

Baustoffe für standfeste Bankette

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 107

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving them a 3D appearance as if they are floating above a white surface. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Baustoffe für standfeste Bankette

von

Andromachi Koukoulidou
Emanuel Birle
Dirk Heyer

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

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 107

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 Schünemann Verlag GmbH, 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-Nr. 05.0177/2012/MRB:
Baustoffe für standfeste Bankette

Fachbetreuung
Michael Bürger

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
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 978-3-95606-310-7

Bergisch Gladbach, April 2017

Kurzfassung – Abstract

Baustoffe für standfeste Bankette

Bankettmaterialien müssen zwei Anforderungen erfüllen, die von verschiedenen Bestandteilen der Böden gewährleistet werden. Aufgrund der Verkehrssicherheit müssen sie eine dauerhaft hohe Tragfähigkeit aufweisen, damit von der Fahrbahn abkommende Fahrzeuge nicht einsinken und verunfallen. Die Tragfähigkeit und Standfestigkeit der Böden wird hauptsächlich durch den Kiesanteil der Böden erreicht. Da im Bereich des Banketts Straßenoberflächenwasser versickert, müssen sie andererseits ein möglichst hohes Schadstoffrückhalte- und -bindevermögen aufweisen, um den Untergrund und das Grundwasser zu schützen. Dies wird durch die Sand- und Feinanteile der Böden erreicht. Bei den bestehenden Bauweisen besteht nach Auffassung einiger Straßenbauverwaltungen der Länder ein Optimierungsbedarf. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit sollten diese Bauweisen überprüft und ggf. weiter entwickelt werden, um noch stärker den bau-, als auch den umwelttechnischen Ansprüchen gerecht zu werden. Dabei werden die Bankette aus einem Gemisch von Gesteinskörnungen bzw. rezyklierten Baustoffen der Körnung 0/32 mm mit Feinkorn bzw. Oberboden hergestellt. Geeignete Zusammensetzungen waren durch Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab zu ermitteln. 18 Gemische von Gesteinskörnungen und Baustoffen der Körnung 0/32 mm mit unterschiedlichen Feinkorn- bzw. Oberbodenanteilen wurden in Bezug auf ihre Tragfähigkeit (CBR-Versuche) und Durchlässigkeit im Labor untersucht. Unter Berücksichtigung der Laborergebnisse wurden im Technikumsmaßstab Versuche mit vier Mischungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens mittels statischen und dynamischen Verformungsmoduln durchgeführt. Basierend auf den Versuchsergebnissen sollte der Feinkornanteil der Bankettmaterialien einen Wert von 15 M.-% nicht übersteigen. Mit solchen Materialien sollte ein Verformungsmodul $E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ bzw. $E_{vd} \geq 30 \text{ MN/m}^2$ bei einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100 \%$ sicher erreichbar sein. Falls eine höhere Tragfähigkeit für Bankette erforderlich ist, sollte der Feinkornanteil der Materialien ggf. weiter beschränkt werden.

Materials for stable road shoulders

The materials used for the construction of road shoulders have to fulfill two requirements that can be ensured by different soil fractions. On one hand, for traffic safety reasons, road shoulders must demonstrate a high bearing capacity, so that no settlements or accidents are caused when vehicles come off the paved part of the road. Stability and high bearing capacity are mainly achieved through the gravel fraction of the soil. On the other hand, runoff water from the road pavement, which typically contains significant amounts of pollutants, infiltrates into the shoulders. In order to protect the soil and groundwater, the used materials must demonstrate a high pollutant retention and binding capacity. These properties are achieved through the sand and fine fraction. According to the road construction authorities of several German federal states the construction methods described in the existing directives need to be improved. Goal of this research was the verification and optimization of the existing construction methods, so that both the technical and environmental requirements are fulfilled. Thereby shoulders constructed with mixtures of fine grains or topsoil and aggregates or construction materials with a maximum grain size of 32 mm have been investigated. Appropriate mixture compositions were determined by laboratory and large scale tests. 18 mixtures of aggregates or construction materials with different content of fine particles and topsoil were investigated at the laboratory with respect to their bearing capacity (CBR tests) and permeability. Based on the results large scale tests were conducted with four of the mixtures to determine their bearing capacity by means of the static and dynamic modulus of deformation. With respect to the test results the content of fines of the shoulder materials should not exceed a value of 15%. With this constraint a modulus of deformation $E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ or $E_{vd} \geq 30 \text{ MN/m}^2$ for a degree of compaction $D_{Pr} = 100\%$ could be achieved. If a higher bearing capacity is required, the content of fines should be further reduced.

Summary

Materials for stable road shoulders

1 Scope of the research

The materials used for the construction of road shoulders have to fulfill two requirements that can be ensured by different soil fractions. On one hand, for traffic safety reasons, road shoulders must demonstrate a high bearing capacity, so that no settlements or accidents are caused when vehicles come off the paved part of the road. Stability and high bearing capacity are mainly achieved through the gravel fraction of the soil. On the other hand, runoff water from the road pavement, which typically contains significant amounts of pollutants, infiltrates into the shoulders. In order to protect the soil and groundwater, the used materials must demonstrate a high pollutant retention and binding capacity. These properties are achieved through the sand and fine fraction. Large amounts of these components however could cause a reduction of the bearing capacity.

The current specifications for shoulders are described in the Additional technical conditions of contract and directives for earthworks in road construction 09 (ZTV E-StB 09, FGSV, 2009). For constructing stable shoulders the following soils and building materials or mixtures of building materials with a maximum grain size of 32 mm are suitable:

- (1) mixed-grained soils of the soil groups GU or GT,
- (2) mixtures of broken rock aggregates, as long as they correspond to the aforementioned soil groups,
- (3) gravel with a topsoil portion of 15 wt.% and a thickness of 20 cm.

A topsoil layer 5 cm thick is to be placed on shoulders constructed with the aforementioned materials (1) and (2).

According to the road construction authorities of several German federal states the construction methods described above need to be improved. Goal of this research was the verification and optimization of the existing directives and the

development of a construction method for road shoulders that considers both the technical and environmental requirements. As possible construction materials mixtures of aggregates (gravel) with a maximum grain size of 32 mm with fine grains or topsoil could be used. The required material composition, in terms of the highest possible content of fine particles that can ensure a sufficient bearing capacity has been determined by laboratory and large scale tests. For this purpose mixtures of aggregates or recycled materials with different content of fine particles and topsoil have been investigated with respect to their compaction properties, bearing capacity and permeability.

2 Investigated materials

Three materials with a maximum grain size of 32 mm (range of grains 0-32 mm) have been used as initial materials to create different mixtures:

- an unbroken aggregate (RK) classified as GW,
- a broken rock aggregate (BK) classified as GW or GU and
- a recycled aggregate (RC) classified as GW.

A fine-grained soil from gravel wash (Si), classified as TL, and a sieved topsoil (Ob) with a maximum grain size of 0,5 mm and an organic content of 8.5%, classified as TM, were added to the aforementioned materials to create mixtures with different contents of fine particles and topsoil. In total 18 mixtures were investigated (Table 1).

The mixtures have been named after their components and their content of fines. The first two letters refer to the 0-32 mm material that has been used (RK, BK or RC). The following letters indicate the fine-grained materials that have been added (Si for the material from gravel wash, Ob for the topsoil, SiOb when both materials have been used). Finally, the number with the letter F stands for the content of fine particles (target value) of the mixture.

3 Laboratory investigations

3.1 Conducted tests

For the determination of the soil properties laboratory tests were carried out. The grain size distribution was determined for all mixtures according to DIN 18123 in order to classify them

and to verify their content of fine particles. To determine the compaction properties of the mixtures proctor tests were performed according to DIN 18127. The saturated permeability was determined for two compaction conditions ($D_{Pr} = 100\%$ and $D_{Pr} = 97\%$). The tests were conducted in proctor or pressure cells, depending on the content of fine particles of the samples. Concerning the bearing capacity CBR tests were performed according to TP BF-StB – Teil B 7.1 (FGSV, 2012c) on all samples compacted with the proctor tests.

3.2 Results

The results of the laboratory tests are summarized in table 1. The obtained CBR values for the mixtures of unbroken, broken and recycled aggregates are shown in figures 1, 2 and 3, respectively.

The content of fine particles of the RK-mixtures varies between 9% and 17.7% (table 1). For all

BK-mixtures the content of fine particles is lower than expected (approximately 1.5%) and varies between 6.6% and 15.5%. From the RC-mixtures only those with 15% topsoil content (RC.SiOb.17F and RC.Ob.14F) deviate from the target values and their content of fine particles equal to 14.6% and 10.2%, respectively, are lower than expected values of 17% and 14%.

Regarding the compaction properties of the BK-mixtures, the addition of fine grains (Si or Ob) leads to higher proctor densities at higher water contents compared to the initial material (BK.08F). The RK-mixtures with a topsoil content $\leq 10\%$ show similar behavior. For higher topsoil contents the proctor density decreases compared to the initial material. For the mixtures of both unbroken and broken aggregates containing topsoil, an increase in the topsoil content leads to lower proctor densities at lower water contents. The determination of the proctor curves for the RC-mixtures was relative difficult and no correlation could be defined between the compaction

Mixture	Classification according to DIN 18196	Content of fine particles [%]	Content of topsoil [%]	Proctor-Optimum		Saturated Permeability for $D_{Pr} = 100\%$ k [m/s]
				w_{Pr} [%]	ρ_{Pr} [g/cm ³]	
RK.Si.08F	GU	9.0	-	5.62	2.347	$8.80 \cdot 10^{-7}$ [D]
RK.Si.14F	GU/GU*	15.4	-	6.01	2.334	$1.17 \cdot 10^{-9}$ [D]
RK.SiOb.11F	GU	11.0	5	5.85	2.286	$7.34 \cdot 10^{-9}$ [D]
RK.SiOb.14F	GU	13.4	10	7.00	2.246	$1.42 \cdot 10^{-9}$ [D]
RK.SiOb.17F	GU*	17.7	15	7.29	2.191	$1.41 \cdot 10^{-9}$ [D]
RK.Ob.14F	GU	13.4	16	7.61	2.184	$2.76 \cdot 10^{-9}$ [D]
BK.08F	GU	6.6	-	7.20	2.001	$3.23 \cdot 10^{-7}$ [P]
BK.Si.14F	GU	12.4	-	7.68	2.203	$1.08 \cdot 10^{-4}$ [P] / $7.55 \cdot 10^{-8}$ [D]
BK.Si.17F	GU*	15.5	-	7.46	2.221	$5.28 \cdot 10^{-9}$ [D]
BK.Ob.11F	GU	9.8	5	8.10	2.134	$1.04 \cdot 10^{-4}$ [P]
BK.Ob.14F	GU	11.7	10	8.33	2.127	$1.95 \cdot 10^{-4}$ [P]
BK.Ob.17F	GU*	15.5	15	8.45	2.116	$3.80 \cdot 10^{-9}$ [D]
RC.Si.08F	GU	7.6	-	13.05	1.869	$1.69 \cdot 10^{-5}$ [P]
RC.Si.14F	GU	13.2	-	12.78	1.962	$6.23 \cdot 10^{-6}$ [P]
RC.SiOb.11F	GU	10.1	5	13.62	1.920	$4.33 \cdot 10^{-7}$ [P]
RC.SiOb.14F	GU	14.3	10	12.52	1.954	$3.61 \cdot 10^{-7}$ [P]
RC.SiOb.17F	GU/GU*	14.6	15	11.43	1.947	$3.53 \cdot 10^{-8}$ [P]
RC.Ob.14F	GU	10.2	15	12.95	1.907	$9.31 \cdot 10^{-7}$ [P]

[P] Test performed in Proctor cell
[D] Test performed in pressure cell

Tab. 1: Investigated mixtures and results of the laboratory tests

properties and the content of fine particles or topsoil.

Due to the ratio between the maximum grain size (32 mm) and the diameter of the penetration piston

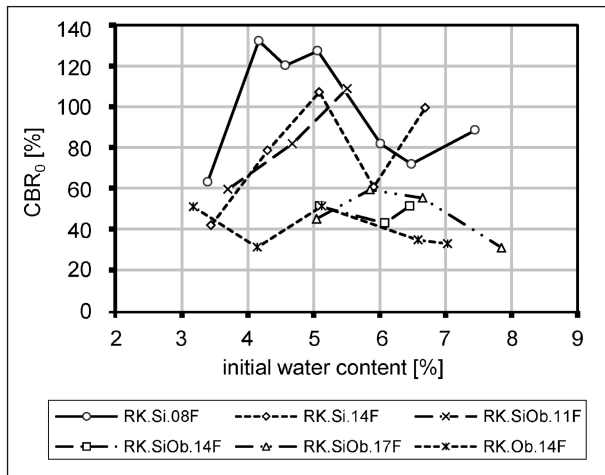


Fig. 1: CBR values for the mixtures of unbroken aggregates

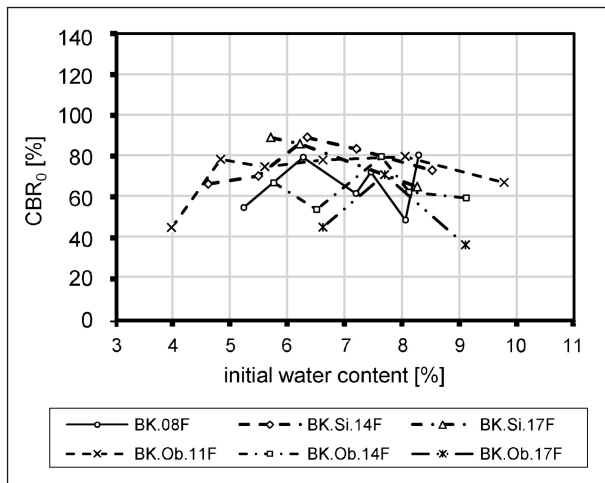


Fig. 2: CBR values for the mixtures of broken aggregates

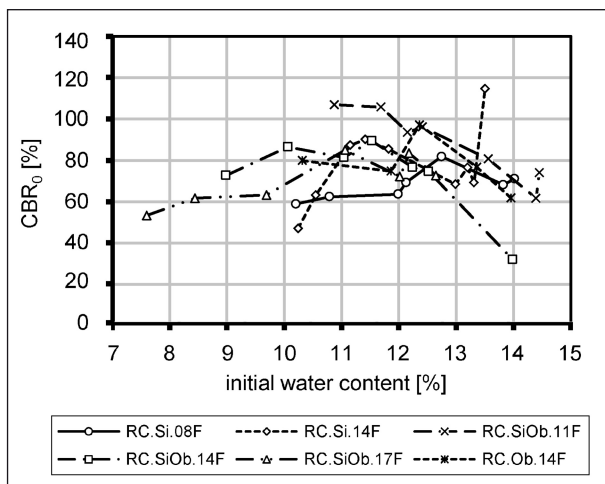


Fig. 3: CBR values for the mixtures of recycled aggregates

(50 mm), the CBR values of the investigated mixtures demonstrate strong fluctuations (see figures 1, 2 and 3). For some samples exponentially curved diagrams (force to penetration depth) have been obtained, caused likely by their support on the CBR cell. The results could be therefore used only as an orientation for the bearing capacity of the mixtures. The CBR values of the RK-mixtures lie between 30% and 135%. The mixtures containing only Si (RK.Si.08F, RK.Si.14F), as well as the mixture with the lowest topsoil content (RK.SiOb.11F), demonstrate the highest values, between 80% and 135%. The CBR values of the BK-mixtures and RC-mixtures fluctuate less and lie between 45% and 90% and between 30% and 115%, respectively. Despite the fluctuations the results show that higher topsoil contents generate lower CBR values.

Regarding the permeability, the results cover a wide range of values. For a degree of compaction D_{Pr} of 100%, the permeability of the RK-mixtures lies between $8.8 \cdot 10^{-7}$ m/s and $1.2 \cdot 10^{-9}$ m/s, of the BK-mixtures between $1.9 \cdot 10^{-4}$ m/s and $3.8 \cdot 10^{-9}$ m/s and of the RC-mixtures between $1.7 \cdot 10^{-5}$ m/s and $3.5 \cdot 10^{-8}$ m/s. For a degree of compaction D_{Pr} equal to 97% the permeability varies a bit stronger and the determined values of the mixtures of unbroken, broken and recycled aggregates lie between $3.2 \cdot 10^{-4}$ m/s and $1.2 \cdot 10^{-9}$ m/s, $4.9 \cdot 10^{-3}$ m/s and $2.3 \cdot 10^{-6}$ m/s and between $8.2 \cdot 10^{-5}$ m/s and $2.7 \cdot 10^{-7}$ m/s, respectively. The permeability of the mixtures depends on the shape of the particles as well as on the content of fine particles and topsoil. In principal a higher content of fine particles and a higher degree of compaction D_{Pr} yield lower k values. The applied method (proctor cell vs. pressure cell) has also an influence on the results. Based on the obtained values the use of a pressure cell is recommended for mixtures with a content of fine particles higher than 10%.

4 Large scale investigations

4.1 Procedure

Since the CBR tests, due to the coarse-grained components of the samples, demonstrated strong fluctuations and uncertainties, the bearing capacity of the mixtures was also investigated in field scale using the static and dynamic plate load tests.

The tests have been performed in a test pit 3.3 m by 5.0 m on four of the 18 mixtures investigated in the laboratory. The selection of the examined materials was based on the laboratory results. From the mixtures of unbroken aggregates the mixture with the highest topsoil content (RK.Ob.14F) was selected, as it demonstrates the lower CBR values. It can therefore be assumed that the other RK-mixtures will demonstrate higher bearing capacities. Similarly, from the RC-mixtures plate load tests have been conducted on the one with the highest topsoil content (RC.Ob.14F), as it shows also relatively low CBR values. Finally, in order to examine the influence of the topsoil content on the bearing capacity, from the BK-mixtures the material BK.08F, containing no additional soils, and the mixture BK.Ob.17F with the highest topsoil content were investigated.

Due to the large amounts of materials that were necessary for the large scale tests, the mixtures could not be prepared following the same procedure as at the laboratory. They were therefore created, when possible, using different particle fractions, the fine-grained soil Si and topsoil with a maximum grain size of 15 mm. The necessary amounts were calculated so that the produced mixtures were comparable to the corresponding laboratory mixtures regarding the grain size distribution and the form of the particles. The mixing process took place in the test pit using an excavator.

For the large scale tests single layer road shoulders with a thickness of 35 cm were investigated. The examined shoulder materials were compacted in one layer. As a base layer frost resistant gravel was used. Its thickness under the shoulder materials BK.08F and BK.Ob.17F was 35 cm and under the mixtures RK.Ob.14F und RC.Ob.14F 70 cm.

Six static and six dynamic plate load tests were conducted for each material 24 hours after compaction. To investigate the influence of the water content on the bearing capacity, tests were also performed after wetting of the materials. The amount of the water sprinkled on the testing surface was enough to achieve a degree of saturation of 100%. The achieved dry and wet densities were also determined using the balloon-method according to DIN 18125-2.

4.2 Results

The results of the large scale tests are summarized in table 2.

Regarding the grain size distribution the mixtures used for the large scale tests are similar to the corresponding laboratory mixtures (compare tables 1 and 2). The aggregate BK.08F exhibits a relative high inhomogeneity, despite the fact that it contains no additives (Si or Ob). The grain size distribution of the sample acquired from the pit (compacted material) is however similar to that of the laboratory mixture. The content of fines of the pit mixtures is ca. 3.2%. The pit mixture BK.Ob.17F has a slightly

	FKA ^[1] [%]	D _{Pr} [%]	After compaction		After wetting	
			E _{v2} [MN/m ²]	E _{vd} [MN/m ²]	E _{v2} [MN/m ²]	E _{vd} [MN/m ²]
BK.08F	3.2	104	225.7	(77.1)	256.6	61.6
			244.1	(77.9)	294.6	(80.4)
			251.0	(84.3)	314.5	(80.7)
			261.3	(85.2)	323.7	(100.0)
			265.6	(86.5)		(101.4)
			279.5	(88.6)		(101.4)
BK.Ob.17F	19.7	94	53.4	31.0	45.8	23.0
			56.9	32.5	57.9	23.4
			66.9	35.9	61.0	27.8
			69.7	36.4		31.7
			73.2	36.5		32.2
				42.5		32.5
RK.Ob.14F	13.9	102	71.1	31.1	76.6	22.9
			83.8	38.5	78.5	32.8
			86.1	38.8	83.5	33.1
			87.6	41.8	85.6	33.6
			87.9	46.5		39.5
			109.5	48.3		41.4
RC.Ob.14F	12.3	96	82.7	35.3	87.2	34.6
			91.1	37.4	91.8	38.3
			94.7	41.8	98.8	41.3
			94.9	45.7	103.1	42.7
			102.9	47.6		50.9
			108.6	48.0		51.4

[1] FKA = Content of fine particles
(average value of the determined grain size distributions)

Tab. 2: Results of the static and dynamic plate load tests for the examined mixtures. The values in brackets lie above the measuring range of the device

higher content of fine particles compared to the laboratory mixture (19% instead of 15.5%), while the pit mixtures RK.Ob.14F and RC.Ob.14F, with content of fine particles equal to 13.9% and 12.5%, respectively, are very similar to the corresponding laboratory mixtures (for the laboratory mixtures the content of fines lies by 13.4% and 10.2%, respectively).

With a degree of compaction $D_{Pr} = 104\%$, the material BK.08F demonstrates a very high bearing capacity. The static deformation modulus E_{v2} varies from 225.7 to 279.5 MN/m² (average value of 254.5 MN/m²), while the E_{vd} values lie above the measuring range of the used device. Due to the low content of fine particles, the material shows a high permeability. During wetting, the water infiltrated quickly and a degree of saturation S_r of only 32% could be achieved. The E_{v2} values after wetting seem to increase and have an average value of 297.3 MN/m². As the wetting was performed three weeks after the compaction of the material, it is possible that this time period has contributed to the increase of the bearing capacity.

The achieved degree of compaction D_{Pr} for the mixture BK.Ob.17F is equal to 94%. The E_{v2} and E_{vd} values of the material after compaction vary between 53.4 MN/m² und 73.2 MN/m² (average value of 64.0 MN/m²) and 31.0 MN/m² and 42.5 MN/m² (average of 35.8 MN/m²), respectively. After wetting the bearing capacity is reduced and the average values of E_{v2} and E_{vd} lie by 54.9 MN/m² (decrease of 14%) and 28.4 MN/m² (decrease of 21%), respectively. Since the achieved degree of saturation S_r was only 74%, the material was twice more sprinkled with water (achieved degrees of saturation of 77% and 85%, respectively). Plate load tests were repeated after every wetting. The determined bearing capacity for these cases was reduced to a relatively lower level.

The achieved degree of compaction for the mixture RK.Ob.14F is $D_{Pr} = 102\%$. The static modulus of deformation E_{v2} after compaction lies between 71.1 MN/m² and 109.5 MN/m² (average of 87.7 MN/m²) and after wetting between 76.6 MN/m² and 85.6 MN/m² (average of 81.0 MN/m²). The compaction water content of 7.1% was very close to the saturation water content (ca. 7.7%). Therefore the wetting had no significant influence on the bearing capacity. Similar results were obtained by the dynamic plate load tests.

The mixture RC.Ob.14F, with a degree of compaction $D_{Pr} = 96\%$, demonstrates a relative high bearing capacity. The E_{v2} values after compaction reach up to 108.6 MN/m², with an average value of 95.8 MN/m². After wetting the average E_{v2} modulus lies at 95.2 MN/m². As the achieved degree of saturation S_r was relative low, at about 78%, water was sprinkled again to the surface of the material and plate load tests were directly performed. The E_{v2} modulus after the second wetting varies between 92.3 MN/m² and 115.4 MN/m². The bearing capacity of the mixture of recycled aggregates appears independent of the water content. Similar results were obtained by the dynamic plate load tests.

The evaluation of the plate load tests reveals the effect of different factors on the bearing capacity. Comparing the mixture of unbroken aggregates RK.Ob.14F with the mixture of recycled materials RC.Ob.14F, which has a similar grain size distribution, it can be seen that with the recycled materials, despite the lower degree of compaction D_{Pr} , slightly higher bearing capacity can be achieved. The broken aggregate BK.08F, that does not contain topsoil or additional fine grains (Si), demonstrates a very high bearing capacity due to the sharp-edged grains and the low content of fine particles. The strong influence of topsoil and accordingly of the content of fine particles on the bearing capacity can be seen by comparing the investigated materials of broken aggregates (BK.08F and BK.Ob.17F). An increase of the content of fines from 4% to 19% has caused a reduction of the modulus of deformation E_{v2} of about 75%. The obtained E_{v2} values however for the material BK.Ob.17F, despite the high content of fine particles (19%) and the low degree of compaction ($D_{Pr} = 94\%$) are higher than 53 MN/m².

The ratio of the average static to the average dynamic modulus of deformation E_{v2}/E_{vd} for the different mixtures varies between 1.8 and 2.4 and is in good agreement with the values described in the literature (between 1.9 and 2.2).

5 Recommendations for the construction

Road shoulders for construction reasons should have a single-layer.¹ They should be compacted directly above the non-frost susceptible gravel base layer, which in principal demonstrates a high bearing capacity. A base layer of high bearing capacity promotes a better compaction of the shoulder material and a sufficient bearing capacity is easier to be achieved. As described in the ZTV E-StB 09 (FGSV, 2009) the materials should be compacted in layers with a maximum thickness of 30 cm. Based on these construction conditions, a degree of compaction $D_{Pr} = 100\%$ could be achieved and is therefore recommended.

As shoulder materials mixtures of soils or aggregates (gravel) with a maximum grain size of 32 mm with fine grains or topsoil could be used. The use of compost as substitute to the topsoil should be avoided, due to the high organic content. As criterion for the composition of the used materials a maximum content of fine particles should be set, independent of the topsoil content.

Based on the test results of this research the content of fines of the shoulder materials should not exceed a value of 15%. Higher values can lead, especially after wetting of the materials, to insufficient bearing capacity in case heavy vehicles come off the paved road. With this constraint a modulus of deformation $E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ or $E_{vd} \geq 30 \text{ MN/m}^2$ for a degree of compaction $D_{Pr} = 100\%$ could be achieved. If a higher bearing capacity is required, the content of fine particles should be further reduced. According to the large scale tests excluding the mixture BK.Ob.17F ($D_{Pr} = 94\%$, content of fine particles 19.7%) and one plate load test of the mixture RK.Ob.14F ($D_{Pr} = 102\%$, content of fine particles 13.9%), a modulus of deformation $E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ could be attained. It could therefore be assumed that a deformation modulus $E_{v2} = 80 \text{ MN/m}^2$ or $E_{vd} = 40 \text{ MN/m}^2$ could be achieved by mixed-grained soils with a maximum content of fine particles of 13%.

