verwendet werden. Industriell hergestellte Gesteinskörnungen und rezyklierte Baustoffe eignen sich auch für die mechanische Verbesserung weicher Böden durch Einrütteln oder Einschlagen.

TL BuB E-StB

In den technischen Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus (TL BuB E-StB [57]) sind bautechnische Anforderungen und umweltrelevante Merkmale beschrieben, die die im Erdbau des Straßenbaus verwendeten Materialien (Böden bzw. Baustoffe) erfüllen müssen. Anforderungen sind für die folgenden Baustoffe gegeben:

- Böden,
- Böden mit Fremdbestandteilen,
- rezyklierte Baustoffe,
- Eisenhüttenschlacken,
- Metallhüttenschlacken,
- Hausmüllverbrennungsasche (HMVA),
- Kraftwerksnebenprodukte,
- Gießereirückstände und
- mineralische Baustoffe aus Bergbautätigkeit.

Alle Baustoffe sind gemäß DIN EN ISO 14688-1 bzw. nach DIN 18196 zu beschreiben, zu benennen und zu klassifizieren. Bei den rezyklierten Baustoffen bestehen bautechnische Anforderungen hinsichtlich der Plastizität (DIN 18122), der Kornverteilung (DIN 18123), des Wassergehaltes (DIN 18121) und der stofflichen Zusammensetzung (M RC). Der Einbauwassergehalt sollte in der Spanne der Wassergehalte, in der bei Verdichtung mit Proctorenergie Verdichtungsgrade von mindestens $D_{Pr} = 97\%$ erreicht werden, liegen. Die stoffliche Zusammensetzung ist gemäß TP Gestein-StB, Teil 3.1.5 [66] zu ermitteln. Anforderungen nach TL BuB E-StB hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung von rezyklierten Baustoffen sind in Tabelle 48 zusammengefasst.

Stoffgruppe	M.-%
Ausbauasphalt	≤ 10
Fremdstoffe, wie Holz, Gummi, Kunststoffen und Textilien	$\leq 0,2$
Mit pechhaltigen Bindemitteln gebundene Stoffe	0

Tab. 48: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von rezyklierten Baustoffen gemäß TL BuB E-StB 09 [57]

Bestandteil	M.-%
Metalle	≤ 5
Unverbranntes	$\leq 0,5$
Kesselaschen, Filterstäube und Reaktions- bzw. Sorptionsprodukte	0

Tab. 49: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von HMVA nach TL BuB E-StB 09 [57]

Nach TL BuB E-StB 09 müssen die HMVA vor der Verwendung mindestens drei Monate feucht gelagert werden, um eine ausreichende Raumbeständigkeit aufzuweisen. In dieser Zeit finden Mineralum- und Neubildungen statt, die für die Raumbeständigkeit von großer Wichtigkeit sind. Für die HMV-Aschen bestehen bautechnische Anforderungen hinsichtlich der Kornverteilung (DIN 18123), des Wassergehaltes (DIN 18121), der stofflichen Zusammensetzung (M HMVA) und der Raumbeständigkeit (TL Gestein-StB). Der Einbauwassergehalt sollte in der Spanne der Wassergehalte bei $D_{Pr} = 97\%$ auf der trockenen Seite der Proctorkurve liegen. Die stoffliche Zusammensetzung ist gemäß den TP Gestein-StB, Teil 3.1.4 zu ermitteln. Die Körner im Korngrößenbereich $> 4\text{ mm}$ sind dabei den folgenden Stoffgruppen zuzuordnen:

- Asche/Schlacke,
- Glas/Keramik,
- Metalle,
- Unverbranntes,
- Sonstiges (z. B. nicht brennbare mineralische Bestandteile, wie Beton, Mauerwerk und Kies).

Anforderungen nach TL BuB E-StB hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung für HMV-Aschen sind in Tabelle 49 gegeben.

TL Gestein-StB

Die TL Gestein-StB 04 [58] „enthalten Anforderungen an natürliche, industriell hergestellte und rezyk-

Stoffgruppe	M.-%
Asphaltgranulat im Anteil > 4 mm	≤ 30
Klinker, Ziegel und Steinzeug im Anteil > 4 mm	≤ 30
Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe im Anteil > 4 mm	≤ 5
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, wie Poren- und Bimsbeton im Anteil > 4 mm	≤ 1
Fremdstoffe, wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien im Gemisch	≤ 0,2

Tab. 50: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen nach TL Gestein-StB 04 [58]

Bestandteil	M.-%
Metalle	≤ 5
Unverbranntes	≤ 0,5

Tab. 51: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von HMVA nach TL Gestein-StB 04 [58]

lierte Gesteinskörnungen, die bei der Herstellung von Oberbauschichten aus Asphalt, Beton, hydraulisch gebunden und ungebundenen Baustoffgemischen, Pflasterdecken und Plattenbelägen, dünne(n) Schichten im Kalteinbau und Oberflächenbehandlungen verwendet werden“. Die Materialien müssen allgemein verwitterungsbeständig sein und dürfen keine schädliche Mengen an Stoffen enthalten, die zerfallen, sich lösen oder chemisch umsetzen können (z. B. mergelige und tönige Körner, bestimmte Ton- und Glimmerminerale, Pyrit, Markasit, Gips, Calcium- und Magnesiumoxid). Sie dürfen auch keine schädlichen Mengen an groben Stoffen organischen Ursprungs (z. B. Holz, Pflanzenreste) oder Fremdstoffe (z. B. Metall, Kunststoffe) enthalten. Die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen und HMVA gemäß TL Gestein-StB 04 sind in den Tabelle 50 und Tabelle 51 gegeben.

Abhängig vom angestrebten Einsatzzweck sind verschiedene Anforderungen an die Körner (z. B. Kornverteilung, Kornform, Gehalt an Feinanteilen, Qualität der Feinanteile, usw.) oder hinsichtlich verschiedener Arten von Widerständen (z. B. gegen Zertrümmerung, gegen Polieren, gegen Verschleiß, usw.) beschrieben, die von den Baustoffen einzuhalten sind.

Nach TL Gestein-StB 04 ist die Kornzusammensetzung von RC-Baustoffe und HMVA gemäß dem „Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Stra-

ßenbau“ (M RC) [55] bzw. dem „Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungssasche im Straßenbau“ (M HMVA) [53] zu ermitteln.

TL SoB-StB

Die Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau [59] „enthalten Anforderungen an Baustoffgemische und an Böden, die zur Herstellung von Oberbauschichten im Straßen- und Wegebau sowie für andere Verkehrsflächen verwendet werden“. Abhängig vom Einsatzbereich (Frostschutzschichten, Kies- und Schottertragschichten bzw. Deckschichten) sind Anforderungen an den Feinanteil, an das Überkorn, die Kornverteilung, die Frostempfindlichkeit, die Wasserdurchlässigkeit und den Wassergehalt gestellt sowie umweltrelevante Merkmale, die es einzuhalten gilt, angegeben.

Für die Verwendung von RC-Gemischen, die natürliche oder industriell hergestellte Gesteinskörnungen enthalten, müssen alle Komponenten die Anforderungen des entsprechenden Einsatzbereichs erfüllen. Die Einordnung des Materials in die in der TL SoB-StB jeweils unterschiedenen Materialgruppen wird von den Werten der ungünstigsten Komponente bestimmt.

Einschränkungen bestehen hinsichtlich der Anwendungen von Lavaschlacken, Hausmüllverbrennungssaschen und Kesselaschen. Lavaschlacken dürfen nur für Frostschutzschichten verwendet werden, HMVA dürfen nur in Frostschutzschichten bei Verkehrswegen der Bauklassen III-VI (entspricht etwa Belastungsklasse Bk0,3 bis Bk3,2 nach RStO 12) eingebaut werden, während Kesselasche nur in Frostschutzschichten von Radwegen eingesetzt werden dürfen.

Außerdem müssen die RC-Baustoffe für Frostschutzschichten einen Schlagzertrümmerungswert ≤ 32 und einen Los Angeles-Koeffizient ≤ 40 aufweisen. Bei Schottertragschichten müssen die rezyklierten Materialien den Kategorien SZ₂₈ bzw. LA₃₅ entsprechen und der Schotter Schlagwert SD 10-Wert darf 33 M.-% nicht übersteigen.

M RC

Das M RC 2002 [55] enthält Informationen über die Gewinnung, die Anlieferung, die Aufbereitung und die Lagerung von rezyklierten Baustoffen. Die RC-Baustoffe sind hinsichtlich der stofflichen Zu-

	Stoffgruppe	1	2	3	4	5	6	7
	Verwertungsbereich	Naturstein, Naturwerkstein	Kies und Sand	Beton, Betonwerkstein	Klinker, dichte Ziegel, Steinzeug	Ausbauasphalt	Kalksandstein, weich gebrannte Ziegel, Putze, Leichtbaustoffe	Stoffgruppen nach Spalte 1 bis 6 mit mehr als 15 M.-% Anteil < 0,063 mm
Vollständiger Inhalt der Originaltabelle nicht abgebildet								
2.	Erdbau nach ZTV E-StB ¹	x	x	x	x	•	o	o
¹ Bei Verfüllung von Leitungszonen sind gegebenenfalls besondere Prüfungen erforderlich, die den physikalischen und chemischen Schutz der Leitungen gewährleisten Zeichenerklärung: x Verwertung möglich o Verwertung bedingt möglich – Verwertung nicht möglich • Mitverwertung möglich								

Tab. 52: Stoffgruppe und Verwertungsbereiche der RC-Baustoffe im Erdbau nach M RC [55]

sammensetzung in sieben Stoffgruppen kategorisiert. Für jede Stoffgruppe sind verschiedene Verwendungsbereiche vorgegeben (Tabelle 52). Die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung ist auch in diesem Merkblatt beschrieben. Die einzelnen Körner sind augenscheinlich zu unterscheiden und unterschiedlichen Stoffgruppen zuzuordnen.

M HMVA

Das M HMVA 2014 [53] enthält Informationen über die Entstehung, die Aufbereitung und die Lagerung von HMVA und beschreibt die Eigenschaften und möglichen Anwendungsbereiche im Straßen-, Wege- und Erdbau.

Nach M HMVA sind die HMV-Aschen bezüglich der Salzbelastung zu unterscheiden. HMVA mit geringerer Salzbelastung werden als HMVA-1 bezeichnet, solche mit höherer Salzbelastung als HMVA-2.

Die stoffliche Zusammensetzung von HMVA hängt von der Zusammensetzung der verbrannten Siedlungsabfälle ab, ihre Bestimmung wird nach TP Gestein-StB Teil 3.1.4 [65] durchgeführt. Die verschiedenen Körner sind nachstehenden fünf Stoffgruppen zuzuordnen:

- poröse und dichte Asche mit geringen Anteilen an glasigen bis kristallinen Strukturen,
- Inertstoffe (Glas, Keramik, Porzellan),
- restliche metallische Bestandteile,

Stoffgruppen	Anteil in M.-%
Asche	30 – 80
Glas/Keramik	10 – 50
Metalle	0 – 5
Sonstiges	0 – 25
Unverbranntes	< 0,5

Tab. 53: Bereiche der Stoffgruppen von HMV-Asche [53]

- Sonstiges (z. B. nicht brennbare mineralische Bestandteile, wie Beton, Ziegel, Mauerwerk, Festgestein, Kies) und
- Unverbranntes.

Übliche Bandbreiten der vorgenannten Stoffgruppen sind in Tabelle 53 gegeben.

Anwendungsmöglichkeiten für HMV-Aschen nach M HMVA 2014 [53] sind in Tabelle 54 angegeben. Die Anforderungen, die erfüllt werden müssen, hängen vom jeweils vorgesehenen Anwendungsbereich ab.

M BomF

Seit 2015 ist das Merkblatt für die Verwendung von Boden ohne und mit Fremdbestandteilen im Straßenbau [52] veröffentlicht. Dieses „[...] trägt vorhandene Erfahrungen zusammen und gibt den Anwendern von Boden ohne und mit Fremdbestandteilen Hinweise für die Praxis“ (siehe Tabelle 55).

Anwendungsbereich		
Vollständiger Inhalt der Originattabelle nicht abgebildet		
4	Erdbau nach ZTV E-StB	
4.1	Unterbau	+
4.2	Sickeranlagen und Filterschichten	-
4.3	Baugruben und Leitungsgräben (außerhalb der Leitungszone)	+
4.4	Hinterfüllung und Überschüttung von Bauwerken	-
4.5	Schutzwälle	+
4.6	Bodenverfestigung	+
4.7	Bodenverbesserung	+
Beurteilungskriterium: + Verwertung möglich - Verwertung nicht möglich		

Tab. 54: Anwendungsmöglichkeiten für Hausmüllverbrennungssasche im Erdbau nach M HMVA [53]

Lfd. Nr.	Anwendungsbereich	Boden bzw. Bodenmaterial ¹ ohne und mit Fremdbestandteilen			
		grobkörniger Boden (Bodengruppen GE, GW, GI, SW, SE, SI) ⁵	gemischtkörniger Boden (Bodengruppen SU/ST, GU/GT) ⁵	gemischtkörniger Boden (Bodengruppen SU*/ST*, GU*/GT*) ⁵	feinkörniger Boden (Bodengruppen UL, UM, UA, TL, TM, TA) ⁵
Verwendung					
Vollständiger Inhalt der Originattabelle nicht abgebildet					
3	Erdbau nach ZTV E-StB ¹				
3.1	Damm	x	x	x	x
3.2	Bankett	-	x	x	x
3.3	Herstellung von Substraten/ Vegetationsschichten ³	x	x	x	-
3.4	Abdichtungen	-	-	x	x
3.5	Sickeranlagen und Filterschichten	x	x	-	-
3.6	Leitungsgräben	x	x	x	x
3.7	Hinterfüllungen und Überschüttungen von Bauwerken	x	x	x ⁴	x ⁴
3.9	Schutzwälle	x	x	x	x
3.10	Mechanische Bodenverbesserungen	x	x	-	
3.11	Bodenbehandlung mit Bindemitteln ²	x	x	x	x
x Verwertung möglich - Verwertung nicht möglich					
¹ Sofern eine Unterscheidung von Boden und Bodenmaterial nicht notwendig ist, wird für Boden bzw. Bodenmaterial ohne und mit Fremdbestandteilen einheitlich der Begriff Boden verwendet					
² Anwendung nicht als Bindemittel					
³ Böden, die durch geeignete Maßnahmen nach DIN 18915 für vegetationstechnische Zwecke verwendbar gemacht werden, sind wie Oberboden zu behandeln					
⁴ Einschränkungen siehe ZTV E-StB, Abschnitt 10.2.4, (3) und (4)					
⁵ Bodenklassifikation nach DIN 18196					

Tab. 55: Anwendungsmöglichkeiten von Boden bzw. Bodenmaterial ohne und mit Fremdbestandteilen nach M BomF [52]

Das Merkblatt stellt auch jene Tabellen zur Beurteilung der Beeinflussung der bautechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Bodenarten durch Anteile an Fremdbestandteilen zur Verfügung, die Grundlage der abschließenden Beurteilung dieser Untersuchungen sind.

4.3.2 Erdbautechnische Eigenschaften von RC-Material

Die bodenmechanischen und bautechnischen Eigenschaften von Recycling-Baustoffen variieren und sind allgemein von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Die stoffliche Zusammensetzung der Materialien, die Eigenschaften und das Alter des enthaltenen Betons oder die Aufbereitungsanlage, die zur Zerkleinerung und Siebung verwendet wurde, sind nur einige dieser Einflussfaktoren, die in der Literatur genannt werden [4].

Verdichtungseigenschaften

Im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen weisen die RC-Baustoffe niedrigere Korndichten auf [118] [123] [144] [145]. Nach TAM et al. [145] ist dieser Umstand der größeren Porosität der RC-Baustoffe im Vergleich zu natürlichen Baustoffen sowie der niedrigeren Dichte der Baustoffe und der Materialien, die auf den einzelnen Aggregaten anhaften, (z. B. Zement, Mörtel, Putz) geschuldet. Nach RATHJE et al. [125] sind insbesondere bei feineren Kornanteilen gegenüber den gröberen niedrigere Korndichten zu erwarten, da im Feinkornbereich größere Mengen an Putz und Mörtel mit geringeren Kornfestigkeiten und Dichten enthalten sind. GOMEZ-SOBERON [76] hat für RC-Aggregate Porositätswerte bis 14,8 % ermittelt, während die Werte von natürlichen Gesteinskörnungen unter 3 % liegen. Die hohe Porosität der RC-Baustoffe hat auch einen großen Einfluss auf ihr Wasseraufnahmevermögen. Die Wasseraufnahme variiert relativ stark und liegt in der Regel zwischen 3 % und 10 % höher als im Vergleich zu natürlichen Aggregaten. POON et al. [123] berichten für Ziegelanteile mit einem Korndurchmesser < 5 mm Wasseraufnahmewerte von ca. 30 %. In der Regel besitzt Betonbruch im Vergleich zu Ziegelbruch und Bauschutt höhere Korndichten und ein niedrigeres Wasseraufnahmevermögen. Insbesondere bei Bauschuttgemischen hängen die durchschnittliche Korndichte sowie das Wasseraufnahmevermögen stark von der stofflichen Zusammensetzung ab. Vor allem Fremdstoffe mit hoher

Gesteinskörnung RC-Baustoff	Korndichte [g/cm ³]	Wasseraufnahme [%]
Kies rund	2,55 – 2,75 [10]	< 3
Betonbruch	2,20 – 2,50 [10]	5,8 – 10,5
Ziegelbruch	1,80 – 2,40 [10]	2,5 – 25
Leichtbeton	1,20 – 1,80 [10]	-
Mörtel	2,20 – 2,40 [10]	4 bis > 10 [26]
Kalksandstein	1,77 – 2,65 [48]	9,5 – 18 [48]

Tab. 56: Typische Korndichten und Wasseraufnahmewerte von RC-Baustoffen und natürlichen Gesteinskörnungen

Porosität (Mörtel, Putz, usw.) beeinflussen die beiden letztgenannten Eigenschaften stark [118] [123]. Typische Werte für Korndichten von RC-Baustoffen sind in Tabelle 56 angegeben.

Hinsichtlich der Verdichtungseigenschaften weisen RC-Baustoffe gegenüber natürlichen Gesteinskörnungen niedrigere Proctordichten und höhere optimale Wassergehalte auf [144]. Die Wasseraufnahme und die Rohdichte der Materialien sind die wesentlichen Parameter, die das Proctoroptimum beeinflussen [96] [121] [144]. Aufgrund des hohen Wasseraufnahmevermögens ist bei den RC-Materialien zu berücksichtigen, dass nur ein Teil des zugegebenen Wassers verdichtungswirksam ist, da sich ein großer Anteil des vorhandenen Wassers in die innere Porenstruktur poröser RC-Materialien einlagert und somit an der Kornoberfläche durch Verminderung der Reibung an den Korn-zu-Korn-Kontakten nicht zur Vereinfachung der Kornumlagerung beiträgt. Deswegen ist bei der Durchführung von Versuchen mit solchen Materialien die Homogenisierungszeit zwischen Wasserzugabe und Verdichtung zu berücksichtigen (vgl. KRASS & KOLLAR [96]). Dieser Effekt zeigt sich auch darin, dass sich bei RC-Baustoffen oft keine typischen glockenförmigen Proctorkurven ausbilden, an denen das Proctoroptimum sowie der Proctorwassergehalt eindeutig abgelesen werden können. Beide Werte werden bei solchen Materialien in der Regel an jenem Punkt festgelegt, an dem bei der Versuchsdurchführung Wasser austritt bzw. beim Schnittpunkt der Proctorkurve mit der Linie eines bestimmten Sättigungsgrades [96] [118] [125].

In der Arbeit von POON et al. [123] zur Eignung von RC-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel wurden ein Betonbruch, ein Ziegelbruch sowie Gemische mit unterschiedlichen Ziegelanteilen untersucht. Aus den durchgeführten Proctorversuchen geht hervor, dass ein höherer Ziegelanteil zur Erhö-

hung des optimalen Wassergehaltes und zur Verringerung der maximalen Trockendichte führt. Nach POON et al. [123] ist dies sowohl auf die niedrigere Dichte und die damit verbundene höhere Wasseraufnahme der Ziegel als auch auf die unregelmäßige Form der Körner, durch die sich der Hohlraum zwischen den einzelnen Partikeln erhöht, zurückzuführen. Zudem weisen die Mischungen, bei denen der Feinanteil zu großen Teilen aus Ziegelbruch besteht, flachere Proctorkurven auf und zeigen damit eine geringere Empfindlichkeit gegenüber einer Änderung des Wassergehalts als die Mischungen, deren Feinanteil sich überwiegend aus Betonbruch zusammensetzt.

Die Anwendung von ziegelreichen RC-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel wurde auch von KRASS & KOLLAR [96] untersucht. In Rahmen ihrer Arbeit wurden Ziegelbrüche unterschiedlicher Beschaffenheit – hierbei wurde insbesondere zwischen hart- und weichgebrannten Ziegeln differenziert – sowie Mischungen aus RC-Beton und RC-Ziegel untersucht. Schwerpunkte der Forschung waren die Frostempfindlichkeit, die Kornverfeinerung infolge Verdichtung mit Proctorenergie, die Tragfähigkeit und die Durchlässigkeit der Baustoffe. Anhand der Ergebnisse der Proctorversuche an den verschiedenen Ziegelsorten wurde nachgewiesen, dass der optimale Wassergehalt von der Wasseraufnahme der Baustoffe abhängig ist. Die Korngemische aus hartgebranntem dichtem Ziegel weisen im Allgemeinen einen niedrigeren Proctorwassergehalt als Korngemische aus weichgebrannten Ziegeln auf. Die maximal erreichbaren Trockendichten hängen stark von der Rohdichte der Baustoffe ab. So lag der Proctorwassergehalt hartgebrannter Ziegel in den Untersuchungen bei etwa 10 %, während bei weichgebranntem porösem Ziegel die Werte bei etwa 22 % lagen. Bei den porösen Ziegelsorten werden von den Autoren niedrigere Proctordichten beschrieben als bei den dichteren Ziegelsorten. Der Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und Proctorwassergehalt wird auch in der Arbeit von PARK [121] bestätigt.

TAHERKHANI et al. [144] haben den Einfluss von RC-Baustoffen auf die Eigenschaften von Gemischen mit natürlichen Gesteinskörnungen beurteilt. In Rahmen ihrer Arbeit wurde eine natürliche Gesteinskörnung, die für Tragschichten ohne Bindemittel geeignet ist, sowie Gemische der natürlichen Gesteinskörnung mit 20 M.-%, 50 M.-% und 75 M.-% Betonbruch, untersucht. In Versuchen zur Rohdichte und zur Wasseraufnahme wurde gezeigt, dass

ein steigender Anteil an RC-Beton zu einer Verringerung der Rohdichte und zur Erhöhung der Wasseraufnahme führt. Auch die Proctordichte nimmt mit zunehmendem Anteil an RC-Beton ab, während der Proctorwassergehalt infolge der höheren Wasseraufnahme des RC-Betons steigt.

Kornzertrümmerung durch Verdichtung

Die mechanische Festigkeit von RC-Baustoffen gegen Zertrümmerung infolge mechanischen Energieeintrags wird in der Literatur oft anhand des Schlagzertrümmerungswertes, des Los-Angeles-Koeffizienten oder durch den Vergleich der Kornverteilung vor und nach Verdichtung quantifiziert. ARULRAJAH et al. [5], die die geotechnischen Eigenschaften von einem Betonbruchmaterial der Körnung 0/22 mm untersuchten, berichten einen Los-Angeles-Wert von 28 %. Die Kornzertrümmerung infolge Verdichtung mit modifizierter Proctorenergie konnte durch einen Vergleich der Sieblinien vor und nach Verdichtung gezeigt werden. Der Siebdurchgang der Korngrößenverteilung nach Verdichtung lag dabei um 0,4 M.-% bis 6,4 M.-% über den Werten der Sieblinie vor Verdichtung. Dennoch behielt das Material eine für erdbautechnische Zwecke wünschenswerte, gute Abstufung. Dieselben Versuche wurden an einem Ziegelbruch 0/22 mm durchgeführt [4]. Der Ziegelbruch besaß dabei eine geringere Festigkeit als der RC-Beton und so lag der ermittelte Los-Angeles-Wert von Ziegelbruch bei 36 %. Obwohl der Vergleich der Korngrößenverteilungen vor und nach Verdichtung eine deutliche Zertrümmerung des Ziegels zeigt, blieb auch hier die Körnungslinie gut abgestuft. Der Los-Angeles-Koeffizient für Gemische aus RC-Ziegel und RC-Beton bzw. aus RC-Ziegel und natürlichen Gesteinskörnungen, der von ARULRAJAH et al. [6] untersucht wurde, variiert zwischen 28 % und 33 % bzw. zwischen 21 % und 29 %. Aus den Ergebnissen der Kornzertrümmerung infolge Verdichtung nach ARULRAJAH et al. [6] geht hervor, dass der Ziegelanteil 50 % nicht überschritten werden sollte, damit eine für erdbautechnische Zwecke geeignete Kornverteilung nach Verdichtung erhalten bleibt. KRASS & KOLLAR [96] haben die Kornfestigkeit von RC-Ziegel sowie von Gemischen aus RC-Ziegel mit RC-Beton sowohl durch Schlagzertrümmerungsversuche als auch durch einen Vergleich der Sieblinien vor und nach Verdichtung mit Proctorenergie untersucht. Aus den Ergebnissen konnte kein Verhältnis zwischen dem Schlagzertrümmerungswert und der Zertrümmerung infolge Verdichtung festgestellt werden.

Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit von RC-Baustoffen ist hauptsächlich von der stofflichen Zusammensetzung und der erreichten Lagerungsdichte abhängig [96] [118]. RC-Beton weist in der Regel hohe CBR-Werte, die vergleichbar mit denen natürlicher Gesteinskörnungen sind [5] [118], auf. ARULRAJAH et al. [5] berichten für Betonbruch, der mit modifizierter Proctorenergie verdichtet wurde, Werte zwischen 118 % und 160 %. Mit zunehmendem Ziegelanteil verringert sich nach POON et al. [123] die Tragfähigkeit. Dem Autor zufolge ist dies auf den geringeren Widerstand der Ziegel und die schwache Verzahnung zwischen den Körnern der unterschiedlichen Materialien zurückzuführen. KRASS & KOLLAR [96] haben CBR-Versuche sowohl nach Verdichtung mit Proctorenergie als auch nach 12 Frost-Tau-Wechsel (FTW) an verschiedenen Ziegelsorten und Gemischen aus RC-Ziegel mit RC-Beton durchgeführt. Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass die CBR-Werte der Gemische unabhängig vom Ziegelanteil sind und nur kleine Unterschiede zwischen den Gemischen und dem reinen Ziegelbruch festzustellen sind. Die CBR-Werte der Ziegelbrüche lagen nach Verdichtung mit Proctorenergie zwischen 51 % und 165 %. Die höchsten Werte wurden bei den dichten Ziegelsorten ermittelt. Die FTW hatten keinen signifikanten Einfluss auf die CBR-Werte und es konnte keine Verschlechterung der CBR-Werte nach den FTW festgestellt werden. Die dokumentierten CBR-Werte der Gemische nach Verdichtung mit Proctorenergie variieren zwischen 80 % und 110 % und die Tragfähigkeit verbesserte sich nach den 12 FTW deutlich. POON et al. [123] berichten keine Veränderung der Tragfähigkeit nach 4 Tagen Wasserlagerung. ARULRAJAH et al. [4] haben für Ziegelbruch CBR-Werte zwischen 123 % und 138 % ermittelt. Bei RC-Bauschuttgemischen sind wegen den zusätzlichen Anteilen an Fremdstoffen niedrigere Tragfähigkeitswerte zu erwarten [118]. TAHERKHANI et al. [144] haben auch festgestellt, dass in Mischungen aus natürlichen Gesteinskörnungen und Betonbruch eine Erhöhung des RC-Anteils zur Verringerung der CBR-Werte führt. Die ermittelten CBR-Werte lagen bei 128 %, 110 % und 88 % für Mischungen mit Anteilen an 20 M.-%, 50 M.-% bzw. 75 M.-% Betonbruch.

Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit von RC-Baustoffen wurde von verschiedenen Autoren durch Triaxialversuche bzw. durch direkte Scherversuche untersucht. ARULRA-

JAH et al. haben CD-Versuche (konsolidierte, drainierte Triaxialversuche) an reinem Betonbruch [5] und reinem Ziegelbruch [4] durchgeführt. Die Radialspannung σ_3 betrug dabei 50, 100 bzw. 200 kPa. Basierend auf einer linear verlaufenden Schergerade nach Mohr-Coulomb wies der Betonbruch eine Kohäsion von 45 kPa und einen Reibungswinkel von 49° auf. Die ermittelten Werte für Ziegelbruch lagen bei 41 kPa und 49° . Ähnliche Versuche wurden sowohl an Gemischen aus Beton- und Ziegelbruch als auch an Gemischen aus Ziegelbruch und natürlichen Gesteinskörnungen durchgeführt [6]. Die dokumentierten Werte für Kohäsion und Reibungswinkel der untersuchten Materialien variieren zwischen 41 und 80 kPa und zwischen 43° und 50° . Aus den Ergebnissen konnte kein Zusammenhang zwischen den Scherparametern und dem Ziegelanteil festgestellt werden. RATHJE et al. [125] haben die Scherparameter eines Betonbruchs sowohl durch CD-Triaxialversuche als auch durch direkte Scherversuche untersucht. Beide Verfahren zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Kohäsion des Betonbruchs lag bei etwa 61 kPa, der Reibungswinkel wurde zu 46° bestimmt. Nach RATHJE et al. [125] könnte die hohe Kohäsion durch die „Wieder“-Zementierung des Materials, also durch Verfestigungsprozesse infolge puzzolanischer Reaktionen des Betonbruchs, erklärt werden. O'MAHONY [118] führte direkte Scherversuche an einem Betonbruch und einem Bauschuttgemisch durch. Die dabei dokumentierten Reibungswinkel liegen im Bereich der bereits genannten Werte und variieren zwischen 37° und 49° bzw. zwischen 36° und 47° .

4.3.3 Erdbautechnische Eigenschaften von HMV-Aschen

Die Eigenschaften einer HMVA hängen hauptsächlich von ihrer stofflichen und mineralischen Zusammensetzung ab, die durch die Bestandteile des angelieferten und verbrannten Abfalls, dem Verbrennungsprozess (Anlagentyp, Anlagekapazität, Verbrennungstemperatur) und der Vollständigkeit der Verbrennung bestimmt wird. Da die Zusammensetzung von Siedlungsabfall sehr heterogen ist und unter anderem von der Region, in der der Abfall anfällt, und der Jahreszeit abhängig ist, können verschiedene HMVA deutlich unterschiedliche Eigenschaften aufweisen [3] [21] [23] [115].

Obwohl Hausmüllverbrennungsaschen aufgrund ihrer Kornverteilungskurven oft als Kies bzw. Sand klassifiziert werden können, besitzen sie gegen-

über Kiesen und Sanden teilweise abweichende Eigenschaften. So unterscheidet sich die Morphologie der Partikel von Hausmüllverbrennungaschen stark von der Oberflächenbeschaffenheit natürlicher Aggregate. HMV-Aschen bestehen zum Großteil aus Schlacke bzw. Asche, die eine ungleichmäßige, eckige und kantige Form besitzen und eine poröse Struktur aufweisen [23] [84] [155]. Die Form der Körner und die hohe Porosität wirken sich, wie schon bei den RC-Baustoffen, auf die Dichte, das Wasseraufnahmevermögen sowie auf die geotechnischen Eigenschaften des Materials aus. Gemäß früheren Forschungsarbeiten (vgl. [3] [12] [70] [84] [115] [155] [161] [169]) variiert die Korndichte in Abhängigkeit von der Körnung und der chemischen Zusammensetzung der HMV-Aschen von $1,56 \text{ g/cm}^3$ bis $2,80 \text{ g/cm}^3$, während die Wasseraufnahme zwischen 7,7 % und 58,0 % liegt. In der Regel können HMV-Aschen nach entsprechender Aufbereitung bautechnisch als gut abgestufte Kiese bzw. Sande klassifiziert werden. Die Korngrößenverteilung scheint auch unabhängig vom Alter des Materials zu sein [70].

Verdichtungseigenschaften

Hinsichtlich der Verdichtbarkeit weisen porösere HMV-Aschen bedingt durch die geringen Korndichten niedrigere Proctordichten und höhere Proctorwassergehalte gegenüber natürlichen mineralischen Baustoffen auf. ZEKOS et al. [169] haben die Ergebnisse von Proctorversuchen aus unterschiedlichen Forschungsarbeiten verglichen. Der optimale Wassergehalt lag bei den betrachteten Arbeiten zwischen 9 % und 28 %, die Angaben zu den maximalen Trockendichten schwanken zwischen $1,19 \text{ g/cm}^3$ und $2,12 \text{ g/cm}^3$. MUHUNTHAN et al. [115] haben für eine HMV-Flugasche eine Proctordichte von $1,08 \text{ g/cm}^3$ bei einem Wassergehalt von 45,7 % ermittelt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass es sich bei dem untersuchten Material um Flugaschen handelt, während die obenstehenden Werte sich auf Rostaschen beziehen. Anhand ihrer Versuche an Mischungen mit unterschiedlichen Flug- bzw. Rostaschenanteilen konnten sie feststellen, dass mit zunehmendem Flugaschenanteil sinkende Proctordichten bei steigendem Proctorwassergehalt erhalten werden. Dies führen die Autoren darauf zurück, dass Flugaschen, die aus den Rauchgasen der Abluft gefiltert werden, im Vergleich zu den Rostaschen sehr viel feiner sind. Sie besitzen dadurch eine größere Oberfläche und können dadurch mehr Wasser binden.

Tragfähigkeit

Ergebnisse von CBR-Versuchen sind in den Arbeiten von BUZ [21], IZQUIERDO et al. [84], FORTEZA et al. [70] und VEGAS et al. [155] dargestellt. Die dokumentierten Werte liegen zwischen 21 % und 107 %. Als Haupteinflussgrößen auf den CBR-Wert werden die Korngrößenverteilung, die Zusammensetzung der Aschen, der Verdichtungsgrad und die Lagerungszeit (auch hier kommt es durch Mineralum- und Neubildungen zu Verfestigungsprozessen) genannt.

Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeitsparameter von HMV-Aschen variieren relativ stark und sind von unterschiedlichen Faktoren abhängig. In der Regel weisen die Materialien infolge der eckigen und kantigen Form der Körnerhohe Reibungswinkel auf [12] [132] [147]. Die in der Literatur dargestellten Werte liegen zwischen 42° und 59° . Nach BECQUART et al. [12], MUHUNTHAN et al. [115] und TAY et al. [147] zeigen die Aschen ähnliche Eigenschaften wie natürliche grobkörnige Böden und weisen eine niedrige (7,7 kPa bis 9,6 kPa) bis gar keine Kohäsion auf. Hinsichtlich der Kohäsion werden in der Literatur allerdings auch gegensätzliche Beobachtungen berichtet, was sich mit der eingangs berichteten Tatsache erklären lässt, dass verschiedene HMV-Aschen sich in ihren Eigenschaften deutlich unterscheiden können. So haben ZEKOS et al. [169] durchaus beträchtliche Werte für die Kohäsion ermittelt (20,1 kPa – 52,4 kPa). Die Scherfestigkeitsparameter scheinen insgesamt von der Korngrößenverteilung und dem Verdichtungsgrad abhängig zu sein, auch der Wassergehalt der Probe beeinflusst die Ergebnisse [161] [169]. Aus den Untersuchungen von WENG et al. [161] an künstlichen Mischungen ist zu entnehmen, dass die chemische Zusammensetzung der Asche eine große Rolle auf die Scherfestigkeit spielt.

4.4 Eigene Untersuchungen

4.4.1 RC-Baustoffe mit und ohne Bodenanteile

Material

Das aufbereitete Betonbruchmaterial (RC-Beton) der Körnung 0/8 mm und 0/32 mm wurde von einem Recyclingunternehmen aus dem Großraum München bezogen. Von Material 0/8 mm wurde vorab

der Anteil > 4 mm abgesiebt (RC-Beton 0/4). Da der gelieferte Betonbruch der Körnung 0/32 mm auch Überkorn enthielt, wurde dieses vor Durchführung der Laborversuche abgesiebt. Die Ergebnisse der Siebanalyse sind Bild 114 zu entnehmen.

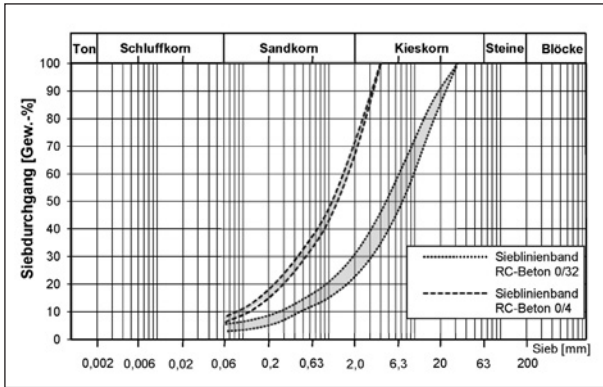


Bild 114: Sieblinienbänder der RC-Beton 0/4 und RC-Beton 0/32

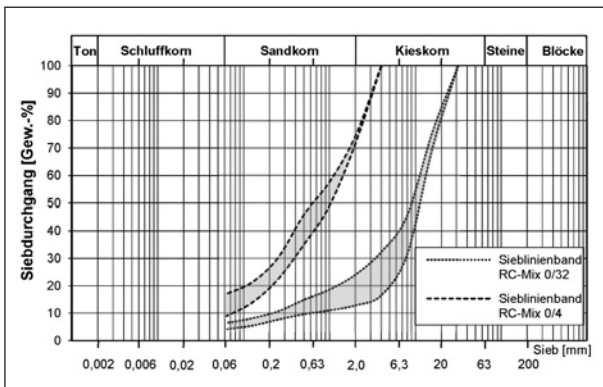


Bild 115: Sieblinienbänder der Vorabsiebmaterialien aus RC-Mix

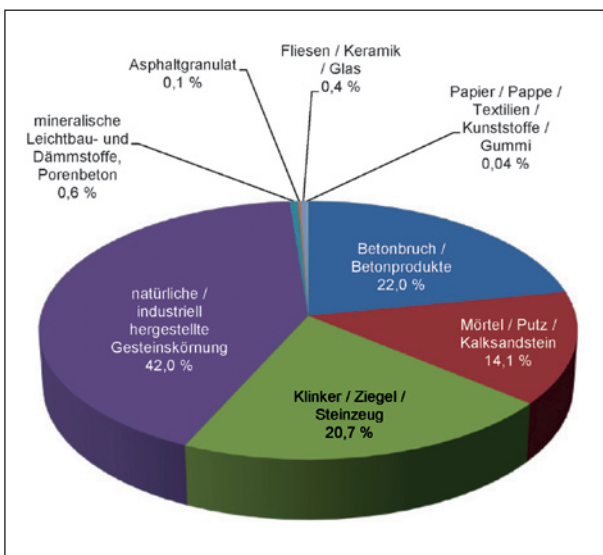


Bild 116: Stoffliche Zusammensetzung des RC-Mix bestimmt an der Fraktion 4/32

Ein aufbereitetes Bauschuttgemisch (RC-Mix) wurde vom selben Recyclingunternehmen bezogen wie der vorgenannte RC-Beton. Da es nur in der Körnung 0/56 mm geliefert werden konnte, wurde der Anteil > 4 mm bzw. > 31,5 mm abgesiebt, sodass für die Untersuchungen Materialien der Körnung 0/4 mm (RC-Mix 0/4) bzw. 0/32 mm (RC-Mix 0/32) übrigblieben. Die Sieblinienbänder sind in Bild 115 dargestellt.

Die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung des RC-Mix erfolgte nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5 [66] an der Teilfraktion 4/32 mm. Das Gemisch bestand demnach aus 42 M.-% Gesteinskörnung, 22 M. % Betonprodukten, 21 M.-% Klinker, Ziegel und Steinzeug und zu 14 M.-% aus Mörtel, Putz und Kalksandstein (Bild 116).

Zusätzlich wurde ein RC-Gemisch aus RC-Beton und RC-Ziegel gezielt so hergestellt, dass der Ziegelanteil insgesamt den in TL Gestein-StB geforderten Wert von max. 30 M.-% überschritt. Grundlage für den Ziegelanteil dieses Materials war eine Mischung aus Dach- und Mauerziegelbruch (je 0/4 mm und 0/32 mm), die am Zentrum Geotechnik hergestellt wurde. Die Ausgangsmaterialien, Mauerziegel 0/4 und 0/16 sowie auch Dachziegel 0/32 mm, wurden von einer Recyclingfirma aus dem Münchner Umland bezogen. Die hergestellte Mischung 0/32 mm (RC-Ziegel 0/32) wurde aus 50 M.-% Mauerziegel 0/16 mm und 50 M.-% Dachziegel 0/32 mm hergestellt. Die Mischung 0/4 mm (RC-Ziegel 0/4) wurde aus 50 M.-% Mauerziegel 0/4 mm und 50 M.-% Dachziegel 0/4 mm zusammengesetzt. Dabei wurde der Dachziegelbruch der Körnung 0/4 mm durch Absiebung aus der gelieferten Körnung 0/32 mm erhalten.

Mit diesem Ziegelgemisch wurden im Anschluss zwei Gemische der Körnungen 0/4 mm und 0/32 mm erstellt, die einen Ziegelanteil von 40 M.-% enthalten (RCBZ04 bzw. RCBZ032). Die Mischungen wurden aus den oben genannten RC-Beton und dem beschriebenen RC-Ziegel der entsprechenden Körnungen zusammengesetzt. Die Korngrößenverteilungen der so entstandenen Mischungen sind in Bild 117 dargestellt.

An Mischungen wurden Laborversuche zu Verdichtungseigenschaften und Tragfähigkeit durchgeführt.

Um den Einfluss eines Bodenanteils auf die Eigenschaften von RC-Materialien zu untersuchen, wurden Versuche an Gemischen aus RC-Baustoffen und natürlichen mineralischen Böden unterschied-

licher Körnung durchgeführt. Als grobkörniger Boden wurde ein rundkörniger Frostschutzkies der Korngruppe 0/32 verwendet. Es handelt sich nach DIN 18196 [45] um einen weit gestuften Kies (GW). Als feinkörniger Boden wurde der aus der Kieswäsche stammende Feinkornanteil verwendet. Es handelt sich um einen Schluff, der nach DIN 18196 [45] als leicht plastischer Ton (TL) zu klassifizieren

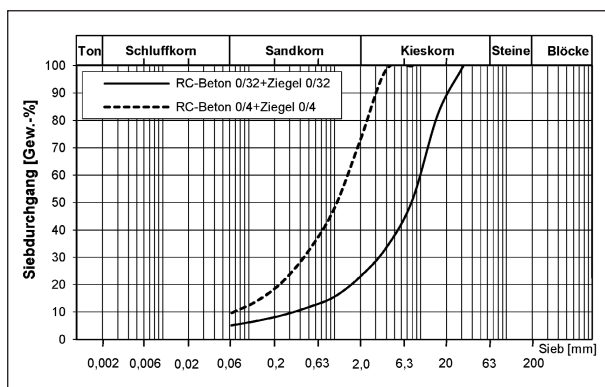


Bild 117: Korngrößenverteilung der Mischungen aus RC-Beton und RC-Ziegel jeweils in den Korngrößen 0/4 und 0/32 mm

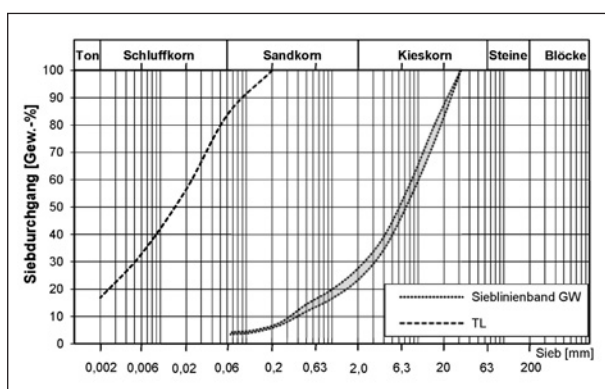


Bild 118: Korngrößenverteilung der verwendeten Böden

ist. Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze kann mit $w_p = 17,2 \%$, jener an der Fließgrenze $w_L = 30,4 \%$ angegeben werden. Die Korngrößenverteilung der Böden und das Plastizitätsdiagramm für den Schluff sind in Bild 118 und Bild 119 dargestellt.

Die im Zuge dieser Arbeit untersuchten Materialien umfassen Mischungen der rezyklierten Materialien der Korngruppe 0/4 mm mit dem feinkörnigen Boden TL und der RC-Baustoffe 0/32 mm mit dem grobkörnigen Boden GW. Zusätzlich wurden auch Mischungen aus groben RC-Materialien (0/32 mm) mit dem feinkörnigen Boden TL untersucht. Die untersuchten Mischungen sind in Tabelle 57 zusammengefasst. An allen Mischungen wurden Laborversuche zu Verdichtungseigenschaften, Tragfähigkeit und Kornertrümmung durchgeführt.

Zur Identifizierung des Einflusses von Fremdstoffen auf die Eigenschaften von Baustoffen wurden zwei Mischungen von RC-Materialien mit Boden ausgewählt und mit jeweils 0,2 M.-%, 1 M.-% bzw. 5 M.-% Fremdstoffen gemischt. Als Fremdstoffe

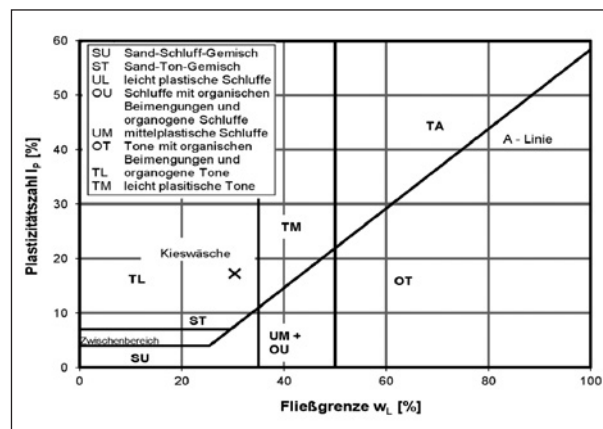


Bild 119: Plastizitätsdiagramm für den feinkörnigen Boden

Bezeichnung	RC-Baustoff		Boden	
	M.-%	Material	M.-%	Material
RCB04TL	70 %	RC-Beton 0/4	30 %	TL
RCBZ04TL	70 %	RC-Beton+RC-Ziegel 0/4	30 %	TL
RCM04TL	70 %	RC-Mix 0/4	30 %	TL
RCB032GW	70 %	RC-Beton 0/32	30 %	GW
RCBZ032GW	70 %	RC-Beton+RC-Ziegel 0/32	30 %	GW
RCM032GW	70 %	RC-Mix 0/32	30 %	GW
RCB032TL	70 %	RC-Beton 0/32	30 %	TL
RCBZ032TL	70 %	RC-Beton+RC-Ziegel 0/32	30 %	TL
RCM032TL	70 %	RC-Mix 0/32	30 %	TL

Tab. 57: Versuchsmischungen aus RC-Baustoffen mit 30 % Boden

wurden Holzspäne, Polystyrolschaumkugeln und Kunststoffgranulat verwendet (siehe dazu auch Bild 120).

Als von Eigenanteilen an Fremdstoffen unbeeinflusstes Ausgangs-Material wurde das Gemisch aus Boden (TL, GW) und Betonbruch 0/4 bzw. 0/32 mm gewählt. Die Zusammensetzung und die Bezeichnung der Gemische sind in Tabelle 58 zusammenfassend dargestellt. Für alle Mischungen wurden Proctor- und CBR-Versuche durchgeführt.

Allgemeine Angaben zur Probenvorbereitung

Um die Ergebnisse verschiedener Versuche vergleichen zu können, müssen die einzelnen Messproben eine möglichst homogene Kornzusammensetzung aufweisen. Hierbei besteht insbesondere bei den grobkörnigen Materialien der Körnung 0/32 mm die Gefahr der Entmischung. Aus diesem Grund wurden die einzelnen Messproben einer Versuchsreihe in der Korngröße 0/32 durch Teilung einer Laboratoriumsprobe mit dem Riffelteiler gemäß DIN 932-2 [35] erstellt. Da die Entmischung der Proben

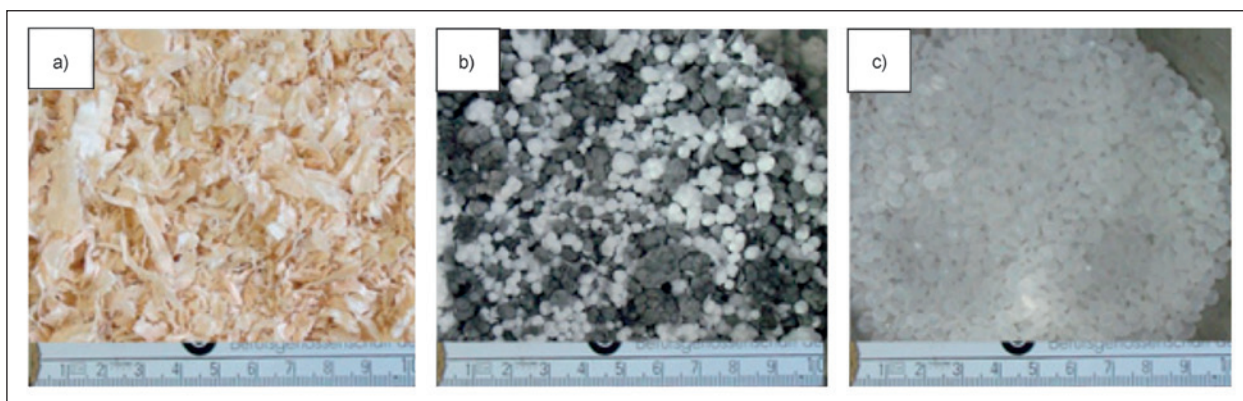


Bild 120: Verwendete Fremdstoffe: a) Holzspäne, b) Polystyrolschaumkugeln, c) Kunststoffgranulat

Bezeichnung	Fremdbestandteil		Boden		Fremdstoff	
	M.-%	Material	M.-%	Material	M.-%	Material
RCB04TL02H	69,8 %	RCB04	30 %	TL	0,2 %	Holzspäne
RCB04TL1H	69,0 %	RCB04	30 %	TL	1,0 %	Holzspäne
RCB04TL5H	65,0 %	RCB04	30 %	TL	5,0 %	Holzspäne
RCB04TL02P	69,8 %	RCB04	30 %	TL	0,2 %	Polystyrolschaumkugeln
RCB04TL1P	69,0 %	RCB04	30 %	TL	1,0 %	Polystyrolschaumkugeln
RCB04TL5P	65,0 %	RCB04	30 %	TL	5,0 %	Polystyrolschaumkugeln
RCB04TL02K	69,8 %	RCB04	30 %	TL	0,2 %	Kunststoffgranulat
RCB04TL1K	69,0 %	RCB04	30 %	TL	1,0 %	Kunststoffgranulat
RCB04TL5K	65,0 %	RCB04	30 %	TL	5,0 %	Kunststoffgranulat
RCB032GW02H	69,8 %	RCB032	30 %	GW	0,2 %	Holzspäne
RCB032GW1H	69,0 %	RCB032	30 %	GW	1,0 %	Holzspäne
RCB032GW5H	65,0 %	RCB032	30 %	GW	5,0 %	Holzspäne
RCB032GW02P	69,8 %	RCB032	30 %	GW	0,2 %	Polystyrolschaumkugeln
RCB032GW1P	69,0 %	RCB032	30 %	GW	1,0 %	Polystyrolschaumkugeln
RCB032GW5P	65,0 %	RCB032	30 %	GW	5,0 %	Polystyrolschaumkugeln
RCB032GW02K	69,8 %	RCB032	30 %	GW	0,2 %	Kunststoffgranulat
RCB032GW1K	69,0 %	RCB032	30 %	GW	1,0 %	Kunststoffgranulat
RCB032GW5K	65,0 %	RCB032	30 %	GW	5,0 %	Kunststoffgranulat

Tab. 58: Zusammensetzung und Bezeichnung der Mischungen aus Fremdbestandteilen, Boden und Fremdstoffen

in der Korngröße 0/4 mm als weniger problematisch erachtet wurde, wurde bei der Körnung 0/4 von der Verwendung des Riffelteilers abgesehen. Die Masse einer Einzelprobe wurde dabei so bemessen, dass ihre Menge ausreichend war, um sowohl den vorgesehenen Versuch durchzuführen als auch zusätzlich den Wassergehalt der Probe am Restmaterial der Probenherstellung bestimmen zu können.

Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften

Das Verdichtungsverhalten der Versuchsmaterialien wird im Labor mit dem nach DIN 18127 [40] genormten Proctorversuch untersucht. Nach der Norm wird das zu untersuchende Material in Abhängigkeit von der maximalen Korngröße in Versuchszylindern mit unterschiedlichen Durchmessern und Höhen lagenweise eingebaut und verdichtet. Für ein Größtkorn von 32 mm ist ein Versuchszylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 125 mm (zzgl. Aufsatzring) vorgesehen. Für ein Größtkorn von 4 mm ist ein Versuchszylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 120 mm zu verwenden. Da im Rahmen dieser Arbeit CBR-Werte für jede verdichtete Probe ermittelt werden sollten, wurde für die Probenherstellung der gemäß TP BF-StB Teil 7.1 [60] beschriebene Proctortopf verwendet. Dieser besteht aus einem 175 mm hohen Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einem 65 mm hohen Aufsatzring, welcher mit Spannschrauben auf einer Grundplatte mit einem Durchmesser von 250 mm befestigt ist. Eine 50 mm hohe Einsatzscheibe befindet sich innerhalb des Zylinders (siehe Bild 121).

Der Versuch wurde für jedes Versuchsmaterial mit mindestens fünf unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt. Nach der Wasserzugabe wurde die Probe manuell mit einer Handschaufel homogeni-

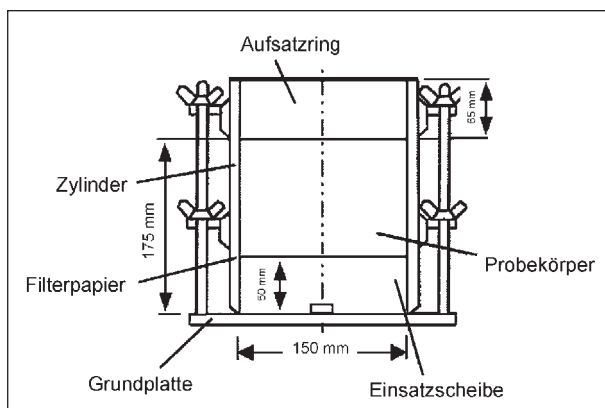


Bild 121: Proctortopf bestehend aus Zylinder, Aufsatzring, Grundplatte und Einsatzscheibe [60]

siert und anschließend (nach einer zehnmütigen Homogenisierungszeit im abgedeckten Behälter) für die Verdichtung im CBR-Topf verwendet. Für jede Probe wurde dabei neues Material verwendet. Die Proben wurden unter Verwendung einer Stahlplatte (zwischen Bodenprobe und Probenoberfläche) verdichtet. Die Stahlplatte wurde dabei für jede Schicht verwendet. Der Wassergehalt der verdichteten Probe wurde nach der Durchführung des CBR-Versuchs bestimmt, zusätzlich erfolgte die Wassergehaltsbestimmung am nicht verwendeten Material der Probenherstellung. Die ermittelten Wertepaare (w, ρ_d) wurden im Trockendichte-Wassergehalts-Diagramm aufgetragen und die jeweilige Verdichtbarkeit durch eine Ausgleichskurve veranschaulicht. Als Verdichtungsoptimum (w_{Pr}, ρ_{Pr}) wurde der Maximalwert der Trockendichte dieser Ausgleichskurve festgelegt, wenn die Kurve eine „typische Form“ mit fallendem Ast auf der nassen Seite aufwies. In bestimmten Fällen wurde das Verdichtungsoptimum an jenem Punkt bestimmt, an dem die Verdichtung wegen Wasseraustritt bei der Versuchsdurchführung abgebrochen werden musste (in der Nähe der Sättigungslinie, typisch für grobkörnige Materialien).

Im Anschluss an die Verdichtungsversuche wurden Tragfähigkeitsversuche mittels Stempel Eindringversuch durchgeführt. Der Versuch ist in TP BF-StB Teil B 7.1 [60] beschrieben. Der CBR-Versuch ist gewöhnlich auf Proben mit einem Größtkorn von 22,4 mm beschränkt und wird im Verdichtungs-optimum durchgeführt. Im Rahmen dieser Forschung wurden CBR-Versuche an allen hergestellten Proben durchgeführt, wobei auch Proben mit Größtkorn 32 mm untersucht wurden. Erfahrungen am Zentrum Geotechnik der TU München zeigen, dass dies grundsätzlich möglich ist. Es ist dabei allerdings mit einer größeren Streuung der Versuchsergebnisse zu rechnen.

Die CBR-Versuche (siehe Bild 122) wurden auf der Unterseite der verdichteten Proben durchgeführt. Die nach dem Regelwerk der FGSV vorgeschriebenen Belastungsscheiben wurden verwendet und der Kraftschluss zwischen Laststempel und Probenoberfläche durch eine Vorlast von etwa 40 N gewährleistet. Die Vorschubgeschwindigkeit des Stempels betrug in allen Fällen 1,25 mm/min und wurde bis zu einer Eindringung des Stempels von etwa 10 mm aufrechterhalten. Die Last-Eindringungs-Kurven wurden (falls erforderlich) gemäß TP BF-StB Teil B 7.1 [60] korrigiert und der CBR-Wert bei einer Eindringung von 2,5 mm und 5 mm

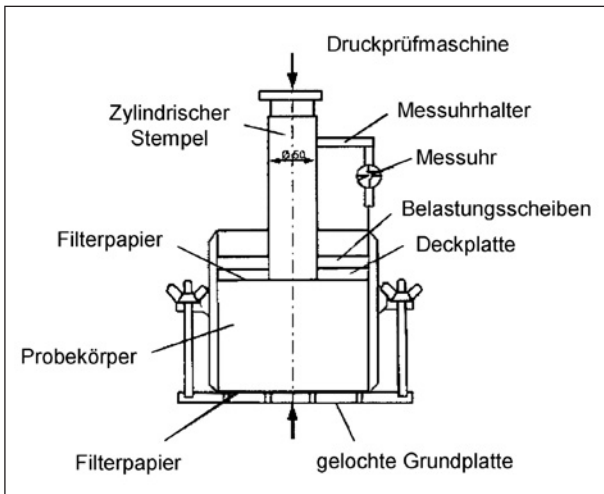


Bild 122: Versuchsaufbau für die Bestimmung des CBR-Werts [60]

ermittelt. Der Maximalwert dieser beiden Werte wurde gemäß oben genannter Prüfvorschrift als CBR-Wert verwendet.

Die Proctorkurven und die CBR-Werte für die RC-Baustoffe ohne Bodenzugabe (RC-Beton, RC-Mix, RC-Beton+Ziegel) sind in den Diagrammen (Bild 123 bis 128) für beide Korngruppen (0/4 und 0/32 mm) dargestellt. Die dargestellten Proctorpunkte, die ohne Füllung eingezeichnet sind, stellen Punkte dar, bei denen es beim Proctor- oder CBR-Versuch zum Wasseraustritt aus dem CBR-Topf aufgrund zu hoher Wassergehalte gekommen ist. Die Wassergehalte bezogen auf den Wassergehalt im CBR-Topf werden dabei als Dreiecke bzw. Dreiecke ohne Füllung dargestellt, während die Wassergehalte

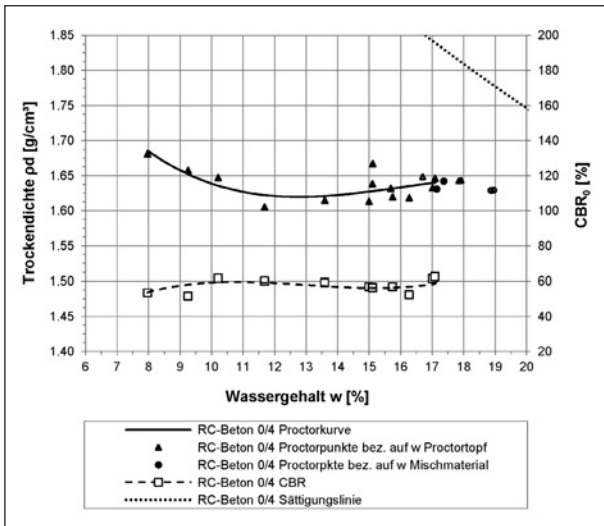


Bild 123: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/4

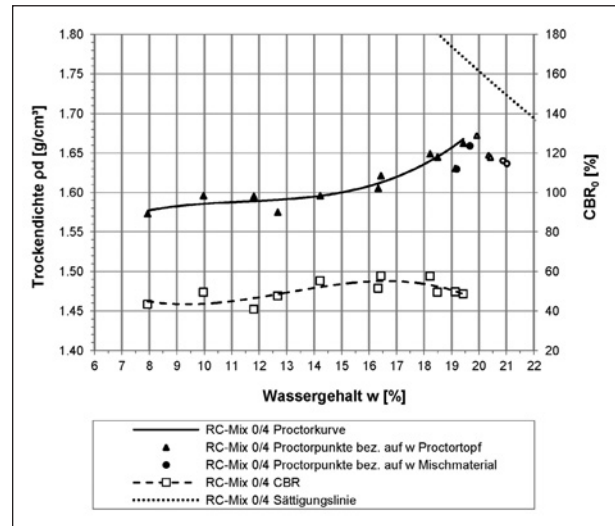


Bild 125: Proctorkurve und CBR-Werte für den Bauschutt RC-Mix 0/4

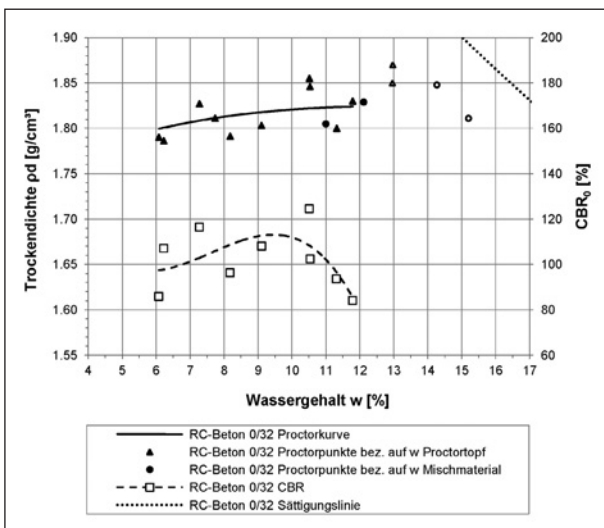


Bild 124: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/32

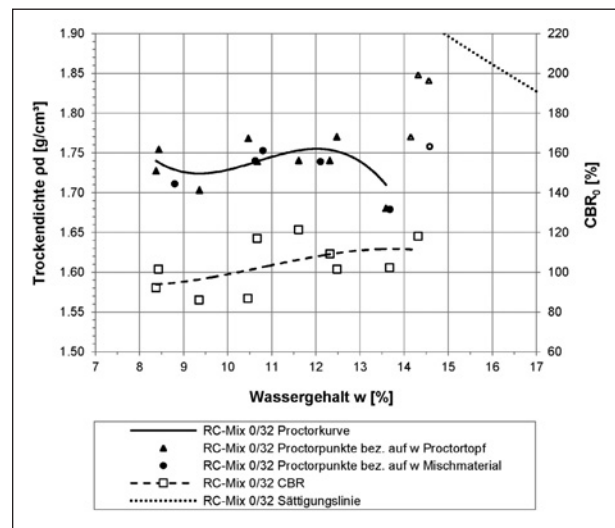


Bild 126: Proctorkurve und CBR-Werte für den Bauschutt RC-Mix 0/32

te, die an dem restlichen Material der Mischung ermittelt wurden, als Kreise eingezeichnet sind. Die Punkte, bei denen es zum Wasseraustritt kam, wer-

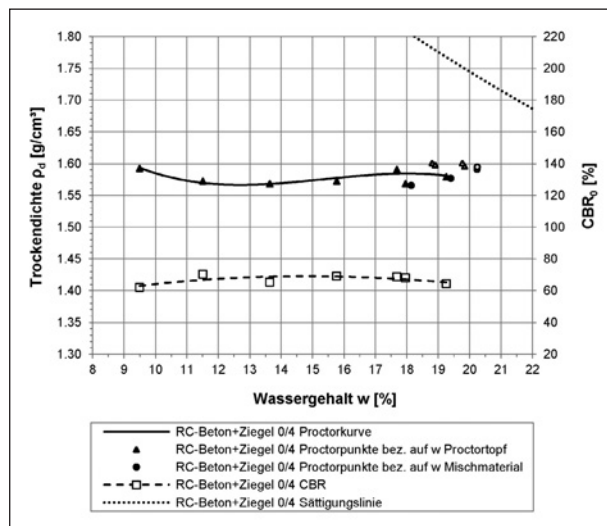


Bild 127: Proctorkurve und CBR-Werte für die Mischung aus RC-Beton und RC-Ziegel 0/4

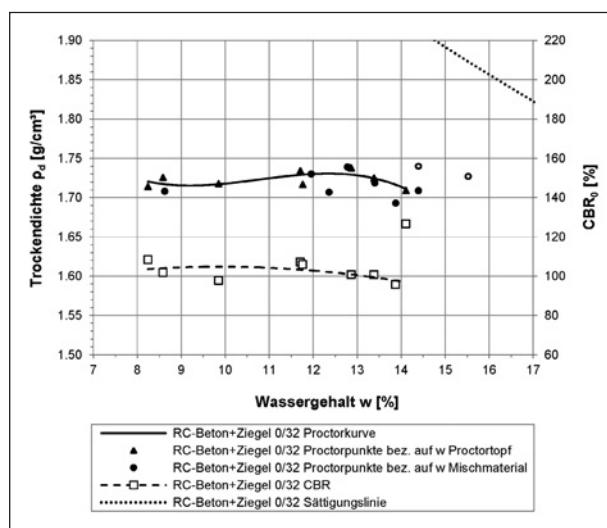


Bild 128: Proctorkurve und CBR-Werte für die Mischung aus RC-Beton und RC-Ziegel 0/32

den für die Darstellung der Proctorkurven nicht berücksichtigt und die ermittelten CBR-Werte der entsprechenden Proben nicht dargestellt. Für die durchgeführten Versuche mit den jeweils höchsten Wassergehalten ist in den Diagrammen die Auswertung der Trockendichte jeweils auf den Wassergehalt des Probekörpers und auf jenen des Restmaterials von der Verdichtung bezogen dargestellt.

Die Verdichtungskurven der RC-Baustoffe ohne Bodenanteile zeigen durchwegs nicht die typische Form mit ausgeprägtem Verdichtungsmaximum. Für alle Materialien scheint die Verdichtung nur in untergeordnetem Maße vom Wassergehalt abhängig zu sein. Als Proctroptimum wurde für alle Materialien jener Punkt festgelegt, an dem Wasseraustritt während des Proctorversuches festgestellt wurde. Die jeweiligen Proctorwassergehalte und -dichten sind in Tabelle 59 zusammengefasst.

Die Zugabe von Ziegel zu RC-Beton führte wahrscheinlich wegen der geringeren Korndichte und der höheren Porosität des Ziegelbruchs (Wasser-aufnahmevermögen) tendenziell zur Verringerung der Proctordichte und zur Erhöhung des Proctorwassergehaltes (Bild 127, Bild 128). Auch der RC-Mix 0/32, der verschiedene Anteile an Baustoffen enthält, weist im Vergleich zum Betonbruch der gleichen Körnung eine leicht niedrigere Proctordichte auf. Dies könnte auch auf den Anteil an Mörtel- und Putz und Kalksandstein (ca. 14 M.-%) zurückzuführen sein. Ähnliche Beobachtungen werden auch in der Literatur berichtet (siehe oben). Insgesamt ist aber festzustellen, dass die erreichbaren Trockendichten und Tragfähigkeiten bei allen untersuchten Materialien einer Körnung (je 0/4 mm und 0/32 mm) vergleichbare Werte aufweisen.

Die Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche an den Gemischen aus RC-Baustoffen mit einem Anteil an 30 M.-% Boden sind in den Bildern 129 bis

Baustoff	Proctorwassergehalt w_{Pr} [%]	Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]	CBR-Werte [%]	Korndichte ρ_s^1 [g/cm ³]
RC-Beton 0/4	17,0	1,639	50 – 62	2,683
RC-Mix 0/4	19,0	1,657	43 – 57	2,701
RC-Beton+RC-Ziegel 0/4	19,0	1,582	60 – 70	2,680
RC-Beton 0/32	11,5	1,824	85 – 125	2,659
RC-Mix 0/32	13,0	1,739	85 – 118	2,651
RC-Beton+RC-Ziegel 0/32	12,5	1,730	96 – 126	2,641

¹ Bestimmung der Korndichte mit dem Luftpiknometer nach TP BF-StB Teil B 3.3 [62]

Tab. 59: Proctordichte, Proctorwassergehalt und CBR-Werte der RC-Baustoffe

137 dargestellt und die wichtigsten Ergebnisse in Tabelle 60 zusammengefasst. Um den Einfluss der Bodenzugabe auf die Proctordichte und die Tragfähigkeit zu verdeutlichen, sind zusätzlich in jedem Diagramm die Proctorkurve und die CBR-Werte des entsprechenden Ausgangsmaterials (RC-Material ohne Boden) dargestellt.

Die Zugabe von TL zu den RC-Baustoffen der Kornklasse 0/4 mm (Bild 129, Bild 131 und Bild 133) führt möglicherweise aufgrund der besseren Abstufung der Gemische (im Vergleich zum reinen RC-Material) zur deutlichen Erhöhung der Proctordichte. Außerdem weisen die ermittelten Proctorkurven eine typische glockenförmige Form auf.