As the results of the large scale tests have shown, for shoulder mixtures both broken and unbroken

aggregates, as well as recycled materials can be used. For the mixtures of unbroken aggregates lower bearing capacity should be expected.

According to the directive RAS-Ew (FGSV, 2005), in order to protect the soil and the groundwater road shoulders should be slightly permeable with permeability values $k < 10^{-6} \text{ m/s}$. This criterion has been met by all the investigated mixtures of this research that have a content of fine particles higher than 15%, regardless of the type of the fine fraction (Si or Ob). For the mixtures containing topsoil (Ob) this value is achieved by a topsoil content $\geq 10\%$.

Suitable materials for road shoulders are therefore aggregates with a maximum grain size of 32 mm classified as GU or GT according to DIN 18196. Such materials could be produced by mixing fine grains or topsoil with the 0-32 mm aggregates that are suitable for gravel bearing layers according to TL SoB-StB 04 (FGSV, 2004).

Regarding the environmental requirements, the determination of a minimum content of fine particles that is necessary to achieve sufficient pollutant retention, is recommended. However, since the main point of this research was the bearing capacity of the shoulder materials, based on the carried out investigations such a specification could not be defined.

The use of topsoil for the construction of road shoulders, as described in the existing directive ZTV E-StB 09 (FGSV, 2009) is from a civil engineering point of view not necessary. The use of a material of the soil group GU or GT is required instead. Thus the existing directives and the specifications described in the STLK LB 112 (2014) should be accordingly modified.

6 Further need for research

The initial 0-32 mm materials used for this research contain a relative low amount of sand. Their grain size distribution curves, illustrated in figure 4, cover only the lower area of the grain size distribution range specified in the TL SoB-StB 04 (FGSV, 2004a) for bearing layers (continuous lines). It should therefore be verified, if materials with higher amounts of sand exhibit similar bearing capacities with the mixtures investigated in this study.

Regarding the required bearing capacity of road shoulders it should be noted that the values for the

¹ In terms of the materials used

moduli of deformation E_{v2} and E_{vd} defined by different federal states have not been yet scientifically proven. Further research is especially required for the determination of a value that could ensure a long-lasting stability of the road shoulders. As this topic was not the main purpose of this research, only limited information could be given based on the test results of the investigated gravel-silt mixtures. Although the examined materials demonstrated relative low sensitivity in water during both laboratory and large scale tests, changes in temperature (freeze-thaw cycles) could have a significant impact on their stability.

Moreover, when performing static and dynamic plate load tests it should be considered that the typical 12% inclination of the surface of road shoulders exceeds the allowable 6% inclination defined in the test specifications (TP BF-StB Part B 8.3). In this context, investigations on the influence of the inclination of the tested surface on the results of static and dynamic plate load tests would be recommended.

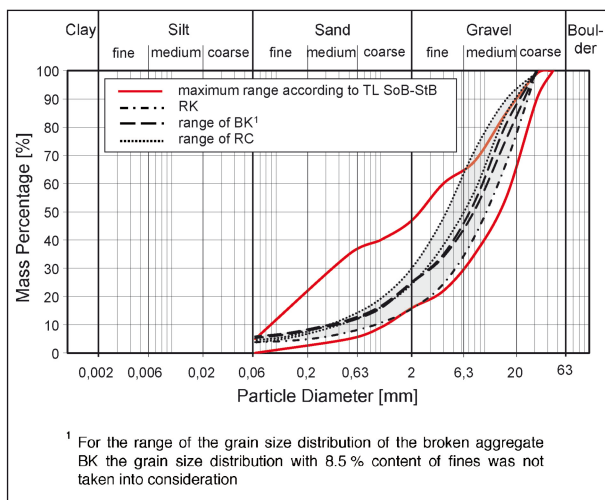


Fig. 4: Range of the grain size distribution of the initial materials used for this research in comparison with the range specified in TL SoB-StB 04 (FGSV, 2004) for bearing layers

Inhalt

Abkürzungen	12	5	Versuchsmischungen	26
1 Einleitung	13	5.1	Versuchsmischungen aus ungebrochenen Gesteins- körnungen	26
2 Forschungskonzept	14	5.2	Versuchsböden aus gebrochenen Gesteinskörnungen	26
2.1 Zielsetzung	14	5.3	Versuchsböden aus rezyklierten Gesteinskörnungen	27
2.2 Vorgehen	14	6	Laboruntersuchungen	27
3 Regelungen	15	6.1	Klassifizierungsversuche	27
3.1 ZTV E-StB 09	15	6.2	Proctorversuche	27
3.2 ZTV-StB LSBB 13	15	6.3	CBR-Versuche	28
3.3 RStO 12	16	6.4	Gesättigte Durchlässigkeit	29
3.4 BTR RC-StB 04	16	7	Laborergebnisse	30
3.5 Weitere Regelungen	16	7.1	Klassifizierungsversuche	30
3.6 Schotterrasen	17	7.2	Proctorversuche	31
3.6.1 Begriff	17	7.3	CBR-Versuche	32
3.6.2 Regelbauweise	17	7.4	Gesättigte Durchlässigkeit	34
3.6.3 Erfahrungen mit Schotterrasen	18	8	Technikumsversuche	35
3.7 Tragfähigkeit von Böden	19	8.1	Versuchsgrube	35
3.7.1 California Bearing Ratio (CBR)	20	8.2	Versuchsmischungen	36
3.7.2 Verformungsmodul E_{v2}	20	8.3	Versuchsvorgehen	36
3.7.3 Dynamischer Verformungs- modul E_{vd}	20	8.3.1	Aufbau der Versuche	36
3.7.4 Zusammenhänge	20	8.3.2	Aufbauprozess	37
4 Ausgangsmaterialien	23	8.4	Versuche	39
4.1 Ungebrochene Gesteins- körnung (RK)	23	8.4.1	Statische Plattendruck- versuche	39
4.2 Gebrochene Gesteins- körnung (BK)	23	8.4.2	Dynamische Plattendruck- versuche	40
4.3 Rezyklierte Gesteins- körnung (RC)	24	8.4.3	Dichtebestimmung	40
4.4 Feinkörniger Boden (Si)	25			
4.5 Natürlicher Oberboden (Ob)	25			

8.5	Ergebnisse der Technikumsversuche	41
8.5.1	Korngrößenverteilung	41
8.5.2	Tragfähigkeit	42
9	Weitere Laboruntersuchungen	46
9.1	Baustoffgemisch von TU Berlin	46
9.2	Handelsüblicher Schotterrasen	47
10	Zusammenfassung	48
11	Empfehlungen für die Baupraxis	49
12	Weiterer Forschungsbedarf	50
13	Literatur	51
	Normen	52
	Prüfvorschriften, Richtlinien und Merkblätter	52

Anlagen

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

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

Abkürzungen

<u>Abkürzung</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
C_{org}	%	Organischer Kohlenstoff
CBR_0	%	California Bearing Ratio
CBR_w	%	California Bearing Ratio nach Wasserlagerung der Probe
C_u	-	Ungleichförmigkeitszahl
d_{10}	mm	10 % der Körner weisen kleinere Durchmesser als d_{10} auf
d_{60}	mm	60 % der Körner weisen kleinere Durchmesser als d_{60} auf
D_{Pr}	%	Verdichtungsgrad
E_{v1}	MN/m ²	Verformungsmodul bei Erstbelastung
E_{v2}	MN/m ²	Verformungsmodul bei Zweitbelastung
E_{vd}	MN/m ²	Dynamischer Verformungsmodul
I_c	-	Konsistenzzahl
k	m/s	Wasserdurchlässigkeit
n	-	Porenanteil
S_r	%	Sättigungsgrad
V_{gl}	%	Glühverlust
w	%	Wassergehalt
w_L	%	Wassergehalt an der Fließgrenze
w_P	%	Wassergehalt an der Ausrollgrenze
w_{Pr}	%	Proctorwassergehalt
ρ_d	kg/m ³	Trockendichte
ρ_{Pr}	kg/m ³	Proctordichte beim Wassergehalt w_{Pr}
ρ_s	kg/m ³	Korndichte

1 Einleitung

Bankette werden nach ZTV E-StB 09 (FGSV, 2009) als „der unmittelbar neben der Fahrbahn oder dem Standstreifen (befestigter Seitenstreifen) liegende Teil der Straße“ definiert. Sie dienen der seitlichen Unterstützung der Fahrbahn und zur Ableitung des Straßenoberflächenwassers. Für Autobahnen und Landstraßen werden sie zur Unterbringung von Ausstattungselementen (Verkehrszeichen, Leiteinrichtungen und Fahrzeug-Rückhaltesysteme) sowie als Arbeitsraum für den Straßenbetriebsdienst verwendet (FGSV, 2012a; FGSV, 2008).

Die grundsätzliche Gestaltung von Banketten ist in Bild 1 dargestellt. Um die Entwässerung der befestigten Verkehrsfläche zu gewährleisten, werden sie ca. 3 cm tiefer an den Rand der befestigten Flächen angeschlossen und weisen eine Querneigung von 12 % nach außen auf. Falls die Fahrbahn nicht über die Bankette entwässert wird, sind sie mit einer Querneigung von 6 % anzulegen (FGSV, 2005). Ihre Breite beträgt in der Regel 1,5 m. In Einschnitten können sie neben 2,0 m breiten Mulden auf 1,0 m verringert werden (FGSV, 2012a), jedoch sollten sie eine Mindestbreite von 0,5 m nicht unterschreiten (ZTV-E LSBB, 2013).

Die bei der Herstellung von Banketten im Straßenwesen verwendeten Materialien müssen zwei wesentliche und gleichzeitig gegensätzliche Anforderungen erfüllen (Bild 2). Hinsichtlich der Verkehrssicherheit müssen die Materialien einerseits hohen Beanspruchungen standhalten und eine dauerhafte, witterungsunempfindliche hohe Tragfähigkeit nachweisen, damit abkommende Fahrzeuge (insbesondere schwere Lkw) und Betriebsdienste nicht einsinken und verunfallen. Die Tragfähigkeit und Standfestigkeit der Böden wird hauptsächlich durch den Kiesanteil der Böden erreicht. Andererseits versickert im Bereich der Bankette Straßenoberflächenwasser. Um die Retention der Schadstoffe mit dem Ziel des Boden- und Grundwasserschutzes zu gewährleisten; sollen die verwendeten Materialien ein möglichst hohes Schadstoffrückhalte- und -bindevermögen aufweisen. Das ist u. a. durch mechanische Filtration zu erreichen, welche durch die Sand- und Feinanteile der Böden erreicht wird. Falls diese Anteile aber zu hoch sind, verringern sich die Standfestigkeit und die Tragfähigkeit des Bodens (HILLMANN und KOCHER, 2013).

Bei den Bankettbauweisen, die in den ZTV E-StB 09 (FGSV, 2009) beschrieben werden (siehe Kapi-

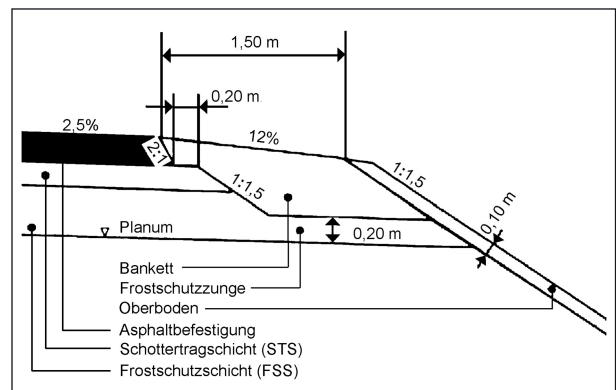


Bild 1: Geometrie von Banketten (HILLMANN und KOCHER, 2013)

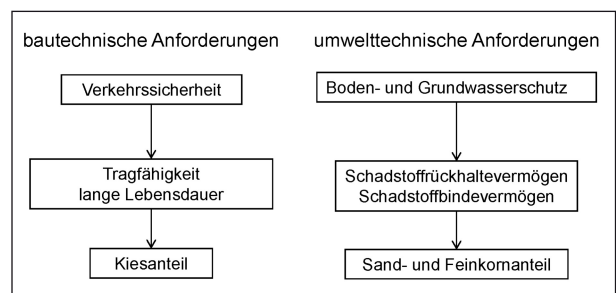


Bild 2: Anforderungen an Bankettbauweisen

tel 3.1), besteht nach Auffassung einiger Straßenbauverwaltungen der Länder ein Optimierungsbedarf. Aus Gründen der Verkehrssicherheit und des andauernden Bankettwachstums (Problematik: Vermehrung des Bankettschälguts) wird in manchen Ländern auf die Oberbodenschicht ganz verzichtet, womit aber das Schadstoffrückhaltevermögen für das versickernde Straßenoberflächenwasser vermindert sein dürfte. In anderen Bundesländern wird nur in einer obersten dünnen Schicht von 6 cm bis 8 cm dem Gesteinskorngemisch ein Oberboden mit einem Anteil von 20 % zugegeben, wobei hier von Anderen der Oberbodenanteil als vergleichsweise hoch angesehen wird.

Weiterhin ist der Begriff „Schotterrasen“ nicht eindeutig und trägt damit zur Verwirrung bei. Die Teilbegriffe „Schotter“ und „Rasen“ passen nicht mehr in die aktualisierten Begriffsbestimmungen des straßenbautechnischen Regelwerks. Den Begriff „Schotter“ gibt es formal nicht mehr und den Begriff „Rasen“ für die Bankette anzuwenden ist ebenso wenig zielführend. Da der Begriff „Oberboden“ zusätzlich nur allgemein definiert ist und keine festen Spezifikationen in Bezug auf Korngrößenverteilung, Feinanteil, organischem Anteil, usw. besitzt, sollte er als Kriterium für die Zusammensetzung der Bankettmaterialien möglichst nicht verwendet werden.

Für die Zukunft zeichnet sich eine Lösung für eine Bauweise ab, bei der die Bankette aus einem Gemisch von Kies mit Feinkornanteilen (Schluff, Ton) oder Oberboden hergestellt werden. Die erforderliche Zusammensetzung im Sinne eines möglichst hohen Feinkornanteils bei Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit ist durch Untersuchungen zu ermitteln.

2 Forschungskonzept

2.1 Zielsetzung

In der vorliegenden Forschungsarbeit ist eine Bauweise für Bankette zu entwickeln, die den Anforderungen an eine dauerhaft hohe Tragfähigkeit und ein hohes Schadstoffrückhalte- und -bindevermögen gerecht wird. Dazu sollen Bauweisen untersucht werden, bei denen die Bankette aus einem Gemisch von Böden der Bodengruppen GU, GT bzw. aus Gesteinskörnungen und Feinkorn bzw. Oberboden hergestellt werden.

Im Rahmen dieser Forschung werden experimentelle Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab zur Ermittlung der erforderlichen Dicken sowie zum Maximalanteil des Feinkorns bzw. des Oberbodens in den Gemischen durchgeführt. Dazu werden verschiedene Gemische von Böden und Baustoffen mit unterschiedlichem Feinkornanteil bzw. Oberbodenanteil in Bezug auf ihre Tragfähig-

keits- und Durchlässigkeitseigenschaften untersucht.

2.2 Vorgehen

Es werden Mischungen aus verschiedenen Ausgangsmaterialien mit einem Größtkorn von 32 mm und verschiedenen Anteilen eines feinkörnigen Bodens bzw. eines Oberbodens untersucht.

Die folgenden Ausgangsmaterialien werden verwendet:

- ein Gemisch 0/32 mm aus ungebrochenen Gesteinskörnungen,
- ein Gemisch 0/32 mm aus gebrochenen Gesteinskörnungen,
- ein Gemisch 0/32 mm aus rezyklierten Gesteinskörnungen,
- ein feinkörniger Boden und
- ein natürlicher Oberboden.

Mit den Ausgangsmaterialien werden 18 Versuchsböden zusammengesetzt (Bild 3, Tabellen 7 bis 9). Jedes Material 0/32 mm wird mit dem feinkörnigen Boden gemischt, um Gemische der Bodengruppe GU oder GT herzustellen. Durch Variation der Feinkornzugabe werden Mischungen einmal mit 6 M.-% bis 9 M.-% und einmal mit 13 M.-% bis 15 M.-% Feinkornanteil hergestellt.

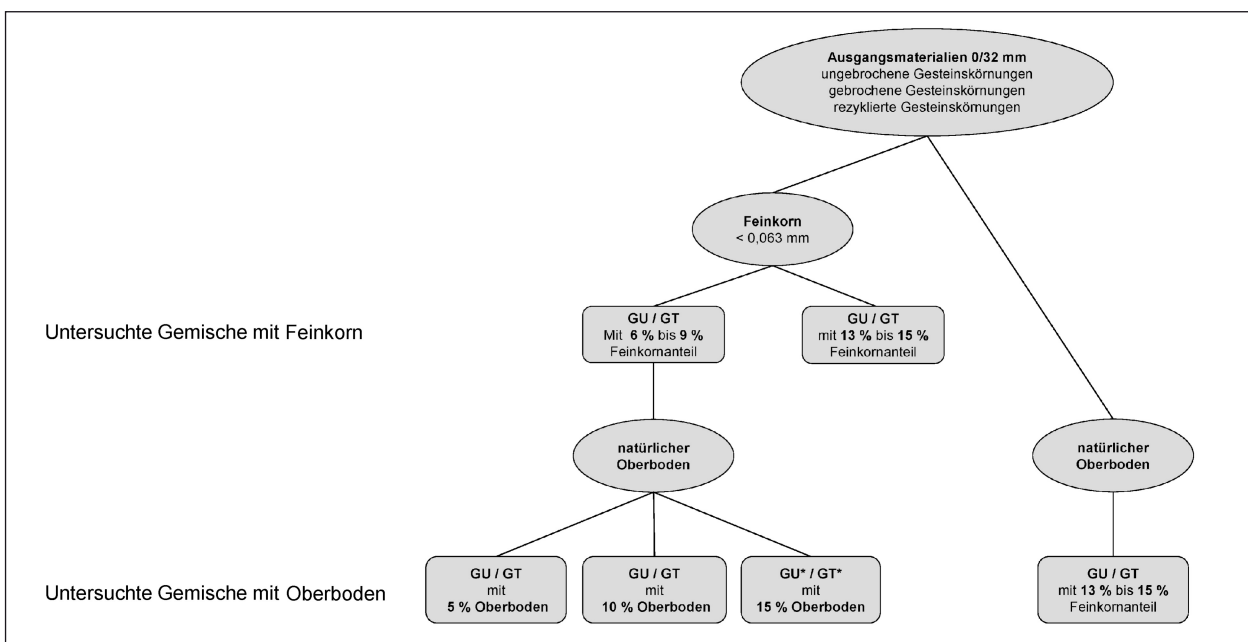


Bild 3: Forschungskonzept

Im Weiteren werden die hergestellten Mischungen mit dem geringeren Feinkornanteil (6 M.-% bis 9 M.-%) mit dem natürlichen Oberboden gemischt. Dabei werden 5 M.-%, 10 M.-% und 15 M.-% des Oberbodens zugegeben. In einer weiteren Variante wird der Oberboden direkt den grobkörnigen Ausgangsmaterialien 0/32 mm zugegeben, um einen Feinkornanteil von 13 M.-% bis 15 M.-% zu erreichen.

Für die Bestimmung der Bodeneigenschaften sind Versuche sowohl im Labor als auch in-situ geplant. Die wichtigsten Untersuchungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für alle Versuchsböden werden die Korngrößenverteilungen bestimmt. Proctorversuche werden durchgeführt, um die Verdichtungseigenschaften der Böden zu ermitteln. Die Bestimmung der gesättigten Durchlässigkeit ist notwendig, um Hinweise auf das Schadstoffrückhaltevermögen der Mischungen zu erlangen. Außerdem werden Laboruntersuchungen zur Tragfähigkeit durchgeführt (CBR-Versuche). Da Laboruntersuchungen zur Tragfähigkeit an Böden mit nennenswerten Anteilen an Grobkies aufgrund von Maßstabsproblemen starken Streuungen und Unsicherheiten unterworfen sind, muss mittels Versuchen im Technikumsmaßstab die Verbindung der Laborversuche zu den Praxisbedingungen in-situ hergestellt werden. Dabei sind vornehmlich sowohl statische als auch dynamische Plattendruckversuche vorgesehen.

Eigenschaft	Versuch	Methode
Korngrößenverteilung	Nasse und trockene Siebung DIN 18121	Labor
Verdichtungsverhalten	Proctorversuch DIN 18127	
Wasserdurchlässigkeit	Gesättigte Durchlässigkeit DIN18130	
Tragfähigkeit	CBR-Versuch TP BF-StB – Teil B 7.1	Technikum
	Statischer Plattendruckversuch DIN 18134	
	Dynamischer Plattendruckversuch TP BF-StB – Teil B 8.3	

Tab. 1: Übersicht zu den vorgesehenen Versuchen

3 Regelungen

3.1 ZTV E-StB 09

Der aktuelle Stand der Anforderungen an die Baustoffe und den Aufbau von Banketten ist in Abschnitt 4.7 der ZTV E-StB 09 (FGSV, 2009) beschrieben. Für die Herstellung standfester Bankette sind folgende Böden und Baustoffe bzw. Baustoffgemische mit einem Größtkorn von 32 mm geeignet:

- 1) gemischtkörnige Böden der Bodengruppe GU, GT,
- 2) Gemische aus gebrochenen Gesteinskörnungen, die den genannten Bodengruppen entsprechen.

Auf den so hergestellten Banketten ist eine Schicht Oberboden mit einer Dicke von 5 cm aufzubringen.

- 3) Schotterrasen mit einem Oberbodenanteil von 15 M.-% und einer Dicke von 20 cm.

In Bezug auf die Verdichtung ist für standfeste Bankette ein Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100 \%$ vorgesehen.

3.2 ZTV-StB LSBB 13

In Anlage 7 der ZTV-StB LSBB 13 ist die Richtlinie zur Gestaltung und Bauausführung von Banketten enthalten, die für die LSBB gilt.

Nach ZTV-StB LSBB 13 können Bankette aus folgenden Gemischen und Baustoffen hergestellt werden:

- 1) rezyklierte Gesteinskörnungen, RC-Baustoffe und RC-Gemische,
- 2) sonstige rezyklierte Gesteinskörnungen, RC-Baustoffe und RC-Gemische,
- 3) natürliche Gesteinskörnungen und Baustoffgemische,
- 4) Schotterrasen,
- 5) Oberboden.

Für die Herstellung standfester Bankette sollen entweder Baustoffgemische 0/32 mm mit einer Sieblinie (Bild 4) gemäß den TL SoB-StB (FGSV, 2004) oder Baustoffgemische, die die Anforderungen der Tabelle 2 erfüllen, verwendet werden.

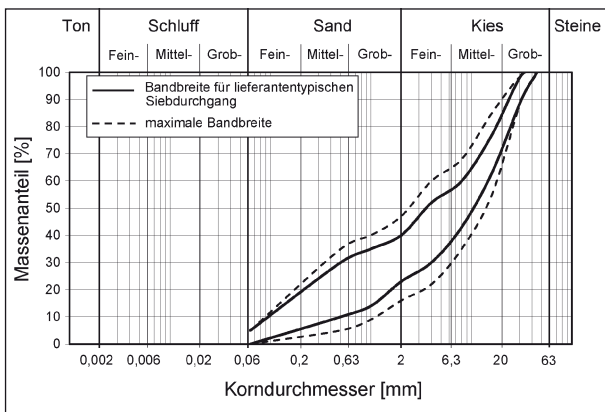


Bild 4: Baustoffgemisch 0/32 für Kies- und Schottertragschichten nach TL SoB-StB

Kornanteil > 2 mm [M.-%]	Kornanteil > 16 mm [M.-%]	Ungleichförmigkeitsgrad	Solldicke [cm]	Verformungsmodul [MN/m ²]	
				$E_{v2}^{a)}$	E_{vd}
≥ 40	≥ 13	≥ 7	≤ 25	≥ 70	≥ 35

a) bei $E_{v2}/E_{v1} \leq 4,0$

Tab. 2: Anforderungen an Baustoffgemische zur Herstellung standfester Bankette gemäß den ZTV-StB LSBB 13

3.3 RStO 12

Gemäß den RStO 12 (FGSV, 2012b) gehören die Bankette nicht zu dem Oberbau eines Straßendamms. Deshalb sind in den RStO 12 dafür keine Bauweise oder technischen Anforderungen gegeben.

3.4 BTR RC-StB 04

In den Brandenburgischen Technischen Richtlinien für die Verwendung von Recycling-Baustoffen im Straßenbau (BTR RC-StB 04) sind Anforderungen vorgegeben, die die RC-Baustoffe, die für die Herstellung von Banketten verwendet werden, erfüllen müssen.

Nach BTR RC-StB 04 soll die Korngrößenverteilung der verwendeten Materialien den Werten in Tabelle 3 entsprechen. Hinsichtlich der Tragfähigkeit sollen sie einen CBR-Wert ≥ 40 % aufweisen und vor dem Aufbringen von Oberboden soll ein E_{v2} -Wert ≥ 80 MN/m² oder ein E_{vd} -Wert ≥ 40 MN/m² erreicht werden.

Körnung	Kornanteil im Mineralstoffgemisch [M.-%]			
	≤ 0,063 mm	> 2,00 mm	größte Kornklasse ¹	Überkorn
0/32 (Regelfall) bzw. 0/45	≤ 7	50-84	≥ 10	≤ 10

¹ einschließlich des Überkorns

Tab. 3: Anforderungen an Recycling-Baustoffe zur Herstellung von Banketten gemäß BTR RC-StB 04

3.5 Weitere Regelungen

Das Merkblatt ME 1.2 für standfeste Bankettstreifen des Landbetriebs Straßenwesen Brandenburg (2012) sieht eine zweischichtige Bankettebauweise vor (Bild 5). Die untere Schicht ist eine Schottertragschicht aus 0/32 mm natürlichen Mineralstoffen bzw. RC-Material. Für die obere Schicht, die eine Dicke von 6 cm bis 8 cm hat, ist ein Oberboden-Schotter-Gemisch mit Schotter der Körnung 0/22 mm nach TL SoB-StB (FGSV, 2004) vorgesehen. Hinsichtlich der Tragfähigkeit wird für die obere Schicht ein dynamischer Verformungsmodul $E_{vd} \geq 40$ MN/m² gefordert. Bei Schleifenfahrbahnen und engen Radien ist ein höherer Wert $E_{vd} \geq 60$ MN/m² zu gewährleisten.

Ähnliche Anforderungen sind in einem Erlass des Thüringer Ministeriums für Bau, Landesentwicklung und Verkehr (2010) festgelegt. Standfeste Bankette müssen in Thüringen mit einem Verdichtungsgrad D_{Pr} von 100 % aufgebaut werden und einen Verformungsmodul $E_{v2} \geq 60$ MN/m² bzw. $E_{vd} \geq 35$ MN/m² aufweisen. Bei engen Fahrstreifen und Schleppkurven werden höhere Tragfähigkeitswerte von $E_{v2} \geq 80$ MN/m² bzw. $E_{vd} \geq 40$ MN/m² gefordert.

Bei Hessen Mobil (KUHL, 2014) wird für die Herstellung von Banketten vorgeschlagen, Materialien für Deckschichten ohne Bindemittel nach ZTV SoB-StB 04 (FGSV, 2004b) und nach TL SoB-StB (FGSV, 2004a) zu verwenden. Die Materialien sollen einen Kornanteil > 2 mm von mindestens 40 M.-% enthalten und ihr Feinkornanteil soll zwischen 8,0 M.-% und 15 M.-% liegen (Bild 6). Das Größtkorn richtet sich nach der Lagendicke, wobei die Lagendicke 20 cm nicht überschreiten sollte. Der Verdichtungsgrad D_{Pr} muss mindestens 100 % betragen.

Außerdem werden nach dem Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau STKL LB 112 (FGSV, 2014) für die Herstellung von

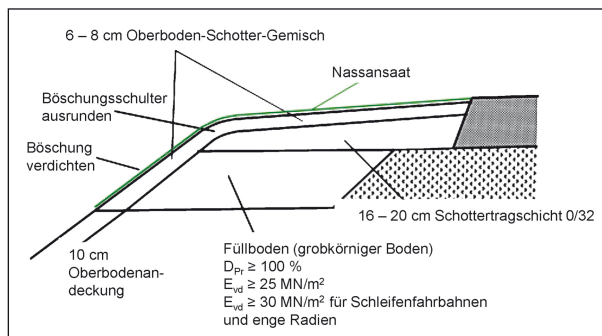


Bild 5: Aufbau von Banketten gemäß ME 1.2 (Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg, 2012)

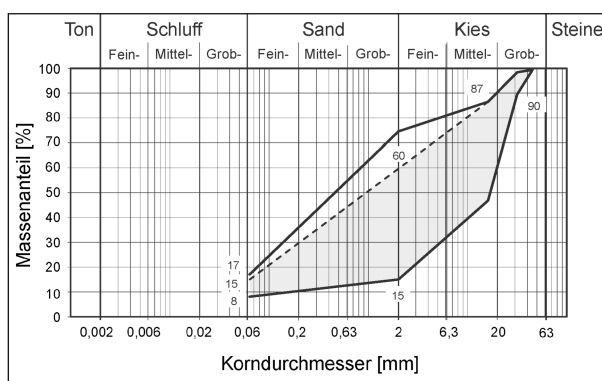


Bild 6: Beispiel für den Körnungsbereich der Bankettmaterialien nach Hessen Mobil (KUHLE, 2014) auf Basis von ZTV SoB-StB 04

zwei- bzw. einschichtigen Banketten die folgenden Baustoffe genannt:

- 1) Baustoffgemisch 0/32 für Deckschichten ohne Bindemittel mit mindestens 40 M.-% Kiesanteil für die untere Schicht und gelieferter Oberboden für die obere Schicht,
- 2) Baustoffgemisch 0/32 für Deckschichten ohne Bindemittel mit mindestens 40 M.-% Kiesanteil für die untere Schicht und Oberboden des Auftraggebers für die obere Schicht,
- 3) Schotterrassen als Gemisch aus 85 M.-% Gesteinskörnung 2/45 der Kategorie C 90/3 und 15 M.-% Oberboden,
- 4) Baustoff für Schottertragschichten,
- 5) Baustoff nach Unterlagen des Auftraggebers,
- 6) gemischt-körniger Boden.

3.6 Schotterrassen

3.6.1 Begriff

Der Begriff „Schotterrassen“ ist durch verschiedene Beschreibungen charakterisiert und wird in der

Baupraxis sehr vielen unterschiedlichen Anwendungen zugeordnet. Der Begriff „Schotter“ ist auch nicht eindeutig und kann sowohl Rundkorn, als auch gebrochenes Korn bedeuten (MASLOWSKI, 2007).

Gemäß dem nicht mehr gültigen Merkblatt für die Befestigung von Parkflächen (FGSV, 1977) konnte Schotterrassen mit oder ohne Humus hergestellt werden. Bei humuslosem Schotterrassen handelte es sich um eine tragfähige Schotterschicht, die mit einer Mischung aus Nährlösung und Grassamen angesät wurde, während Schotterrassen mit Humus ein hohlraumarmes Gemisch aus Schotter und Mutterboden war, mit dem eine befahrbare Rasenfläche hergestellt werden konnte.

Nach dem Green-Concrete-Projekt ist Schotterrassen eine ökonomische und ökologische Bauweise für Parkplätze und gering belastete Verkehrsflächen. Es handelt sich um eine begrünte und versickerungsaktive Schotterfläche (Naturschotter oder Recyclingbaustoffmaterialien mit Oberboden- bzw. Kompostzugabe), die im Gegensatz zu Asphalt oder Platten-Belägen die Versickerung des Oberflächenwassers erlaubt und durch die Vegetation den Boden-Luft Austausch ermöglicht (HASLGRÜBLER, 2008; PITHA et al., 2008; Green Concrete).

Laut ZTV-StB LSBB 13 eignet sich Schotterrassen für die Banketherstellung und es handelt sich um ein Gemisch aus natürlichen oder rezyklierten Gesteinskörnungen und Oberboden. Als natürliche Gesteinskörnungen können sowohl gebrochene als auch ungebrochene Gemische verwendet werden. Nach FLL (2008) muss aber die Tragfähigkeit von ungebrochenen Materialien überprüft werden und reine rundkörnige Gesteinskörnungen sind zu vermeiden. In der Regel werden wegen der Verzahnung und der somit erhöhten Tragfähigkeit für Schotterrassenbauweisen gebrochene Gesteinskörnungen verwendet (MASLOWSKI, 2007).

Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungen und verschiedenen Definitionen des Begriffs „Schotterrassen“ hat der Arbeitsausschuss AA 5.1 (Erd- und Felsarbeiten) entschieden, ihn zukünftig im Straßenbauregelwerk nicht mehr zu verwenden (HILLMANN und KOCHER, 2013).

3.6.2 Regelbauweise

Nach RStO 12 (FGSV, 2012b) gehört Schotterrassen zu den Einfachbauweisen, jedoch werden keine bautechnischen Anforderungen genannt.

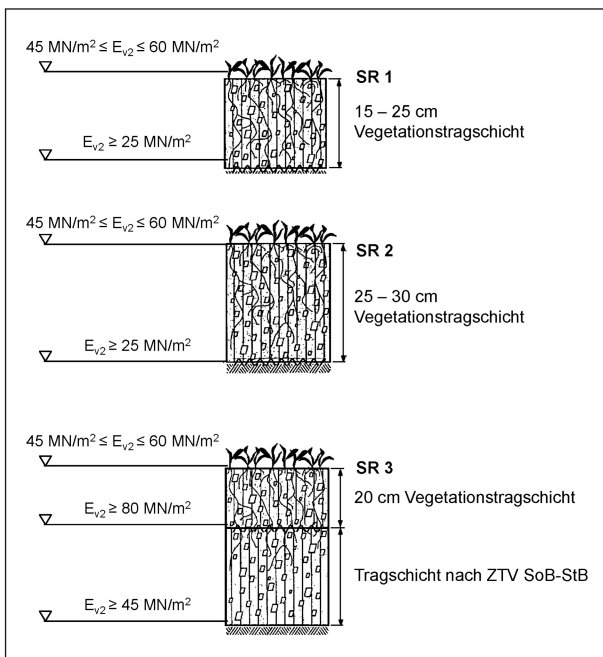


Bild 7: Regelbauweisen für Schotterrassen (FLL, 2008)

Zurzeit sind Schotterrassenbauweisen in der Richtlinie für die Planung, Ausführung und Unterhaltung von begrünbaren Flächenbefestigungen beschrieben (FLL, 2008). Nach FLL (2008) können Schotterrassenflächen abhängig von der vorgesehenen Verkehrslast aus einer oder zwei Schichten aufgebaut werden. Es werden drei Bauweisen definiert:

- Bauweise 1 (SR 1): Flächen ausschließlich für den Personenkraftwagen-Verkehr,
- Bauweise 2 (SR 2): Wie Bauweise 1, zusätzlich mit geringerem Lastkraftwagen- und Busverkehr,
- Bauweise 3 (SR 3): Wie Bauweise 2, zusätzlich mit höherem Lastkraftwagen- und Busverkehr.

Der Aufbau und die erforderlichen Dicken der Vegetationstragschicht für alle Regelbauweisen sind in Bild 7 dargestellt und in Tabelle 4 zusammengefasst. Hier sind ebenfalls die Anforderungen an die Tragfähigkeit der verschiedenen Schichten angegeben.

Um eine ausreichende Tragfähigkeit zu erreichen, muss die Vegetationstragschicht einen E_{v2} -Wert zwischen 45 MN/m^2 und 60 MN/m^2 aufweisen und der Verdichtungsgrad D_{Pr} muss zwischen 93 % und 97 % liegen. Die Verdichtung ist statisch auszuführen.

Im Hinblick auf die Zusammensetzung der Baustoffgemische, die für Schotterrassen geeignet sind, ist der Sieblinienbereich in Bild 8 festgelegt. Der

Regelbauweise	Schichtaufbau	Dicke der Vegetationstragschicht
SR 1	1	15 – 25 cm
SR 2	1	25 – 30 cm
SR 3	2	20 cm (auf Tragschicht nach ZTV SoB-StB)

Tab. 4: Regelbauweise und erforderliche Dicke der Vegetationstragschicht nach FLL (2008)

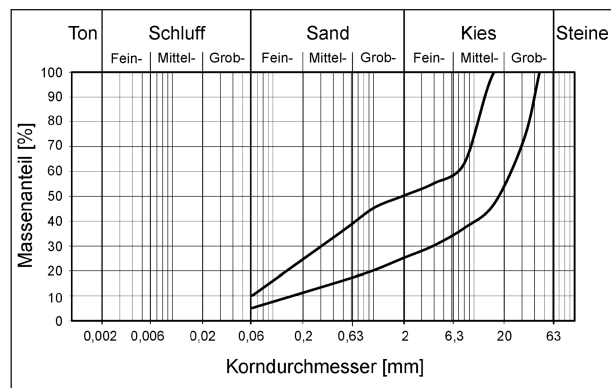


Bild 8: Empfohlener Sieblinienbereich der Baustoffgemische für Schotterrassen nach FLL (2008)

Feinkornanteil muss mindestens 5 M.-% betragen und darf 10 M.-% nicht überschreiten. Das Größtkorn, das zwischen 16 mm und 45 mm variieren kann, darf nicht größer als 1/3 der Schichtdicke sein und der organische Anteil soll maximal 3 M.-% betragen.

Außerdem muss die Wasserdurchlässigkeit zwischen $5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ und $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ liegen.

3.6.3 Erfahrungen mit Schotterrassen

HEIDGER (1997) hat in seiner Arbeit die Schwierigkeiten betont, eine belastbare Rasenfläche aufzubauen, die sowohl die bautechnischen (lange Lebensdauer, hohe Tragfähigkeit) als auch die vegetationstechnischen (Ästhetik, gutes Pflanzenwachstum) Anforderungen erfüllt. Im Rahmen seiner Forschung wurden Schotterrassen mit unterschiedlicher Kornzusammensetzung und Eigenschaften untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Parameter, welche die Qualität und Funktionalität des Schotterrassens beeinflussen, die Kornformfestigkeit und -griffigkeit, die Qualität und die Menge der Bodenbestandteile sind.

Aus den Ergebnissen der Tragfähigkeits- und Befahrversuche geht hervor, dass Schotterrassen-

flächen nur für gelegentliche Beanspruchung geeignet sind, da die empfindlichen Rasendecken der Lkw-Belastung nicht standhalten können. In diesem Rahmen und um einen Kompromiss bezüglich bautechnischer und vegetationstechnischer Anforderungen zu erreichen, sollte ein E_{v2} -Wert von 25 MN/m^2 bis 30 MN/m^2 ausreichen. Ein Verdichtungsgrad D_{Pr} zwischen 80 % und 85 % und eine statische Verdichtung werden empfohlen.

Im Hinblick auf die Korngrößenverteilung sollte das Größtkorn des Schotterrasens einen Durchmesser von 31,5 mm nicht überschreiten und der Feinanteil auf 15 M.-% beschränkt werden. Es wird auch ein Sieblinienbereich für Vegetationstragschichtgemische festgelegt.

MASLOWSKI (2007) hat im Rahmen seiner Diplomarbeit Schotterrasenmischungen mit unterschiedlicher Kornform und Größtkorn untersucht. Die Tragfähigkeitsversuche haben gezeigt, dass die scharfkantige Schotterrasenmischung im Vergleich zur rundkörnigen Mischung einen höheren E_{vd} -Wert ergibt, obwohl beide Materialien die Tragfähigkeitsanforderungen nach FLL (2008) erfüllen. In Bezug auf die Durchlässigkeit hat das gebrochene Korn eine höhere Durchlässigkeit und kürzere Sickerzeiten gezeigt (MASLOWSKI und LÄNGERT, 2008).

LÄNGERT und FLORINETH (2005) haben den Einfluss unterschiedlicher Aufbauten, Untergründe, Kalkschottermischungen, Substrat-Varianten und -anteile sowie Belastungen auf die Tragfähigkeit von Schotterrasenparkflächen untersucht. Die Sieblinienbänder der untersuchten Materialien sind in Bild 9 dargestellt. Aus den Ergebnissen ist erkennbar, dass die Tragfähigkeit des Untergrunds die Tragfähigkeit der Vegetationstragschicht signifikant beeinflusst. Besonders bei trockenen Bodenbedingungen führt ein stark verdichteter und tragfähiger Untergrund zu höheren E_{vd} -Werten auf der Oberfläche von Schotterrasen. In der Regel sind einschichtige Bauweisen zu bevorzugen, sofern der Untergrund eine ausreichende Tragfähigkeit aufweist. Im Hinblick auf die Substratbeimischungen haben Erd-Mischungen im Vergleich zu Kompost-Mischungen höhere E_{vd} -Werte gezeigt. Materialien der Korngruppe 0/32, 0/45 und 0/64 haben auch ähnliche Tragfähigkeiten aufgewiesen. Die Ergebnisse haben auch ergeben, dass sich die Tragfähigkeit infolge der Befahrung und aufgrund von Kornumlagerungen und der dadurch bedingten Verdichtung erhöht.

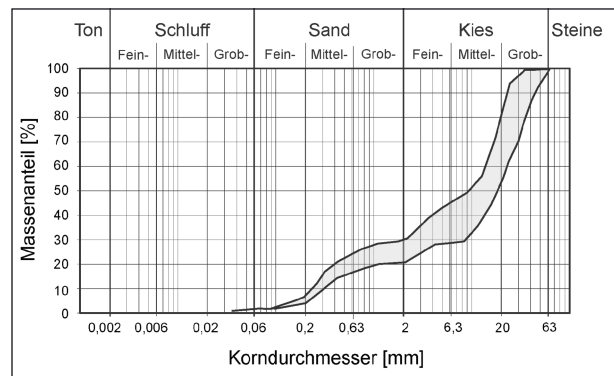


Bild 9: Sieblinienbereich der untersuchten Gemische von LÄNGERT und FLORINETH (2005)

Im Rahmen des Green-Concrete-Forschungsprojekts wurde die Eignung von Baustoffrecyclingmaterialien für die Herstellung von Schotterrasen untersucht (PITHA et al., 2008; EPPEL et al., 2007; EPPEL et al., 2009). Die verwendeten Schotterrasenmischungen unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung, in der Korngrößenverteilung, dem Größtkorn und dem Kompostanteil. Versuche wurden an vier verschiedenen Standorten für zwei unterschiedliche Belastungskonzepte durchgeführt. Die Recycling-Mischungen wiesen gute Tragfähigkeits- und Begrünungsleistungen auf, sie stellten keine Gefahr für das Grundwasser dar und sind deshalb geeignet für den Aufbau von Vegetationstragschichten. Für die an einem Standort getesteten Mischungen liegt der E_{v2} -Verformungsmodul zwischen $39,7 \text{ MN/m}^2$ und $52,8 \text{ MN/m}^2$ und die Tragfähigkeit ist unabhängig von dem Kompostanteil (10 Vol.-% oder 15 Vol.-%) oder der Korngrößenverteilung der Mischungen. Allerdings sind keine weiteren Informationen über die Korngrößenverteilung der untersuchten Gemische angegeben.

Hinsichtlich der Verdichtung sollten Schotterflächen statisch mit leichten Walzen verdichtet werden (LÄNGERT und FLORINETH, 2005). Rüttelvorgänge sollten nicht ausgeführt werden, um die Entmischung des Materials zu vermeiden. Gräder und schwere Walzen werden auch nicht empfohlen, da durch die starke Verdichtung die Wasserdurchlässigkeit verringert wird und die Begrünung der Vegetationstragschicht schwer zu gewährleisten ist (HASLGRÜBLER, 2008).

3.7 Tragfähigkeit von Böden

Die Tragfähigkeit von Böden wird durch unterschiedliche Verfahren ermittelt und durch verschiedene Parameter beschrieben.

3.7.1 California Bearing Ratio (CBR)

Der CBR-Versuch (California Bearing Ratio) wurde von dem US Corps of Engineers entwickelt und wurde von dem California State Highway Department für die Bemessung von flexiblen Fahrdecken eingesetzt. Es ist ein Stempelleindringversuch, bei dem ein empirisches Maß für die Tragfähigkeit einer Bodenprobe bestimmt wird. Es wird die Kraft ermittelt, die notwendig ist, um einen zylindrischen Stempel mit einem Durchmesser von 50 mm bei einer Geschwindigkeit von 1,25 mm/min in eine Bodenprobe einzudrücken. Die benötigte Kraft für Eindringtiefen von 2,5 mm und 5,0 mm in den Versuchsboden wird mit der benötigten Kraft für dieselben Eindringtiefen in einen Standardboden verglichen. Das prozentuale Verhältnis zwischen den beiden Kräften ergibt den CBR-Wert:

$$\text{CBR} = \frac{F}{F_S} \cdot 100 \quad (\text{Gl. 1})$$

mit

F Stempelkraft beim Versuchsboden

F_S Stempelkraft beim Standardboden

F_S 13,2 kN für Eindringtiefe von 2,5 mm

F_S 20,0 kN für Eindringtiefe von 5,0 mm

Obwohl sich der CBR-Wert als ein Maß der Tragfähigkeit von Böden etabliert hat, gibt es Bedenken hinsichtlich seiner Aussagefähigkeit (DEMPWOLFF, 1952; LIVNEH und GREENSTEIN, 1978). Nach BENNERT und MAHER (2005) sollen sie nur als Vergleichswerte zwischen verschiedenen Materialien verwendet werden, da sie keine charakteristische Eigenschaft der Böden beschreiben.

3.7.2 Verformungsmodul E_{v2}

Der Verformungsmodul E_{v2} dient zur Ermittlung der Tragfähigkeit und Verformbarkeit von Böden. Er ist das Maß, das als hauptsächliches Kriterium für die Standfestigkeit von Schichten im Straßenbau verwendet wird.

Der Verformungsmodul wird durch den statischen Plattendruckversuch bestimmt (Bild 10). Während des Versuchs wird der Boden mittels einer kreisförmigen Lastplatte stufenweise belastet, entlastet und wiederbelastet. Durch die Messung der Setzungen auf der Bodenoberfläche wird das Spannungs-Setzungs-Diagramm ermittelt. Aus der

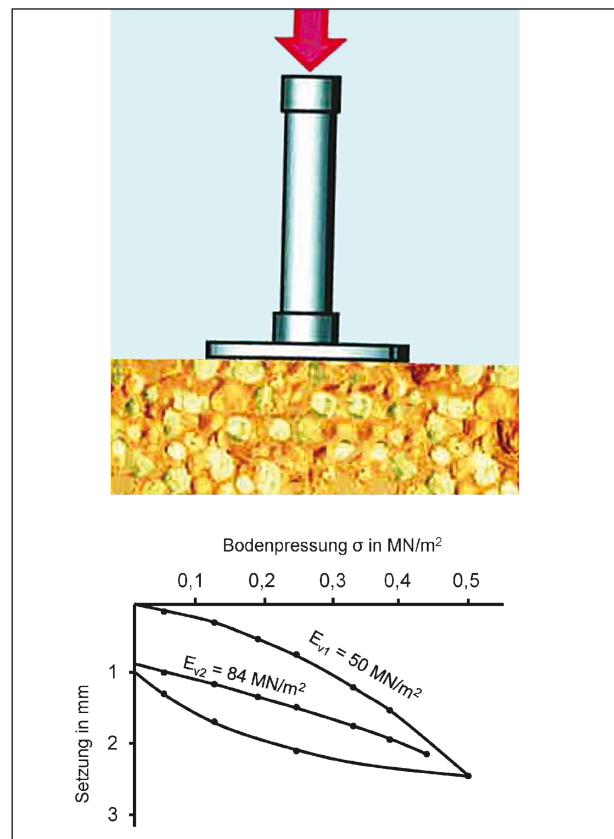


Bild 10: Prinzip des statischen Plattendruckversuchs mit Spannungs-Setzungs Diagramm (FLOSS, 2001)

Neigung der Erstbelastung wird der E_{v1} -Wert und der Zweitbelastung der E_{v2} -Wert berechnet.

3.7.3 Dynamischer Verformungsmodul E_{vd}

Der dynamische Plattendruckversuch ist ein einfaches und schnelles Verfahren um die Tragfähigkeit von Bodenflächen zu überprüfen. Es handelt sich um die Stoßbelastung des Bodens mit dem leichten Fallgewichtsgerät. Aus der gemessenen maximalen Kraft und Setzung, die von Beschleunigungs- bzw. Schwinggeschwindigkeitsaufnehmern ermittelt wird, wird der Verformungsmodul E_{vd} berechnet.

3.7.4 Zusammenhänge

Die Kornzusammensetzung, die Kornform, die Art und Menge der verschiedenen Bestandteile (Kies-, Sand-, Feinanteil) sowie die Verdichtung beeinflussen stark die Tragfähigkeit von Böden (FLOSS et al., 1968; WEINGART, 1998). In der Regel führt ein steigender Grobkornanteil zu höherer Standfestigkeit (FLOSS et al., 1968; BENNERT und MAHER, 2005). Die Eckigkeit und Rauheit der Körner haben Einfluss auf die Trockendichten

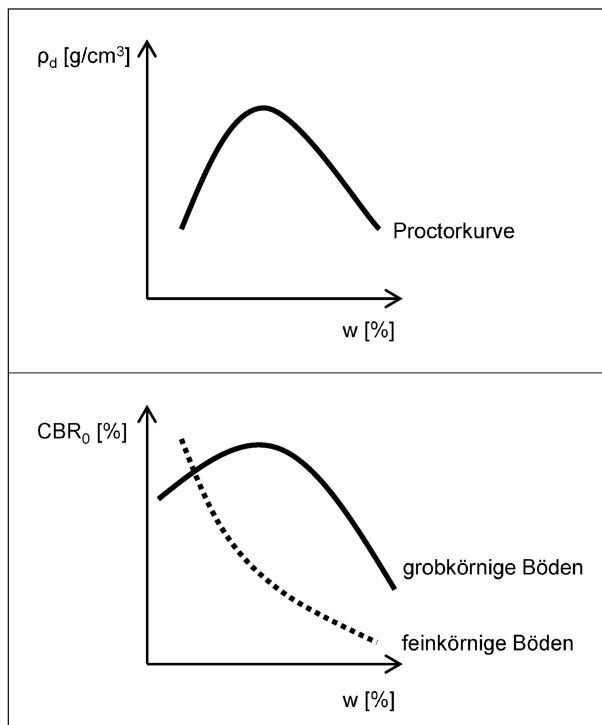


Bild 11: Typische Zusammenhänge zwischen CBR-Werten, Wassergehalt, Trockendichte und Bodenart (BAUMGÄRTEL et al., 2008)

und Verformungswiderstände. Eine zunehmende Ungleichförmigkeit ($C_u = d_{60}/d_{10}$) erhöht ebenso die Verdichtungsfähigkeit und den Verformungswiderstand (SIEDEK und VOSS, 1955). Die Dicke der Schichten als auch die Tragfähigkeit des Untergrunds können auch die erzielbare Tragfähigkeit der Oberfläche stark beeinflussen (SCHWABBAUER et al., 2002).

Typische Zusammenhänge zwischen CBR-Wert, Trockendichte und Wassergehalt sind in Bild 11 dargestellt. Bei feinkörnigen Böden verändern sich die CBR-Werte mit dem Wassergehalt, insbesondere bei Sättigungsgraden größer 90 % (FLOSS, 1973). Die CBR-Werte erhöhen sich bei Entwässerung und verringern sich bei Bewässerung, da sich die Konsistenz der Böden verringert (AMPADU, 2007; BAUMGÄRTEL, 2008). Bei grobkörnigen Böden sind die CBR-Werte hauptsächlich von der Verdichtung abhängig (FLOSS, 2001). Eine Wasserlagerung hat bei grobkörnigen Böden keinen nennenswerten Einfluss auf die CBR-Werte, da diese wegen des geringeren Feinkornanteils wasserunempfindlich sind und keine Schwellung auftritt, die zu einer Auflockerung der Böden führen könnte (MEYER, 1980).