Gleichzeitig weisen die Mischungen auch eine deutliche Abhängigkeit der Tragfähigkeit (CBR) vom Wassergehalt auf. Da der Feinkornanteil der Gemische zwischen 30 M.-% und 40 M.-% liegt, beginnt das Grobkorn in der Feinkornmatrix zu schwimmen und die Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit der Materialien wird maßgeblich von den Eigenschaften des Feinanteils (Anteil feinkörniger Boden TL) bestimmt.

Auch die Mischungen des grobkörnigen Bodens GW mit den groben RC-Materialien der Kornklasse 0/32 mm zeigen höhere erreichbare Proctordichten als das jeweilige Material ohne Boden. Da die Kornverteilungen der jeweils gemischten Materialien ähnlich sind, kann dies wohl auf den Einfluss der

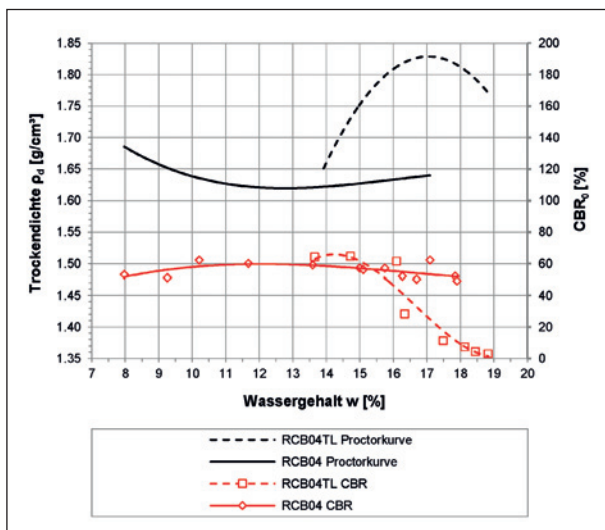


Bild 129: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/4 (RCB04) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCB04TL)

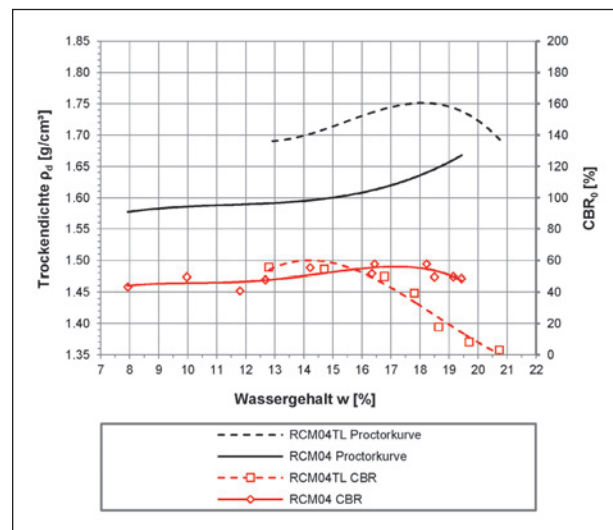


Bild 131: Proctorkurve und CBR-Werte für das RC-Mix 0/4 (RCM04) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCM04TL)

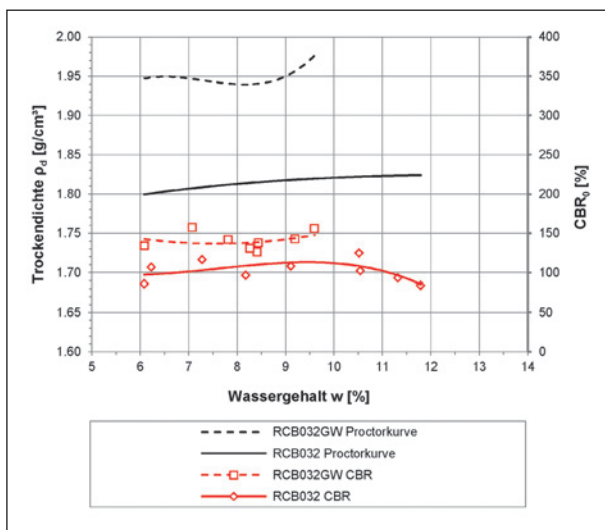


Bild 130: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/32 (RCB032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% GW (RCB032GW)

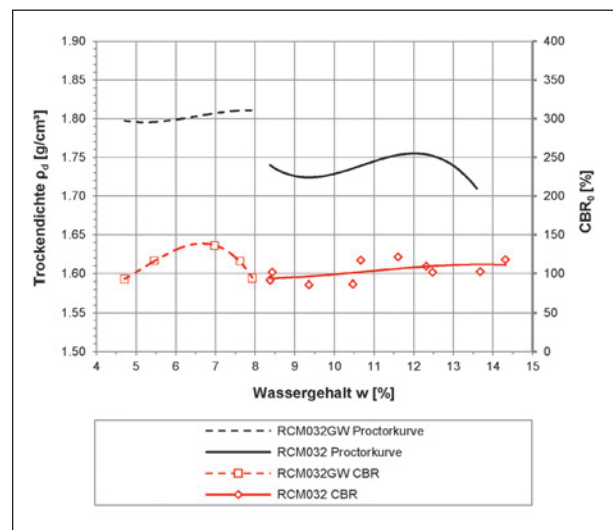


Bild 132: Proctorkurve und CBR-Werte für das RC-Mix 0/32 (RCM032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% GW (RCM032GW)

höheren Korndichte des zugemischten Materials zurückgeführt werden (volles Korn ersetzt im Betrachtungsquerschnitt poröses Korn). Am deutlichsten fällt die Erhöhung hier bei den Mischungen mit RC-Beton 0/32 und RC-Beton+Ziegel 0/32 aus (Bild 130 und Bild 134). Auch die Tragfähigkeiten sind bei diesen Gemischen mit grobkörnigem Boden tendenziell höher, bei der Mischung des RC-Mix 0/32 mit GW bleiben die erreichbaren CBR-Werte jedoch nahezu unverändert im Vergleich zum Material ohne Boden (Bild 132). Deutlich sichtbar für alle grobkörnigen Mischungen (Bild 130, Bild 132 und Bild 134) ist das Absinken des optimal verarbeitbaren Wassergehaltes. Diese fällt vor allem bei den Mischungen mit porösen RC-Materialien (RC-Mix

0/32 und RC-Beton+Ziegel 0/32) stärker aus. Insgesamt bleiben Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit auch bei den Mischungen mit dem grobkörnigen Boden GW nahezu unabhängig vom Wassergehalt.

Die Mischungen der groben RC-Materialien der Fraktion 0/32 mm mit dem feinkörnigen Boden TL zeigen höhere Trockendichten, als die reinen RC-Materialien. Dabei wurde jeweils ein ausgeprägtes Verdichtungsoptimum dokumentiert. Gleichzeitig wiesen alle Mischungen eine deutliche Abhängigkeit der Tragfähigkeit vom Wassergehalt, ähnlich wie bei den Gemischen aus RC-Material der Körnung 0/4 mit dem feinkörnigen Boden TL, auf. Zu den Ergebnissen siehe Bild 135, Bild 136 und Bild 137.

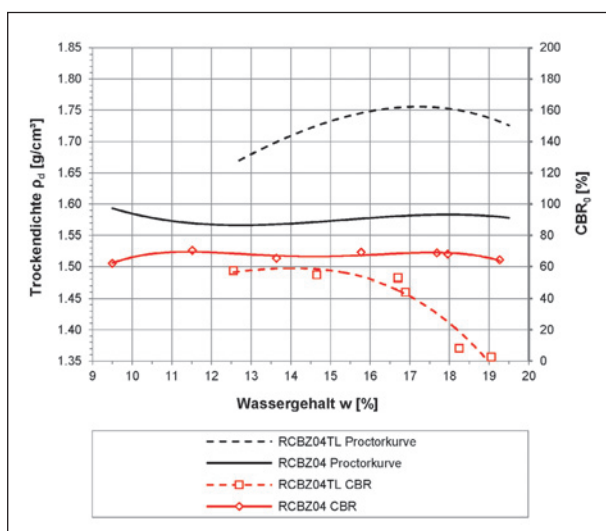


Bild 133: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton+Ziegel 0/4 (RCBZ04) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCBZ04TL)

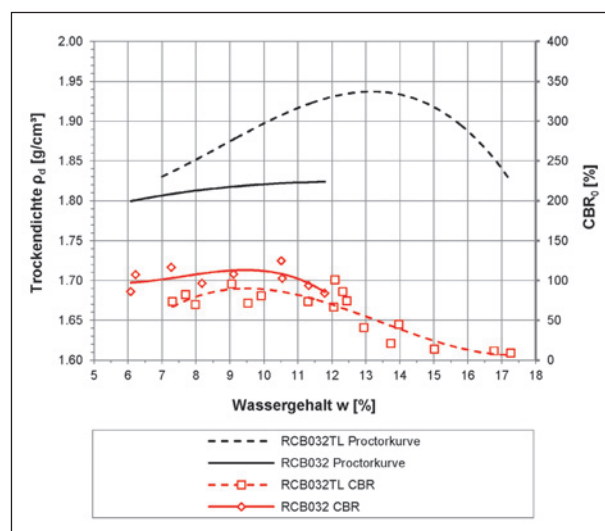


Bild 135: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/32 (RCB032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCB032TL)

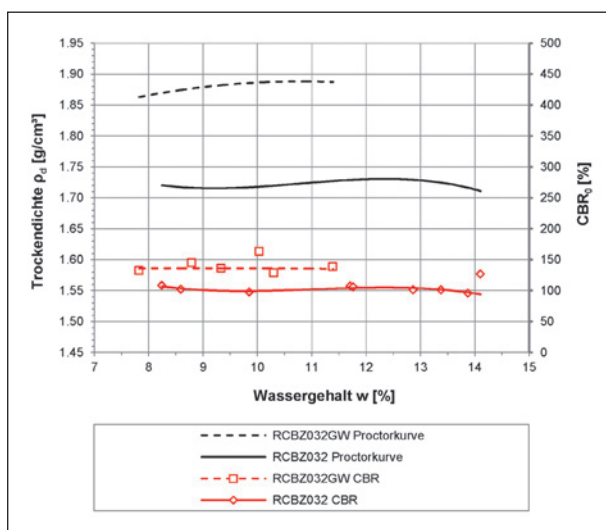


Bild 134: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton+Ziegel 0/32 (RCBZ032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% GW (RCBZ032GW)

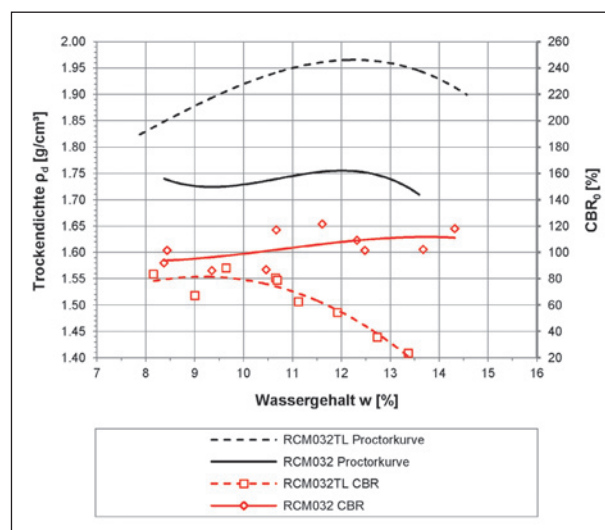


Bild 136: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Mix 0/32 (RCM032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCM032TL)

Baustoff	Proctorwassergehalt w_{Pr} [%]	Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]	CBR-Werte [%]	Korndichte ρ_s^1 [g/cm ³]
RCB04TL	17,1	1,833	3 – 60	2,706
RCM04TL	18,1	1,751	3 – 55	2,720
RCBZ04TL	17,0	1,756	2 – 57	2,607
RCB032GW	9,6	1,976	125 – 157	2,675
RCM032GW	7,5	1,810	93 – 136	2,683
RCBZ032GW	11,2	1,888	128 – 144	2,669
RCB032TL	13,1	1,937	8 – 100	2,689
RCM032TL	12,1	1,970	23 – 88	2,704
RCBZ032TL	12,7	1,898	4 – 84	2,679

¹ Bestimmung der Korndichte mit dem Luftpyknometer nach TP BF-StB Teil B 3.3 [62]

Tab. 60: Proctordichte, Proctorwassergehalt und CBR-Werte der RC-Baustoffe mit 30 M.-% Bodenzugabe

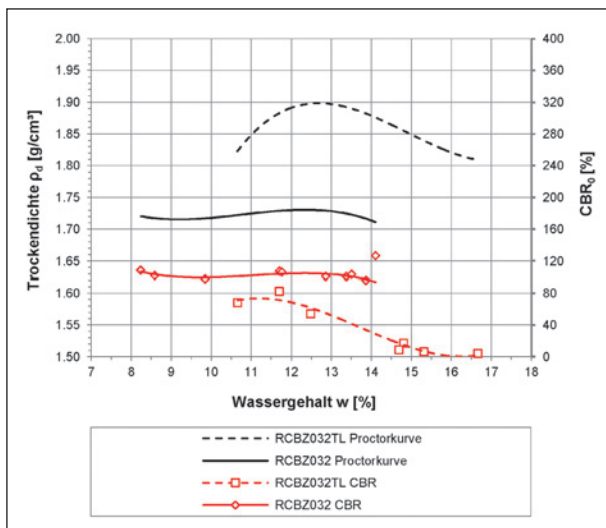


Bild 137: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton+ Ziegel 0/32 (RCBZ032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% GW (RCBZ032TL)

Die Ergebnisse der Verdichtungs- und Tragfähigkeitsversuche sind in Tabelle 60 zusammenfassend dargestellt.

Kornzertrümmerung

Um mögliche Kornzertrümmerungseffekte durch den Verdichtungsprozess zu untersuchen wurden Korngrößenverteilungen der Materialien mit und ohne Verdichtung (etwa im Verdichtungs optimum) bestimmt. Während ein Teil einer vorbereiteten Probe verdichtet wurde, um sie erst im Anschluss zu untersuchen, wurde der bei der Verdichtung übrig gebliebene Rest dieser vorbereiteten Probe direkt der Untersuchung zur Kornverteilung unterzogen.

Die Korngrößenverteilungen für den RC-Beton, den RC-Mix und die Mischung RC-Beton+RC-Ziegel vor und nach Verdichtung mit Proctorenergie im Proctor-

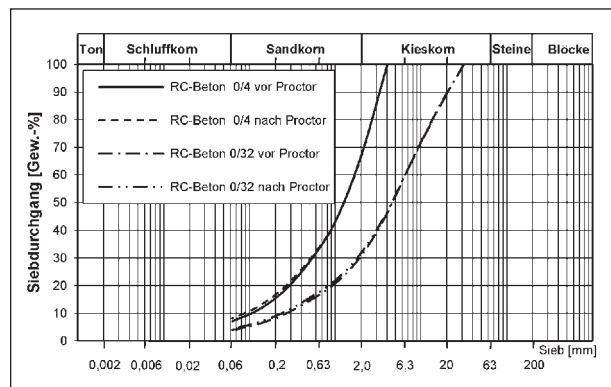


Bild 138: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für RC-Beton 0/4 und RC-Beton 0/32

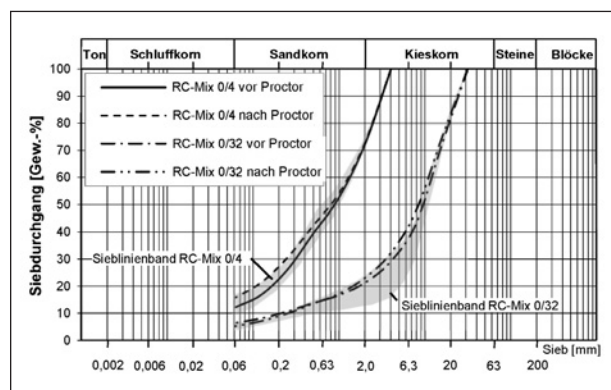


Bild 139: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für RC-Mix 0/4 und RC-Mix 0/32

optimum sind jeweils für die beiden Körnungen 0/4 mm und 0/32 mm in Bild 138, Bild 139 und Bild 140 dargestellt. Die Veränderungen der Kornanteile < 2 mm und $< 0,063$ mm sind auch in Tabelle 61 zusammengefasst.

Die Verdichtung des RC-Betons in Bild 138 zeigt in beiden Fraktionen nur sehr kleine Anteile an Kornbruch durch die Verdichtung. Beim RC-Mix (Bild 139)

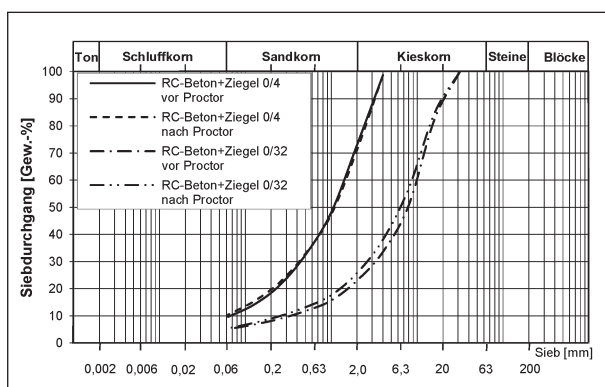


Bild 140: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für RC-Beton+RC-Ziegel 0/4 und RC-Beton+RC-Ziegel 0/32

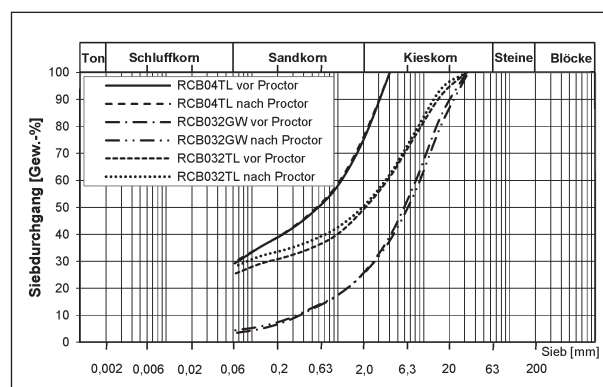


Bild 141: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für die Mischungen aus RC-Beton mit 30 % Boden: RCB04TL, RCB032GW und RCB032TL

	Anteil < 2 mm vor/nach Verdichtung [M.-%]			Anteil < 0,063 mm vor/nach Verdichtung [M.-%]		
	vor	nach	Diff.	vor	nach	Diff.
RCB04	66,9	66,6	-0,3	7,1	8,1	1,0
RCB032	30,8	31,8	1,0	3,8	4,3	0,5
RCM04	72,1	72,7	0,6	12,2	15,9	3,7
RCM032	21,2	23,0	1,8	6,4	5,2	-1,2
RCBZ04	73,0	71,1	-1,9	9,6	10,4	0,8
RCBZ032	23,0	25,8	2,8	5,1	5,4	0,3

Tab. 61: Kornzertrümmerung bei Verdichtung mit Proctorenergie für RC-Baustoffe ohne Zugabe von Bodenmaterial

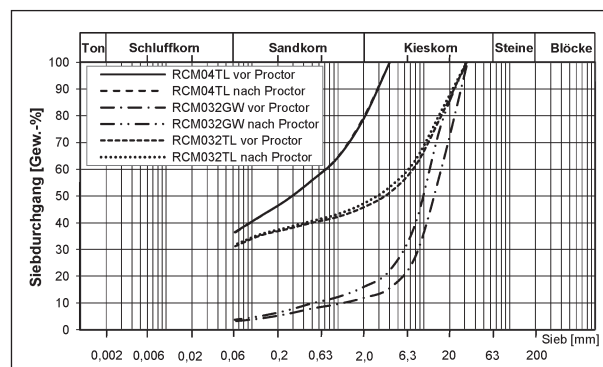


Bild 142: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für die Mischungen aus RC-Mix mit 30 % Boden: RCM04TL, RCM032GW und RCM032TL

zeigen sich kleine Unterschiede bei der Ermittlung der Kornverteilung vor und nach Verdichtung. Die ermittelten Sieblinien der Materialien mit und ohne Verdichtung liegen aber innerhalb der Sieblinienbänder der Ausgangsmaterialien. Eine deutliche Änderung des bautechnischen Charakters durch Kornbruch bei Verdichtung ist demnach nicht zu erwarten.

Auch die Verdichtung des Gemisches aus RC-Beton+Ziegelbruch zeigt keine deutliche Änderung der Korngrößenverteilung durch Verdichtung (Bild 140).

Die Baustoffe weisen zusammenfassend keine signifikante Kornzertrümmerung infolge der Verdichtung mit Proctorenergie auf. Die dokumentierte maximale Erhöhung des Anteils < 2 mm beträgt 2,8 %, die maximale Erhöhung des Anteils < 0,063 mm beträgt 3,7 %. Die dokumentierten negativen Werte weisen auf die Genauigkeit hin, die bei der Untersuchung zweier Parallelproben erzielbar ist.

In Bild 141, Bild 142 und Bild 143 sind die Korngrößenverteilungen der Gemische aus RC-Beton, RC-Mix und RC-Beton+RC-Ziegel mit jeweils 30 M.-%

Boden vor und nach Verdichtung mit Proctorenergie dargestellt. Die Veränderungen der Kornanteile < 2 mm und < 0,063 mm sind auch in Tabelle 62 aufgelistet.

Weder die Mischungen aus RC-Beton mit Boden, noch die Mischungen aus RC-Mix mit Boden weisen deutliche Änderungen in der Kornverteilung durch die Verdichtung auf. Ausnahme bildet hier die grobkörnige Mischung aus RC-Mix 0/32 mit Boden GW (Bild 142), wo sich Änderungen vor allem im Grobsand- und Kieskornbereich ergeben. Das Gemisch aus RC-Beton+Ziegelbruch der Kornklasse 0/32 mm mit Boden TL weist eine leichte Erhöhung des Anteils < 2 mm auf, bei den übrigen Mischungen dieses Grundmaterials wurde allerdings keine Änderung der Kornverteilungskurve infolge Verdichtung dokumentiert (Bild 143).

Die Baustoffe weisen keine signifikante Kornzertrümmerung infolge der Verdichtung mit Proctorenergie auf. Die dokumentierte maximale Erhöhung des Anteils < 2 mm beträgt 4,1 %, die maximale Erhöhung des Anteils < 0,063 mm beträgt 2,6 %.

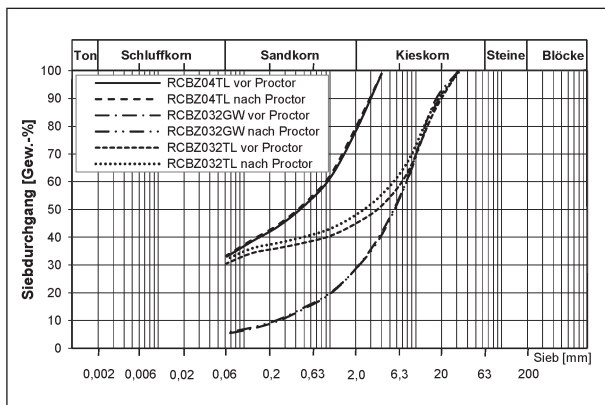


Bild 143: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für die Mischungen aus RC-Beton+RC-Ziegel mit 30 % Boden: RCBZ04TL, RCBZ032GW und RCBZ032TL

	Anteil < 2 mm vor/nach Verdichtung [M.-%]			Anteil < 0,063 mm vor/nach Verdichtung [M.-%]		
	vor	nach	Diff.	vor	nach	Diff.
RCB04TL	75,2	76,2	1,0	29,2	29,8	0,6
RCB032GW	25,7	25,4	-0,3	3,4	4,4	1,0
RCB032TL	49,3	50,5	1,2	25,4	28,0	2,6
RCM04TL	78,9	79,5	0,6	36,4	36,3	0,5
RCM032GW	11,9	16,0	4,1	3,1	3,7	0,6
RCM032TL	45,8	47,2	1,4	31,1	31,7	0,6
RCBZ04TL	78,2	79,6	1,4	33,0	33,5	0,5
RCBZ032GW	28,7	28,5	-0,2	5,2	5,7	-0,5
RCBZ032TL	44,9	48,0	3,1	30,6	32,1	1,5

Tab. 62: Kornzertrümmerung bei Verdichtung mit Proctor-energie – RC-Baustoffe mit Boden

Scherfestigkeit

Die Scherparameter der RC-Baustoffe wurden mittels Triaxialversuchen (CU) bestimmt. Die Versuche wurden an RC-Beton und RC-Mix jeweils der Körnungen 0/4 und 0/32 mm sowie an ihren Gemischen mit 30 M.-% des feinkörnigen Bodens TL durchgeführt. Die Probenkörper wurden mit Standard Proctor Energie bzw. statisch (RCM04, RCM04TL) bei den entsprechenden Wassergehalten im Verdichtungsoptimum verdichtet, bei einem Porenwasserdruck von 500 kN/m² gesättigt und bei einer isotropen Spannung konsolidiert. In der Regel wurden drei Versuchsstufen mit einer

Konsolidierungsspannung von $\sigma_3 = 100, 200$ und 300 kN/m^2 durchgeführt. Als Vorschubgeschwindigkeit wurde in den Versuchen eine Rate von 0,012 mm/min verwendet. Für RC-Beton 0/32, RCB032TL, RC-Mix 0/4 und RCM04TL wurden die Versuche jeweils an einzelnen Proben durchgeführt, während für RC-Beton 0/4, RCB04TL, RC-Mix 0/32 und RCM032TL die Mehrstufentechnik verwendet wurde und für alle Versuchsstufen derselbe Probekörper verwendet wurde. Um das nach DIN 18137-2 [44] geforderte Verhältnis zwischen Probendurchmesser und Größtkorn einzuhalten, hatten die Proben der Korngröße 0/32 mm einen Durchmesser von 15 cm. Gleichzeitig wiesen auch die Probenkörper von RC-Beton 0/4 und RCB04TL ebenfalls einen Durchmesser von 15 cm, die Proben von RC-Mix 0/4 und RCM04TL jedoch einen Durchmesser von 5 cm auf.

Die Einbaubedingungen der untersuchten Proben der jeweiligen RC-Baustoffe und die ermittelten Spannungspfade sind in den Bildern 144 – 151 dargestellt. Die Bestimmung von Bruchgeraden durch Ansatz des Mohr-Coulomb-Kriteriums zeigt für die RC-Baustoffe Schwierigkeiten auf, die Interpretation der Ergebnisse lässt Spielräume offen. Für jedes Material wurden nachfolgend Scherparameter mit und ohne Annahme von Kohäsion ermittelt. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 63 zusammengefasst.

Die ermittelten Kohäsionswerte liegen grundsätzlich hoch. Solche Ergebnisse mit hohen Werten für die Kohäsion werden in der Literatur häufig berichtet (siehe Kapitel 4.3.2). Für alle Materialien sind gleichzeitig auch hohe Reibungswinkel dokumentiert, wie dies für gebrochene Körner mit ihrer typisch kantigen Form und rauen Oberfläche üblich ist.

Mit oder ohne Ansatz einer Kohäsion liegen die Werte für die Reibungswinkel durchweg im Bereich von vergleichbaren natürlichen Körnungen. Ohne Bodenanteile liegen die dränierten Reibungswinkel im Bereich um und größer als 40°. Feinkörnige Bodenanteile im RC-Material liefern Winkel, die leicht niedriger liegen als jene des reinen RC-Materials.

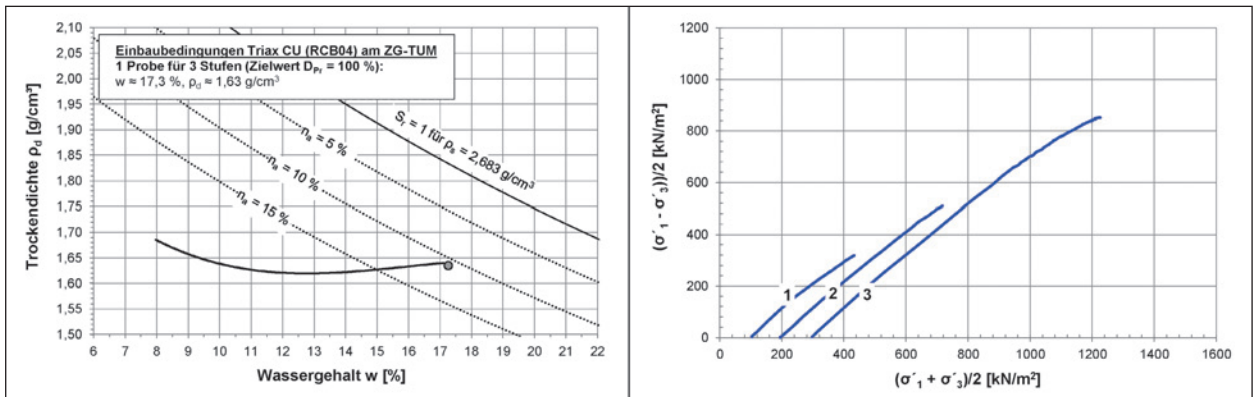


Bild 144: Einbaubedingungen und Spannungspfade der drainierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCB04

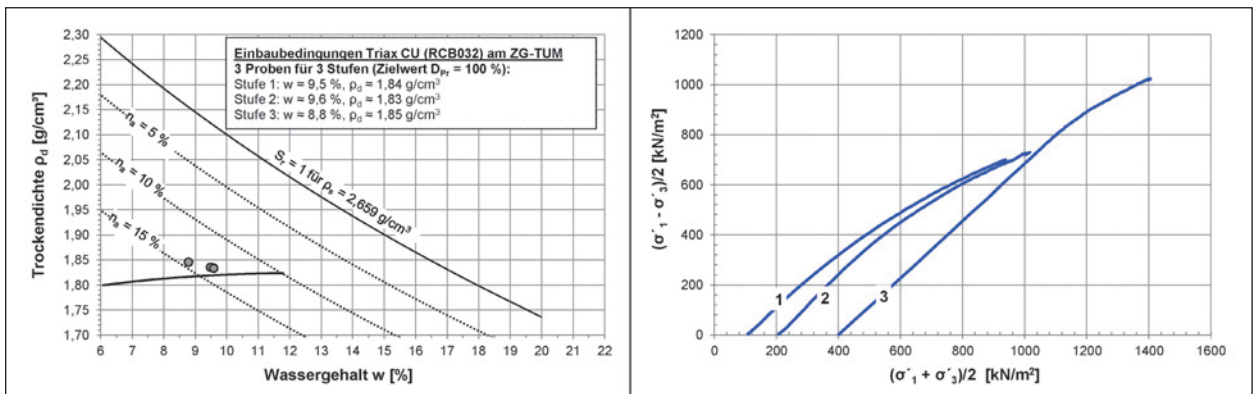


Bild 145: Einbaubedingungen und Spannungspfade der drainierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCB032

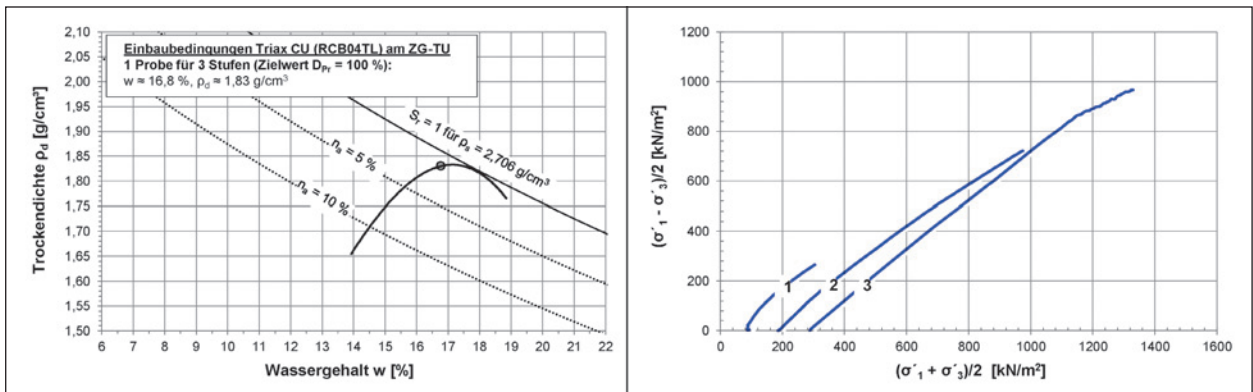


Bild 146: Einbaubedingungen und Spannungspfade der drainierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCB04TL

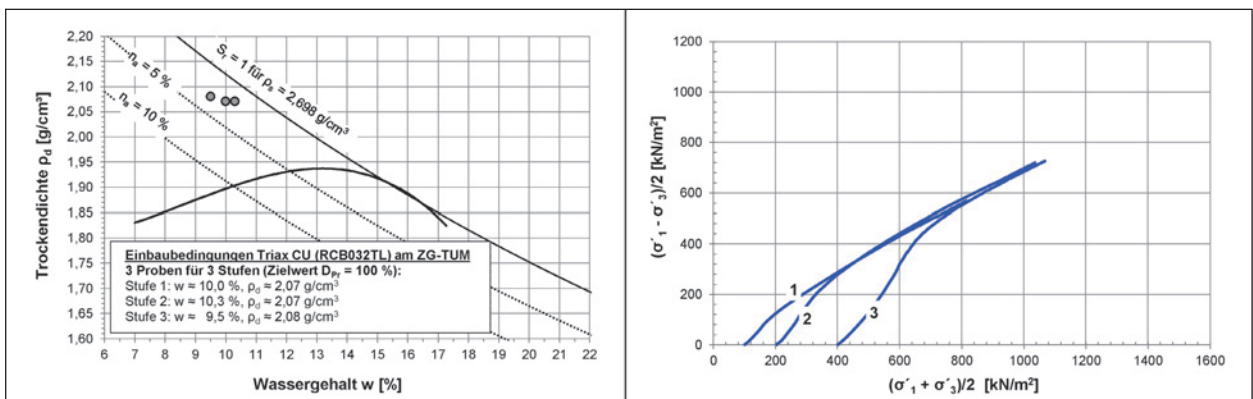


Bild 147: Einbaubedingungen und Spannungspfade der drainierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCB032TL

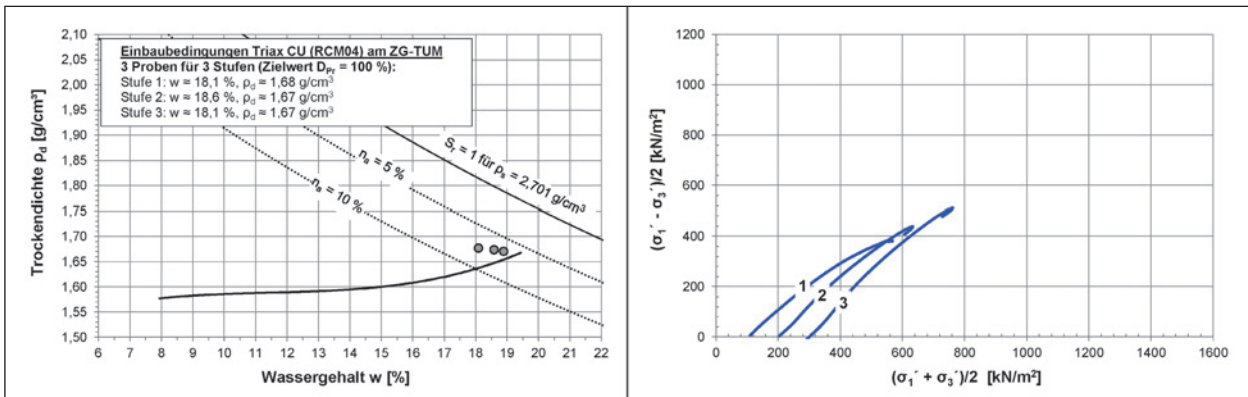


Bild 148: Einbaubedingungen und Spannungspfade der drainierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCM04

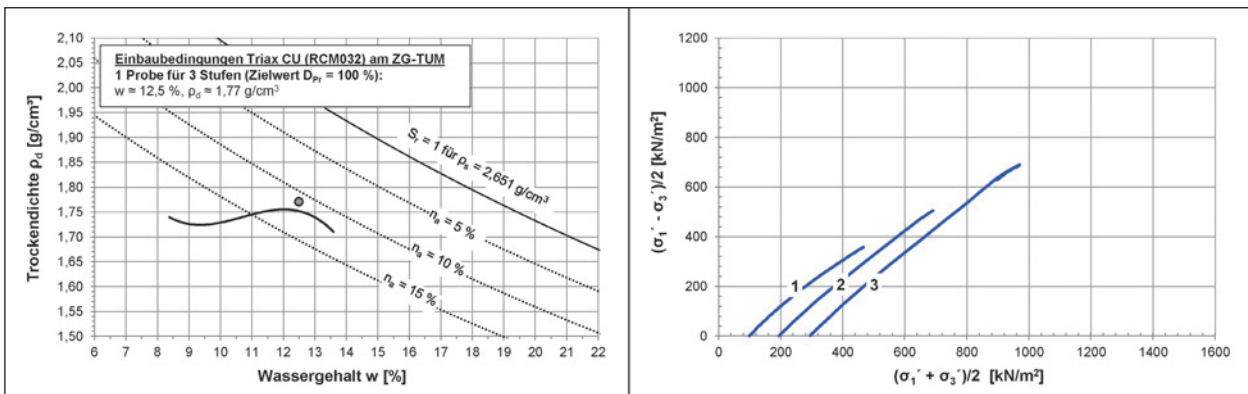


Bild 149: Einbaubedingungen und Spannungspfade der drainierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCM032

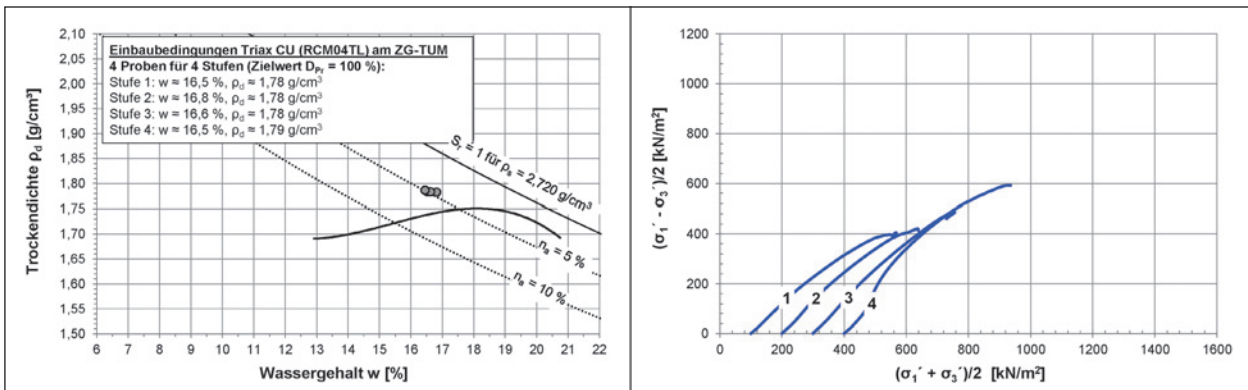


Bild 150: Einbaubedingungen und Spannungspfade der drainierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCM04TL

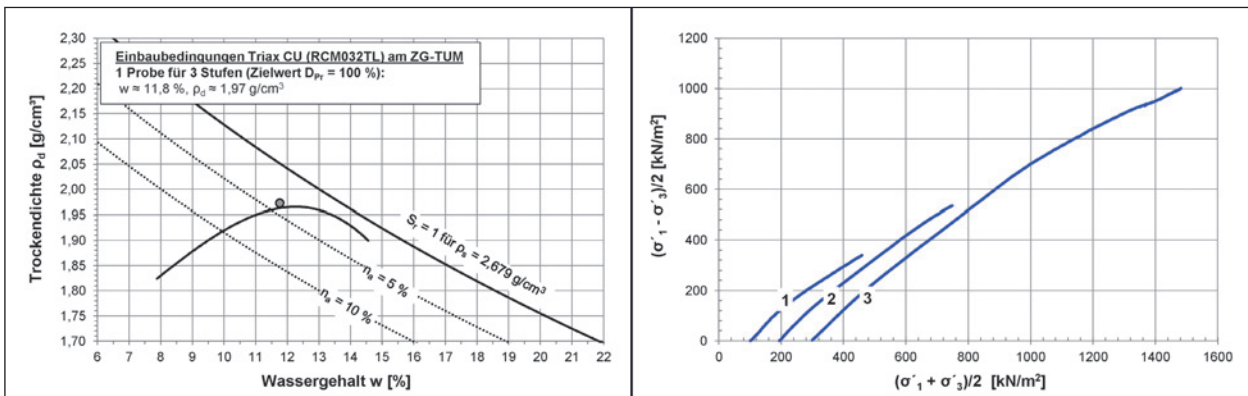


Bild 151: Einbaubedingungen und Spannungspfade der drainierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCM032TL

Material	mit Ansatz einer Kohäsion		ohne Kohäsion
	Kohäsion c' [kN/m ²]	Reibungswinkel φ' [°]	Reibungswinkel φ' [°]
RCB04	34,5	42,5	44,4
RCB032	27,9	45,2	46,9
RCB04TL	61,5	42,8	46,9
RCB032TL	55,3	40,3	43,6
RCM04	56,0	38,0	43,0
RCM032	69,0	40,5	46,1
RCM04TL	103,1	32,6	40,9
RCM032TL	61,9	39,8	43,4

Tab. 63: Scherfestigkeitsparameter der RC-Baustoffe mit und ohne Bodenanteile

Frosthebungsverhalten⁴⁷

Für die Durchführung von Frosthebungsversuchen an Böden und RC-Baustoffen liegt in Deutschland derzeit keine bindende Prüfvorschrift vor. Im Rahmen eines Ringversuches „Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten“ (BLUME [18]) wurde der Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau, Teil „Frosthebungsversuch“ (TP-BF StB „Frosthebungsversuch“ [61]) vorgestellt. Die hier durchgeführten Frosthebungsversuche erfolgten in Anlehnung an diesen Entwurf, weisen stellenweise aber Abweichungen in der Versuchsdurchführung auf (siehe Tabelle 25 in Kapitel 3.4.2). Abweichend von dem Entwurf der Technischen Prüfvorschrift erfolgte die Herstellung der Prüfkörper mit vorgegebenem Proctorwassergehalt und Proctordichte (Trockendichte). In Bild 79 und Bild 80 (siehe Kapitel 3.4.2) sind der Prüfszylinder aus Teflon und das verwendete Frosthebungsgerät abgebildet.

Das Vorbereiten der Proben für die Prüfung erfolgte auf Grundlage von ofentrockenem Material (Trocknung bei 105 °C). Nach Zugabe von entionisiertem Wasser wurde die Probe von Hand homogenisiert, mit einem feuchten Tuch abgedeckt und in einem verschlossenen Behälter für 24 Stunden gelagert. Die Prüfkörper wurden im Anschluss an die 24-stündige Homogenisierungszeit hergestellt.

Untersucht wurden Proben des RC-Mix 0/4 und RC-Mix 0/32 jeweils etwa im Proctoroptimum (siehe Bild 125 und Bild 126). Um den Einfluss einer Lagerungszeit auf das Frosthebungsverhalten zu überprüfen, wurden 2 Teilproben der Proben RC-Mix 0/32 für 28 Tage auf einem Gitter in einem Feuchtraum bei Raumtemperatur gelagert. Im Anschluss an diese Feuchtraumlagerung wurde dann der Frosthebungsversuch durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde auch die Tragfähigkeit durch Ermittlung des CBR-Wertes bestimmt. Die CBR-Versuche wurden bei allen Einbaubedingungen durchgeführt, die auch der Befrostung unterzogen wurden, jeweils an einer Probe direkt nach Probenherstellung (CBR_0) und an einer analog hergestellten Parallelprobe nach den Frosthebungsversuchen (CBR_F). Die Ermittlung des Ausbauwassergehaltes erfolgte unmittelbar nach dem Versuchsende.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 64 zusammengefasst. Aus den Frosthebungsversuchen ist ersichtlich, dass die stärksten Frosthebungen beim RC-Mix der Körnung 0/4 mm auftraten. Das gleiche Material der Körnung 0/32 mm zeigt deutlich niedrigere Frosthebungen. Die niedrigsten Frosthebungswerte zeigt die Mischung aus RC-Mix 0/32 und Boden GW. Da die Proben im jeweiligen Verdichtungs optimum hergestellt wurden, unterscheiden sich die Trockendichten und Wassergehalte der Proben (siehe dazu auch die Verdichtungskurven der Materialien). Die Zielwerte für die Herstellung der Proben wurden folgende Werte verwendet:

- RC-Mix 0/4 mm: $w_{Pr} = 19 \%$ / $\rho_d = 1,66 \text{ g/cm}^3$,
- RC-Mix 0/32 mm: $w_{Pr} = 13 \%$ / $\rho_d = 1,75 \text{ g/cm}^3$,
- RC-Mix 0/32 mit Bodenanteilen GW: $w_{Pr} = 7,5 \%$ und $\rho_d = 1,81 \text{ g/cm}^3$.

Mit steigendem Einbauwassergehalt und sinkender Einbautrockendichte der eingebauten Proben steigt also die dokumentierte Frosthebung. Die vergleichsweise hohe maximale und verbleibende Frosthebung führt beim RC-Mix 0/4 wohl dazu, dass die Tragfähigkeit (CBR) durch die Befrostung deutlich abnimmt. Der RC-Mix 0/32 weist im Vergleich dazu zwar deutlich niedrigere Frosthebungen auf, die Absolutwerte bewegen sich aber immer noch im Bereich von etwa 10 mm. Es ist daher bemerkenswert, dass die Tragfähigkeiten nach Befrostung konsistent höher liegen als vor Befrostung. Eine 28-tägige Feuchtraumlagerung vor Befrostung, wie

⁴⁷ Bearbeitet durch die HTW Dresden, überarbeitet durch das ZG TUM.

Material	Kennwert	Frosthebung				Tragfähigkeit	
		$\Delta s_{FH,Max}$ [mm]	$\Delta s_{FH,R}$ [mm]	v_{FH} [mm/d]	Δw_E [%]	CBR_0 [%]	CBR_F [%]
RC-Mix 0/4 (1)		21,7	3,1	0,4	0,3	41	19
RC-Mix 0/4 (2)		20,9	3,6	0,2	0,2		22
RC-Mix 0/32		9,9	1,0	0,6	0,0	63	77
RC-Mix 0/32 (nach 28 tägiger Feuchtraumlagerung)		9,0	1,9	0,7	-0,5		90
RC-Mix 0/32 mit Bodenanteilen (30 % GW) (1)		7,1	1,4	0,5	0,8	62	-
RC-Mix 0/32 mit Bodenanteilen (30 % GW) (2)		4,7	0,6	0,4	1,6		90
$\Delta s_{FH,Max}$ maximale Frosthebung $\Delta s_{FH,R}$ verbleibende Resthebung v_{FH} Frosthebungsgeschwindigkeit Δw_E Wassergehaltsänderung während des Versuches CBR_0 Tragfähigkeitswert CBR direkt nach Probeherstellung CBR_F Tragfähigkeitswert CBR nach Frosthebungsversuch bzw. nach 28 tägiger Feuchtraumlagerung und anschließendem Frosthebungsversuch							

Tab. 64: Ergebnisse der Frosthebungsversuche und Tragfähigkeitsversuche nach Befrostung

sie am RC-Mix 0/32 durchgeführt wurde, scheint auf das Frosthebungsverhalten nur einen untergeordneten Einfluss zu nehmen, verbessert aber möglicherweise die Tragfähigkeit nach Befrostung zusätzlich. Die kleinsten Frosthebungen wurden am Gemisch aus RC-Mix 0/32 und dem grobkörnigen Boden GW ermittelt. Dieser zeigte trotz Frostbeanspruchung gleichzeitig ebenfalls auch eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit. Der Hintergrund dieser dokumentierten Erhöhung der Tragfähigkeit der Proben mit RC-Mix 0/32 trotz Auflockerung durch Befrostung ist derzeit nicht eindeutig geklärt. Es wird allerdings vermutet, dass sich die sekundären Effekte (Verfestigung, siehe nächster Absatz) und Auflockerung durch Befrostung überlagern. Je nachdem, welcher Effekt dominiert, ist in Summe dann eine Erhöhung oder Abminderung der Tragfähigkeit möglich.

Sekundäre Effekte⁴⁸

Zur Klärung der Frage, ob in den RC-Baustoffen über einen längeren Zeitraum sekundäre Verfestigungsprozesse festgestellt werden können, wurden Probekörper im Verdichtungsoptimum des RC-Mix 0/32 mm hergestellt und für bis zu 12 Monate gelagert. Zu unterschiedlichen Zeitpunkten dieser Lagerungszeit wurden Probekörper der Lagerung ent-

nommen und auf Druckfestigkeit und Durchlässigkeit geprüft.

Die Vorbereitung der Proben erfolgte auf Grundlage von ofentrockenem Material (Trocknung bei 105 °C). Nach Zugabe von entionisiertem Wasser zur Erreichung des Einbauwassergehaltes wurden die Proben von Hand homogenisiert und in verschlossenen Behältern für 24 Stunden gelagert. Im Anschluss daran wurden die Prüfkörper hergestellt.

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte in Kunststoffstutzen (PVC-U) mit einem Durchmesser von 151 mm und einer Höhe von 125 mm (Bild 152). Direkt im Anschluss der Prüfkörperherstellung wurde am Restmaterial der Herstellung der Einbauwassergehalt bestimmt. Die Lagerung zwischen Herstellung und Prüfung der Prüfkörper erfolgte in zwei Prüfserien einerseits im Feuchtraum und andererseits im Wasser. Um einen Feinkornaustrag aus den zur Wasserlagerung vorgesehenen Prüfkörpern möglichst zu vermeiden, wurden diese zuerst 7 Tage im Feuchtraum gelagert und erst anschließend der Wasserlagerung zugeführt. Die Feuchtraum- bzw. Wasserlagerung erfolgte jeweils bei Raumtemperatur.

Einzelne Probekörper wurden jeweils nach 1 Monat (entspricht 28 Tagen), 3 Monaten (entspricht 84 Tagen), 6 Monaten (entspricht 168 Tagen) und 12 Monaten (entspricht 336 Tagen) aus der Lagerung entnommen und auf ihre einaxiale Druckfestigkeit sowie Durchlässigkeit überprüft.

⁴⁸ Bearbeitet durch die HTW Dresden, überarbeitet durch das ZG TUM.



Bild 152: PVC-U Kunststoffstutzen

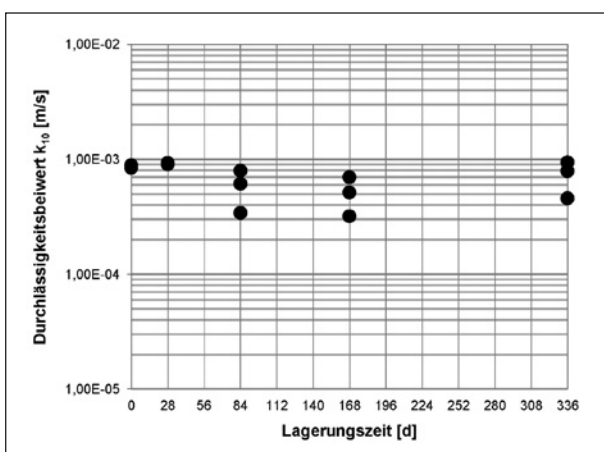


Bild 153: Entwicklung der Durchlässigkeit des RC-Mix 0/32 bei Feuchtraumlagerung

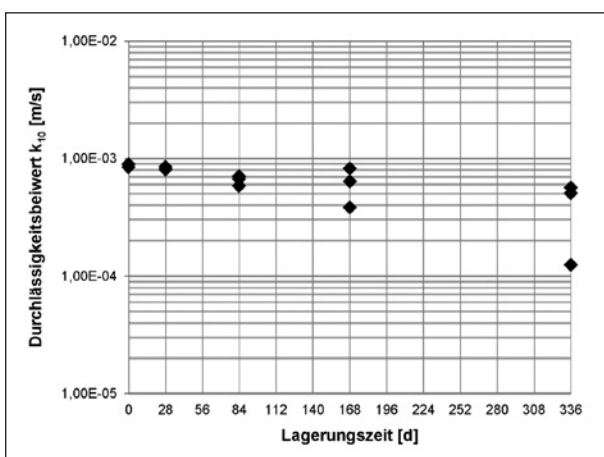


Bild 154: Entwicklung der Durchlässigkeit des RC-Mix 0/32 bei Wasserlagerung

Die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes erfolgte nach DIN 18130-1 [41] im Messzylinder (Kunststoffstutzen; $d = 151 \text{ mm}$; $h = 125 \text{ mm}$) im Vorfeld der Untersuchungen zur einaxialen Druckfestigkeit. Die einaxiale Druckfestigkeit der Prüfkörper wurde dann in Anlehnung an DIN 18136

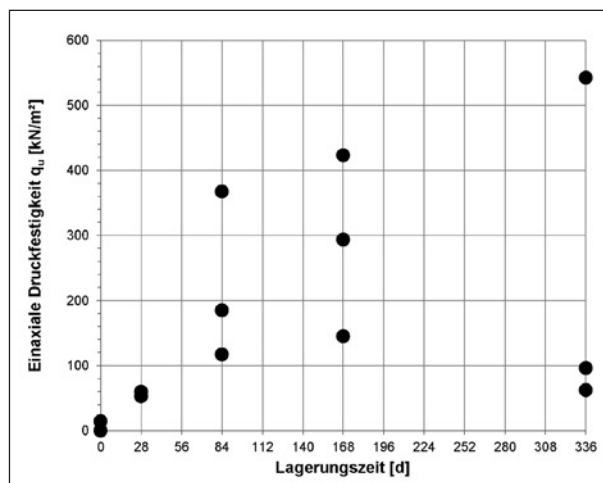


Bild 155: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit des RC-Mix 0/32 bei Feuchtraumlagerung

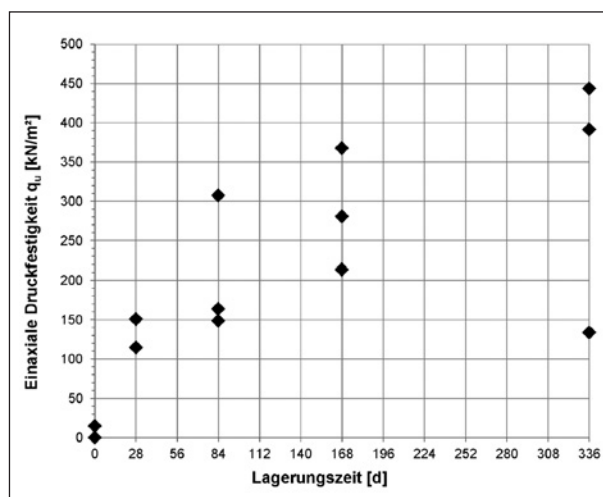


Bild 156: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit des RC-Mix 0/32 bei Wasserlagerung

[43] ermittelt, wobei abweichend von DIN 18136 [43] die Probekörperhöhe auf das 1,21-fache des Probendurchmessers beschränkt war.

Die Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwertes in Abhängigkeit von der Lagerungsart und -zeit des RC-Mix 0/32 ist in Bild 153 und Bild 154 abgebildet. Die Probe ist gemäß DIN 18130-1 [41] mit und ohne Lagerung als stark durchlässig zu klassifizieren. Bei der Wasserlagerung wurde tendenziell eine Abnahme der Durchlässigkeit festgestellt, die Feuchtraumlagerung zeigte nahezu gleichbleibende bis leicht abnehmende Werte.

Bei RC-Mix 0/32 wurde für beide Lagerungsarten (Feuchtraumlagerung siehe Bild 155 und Wasserlagerung siehe Bild 156) teils eine deutliche Tendenz für eine Festigkeitszunahme festgestellt, wobei die Einzelwerte stark streuen.

Einfluss von Fremdstoffen

In Bild 157 bis Bild 162 sind die Ergebnisse der Verdichtungs- und Tragfähigkeitsuntersuchungen für das Grundmaterial aus RC-Beton und Boden (jeweils 70 % RC-Beton 0/4 mit 30 % Boden TL sowie 70 % RC-Beton 0/32 mit 30 % Boden GW) mit unterschiedlichen Fremdstoffen (Kunststoffgranulat, Holzspäne und Polystyrolschaumkugeln) dargestellt. Die genaue Zusammensetzungen der untersuchten Materialien sind in Tabelle 58 eingehend beschrieben.

Bild 157 und Bild 158 zeigen die Ergebnisse mit unterschiedlichen Anteilen an Kunststoffgranulat als Fremdstoff (Anteile 0 M.-%, 0,2 M.-%, 1 M.-% und

5 M.-%). In beiden Grundmaterialien führt der steigende Anteil des Granulats zu tendenziell niedrigeren Trockendichten und Tragfähigkeiten. Dabei sinken die Tragfähigkeiten nur bei den grobkörnigen Mischungen und auch dort erst bei einem Fremdstoffanteil von 5 M.-% unter 100 % des Standardbodens ab (Bild 158) und bleiben sonst auf vergleichbarem Niveau mit dem Grundmaterial bzw. leicht darunter. Da der verwendete Kunststoff außer an der Oberfläche kein Wasser aufnehmen kann, ist die in Bild 157 sichtbare, tendenzielle Verringerung des optimalen Wassergehaltes grundsätzlich nachvollziehbar.

Im Bild 159 und Bild 160 sind die Ergebnisse zu den Versuchen mit Holzspänen als Fremdstoff darge-

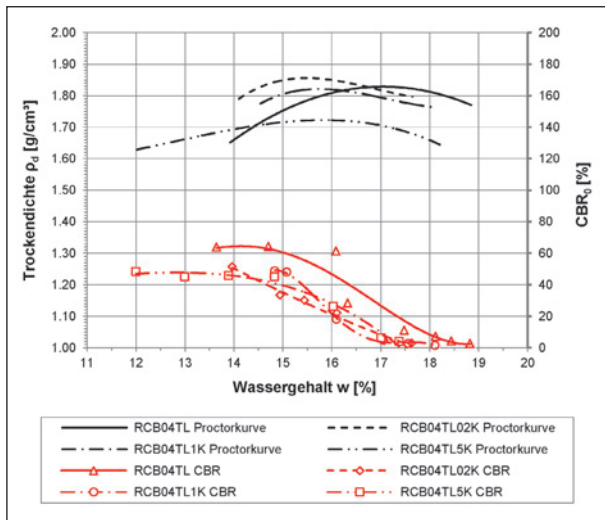


Bild 157: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/4 mit Kunststoffgranulat im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB04TL

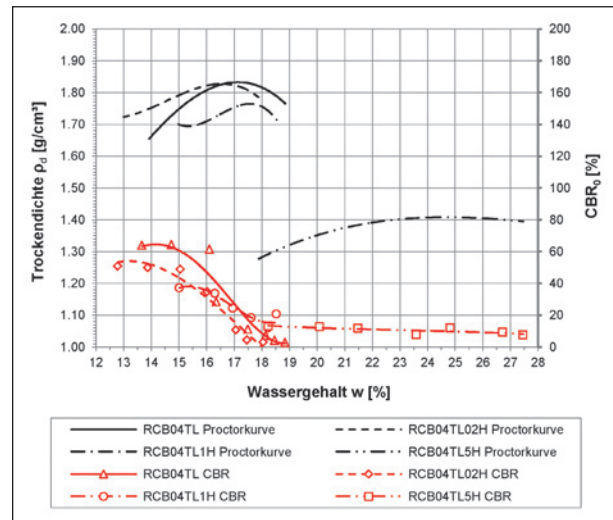


Bild 159: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/4 mit Holzspänen im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB04TL

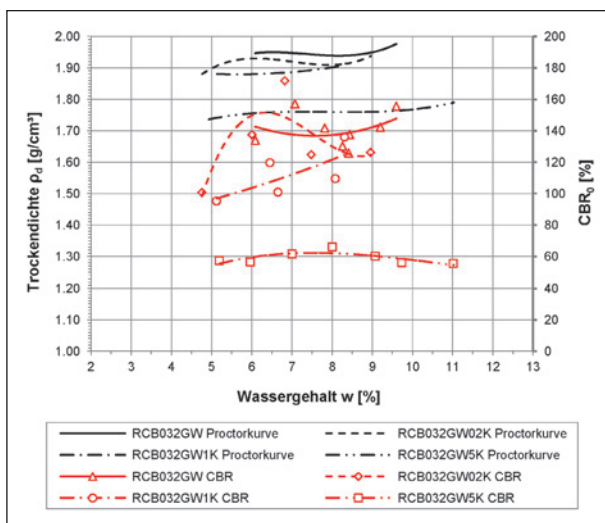


Bild 158: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/32 mit Kunststoffgranulat im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB032GW

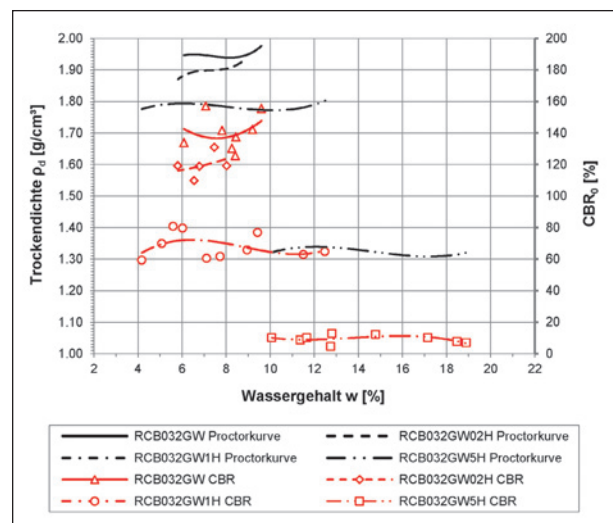


Bild 160: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/32 mit Holzspänen im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB032GW

stellt. Wiederum zeigen sich die Mischungen mit dem feineren Grundmaterial (Bild 159) gutmütiger gegenüber der Zugabe als die Mischungen mit dem gröberen Grundmaterial (Bild 160). In allen Fällen wurde mit steigendem Anteil des Fremdstoffes am Gemisch auch eine sinkende Trockendichte dokumentiert. Tendenziell steigt auch der Wassergehalt an, bei dem das Material noch verdichtet werden kann. Das Holz ist also durchaus in der Lage Wasser im Gemisch zu binden. Die deutlichsten Änderungen in Verdichtungseigenschaften und Tragfähigkeit wird erwartungsgemäß bei einer Zugabemenge von 5 M.-% angezeigt.

Die Ergebnisse der Versuche zu den Mischungen mit Polystyrolschaumkugeln ist in Bild 161 und Bild

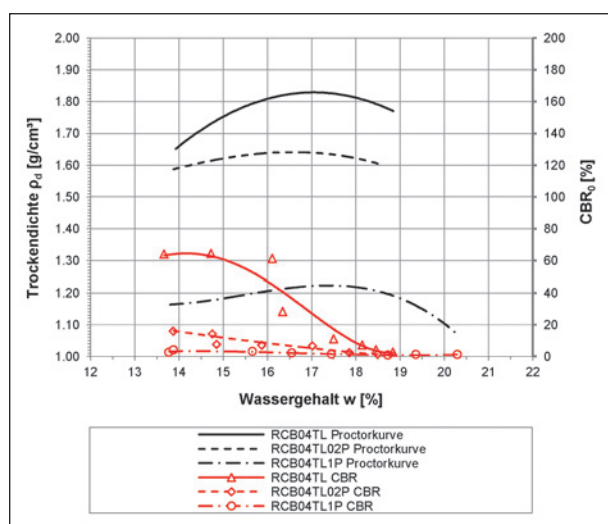


Bild 161: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/4 mit Polystyrol im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB04TL

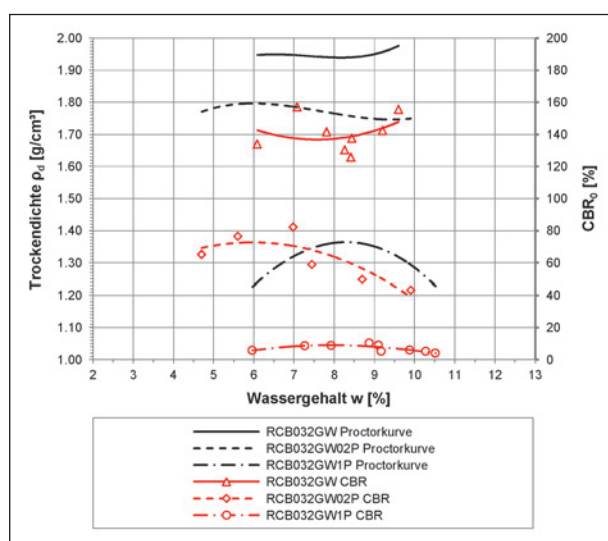


Bild 162: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/32 mit Polystyrol im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB032GW

162 für unterschiedliche Zugabemengen dargestellt. Wegen des gravierenden Dichteunterschiedes zwischen mineralischem Grundmaterial und den Schaumkugeln war es nicht möglich, eine homogene Mischung mit 5 M.-% Zugabemenge herzustellen (Entmischung). Die Ergebnisse zeigen insgesamt aber deutlich, dass bereits ein Anteil von 0,2 M.-% dieses Fremdstoffes kleiner Dichte ausreicht, um das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten entscheidend negativ zu beeinflussen.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 65 und Tabelle 66 zusammengefasst, die Einzelergebnisse sind im Anhang zu diesem Bericht abgebildet.

Baustoff	Proctorwassergehalt w_{Pr} [%]	Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]	CBR-Werte [%]
RCB04TL	17,1	1,833	3 – 60
RCB04TL02K	15,5	1,856	3 – 51
RCB04TL1K	15,7	1,821	1 – 49
RCB04TL5K	15,8	1,723	4 – 48
RCB04TL02H	16,5	1,827	3 – 51
RCB04TL1H	17,6	1,765	12 – 37
RCB04TL5H	24,7	1,408	8 – 13
RCB04TL02P	16,5	1,641	1 – 16
RCB04TL1P	17,4	1,223	1 – 4
RCB04TL5P	-	-	-

Tab. 65: Proctordichte, Proctorwassergehalt und CBR-Werte der RC-Baustoffe 0/4 mm mit Fremdstoffen

Baustoff	Proctorwassergehalt w_{Pr} [%]	Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]	CBR-Werte [%]
RCB032GW	9,6	1,976	125 – 157
RCB032GW02K	9,0	1,938	100 – 172
RCB032GW1K	8,3	1,917	95 – 135
RCB032GW5K	11,0	1,791	55 – 66
RCB032GW02H	8,9	1,937	108 – 130
RCB032GW1H	12,5	1,803	55 – 80
RCB032GW5H	18,9	1,315	5 – 13
RCB032GW02P	9,9	1,749	43 – 82
RCB032GW1P	8,3	1,364	4 – 10
RCB032GW5P	-	-	-

Tab. 66: Proctordichte, Proctorwassergehalt und CBR-Werte der RC-Baustoffe 0/32g mm mit Fremdstoffen

4.4.2 Versuche an RC-Materialien im Großmaßstab

Allgemeines

Von wesentlicher Bedeutung für die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Baumaßnahmen im Erdbau ist die ausreichende Verdichtung des verwendeten Erdbaustoffs bereits beim Einbau. Wird der Erdbaustoff beim Einbau nicht ausreichend verdichtet, sodass keine genügende Verzahnung zwischen den Körnern erfolgt und zu viel Porenraum zwischen den einzelnen Körnern bestehen bleibt, so werden sich infolge der späteren Belastung unplanmäßige Setzungen einstellen, die die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks einschränken können oder im Extremfall sogar die Tragfähigkeit gefährden können.

Um Schäden, die aus einer ungenügenden Verdichtung resultieren, vorzubeugen, bestehen in den einschlägigen Regelwerken Anforderungen hinsichtlich der auf der Baustelle zu erreichenden Einbaudichte. Die Anforderungen werden hauptsächlich an den Verdichtungsgrad gestellt, das heißt die tatsächlich auf der Baustelle erreichte Trockendichte wird zur im Labor ermittelten Proctordichte in Bezug gesetzt und ihr Verhältnis muss einen bestimmten Wert erreichen. Bei manchen Bodenarten wird der Luftporenanteil in Kombination mit der erreichten Trockendichte zur Bewertung der erreichten Verdichtung herangezogen. In Tabelle 67 sind die an den Verdichtungsgrad gestellten Anforderungen in Abhängigkeit des Anwendungsbereichs gemäß den ZTV E-StB 09 [67] dargestellt.

Als Alternative zur Überprüfung der erreichten Dichte besteht nach ZTV E-StB 09 [67] auch die Mög-

lichkeit, mithilfe indirekter Prüfmerkmale – hierzu zählen im Falle des Verdichtungsgrades D_{Pr} als direktes Prüfmerkmal beispielsweise der statische Verformungsmodul E_{v2} oder der dynamische Verformungsmodul E_{vd} – auf das direkte Prüfmerkmal zu schließen. Voraussetzung bei diesem Vorgehen ist, dass das direkte und indirekte Prüfmerkmal einen engen technischen Zusammenhang besitzen. Für grobkörnige Böden ist der Nachweis über ein indirektes Prüfmerkmal nach ZTV E-StB 09 [67] sogar ohne Kalibrierversuche möglich (siehe Tabelle 68 und Tabelle 69).

Der Nachweis über indirekte Prüfverfahren ist insbesondere bei großen Erdbaumaßnahmen sinnvoll, da die Durchführung von Densitometer-Versuchen bis zum Vorliegen der Ergebnisse wesentlich zeitaufwändiger ist als die Durchführung von statischen Plattendruckversuchen nach DIN 18134 [36] oder Versuchen mit dem dynamischen Fallgewichtsgerät nach den TP BF-StB Teil B 8.3 [63]. Im Vergleich zum statischen Plattendruckversuch ist bei letzteren kein schweres Widerlager zur Versuchsdurchführung nötig und es ist eine nochmals schnellere Versuchsdurchführung möglich.