Die Beziehung zwischen dem Verformungsmodul E_v und den Verdichtungseigenschaften (D_{Pr} , ρ , n)

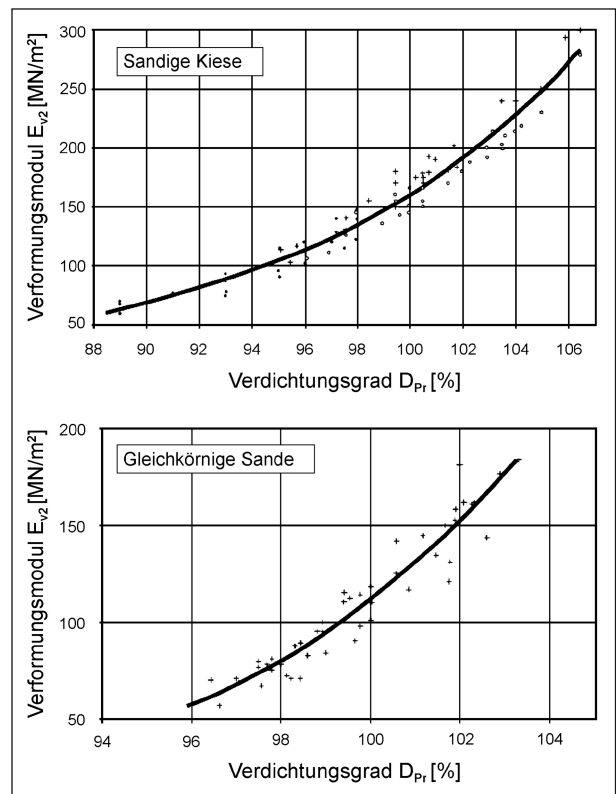


Bild 12: Beziehung zwischen Verdichtungsgrad und Verformungsmodul E_{v2} für sandige Kiese und gleichkörnige Sande nach VOSS (1961)

ist von vielen Faktoren abhängig. Bei nichtbindigen Böden nehmen die Kornabstufung, die Kornform, die Kornelastizität, die Verspannung des Korngerüsts und die Kornzertrümmerung spröder oder poröser Materialien Einfluss (FLOSS, 1997). In Bild 12 sind Zusammenhänge zwischen E_{v2} und D_{Pr} für Kiese und Sande dargestellt. Für beide Materialien steigt die Tragfähigkeit mit zunehmendem Verdichtungsgrad stark an, wobei Kiese bei gleichem Verdichtungsgrad einen höheren Verformungsmodul als Sande aufweisen. Da eine Korrelation E_v - D_{Pr} nur für ein bestimmtes Korngemisch gelten kann, gibt FLOSS (1997) einen allgemeinen Zusammenhang zwischen Verformungsmodul E_{v2} und Porenanteil für Sande und Kiese an (Bild 13).

Bei feinkörnigen Böden ist der Wassergehalt bzw. die Konsistenz der hauptsächliche Einflussfaktor des Verformungsmoduls und deswegen lassen sich keine direkten Zusammenhänge zwischen Verdichtungsgrad und Verformungsmodul aufstellen (FLOSS, 2001). Der Zusammenhang zwischen E_{v2} und der Konsistenzzahl I_c ist in Tabelle 5 angegeben.

Die Tragfähigkeit gemischtkörniger Böden wird vom Verhältnis zwischen Fein- und Grobanteil sowie

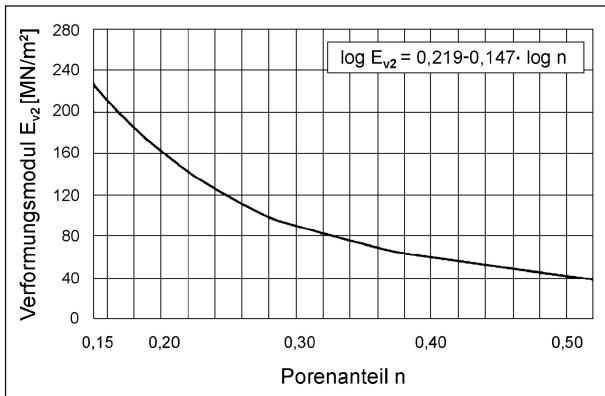


Bild 13: Beziehung zwischen Porenanteil n und Verformungsmodul E_{v2} für Sande und Kiessande nach FLOSS (1970)

I_c	E_{v2} [MN/m ²]
> 0,8	> 15
> 0,9	> 20
> 1,0	> 80
> 1,2	> 45

Tab. 5: Näherungsweise Zuordnung von E_{v2} -Modul und Konsistenzzahl I_c (FLOSS, 1997)

vom Wassergehalt, der Kornzusammensetzung und der Plastizität des Feinanteils bestimmt (FLOSS et al., 1968; FLOSS, 2001). Nach OSTERMAYER (1976) kann die Tragfähigkeit bei Feinkornanteilen von bis zu 25 M.-% auf das tragende Korngerüst des Grobkorns zurückgeführt werden. Bei höheren Feinkornanteilen von 30 M.-% bis 40 M.-% beginnt das Grobkorn in der Feinkornmatrix zu schwimmen, sodass die Tragfähigkeit entsprechender Böden von den Eigenschaften des Feinkorns bestimmt wird. Deswegen ist die Bestimmung eines Verhältnisses zwischen Verformungsmodul und Verdichtungseigenschaften relativ schwierig.

Weiterhin wurden Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Tragfähigkeitswerten ermittelt. FLOSS (1973) hat die Beziehung zwischen CBR-Wert und Verformungsmodul (E_{v1} bzw. E_{v2}) untersucht. Die Ergebnisse sind Bild 14 zu entnehmen. Unterschiedliche Zusammenhänge wurden für bindige und nichtbindige Böden ermittelt. Für bindige Böden konnte eine Korrelation zwischen den beiden Parametern nur für CBR-Werte kleiner 12 % festgestellt werden. Bei höheren Werten sind die Parameter nicht vergleichbar.

WEINGART (1998) hat unterschiedliche Beziehungen zwischen CBR-Wert und Verformungsmodul E_{v2} zusammengefasst (Bild 15). Die ermittelten Kur-

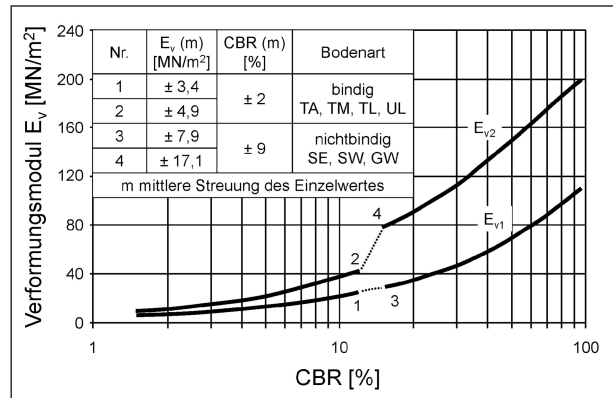


Bild 14: Beziehung zwischen Verformungsmodul E_v und CBR-Wert (FLOSS, 1973)

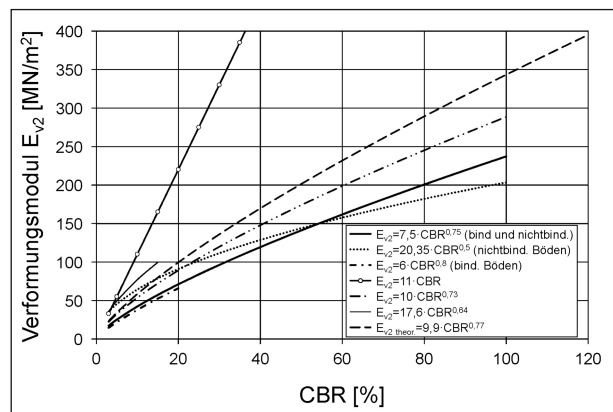


Bild 15: Beziehungen zwischen CBR-Wert und Verformungsmodul E_{v2} (WEINGART, 1998)

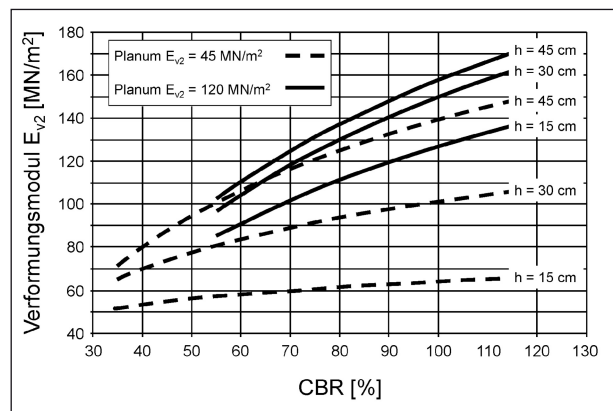


Bild 16: Zusammenhang zwischen dem CBR-Wert und dem Verformungsmodul E_{v2} eines Tragschichtmaterials in Abhängigkeit von dessen Schichtdicke und des Verformungsmodul E_{v2} des Untergrunds (SCHWABBAUER et al., 2002)

ven zeigen starke Unterschiede im Verhalten der Böden, sodass keine allgemeingültige Gleichung für alle Böden aufgestellt werden kann. Dennoch ist ersichtlich, dass die E_{v2} -Werte mit zunehmenden CBR-Werten steigen. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von SCHWABBAUER et al. (2002) festgestellt.

E_{v2} [MN/m ²]	E_{vd} [MN/m ²]	E_{v2}/E_{vd} [-]
180	80	2,25
150	70	2,14
120	55	2,18
100	45	2,22
80	40	2,00
60	30	2,00
45	25	1,80
20	15	1,33

Tab. 6: Zusammenhang zwischen den Verformungsmodul E_{v2} und E_{vd} bei nichtbindigen Böden nach PREGL (MASLOWSKI, 2007)

Eine Beziehung zwischen CBR und E_{v2} unter Berücksichtigung der Dicke der Tragschicht und der Tragfähigkeit des Untergrunds wurden von SCHWABBAUER et al. (2002) ermittelt (Bild 16). Die Tragfähigkeitswerte nehmen mit zunehmender Dicke und zunehmendem Verformungsmodul des Planums zu.

Zwischen dem statischen und dynamischen Verformungsmodul E_{v2} und E_{vd} ergibt sich ebenfalls ein Zusammenhang, wie die Werte in Tabelle 6 nach PREGL (MASLOWSKI, 2007) zeigen. Üblich ist ein Verhältnis E_{v2}/E_{vd} von etwa 2.

4 Ausgangsmaterialien

Im Rahmen dieser Forschung wurden drei verschiedene Arten von Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn von 32 mm ausgewählt: einem Gemisch aus natürlichen, ungebrochenen Gesteinskörnungen, einem Gemisch aus gebrochenen Gesteinskörnungen und einem Gemisch aus rezyklierten Gesteinskörnungen. Für die Herstellung von Mischungen mit unterschiedlichem Feinkorn- bzw. Oberbodenanteil wurden ein feinkörniger Boden und ein Oberboden verwendet.

4.1 Ungebrochene Gesteinskörnung (RK)

Als natürliches, ungebrochenes Material wurde ein Frostschutzkies von 0/32 mm der Firma Glück Beteiligungs-GmbH verwendet. Das Material ist ein Baustoffgemisch nach TL SoB-StB (FGSV, 2004) und besteht hinsichtlich seiner Korngrößenver-

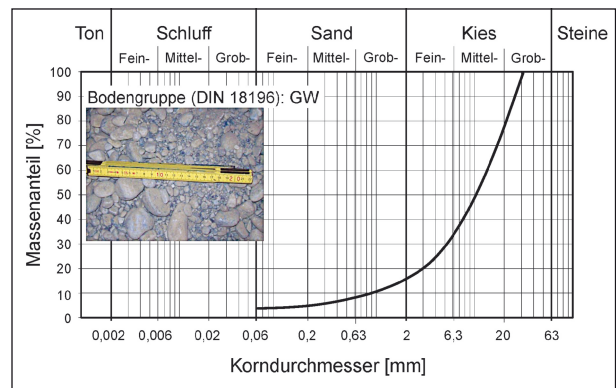


Bild 17: Korngrößenverteilung der ungebrochenen Gesteinskörnung

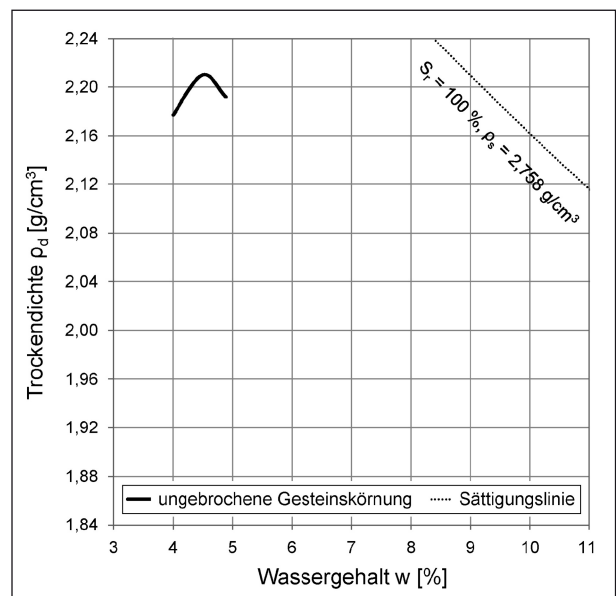


Bild 18: Proctorkurve des ungebrochenen Materials

teilung (Bild 17) aus 85 M.-% Kies, 11 M.-% Sand und hat einen Feinkornanteil von ungefähr 4 M.-%. Dieses Material wird nach DIN 18196 einem weitgestuften Kies (GW) zugeordnet.

Die Proctordichte des Materials wurde nach DIN 18127 bestimmt. Sie liegt bei $\rho_{Pr} = 2,210 \text{ g/cm}^3$ bei einem Wassergehalt von $w_{Pr} = 4,5 \%$ (Bild 18).

Im Folgenden wird die Abkürzung RK (Rundkorn) für die ungebrochene Gesteinskörnung verwendet.

4.2 Gebrochene Gesteinskörnung (BK)

Als gebrochene Gesteinskörnung wurde ein Kalkstein 0/32 mm der Firma H. Geiger GmbH Stein- und Schotterwerke verwendet. Die an drei Proben ermittelten Korngrößenverteilungen des Materials

sind in Bild 19 dargestellt. Der Kiesanteil des Materials variiert zwischen 60 M.-% und 75 M.-%, der Sandanteil zwischen 20 M.-% und 30 M.-% und der Feinkornanteil zwischen 5 M.-% und 8,5 M.-%. Die Bandbreite der festgestellten Kornverteilungskurven kann durch Entmischungsprozesse während des Transports des nahezu trockenen Materials erklärt werden. Aufgrund der großen Probenmengen gestaltete sich die nach der Anlieferung durchgeführte Homogenisierung schwierig. Diese Gesteinskörnung ist nach DIN 18196 als schluffiger Kies (GU) bzw. weit gestufter Kies GW klassifiziert.

Die Proctordichte des Materials liegt bei $\rho_{Pr} = 2,001 \text{ g/cm}^3$ bei einem optimalem Wassergehalt von $w_{Pr} = 7,2 \%$ (Bild 20). Bei höherem Wassergehalt tritt Wasser aus dem Proctortopf aus, womit der maximale Wassergehalt erreicht ist.

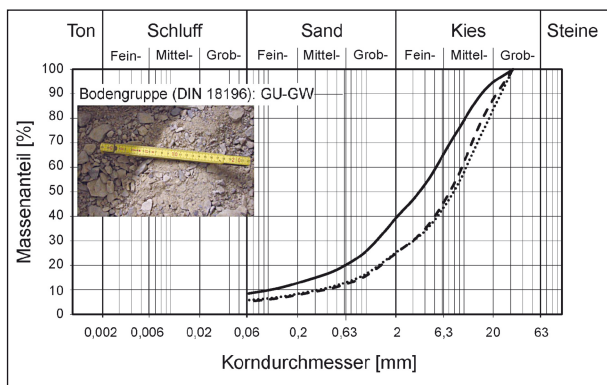


Bild 19: Korngrößenverteilung der gebrochenen Gesteinskörnung

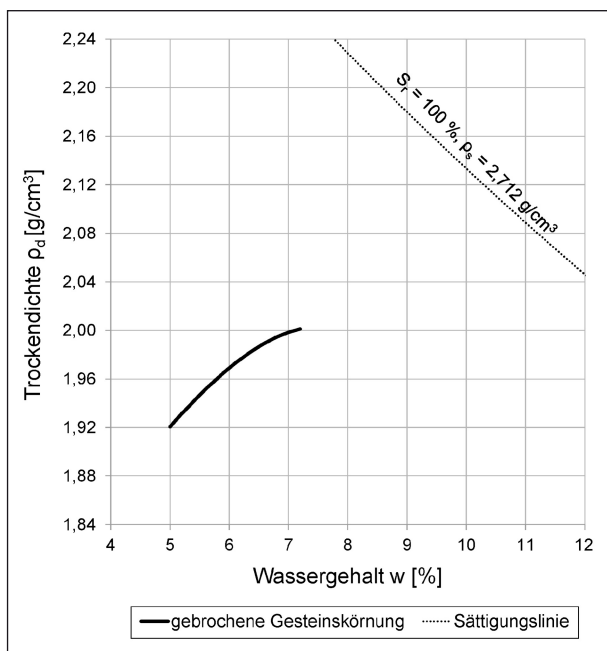


Bild 20: Proctorkurve der gebrochenen Gesteinskörnung

Nachfolgend wird die Abkürzung BK (Breckkorn) für die Gesteinskörnung aus gebrochenem Material verwendet.

4.3 Rezyklierte Gesteinskörnung (RC)

Ein Betonbruch 0/32 mm der Firma Ettengruber wurde als rezyklierte Gesteinskörnung verwendet. Es wurden zwei Versuche zur Ermittlung der Korngrößenverteilung durchgeführt. Die Sieblinien sind in Bild 21 dargestellt. Der Feinkornanteil des Materials variiert von 3,7 M.-% bis 4,5 M.-%, der Sandanteil zwischen 20,8 M.-% und 25,7 M.-% und der Kiesanteil zwischen 70 M.-% und 75 M.-%. Es wird nach DIN 18196 einem weit gestuften Kies (GW) zugeordnet.

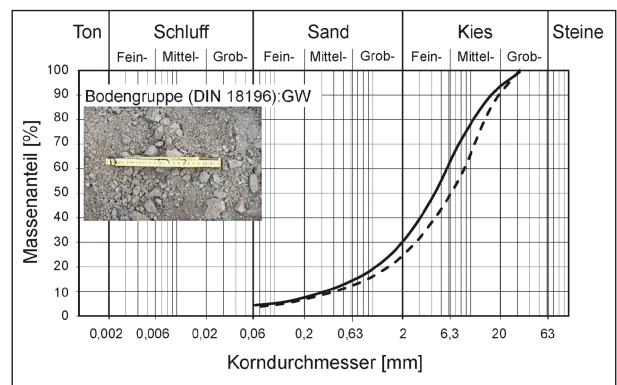


Bild 21: Korngrößenverteilung des rezyklierten Materials

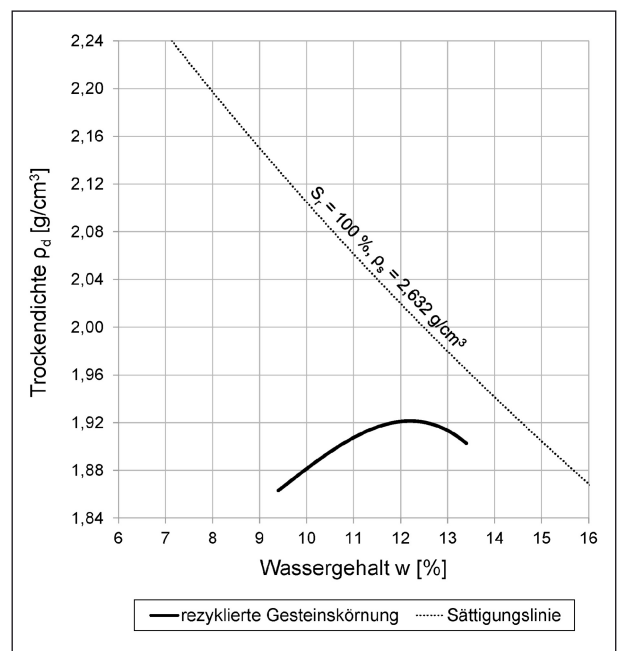


Bild 22: Proctorkurve der rezyklierten Gesteinskörnung

Die Proctordichte des Materials wurde nach DIN 18127 mit $\rho_{Pr} = 1,921 \text{ g/cm}^3$ bei einem Wassergehalt von $w_{Pr} = 12,2 \%$ bestimmt (Bild 22).

Im Weiteren wird die Abkürzung RC für den Recycling-Baustoff benutzt.

4.4 Feinkörniger Boden (Si)

Als feinkörniger Boden wurde das aus dem Waschvorgang im Kieswerk stammende feinkörnige Material der Firma Glück Beteiligungs-GmbH verwendet. Es handelt sich um einen Schluff mit einem Tonanteil von 27 M.-% und einem Sandanteil von ca. 13 M.-%. Die Korngrößenverteilung des Bodens ist in Bild 23 dargestellt. Nach DIN 18196 handelt es sich bei dem Boden um einen leicht plastischen Ton (TL) (siehe Bild 24). Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze beträgt $w_P = 15,1 \%$, an der Fließgrenze $w_L = 28,4 \%$.

Der organische Anteil C_{org} und der CO_3 -Anteil wurden am Institut für Ökologie, Standortkunde und Bodenschutz der TU Berlin mit 0,27 M.-% bzw. 7,98 M.-% bestimmt.

Nachfolgend wird die Abkürzung Si (Schluff) für den feinkörnigen Boden verwendet.

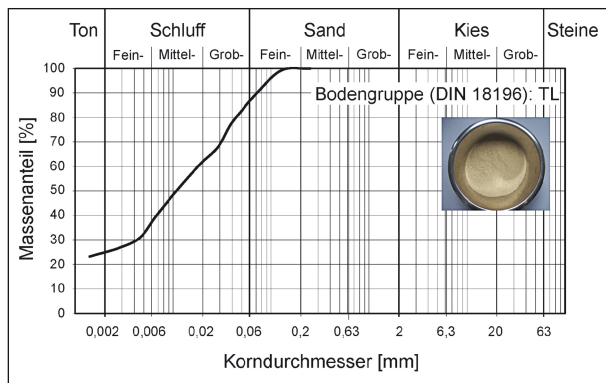


Bild 23: Korngrößenverteilung des feinkörnigen Bodens

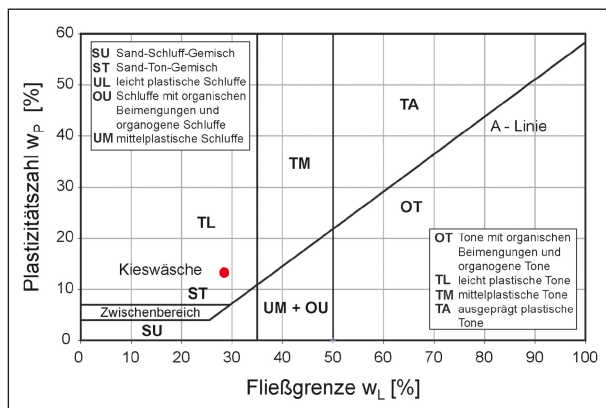


Bild 24: Plastizitätsdiagramm für den feinkörnigen Boden

4.5 Natürlicher Oberboden (Ob)

Als Oberboden wurde ein natürlicher Oberboden mit einem Größtkorn von 15 mm der Firma Ganser Erden aus dem Münchner Umland verwendet. Die Korngrößenverteilung des Bodens ist aus Bild 25 (durchgezogene Linie) ersichtlich. Der Glühverlust V_{gl} des Oberbodens liegt bei 5,5 M.-%.

Um den Einfluss von Grobanteilen im Oberboden auf die Versuchsmischungen zu reduzieren, wurde das Material vor Beimischung mit einem Sieb der Maschenweite 0,5 mm gesiebt. Die Korngrößenverteilung des gesiebten Materials ist in Bild 25 (gestrichelte Linie) dargestellt. Die Fließgrenze des gesiebten Oberbodens wurde mit $w_L = 48,6 \%$ und die Ausrollgrenze mit $w_P = 27,0 \%$ bestimmt. Im Plastizitätsdiagramm liegt der Boden sehr nahe an der A-Linie (Bild 26). Nach DIN 18196 entspricht das Material einem mittelplastischen bis ausgeprägt plastischen Ton (TM bzw. TA) bzw. einem mittelplastischen Schluff (UM). Der organische Anteil V_{gl} des gesiebten Materials erhöht sich gegenüber dem Ausgangszustand aufgrund des Abtrennens der Anteile $> 0,5 \text{ mm}$ auf 8,5 M.-%.

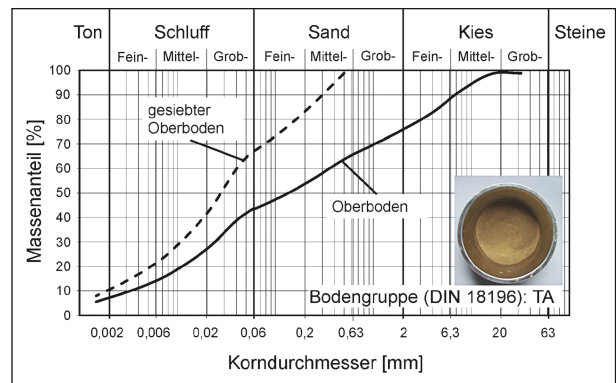


Bild 25: Korngrößenverteilung des Oberbodens

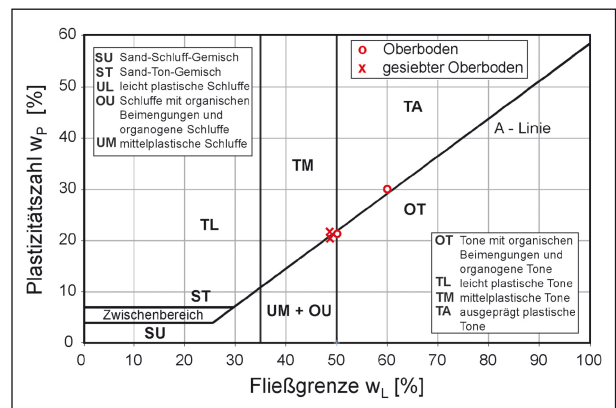


Bild 26: Plastizitätsdiagramm für den Oberboden

Der organische Anteil C_{org} sowie der CO_3 -Anteil wurden vom Institut für Ökologie, Standortkunde und Bodenschutz der TU Berlin mit 3,24 M.-% bzw. 0,92 M.-% bestimmt.

Nachfolgend wird die Abkürzung Ob für den Oberboden verwendet.

5 Versuchsmischungen

Die Versuchsmischungen wurden aus den in Kapitel 4 beschriebenen Ausgangsmaterialien zusammengesetzt. Sieben Versuchsböden mit feinkörnigem Boden (Si) und elf mit Oberboden (Ob) wurden untersucht. Die Böden wurden von Hand gemischt.

Die Namensgebung der Mischungen orientiert sich an den Ausgangsmaterialien und dem Feinanteil. Die ersten zwei Buchstaben bezeichnen das 0/32 mm Material (RK, BK, RC), gefolgt von der Ziffernfolge für die feinkörnigen Materialien (Si für Kieswäsche, Ob für Oberboden und SiOb, wenn beide verwendet werden). Die letzten beiden Ziffern und der Buchstabe F bezeichnen den Zielwert für den Feinanteil der jeweiligen Mischung.