In Tabelle 68 und Tabelle 69 sind die Richtwerte der Verformungsmoduln E_{v2} bzw. E_{vd} nach den ZTV E-StB 09 [67], die als indirekte Prüfmerkmale zum Nachweis des Verdichtungsgrades D_{Pr} erreicht werden müssen, für die jeweiligen Bodengruppen nach DIN 18196 für natürliche Böden tabelliert. Werden die Verformungsmodule in den entsprechenden Versuchen erreicht, so gilt der nebenstehende Verdichtungsgrad als erreicht.

Es ist derzeit nicht geklärt, wie weit diese Kennwerte in Tabelle 68 und Tabelle 69 auch auf Ersatzbau-

Bereich	Bodengruppen	D_{Pr} [%]	n_a [Vol.-%]
Planum bis 1,0 m Tiefe bei Dämmen und bis 0,5 m Tiefe bei Einschnitten	GW, GI, GE, SW, SI, SE, GU, GT, SU, ST	100 ¹	-
1,0 m unter Planum bis Dammsohle	GW, GI, GE, SW, SI, SE, GU, GT, SU, ST	98 ¹	-
Planum bis Dammsohle und bis 0,5 m Tiefe bei Einschnitten	GU*, GT*, SU*, ST*, U, T, OU, OT	97 ¹	12 ²
Verfüllung von Baugruben und Leitungsräben		97 ¹	
Hinterfüllen und Überschütten von Bauwerken		100 ¹	
Schutzwälle		95 ¹	12 ²
¹ Anforderung an das 10%-Mindestquantil ² Anforderung an das 10%-Höchstquantil			

Tab. 67: Anforderungen an das 10%-Mindestquantil für den Verdichtungsgrad D_{Pr} bzw. an das 10%-Höchstquantil für den Luftporenanteil n_a

stoffe anwendbar sind. Um hierzu zu ersten Aussagen zu gelangen, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Großversuche durchgeführt. Ein RC-Baustoff-Gemisch wurde mit einer gängigen Verdichtungswalze verdichtet und die erreichte Verdichtung anschließend mit den Methoden der Erdbaupraxis überprüft.

Die Versuche wurden aus Verfügbarkeitsgründen an einem Material durchgeführt, das gemäß DIN 18196 der Bodengruppe GU zuzuordnen ist (siehe Bild 164). Streng genommen dürfen für Materialien dieser Klasse die Tabelle 68 und Tabelle 69 dargestellten Prüfwerte nicht angewendet werden. Die vergleichenden Untersuchungen anhand von Dichtebestimmung mittels Densitometer, statischer Lastplatte und leichtem Fallgewichtsgerät lieferte trotzdem erste Hinweise.

Bodengruppe	E_{v2} [MN/m ²]	D_{Pr} [%]
GW, GI	≥ 100	≥ 100
	≥ 80	≥ 98
GE, SE, SW, SI	≥ 80	≥ 100
	≥ 70	≥ 98

Tab. 68: Richtwerte für die Zuordnung vom statischen Verformungsmodul E_{v2} zum Verdichtungsgrad D_{Pr} bei grobkörnigen Böden

Bodengruppe	E_{vd} [MN/m ²]	D_{Pr} [%]
GW, GI, GE	≥ 50	≥ 100
SW, SI, SE	≥ 40	≥ 98

Tab. 69: Richtwerte für die Zuordnung vom dynamischen Verformungsmodul E_{vd} zum Verdichtungsgrad D_{Pr} bei grobkörnigen Böden

Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden auf dem Gelände der ehemaligen Bayernkaserne in München durchgeführt. Im Zuge der Umnutzung des Geländes wird die nicht mehr benötigte Bebauung von einem lokalen Recyclingunternehmen rückgebaut und vor Ort zu einem RC-Baustoffgemisch aufbereitet. Dieses wird direkt vor Ort dazu verwendet, bestehende Gruben aus ehemaligen Kellern zu Verfüllen.

Die Aufbereitung des Materials vor Ort beginnt dabei bereits beim Rückbau, indem zunächst alle in den Gebäuden verbauten Materialien, die im RC-Material unerwünscht sind, noch vor dem Abbruch der Gebäude entfernt werden; hierbei werden auch die Anstriche der Gebäude vor dem Abriss abgeschliffen und separat entsorgt. Nach dem Abbruch werden die Abbruchstücke, bei denen es sich überwiegend um mineralische Restmassen, insbesondere um Beton- und Ziegelbruchstücke handelt, gebrochen und noch vorhandene Wertstoffe wie Metall oder Fremd- und Störstoffe wie Plastik aussortiert. Erst danach werden die Abbruchmaterialien als RC-Baustoffe zur Auffüllung der Gruben verwendet. Das Material wird lagenweise eingebaut und mittels einer Vibrationswalze verdichtet.

Für die eigenen Untersuchungen wurde ein Versuchsfeld wie in Bild 163 in Anlehnung an die „TP BF-StB Teil E 4 – Kalibrierung eines indirekten Prüfmerkmals mit einem direkten Prüfmerkmal“ [68] aus dem vor Ort verwendeten Material errichtet und dieses in drei Prüffelder unterteilt (Prüffeld I – III in Bild 163). Die Durchführung des Großversuchs erfolgte in insgesamt drei Durchgängen, in denen mit jedem Durchgang die insgesamt zugeführte Ver-

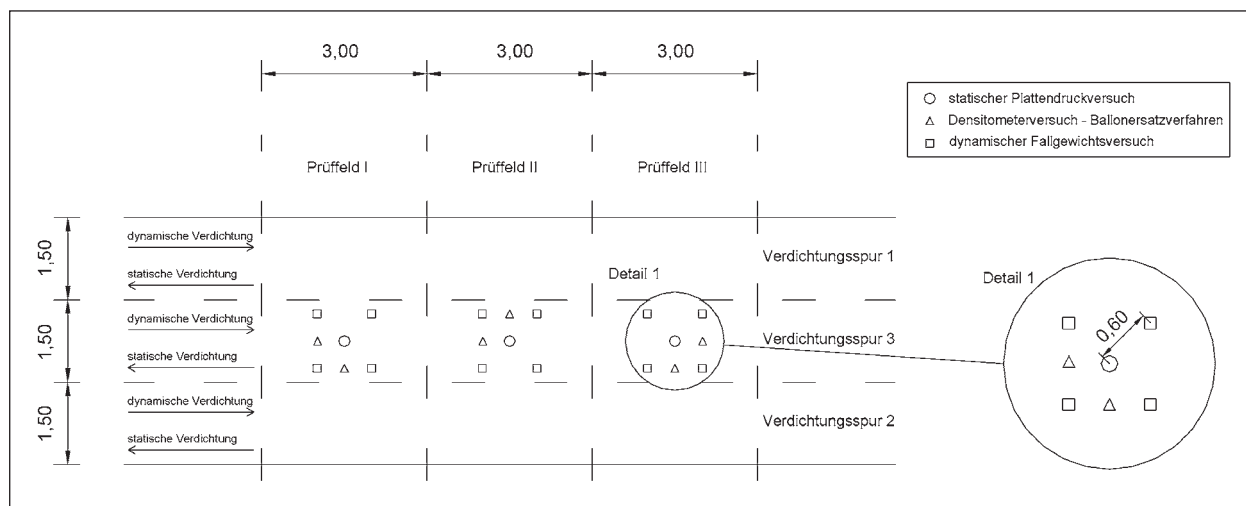


Bild 163: Versuchsfeld mit Anordnung der Versuchspunkte

dichtungsenergie durch weitere Walzenüberfahrten gesteigert wurde. Nach jedem Durchgang wurden in allen drei Prüffeldern Densitometerversuche mit dem Ballonersatzverfahren zur Bestimmung der im Feld erreichten Dichte sowie statische Plattendruckversuche und Versuche mit dem dynamischen Fallgewichtsgeschütz durchgeführt. Die Anordnung der Versuchspunkte sowie die Abmessungen des Prüffeldes und Abstände der Versuchspunkte können Bild 163 entnommen werden. Es ist zu beachten, dass nach jedem Durchgang die Anordnung der Versuchspunkte so gewählt wurde, dass die folgenden Versuche auf einer durch die vorherigen Versuche unbeeinflussten Fläche durchgeführt werden konnten.

Durch die Durchführung der Densitometerversuche nach jedem Verdichtungsdurchgang wurde die im Feld erreichte Dichte ermittelt. Diese wurde mit der später im Labor im Proctorversuch bestimmten Proctordichte in Bezug gesetzt und so der Verdichtungsgrad D_{Pr} ermittelt. Durch dieses Vorgehen konnte untersucht werden, wie viele Übergänge mit der verwendeten Verdichtungswalze nötig sind, um einen bestimmten Verdichtungsgrad zu erreichen.

Die Durchführung sowohl der statischen Plattendruckversuche als auch der Versuche mit dem dynamischen Fallgewichtsgeschütz ermöglichte den Vergleich der statischen und dynamischen Verformungsmodul E_{v2} bzw. E_{vd} (indirekte Prüfmerkmale) mit dem Verdichtungsgrad D_{Pr} (direktes Prüfmerkmal). Die Ergebnisse wurden mit den Vorgaben der in ZTV E-StB 09 [67] für grobkörnige, natürliche Gesteinskörnungen formulierten Kennwerte (siehe auch Tabelle 68 und Tabelle 69) verglichen.

Versuchsmaterial

Bei dem zur Verfüllung verwendeten Material handelt es sich um ein RC-Baustoff mit einem hohen Anteil an gebrochenen Ziegeln. Zum Vergleich der drei Prüffelder wurde aus jedem Prüffeld eine Probemenge von etwa 50 kg entnommen und nachträglich im Labor des Zentrum Geotechnik untersucht. Mittels Riffelteiler wurde die Probe jeweils soweit geteilt, dass die entsprechende Mindestmenge nach DIN 18123 [38] zur Erstellung einer Sieblinie vorlag. Die Korngrößenverteilungen wurden für jedes Prüffeld erstellt und sind in Bild 164 zusammenfassend dargestellt.

Die Sieblinien der drei Prüffelder zeigen, dass es sich bei allen drei Prüffeldern um ein homogenes

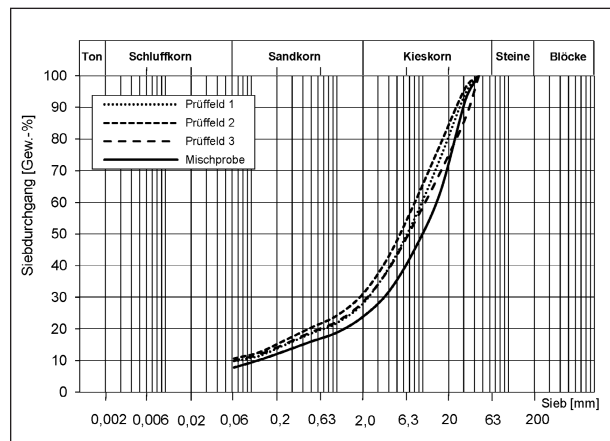


Bild 164: Sieblinien des Versuchsmaterials

und vergleichbares Material handelt. Es wurde daher eine Mischprobe aus den drei entnommenen Probemengen erstellt. Die zugehörige Sieblinie ist ebenfalls in Bild 164 dargestellt. Die Mischprobe ist nach DIN 18196 als weit gestufter Kies (Boden-gruppe GU) zu klassifizieren.

Mittels Riffelteiler wurden aus der Mischprobe Teilproben zur Durchführung des Proctorversuchs nach DIN 18127 [40] erstellt. In Bild 166 ist die Proctorkurve der Mischprobe dargestellt. Die zu den einzelnen Verdichtungspunkten gehörenden CBR-Werte (Versuchsdurchführung an der Probenunterseite) sind ebenso angegeben. Der Wassergehalt zur Ermittlung der Trockendichte wurde an der Probe selbst bestimmt (Dreiecke). Zusätzlich sind in Bild 166 auch jene Trockendichten angegeben, die sich aus Wassergehaltsbestimmung am Restmaterial der Laborverdichtung ergaben (Kreise). Der Unterschied ist wahrscheinlich einerseits auf Inhomogenitäten in der zur Verdichtung aufbereiteten Probe selbst, andererseits auf einen Wasserverlust im Zuge der Versuchsdurchführung (vor allem beim CBR-Versuch) zurückzuführen.

Nicht ausgefüllte Symbole des Proctorversuchs zeigen die Punkte an, bei denen es im Proctorversuch zum Wasseraustritt kam. Die optimalen Verdichtungsparameter ergaben sich am nassen Ende der Ausgleichskurve (letzter durchgeführter Punkt vor Wasseraustritt beim Verdichtungsversuch) bei einer Trockendichte von etwa $1,94 \text{ g/cm}^3$ und einem optimalen Wassergehalt zwischen ca. 11,0 % bis 11,5 %.

Verdichtung

Die Verdichtung des Versuchsfeldes erfolgte mit einem Walzenzug vom Typ Bomag BW 156 D-3



Bild 165: Verdichtungswalze Bomag BW 156 D-3

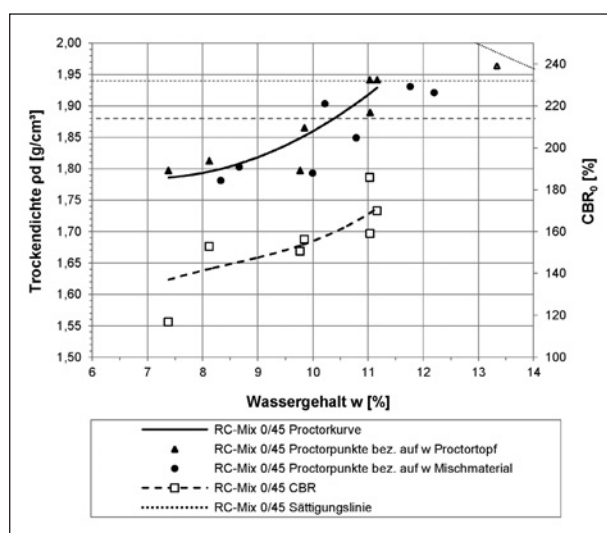


Bild 166: Proctorkurve des Versuchsmaterials

(Bild 165). Hierbei handelt es sich um eine Vibrationswalze mit einem Betriebsgewicht von 6,15 t bei einer Bandagenbreite von 1,5 m. Gemäß Datenblatt des Geräteherstellers lassen sich hiermit für Sande und Kiese Schichtdicken bis 0,4 m erfolgreich verdichten, für Mischböden beträgt die Verdichtungswirkung bis 0,3 m.

Insgesamt wurden drei Versuchsdurchgänge durchgeführt, bei denen mit jedem Durchgang die insgesamt zugeführte Verdichtungsenergie durch Steigerung der gesamten Anzahl der Überfahrten mit der Verdichtungswalze sukzessive gesteigert wurde. In jedem Versuchsdurchgang erfolgte zunächst die Verdichtung der Verdichtungsspur 1, anschließend wurde Spur 2 und zuletzt Spur 3 verdichtet. Die Überfahrt über jede Verdichtungsspur erfolgte dabei nach vorne mit dynamischer Verdichtung, während die Rückfahrt über dieselbe Verdichtungsspur statisch ohne Vibration erfolgte. In Tabelle 70 sind

Durchgang	Überfahrten/Spur	Überfahrten/Spur ges.
1	1	1
2	3	4
3	5	9

Tab. 70: Überfahrten je Versuchsdurchgang und in Summe

die Überfahrten je Spur und Durchgang sowie die Überfahrten je Spur insgesamt für jeden Versuchsdurchgang dargestellt.

Nach Abschluss des Verdichtungs Vorgangs wurden nach jedem Versuchsdurchgang auf der mittleren Verdichtungsspur 3 in jedem Prüffeld statische Plattendruckversuche sowie Versuche mit dem dynamischen Fallgewichtsgesetz durchgeführt (zur Anordnung der Versuchspunkte siehe Bild 163). Die nach jedem Durchgang erreichte Dichte wurde in jedem Prüffeld mithilfe des Ballonersatzverfahrens ermittelt.

Von grundlegender Bedeutung für den ökonomischen Einsatz von Verdichtungsgeräten auf der Baustelle ist die Kenntnis darüber, wie viele Walzenübergänge benötigt werden, um den nach den ZTV E-StB 09 [67] für die jeweilige Anwendung geforderten Verdichtungsgrad zu erreichen. Der erreichte Verdichtungsgrad hängt dabei von der zugeführten Verdichtungsenergie, also im Wesentlichen von der Anzahl an Überfahrten und dem Gewicht und den Abmessungen des Verdichtungsgerätes, aber auch von der in die zu verdichtende Schicht eingetragenen dynamischen Schwingung, ab.

Zur Beurteilung der Verdichtbarkeit und um Aussagen darüber zu erhalten, nach wie vielen Überfahrten die geforderten Verdichtungsgrade bei RC-Materialien erreicht werden, wurde, wie bereits erwähnt, die Anzahl der Überfahrten mit der zur Verfügung stehenden Vibrationswalze mit jedem Versuchsdurchgang erhöht und nach jedem Versuchsdurchgang in den drei Prüffeldern die erreichte Dichte bestimmt. Die Dichtebestimmung erfolgte durch Densitometerversuche mit dem Ballonersatzverfahren nach DIN 18125-2 [34]. In jedem Prüffeld wurden auf der mittleren Verdichtungsspur um den Prüfpunkt für den statischen Plattendruckversuch im Zentrum der Versuchspunkte je zwei Densitometerversuche durchgeführt. Die Anordnung der Densitometerversuche ist in Bild 163 dargestellt. Bild 168 zeigt Mitarbeiter des Zentrum Geotechnik der TU München bei der Durchführung eines Densitometerversuchs. Die mit den beiden je Prüffeld

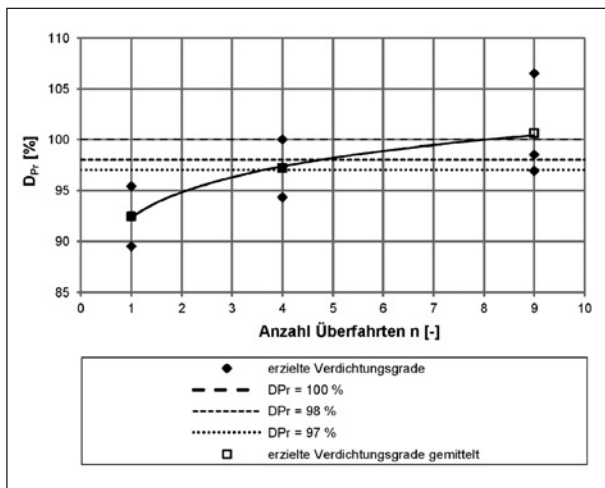


Bild 167: Entwicklung des Verdichtungsgrades in Abhängigkeit der Anzahl der Überfahrten



Bild 168: Mitarbeiter des ZG bei der Durchführung von Densitometerversuchen

durchgeführten Densitometerversuchen bestimmten Trockendichten wurden gemittelt und mit der im Labor an der Mischprobe bestimmten Proctordichte zur Bestimmung des erreichten Verdichtungsgrades ins Verhältnis gesetzt.

In Bild 167 sind die nach jedem Versuchsdurchgang in den drei Prüffeldern ermittelten Verdichtungsgrade als Rauten und der aus den drei Einzelwerten gebildete Mittelwert als Quadrate dargestellt. Deutlich lässt sich erkennen, dass mit zunehmender Anzahl an Walzenübergängen der Verdichtungsgrad im Mittel zunimmt, auch wenn einige Messwerte streuen. Ebenfalls von natürlichen Böden bekannt und auch hier klar ersichtlich ist, dass sich kein linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Überfahrten und dem Verdichtungsgrad einstellt. Bei porösen RC-Materialien ist allerdings zu beachten, dass es durch den Energieeintrag eher zu Kornbrüchen kommen kann als bei natürlichen Bö-



Bild 169: Mitarbeiter des ZG bei der Durchführung von statischen Plattendruckversuchen

den und der Verdichtungsgrad so noch in untergeordnetem Ausmaß gesteigert werden kann.

Zusammenhang E_{v2}/D_{Pr}

Da der Nachweis der direkten Prüfmerkmale in der Regel sehr zeitintensiv ist, wird zur flächigen Kontrolle auf indirekte Prüfverfahren und Prüfmerkmale zurückgegriffen, die mit dem direkten Prüfmerkmal zu korrelieren haben. Als eine Möglichkeit zur Verdichtungskontrolle bei grobkörnigen Böden bieten die ZTV E-StB 09 [67] an, das statische Verformungsmodul E_{v2} zur Beurteilung heranzuziehen. Dieses Verformungsmodul wird im statischen Plattendruckversuch bestimmt und korreliert bei natürlichen, grobkörnigen Böden entsprechend gut mit dem Verdichtungsgrad. In den ZTV E-StB 09 [67] sind für grobe Böden Richtwerte des Verdichtungsgrades zum Verformungsmodul aufgeführt (siehe Tabelle 68).

Zur Überprüfung, ob die Richtwerte der ZTV E-StB 09 [67] auch für Recyclingmaterial der Bodengruppe GU zu brauchbaren Ergebnissen führen und zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Verdichtungsgrad und Verformungsmodul E_{v2} , wurden daher von Mitarbeitern des Zentrum Geotechnik der TU München statische Plattendruckversuche auf der verdichteten Oberfläche durchgeführt (Bild 169). Nach jedem Versuchsdurchgang wurde in jedem der drei Prüffelder ein statischer Plattendruckversuch durchgeführt und der E_{v2} -Wert bestimmt. Die ermittelten Verformungsmodule wurden als indirektes Prüfmerkmal nach TP BF-StB Teil E 4 mit den erzielten und für jedes Prüffeld gemittelten Verdichtungsgraden korreliert.

In Bild 170 sind die gemessenen E_{v2} -Werte mit ihren zugehörigen Verdichtungsgraden sowie die im

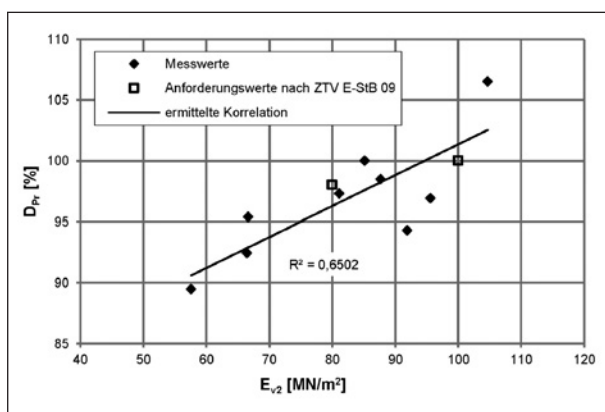


Bild 170: Korrelation zwischen Verdichtungsgrad D_{Pr} und Verformungsmodul E_{v2}

Versuch bestimmte Korrelation zwischen beiden Prüfmerkmalen und die Richtwerte nach den ZTV E-StB 09 [67] dargestellt. Zwischen beiden Merkmalen stellt sich ein Zusammenhang ein, der im betrachteten Abschnitt durch eine Gerade mit einem Korrelationskoeffizienten von etwa 0,65 beschrieben werden kann. Die Richtwerte gemäß den ZTV E-StB 09 [67] für grobkörnige Böden und einen Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100\%$ ($E_{v2} = 100 \text{ MN/m}^2$) bzw. für einen Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 98\%$ ($E_{v2} = 80 \text{ MN/m}^2$) fügen sich gut in die Messergebnisse ein. Es ist somit festzustellen, dass der in ZTV E-StB 09 [67] für grobkörnige natürliche Böden formulierte Zusammenhang zwischen indirekten und direkten Prüfmerkmalen für das untersuchte RC-Material ausreichend gegeben ist.

Zusammenhang E_{vd}/D_{Pr}

Eine wesentlich schnellere Möglichkeit, den Verdichtungsgrad nachzuweisen bietet das dynamische Fallgewichtsgeschütz und die Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} nach der deutschen Richtlinie der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen TP BF-StB, Teil B 8.3 [63]. Wie beim statischen Plattendruckversuch wird auch hier durch eine Belastung eine Setzung erzeugt und daraus der Verformungsmodul E_{vd} berechnet. Im Gegensatz zum statischen Plattendruckversuch erfolgt beim dynamischen Fallgewichtsgeschütz, wie der Name bereits nahelegt, die Belastung dynamisch. Der Vorteil im Vergleich zum statischen Plattendruckversuch besteht in der schnelleren Versuchsdurchführung und darin, dass zur Durchführung kein Widerlager notwendig ist. Auch für das dynamische Verformungsmodul sind in den ZTV E-StB 09 [67] Richtwerte für grobkörnige Böden für den Verdichtungsgrad aufgeführt (siehe

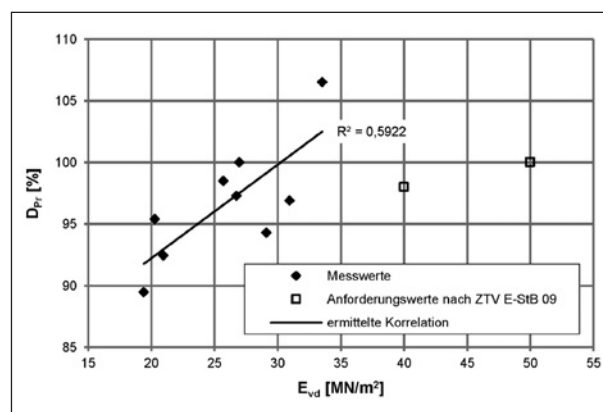


Bild 171: Korrelation zwischen Verdichtungsgrad D_{Pr} und Verformungsmodul E_{vd}

he hierzu Tabelle 69), die zur Beurteilung der erreichten Verdichtung herangezogen werden können.

Es wurden wiederum nach jedem Versuchsdurchgang in jedem Prüffeld vier Versuche mit dem dynamischen Fallgewichtsgeschütz durchgeführt und für jedes Prüffeld ein mittlerer dynamischer Verformungsmodul bestimmt. Aus den Versuchsergebnissen der Fallgewichtversuche und den in jedem Prüffeld erreichten Verdichtungsgrad konnte nach den TP BF-StB Teil E 4 [68] die Korrelation zwischen E_{vd} -Wert und Verdichtungsgrad abgeleitet werden. Die gemittelten dynamischen Verformungsmodule und die zugehörigen Verdichtungsgrade sowie die daraus abgeleitete Korrelation sind in Bild 171 dargestellt. Ebenso sind die für grobkörnige Böden entwickelten Richtwerte nach den ZTV E-StB 09 [67] für Verdichtungsgrade von 98 % und von 100 % in die Abbildung eingetragen.

Die Richtwerte für grobkörnige Böden nach den ZTV E-StB 09 [67] fügen sich nicht gut in die Messergebnisse ein, obwohl die Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche am gleichen Material gut zu den entsprechenden Richtwerten passen. Der erreichte Verdichtungsgrad wird somit durch die Messergebnisse weit unterschätzt. Das Ergebnis kann als Hinweis darauf gewertet werden, dass das von natürlichen Böden bekannte Verhältnis von $E_{v2}/E_{vd} \approx 2$ für den untersuchten RC-Baustoff nicht gilt. Aus derzeitiger Sicht sollte beim Nachweis des Verdichtungsgrades von RC-Materialien das indirekte Prüfmerkmal „dynamischer Verformungsmodul E_{vd} “ auch für grobkörniges Material gemäß den Vorgaben der ZTV E-StB 09 [67] respektive der TP BF-StB Teil E 4 [68] kalibriert werden.

4.4.3 HMV-Aschen

Material

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Hausmüllverbrennungsaschen aus verschiedenen Abfallverbrennungsanlagen aus Deutschland untersucht. Beide Materialien wurden in den Körnungen 0/4 mm und 0/32 mm untersucht.

Die HMVA A wurde ab Werk in den nominellen Körnungen 0/3 mm und 0/32 mm zur Verfügung gestellt. Da beide Körnungen einen merkbaren Anteil an Überkorn aufwiesen, wurden die Materialien vor den Versuchen auf die gewünschten Korngrößen 0/4 mm und 0/32 mm abgesiebt. Die Körnungslinien der auf diese Weise aufbereiteten Körnungen sind in Bild 172 dargestellt.

Die zweite Hausmüllverbrennungsasche, HMVA B, konnte nur in der Körnung 0/32 mm zur Verfügung gestellt werden. Da auch sie einen leichten Überkornanteil aufwies, wurde auch hier vor den Untersuchungen das Überkorn abgetrennt. Die Körnung in der Korngröße 0/4 mm wurde durch Absieben aus der Körnung 0/32 mm erhalten. Die Körnungslinien der aufbereiteten Asche ist in Bild 173 dargestellt.

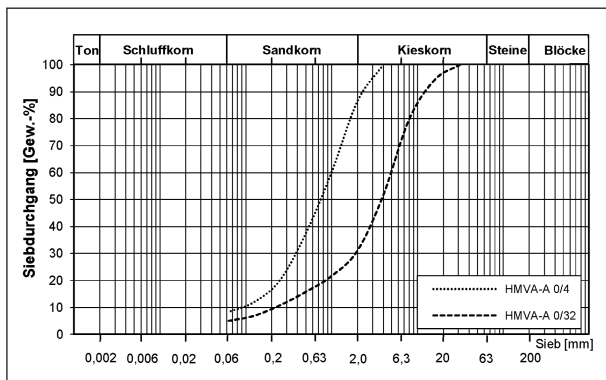


Bild 172: Sieblinien für die HMVA A

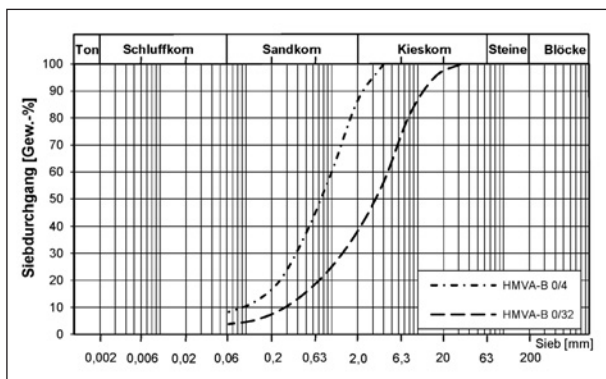


Bild 173: Sieblinien für die HMVA B

Allgemeine Angaben zur Probenvorbereitung

Um die Ergebnisse verschiedener Versuche vergleichen zu können, müssen die einzelnen Messproben eine möglichst homogene Kornzusammensetzung aufweisen. Hierbei besteht, insbesondere bei den grobkörnigen Materialien der Körnung 0/32 mm, die Gefahr der Entmischung. Aus diesem Grund wurden die einzelnen Messproben einer Versuchsreihe in der Korngröße 0/32 durch Teilung einer Laboratoriumsprobe mit dem Riffelteiler gemäß DIN 932-2 [35] erstellt. Da die Entmischung der Proben in der Korngröße 0/4 mm als weniger problematisch erachtet wurde, wurde bei der Körnung 0/4 von der Verwendung des Riffelteilers abgesehen. Die Masse einer Einzelprobe dabei wurde so bemessen, dass ihre Menge ausreichend war, um sowohl den vorgesehenen Versuch durchzuführen als auch zusätzlich den Wassergehalt der Probe am Restmaterial der Probenherstellung bestimmen zu können.

Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften

Die Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften ist in Kapitel 4.4.1 beschrieben. Die Ergebnisse der Versuche an den HMV-Aschen sind in Bild 174 und Bild 175 (Material 0/4 mm) sowie in Bild 176 und Bild 177 (Material 0/32 mm) abgebildet.

Die Trockendichte der beiden HMV-Aschen der Körnung 0/4 mm zeigen keine deutliche Abhängigkeit vom Wassergehalt. Die CBR-Werte liegen für HMVA A 0/4 zwischen 34 % und 45 % und für HMVA B 0/4 variieren sie zwischen 47 % und 70 %. In der Regel sinken die CBR-Werte mit zunehmendem Wassergehalt leicht ab.

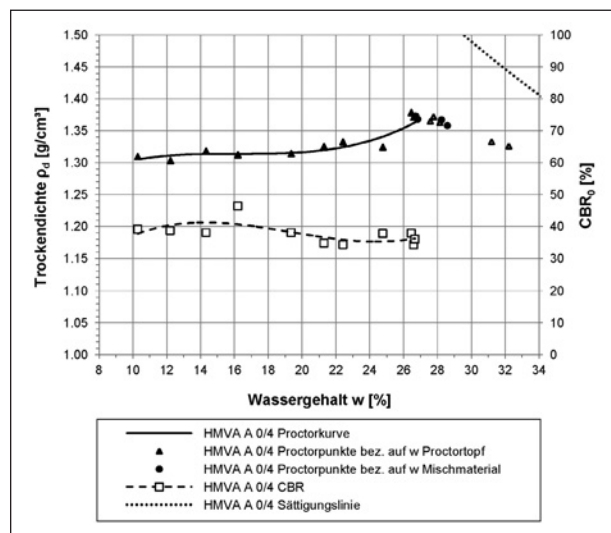


Bild 174: Proctorkurve und CBR-Werte für die HMVA A 0/4

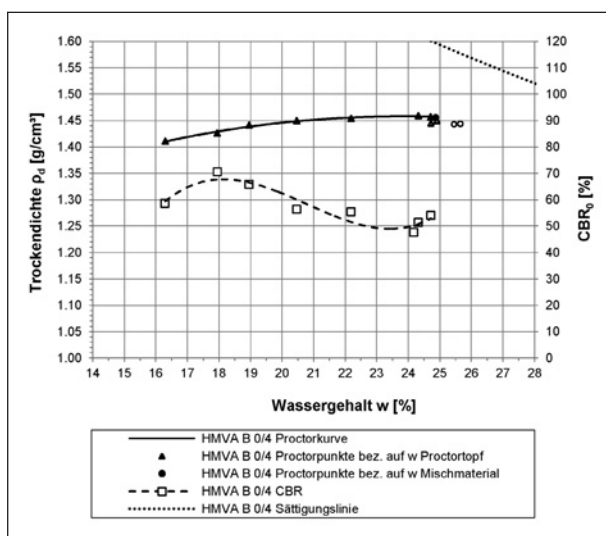


Bild 175: Proctorkurve und CBR-Werte für die HMVA B 0/4

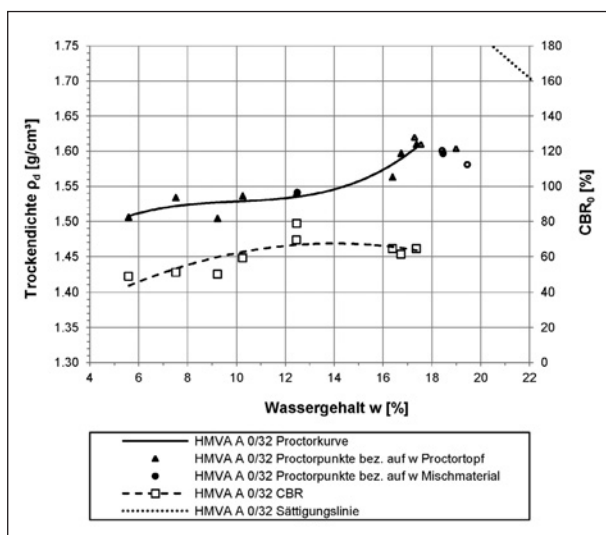


Bild 176: Proctorkurve und CBR-Werte für die HMVA A 0/32

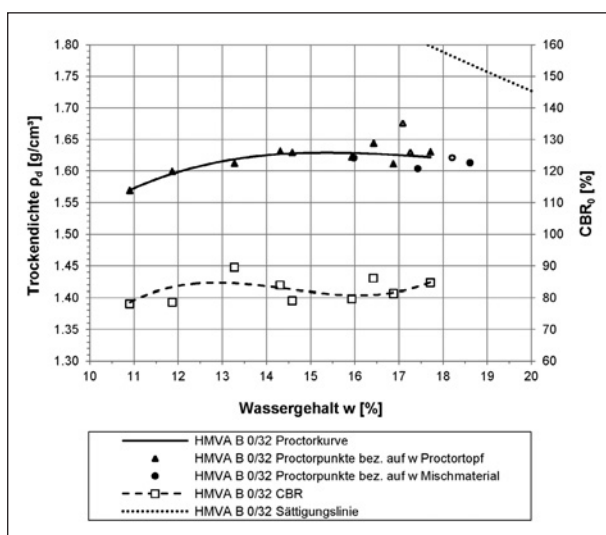


Bild 177: Proctorkurve und CBR-Werte für die HMVA B 0/32

Die HMV-Aschen der Körnung 0/32 mm weisen ebenfalls keine typischen Verdichtungskurven auf. Die CBR-Werte liegen für die HMVA A 0/32 zwischen 49 % und 79 % und für die HMVA B 0/32 zwischen 79 % und 90 %. Auch die Tragfähigkeit dieser Materialien zeigt sich annähernd unabhängig vom Wassergehalt.

Kornzertrümmerung

Die Untersuchungen zur Kornzertrümmerung durch den Verdichtungsprozess wurde analog zur in Kapitel 4.4.1 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die Korngrößenverteilungen der HMV-Aschen mit und ohne Verdichtung mit Proctorenergie sind in Bild 178 und Bild 179 für das Material HMVA A bzw. HMVA B dargestellt. Die Änderungen in den Kornanteilen < 2 mm und < 0,063 mm sind in Tabelle 71 zusammengefasst.

Bei der HMVA A sind Unterschiede in der Sieblinie vor und nach Verdichtung im Proctortopf sowohl für die Körnung in 0/4 mm als auch in 0/32 mm erkennbar. Der Feinkornanteil für HMVA A 0/4 mm wurde

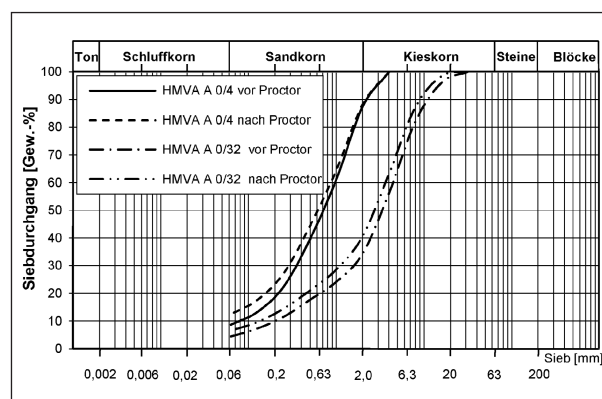


Bild 178: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für HMVA A 0/4 und HMVA A 0/32

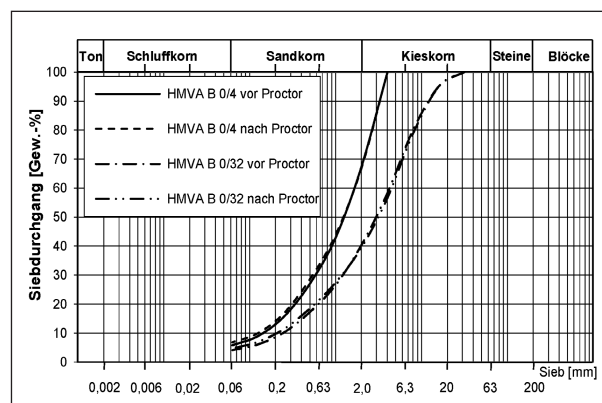


Bild 179: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für HMVA B 0/4 und HMVA B 0/32

durch die Verdichtung von 8,7 % auf 12,5 % erhöht, wobei diese Änderung vor allem im Anteil < 1 mm dokumentiert ist. Bei HMVA A 0/32 mm ist die Änderung der Kornverteilungskurve auch für Korngrößen > 2 mm erkennbar. Der Anteil < 2 mm wurde demnach um 6,2 % vergrößert und die Zunahme des Anteils < 0,063 mm betrug 2,1 %. Trotz leichter Änderungen blieb das Material aber insgesamt gut abgestuft.

Bei HMVA B sind keine nennenswerten Unterschiede in den Sieblinien vor und nach Verdichtung im Proctortopf festzustellen. Minuswerte in Tabelle 71 sind der Versuchsgenauigkeit und Schwankungen in der Zusammensetzung im Material zuzuordnen.

Frosthebungsverhalten⁴⁹

Die Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Frosthebungsverhaltens ist in Kapitel 4.4.1 beschrieben. Für die Untersuchungen wurden Proben

HMVA	Anteil < 2 mm vor/nach Verdichtung [M.-%]			Anteil < 0,063 mm vor/nach Verdichtung [M.-%]		
	vor	nach	Diff.	vor	nach	Diff.
A 0/4	87,5	88,3	0,8	8,7	12,5	3,8
A 0/32	34,4	40,6	6,2	4,4	6,5	2,1
B 0/4	67,3	66,8	-0,5	5,8	6,8	1,0
B 0/32	40,4	39,4	-1,0	4,1	4,7	0,6

Tab. 71: Kornzertrümmerung bei Verdichtung mit Proctorenergie für HMV-Aschen

etwa im Verdichtungsoptimum (Herstellung beim optimalen Wassergehalt auf eine vorgegebene Trockendichte) hergestellt. Die Einbaubedingungen wurden aus den Ergebnissen der Verdichtungsversuche (siehe Bild 174, Bild 175, Bild 176 und Bild 177) festgelegt:

- HMVA A 0/4 mm: $w_{Pr} = 26,5 \text{ \%} / \rho_d = 1,37 \text{ g/cm}^3$,
- HMVA A 0/32 mm: $w_{Pr} = 17 \text{ \%} / \rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$,
- HMVA B 0/32 mm: $w_{Pr} = 17 \text{ \%} / \rho_d = 1,63 \text{ g/cm}^3$.

Die Ergebnisse in Tabelle 64 weisen vor allem für HMVA A sehr niedrige Werte für die Frosthebung aus. Die CBR-Werte sind vor und nach Befrostung nahezu identisch. Die HMVA B weist zwar höhere Frosthebungen auf als HMVA A, die Tragfähigkeiten nach dem Frostversuch weisen aber nicht auf eine maßgebliche Entfestigung des Materials hin.

Sekundäre Effekte⁵⁰

Die Untersuchungen der verdichteten Aschen auf langfristige Verfestigungsprozesse wurde analog zur in Kapitel 4.4.1 beschrieben Vorgehensweise durchgeführt. Die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche zeigen das unterschiedliche Verhalten der

⁴⁹ Bearbeitet durch die HTW Dresden, überarbeitet durch das ZG TUM.

⁵⁰ Bearbeitet durch die HTW Dresden, überarbeitet durch das ZG TUM.

Material	Kennwert	Frosthebung				Tragfähigkeit	
		$\Delta S_{FH,Max}$ [mm]	$\Delta S_{FH,R}$ [mm]	v_{FH} [mm/d]	Δw_E [%]	CBR ₀ [%]	CBR _F [%]
HMVA A 0/4 (1)		1,4	0,2	0,1	4,8	33	32
HMVA A 0/4 (2)		0,6	0,0	0,1	4,8		32
HMVA A 0/32		1,2	0,3	0,1	1,9	60	65
HMVA A 0/32 (nach 28 tägiger Feuchtraumlagerung)		1,0	0,0	0,1	2,0		58
HMVA A 0/32 (nach 28 tägiger Feuchtraumlagerung)		1,2	0,1	0,1	2,6		61
HMVA B 0/32		5,7	1,0	0,3	2,1	56	50
HMVA B 0/32 (nach 28 tägiger Feuchtraumlagerung)		10,3	2,0	0,5	2,4		57

$\Delta S_{FH,Max}$	maximale Frosthebung
$\Delta S_{FH,R}$	verbleibende Resthebung
v_{FH}	Frosthebungsgeschwindigkeit
Δw_E	Wassergehaltsänderung während des Versuches
CBR ₀	Tragfähigkeitswert CBR direkt nach Probeherstellung
CBR _F	Tragfähigkeitswert CBR nach Frosthebungsversuch bzw. nach 28 tägiger Feuchtraumlagerung und anschließendem Frosthebungsversuch

Tab. 72: Ergebnisse der Frosthebungsversuche und Tragfähigkeitsversuche nach Befrostung

beiden HMV-Aschen. Während HMVA A weder bei Feuchtraumlagerung noch bei Wasserlagerung eine deutliche Nachverfestigung anzeigt, weist HMVA B bei beiden Lagerungsarten eine teils deutliche Nachverfestigung auf (siehe Bild 180 und Bild 181).

Die Ergebnisse zu den sekundären Verfestigungsprozessen sind auch unter Berücksichtigung des Durchströmungsverhaltens interessant. So weist HMVA A zwar keine Verfestigung auf, dafür bleibt ihre Durchlässigkeit über die Lagerungszeit bei beiden Lagerungsarten, Feuchtraumlagerung und Wasserlagerung, konstant. Im Gegensatz dazu zeigt die HMVA B bei den Durchlässigkeitsversuchen für beide Lagerungsarten teils stark steigende Durchlässigkeiten auf (siehe Bild 183).

Gemäß den TL BuB E-StB sind HMV-Aschen nach der Aufbereitung so lange feucht zu lagern, bis

eine ausreichende Raumbeständigkeit gewährleistet ist. Die dokumentierten Unterschiede zwischen den beiden Aschen weisen möglicherweise darauf hin, dass bei HMVA B über Lösungsvorgänge noch Material an die Porenlösung verliert. Diese Vermutung wird dadurch gestützt, dass die Durchlässigkeit bei Wasserlagerung deutlich stärker steigt als bei Feuchtraumlagerung. Zur Erreichung des Lösungsgleichgewichtes muss im Kontakt mit einer größeren Wassermenge auch mehr Material aus der Struktur gelöst werden. Gleichzeitig können die in der Porenlösung befindlichen gelösten Stoffe an anderer Stelle wieder auskristallisieren und zur (auch bei HMV-Aschen bekannten) Verfestigung führen. Eben dies ist bei den Untersuchungen an HMVA B dokumentiert. HMVA A hingegen zeigt bezüglich Festigkeitsentwicklung und Entwicklung der Durchlässigkeit unauffälliges Verhalten.

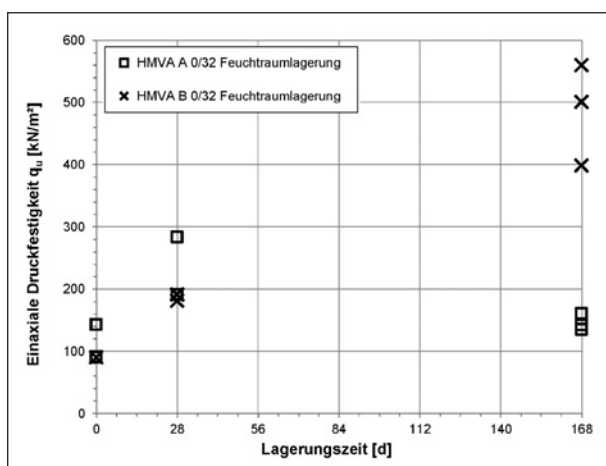


Bild 180: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit der HMV-Aschen bei Feuchtraumlagerung

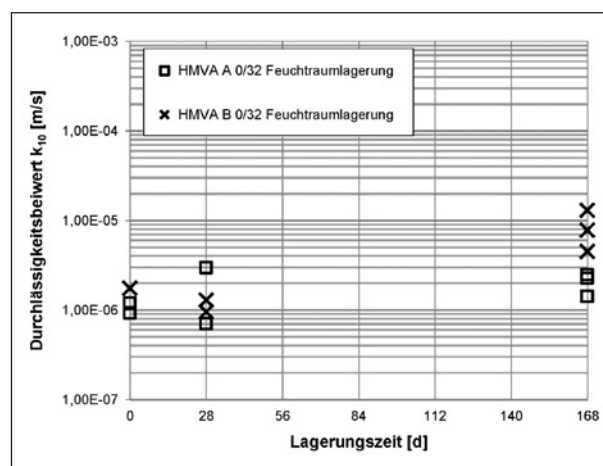


Bild 182: Entwicklung der Durchlässigkeit der HMV-Aschen bei Feuchtraumlagerung

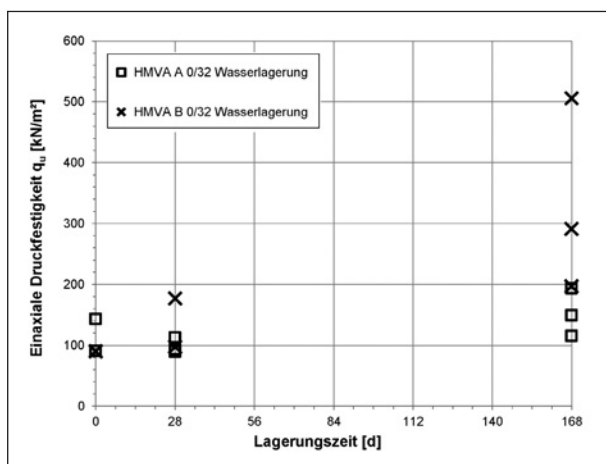


Bild 181: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit der HMV-Aschen bei Wasserlagerung

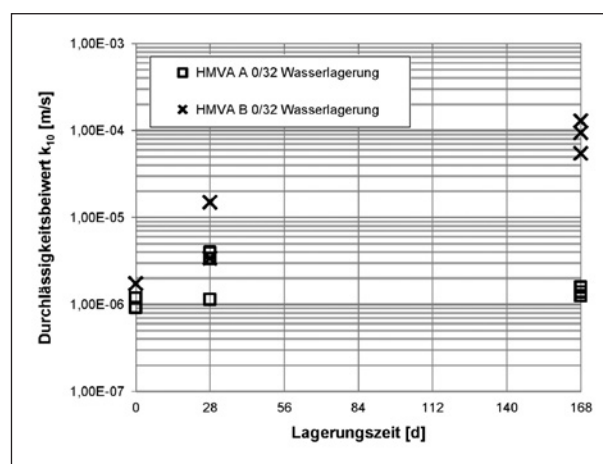


Bild 183: Entwicklung der Durchlässigkeit der HMV-Aschen bei Wasserlagerung

4.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

4.5.1 RC-Materialien mit und ohne Bodenanteile

Die Untersuchungen umfassten sowohl RC-Materialien, die den Anforderungen der TL Gestein-StB bzw. TL BuB E-StB entsprachen als auch Materialien, deren Zusammensetzung nicht den Anforderungen dieser Regelwerke gerecht wurde. Die Anteile bestimmter mineralischer Fremdbestandteile und Fremdstoffe wurde in den Versuchen bewusst überschritten. Die ermittelten Eigenschaften dieser Materialien passen allgemein gut zu den Informationen der Literatur (vgl. Kapitel 4.3.2).

Verdichtung und Tragfähigkeit

Bei der Untersuchung der erdbautechnischen Eigenschaften in Kapitel 4.4.1 zeigten sich die Verdichtung und Tragfähigkeit für die jeweils untersuchten Kornfraktionen (0/4 mm und 0/32 mm) nahezu unabhängig vom Wassergehalt.

Liegen im Recyclingmaterial nennenswerte Anteile an natürlichen Körnungen vor, so entscheidet die Art dieses Bodenanteils darüber, wie sich das Verhalten im Vergleich zum „reinen“ RC-Material ändert. Grobkörnige Bodenanteile im RC-Material führen im Vergleich zum RC-Material ohne Bodenanteile in der Regel zu höheren erreichbaren Trockendichten und Tragfähigkeiten, gleichzeitig sinkt der optimale Verdichtungswassergehalt. Ist der Bodenanteil feinkörnig, so können im Vergleich zum RC-Material ohne Bodenanteile ebenfalls höhere Trockendichten erreicht werden. Je nach Anteil des feinkörnigen Bodens am RC-Material entwickelt sich allerdings eine ausgeprägte Abhängigkeit der Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit vom Wassergehalt. Erfahrungen am Zentrum Geotechnik⁵¹ zeigen

⁵¹ FE 05.0183/2013/CGB „Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% bzw. Massen-%-Grenzen bei Bodenmaterial“ im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen; Bericht noch nicht veröffentlicht (HENZINGER et al. [79]).

⁵² BAUMGÄRTEL et al. [10] stellten eine unterschiedliche Beeinflussung des Materialverhaltens fest, je nach Feinkornanteil des Materials. Demnach beeinflussen Anteile an Fremdbestandteilen in fein- und gemischt-körnigem Material (Feinkornanteil insg. > 15 %) das Materialverhalten auf andere Art, als Fremdbestandteile in gemischt- und grobkörnigen Materialien (Feinkornanteil insg. ≤ 15 %).

in diesem Zusammenhang, dass die von natürlichen Böden bekannten Richtwerte für den Übergang zwischen tragender Feinkornmatrix und tragendem Grobkorngerüst (zum Beispiel OSTERMAYER [119]) näherungsweise auch für RC-Materialien mit Bodenanteilen angewendet werden können. Die bautechnische Klassifizierung nach DIN 18196 ist somit auch für solche Materialien technisch gerechtfertigt. Dies spiegelt sich auch in den Untersuchungen von BAUMGÄRTEL et al. [10] wieder, die die Beeinflussung der Eigenschaften von Böden durch Anteile an Fremdbestandteilen untersuchten⁵².

Die Überschreitung des in TL Gestein-StB zugelassenen maximalen Ziegelanteiles um 10 % (zugelassen 30 M.-%, hier untersucht 40 M.-%) war aus Sicht der Verdichtung und Tragfähigkeit als unkritisch zu bezeichnen. Auch in Verbindung mit nennenswerten Bodenanteilen wurde im Vergleich zum Verhalten von Materialien ohne Überschreitung des Kennwertes kein auffälliges Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten dokumentiert.

Die Überschreitung der zulässigen Fremdstoffanteile nach TL Gestein-StB bzw. TL BuB E-StB führt vor allem bei Fremdstoffen kleiner Dichte zur signifikanten Abnahme der Tragfähigkeit (siehe Bild 184). So wurden auch für einen Anteil von 5 M.-% an Kunststoffgranulat im RC-Material akzeptable Ergebnisse in Bezug auf Verdichtung und Tragfähigkeit dokumentiert. Bei Holzspänen als Fremdstoff wurden akzeptable Verdichtungseigenschaften

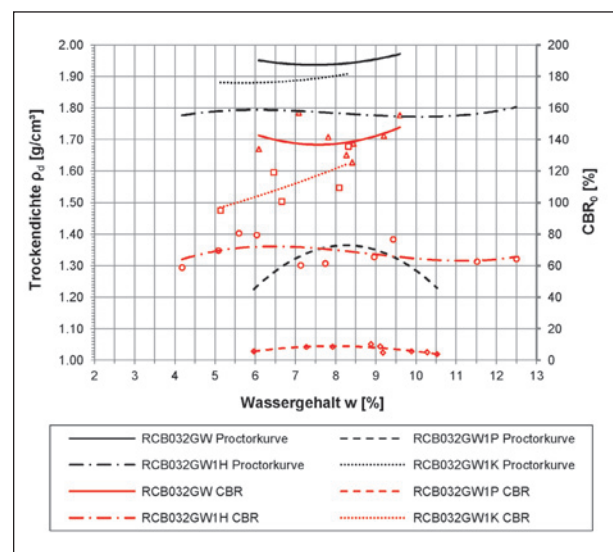


Bild 184: Einfluss von 1 M.-% unterschiedlicher Fremdstoffe (Polystyrolschaumkugeln, Holzspäne, Kunststoffgranulat) auf die Verdichtbarkeit und die Tragfähigkeit von RCB032GW

und Tragfähigkeiten bis zu einem Anteil am Gemisch von 1 M.-% dokumentiert. Bei Polystyrolschäumkugeln als Fremdstoff führte bereits ein Anteil im RC-Material von 0,2 M. % zu einer stark negativen Beeinflussung der Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit.

Neben der Materialdichte der Fremdstoffe wird aber allgemein auch deren Form eine maßgebliche Rolle für Verdichtung und Tragfähigkeit spielen. Es kann zum Beispiel nicht davon ausgegangen werden, dass der Einfluss von Kunststoff in faseriger Form auf das Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten gleich ist wie jener von Kunststoff in granularer Form (wie hier untersucht). In diesem Zusammenhang gibt es auch Bestrebungen, faserige Kunststoffanteile zur Verbesserung der Bodeneigenschaften einzusetzen (vgl. CHEBET & KALUMBA [24]).

Kornzertrümmerung durch Verdichtung

Die durchgeführten Siebversuche an Material mit und ohne vorangegangener Verdichtung zeigten für alle RC-Materialien und RC-Materialien mit maßgeblichen Bodenanteilen meist nur untergeordnete Änderungen im Feinkornanteil ($< 0,063$ mm) durch Kornbruch bei der Verdichtung (maximal dokumentierte Erhöhung des Feinkornanteils etwa 4 %). Die Erhöhung des Sandanteils (< 2 mm) wies Werte in der gleichen Größenordnung auf, die aber in keinem offensichtlichen Zusammenhang zum Betrag der Erhöhung des Feinkornanteils standen. In welchem Körnungsbereich des RC-Materials der Kornbruch zum Anwachsen des Feinkornanteils führte, konnte also nicht nachvollzogen werden.

Aus derzeitiger Sicht ist auch bei hohen Ziegelanteilen (hier 40 %) keine maßgebliche Änderung der erdbautechnischen Eigenschaften des Materials zu erwarten. Grundsätzlich ist aber mit steigendem Anteil von Material mit entsprechend niedriger Einzelkornfestigkeit im Gemisch durchaus mit Kornzertrümmerung durch Verdichtung zu rechnen.

Scherfestigkeit

Die Untersuchungen zur dränierten Scherfestigkeit bestätigen die bereits in der Literatur berichteten Eigenheiten solcher RC-Materialien. So sind in der Regel für die gebrochenen Körner unter Ansatz des Mohr-Coloumb-Kriteriums hohe Reibungswinkel und nennenswerte Werte für Kohäsion dokumentiert. Mit oder ohne Ansatz einer

Kohäsion liegen die Werte für die dränierten Reibungswinkel durchwegs im Bereich von vergleichbaren natürlichen Körnungen. Ohne Bodenanteile liegen die dränierten Reibungswinkel (im Verdichtungsoptimum) im Bereich um 40° . Nennenswerte feinkörnige Bodenanteile im RC-Material liefern Werte die niedriger liegen, als jene des reinen RC-Materials.

Verhalten bei und nach Befrostung

Das untersuchte RC-Material aus Bauschutt (RC-Mix) zeigte in der Körnung 0/4 mm deutlich höhere Frosthebungen als in der Körnung 0/32 mm. Gleichzeitig fiel bei der feineren Körnung der CBR-Wert nach Befrostung im Vergleich zum Wert ohne Frostbeanspruchung um etwa die Hälfte ab, während für das gröbere Material im selben Vergleich sogar eine leichte Tragfähigkeitssteigerung (CBR) dokumentiert wurde. Eine Feuchtraumlagerung vor Befrostung der grobkörnigen Proben bewirkte eine weitere Zunahme der Tragfähigkeit (CBR) und eine leichte Abnahme der Frosthebung im Vergleich zu Proben ohne Feuchtraumlagerung. Nennenswerte Anteile an grobkörnigem Boden (hier Boden GW) im RC-Material der Körnung 0/32 mm führten zu niedrigeren Frosthebungen im Vergleich zu RC-Material ohne Bodenanteile, wobei auch hier eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit (CBR) nach Befrostung dokumentiert wurde.

Die Erhöhung der Tragfähigkeit der untersuchten groben RC-Materialien trotz der durch Befrostung bedingten Auflockerung ist derzeit nicht ausreichend untersucht. Der gewählte Erklärungsansatz (Überlagerung der Effekte aus Auflockerung mit sekundären Verfestigungsprozessen während der Befrostung) ist nicht belegt.

Sekundäre Verfestigungsprozesse und andere Effekte

Das Langzeitverhalten von RC-Materialien wurde mit Einaxialen Druckversuchen und Durchlässigkeitsversuchen am RC-Mix 0/32 mm nach unterschiedlicher Lagerungsdauer und bei verschiedenen Lagerungsarten untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem innerhalb der ersten Monate eine deutliche Verfestigung der verdichteten Proben stattfand, unabhängig davon, ob die Proben im Feuchtraum oder im Wasser gelagert wurden. Gleichzeitig konnte bei der Wasserlagerung eine Tendenz zur Verringerung der Durchlässigkeit über die Lagerungszeit festgestellt werden.

Prüfung der Verdichtung mit indirekten Prüfmerkmalen im Feld

Bei der Verdichtungskontrolle von RC-Materialien im Feld ist darauf zu achten, dass der Nachweis des Verdichtungserfolges über indirekte Prüfmerkmale mit der statischen Lastplatte aus derzeitiger Sicht analog zur Kontrolle natürlicher Böden gemäß ZTV E-StB 09 erfolgen kann. Bei der Anwendung des leichten Fallgewichtsgerätes zur Verdichtungskontrolle ist auch für grobkörnige RC-Materialien ein von natürlichen Böden abweichendes Verhältnis zwischen E_{vd} und D_{Pr} zu erwarten. Die Übertragung der Richtwerte für grobkörnige Böden gemäß ZTV E-StB 09 auf grobkörnige RC-Materialien (gleicher Bodengruppe nach DIN 18196) wird auf Basis der Versuchsergebnisse nicht empfohlen.

4.5.2 Hausmüllverbrennungsasche

Verdichtung und Tragfähigkeit

Beide untersuchten HMV-Aschen wiesen keine typischen Verdichtungskurven auf, der Verdichtungserfolg zeigte sich nahezu unabhängig vom Wassergehalt. Die Ergebnisse weisen allerdings auf die möglichen Unterschiede der erdbautechnischen Eigenschaften solcher Produkte hin (vgl. Kapitel 4.4.2). So wies HMVA A nach Verdichtung trotz sehr ähnlicher Körnung allgemein niedrigere Trockendichten und Tragfähigkeiten auf wie HMVA B. Der Grund für die Unterschiede ist derzeit nicht geklärt. Insgesamt führte bei beiden Aschen jeweils die gröbere Körnung zu höheren Trockendichten und Tragfähigkeiten. Die verarbeitbaren Wassergehalte liegen dabei allerdings niedriger als bei den feineren Körnungen.

Kornzertrümmerung durch Verdichtung

Jene Asche, die in den Verdichtungsversuchen die höheren Trockendichten und Tragfähigkeiten aufwies (HMVA B), zeigte in den Untersuchungen keine Änderung der Kornverteilungslinie durch Verdichtung. Bei der zweiten Asche (HMVA A) hingegen wurde bei den untersuchten Körnungen (0/4 mm und 0/32 mm) maximal eine Erhöhung des Anteils < 2 mm um etwa 6 % und eine maximale Erhöhung des Feinkornanteils von etwa 4 % dokumentiert. Die Dimension der Kornzertrümmerung lässt eine grundlegende Änderung des bautechnischen Verhaltens durch Kornbruch bei Verdichtung allerdings nicht erwarten, das Material bleibt gut abgestuft.

Verhalten bei und nach Befrostung

Durch die Befrostung mit und ohne vorangegangene Feuchtraumlagerung wurde die Tragfähigkeit der Proben nicht maßgeblich beeinflusst. Die dokumentierten Beträge für die Frosthebung befinden sich in derselben Größenordnung wie jene des RC-Materials (vgl. Kapitel 4.4.1).

Sekundäre Verfestigungsprozesse und andere Effekte

Aus den Ergebnissen von Versuchen zur einaxialen Druckfestigkeit an den zwei ausgewählten Versuchssachen ist ersichtlich, dass sich sowohl die Durchlässigkeit als auch die Druckfestigkeit im Laufe einer Wasser- bzw. Feuchtraumlagerung ändern können. Die beiden Effekte sind markant bei derselben Asche jeweils als Anstieg beider Werte (Druckfestigkeit und Durchlässigkeit) über die Zeit dokumentiert, während die andere Asche nur sehr untergeordnete Änderungen im zeitlichen Verlauf aufweist (siehe Kapitel 4.4.2).

4.6 Beurteilung der Ergebnisse im Kontext des straßenbautechnischen Regelwerks

4.6.1 Vorgaben der ZTV E-StB 09

Das erdbautechnische Regelwerk der FGSV trennt die Baustoffe Boden, Boden mit Fremdbestandteilen und RC-Baustoff. Die Trennung erfolgt anhand des Anteils an Boden und mineralischen Fremdbestandteilen.

Insgesamt zeigt sich das Verhalten von Gemischen aus Boden und mineralischen Fremdbestandteilen vom jeweiligen Mischungsverhältnis dieser Bestandteile abhängig. Eine scharfe Grenze, ab der die bautechnischen Eigenschaften eindeutig von einem bestimmten Bestandteil dominiert werden, konnte in den Versuchen nicht bestätigt werden. Aus dem bautechnischen Verhalten der untersuchten RC-Materialien und Mischungen mit Boden konnte zusammenfassend nicht die Notwendigkeit einer allgemeingültigen Grenze zwischen jenen im Regelwerk definierten Baustoffen abgeleitet werden. Dies wurde auch in den Versuchen von HENZINGER et al. [79] bestätigt, die zur Beschreibung des bautechnischen Verhaltens die Klassifizierung solcher Materialien gemäß DIN 18196 als ausreichend erachten.

Die Verwendung von HMV-Aschen ist nach den Vorgaben der ZTV E-StB nur für bestimmte Anwendungen vorgesehen. Grundsätzlich zeigen die Untersuchungen, dass HMV-Aschen durchaus hochwertige bautechnische Eigenschaften in Bezug auf Verdichtbarkeit, Tragfähigkeit und Potenzial zur Nachverfestigung aufweisen. Der Ausschluss dieses Materials aus planmäßig durchströmten Bauteilen (Filter- & Sickerschichten) nach ZTV E-StB wird durch die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse gleichzeitig bestätigt (Änderung der Durchlässigkeit mit steigendem Alter).

4.6.2 Vorgaben der TL BuB E-StB 09

Die TL BuB E-StB regeln im Rahmen des Regelwerkes der FGSV die Anforderungen an Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus. Unter anderem sind darin Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von Material der Kategorie „Boden mit Fremdbestandteilen“ und von „Rezyklierten Baustoffen“ festgelegt. Die Beschränkungen umfassen für beide Materialgruppen jeweils einen maximal zulässigen Anteil an Ausbauasphalt (< 10 M.-%) und einen maximal zulässigen Anteil an Fremdstoffen, wie Holz, Gummi, Kunststoffen und Textilien (< 0,2 M.-%).

Die eigenen Versuche bestätigen grundsätzlich das in TL BuB E-StB gewählte Vorgehen ohne Beschränkung der mineralischen Fremdbestandteile (exkl. Ausbauasphalt). Weder aus der Literatur, noch aus den Ergebnissen der eigenen Versuche konnte für hohe Anteile des mineralischen Fremdbestandteils Ziegel grundsätzlich eine mangelnde Eignung abgeleitet werden. Andere Fremdbestandteile wie Kalksandstein oder Porenbeton wurden nicht untersucht. Bezieht man sich allerdings auf die Arbeit von BAUMGÄRTEL et al. [10], bestehen im Allgemeinen keine verwitterungsbedingten Einschränkungen an die erdbautechnische Eignung solcher Materialien. Wie bereits durch BAUMGÄRTEL et al. [10] vorgeschlagen, kann der möglichen Kornzertrümmerung durch den Verdichtungsprozess bei der Eignungsprüfung dadurch begegnet werden, dass die Beurteilung der Frostempfindlichkeit des jeweiligen Materials gemäß den ZTV E-StB (Klassifikationsmerkmale werden aus der Korngrößenverteilung abgeleitet) anhand einer zuvor verdichteten Probe erfolgt. Für mineralische Fremdstoffe mit niedriger Partikel Festigkeit – wie Mörtel und Putz – schlagen BAUMGÄRTEL et al. [10] im Gemisch mit gemischt- und grobkörnigen Böden eine Beschränkung auf einen Anteil von maximal 10 M.-% vor.

In den eigenen Untersuchungen zur Beeinflussung der erdbautechnischen Eigenschaften von Gemischen mit unterschiedlichen Anteilen an Fremdstoffen konnte gezeigt werden, dass der im Regelwerk formulierte, maximal zulässige Anteil an Fremdstoffen von 0,2 M.-% eine teils problematische, teils aber auch konservative Grenze darstellt. Für Fremdstoffe sehr niedriger Dichte (wie zum Beispiel Polystyrolschaumkugeln) ist bereits bei einem Anteil von 0,2 M.-% eine deutliche Beeinflussung von Verdichtung und Tragfähigkeit zu erwarten. Für Fremdstoffe höherer Dichte (wie hier zum Beispiel Kunststoffgranulat) wurde auch bei höheren Anteilen nur eine untergeordnete Beeinflussung festgestellt. Nach BAUMGÄRTEL et al. [10] sollte die Vorgabe der TL BuB E-StB zur Beschränkung des Fremdstoffanteils, vor allem von Fremdstoffen kleiner Rohdichte, bezogen auf den Volumenanteil erfolgen. Im Kontext der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen und in Anlehnung an BAUMGÄRTEL et al. [10] wird vorgeschlagen, zusätzlich zur bereits bestehenden Begrenzung (0,2 M.-%) den maximal zulässigen Anteil an Fremdstoffen im Gemisch für Fremdstoffe mit Dichten < 0,05 g/cm³ auf 10 Vol.-% zu beschränken.

Die Vorgaben der TL BuB E-StB können aus derzeitiger Sicht nur bestätigt werden. Außerdem unterstreichen die Tendenzen zur Änderung der Durchlässigkeit mit der Zeit die Relevanz der Forderung der TL BuB E-StB nach Raumbeständigkeit der Aschen.

4.6.3 Beurteilungsschema für Recyclingmaterialien mit und ohne Bodenanteile

Im Merkblatt über die Verwendung von Boden ohne und mit Fremdbestandteilen im Straßenbau [52] ist der Einfluss von Fremdbestandteilen auf die bautechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Böden hauptsächlich auf Grundlage der Erkenntnisse von BAUMGÄRTEL et al. [10] beschrieben. Das Vorhandensein einer scharfen Grenze zwischen Boden mit Fremdbestandteilen und RC-Baustoffen konnte in den eigenen Untersuchungen und jenen von HENZINGER et al. [79] aus bautechnischer Sicht nicht bestätigt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit zunehmendem Anteil der mineralischen Fremdbestandteile am Gemisch deren Verhalten fortschreitend dominant wird. Aus derzeitiger Sicht können daher die im Merkblatt M BomF [52] dargestellten Tabellen auf Gemische aus Böden und RC-Materialien verallgemeinert werden.