5.1 Versuchsmischungen aus ungebrochenen Gesteinskörnungen

Die vorgesehenen Mischungen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Für die Herstellung der Mischungen wurde feinkörniger Boden (Si) zum ungebrochenen Kies 0/32 mm hinzugefügt, um zwei Mischungen der Boden-

gruppe GU herzustellen: eine mit 8 M.-% (RK.Si.08F) und eine mit 14 M.-% (RK.Si.14F) Feinkornanteil.

Als nächstes wurden Versuchsböden mit Oberboden hergestellt. Dazu wurde dem zuvor angefertigten Versuchsboden mit 8 M.-% Feinkornanteil (RK.Si.08F) Oberboden mit einem Anteil von 5 M.-% (RK.SiOb.11F), 10 M.-% (RK.SiOb.14F) und 15 M.-% (RK.SiOb.17F) zugegeben. Außerdem wurde eine Mischung mit 16 M.-% Oberboden (RK.Ob.14F) hergestellt, indem der Oberboden direkt mit dem Ausgangsmaterial ohne Zugabe von Schluff vermischt wurde.

5.2 Versuchsböden aus gebrochenen Gesteinskörnungen

Die Versuchsböden aus gebrochenen Gesteinskörnungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Nach der zuerst ermittelten Sieblinie des gebrochenen Kalksteins beträgt sein Feinanteil 8,5 M.-%. Deshalb wurde er direkt als Versuchsboden untersucht. Außerdem wurden zwei zusätzliche Mischungen mit feinkörnigem Boden (Si) hergestellt. 7,5 M.-% und 12,8 M.-% des leicht plastischen Tons wurden dazu dem Kalkstein hinzugefügt, um zwei Versuchsböden der Bodengruppe GU und GU* herzustellen: einen mit 14 M.-% (BK.Si.14F) und einen mit ca. 17 M.-% (BK.Si.17F) Feinkornanteil.

Zusätzlich wurden drei Versuchsmischungen aus dem gebrochenen Kalkstein und dem Oberboden mit 5 M.-% (BK.Ob.11F), 10 M.-% (BK.Ob.14F) und 15 M.-% (BK.Ob.17F) Oberbodenanteil hergestellt.

	Ausgangsmaterial	Zugabe	Angestrebter Feinkornanteil der Versuchsmischung [M.-%]	Oberbodenanteil der Versuchsmischung [M.-%]	Kurzbezeichnung
Mischungen mit Feinkorn	0/32 mm ungebrochene Gesteinskörnung (RK)	+ 5,3 M.-% Si	8	-	RK.Si.08F
		+ 14,0 M.-% Si	14	-	RK.Si.14F
Mischungen mit Oberboden	Mischung aus 0/32 mm ungebrochener Gesteinskörnung und Feinkorn mit 8 % Feinkornanteil (RK.Si.08F)	+ 5,3 M.-% Ob	11	5	RK.SiOb.11F
		+ 11,1 M.-% Ob	14	10	RK.SiOb.14F
		+ 17,6 M.-% Ob	17	15	RK.SiOb.17F
	0/32 mm ungebrochene Gesteinskörnung (RK)	+ 19,0 M.-% Ob	14	16	RK.Ob.14F

Tab. 7: Versuchsmischungen aus ungebrochenen Gesteinskörnungen

	Ausgangsmaterial	Zugabe ^[1]	Angestrebter Feinkornanteil der Versuchsmischung [M.-%]	Oberbodenanteil der Versuchsmischung [M.-%]	Kurzbezeichnung
Mischungen mit Feinkorn	0/32 mm gebrochene Gesteinskörnung (BK)	-	8,5	-	BK.08F ^[2]
		+ 7,5 M.-% Si	14,0	-	BK.Si.14F
		+ 12,8 M.-% Si	17,4	-	BK.Si.17F
Mischungen mit Oberboden		+ 5,3 M.-% Ob	11,5	5	BK.Ob.11F
		+ 11,1 M.-% Ob	14,4	10	BK.Ob.14F
		+ 17,6 M.-% Ob	17,4	15	BK.Ob.17F

^[1] Berechnet mit einem Feinkornanteil für den gebrochenen Kalkstein von 8,5 %
^[2] Der Versuchsboden BK.08F entspricht dem Ausgangsmaterial BK

Tab. 8: Versuchsmischungen aus gebrochenen Gesteinskörnungen

5.3 Versuchsböden aus rezyklierten Gesteinskörnungen

Die Versuchsböden aus rezyklierten Gesteinskörnungen sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Wie bei den ungebrochenen Gesteinskörnungen wurde der leicht plastische Ton dem 0/32 mm Recyclingmaterial hinzugefügt, um zwei Mischungen herzustellen: eine mit 8 M.-% (RC.Si.08F) und eine mit 14 M.-% (RC.Si.14F) Feinkornanteil.

Zu der erzeugten Mischung mit 8 M.-% Feinkornanteil (RC.Si.08F) wurde als nächstes Oberboden hinzugefügt, um drei Versuchsböden mit 5 M.-% (RC.SiOb.11F), 10 M.-% (RC.SiOb.14F) und 15 M.-% (RC.Si.Ob.17F) Oberbodenanteil herzustellen. Außerdem wurde eine weitere Mischung aus 15 M.-% Oberboden hergestellt (RC.Ob.14F), indem Oberboden direkt mit dem Ausgangsmaterial ohne Zugabe von Schluff vermischt wurde.

6 Laboruntersuchungen

6.1 Klassifizierungsversuche

Zur grundlegenden Beschreibung der bodenmechanischen Eigenschaften wurden Klassifizierungsversuche durchgeführt. Diese beinhalten die Bestimmung des Wassergehaltes nach DIN 18121-1, die Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123, die Bestimmung der Korndichte nach DIN 66137-2 und die Bestimmung des Glühverlustes nach DIN 18128.

6.2 Proctorversuche

Das Verdichtungsverhalten der Böden wird im Labor mit dem nach DIN 18127 genormten Proctorversuch untersucht. Nach der Norm wird der zu untersuchende Boden in Abhängigkeit von der maximalen Korngröße in Versuchszylindern mit unter-

	Ausgangsmaterial	Zugabe	Angestrebter Feinkornanteil der Versuchsmischung [M.-%]	Oberbodenanteil der Versuchsmischung [M.-%]	Kurzbezeichnung
Mischungen mit Feinkorn	0/32 mm Recyclingbaustoff (RC)	+ 4,4 M.-% Si	8,0	-	RC.Si.08F
		+ 13,0 M.-% Si	14,0	-	RC.Si.14F
Mischungen mit Oberboden	Mischung aus 0/32 mm Recycling Baustoff und Feinkorn mit 8 M.-% Feinkornanteil (RC.Si.08F)	+ 5,3 M.-% Ob	11,5	5	RC.SiOb.11F
		+ 11,1 M.-% Ob	14,4	10	RC.SiOb.14F
		+ 17,6 M.-% Ob	17,4	15	RC.SiOb.17F
	0/32 mm Recyclingbaustoff (RC)	+ 17,6 M.-% Ob	14,0	15	RC.Ob.14F

Tab. 9: Versuchsmischungen aus rezyklierten Gesteinskörnungen

schiedlichen Durchmessern und Höhen lagenweise eingebaut und verdichtet. Für ein Größtkorn von 32 mm ist ein Versuchszyylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 125 mm (zzgl. Aufsatzring) vorgesehen. Da im Rahmen dieser Forschung CBR-Werte für jede verdichtete Probe ermittelt werden, wird für die Probenherstellung der gemäß TP BF-StB – Teil 7.1 (FGSV, 2012c) 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 (Bild 27).

Im Proctorversuch erfolgt die Verdichtung über ein genormtes Fallgewicht, das mit einer bestimmten Anzahl an Schlägen das lagenweise eingebaute Material verdichtet. Für den Zylinder mit 150 mm Durchmesser wird die Probe in 3 Schichten mit je 22 Schlägen verdichtet (Standard Proctor Energie). Die Proben werden ohne Verwendung einer Stahlplatte verdichtet.

Der Versuch wird für jede Versuchsmischung mit mindestens fünf unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt. Die Bestimmung der durch die Verdichtung erreichten Trockendichte ρ_d für den jeweiligen Wassergehalt erfolgt über die Bestimmung der Feuchtmasse des eingebauten Bodens und den zugehörigen Wassergehalt w . Der Wassergehalt der Proben wird nach DIN 18121-1 ermittelt, nachdem der CBR-Versuche abgeschlossen ist (nach der Bestimmung der Dichte werden die Proben für die CBR-Versuch verwendet). Außerdem wird an dem nach Herstellung des Probekörpers nicht verwendeten Material der Wasser-

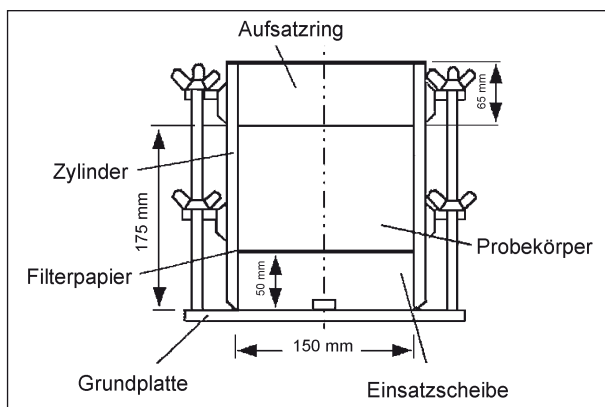


Bild 27: Proctortopf bestehend aus Zylinder, Aufsatzring, Grundplatte und Einsatzscheibe (TP BF-StB – Teil B 7.1)

gehalt bestimmt. Die ermittelten Wertepaare (ρ_d, w) werden anschließend im Trockendichte-Wassergehalts-Diagramm aufgetragen. Durch die Ermittlung einer Ausgleichskurve wird die Proctorkurve erzeugt, deren Scheitelpunkt die für die angewandte Verdichtungsarbeit beim optimalen Wassergehalt w_{Pr} erreichbare Trockendichte, die sogenannte Proctordichte ρ_{Pr} , kennzeichnet.

6.3 CBR-Versuche

Die Durchführung von CBR-Versuchen ist in den TP BF-StB – Teil B 7.1 (FGSV, 2012c) beschrieben. Der CBR-Versuch ist gewöhnlich auf Proben mit einem Größtkorn von 22,4 mm beschränkt und wird beim optimalen Wassergehalt durchgeführt. Im Rahmen dieser Forschung wurden CBR-Versuche jedoch für alle Bodenproben durchgeführt, die im Proctorversuch verdichtet wurden (siehe Kapitel 6.2), also Proben mit einem Größtkorn von 32 mm.

Nachdem der Probekörper mit Proctorenergie verdichtet worden ist, wird eine gelochte Grundplatte mit Spannschrauben auf die Oberfläche des verdichteten Bodens gelegt und befestigt. Dann wird die Form umgedreht, die Grundplatte und die Einsatzscheiben werden entfernt und zwei Belastungsscheiben werden auf die Oberfläche der Probe angebracht. Das Eindringen des Stempels ist durch eine kreisförmige Öffnung in der Mitte der Belastungsscheiben möglich (Bild 28).

Vor Beginn des Tests ist eine Vorlast von 40 N auf den Druckstempel aufzubringen. Danach wird die Null-Ablesung der Kraft- und Tiefenmeseinrichtung vorgenommen. Der Stempel wird mit einer

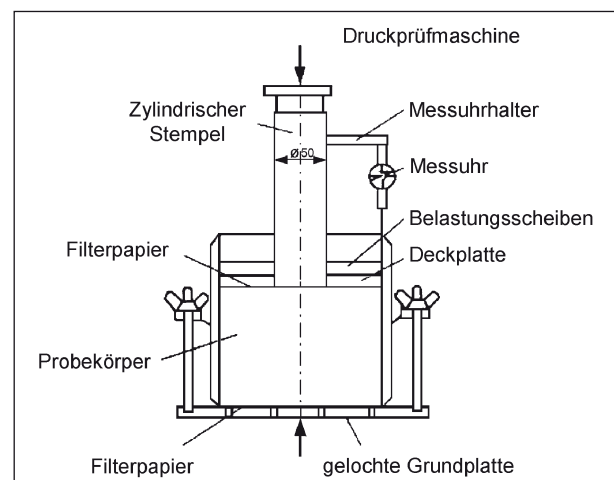


Bild 28: Versuchsaufbau für die Bestimmung des CBR-Werts (TP BF-StB – Teil B 7.1)

Eindringgeschwindigkeit von 1,25 mm/min vorgegeben (Bild 29). Die Kraft und die Eindringtiefe werden gemessen. Der Test läuft solange, bis die Eindringtiefe von 10 mm erreicht ist.

Bei Bedarf werden Korrekturen im Kraft-Eindringtiefe-Diagramm vorgenommen, falls der Stempel am Anfang des Versuchs nicht vollständig auf der Probenoberfläche anliegt. Anschließend wird die Eindringkraft für Tiefen von 2,5 mm und 5 mm bestimmt. Die CBR-Werte werden für beide Tiefen errechnet. Der größere der beiden Werte ist als CBR-Wert anzunehmen.

Streuungen in den Ergebnissen der CBR-Werte lassen sich durch das Verhältnis zwischen dem Stempeldurchmesser und dem Größtkorn der Probe erklären. Sofern der Stempel direkt oberhalb eines Kieskornes mit einem Durchmesser von

ca. 30 mm aufsitzt, ergeben sich vergleichsweise größere CBR-Werte, als wenn sich unterhalb des Stempels Bodenmaterial mit deutlich kleineren Korngrößen befindet, da das feinere Material leichter verformt werden kann als ein großes Kieskorn.

6.4 Gesättigte Durchlässigkeit

Für alle Mischungen wurden zur Ermittlung der gesättigten Durchlässigkeit zwei Versuche bei verschiedenen Einbaubedingungen durchgeführt. Eine Probe wurde bei der Proctordichte ($D_{Pr} = 100\%$) verdichtet und eine Probe bei dem Proctor-Wassergehalt, aber für einen Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 97\%$.

Die Versuche wurden nach den in DIN 18130-1 beschriebenen Verfahren mit konstantem hydraulischem Gefälle durchgeführt. In Abhängigkeit von der Versuchsmischung und des Verdichtungsgrads wurden unterschiedliche Einrichtungen herangezogen.

Wird eine relativ hohe Durchlässigkeit erwartet, wird ein Proctortopf mit einem Durchmesser von 150 mm als Versuchszylinder verwendet (Bild 30). Konstante hydraulische Potentiale werden an der Oberfläche und am Boden der Probe angebracht, um das gewünschte hydraulische Gefälle zu erreichen. Standrohre werden in verschiedenen Ebenen der Proben eingebaut, um das hydraulische Potential zu bestimmen. Um die Wassermenge, die in bestimmten Zeitabständen durch die Probe fließt, zu bestimmen, wird ein Messzylinder verwendet. Aus den Messungen lässt sich nach Versuchsende der Durchlässigkeitsbeiwert k berechnen.



Bild 29: Durchführung eines CBR-Versuchs

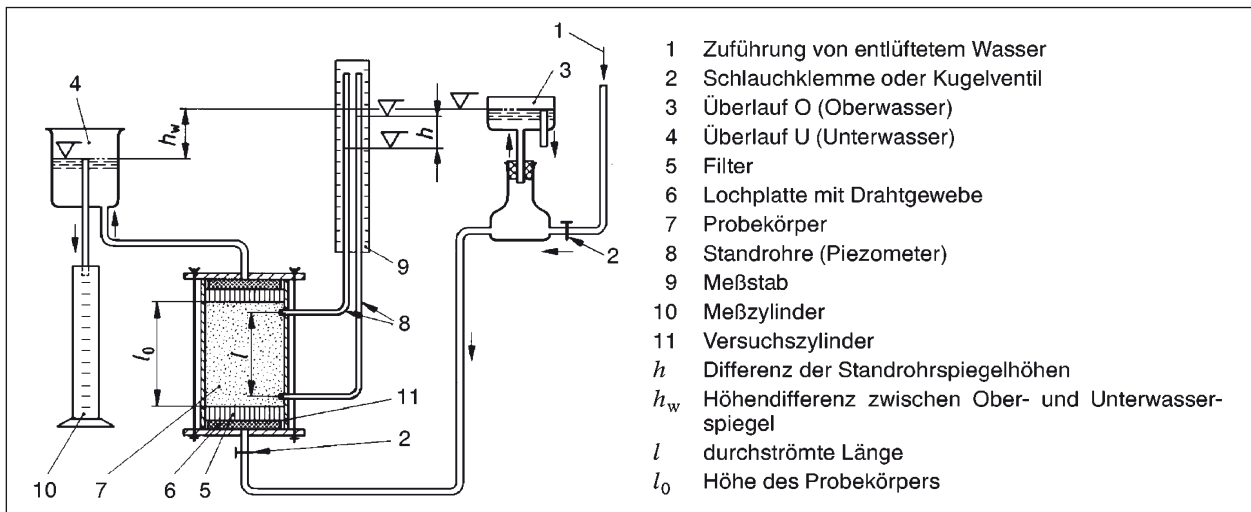


Bild 30: Versuchsaufbau für die Bestimmung der Durchlässigkeit (DIN 18130-1)

Bei höherem Feinkornanteil bzw. Verdichtungsgrad werden in der Regel die Versuche in einer Druckzelle mit isotroper statischer Belastung durchgeführt.

7 Laborergebnisse

7.1 Klassifizierungsversuche

Die Ergebnisse der Klassifizierungsversuche sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Der Feinkornanteil der hergestellten Mischungen aus RK variiert zwischen 9 M.-% und 17,7 M.-%, aus BK zwischen 6,6 M.-% und 15,5 M.-% und aus RC zwischen 7,6 M.-% und 14,6 M.-% (Mittelwerte der Korngrößenverteilungen). Der Feinkornanteil der BK-Mischungen weicht geringfügig von den Zielwerten ab. Alle Mischungen aus gebrochenen Gesteinskörnungen weisen im Vergleich zu dem Zielwert einen geringeren Feinkornanteil von ca. 1,5 M.-% auf. Bei den RC-Mischungen weichen die Mischungen mit dem höheren Oberboden-

anteil RC.SiOb.17F und RC.Ob.14F von den Zielwerten ab, wobei ihr Feinkornanteil mit 14,6 M.-% bzw. 10,2 M.-% unter den Zielwerten von 17 M.-% bzw. 14 M.-% liegt.

In Bild 31 ist das Sieblinienband der untersuchten Materialien dargestellt. Die Kornverteilungslinien der einzelnen Versuchsböden sind in Anlage 1 enthalten.

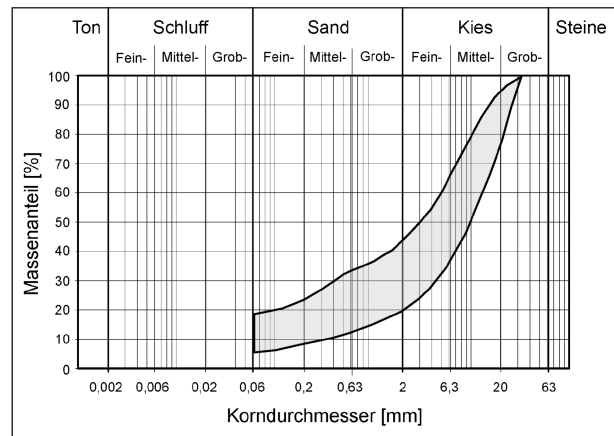


Bild 31: Sieblinienband der im Labor untersuchten Mischungen

	Bodengruppe nach DIN 18196	Feinkornanteil ^[1] [M.-%]	Korndichte ρ_s [g/cm ³]	Glühverlust V_{gl} [M.-%]
RK.Si.08F	GU	9,0	2,747	
RK.Si.14F	GU/GU*	15,4	2,777	
RK.SiOb.11F	GU	11,0	2,741	1,29
RK.SiOb.14F	GU	13,4	2,716	1,44
RK.SiOb.17F	GU*	17,7	2,733	2,41
RK.Ob.14F	GU	13,4	2,754	1,38
BK.08F	GU	6,6	2,712	
BK.Si.14F	GU	12,4	2,734	
BK.Si.17F	GU*	15,5	2,728	
BK.Ob.11F	GU	9,8	2,721	0,86
BK.Ob.14F	GU	11,7	2,734	1,19
BK.Ob.17F	GU*	15,5	2,731	1,82
RC.Si.08F	GU	7,6	2,675	
RC.Si.14F	GU	13,2	2,666	
RC.SiOb.11F	GU	10,1	2,641	2,06
RC.SiOb.14F	GU	14,3	2,667	2,68
RC.SiOb.17F	GU/GU*	14,6	2,657	2,80
RC.Ob.14F	GU	10,2	2,617	2,92

^[1] Falls die Korngrößenverteilung in mehr als einer Probe ermittelt wurde, ist aus allen Versuchen der durchschnittliche Wert als Feinkornanteil der Mischung berücksichtigt worden

Tab. 10: Ergebnisse der Klassifizierungsversuche

7.2 Proctorversuche

Die für die verschiedenen Versuchsböden erstellten Proctorkurven sind in Bild 32, Bild 33 und Bild 34 dargestellt. Die jeweiligen Proctorwassergehalte und -dichten sind in Tabellen 11, 12 und 13 zusammengefasst.

Bei den Mischungen aus BK hat die Zugabe von feinkörnigen Böden (Si bzw. Ob) im Vergleich zum Ausgangsmaterial eine höhere Proctordichte bei höherem Wassergehalt zur Folge. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die Mischungen mit ungebrochenen Gesteinskörnungen. Insbesondere für die Mischungen mit höherem Oberbodenanteil zeigt sich, dass die Proctordichte abnimmt.

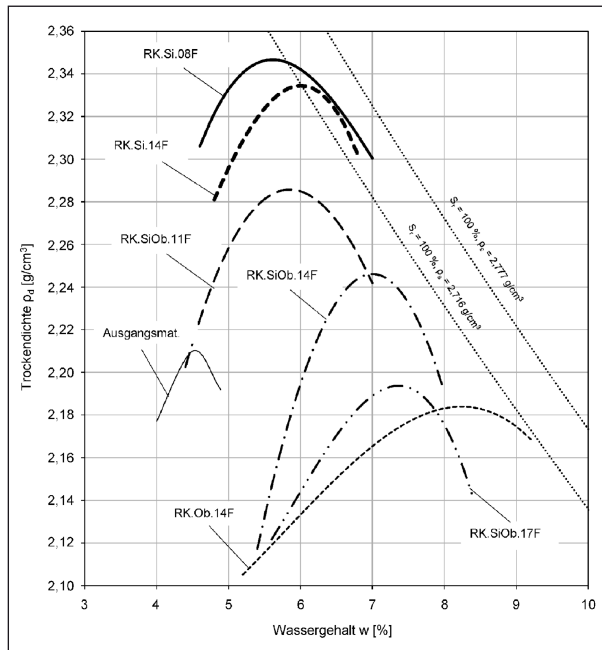


Bild 32: Proctorkurven für die Mischungen aus ungebrochenen Gesteinskörnungen

	Proctorwasser gehalt w_{Pr} [%]	Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]
RK.Si.08F	5,62	2,347
RK.Si.14F	6,01	2,334
RK.SiOb.11F	5,85	2,286
RK.SiOb.14F	7,00	2,246
RK.SiOb.17F	7,29	2,191
RK.Ob.14F	7,61	2,184

Tab. 11: Proctordichte und -wassergehalt der Versuchsböden aus ungebrochenen Gesteinskörnungen

Von den ermittelten Kurven (RK- und BK-Mischungen) ist auch ersichtlich, dass ein zunehmender Oberbodenanteil zu niedrigerer Proctordichte führt.

Die Bestimmung der maximalen Trockendichte für die Mischungen aus rezyklierten Baustoffen war im Vergleich zu den Mischungen mit natürlichen Gesteinskörnungen relativ schwierig, da die Versuchswerte zum Teil stark schwanken und ihre Anpassung mit einer Proctorkurve mit Schwierigkeiten verbunden ist.

Die einzelnen Proctorkurven mit den ermittelten Punkten aller untersuchten Mischungen sind in Anlage 2 abgebildet.

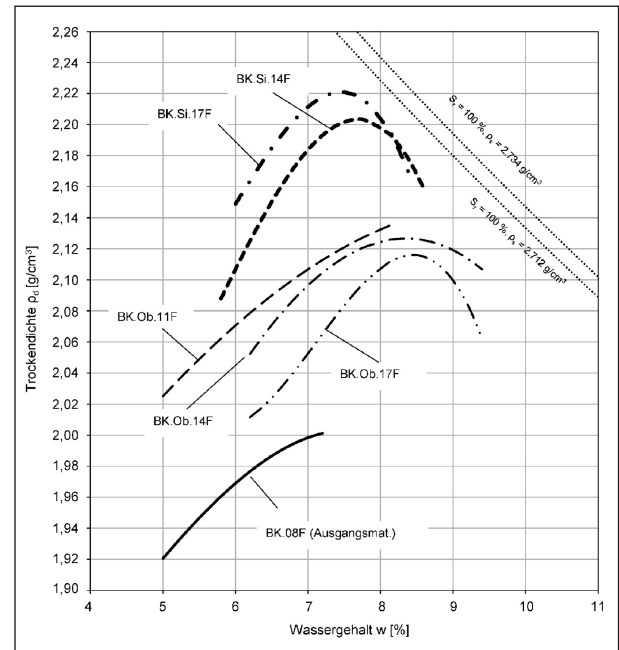


Bild 33: Proctorkurven für die Mischungen aus gebrochenen Gesteinskörnungen

	Proctorwasser gehalt w_{Pr} [%]	Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]
BK.08F	7,20	2,001
BK.Si.14F	7,68	2,203
BK.Si.17F	7,46	2,221
BK.Ob.11F	8,10	2,134
BK.Ob.14F	8,33	2,127
BK.Ob.17F	8,45	2,116

Tab. 12: Proctordichte und -wassergehalt der Versuchsböden aus gebrochenen Gesteinskörnungen

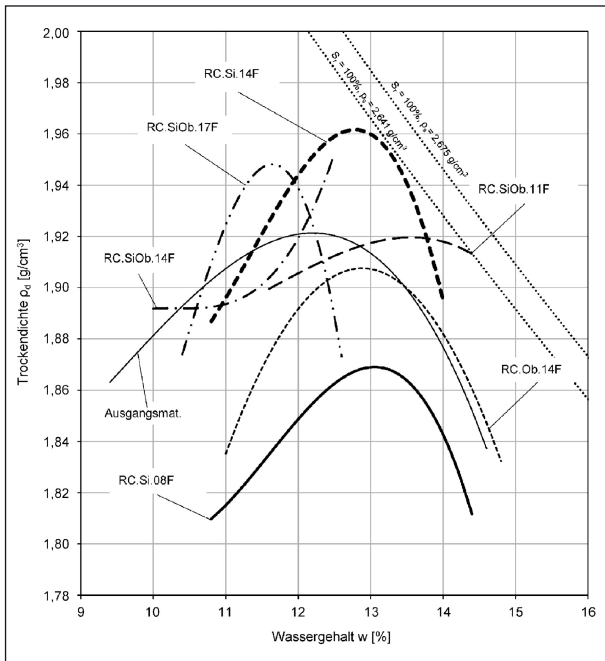


Bild 34: Korngrößenverteilungen der Mischungen aus rezyklierten rezyklierten Gesteinskörnungen

	Proctorwasser gehalt w_{Pr} [%]	Proctordichte ρ_{Pr} [g/cm ³]
RC.Si.08F	13,05	1,869
RC.Si.14F	12,78	1,962
RC.SiOb.11F	13,62	1,920
RC.SiOb.14F	12,52	1,954
RC.SiOb.17F	11,43	1,947
RC.Ob.14F	12,95	1,907

Tab. 13: Proctordichte und -wassergehalt der Versuchsböden aus rezyklierten Gesteinskörnungen

7.3 CBR-Versuche

Die CBR-Werte werden auf Basis der ermittelten Stempel-Eindringtiefe-Diagramme für jede Mischung bestimmt.

Beispielhaft ist das Diagramm für das Material BK.08F bei einem Wassergehalt von 8 % in Bild 35 dargestellt. Zur Ermittlung der CBR-Werte ist eine Korrektur der Eindringtiefe von 0,4 mm notwendig. Die Ermittlung der korrigierten Stempelkräfte und die Berechnung der CBR-Werte sind auch in Bild 35 dargestellt. Die mit Gleichung 1 ermittelten CBR-Werte für Eindringtiefen von 2,5 mm und 5,0 mm liegen bei 40 % und 48 %. Der CBR-Wert für diese Probe wird daher mit 48 % angegeben (größerer Wert).

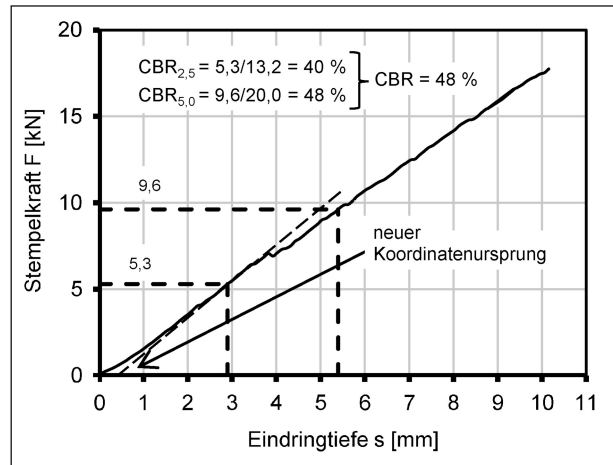


Bild 35: Korrektur der Stempelkraft-Eindringtiefe-Kurve für die Bodenprobe BK.08F verdichtet bei einem Wassergehalt von 8 %

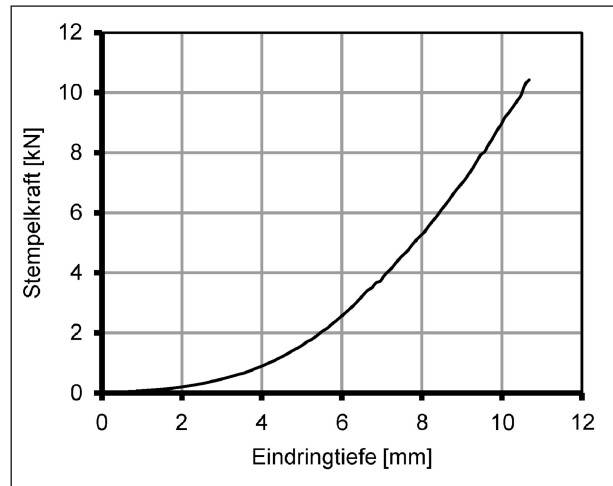


Bild 36: Exponentiell gekrümmte Stempelkraft-Eindringtiefe-Kurve ermittelt für die Mischung BK.Ob.11F (Einbauwassergehalt von 7,5 %)

Einige Proben ergeben exponentiell gekrümmte Kurven (Bild 36), sodass kein CBR-Wert festgelegt werden konnte. Solche Kurven sind bei grobkörnigen Böden zu erwarten und weisen auf die Abstützung des Bodens am CBR-Topf hin (MEYER, 1980).

Die resultierenden CBR-Werte für die Mischungen aus ungebrochenen, gebrochenen und rezyklierten Materialien für verschiedene Wassergehalte sind in Bild 37, Bild 38 und Bild 39 dargestellt.

Die CBR-Werte für Mischungen aus ungebrochenem Material weisen mit Ergebnissen zwischen 30 % und 135 % eine große Streuung auf. Die Böden, denen nur der leicht plastische Ton (Si) beigemischt wurde (RK.Si.08F, RK.Si.14F) sowie die Mischung mit dem niedrigsten Oberbodenanteil (RK.SiOb.11F) weisen mit CBR-Werten zwischen

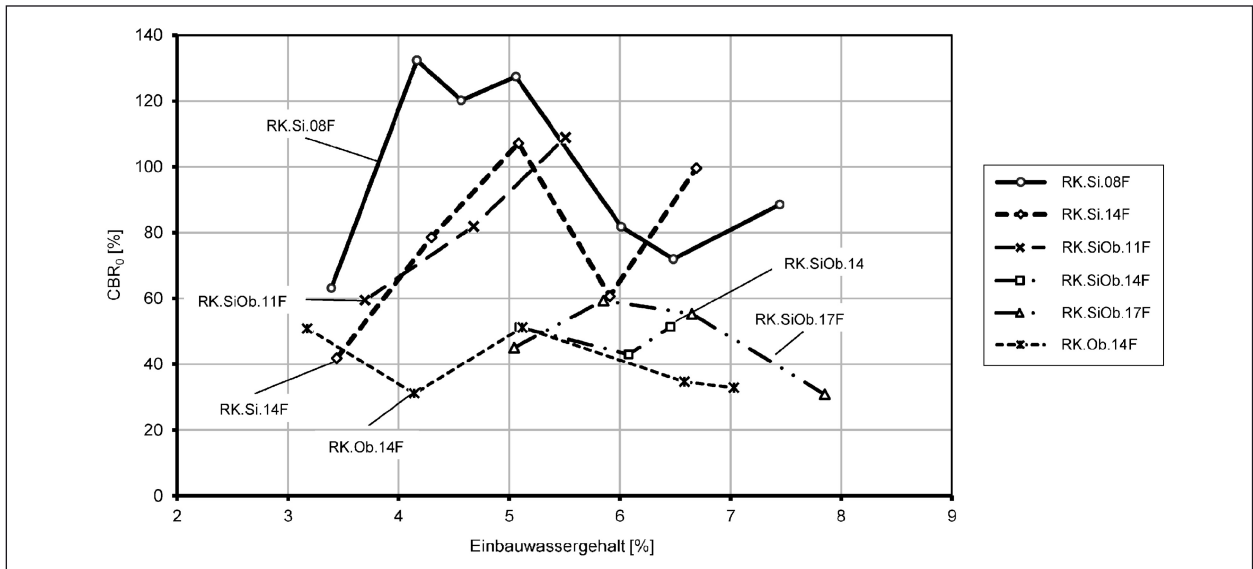


Bild 37: CBR-Ergebnisse für die Mischungen aus ungebrochenen Gesteinskörnungen

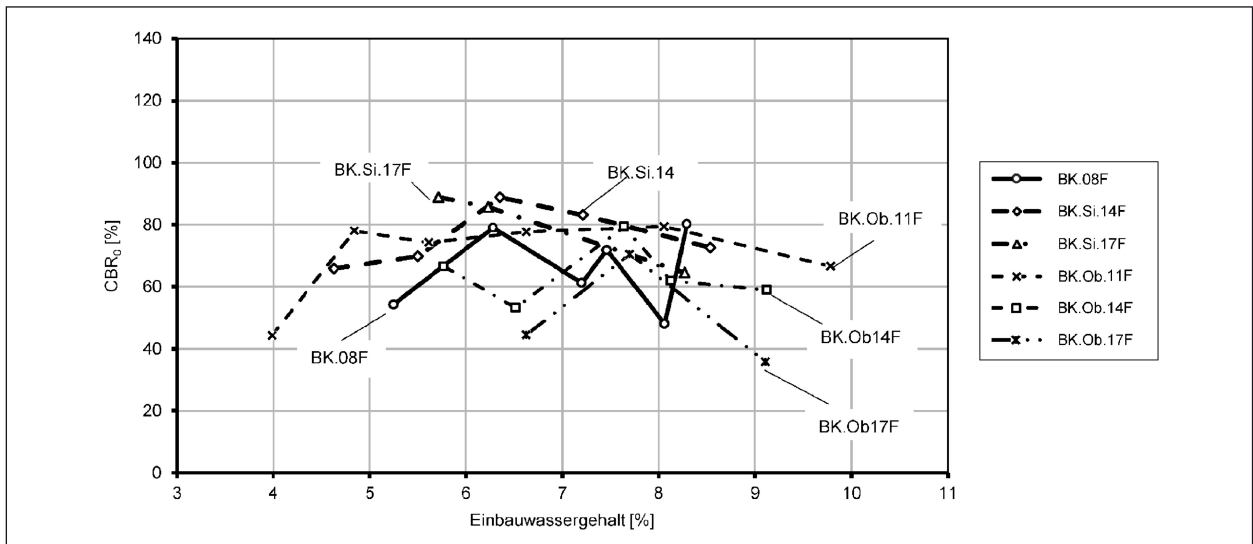


Bild 38: CBR-Ergebnisse für die Mischungen aus gebrochenen Gesteinskörnungen

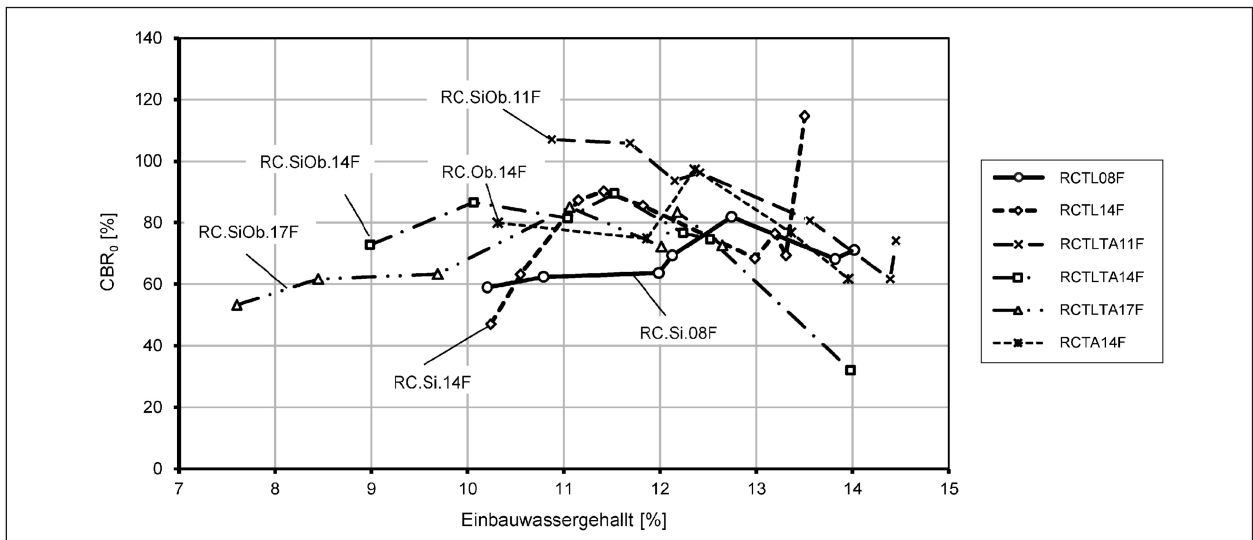


Bild 39: CBR-Ergebnisse für die Mischungen aus rezyklierten Gesteinskörnungen

80 % und 135 % die höchsten Werte auf. Gleichzeitig zeigen die Mischungen mit höherem Oberbodenanteil (RK.SiOb.14F und RK.SiOb.17F und RK.Ob.14F) eine geringere Tragfähigkeit, wobei keine signifikante Abhängigkeit vom Wassergehalt erkennbar ist. Die Werte liegen zwischen 30 % und 60 %.

Die CBR-Werte für die Mischungen aus gebrochenen Gesteinskörnungen variieren etwas geringer als die Mischungen aus unebrochenen Materialien. Es ergeben sich Werte zwischen 45 % und 90 %. Wie Bild 38 entnommen werden kann, führt ein steigender Oberbodenanteil zu einer geringfügig verringerten Tragfähigkeit.

Für die Mischungen aus rezyklierten Materialien werden CBR-Werte zwischen 30 % und 115 % er-

mittelt. Die Ergebnisse weisen kleine Streuungen auf, wobei die Mehrheit der Werte im Bereich zwischen 60 % und 100 % liegt. Für die Mischungen mit Oberboden hat wiederum ein höherer Oberbodenanteil geringere CBR-Werte zur Folge.

7.4 Gesättigte Durchlässigkeit

Die Ergebnisse für die gesättigte Durchlässigkeit sind zusammen mit den Probeneigenschaften in Tabelle 14 zusammengefasst.

Die Durchlässigkeit der RK-Mischungen aus unebrochener Gesteinskörnung und der BK-Mischungen aus gebrochenem Kalkstein variiert stark von $3,2 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s bzw. von $4,9 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $2,3 \cdot 10^{-6}$ m/s für einen Verdich-

Mischung	$D_{Pr} = 97 \%$			$D_{Pr} = 100 \%$		
	Feinanteil [M.-%]	Einbautrocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	k ^[1] [m/s]	Feinanteil [M.-%]	Einbautrocken- dichte ρ_d [g/cm ³]	k ^[1] [m/s]
RK.Si.08F	7,9	2,309	$3,16 \cdot 10^{-4}$ [P]	8,3	2,349	$8,80 \cdot 10^{-7}$ [D]
RK.Si.14F	15,4 [2]	2,263	$1,22 \cdot 10^{-5}$ [P]	15,4 [2]	2,331	$1,17 \cdot 10^{-9}$ [D]
RK.SiOb.11F	10,7	2,252	$2,35 \cdot 10^{-8}$ [D]	10,7	2,341	$7,34 \cdot 10^{-9}$ [D]
RK.SiOb.14F	14,0	2,195	$3,49 \cdot 10^{-9}$ [D]	13,5	2,271	$1,42 \cdot 10^{-9}$ [D]
RK.SiOb.17F	18,0	2,150	$3,29 \cdot 10^{-9}$ [D]	17,0	2,197	$1,41 \cdot 10^{-9}$ [D]
RK.Ob.14F	13,4 [2]	2,098	$1,15 \cdot 10^{-9}$ [P]	13,4 [2]	2,199	$2,76 \cdot 10^{-9}$ [D]
BK.08F	7,1	2,171	$2,31 \cdot 10^{-6}$ [P]	6,6 [2]	2,238	$3,23 \cdot 10^{-7}$ [P]
BK.Si.14F	12,4 [2]	2,156	$1,32 \cdot 10^{-4}$ [P]	12,4 [2]	2,150/2,222	$1,08 \cdot 10^{-4}$ [P]/ $7,55 \cdot 10^{-8}$ [D]
BK.Si.17F	15,5 [2]	2,160	$1,88 \cdot 10^{-7}$ [D]	15,5 [2]	2,240	$5,28 \cdot 10^{-9}$ [D]
BK.Ob.11F	9,8 [2]	2,127	$2,74 \cdot 10^{-3}$ [P]	9,8 [2]	2,220	$1,04 \cdot 10^{-4}$ [P]
BK.Ob.14F	11,7 [2]	2,066	$4,92 \cdot 10^{-3}$ [P]	11,7 [2]	2,112	$1,95 \cdot 10^{-4}$ [P]
BK.Ob.17F	15,5 [2]	2,050	$5,36 \cdot 10^{-4}$ [P]	15,5 [2]	-	$3,80 \cdot 10^{-9}$ [D]
RC.Si.08F	7,6 [2]	1,830	$6,97 \cdot 10^{-5}$ [P]	7,6 [2]	1,880	$1,69 \cdot 10^{-5}$ [P]
RC.Si.14F	13,2 [2]	1,906	$8,22 \cdot 10^{-5}$ [P]	13,2 [2]	1,964	$6,23 \cdot 10^{-6}$ [P]
RC.SiOb.11F	10,1 [2]	1,860	$4,08 \cdot 10^{-5}$ [P]	10,1 [2]	1,945	$4,33 \cdot 10^{-7}$ [P]
RC.SiOb.14F	10,9	1,867	$4,54 \cdot 10^{-7}$ [P]	8,5	1,927	$3,61 \cdot 10^{-7}$ [P]
RC.SiOb.17F	12,9	1,860	$7,79 \cdot 10^{-7}$ [P]	9,3	1,939	$3,53 \cdot 10^{-8}$ [P]
RC.Ob.14F	9,7	1,821	$2,73 \cdot 10^{-7}$ [P]	9,6	1,912	$9,31 \cdot 10^{-7}$ [P]

[1] Falls verschiedene Werte für verschiedene hydraulische Gradienten ermittelt wurden, ist der durchschnittliche Wert als k-Wert der Mischung zu berücksichtigen
[2] Feinanteil der Ausgangs-Mischung (die Korngrößenverteilung der Probe wurde nicht bestimmt)
[P] Versuch in Proctortopf
[D] Versuch in Druckzelle

Tab. 14: Gesättigte Durchlässigkeit der Versuchsmischungen

tungsgrad D_{Pr} von 97 % und von $8,8 \cdot 10^{-7}$ m/s bis $1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s bzw. von $1,9 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $3,8 \cdot 10^{-9}$ m/s für einen Verdichtungsgrad D_{Pr} von 100 %. Bei den RC-Mischungen aus Betonbruch liegen die Werte zwischen $8,2 \cdot 10^{-5}$ m/s und $2,7 \cdot 10^{-7}$ m/s bzw. zwischen $1,7 \cdot 10^{-5}$ m/s und $3,5 \cdot 10^{-8}$ m/s für Verdichtungsgrad D_{Pr} von 97 % bzw. 100 %.

Prinzipiell wurden hohe Durchlässigkeitsbeiwerte bei Proben mit niedrigerem Verdichtungsgrad D_{Pr} und Feinkornanteil ermittelt. Allerdings scheinen die ermittelten Werte insbesondere für die BK- und RC-Mischungen mit Oberboden zum Teil widersprüchlich zu sein. Proben mit theoretisch höherem Feinanteil bzw. Verdichtungsgrad zeigen größere k-Werte als Proben mit niedrigeren Werten. Um die Zusammensetzung der Probe zu überprüfen, wurde ihre Korngrößenverteilung nach der Versuchsdurchführung bestimmt. Der ermittelte Feinanteil der Proben RC.SiOb.14F, RC.SiOb.17F, RC.Ob.14F entspricht nicht dem Feinanteil der Mischungen und kann die auf den ersten Blick überraschenden Unterschiede zwischen den Ergebnissen erklären.

Auch hat die Art der Prüfverfahren einen Einfluss auf die Ergebnisse. Das ist besonders bei dem Gemisch BK.Si.14F zu erkennen, dessen Durchlässigkeit an einer Probe im Proctortopf und an einer Probe in der Druckzelle bestimmt wurde. Der Versuch in der Druckzelle ergab eine um mehrere Zehnerpotenzen geringere Durchlässigkeit als der Versuch im Proctortopf. Neben der geringeren Dichte der Probe im Proctortopf tragen hierbei vermutlich Randumläufigkeiten im Proctortopf zu den Unterschieden bei. Aufgrund der Ergebnisse ist zu empfehlen, die Durchlässigkeit von derartigen Mischungen mit Feinkornanteil über 10 M.-% in einer Druckzelle zu ermitteln.

Insgesamt zeigen die Versuche, dass die Zugabe des Oberbodens im Vergleich zur Zugabe des Schluffs zu niedrigeren k-Werten führt.

8 Technikumsversuche

Die Untersuchungen zur Ermittlung des Verformungsmoduls von verschiedenen Bankettmischungen wurden in der Versuchsgrube der Prüfhalle am Zentrum Geotechnik der Technischen Universität München durchgeführt. Insgesamt wurden vier

Versuchsmischungen untersucht. Versuche wurden zum Einen nach Einbau und zum Andern nach Bewässerung der Böden durchgeführt, um den Einfluss des Wassergehalts auf die Tragfähigkeit zu bestimmen.

8.1 Versuchsgrube

Die Versuchsgrube befindet sich in der Prüfhalle am Zentrum Geotechnik und sie ist mit Stahlträgern in zwei Hälften unterteilt, die 7,5 m und 4,0 m tief sind (Bild 40). Die Versuche wurden in dem höheren Teil der Grube durchgeführt. Er ist bis zu einer Tiefe von 1,15 m mit Sand gefüllt und mit einer ca. 10 cm dicken Betonplatte abgedeckt. Der verwendete Grubenbereich ist 3,3 m breit und hat eine Länge von 5,0 m.

Um den Aufwand zu reduzieren, wurde die Versuchsfläche in zwei Hälften geteilt, sodass zwei verschiedene Materialien gleichzeitig untersucht werden konnten (Bild 41).

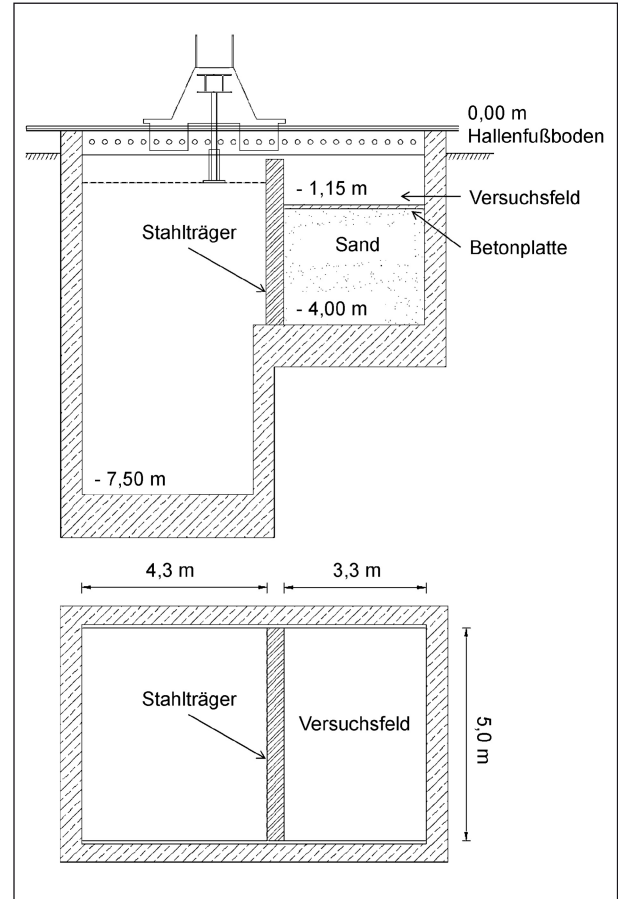


Bild 40: Darstellung der Versuchsgrube im Schnitt und im Grundriss

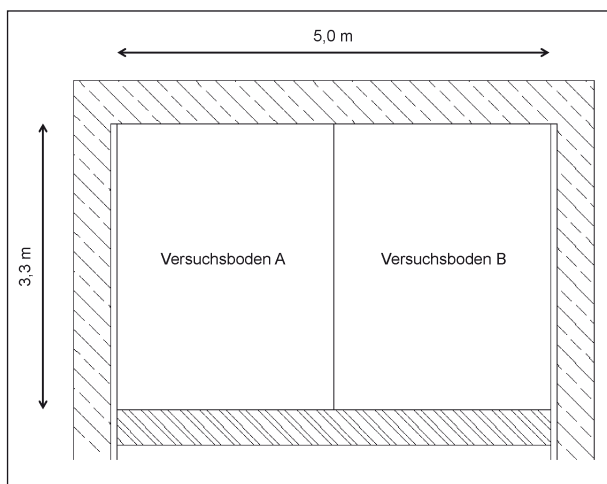


Bild 41: Schematische Darstellung des für die Untersuchungen herangezogenen Teils der Versuchsgrube

8.2 Versuchsmischungen

Von den 18 im Labor untersuchten Mischungen wurden zwei Versuchsreihen im Technikumsmaßstab mit insgesamt vier Mischungen durchgeführt. Da in der Regel Bankette aus gebrochenen Materialien gebaut werden, wurden zwei Mischungen aus gebrochenem Kalkstein (1. Versuchsreihe), eine Mischung aus rundkörnigem Material und eine aus rezyklierten Gesteinskörnungen (2. Versuchsreihe) untersucht.

Von den Mischungen aus ungebrochenen Gesteinskörnungen wurde die Mischung mit dem höchsten Oberbodenanteil (RK.Ob.14F) ausgewählt, da diese die niedrigsten CBR-Werte aufweist. Es kann deshalb für die anderen BK-Mischungen davon ausgegangen werden, dass im Technikumsmaßstab mindestens so hohe Tragfähigkeiten wie an den entsprechenden untersuchten Mischungen erreicht werden. Von den RC-Mischungen wurde ebenso die Mischung mit dem höchsten Oberbodenanteil untersucht, da daran ebenfalls vergleichsweise niedrige CBR-Werte ermittelt wurden. Von den Versuchsmaterialien aus gebrochenem Kalkstein wurde das Material BK.08F, dem kein zusätzlicher Boden zugegeben wurde, und die Mischung BK.Ob.17F mit dem höchsten Oberbodenanteil untersucht, um den Einfluss des Oberbodens auf die Tragfähigkeit nachzuweisen.