Das bautechnische Verhalten eines Gemisches aus Boden und RC-Material ergibt sich damit als Kombination der Eigenschaften der einzelnen Bestandteile und deren Anteil an der Gesamtkörnung. Auf eine

Quantifizierung der Beeinflussung wird in den Tabellen 73, 74 und 75, die die Angaben aus M BomF [52] ansonsten vollinhaltlich übernehmen, deshalb verzichtet.

Eigenschaften der Fremdbestandteile bzw. RC-Materialien/mögliche Unterschiede zum Boden	Fremdbestandteil im Korngrößenbereich [mm]	Eigenschaften				
		Scherfestigkeit	Verdichtungsfähigkeit	Tragfähigkeit	Frostempfindlichkeit	Verwitterungsbeständigkeit
kantige Kornform/ raue Kornform	> 2	●	●	●	○	○
	0,063 – 2	●	●	●	○	○
	< 0,063	○	○	○	○	○
porig/ wassersaugend	> 2	○	●	●	●	●
	0,063 – 2	○	●	●	●	●
	< 0,063	○	○	○	○	○
geringe Kornfestigkeit bei mechanischer Beanspruchung	> 2	●	●	●	●	●
	0,063 – 2	●	●	●	●	●
	< 0,063	○	○	○	○	○
veränderlich feste Eigenschaften/verwitterungsanfällig	> 2	●	○	●	●	●
	0,063 – 2	●	○	●	●	●
	< 0,063	○	○	○	○	○

Beurteilungskriterien: ● Beeinflussung der Eigenschaften möglich
○ Beeinflussung der Eigenschaften nicht zu erwarten

Tab. 73: Einfluss von Fremdbestandteilen bzw. RC-Materialien auf die bautechnischen Eigenschaften in Gemischen mit grobkörnigen und gemischtkörnigen (Feinkornanteil ≤ 15 M.-%) Böden

Eigenschaften der Fremdbestandteile bzw. RC-Materialien/mögliche Unterschiede zum Boden	Fremdbestandteil im Korngrößenbereich [mm]	Eigenschaften				
		Scherfestigkeit	Verdichtungsfähigkeit	Tragfähigkeit	Frostempfindlichkeit	Verwitterungsbeständigkeit
kantige Kornform/ raue Kornform	> 2	●	●	●	○	○
	0,063 – 2	●	●	●	○	○
	< 0,063	●	●	●	○	○
porig/ wassersaugend	> 2	●	●	●	●	●
	0,063 – 2	●	●	●	●	●
	< 0,063	●	●	●	●	●
geringe Kornfestigkeit bei mechanischer Beanspruchung	> 2	●	●	●	●	●
	0,063 – 2	●	●	●	●	●
	< 0,063	●	●	●	○	○
veränderlich feste Eigenschaften/verwitterungsanfällig	> 2	●	○	●	●	●
	0,063 – 2	●	○	●	●	●
	< 0,063	○	○	○	●	●

Beurteilungskriterien: ● Beeinflussung der Eigenschaften möglich
○ Beeinflussung der Eigenschaften nicht zu erwarten

Tab. 74: Einfluss von Fremdbestandteilen bzw. RC-Materialien auf die bautechnischen Eigenschaften in Gemischen mit gemischtkörnigen (Feinkornanteil > 15 M.-% bis 40 M.-%) Böden

Eigenschaften der Fremdbestandteile bzw. RC-Materialien/mögliche Unterschiede zum Boden	Fremdbestandteil im Korngrößenbereich [mm]	Eigenschaften				
		Scherfestigkeit	Verdichtungsfähigkeit	Tragfähigkeit	Frostempfindlichkeit	Verwitterungsbeständigkeit
kantige Kornform/ raue Kornform	> 2	●	●	●	○	○
	0,063 – 2	●	●	●	○	○
	< 0,063	●	●	●	○	○
porig/ wassersaugend	> 2	●	●	●	●	●
	0,063 – 2	●	●	●	●	●
	< 0,063	●	●	●	●	●
geringe Kornfestigkeit bei mechanischer Beanspruchung	> 2	●	●	●	●	●
	0,063 – 2	●	●	●	●	●
	< 0,063	○	○	○	○	○
veränderlich feste Eigenschaften/ verwitterungsanfällig	> 2	●	○	●	●	●
	0,063 – 2	●	○	●	●	●
	< 0,063	○	○	○	●	●
Beurteilungskriterien: ● Beeinflussung der Eigenschaften möglich ○ Beeinflussung der Eigenschaften nicht zu erwarten						

Tab. 75: Einfluss von Fremdbestandteilen bzw. RC-Materialien auf die bautechnischen Eigenschaften in Gemischen mit feinkörnigen (Feinkornanteil > 40 M.-%) Böden

5 Zusammenfassende Betrachtungen

In Kapitel 1 dieses Berichtes wurden die Hintergründe und Ziele des Forschungsprojektes vorgestellt. Es sollten die Grundlagen für eine nachhaltige Materialverwendung im Erdbau für die drei Stoffgruppen a) organogene Böden bzw. Böden mit organischen Bestandteilen, b) Böden mit geringer Konsistenz sowie c) Sekundärbaustoffe (RC-Baustoffe, Böden mit Fremdbestandteilen, industrielle Nebenprodukte) erweitert und Vorbehalte abgebaut werden.

Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung dieser Materialien im Erdbau sollten aufgezeigt werden. Dies erfolgte für organogene Böden bzw. Böden mit organischen Bestandteilen in Kapitel 2. Neben der umfassenden Auswertung von Literaturquellen stehen mit den eigenen Untersuchungen nun umfassende Ergebnisse zur Beurteilung des Einflusses des organischen Anteils auf das Verdichtungsverhalten zur Verfügung. Die weiterführenden Untersuchungen zum Last-Verformungsverhalten und zur Scherfestigkeit verdichteter Böden mit organischen Anteilen sowie zur Bodenverbesserung mit Bindemitteln bieten zusätzliche wichtige Informationen, die für eine Verwendung solcher Materialien im Erd-

bau von Bedeutung sind. Abschließend wurden materialspezifische Hinweise für die Eignungsprüfung solcher Böden formuliert und die Versuchsergebnisse in Tabellen mit Anhaltswerten zur Beurteilung und möglichen Verwertungsmöglichkeiten zusammengefasst. Eine erste Beurteilung, ob ein Boden mit organischen Bestandteilen für ein bestimmtes Bauwerk einsetzbar ist und auf welche speziellen Eigenschaften dabei geachtet werden muss, kann damit erfolgen.

Möglichkeiten zur Verbesserung und des Einsatzes von Böden mit geringer Konsistenz wurden in Kapitel 3 dieses Berichtes dargestellt. Neben den erdbautechnischen Verfahren wurden auch unterschiedliche Entwässerungsverfahren und die Verwendung in Sonderlösungen miteinbezogen. Anhand von 4 Böden (TL, TM, ST* und GU* gem. DIN 18196) wurden die Anwendungsbereiche dieser Verfahren zur Verbarmung der Böden untersucht und die Ergebnisse vergleichend dargestellt. Anhand dieser Auswertung kann abhängig vom Wassergehalt der Böden abgelesen werden, über welche Verfahren sie erdbautechnisch verwendbar gemacht werden können. Zusammengefasst wurden die Erkenntnisse im Anschluss in einer Tabelle, die für unterschiedliche Böden mit zu hohem Wassergehalt die Strategien zur Verwendbar-

machung bewertet und erste Hinweise auf eigenschaftsbedingte Einschränkungen gibt.

Im letzten Schritt wurden in Kapitel 4 die erdbautechnischen Eigenschaften von Recyclingmaterialien und HMV-Aschen untersucht. Speziell wurde bei den Recyclingmaterialien auch auf den Fall eingegangen, dass das Material nicht den Anforderungen an die stoffliche Kennzeichnung gem. den Vorgaben des straßenbautechnischen Regelwerks entspricht. Grundsätzlich bestätigen die Untersuchungen die durchaus hochwertigen bautechnischen Eigenschaften des Materials auch für diesen Fall. Die Untersuchungen bestätigen gleichzeitig die Vorgaben des straßenbautechnischen Regelwerks an den Anteil an Fremdstoffen. Vor allem mit Anteilen an Fremdstoffen niedriger Korndichte sinkt die Qualität des gesamten Materials als Baustoff signifikant ab. Anhand der gesammelten Ergebnisse wurde abschließend für diese Materialgruppe die Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher mineralischer Fremdbestandteile im Recyclingmaterial aufgrund der in M BomF dargestellten Tabellen empfohlen. Für Fälle, in denen ein Erdbaustoff die zulässigen Anteile an mineralischen Fremdbestandteilen nach TL BuB E-Stb überschreitet, kann anhand dieser Tabelle die Art der möglichen Beeinflussung der Eigenschaften abgelesen werden. Die ebenfalls in Kapitel 4 dargestellten Untersuchungen zur Verwendung von HMV-Aschen im Erdbau zeigen einerseits gute Verdichtungseigenschaften. Die Langzeituntersuchungen unterstreichen allerdings die Notwendigkeit der Anforderung an die Volumenbeständigkeit.

Die Entscheidung, ob und wie die beschriebenen Materialien im konkreten Fall eingesetzt oder einsetzbar gemacht werden können ist letztlich eine Einzelfallentscheidung. Dem Bauherrn und Planern sollte mit der vorliegenden Auswertung, Zusammenfassung und Interpretation aber ein nützliches Werkzeug für eine erste Abschätzung einiger wichtiger bautechnischer Eigenschaften und Hinweise für Anwendungsbereiche und Grenzen unterschiedlicher Verfahren zur Verwendbarmachung zur Verfügung gestellt werden. Wir hoffen, dass diese Arbeit diesen vorgesehenen Zweck ausreichend erfüllt und so einen Beitrag für die weitere Erhöhung der Recyclingquote leistet.

6 Angaben zum Forschungsprojekt

6.1 Bearbeitung durch die Forschungsnehmer

Die Bearbeitung des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Ressourcenschonung – Massenbaustoffe im Erdbau“ erfolgte in den Jahren 2012 bis 2015 am Zentrum Geotechnik der TU München und an den Hochschulen HTW Dresden und iTN Zittau. Die Erstellung des Berichtes erfolgte größtenteils durch die TU München; die unter Mitarbeit der HTW Dresden und iTN Zittau erstellten Berichtsteile sind im Text gekennzeichnet.

6.2 Studenten-Abschlussarbeiten

Im Zusammenhang mit diesem Forschungsprojekt wurden am ZG TUM folgende Studenten-Abschlussarbeiten durchgeführt:

- Masterarbeit Hr. Aseem Dahal (TU München),
- Masterarbeit Hr. Christopher Karas (TU München),
- Masterarbeit Hr. Stefan Huber (TU München),
- Masterarbeit Hr. Fernando Moldenhauer (TU München),
- Bachelorarbeit Fr. Guanyue Xiong (TU München),
- Bachelorarbeit Fr. Sophia Madeleine Hölderle (TU München),
- Bachelorarbeit Fr. Anthoula Papadopoulou (TU München),
- Bachelorarbeit Hr. Andreas Eder (TU München),
- Bachelorarbeit Fr. Alina Gold (TU München),
- Bachelorarbeit Fr. Julia Puchala (TU München),
- Bachelorarbeit Hr. Konstantin Angelakis (TU München),
- Bachelorarbeit Hr. Ferdinand Maximilian Schülen (TU München).

Die aus diesen Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse wurden in dem vorliegenden Bericht eingearbeitet.

6.3 Erwähnungen

Den nachgenannten Firmen sei an dieser Stelle für ihr Entgegenkommen gedankt:

- Fa. Märker Kalk GmbH,
- Fa. MUEG – Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH,
- Fa. Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG,
- Fa. Deutsche Zincolit GmbH,
- Fa. REMEX Mineralstoff GmbH,
- Fa. MVR Müllverwertung – Rugenberger Damm GmbH & Co. KG,
- Firmengruppe Ettengruber.

Ein großer Dank gilt der Firmengruppe Ettengruber, einem Recyclingunternehmen aus Dachau, die das FE-Projekt im Bereich Materialbeschaffung und auch im Zuge der Großversuche maßgeblich unterstützt hat.

Literatur

- in Pavement Sub-Base Applications. Geotechnical Testing Journal, Vol. 35, No. 5, pp. 743-751
- [6] ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; BO, M. W.; SIVAKUGAN, N. (2012): Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 49, pp. 796-811
- [7] ATV Merkblatt ATV-DVWK-M 362-2, 2004: Umgang mit Baggergut, Teil 2: Fallbeispiele, Stand 2004
- [8] AXELSSON, K.; JOHANSSON, S.-E.; ANDERSSON, R. (2000): Stabilization of Organic Soils by Cement and Puzzolanic Reactions – Feasibility Study (English Translation 2002). Swedish Deep Stabilization Research Centre, Stockholm
- [9] BALLMANN, P.; GOTTWALD, S.; GUTH, K.-H. (1983): Eigenschaften von Boden-Abfallstoffen-Gemischen und Abfallstoff-Bindemittel-Gemischen. Teil 2: Bodenverbesserung mit Braunkohlenflugasche. Hrsg. v. Bundesanstalt für Strassenwesen. Bundesanstalt für Strassenwesen. Köln
- [10] BAUMGÄRTEL, T.; HEYER, D.; VOGT, N. (2009): Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Fb 1020)
- [11] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2005): Leitfaden Anforderungen an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz
- [12] BECQUART, F.; BERNARD, F.; ABRIAK, N.; ZENTAR, R. (2009): Monotonic aspects of the mechanical behaviour of bottom ash from municipal solid waste incineration and its potential use in road construction. Waste Management, Vol. 29, pp. 1320-1329
- [13] BELL, F. G. (1996): Lime stabilization of clay minerals and soils. In: Engineering Geology 42 (4), pp. 223-237
- [1] ADEJUMO, T. E. (2012): Effect of organic Content on Compaction and Consolidation Characteristics of Lagos Organic Clay. In: The Electronic Journal of Geotechnical Engineering Volume 17 (Bundle O), pp. 2201–2211
- [2] ANDRITZ Separation: Internetauftritt der Fa. ANDRITZ Separation (www.andritzgouda.com, abgerufen Mai 2015)
- [3] ARM, M. (2004): Variation on deformation properties of processed MSWI bottom ash: results from triaxial tests. Waste Management, Vol. 24, pp. 1035-1042
- [4] ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; AATHEESAN, T.; BO, M. W. (2011): Geotechnical Properties of Recycled Crushed Brick in Pavement Applications. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 1444-1452
- [5] ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; ALI, M. M. Y.; BO, M. W. (2012): Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregates

- [14] BENEDIX, R. (2011): *Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten*. 5. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
- [15] BIRLE, E. (2012): *Geohydraulische Eigenschaften verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes*. Diss. TU München. Zentrum Geotechnik – Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau
- [16] BIRLE, E.; HEYER, D.; BAUMGÄRTEL, T. (2013): *Erdbautechnische Eigenschaften organogener Böden der Münchner Schotterebene*. Fachtagung Geotechnik & Umwelt an der HTW Dresden, 21.11.2013
- [17] BIRLE, E.; BOSO, M.; HEYER, D. (2010): *Investigation of the water flow in an embankment built of organic soil: Experimental results and large scale field test*, Fifth International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, 6.-8. September 2010, Tagungsband Volume II, pp. 1299-1304
- [18] BLUME, U. (2010): *Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft
- [19] BOLEY, C. (Hrsg.) (2012): *Handbuch Geotechnik. Der Praxisleitfaden für alle am Bau Beteiligten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Praxis)
- [20] BRÜGGEMANN, K.; MORITZ, K. (1979): *Verwendbarkeit von Böden mit organischen Bestandteilen – Abschlussbericht zu F.A. 5.014 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen*
- [21] BUNZ, W. (2002): *Verfahren zur Verbesserung von Hausmüllverbrennungssasche als Straßenbaustoff*. Institute für Straßenwesen und Eisenbahn der Ruhr-Universität Bochum, Bochum
- [22] CANTRÉ, S.; SCHULZ, H. (2011): *Mobile Baggergut-Entwässerung mit geotextilen Schläuchen*. In: *Wasser und Abfall* 13 (3), S. 24-28
- [23] CHANG, F. Y.; WEY, M. Y. (2006): *Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes*. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 138, pp. 594-603
- [24] CHEBET, F.C.; KALUMBA, D. (2015): *Large direct shear testing of sand reinforced with polyethylene (plastic) shopping bag waste material*. *Proceedings of the XVI ECSMGE, Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, Edinburgh, pp. 1383-1388
- [25] *Chemie.de: Allgemeine Suche*. <http://www.chemie.de/>, abgerufen im Mai 2015
- [26] *Chemie.de: Mauermörtel*. <http://www.chemie.de/lexikon/Mauermörtel.html>, abgerufen am 18.08.2015
- [27] CHMIELESKI, J. (2006): *Zwischen Niedermoor und Boden: Pedogenetische Untersuchungen und Klassifikation von mitteleuropäischen Mudden*. Diss. Humboldt-Universität zu Berlin
- [28] COULET, W.; EKKELENKAMP, H.; HUNTER, T. (2014): *Salhouse Spit Restoration with Dredged Sediment in Geotextile Tubes*. In: *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Konstruktion*. Rostock, 10-12 April 2014
- [29] DASH, S. K.; HUSSAIN, M. (2012): *Lime Stabilization of Soils: Reappraisal*. In: *J. MATER. Civ. Eng.* 24 (6), pp. 707-714
- [30] De KIMPE, C. R.; BERNIER-CARDOU, M.; JOLICOEUR, P. (1982): *Compaction and settling of Québec soils in relation to their soil-water properties*. In: *Canadian Journal of Soil Science* 62, pp. 165-175
- [31] DEHOUST, G.; KÜPPERS, P.; GEBHARDT, P.; RHEINBERGER, U.; HERMANN, A. (2008): *Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle-Endbericht*. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes. Öko-Institut e. V. Darmstadt
- [32] DHOWIAN, A. W.; EDIL, T. B. (1980): *Consolidation Behaviour of Peats*. In: *Geotechnical Testing Journal* 3 (3)
- [33] DIALER, K.; ONKEN, U.; LESCHONSKI, K. (1986): *Grundzüge der Verfahrenstechnik und*

- Reaktionstechnik. München: Carl Hanser Verlag
- [34] DIN 18125 – 2 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche
- [35] DIN EN Norm DIN EN 932-2 (1999): Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 2: Verfahren zum Einengen von Laboratoriumsproben
- [36] DIN Norm DIN 18134 (2012): Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch
- [37] DIN-Norm DIN 18122-1, 1997: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
- [38] DIN-Norm DIN 18123, 2011: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung
- [39] DIN-Norm DIN 18124, 2011: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korndichte – Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer
- [40] DIN-Norm DIN 18127 (2012): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Proctorversuch
- [41] DIN-Norm DIN 18130-1 (1998): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmungen des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Teil 1: Laborversuche
- [42] DIN-Norm DIN 18132, 2012: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte – Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens
- [43] DIN-Norm DIN 18136 (2003): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Einaxialer Druckversuch
- [44] DIN-Norm DIN 18137-2 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch
- [45] DIN-Norm DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Beuth Verlag, Berlin
- [46] DIN-Norm DIN EN 14227-4, 2013: Hydraulisch gebundene Gemische – Anforderungen – Teil 4: Flugasche für hydraulisch gebundene Gemische
- [47] EADES J. L.; GRIM, R. E. (1966): A Quick Test to Determine Lime Requirements For Lime Stabilization. In: Highway Research Record (No. 169), pp. 61-72
- [48] EDEN, W.; KOHLER, G.; KOLLAR, J.; KURKOWSKI, H.; RADENBERG, M.; SCHLÜTTER, F.; SLIWA, N. (2010): Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel. Forschungsvereinigung Kalk-Sand e. V., Hannover, Forschungsbericht Nr. 111
- [49] EDIL, T. B. (1997): Construction over peats and organic soils. In: Proceedings of Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering, Kuching, Sarawak, Malaysia, Vol. 1, pp. 85-108
- [50] ENGEL, J. (2002): Berechnungskennwerte feinkörnig-bindiger, gesättigter Böden – Näherungsverfahren. In: Bautechnik 79 (3), S. 167-177
- [51] FGSV-Regelwerk (2004): Merkblatt über Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln
- [52] FGSV-Regelwerk M BomF (2015): Merkblatt über die Verwendung von Boden ohne und mit Fremdbestandteilen im Straßenbau
- [53] FGSV-Regelwerk M HMVA (2005): Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau
- [54] FGSV-Regelwerk M KNP (2009): Merkblatt über die Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten im Straßenbau
- [55] FGSV-Regelwerk M RC (2002): Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau
- [56] FGSV-Regelwerk M TS E (2009): Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau

- [57] FGSV-Regelwerk TL BuB E-StB 09 (2009): Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus
- [58] FGSV-Regelwerk TL Gestein-StB 04 (2004): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
- [59] FGSV-Regelwerk TL SoB-StB 04 (2004): Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
- [60] FGSV-Regelwerk TP BF-StB Teil B 7.1 (2012): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio)
- [61] FGSV-Regelwerk TP BF-StB Frosthebungsversuch (Entwurf 2009): Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau – Frosthebungsversuch –, Entwurf im Rahmen des Projektes 05.321/S2 „Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten, Stand 2009
- [62] FGSV-Regelwerk TP BF-StB Teil B 3.3 (1988): Bestimmung der Korndichte mit dem Luftpyknometer, Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau
- [63] FGSV-Regelwerk TP BF-StB Teil B 8.3 (2012): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – Dynamischer Plattendruckversuch mit dem leichten Fallgewichtsgesetz
- [64] FGSV-Regelwerk TP BF-StB Teil B11.3 (2010): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Eignungsprüfung bei Bodenverbesserungen mit Bindemitteln
- [65] FGSV-Regelwerk TP Gestein-StB Teil 3.1.4 (2008): Stoffliche Kennzeichnungen von Hausmüllverbrennungsasche (HMV-Asche)
- [66] FGSV-Regelwerk TP Gestein-StB Teil 3.1.5 (2012): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Stoffliche Kennzeichnung von groben rezyklierten Gesteinskörnungen
- [67] FGSV-Regelwerk ZTV E-StB 09 (2009): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau
- [68] FGSV-Regelwerk TP BF-StB Teil E 4 (2003): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – Kalibrierung eines indirekten Prüfmerkmals mit einem direkten Prüfmerkmal
- [69] FLOSS, R. (1973): Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Auswahl und Dimensionierung von Straßenbefestigungen. In: Straße und Autobahn (1/1973), S. 17-26
- [70] FORTEZA, R.; FAR, M.; SEQUI, C.; CERDA, V. (2004): Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base. Waste Management, Vol. 24, pp. 899-909
- [71] Fottweg Separation Technology: Internetauftritt der Fa. Flottweg (www.flottweg.com/de/produktlinien/dekanter, abgerufen im Mai 2015)
- [72] FRANKLIN, A. G.; OROZCO, L. F.; SEMRAU, R. (1973): Compaction and Strength of Slightly Organic Soils. In: Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division Vol. 99 (SM 7), pp. 541-557
- [73] GAFFNEY, D. A.; MARTIN, S. M.; MAHER, M. H.; BENNERT, T. A. (1999): Dewatering contaminated, feine-grained material using geotextiles. Technical Note SM-500. SI Geosolutions
- [74] GE, Y. L.; ROSENBLAD, B. L.; STEPHENSON, R. W. (2013): Use of Coal Fly Ash and Other Waste Products in Soil Stabilization Including Non-Destructive Testing of Roadways. Final Report Prepared for Missouri Department of Transportation (Project TRyy1109, Report cmr 13-006). Missouri University of Science and Technology
- [75] GEIßLER, H.; WILKE, M.; RÖLLICH, U. (2014): Rehabilitation of Water Bodies by Beneficial Re-Use of the Sediments in Geotextile Tubes. In: Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction. Rostock, 10-12 April 2014
- [76] GOMEZ-SOBERON, J. M. V. (2002): Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate – An experimental study. Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 8, pp. 1301-1311

- [77] HANNA, A. M.; MEYERHOF, G. G. (1980): Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay. In: Canadian Geotechnical Journal 17 (2), pp. 300-303
- [78] HEIM, D. (1990): Tone und Tonminerale. Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. Stuttgart: F. Enke
- [79] HENZINGER, C.; BARKA, E.; BIRLE, E.; HEYER, D. (2015): Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% bzw. Massen-%-Grenzen bei Bodenmaterial. Forschungsbericht zu FE-Nr. 05.0183/2013/CGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, noch nicht veröffentlicht
- [80] HENZINGER, C.; HEYER, D. (2014): Parameters Influencing the Applicability of Lignite Fly Ash in Soil Improvement. In: Proceedings of the EUROCOALASH, Munich, 14. – 15. October 2014
- [81] HENZINGER, C.; HEYER, D. (2015): Use of demolition waste in soil improvement. In: Proceedings of the XVI ECSMGE 2015, 13-17 September 2015 in Edinburgh, Scotland, UK
- [82] HESS, P. (1991): Maschinen und Apparate zur Fest/Flüssig-Trennung. Essen: Vulkan-Verlag
- [83] HEYER, D.; BIRLE, E.; BAUMGÄRTEL, T.; BLOMEYER, H.; SCHÖNHOFER, F. (2012): Effizienter und umweltverträglicher Umgang mit dem Baustoff Boden am Beispiel arsenhaltiger Böden bei der geplanten Erweiterung des Flughafens München, 32. Baugrundtagung in Mainz vom 26.09. – 29.09.2012
- [84] INQUIERDO, M.; VAZQUEZ, E.; QUEROL, X.; BARRA, M.; LOPEZ, A.; PLANA, F. (2001): Use of bottom ash from municipal solid waste incineration as a road material. International Ash Utilization Symposium, Center of Applied Energy Research, University of Kentucky
- [85] ISMAIEL, H. A. H. (2006): Treatment and Improvement of the Geotechnical Properties of Different Soft Fine-Grained Soils Using Chemical Stabilization. Diss. Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- [86] JANZ, M.; JOHANSSON, S.-E. (2002): The Function of Different Binding Agents in Deep Stabilization. Report 9. Swedish Deep Stabilization Research Centre
- [87] JASMUND, K.; LAGALY, G. (Hrsg.) (1993): Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendungen, und Einsatz in Industrie und Umwelt. Darmstadt: Steinkopff
- [88] JESSBERGER, H. L. (1967): Grundlagen und Anwendung der Bodenstabilisierung. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH
- [89] KÉZDI, Á. (1964): Bodenmechanik. Band 2. Berlin, Budapest: VEB Verlag für Bauwesen; Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften
- [90] KÉZDI, A. (1969): Handbuch der Bodenmechanik. Band I. Bodenphysik. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen
- [91] KÉZDI, Á. (1973): Stabilisierte Erdstraßen. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen
- [92] KLUTZ H. J.; MOSER, C.; BLOCK, D. (2010): Stand der Entwicklung der WTA-Wirbelschichttrocknung für Braunkohle bei der RWE Power AG. Beitrag aus: Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Band 2, Oktober 2010 (<http://www.rwe.com>, abgerufen im Mai 2015)
- [93] KNOBLAUCH, H.; SCHNEIDER, U. (2001): Bauchemie. 5. Auflage. Düsseldorf: Werner
- [94] KOERNER, G.; KOERNER, R. (2006): Geotextile tube assessment using a hanging bag test. In: Geotextiles and Geomembranes 24 (2), pp. 129-137
- [95] KOLIAS, S.; KASSELOURI-RIGOPOULOU, V.; KARAHALIOS, A. (2005): Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. In: Cement and Concrete Composites 27 (2), pp. 301-313
- [96] KRASS, K.; KOLLAR, J. (2004): Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn

- [97] LESHCHINSKY, D.; LESHCHINSKY, O.; LING, H. I.; GILBERT, P. A. (1996): Geosynthetic Tubes for Confining Pressurized Slurry: Some Design Aspects. In: *Journal of Geotechnical Engineering* 122 (8), pp. 682-690
- [98] LINEMANN, K. (Hrsg.) (1966): *Erdstabilisierung in Theorie und Praxis*. Berlin: Verlag für Bauwesen
- [99] LOTTMANN, A. (2003): *Tragfähigkeit und Frostempfindlichkeit von kalkbehandelten bindigen Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen*. Diss. Technische Universität Cottbus, Cottbus. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung
- [100] MACKIEWICZ, S. M.; FERGUSON, E. G. (2005): *Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes*. 2005 World of Coal Ash (WOCA), April 11-15, 2005, Lexington, Kentucky, USA
- [101] MALKAWI, A. I. H.; ALAWNEH, A. S.; ABU-SAFAQAH, O. T. (1999): Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. In: *Applied Clay Science* 14 (5-6), pp. 257-278
- [102] MEIHORST, W. (1963): *Über die Stabilisierung bindiger Böden mit Kalk*. Diss. Technische Hochschule Hannover, Hannover
- [103] Merkblatt DWA-M 362-1 (2008): *Umgang mit Baggergut, Teil 1: Handlungsempfehlungen*
- [104] MESRI, G.; CASTRO, A. (1987): C_{α}/C_c Concept and K_0 During Secondary Compression. In: *Journal of Geotechnical Engineering* (3), pp. 230-247
- [105] MESRI, G.; GODLEWSKI, P. M. (1977): Time and Stress-Compressibility Interrelationship. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp. 417-430
- [106] MESTERS, K.; GLÄSEKER, W.; DEHOUST, G. (2009): *Wissenschaftliche Studie zu Verwertungsmöglichkeiten von HMV-Schlacke des Hanseatischen Schlackenkotors im Straßen- und Erdbau unter Berücksichtigung bau- und umwelttechnischer Aspekte*. FE 0910164 im Auftrag des HSK – Hanseatisches Schlackenkotors GmbH. KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik. Bochum
- [107] MEYERHOF, G. G. (1951): The ultimate bearing capacity of foundations. *Géotechnique*, 2, pp. 301-332
- [108] MEYERHOF, G. G. (1963): Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, pp. 16-31
- [109] MEYERHOF, G. G. (1974): Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 223-229
- [110] MIERTSCHINK, R.; BUNZEL, M. (2009): Bodenaufbereitung beim suspensionsgestützten maschinellen Tunnelbau. In: *Bauportal* 121 (12), S. 712-714
- [111] MIFKA, K.; THELEN, D. (2008): Verbesserung bindiger Böden mit Betonrecycling – Fallbeispiel einer Großbaumaßnahme bei Koblenz. In: *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.): Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau. Vorträge zur Erd- und Grundbautagung 2007 (FGSV C 10)*, Köln, Band 10
- [112] MISRA, A.; BISWAS, D.; UPADHYAYA, S. (2005): Physico-mechanical behaviour of self-cementing class C fly ash-clay mixtures. In: *Fuel* 84 (11), pp. 1410-1422
- [113] MITCHELL, J. K.; SOGA K. (2005): *Fundamentals of soil behaviour*. 3. edition Hoboken, N. J.: John Wiley & Sons
- [114] MOO-YOUNG, H. K.; GAFFNEY, D. A.; MO, X. (2002): Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes. In: *Geotextiles and Geomembranes* 20 (5), pp. 289-303
- [115] MUHUNTHAN, B.; TAHA, R.; SAID, J. (2004): Geotechnical Engineering Properties of Incinerator Ash Mixes. *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 54, No. 8, pp. 985-991
- [116] MUTHUKUMARAN, A.; ILAMPARUTHI, K. (2006): Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. In: *Geotextiles and Geomembranes* 24 (4), pp. 210-219

- [117] NALBANTOĞLU, Z. (2004): Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer. In: *Construction and Building Materials* 18 (6), pp. 377-381
- [118] O'MAHONY, M. M. (1990): *Recycling of Materials in Civil Engineering*. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Oxford
- [119] OSTERMAYER, H. (1976): *Das Verhalten gemischtkörniger Böden im einachsigen Formänderungszustand*. Mitteilungen aus dem Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität München. Diss. Technische Universität München, München
- [120] OTT, E. (2001): *Zum bodenmechanischen Verhalten von Abfallrostschlacken* (Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel, Heft 11)
- [121] PARK, T. (2003): *Application of Construction and Building Debris as Base and Subbase Materials in Rigid Pavement*. *Journal of Transport Engineering*, Vol. 129, pp. 558-563
- [122] PLACZEK, D. (1987): *Mögliche Alternative für den Einbau nasser bindiger Böden*. In: *Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau TIS* (10/87), S. 600-606
- [123] POON, C. S.; CHAN, D. (2006): *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road subbase*. *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 8, pp. 578-585
- [124] PRANDTL, L. (1920): *Über die Härte Plastischer Körper*. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* 74
- [125] RATHJE, E.; RAUCH, A.; TREJO, D.; FOLLIARD, K.; VIYANANT, C.; ESFELLAR, M.; JAIN, A.; OGALLA, M. (2006): *Evaluation of crushed concrete and recycled asphalt pavement as backfill for mechanically stabilized earth walls*. Texas Department of Transport, Center of Transport Research, University of Texas at Austin
- [126] RIZKALLAH, V.; BLÜMEL, W. (1995): *Geotechnische Aspekte bei der Deponierung von Elbschlick*. In: *HANSA* 132 (10), S. 123-129
- [127] ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. (2000): *Lime Requirement for Stabilization*. In: *Transportation Research Record* 1721 (1), pp. 9-18
- [128] SAATHOFF, F.; OUMERACI, H.; RESTALL, S. (2007): *Australian and German experiences on the use of geotextile containers*. In: *Geotextiles and Geomembranes* 25 (4-5), pp. 251-263
- [129] SCHADE, H. W. (2006): *Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Mischbindemitteln zur Bodenbehandlung*. Bonn: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Fb 0939)
- [130] SCHANZ, T.; VERMEER, P. A.; BONNIER, P. G. (1999): *The hardening soil model: Formulation and verification*; Proceedings of the International Symposium "Beyond 2000 in Computational Geotechnics", Amsterdam, pp. 281-296
- [131] SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL P. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Unter Mitarbeit von H.-P. Blume;, G. W. Brümmer; R., E. Kandeler; I. Kögel-Knabner; R. Kretzschmar; K. Stahr; B.-M. Wilke. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag
- [132] SCHOENBERGER, R.; FUNGAROLLI, A. (1971): *Incenerator-Residue – Fill site Investigation*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 97, pp. 1431-1443
- [133] SCHÖNHERR, R. M. (kein Datum). *Intenet-auftritt Dr.-Ing. Michael Schönherr* (www.drying.de/, abgerufen Mai 2015)
- [134] SCHULTZE, E.; MUHS, H. (1967): *Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten*. 2. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag
- [135] SCHWABBAUR, T.; HEYER, D. (2002): *Verwertung von Rostschlacken aus der thermischen Abfallbehandlung im Rahmen von Bauvorhaben: Geotechnische und umweltrelevante Eigenschaften des Schlackekörpers unter den in der Verwertungspraxis gängigen Einbaubedingungen*. FuE-Vorhaben, München, unveröffentlicht