Für die Technikumsversuche war die Siebung des Oberbodens zum Abtrennen des Anteils größer 0,5 mm im Gegensatz zu den Laborversuchen (vgl. Kapitel 4.5) aufgrund der großen Menge nicht

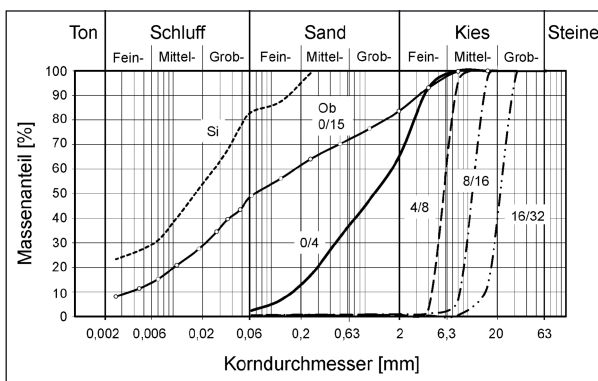


Bild 42: Kornverteilungen der verschiedenen Fraktionen für die Herstellung des Versuchsbodens RK.Ob.14F

möglich. Deshalb wurden die Versuchsböden BK.Ob.17F und RK.Ob.14F aus verschiedenen Kornfraktionen (0/4, 4/8, 8/16, 16/32 mm für die Mischung RK.Ob.14F, 0/2, 2/5, 5/8, 11/16, 16/22 mm für die Mischung BK.Ob.17F), dem feinkörnigen Boden aus der Kieswäsche (Si) und dem 0/15 mm Oberboden so zusammengesetzt, dass die hergestellten Mischungen hinsichtlich der Korngrößenverteilung und Kornform vergleichbar den entsprechenden Labormischungen sind (Bild 42). Die erforderlichen Mengen der einzelnen Fraktionen wurden anhand der Korngrößenverteilung der verschiedenen Bestandteile so berechnet, dass bei den Labor- und Technikumsversuchen der gleiche Feinanteil aus dem Oberboden erreicht wurde. Für den Betonbruch waren verschiedene Kornfraktionen nicht verfügbar. Deshalb wurde für die Mischung RC.Ob.14F das 0/32 mm Ausgangsmaterial direkt mit dem Oberboden gemischt.

8.3 Versuchsvorgehen

8.3.1 Aufbau der Versuche

Die Bankette werden nach ZTV-StB SoB 09 (FGSV, 2009) oberhalb des Frostschutzkieses hergestellt. Ihre Dicke (die Dicke des Oberbaus oberhalb des Frostschutzkieses) kann nach RStO 12 (FGSV, 2012b) zwischen 26 cm und 60 cm variieren. Im Rahmen dieser Forschung wurden einschichtige Bankettaufbauten mit einer Dicke von 35 cm untersucht. Um die untere Frostschutzschicht nachzubilden, wurde als Unterlage eine Schicht aus ungebrochenen Gesteinskörnungen hergestellt. Hierdurch wurde gleichzeitig der Abstand zur Betonplatte erhöht und ihr Einfluss auf die Versuchsergebnisse verringert. Die Frostschutzschicht hatte für die erste Versuchsreihe eine Dicke von 35 cm und aus bautechnischen Gründen für die

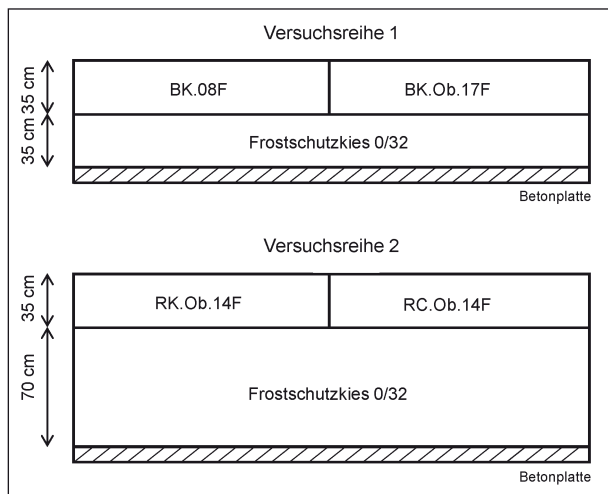


Bild 43: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der beiden Versuchsreihen

zweite 70 cm. Der Versuchsaufbau ist in Bild 43 dargestellt.

8.3.2 Aufbauprozess

Zuerst wurde der Oberboden angeliefert, der für die Versuchsmischungen verwendet wurde. Um die Klumpenbildung des Materials in den Versuchsmischungen zu vermeiden und die Mischbarkeit zu erhöhen, wurde er in der Versuchshalle gelagert und für mindestens eine Woche getrocknet. Nach Ermittlung des Wassergehaltes wurde der Boden einzelnen Gesteinskörnungen zugemischt.

Die Mischung der Materialien erfolgte mithilfe eines Baggers in der leeren Grube (Bild 44). Der Wassergehalt der Mischung wurde mit Schnellverfahren (Trockenblech) nach DIN 18121-2 im Labor ermittelt, wenn nötig wurde Wasser zugegeben, um den Proctorwassergehalt zu erreichen. Nach der Wasserzugabe wurde der Boden nochmals homogenisiert und anschließend das gemischte Material aus der Grube entnommen.

Als nächstes wurde die Frostschutzschicht auf der gesamten Grubenfläche aufgebaut. Die Verdichtung wurde in einer (1. Versuchsreihe) bzw. zwei Lagen (2. Versuchsreihe) von jeweils 35 cm ausgeführt (Bild 45). Als Verdichtungsgerät wurde eine Rüttelplatte der Firma Wacker verwendet. Unmittelbar nach Verdichtung wurden sechs dynamische Plattendruckversuche durchgeführt, um die Tragfähigkeit der Schicht zu überprüfen. Die Dichte wurde zudem an vier verschiedenen Stellen mit dem Ballonverfahren (siehe Kapitel 8.4.3) bestimmt.

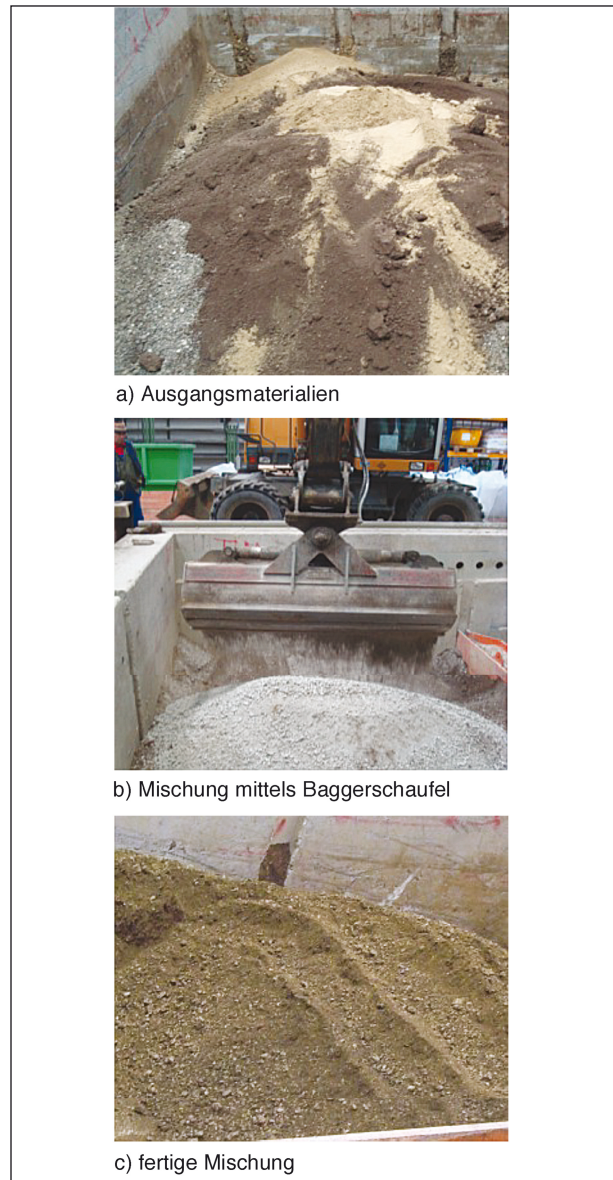


Bild 44: Herstellung von Mischungen in der Versuchsgrube



Bild 45: Verdichtung der Frostschutzschicht in der Versuchsgrube



Bild 46: Verdichtung der ersten Versuchsmischung



Bild 47: Verdichtung der zweiten Versuchsmischung

Anschließend wurde die obere Schicht in einer Lage von 35 cm Dicke aufgebaut. Das Bankettmaterial wurde zunächst mit der Baggerschaufel und mit einer Handschaufel gleichmäßig bis zur Grubenmitte verteilt und mit der Rüttelplatte verdichtet, um eine möglichst ebene Oberfläche zu erhalten (Bild 46). In derselben Weise wurde das zweite Material in der zweiten Hälfte der Versuchsrube aufgebracht (Bild 47). Von den übriggebliebenen Materialien wurden Proben für die Bestimmung von Wassergehalt und Korngrößenverteilung entnommen.

Nach Abschluss des Aufbaus wurde die Grube mit Kunststoff-Folien abgedeckt, um die Materialien gegen Austrocknung zu schützen. Statische und dynamische Plattendruckversuche und die Bestimmung der erreichten Dichte wurden nach 24 Stunden durchgeführt. Die Anordnung der Prüfstellen in der Grube ist in Bild 48 dargestellt. Für jeden Versuchsboden wurden 6 statische und

6 dynamische Plattendruckversuche geplant. Die Dichte wurde an 5 Stellen ermittelt. Die Abstände der Versuchsstellen zueinander und zu den Wänden bzw. der Grubenmitte sind in Bild 48 dargestellt.

Nach der Ausführung der Versuche wurden die Böden bewässert. Die zugegebene Wassermenge je Boden wurde so berechnet, dass rechnerisch eine vollständige Sättigung des Bodens erreicht werden konnte. Bei Böden mit geringer Durchlässigkeit wurde das Wasser schrittweise zugegeben. Ca. 12 Stunden nach der Wasserzugabe wurden sechs dynamische und vier statische Plattendruckversuche durchgeführt. Die Dichte und der Wassergehalt wurden auch an zwei bzw. mindestens vier Stellen bestimmt, um den erreichten Sättigungsgrad zu ermitteln.

Um den Zusammenhang zwischen dem CBR-Wert und dem Verformungsmodul auszuwerten und den

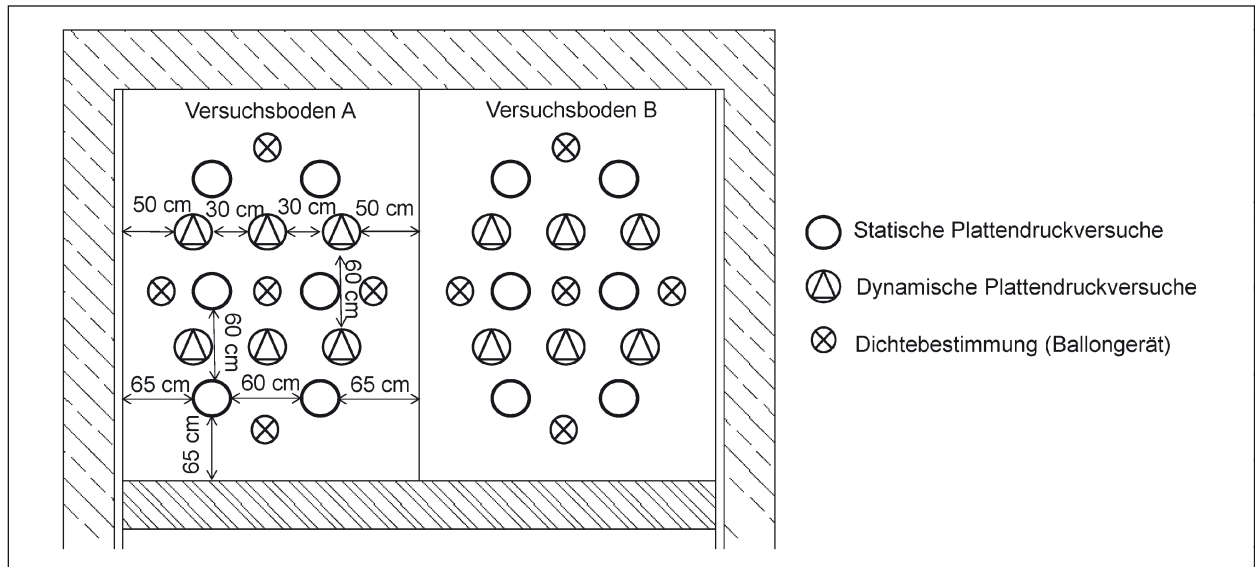


Bild 48: Skizze der Anordnung der Prüfstellen in der Grube



Bild 49: CBR-Probe in Wasser

Einfluss der Bewässerung auf den CBR-Wert zu bestimmen, wurden für jede Mischung der CBR_0 und CBR_w (CBR-Wert nach Lagerung der Probe unter Wasser für mindestens 96 Stunden (s. Bild 49)) ermittelt. Die Proben wurden dazu jeweils bei dem in der Grube vorhandenen Einbauwassergehalt verdichtet.

8.4 Versuche

8.4.1 Statische Plattendruckversuche

Statische Plattendruckversuche wurden im Rahmen dieser Forschung mit einer 300 mm Lastplatte nach DIN 18134 durchgeführt. Die Versuchseinrichtung ist in Bild 50 zu sehen.

Die Belastung des Bodens wurde mittels einer Hydraulikpumpe aufgebracht. Sie wurde mit einem Hydraulikzylinder verbunden, der auf der Lastplatte aufgestellt wurde. Als Belastungswiderlager wurde ein an der Grube montierter Träger verwendet. Für die Ermittlung der Spannung wurde zwischen der Lastplatte und dem Zylinder ein Kraftsensor angeordnet. Der Sensor wurde mit einem Gerät verbunden, das die aufgebrachte Spannung digital mit einer Auflösung von $0,001 \text{ MN/m}^2$ anzeigt. Die Setzungen der Lastplatte wurden durch einen Tastarm gemessen. Dazu wurde eine digitale Messuhr mit einer Auflösung von $0,01 \text{ mm}$ verwendet.

Am Anfang des Versuchs wurde der Boden mit $0,01 \text{ MN/m}^2$ für mindestens 30 s vorbelastet. Danach wurde er stufenweise belastet, bis eine Normalspannung von $0,5 \text{ MN/m}^2$ oder eine Setzung von 5 mm erreicht wurde, entlastet und wiederbelastet. Die Belastung wurde in mindestens sieben Laststufen aufgebracht, die Entlastung in drei Stufen. Die Zweitbelastung wurde bis zur vorletzten Stufe der Erstbelastung durchgeführt. Die Wartezeit zwischen den Laststufen betrug zwei Minuten. Aus den Versuchen wurden anhand der Spannung-Setzung-Diagramme die

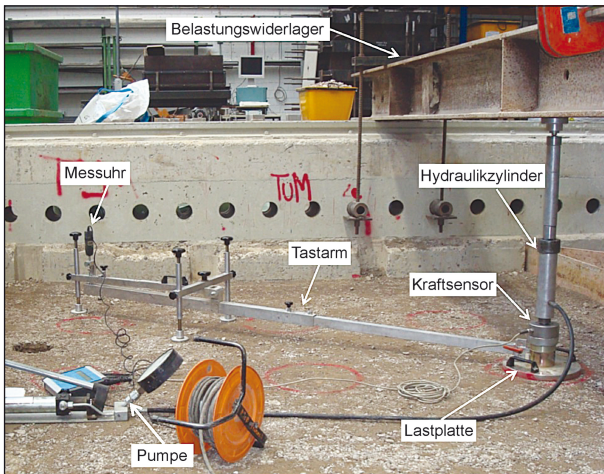


Bild 50: Durchführung eines statischen Plattendruckversuchs

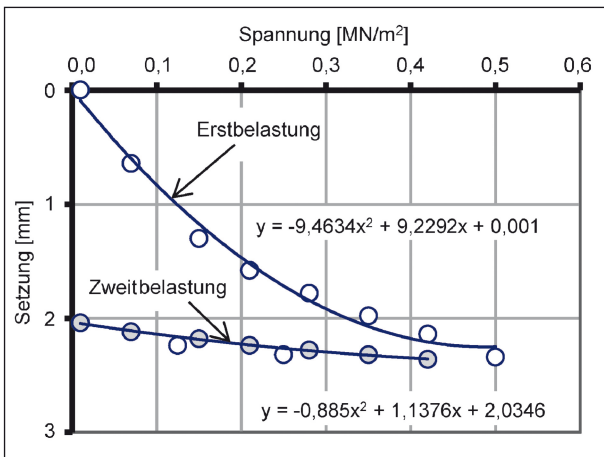


Bild 51: Spannungs-Setzungs-Diagramm ermittelt aus statischem Plattendruckversuch

Verformungsmoduln E_{v1} und E_{v2} bestimmt (siehe Bild 51).

8.4.2 Dynamische Plattendruckversuche

Dynamische Plattendruckversuche wurden nach TP BF-StB – Teil B 8.3 durchgeführt. Für die Durchführung wurde ein leichtes Fallgewichtsgerät der Firma Zorn benutzt (Bild 52). Es besteht aus einer Lastplatte mit einem Durchmesser von 300 mm, die mit einem Sensor ausgestattet ist. Es ist zur Ermittlung der Setzung mit einem Messgerät verbunden. Über eine Führungsstange mit Ausklinkvorrichtung wird ein 10 kg Fallgewicht geführt.

Während des Versuchs wird die Bodenoberfläche durch drei Stöße vorbelastet. Anschließend werden drei Messstöße durchgeführt. Die maximale Setzung je Stoß wird durch den Sensor ermittelt und der dynamische Verformungsmodul wird gemäß Gleichung (2) berechnet:



Bild 52: Dynamischer Plattendruckversuch

Dabei ist

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{max}}{s_{max}} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{0,1 \text{ MN/m}^2}{s_{max}} = \frac{22,5}{s_{max}} \quad (\text{Gl. 2})$$

s_{max} der Mittelwert der drei gemessenen Setzungen

r der Durchmesser der Lastplatte

σ_{max} die maximale Normalspannung unter der Lastplatte

8.4.3 Dichtebestimmung

Die Bestimmung der Dichte wurde mit dem Ballonverfahren gemäß DIN 18125-2 durchgeführt. Es besteht aus einer Stahlringplatte mit einem inneren Durchmesser von 200 mm und einem Kunststoffzylinder, der Wasser enthält. Innerhalb des Zylinders ist ein Gummiballon, der sich durch einen Kolben bewegen lässt.

Das erforderliche Vorgehen für die Ermittlung der Dichte ist in Bild 53 zu sehen. Am Anfang des Versuchs wird die Stahlringplatte am Boden befestigt. Das Ballongerät wird auf die Platte gestellt und der Kolben wird vorsichtig nach unten gedrückt bis der Gummiballon komplett im Kontakt mit der Bodenoberfläche ist. An der Kolbenstange wird die Nullmessung abgelesen (L_0). Anschließend wird der Kolben hochgezogen und das Ballongerät wird



Bild 53: Dichtebestimmung mit dem Ballonverfahren

abgehoben. Der Boden innerhalb des Ringes wird bis auf eine Tiefe von 20 cm vorsichtig ausgehoben und seine Masse und Wassergehalt werden bestimmt. Nach dem Aushub des Bodens wird das Ballongerät nochmal auf die Stahringplatte gestellt und der Kolben wird erneut nach unten geführt. Die Lage des Kolbens wird abgelesen (L_1). Das Volumen des ausgehobenen Bodens wird hinsichtlich des Unterschieds zwischen den zwei Ablesungen L_0 und L_1 gemäß Gleichung 3 berechnet:

$$V = (L_1 - L_0) \cdot A \quad (\text{Gl. 3})$$

Dabei ist

V das Flüssigkeitsvolumen, das der Gerätekolben zwischen den beiden Ablesungen verdrängt

L_1 die Ablesung, die die Lage des Kolbens bei abgesetzter Gummiblase in die Bodenhöhlung beschreibt

L_0 die Ablesung, die die Lage des Kolbens vor Aushub der Bodenprobe beschreibt und

A die Kolbenfläche

Durch die Bestimmung von Volumen, Masse und Wassergehalt der Bodenprobe ist die Berechnung der Feucht- und Trockendichte möglich.

8.5 Ergebnisse der Technikumsversuche

8.5.1 Korngrößenverteilung

Die ermittelten Sieblinien der in der Grube untersuchten Materialien sind in Bild 54, Bild 55, Bild 56 und Bild 57 dargestellt (schwarze Linien). Zur Vergleichbarkeit mit den entsprechenden Labor-

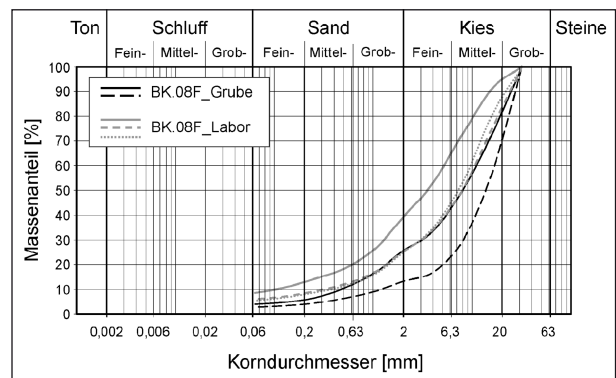


Bild 54: Korngrößenverteilung des Materials BK.08F

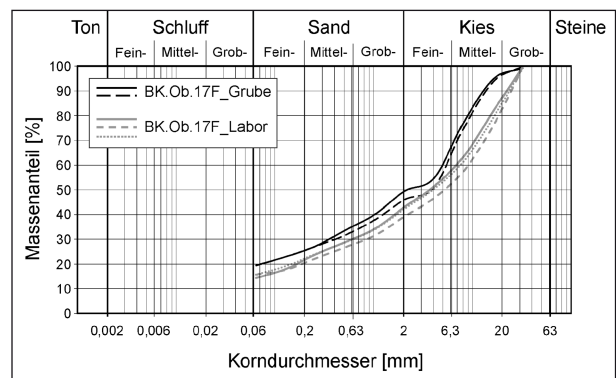


Bild 55: Korngrößenverteilung der Mischung BK.Ob.17F

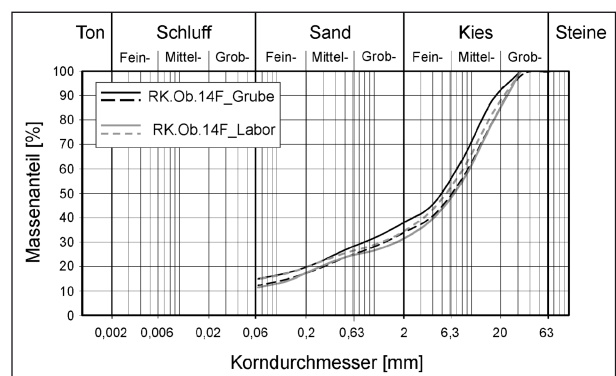


Bild 56: Korngrößenverteilung der Mischung RK.Ob.14F

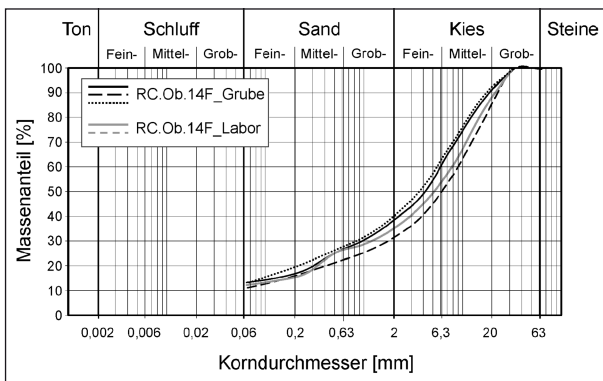


Bild 57: Korngrößenverteilung der Mischung RC.Ob.14F

mischungen sind die Körnungslinien der Labor-mischungen ebenfalls aufgeführt (graue Linien).

Obwohl die Gesteinskörnung BK.08F ein handels-übliches Produkt ist und keine zusätzlichen Zugaben von Schluff oder Oberboden enthält, weist sie eine relativ große Inhomogenität bezüglich der Korngrößenverteilung auf wie aus den ermittelten Korngrößenverteilungen an den verschiedenen Proben erkennbar ist. Dies lässt sich auf die unterschiedliche Entnahme der Proben zurückführen: aus der Grube (homogenisiert und verdichtet – durchgezogene Linie) und direkt im Anlieferungszustand (teilweise durch den Transport entmischt unverdichtet – gestrichelte Linie). Allerdings ist die Sieblinie von dem verdichteten Material (schwarze durchgezogene Linie) ähnlich der am Labormaterial ermittelten Sieblinie.

Die Mischung BK.Ob.17F, die in der Grube hergestellt wurde, weist im Vergleich mit den Laborproben einen etwas höheren Feinkornanteil (19,7 M.-% gegenüber 15,5 M.-%) auf.

Die Sieblinien der in der Grube untersuchten Materialien RK.Ob.14F und RC.Ob.14F sind den entsprechenden Labormischungen sehr ähnlich. Der Feinanteil der Mischungen liegt bei 13,9 M.-% und 12,5 M.-%.

8.5.2 Tragfähigkeit

Unterlage

Die ermittelten Werte des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} und die erreichte Trockendichte für die Frostschuttschicht sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Da die Tragfähigkeit sehr hoch ist, übersteigt die Mehrheit der Werte den Messbereich des verwendeten Geräts.

Versuchsreihe 1		Versuchsreihe 2	
E_{vd} [MN/m ²]	ρ_d [g/cm ³]	E_{vd} [MN/m ²]	ρ_d [g/cm ³]
68,4	2,307	54,7	2,279
(72,4)	2,324	64,5	2,305
(79,5)	2,343	67,8	2,337
(80,1)	2,384	69,0	-
(85,2)		(74,3)	
(102,3)		(75,0)	

Tab. 15: Ergebnisse der dynamischen Plattendruckversuche und der Dichtebestimmung für die Frostschuttschicht. Werte in Klammern liegen oberhalb des Messbereichs

Bankettmaterialien

Die ermittelten Verformungsmoduln E_{v2} und E_{vd} nach Einbau und nach Bewässerung der Bankettmaterialien sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Abweichend von dem geplanten Prüfverfahren wurden bei der Gesteinskörnung BK.Ob.17F fünf statische Plattendruckversuche nach Einbau und drei nach Bewässerung des Materials durchgeführt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Materialeigenschaften sind die Ergebnisse zusätzlich in Bild 58 und Bild 59 dargestellt. Die Proctorkurven mit Darstellung der nach Einbau und nach Bewässerung erzielten Wassergehalte und Trockendichten sind für alle Mischungen in Bild 61, Bild 62, Bild 64 und Bild 65 zu sehen und auch in den Tabellen 17, 18, 20 und 21 angegeben.