- [136] SEZER, A.; İNAN, G.; YILMAZ, H. R.; RAMYAR, K. (2006): Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. In: *Building and Environment* 41 (2), pp. 150-155
- [137] SHINDE, M. N.; ILAMPARUTHI, K. (2010): Performance of Geotextiles in Dewatering High Water Content Sludges. In: *Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz*
- [138] SOANE, B. D. (1990): The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. In: *Soil and Tillage Research* 16 (1-2), pp. 179-201
- [139] SOOS, P. von (1980): Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor. In: Ulrich SMOLTCZYK (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch Teil 1*. 3. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn
- [140] SOOS, P. von (1990): Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor. In: U. SMOLTCZYK (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch. Teil 1*. 4. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn
- [141] SOOS, P. von; ENGEL, J. (2008): Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor. In: K. J. WITT (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch*. 7. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn
- [142] STELA: Internetauftritt der Fa. Stela (www.stela.de, abgerufen Mai 2015)
- [143] STEUERNAGEL, J. (2008): Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen (Schriftenreihe Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Technische Universität Darmstadt, Heft D 17)
- [144] TAHERKHANI, H.; POUR, F. (2014): Investigating the viability of using Recycled Aggregates in Unbound Base Layer. *MAGNT Research Report*, Vol. 2, No. 4, pp. 124-135
- [145] TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. (2007): Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 4, pp. 879-886
- [146] TASTAN, E. O.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; AYDILEK, A. H. (2011): Stabilization of Organic Soils with Fly Ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 9: pp. 819-833
- [147] TAY, J.; GOH, A. (1991): Engineering Properties of Incinerator Residue. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 117, No. 2, pp. 224-235
- [148] TERZAGHI, K. (1943): *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley and Sons
- [149] TERZAGHI, K.; JELINEK, R. (1954): *Theoretische Bodenmechanik*. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag
- [150] THIENEL, K.-Chr. (2013): *Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens. Chemie und Eigenschaften mineralischer Baustoffe und Bindemittel. Skript Frühjahrstrimester 2013*. Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr, München
- [151] THIYYAKKANDI, S.; ANNEX, S. (2011): Effect of Organic Content on Geotechnical Properties of Kuttanad Clay. In: *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering Volume 16 (Bundle U)*, pp. 1653-1663.
- [152] THOMPSON, J. D.; BASHFORD, H. H. (2012): Concrete Recycling and Utilization of Recycled Concrete: An Investigation of the Barriers and Drivers within the Phoenix Metropolitan Area. In: H. CAI; A. KANDIL; M. HASTAK; P. S. DUNSTON (eds.): *Construction Research Congress 2012. Construction challenges in a flat world: proceedings of the 2012 Construction Research Congress, May 21-23, 2012, West Lafayette, Indiana*. Reston, Va: American Society of Civil Engineers, pp. 1682-1688.
- [153] TIMONEY, M. J.; McCABE, B. A.; BELL, A. L. (2012): Experiences of dry soil mixing in highly organic soils. In: *Proceedings of the ICE – Ground Improvement 165 (1)*, pp. 3-14.
- [154] TREMBLAY, H.; DUCHESNE, J.; LOCAT, J. LEROUÉIL, S. (2002): Influence of the nature of organic compounds on fine soil

- stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, No. 3: pp. 535-546
- [155] VEGAS, I.; IBANEZ, J. A.; SAN JOSE, J. T.; URZELAI, A. (2008): Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction. *Waste Management*, Vol. 28, pp. 565-574
- [156] VERMEER, P. A.; NEHER, H. P. (1999): A soft soil model that accounts for creep; Proceedings of the International Symposium "Beyond 2000 in Computational Geotechnics", Amsterdam, pp. 249-261, 1999
- [157] VESIC, A. S. (1975): Bearing capacity of shallow foundations. In: *Foundation engineering handbook*, H. F. WINTERKORN and H.-Y. FANG (eds.), New York: Van Nostrand-Reinhold, pp. 121-147
- [158] VOSS, R.; FLOSS, R. (1968): *Die Bodenverdichtung im Straßenbau*. 5., erg. u. verb. Aufl. Düsseldorf: Werner
- [159] VUKIĆEVIĆ M.; MARAŠ-DRAGOJEVIĆ S.; JOCKOVIĆ S.; MARJANOVIĆ M.; PUJEVIĆ V. (2013): Research Results of Fine-Grained Soil Stabilization Using Fly Ash from Serbian Electric Power Plants. In: *ISSMGE – Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013, pp. 3267-3270
- [160] WEIGAND, H.; MARB, C. M. (2009): Testfelduntersuchungen zum Verhalten stabiliertes Abfälle unter Deponiebedingungen. In: *Deponieseminar 2009 – Aktuelles zur künftigen Ablagerung*, Fachtagung des LfU am 15.10.2009
- [161] WENG, M.; LIN C.; HO, C. (2010): Mechanical Properties of incineration bottom ash: The influence of composite species. *Waste Management*, Vol. 30, pp. 1303-1309
- [162] WHITE, D. J.; HARRINGTON, D. S.; ZACH, T. (2005): *Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils*, Volume I: Engineering Properties and Construction Guidelines. Final Report (IHRB Project TR-461; FHWA Project 4). Center for Transportation Research and Education Iowa State University
- [163] WILKE, M.; HANGEN, H. (2011): Geotextile Container und Schläuche zur Entwässerung von Schlämmen: Funktionsprinzip – Abdichtungsmaßnahmen – Anwendungsmöglichkeiten. In: 27. Fachtagung „Die sichere Deponie 2011 – Abdichtung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“
- [164] WINTERKORN, H. F.; AICHHORN, W. (1960): *Grundlagen der Bodenstabilisierung im Straßen- und Wegebau*. Wien: Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen
- [165] WITT, K. J. (2002): Zement – Kalk – Stabilisierung von Böden. In: T. SCHANZ und K. J. WITT (Hrsg.): *Geotechnikseminar Weimar 2002. Geotechnik im Verkehrswegebau* (Schriftenreihe Geotechnik, Heft 07), S. 1-12
- [166] WITT, K. J. (2012): Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Binemitteln. 8. Erdbaufachtagung "Baugrundverbesserung und -verdichtung – Verfahren, Methoden, Materialien, Prüfungen". Bauakademie Sachsen. Leipzig, 10.02.2012
- [167] WORTELBOER, R. J. M. (2014): Beneficial Use of Dredged Sediments Using Geotextile Tube Technology. In: *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*. Rostock, 10-12 April 2014
- [168] YUNUS, M. N. Z.; WANATOWSKI, D.; STACE, L. R. (2013): Lime stabilization of Organic Clay and the Effects of Humic Acid Content. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol. 44, No. 1: pp. 19-25
- [169] ZEKKOS, D.; KABALAN, M.; SYAL, S. M.; HAMBRIGHT, M.; SAHADEWA, A. (2013): Geotechnical characterization of a Municipal Solid Waste Incineration Ash. *Waste Management*, No. 33, pp. 1442-1450
- [170] Zentrum Geotechnik der TU München (2010): *Geotechnische gutachtliche Stellungnahme zu den geplanten Geländeaufschüttungen mit Empfehlungen zur Bauausführung*, F&E-Vorhaben: Grundbautechnische Untersuchungen und umweltgerechte

Verwendung von organischen Böden in Geländeaufschüttungen, Planfeststellungsverfahren 3. Start- und Landebahn, Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt, 16.08.2010, unveröffentlicht.

- [171] Zentrum Geotechnik der TU München (2010): Grundbautechnische Untersuchungen und umweltgerechte Verwendung von organischen Böden in Geländeaufschüttungen, Schlussbericht zum F&E-Vorhaben mit Datum vom 11.08.2010, unveröffentlicht.

Bilder

- Bild 1: Untersuchungskonzept zur Verwendung organogener Böden bzw. von Böden mit organischen Anteilen im Erdbau
- Bild 2: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Proctorwassergehalt nach BIRLE et al. [16]
- Bild 3: Verbesserung von Böden mit organischen Anteilen nach BIRLE et al. [16]
- Bild 4: Untersuchte Böden im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196
- Bild 5: Sieblinien der natürlichen Böden
- Bild 6: Zusammenhang zwischen Glühverlust und optimalem Wassergehalt mit den Werten von BIRLE et al. [16]
- Bild 7: Zusammenhang zwischen dem Produkt aus Feinkornanteil ($< 0,06$ mm) und Ausrollgrenze (bestimmt am Anteil $< 0,4$ mm) zum optimalen Verdichtungswassergehalt für Boden mit organischen Anteilen
- Bild 8: Zusammenhang zwischen organischem Anteil und optimalem Verdichtungswassergehalt (beide Werte ermittelt nach unterschiedlichen Verfahren)
- Bild 9: Boden NiSt, verbessert mit 10 M.-% WFK
- Bild 10: Boden NiSt, verbessert mit 20 M.-% BFA
- Bild 11: Vergleich der Steifigkeiten der Böden mit organischen Anteilen im Proctoroptimum
- Bild 12: Vergleich der Kriechbeiwerte der ungesättigten Böden mit organischen Anteilen im Proctoroptimum (nach 1 Tag)
- Bild 13: Vergleich der Kriechbeiwerte der gesättigten Böden mit organischen Anteilen im Proctoroptimum (nach 1 Tag)
- Bild 14: Vergleich der Zusammendrückung der Böden mit organischen Anteilen im Proctoroptimum (nach 1 Tag)
- Bild 15: Einbaubedingungen für Oedometerversuche am Boden NiSt + 10 M.-% WFK
- Bild 16: Einbaubedingungen für Oedometerversuche am Boden NiSt + 20 M.-% BFA

- Bild 17: Steifemoduln für Boden NiSt mit und ohne Behandlung mit 10 M.-% WFK (Einbaubedingung EB 1 und EB 2)
- Bild 18: Kriechbeiwerte für Boden NiSt mit und ohne Behandlung mit 10 M.-% WFK (Einbaubedingung EB 1 und EB 2)
- Bild 19: Steifemoduln für Boden NiSt mit und ohne Behandlung mit 20 M.-% BFA (Einbaubedingung EB 1 und EB 2)
- Bild 20: Kriechbeiwerte für Boden NiSt mit und ohne Behandlung mit 20 M.-% BFA (Einbaubedingung EB 1 und EB 2)
- Bild 21: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden MuJä bei EB 1
- Bild 22: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden MuJä bei EB 3
- Bild 23: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden MuJä bei EB 2
- Bild 24: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden KIBu1 bei EB 1
- Bild 25: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden KIBu2 bei EB 1
- Bild 26: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden BoSc bei EB 1
- Bild 27: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden BoGr
- Bild 28: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden NiSt bei EB 1
- Bild 29: Einbaubedingungen und Spannungspfade zur Bestimmung der dränierten Scherparameter im Triaxversuch-CU am Boden NiSt bei EB 2
- Bild 30: Einaxiale Druckversuche; Einbaubedingung und Ergebnisse des mit WFK behandelten Boden NiSt
- Bild 31: Einaxiale Druckversuche; Einbaubedingung und Ergebnisse des mit BFA behandelten Boden NiSt
- Bild 32: Untersuchungskonzept zur Verwendung von zu nassen, fein- und gemischtkörnigen Böden geringer Konsistenz im Erdbau
- Bild 33: Typische Proctorkurven unterschiedlicher Böden nach VOSS & FLOSS [158] und SOOS [139] (aus BAUMGÄRTEL et al. [10])
- Bild 34: Zusammenhang Plastizitätsgrenzen/ Proctorkennwerte (aus SOOS [140])
- Bild 35: Typische CBR-Kurven (aus KÉZDI [89])
- Bild 36: Begriffsbestimmungen nach ZTV E-StB (aus ZTV E-StB 09 [67])
- Bild 37: Konsistenzbalken (aus BOLEY [19])
- Bild 38: Schnitt durch eine Sandwichbauweise (aus PLACZEK [122])
- Bild 39: Gefüllter Geotextil-Container (aus WILKE & HANGEN [163])
- Bild 40: Änderung des Verdichtungsverhaltens durch Zugabe von ungelöschtem Kalk
- Bild 41: Wassergehaltsreduzierung durch Zugabe von ungelöschtem Kalk aus Versuchen von SCHADE [129]
- Bild 42: Wassergehaltsreduzierung durch Zugabe von ungelöschtem Kalk aus Versuchen von SCHADE [129]
- Bild 43: Änderung der Konsistenzgrenzen bei Kalkzugabe; links Schluff, rechts Ton (aus JESSBERGER [88])
- Bild 44: Änderung des Verdichtungsverhaltens durch Zugabe von Braunkohlenflugasche (ohne Reaktionszeit)

- Bild 45: Charakterisierung von Bindemitteln (aus THIENEL [150])
- Bild 46: Aufbau der Sandwichbauweise
- Bild 47: Befahrbarkeit am Rand der Tragschicht
- Bild 48: Befahrbarkeit am Rand der Tragschicht (T1); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln
- Bild 49: Befahrbarkeit am Rand der Tragschicht (T2); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln
- Bild 50: Befahrbarkeit auf flächiger Tragschicht
- Bild 51: Befahrbarkeit auf flächiger Tragschicht (T1); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln
- Bild 52: Befahrbarkeit auf flächiger Tragschicht (T2); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln
- Bild 53: Aufbau der Folgeschicht (unten)
- Bild 54: Aufbau der Folgeschicht (unten; T1); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln (blauer Bereich = Versagen durch Eigengewicht der neuen Schicht)
- Bild 55: Aufbau der Folgeschicht (unten; T2); Zulässige Belastungen aus den analytischen Formeln (blauer Bereich = Versagen durch Eigengewicht der neuen Schicht)
- Bild 56: Aufbau der Folgeschicht (oben)
- Bild 57: Aufbau der Folgeschicht (oben; T1); Zulässige Belastungen aus den FE-Berechnungen und analytischen Formeln (blauer Bereich = Versagen durch Eigengewicht der neuen Schicht)
- Bild 58: Aufbau der Folgeschicht (oben; T2); Zulässige Belastungen aus den FE-Berechnungen und analytischen Formeln (blauer Bereich = Versagen durch Eigengewicht der neuen Schicht)
- Bild 59: Untersuchung der Gesamtstandsicherheit der beispielhaften Sandwich/Kassettenbauweise
- Bild 60: Sieblinienbänder der Ausgangsböden
- Bild 61: Ausgangsböden im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196
- Bild 62: Verdichtungs- und Tragfähigkeitseigenschaften (CBR) der Ausgangsböden
- Bild 63: Schwellversuche (7-tägige Wasserlagerung) der Ausgangsböden im CBR-Topf
- Bild 64: Kornverteilung der Braunkohlenflugasche
- Bild 65: Sieblinien der Recyclingmaterialien
- Bild 66: Knetmischer (Hersteller Fa. REGO)
- Bild 67: Kutter (Hersteller Fa. Eduard Müller)
- Bild 68: Verdichtung und Tragfähigkeit; Boden TA, TL, ST* und GU* mit WFK (Mischung im Knetmischer)
- Bild 69: Verdichtungskurven; Boden TA, TL, ST* und GU* mit BFA (Mischung im Knetmischer)
- Bild 70: Proctorkurven bei Mischung mit Knetmischer bzw. Kutter und 24 Stunden Reaktionszeit (Boden TL + 20 M.-% BFA)
- Bild 71: Rechnerische Sieblinie der Mischungen aus Boden TL und RC-Mix 0/32 mm und 0/4 mm
- Bild 72: Verdichtungskurven; Boden TA und TL mit RC-Mix 0/4 und 0/32 mm
- Bild 73: Δ CBR-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit WFK
- Bild 74: Δ CBR-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit BFA
- Bild 75: Δ CBR-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit RC-Mix 0/4 und 0/32
- Bild 76: Durchlässigkeits-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit WFK
- Bild 77: Durchlässigkeits-Werte; Böden TA, TL, ST* und GU* mit BFA
- Bild 78: Durchlässigkeits-Werte; Böden TA und TL mit RC-Mix 0/4 und 0/32
- Bild 79: Prüfzylinder mit Einbauhilfe, gelochter Grundplatte und Filterpapier
- Bild 80: Frosthebungstischgerät FHT W5/DM
- Bild 81: Maximale Frosthebung und verbleibende Resthebung; links für TL mit WFK, rechts für TL mit BFA

- Bild 82: Frosthebungsgeschwindigkeit der verbesserten Böden; links für TL mit WFK, rechts für TL mit BFA
- Bild 83: Entwicklung der maximalen Frosthebung, der verbleibenden Resthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zugabemenge des Baustoffes RC-Mix 0/4
- Bild 84: Dynamisches Schermodul des verbesserten Bodens TL in Abhängigkeit von der Scherdehnungsamplitude
- Bild 85: Korndichten am leicht plastischen Ton (TL) mit BFA bzw. WFK
- Bild 86: Die Fräse CAT RM500 beim durchgeführten Großversuch (Versuch 1); Bewegung von links nach rechts
- Bild 87: Aufbau des Schichtpaketes vor dem Fräsdurchgang für beide Versuche (Versuch 1 und Versuch 2)
- Bild 88: Versuchsboden im Plastizitätsdiagramm und Sieblinien der Materialien
- Bild 89: Das Ergebnis der Fräsung im Versuch 1 nach 1 und 2 Fräsdurchgängen
- Bild 90: Verdichtung des gefrästen Schichtpaketes
- Bild 91: Verdichtungskurve des verbesserten Bodens und erreichte Verdichtung im Großversuch
- Bild 92: Versuchsraster zu Versuch 1 der Großversuche zur Bodenverbesserung um RC-Mix 0/8 mm
- Bild 93: Wasserzugabe zum leicht plastischen Ton und Einfräsen des zugegebenen Wassers mit 2 Fräsdurchgängen
- Bild 94: Das Ergebnis der Fräsung im Versuch 2 nach 1 Fräsdurchgang
- Bild 95: Verdichtungskurve des verbesserten Bodens und erreichte Verdichtung im Großversuch
- Bild 96: Versuchsraster zu Versuch 2 der Großversuche zur Bodenverbesserung um RC-Mix 0/8 mm
- Bild 97: Laborzentrifuge: Fa. Hettich, Typ Rotina 380R
- Bild 98: Entwässerung durch Zentrifugation Boden TL mit Anfangswassergehalt 37% (Versuchsreihe 2)
- Bild 99: Mobile Versuchsanlage mit Flottweg Dekanter
- Bild 100: Grafische Darstellung der Wassergehalte nach Zentrifugation mittels Dekanter in Abhängigkeit vom Ausgangswassergehalt für den TL
- Bild 101: Grafische Darstellung der Wassergehalte nach Zentrifugation mittels Dekanter in Abhängigkeit vom Ausgangswassergehalt für den TA
- Bild 102: Behälter mit Feststoffaustrag Boden TL
- Bild 103: Behälter mit Feststoffaustrag Boden TA
- Bild 104: Zeitabhängige Darstellung des Volumensstroms für den Boden TA mit unterschiedlichen Ausgangswassergehalten
- Bild 105: Zeitabhängige Darstellung des Volumensstroms für den Boden TL mit unterschiedlichen Ausgangswassergehalten
- Bild 106: Zeitverlauf Wassergehaltsreduzierung durch thermische Trocknung in der Halle für die Böden TL und TA als Anschluss-trocknung
- Bild 107: Zeitverlauf Wassergehaltsreduzierung durch thermische Trocknung im Trockenschrank für den TA unter verschiedenen Bedingungen
- Bild 108: Schalen mit Bodenproben nach der Trocknung ohne (Bild links) und mit Auflockern (Bild rechts)
- Bild 109: Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines ausgeprägt plastischen Tones (Ausgangsboden TA)
- Bild 110: Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines leicht plastischen Tones (Ausgangsboden TL)
- Bild 111: Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines Sand-Ton-Gemisches (Ausgangsboden ST*)

- Bild 112: Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines Kies-Schluff-Gemisches (Ausgangsboden GU*)
- Bild 113: Untersuchungskonzept zur Verwendung von Sekundärbaustoffen im Erdbau
- Bild 114: Sieblinienbänder der RC-Beton 0/4 und RC-Beton 0/32
- Bild 115: Sieblinienbänder der Vorabsiebmaterialien aus RC-Mix
- Bild 116: Stoffliche Zusammensetzung des RC-Mix bestimmt an der Fraktion 4/32
- Bild 117: Korngrößenverteilung der Mischungen aus RC-Beton und RC-Ziegel jeweils in den Korngrößen 0/4 und 0/32 mm
- Bild 118: Korngrößenverteilung der verwendeten Böden
- Bild 119: Plastizitätsdiagramm für den feinkörnigen Boden
- Bild 120: Verwendete Fremdstoffe: a) Holzspäne, b) Polystyrolschaumkugeln, c) Kunststoffgranulat
- Bild 121: Proctortopf bestehend aus Zylinder, Aufsatzring, Grundplatte und Einsatzscheibe [60]
- Bild 122: Versuchsaufbau für die Bestimmung des CBR-Werts [60]
- Bild 123: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/4
- Bild 124: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/32
- Bild 125: Proctorkurve und CBR-Werte für den Bauschutt RC-Mix 0/4
- Bild 126: Proctorkurve und CBR-Werte für den Bauschutt RC-Mix 0/32
- Bild 127: Proctorkurve und CBR-Werte für die Mischung aus RC-Beton und RC-Ziegel 0/4
- Bild 128: Proctorkurve und CBR-Werte für die Mischung aus RC-Beton und RC-Ziegel 0/32
- Bild 129: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/4 (RCB04) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCB04TL)
- Bild 130: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/32 (RCB032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% GW (RCB032GW)
- Bild 131: Proctorkurve und CBR-Werte für das RC-Mix 0/4 (RCM04) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCM04TL)
- Bild 132: Proctorkurve und CBR-Werte für das RC-Mix 0/32 (RCM032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% GW (RCM032GW)
- Bild 133: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton+Ziegel 0/4 (RCBZ04) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCBZ04TL)
- Bild 134: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton+Ziegel 0/32 (RCBZ032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% GW (RCBZ032GW)
- Bild 135: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton 0/32 (RCB032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCB032TL)
- Bild 136: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Mix 0/32 (RCM032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% TL (RCM032TL)
- Bild 137: Proctorkurve und CBR-Werte für den RC-Beton+Ziegel 0/32 (RCBZ032) und die entsprechende Mischung mit 30 M.-% GW (RCBZ032TL)
- Bild 138: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für RC-Beton 0/4 und RC-Beton 0/32
- Bild 139: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für RC-Mix 0/4 und RC-Mix 0/32
- Bild 140: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für RC-Beton+RC-Ziegel 0/4 und RC-Beton+RC-Ziegel 0/32

- Bild 141: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für die Mischungen aus RC-Beton mit 30 % Boden: RCB04TL, RCB032GW und RCB032TL
- Bild 142: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für die Mischungen aus RC-Mix mit 30 % Boden: RCM04TL, RCM032GW und RCM032TL
- Bild 143: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für die Mischungen aus RC-Beton+RC-Ziegel mit 30 % Boden: RCBZ04TL, RCBZ032GW und RCBZ032TL
- Bild 144: Einbaubedingungen und Spannungspfade der dränierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCB04
- Bild 145: Einbaubedingungen und Spannungspfade der dränierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCB032
- Bild 146: Einbaubedingungen und Spannungspfade der dränierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCB04TL
- Bild 147: Einbaubedingungen und Spannungspfade der dränierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCB032TL
- Bild 148: Einbaubedingungen und Spannungspfade der dränierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCM04
- Bild 149: Einbaubedingungen und Spannungspfade der dränierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCM032
- Bild 150: Einbaubedingungen und Spannungspfade der dränierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCM04TL
- Bild 151: Einbaubedingungen und Spannungspfade der dränierten Scherparameter im Triaxialversuch-CU am RCM032TL
- Bild 152: PVC-U Kunststoffstützen
- Bild 153: Entwicklung der Durchlässigkeit des RC-Mix 0/32 bei Feuchtraumlagerung
- Bild 154: Entwicklung der Durchlässigkeit des RC-Mix 0/32 bei Wasserlagerung
- Bild 155: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit des RC-Mix 0/32 bei Feuchtraumlagerung
- Bild 156: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit des RC-Mix 0/32 bei Wasserlagerung
- Bild 157: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/4 mit Kunststoffgranulat im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB04TL
- Bild 158: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/32 mit Kunststoffgranulat im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB032GW
- Bild 159: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/4 mit Holzspänen im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB04TL
- Bild 160: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/32 mit Holzspänen im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB032GW
- Bild 161: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/4 mit Polystyrol im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB04TL
- Bild 162: Proctorkurven und CBR-Werte für die Mischungen 0/32 mit Polystyrol im Vergleich zum Ausgangsmaterial RCB032GW
- Bild 163: Versuchsfeld mit Anordnung der Versuchspunkte
- Bild 164: Sieblinien des Versuchsmaterials
- Bild 165: Verdichtungswalze Bomag BW 156 D-3
- Bild 166: Proctorkurve des Versuchsmaterials
- Bild 167: Entwicklung des Verdichtungsgrades in Abhängigkeit der Anzahl der Überfahrten
- Bild 168: Mitarbeiter des ZG bei der Durchführung von Densitometerversuchen
- Bild 169: Mitarbeiter des ZG bei der Durchführung von statischen Plattendruckversuchen
- Bild 170: Korrelation zwischen Verdichtungsgrad D_{Pr} und Verformungsmodul E_{v2}
- Bild 171: Korrelation zwischen Verdichtungsgrad D_{Pr} und Verformungsmodul E_{vd}
- Bild 172: Sieblinien für die HMVA A
- Bild 173: Sieblinien für die HMVA B

- Bild 174: Proctorkurve und CBR-Werte für die HMVA A 0/4
- Bild 175: Proctorkurve und CBR-Werte für die HMVA B 0/4
- Bild 176: Proctorkurve und CBR-Werte für die HMVA A 0/32
- Bild 177: Proctorkurve und CBR-Werte für die HMVA B 0/32
- Bild 178: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für HMVA A 0/4 und HMVA A 0/32
- Bild 179: Sieblinien von Proben vor und nach Verdichtung für HMVA B 0/4 und HMVA B 0/32
- Bild 180: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit der HMV-Aschen bei Feuchtraumlagerung
- Bild 181: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit der HMV-Aschen bei Wasserlagerung
- Bild 182: Entwicklung der Durchlässigkeit der HMV-Aschen bei Feuchtraumlagerung
- Bild 183: Entwicklung der Durchlässigkeit der HMV-Aschen bei Wasserlagerung
- Bild 184: Einfluss von 1 M.-% unterschiedlicher Fremdstoffe (Polystyrolschaumkugeln, Holzspäne, Kunststoffgranulat) auf die Verdichtbarkeit und die Tragfähigkeit von RCB032GW
- Tab. 5: C_d/C_c der gesättigten Proben bei der höchsten Laststufe (400 kN/m² nach 1 Tag)
- Tab. 6: Korndichte der behandelten Bodenproben (NiSt + 10 M.-% WFK)
- Tab. 7: Korndichte der behandelten Bodenproben (NiSt + 20 M.-% BFA)
- Tab. 8: Triaxialversuche (CU) an den unbehandelten Böden
- Tab. 9: Zusammenfassung der Ergebnisse der Triaxialversuche CU zur Bestimmung der Scherparameter (SP)
- Tab. 10: Anhaltswerte für bodenmechanische Kenngrößen von verdichteten Böden mit organischen Bestandteilen
- Tab. 11: Verwendbarkeit von organogenen Böden der Gruppen 1, 2 und 3 in Erdbauwerken mit unterschiedlichen Anforderungen sowie Einfluss einer Bodenbehandlungsmaßnahme auf die Bodeneigenschaften
- Tab. 12: Baugrundgüte nach SCHULTZE & MUHS [134]
- Tab. 13: Typische Kationenaustauschkapazitäten (Werte aus MITCHELL & SOGA [113])
- Tab. 14: Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen am Gesamtsystem
- Tab. 15: Ergebnisse der Mineralanalyse an der Gesamtprobe und am Anteil < 0,002 mm der Böden TL und TA
- Tab. 16: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen
- Tab. 17: Datenzusammenstellung Weißfeinkalk
- Tab. 18: Datenzusammenstellung der Braunkohlenflugasche
- Tab. 19: Ergebnisse der Ascheoxidanalyse nach DIN 51729-10
- Tab. 20: Kornwichten des zur mechanischen Bodenverbesserung verwendeten RC-Materials
- Tab. 21: Zusammensetzung des RC-Mix 4/32 mm
- Tab. 22: Verbesserung mit WFK; Schwellwerte nach 7-tägiger Wasserlagerung im CBR-Topf (Proben bei etwa w_{Pr} , ohne Auflast)

Tabellen

- Tab. 1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an den natürlichen Böden
- Tab. 2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an den Modellmischungen
- Tab. 3: Versuchsanordnung der Oedometerversuche an den unbehandelten Böden
- Tab. 4: Versuchsanordnung der Oedometerversuche an den behandelten Böden

- Tab. 23: Verbesserung mit BFA; Schwellwerte nach 7-tägiger Wasserlagerung im CBR-Topf (Proben bei etwa w_{Pr} , ohne Auflast)
- Tab. 24: Verbesserung mit RC-Mix 0/4 und 0/32 mm; Schwellwerte nach 7-tägiger Wasserlagerung im CBR-Topf (Proben bei etwa w_{Pr} , ohne Auflast)
- Tab. 25: Randbedingungen und Ablauf des Frosthebungsversuches
- Tab. 26: Kennwerte zur Beurteilung der Ergebnisse
- Tab. 27: Beurteilung der Ergebnisse zur Verbesserung mit Weißfeinkalk (Knetmischer, 24 Stunden Reaktionszeit)
- Tab. 28: Beurteilung der Ergebnisse zur Verbesserung mit Braunkohlenflugasche
- Tab. 29: Beurteilung der Ergebnisse zur Verbesserung mit RC-Mix 0/32 mm
- Tab. 30: Beurteilung der Ergebnisse zur Verbesserung mit RC-Mix 0/4 mm
- Tab. 31: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 3 Walzenübergängen
- Tab. 32: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 3 Walzenübergängen
- Tab. 33: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen
- Tab. 34: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen
- Tab. 35: Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen
- Tab. 36: Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nach 6 Walzenübergängen
- Tab. 37: Nachuntersuchung zu Versuch 2; Ergebnisse der statischen Lastplattenversuche
- Tab. 38: Nachuntersuchung zu Versuch 2; Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche
- Tab. 39: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den klassifizierenden Versuchen an den zusätzlich untersuchten feinkörnigen Böden
- Tab. 40: Übersicht der Wassergehalte in Abhängigkeit von Ausgangswassergehalt und Zentrifugierdauer für den TL, TM1, TM2 und TA
- Tab. 41: Übersicht Ergebnisse der Entwässerungsversuche mit Dekanter
- Tab. 42: Übersicht Wassergehaltsreduzierung für TL, TM2 und TA mittels Handfilterplatte im Labor
- Tab. 43: Übersicht Wassergehaltsreduzierung für TL und TA mit unterschiedlichen Ausgangswassergehalten mittels Kammerfilterpresse im Technikum
- Tab. 44: Übersicht der durchgeführten Versuche zur thermischen Trocknung
- Tab. 45: Strategien zur Weiterverwendung zu nasser fein- und gemischtkörniger Böden
- Tab. 46: Anforderungen an Böden und Sekundärbaustoffen für den Verdichtungsgrad D_{Pr} und den Luftporenanteil n_a
- Tab. 47: Klassifikation von Bodengruppen nach Frostempfindlichkeit
- Tab. 48: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von rezyklierten Baustoffen gemäß TL BuB E-StB 09 [57]
- Tab. 49: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von HMVA nach TL BuB E-StB 09 [57]
- Tab. 50: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen nach TL Gestein-StB 04 [58]
- Tab. 51: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von HMVA nach TL Gestein-StB 04 [58]
- Tab. 52: Stoffgruppe und Verwertungsbereiche der RC-Baustoffe im Erdbau nach M RC [55]
- Tab. 53: Bereiche der Stoffgruppen von HMV-Asche [53]
- Tab. 54: Anwendungsmöglichkeiten für Hausmüllverbrennungsgasche im Erdbau nach M HMVA [53]
- Tab. 55: Anwendungsmöglichkeiten von Boden bzw. Bodenmaterial ohne und mit Fremdbestandteilen nach M BomF [52]

- Tab. 56: Typische Korndichten und Wasseraufnahmewerte von RC-Baustoffen und natürlichen Gesteinskörnungen
- Tab. 57: Versuchsmischungen aus RC-Baustoffen mit 30 % Boden
- Tab. 58: Zusammensetzung und Bezeichnung der Mischungen aus Fremdbestandteilen, Boden und Fremdstoffen
- Tab. 59: Proctordichte, Proctorwassergehalt und CBR-Werte der RC-Baustoffe
- Tab. 60: Proctordichte, Proctorwassergehalt und CBR-Werte der RC-Baustoffe mit 30 M.-% Bodenzugabe
- Tab. 61: Kornzertrümmerung bei Verdichtung mit Proctorenergie für RC-Baustoffe ohne Zugabe von Bodenmaterial
- Tab. 62: Kornzertrümmerung bei Verdichtung mit Proctorenergie – RC-Baustoffe mit Boden
- Tab. 63: Scherfestigkeitsparameter der RC-Baustoffe mit und ohne Bodenanteile
- Tab. 64: Ergebnisse der Frosthebungsversuche und Tragfähigkeitsversuche nach Befrostung
- Tab. 65: Proctordichte, Proctorwassergehalt und CBR-Werte der RC-Baustoffe 0/4 mm mit Fremdstoffen
- Tab. 66: Proctordichte, Proctorwassergehalt und CBR-Werte der RC-Baustoffe 0/32 mm mit Fremdstoffen
- Tab. 67: Anforderungen an das 10%-Mindestquantil für den Verdichtungsgrad D_{Pr} bzw. an das 10%-Höchstquantil für den Luftporenanteil n_a
- Tab. 68: Richtwerte für die Zuordnung vom statischen Verformungsmodul E_{V2} zum Verdichtungsgrad D_{Pr} bei grobkörnigen Böden
- Tab. 69: Richtwerte für die Zuordnung vom dynamischen Verformungsmodul E_{Vd} zum Verdichtungsgrad D_{Pr} bei grobkörnigen Böden
- Tab. 70: Überfahrten je Versuchsdurchgang und in Summe
- Tab. 71: Kornzertrümmerung bei Verdichtung mit Proctorenergie für HMV-Aschen
- Tab. 72: Ergebnisse der Frosthebungsversuche und Tragfähigkeitsversuche nach Befrostung
- Tab. 73: Einfluss von Fremdbestandteilen bzw. RC-Materialien auf die bautechnischen Eigenschaften in Gemischen mit grobkörnigen und gemischtkörnigen (Feinkornanteil ≤ 15 M.-%) Böden
- Tab. 74: Einfluss von Fremdbestandteilen bzw. RC-Materialien auf die bautechnischen Eigenschaften in Gemischen mit gemischtkörnigen (Feinkornanteil > 15 M.-% bis 40 M.-%) Böden
- Tab. 75: Einfluss von Fremdbestandteilen bzw. RC-Materialien auf die bautechnischen Eigenschaften in Gemischen mit feinkörnigen (Feinkornanteil > 40 M.-%) Böden

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2016

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

Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung

Kemper, Schacht, Klaproth, 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 praxisingerechten 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, Scherckenbach, 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.
- 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
- S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**
Augter, Kayser € 16,50
- S 137: Ressourcenschonung – Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**
Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

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.

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.