Die Gesteinskörnung BK.08F weist eine sehr hohe Tragfähigkeit auf. Die E_{v2} -Werte variieren zwischen 225,7 und 279,5 MN/m² mit einem Mittelwert von 254,5 MN/m². Wie in Bild 61 zu sehen ist, obwohl der Wassergehalt der Gesteinskörnung nicht den Proctorwassergehalt w_{Pr} von 7,20 % entsprach, wurde sie stark verdichtet. Der erreichte Verdichtungsgrad D_{Pr} nach Einbau beträgt 104 %. Da der Boden einen geringen Feinanteil enthält, weist er eine hohe Durchlässigkeit auf. Während der Bewässerung ist das Wasser schnell versickert. Obwohl 450 l Wasser zugegeben wurden, hat sich der Wassergehalt des Materials nur wenig erhöht (+0,4 %). Die E_{v2} -Werte nach Bewässerung haben deutlich zugenommen und betragen 297,3 MN/m². Die höhere Tragfähigkeit könnte sowohl durch die Wasserzugabe bedingt sein. Da die Bewässerung drei Wochen nach Einbau durchgeführt wurde ist es auch möglich, dass die Liegezeit nach Verdichtung zu einer Zunahme der Tragfähigkeit geführt hat.

	FKA ^[1] [M.-%]	D _{Pr} [%]	Nach Einbau		Nach Bewässerung	
			E _{v2} [MN/m ²]	E _{vd} [MN/m ²]	E _{v2} [MN/m ²]	E _{vd} [MN/m ²]
BK.08F	3,2	104	225,7	(77,1)	256,6	61,6
			244,1	(77,9)	294,6	(80,4)
			251,0	(84,3)	314,5	(80,7)
			261,3	(85,2)	323,7	(100,0)
			265,6	(86,5)		(101,4)
			279,5	(88,6)		(101,4)
BK.Ob.17F	19,7	94	53,4	31,0	45,8	23,0
			56,9	32,5	57,9	23,4
			66,9	35,9	61,0	27,8
			69,7	36,4		31,7
			73,2	36,5		32,2
				42,5		32,5
RK.Ob.14F	13,9	102	71,1	31,1	76,6	22,9
			83,8	38,5	78,5	32,8
			86,1	38,8	83,5	33,1
			87,6	41,8	85,6	33,6
			87,9	46,5		39,5
			109,5	48,3		41,4
RC.Ob.14F	12,3	96	82,7	35,3	87,2	34,6
			91,1	37,4	91,8	38,3
			94,7	41,8	98,8	41,3
			94,9	45,7	103,1	42,7
			102,9	47,6		50,9
			108,6	48,0		51,4

[1] FKA = Feinkornanteil der Mischung (Mittelwert der ermittelten Sieblinien)

Tab. 16: Ergebnisse der statischen und dynamischen Plattendruckversuche für die verschiedenen Versuchsmaterialien. Werte in Klammern liegen oberhalb des Messbereichs des Geräts

Wegen der hohen Tragfähigkeit liegen die ermittelten E_{vd}-Werte oberhalb des Messbereichs des verwendeten Geräts (70 MN/m²).

Die E_{v2}-Werte von BK.Ob.17F liegen nach Einbau zwischen 53,4 MN/m² und 73,2 MN/m² (Mittelwert von 64 MN/m²) und die E_{vd}-Werte zwischen 31,0 MN/m² und 42,5 MN/m² (Mittelwert von 35,8 MN/m²). Nach der Wasserzugabe sind die ermittelten Verformungsmoduln etwas verringert und liegen bei 54,9 MN/m² (Abfall von 14 %) bzw. 28,4 MN/m² (Abfall von 21 %). Da der nach der

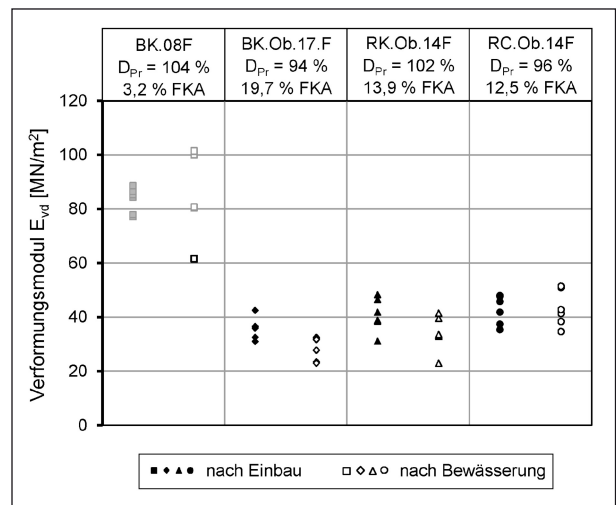


Bild 58: Verformungsmodul E_{vd} für die verschiedenen Versuchsmischungen nach Einbau und nach Bewässerung

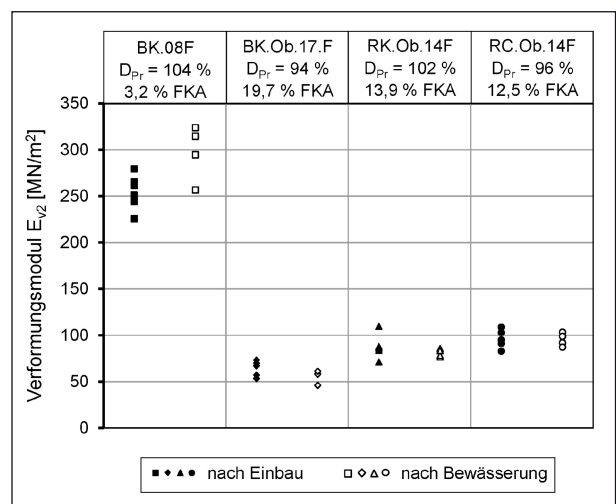


Bild 59: Verformungsmodul E_{v2} für die verschiedenen Versuchsmischungen nach Einbau und nach Bewässerung

Bewässerung erreichte Sättigungsgrad nur 74 % betrug, wurde der Boden noch zweimal mit Wasser bespritzt (erreichter Sättigungsgrad von 77 % bzw. 85 %). Die Plattendruckversuche wurden nach jeder Bewässerung wiederholt. Da die Normbedingungen im Versuchsablauf nicht immer exakt eingehalten werden konnten, weisen die Ergebnisse verringerte Wertenniveaus auf: Im ersten Durchlauf wurde der Boden bis zu einer maximalen Setzung von 10 mm belastet. In der zweiten Wiederholung war der Abstand zu benachbarten Probenahmestellen sehr klein (Bild 60). Die Ergebnisse sind in Anlage 3 zusammengefasst. Für dieses Material ist auch zu berücksichtigen, dass der Verdichtungsgrad bei 94 % liegt und der Feinkornanteil den vorgesehenen Betrag von 17 M.-% übersteigt.



Bild 60: Durchführung eines statischen Plattendruckversuchs nach Bewässerung des Bodens

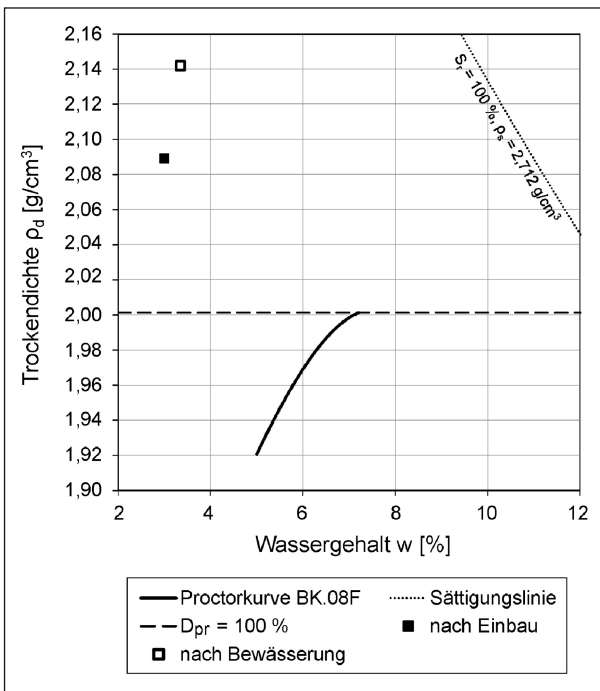


Bild 61: Einbaubedingungen für Material BK.08F

Nach Einbau		Nach Bewässerung	
w [%]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	ρ_d [g/cm ³]
3,6	2,043	3,3	2,177
2,9	1,982	3,1	2,107
3,0	2,192	3,5	
2,7	2,126	3,5	
2,7	2,103		

Tab. 17: Wassergehalt und Trockendichte nach Einbau und nach Bewässerung für Material BK.08F

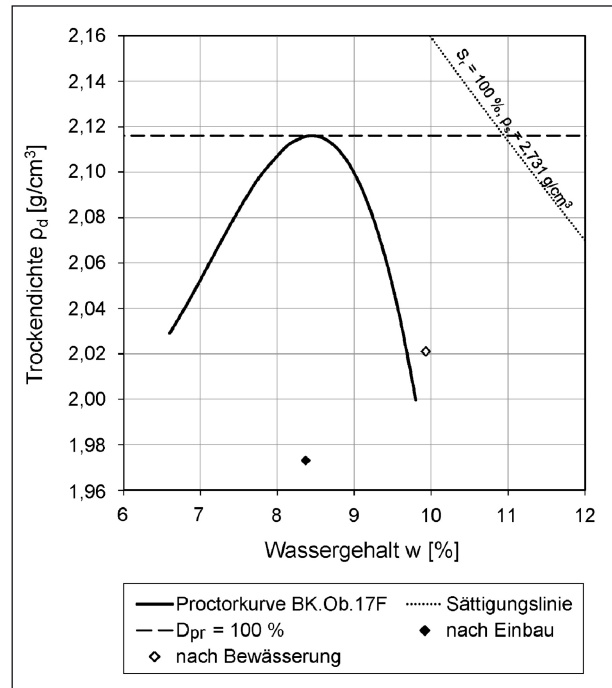


Bild 62: Einbaubedingungen für Mischung BK.Ob.17F

Nach Einbau		Nach Bewässerung	
w [%]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	ρ_d [g/cm ³]
8,5	1,933	10,2	2,035
8,1	2,031	10,5	2,006
8,2	2,034	9,3	
8,6	1,912	9,7	
8,4	1,958		

Tab. 18: Wassergehalt und Trockendichte nach Einbau und nach Bewässerung für Material BK.Ob.17F

Der Verdichtungsgrad der ungebrochenen Mischung RK.Ob.14F beträgt 102 %. Der Verformungsmodul E_{v2} liegt nach Einbau zwischen 71,1 MN/m² und 109,5 MN/m² (Mittelwert von 87,7 MN/m²) und nach der Wasserzugabe zwischen 76,6 MN/m² und 85,6 MN/m² (Mittelwert von 81,0 MN/m² – Abfall von ca. 8 %) Der Einbauwassergehalt von 7,1 % entspricht nahezu dem Sättigungswassergehalt von 7,7 %. Daher zeigt die Bewässerung (45 l) keinen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Ähnliche Ergebnisse wurden auch aus den dynamischen Plattendruckversuchen ermittelt. Der Verformungsmodul E_{vd} liegt nach Einbau bei 40,8 MN/m². Die Wasserzugabe führt zu ca. 17 % Verringerung der Tragfähigkeit und die ermittelten Werte liegen bei 33,9 MN/m² (Mittelwert von sechs Versuchen).

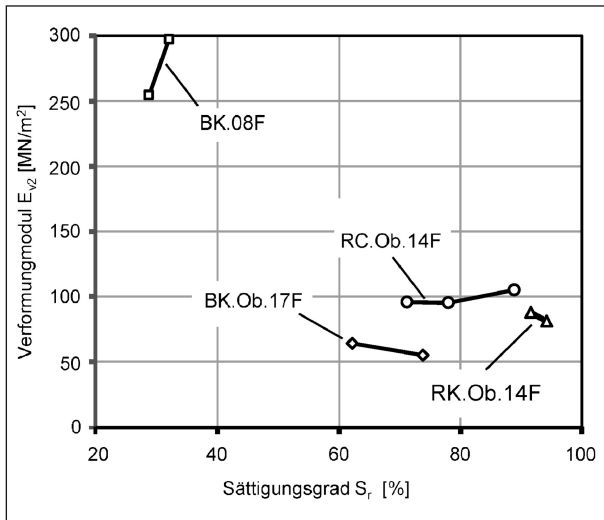


Bild 63: Zusammenhang zwischen E_{v2} und Sättigungsgrad für die verschiedenen Versuchsmaterialien

Versuchsmaterial	E_{v2} [MN/m ²]	E_{vd} [MN/m ²]	E_{v2}/E_{vd} [-]
BK.Ob.17F	64,0	35,8	1,8
	54,9	28,4	1,9
RK.Ob.14F	87,7	40,8	2,1
	81,0	33,9	2,4
RC.Ob.14F	95,8	42,7	2,2
	95,2	43,2	2,2
	105,0	47,3	2,2

Tab. 19: Verhältnis zwischen E_{v2} und E_{vd} nach Einbau für die verschiedenen Versuchsmischungen

Das Material aus Betonbruch RC.Ob.14F wurde mit einem Verdichtungsgrad von 96 % eingebaut. Es weist eine relative hohe Tragfähigkeit auf. Die E_{v2} -Werte reichen bis 108,6 MN/m² und ihr Mittelwert entspricht 95,8 MN/m². Nach Bewässerung des Bodens (265 l) liegen die Werte bei 95,2 MN/m². Der erreichte Sättigungsgrad betrug 78 %. Deshalb wurde der Boden nochmal bewässert und es wurden anschließend die Plattendruckversuche direkt ohne Wartezeit durchgeführt. Der Verformungsmodul nach der zweiten Bewässerung variiert zwischen 92,3 MN/m² und 115,4 MN/m² (Anlage 3). Das Verhältnis zwischen Sättigungsgrad und Verformungsmodul ist Bild 63 zu entnehmen. Die Tragfähigkeit der Mischung aus Betonbruch zeigt keine Abhängigkeit vom Wassergehalt.

In Tabelle 19 sind die Mittelwerte der ermittelten E_{v2} - und E_{vd} -Werte für alle Böden und das Verhältnis zwischen den zwei Verformungsmoduln dargestellt. Die E_{v2}/E_{vd} -Werte liegen zwischen 1,8 und 2,4.

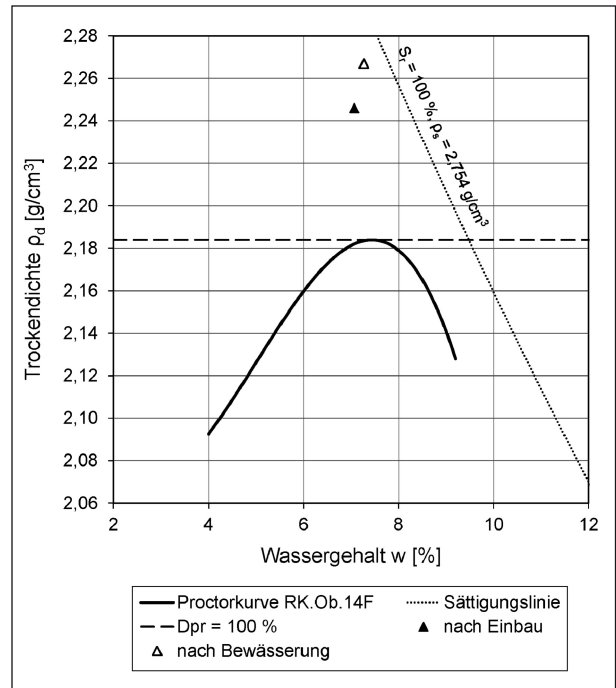


Bild 64: Einbaubedingungen für Mischung RK.Ob.14F

Nach Einbau		Nach Bewässerung	
w [%]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	ρ_d [g/cm ³]
7,5	2,289	7,4	2,279
7,2	2,223	7,5	2,255
6,7	2,246	6,8	
6,7	2,275	7,4	
7,2	2,199	6,9	
		7,8	

Tab. 20: Wassergehalt und Trockendichte nach Einbau und nach Bewässerung für Material RK.Ob.14F

Nach Einbau		Nach Bewässerung	
w [%]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	ρ_d [g/cm ³]
12,2	1,736	14,0	1,870
12,4	1,844	13,5	1,864
12,0	1,865	13,1	
11,8	1,854	12,8	
12,1	1,818	14,2	
		12,1	

Tab. 21: Wassergehalt und Trockendichte nach Einbau und nach Bewässerung für Material RC.Ob.14F

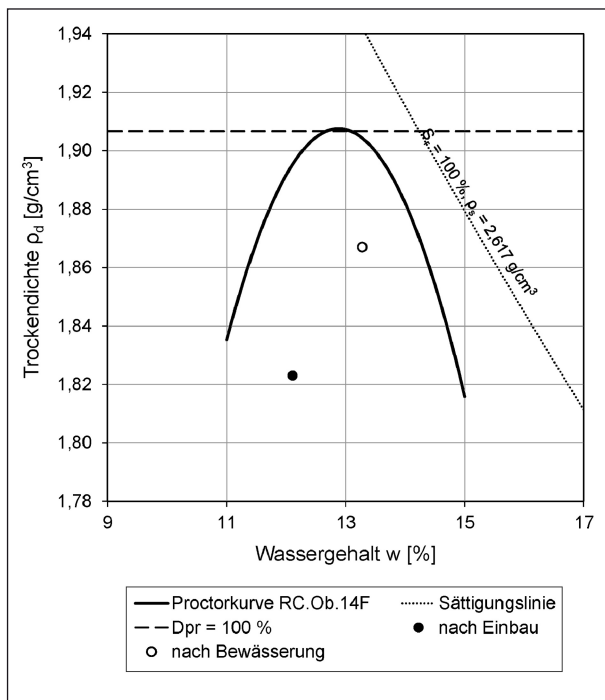


Bild 65: Einbaubedingungen für Mischung RC.Ob.14F

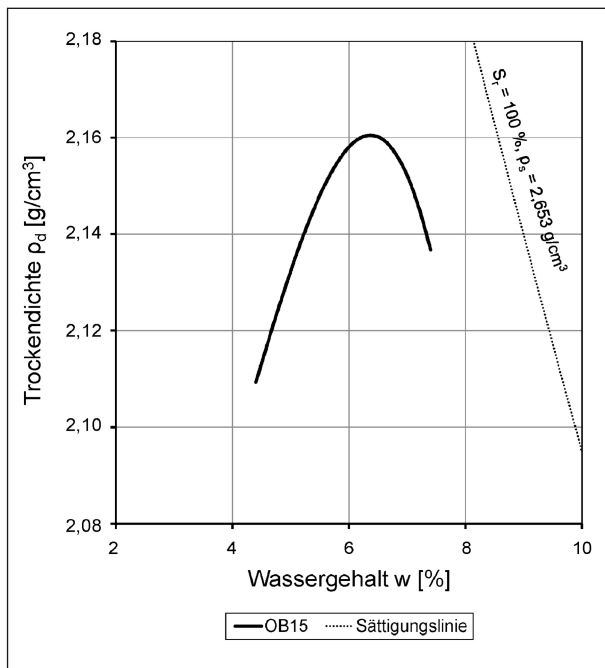


Bild 66: Proctorkurve von OB15

CBR-Versuche

Die Ergebnisse der CBR-Versuche, die den Einbaubedingungen in der Versuchsgrube entsprechen, sind in Tabelle 22 zusammengefasst. Die ermittelten Werte liegen im gleichen Bereich wie die der entsprechenden Labormischungen (grafische Darstellung in Anlage 4). Die Wasserlagerung führt

Versuchsmaterial	w_{Einbau} [%]	Ohne Wasserlagerung		Mit Wasserlagerung	
		ρ_d [g/cm ³]	CBR ₀ [%]	ρ_d [g/cm ³]	CBR _w [%]
BK.08F	3,0	1,915	57	1,920	35
BK.Ob.17F	8,2	1,942	38	1,932	22
RK.Ob.14F	6,4	2,097	59	2,095	28
RC.Ob.14F	11,1	1,780	69	1,813	58

Tab. 22: Ergebnisse der CBR-Versuche mit und ohne Wasserlagerung von den Versuchsmaterialien

bei allen Proben zu einer Reduzierung des CBR-Wertes. Da die Versuche an Proben mit einem Größtkorn von 32 mm durchgeführt wurden und die Versuchsergebnisse aufgrund der Grobanteile erfahrungsgemäß stark schwanken, können aus den CBR-Versuchen keine gesicherten Aussagen bezüglich der Tragfähigkeit im Vergleich zu den Labormischungen bzw. der Wasserlagerung gemacht werden. Für eine zuverlässige Aussage wäre aufgrund der Schwankungen die Durchführung der Versuche an mehreren Proben notwendig.

9 Weitere Laboruntersuchungen

9.1 Baustoffgemisch von TU Berlin

Im Rahmen der Forschung FE 05.0160/2010/MGB „Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten“, die vom Institut für Ökologie der TU Berlin ausgeführt wird, wird ein Gemisch mit Oberboden (OB15) im Labor als auch im Feld bezüglich seines Schadstoffrückhaltevermögens untersucht. Auf Anfrage der BAST wurden im Rahmen dieser Arbeit Laboruntersuchungen auch an diesem Material durchgeführt. Es handelt sich um eine Mischung aus einem 0/32 mm Gemisch für Schottertragschichten aus natürlichen gebrochenen Gesteinskörnungen und Oberboden. Der Oberbodenanteil beträgt 15 M.-%. Der verwendete Oberboden weist einen C_{org} -Anteil < 1 M.-% und ist nach DIN 18196 der Bodengruppe SU* zuzuordnen (WERKENTHIN et al., 2014). Die Ausgangsmaterialien wurden an das Zentrum Geotechnik der TU München geliefert. Die Herstellung der Mischung erfolgte anschließend im Labor.

Die Korngrößenverteilung von dem Gemisch ist in Bild 67 zu sehen. Der Kiesanteil liegt bei 45 M.-%,

der Sandanteil bei 47 M.-% und der Feinkornanteil beträgt ca. 7 M.-%. Es handelt sich nach DIN 18196 bei diesem Material um ein Kies-Schluff-Gemisch (GU). Der ermittelte Glühverlust beträgt 0,8 M.-%.

Die Verdichtungseigenschaften wurden mit dem Proctorversuch ermittelt. Die Proctorkurve ist in Bild 66 dargestellt. Die maximale Dichte liegt bei 2,161 g/cm³ bei einem Proctorwassergehalt von 6,4 %.

CBR-Versuche wurden in Kombination mit den Proctorversuchen durchgeführt. Die ermittelten Werte sind zusammen mit den Ergebnissen der Versuchsmischungen aus Kalkstein (BK) Bild 68 zu entnehmen und liegen zwischen 50 % und 130 %. Der höchste CBR-Wert wird dabei im Bereich des Proctor-Optimums erreicht. Im Vergleich zu den am gebrochenen Kalkstein ermittelten Werten liegen die CBR-Werte des Materials OB15 der TU Berlin etwas höher. Dies ist auf die Zusammensetzung des Mate-

rials mit relativ niedrigem organischen Anteil und geringerem Feinkornanteil zurückzuführen. Außerdem weist der Kurvenverlauf eine geringere Schwankungsbreite auf. Dies ist vermutlich auf den geringeren Kiesanteil der Mischung OB15 zurück zu führen, wodurch die Eindringung des Stempels durch das Überkorn > 22 mm weniger beeinflusst wird.

Die Durchlässigkeit wurde in einer Druckzelle bei konstantem hydraulischem Gefälle und für zwei verschiedene Einbaubedingungen durchgeführt. Bei einem Verdichtungsgrad von 97 % wurde eine Durchlässigkeit von $1,15 \cdot 10^{-6}$ m/s gemessen. Für $D_{Pr} = 100$ % liegt sie bei $2,30 \cdot 10^{-7}$ m/s.

9.2 Handelsüblicher Schotterrasen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch ein handelsüblicher Schotterrasen der Firma Ganser untersucht und mit den untersuchten Mischungen aus gebrochenem Material verglichen. Das Material besteht aus einem 0/32 mm gebrochenen Schotter und Oberboden. Die Korngrößenverteilung ist in Bild 69 dargestellt. Das Material hat einen Kiesanteil von ca. 83 M.-% und einen Feinkornanteil von 8 M.-%. Nach DIN 18196 wird es als GU klassifiziert.

Die ermittelte Proctorkurve ist Bild 70 zu sehen. Die Proctordichte liegt bei 2,134 g/cm³ bei einem Wassergehalt von 9,5 %. Bei höheren Wassergehalten tritt Wasser aus dem Proctortopf aus.

In Bild 71 sind die Ergebnisse der CBR-Versuche dargestellt. Hohe Streuungen treten auch bei diesem Material aufgrund des großen Grobanteils und des Größtkorn-Durchmessers auf. Die CBR-Werte liegen mit Werten zwischen 45 % und 90 % in dem gleichen Bereich wie die Versuchsmischungen aus gebrochenem Kalkstein.

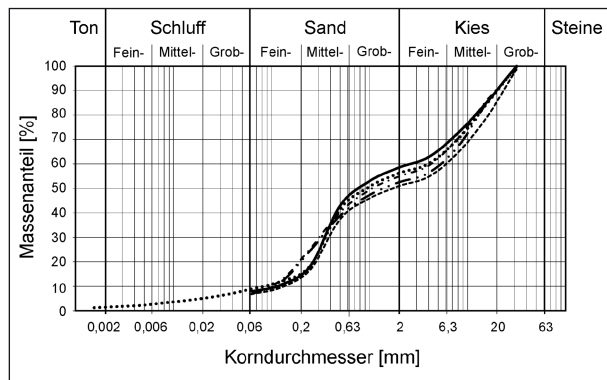


Bild 67: Korngrößenverteilung der 0/32 mm Mischung OB15 von TU Berlin

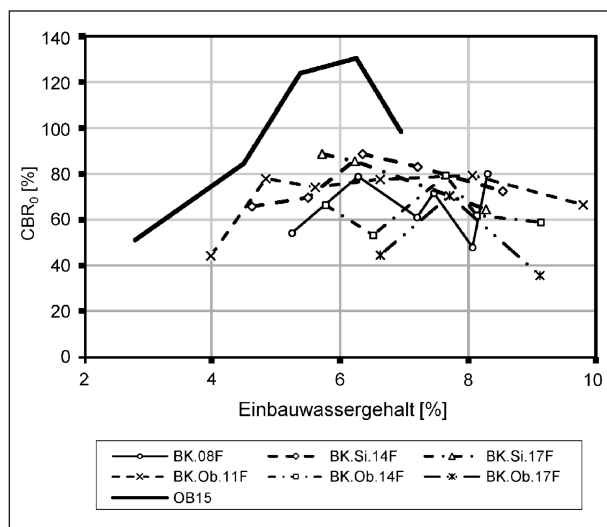


Bild 68: CBR-Werte für die Mischung OB15 der TU Berlin im Vergleich zu den ermittelten Werten für die Mischungen aus gebrochenem Kalkstein

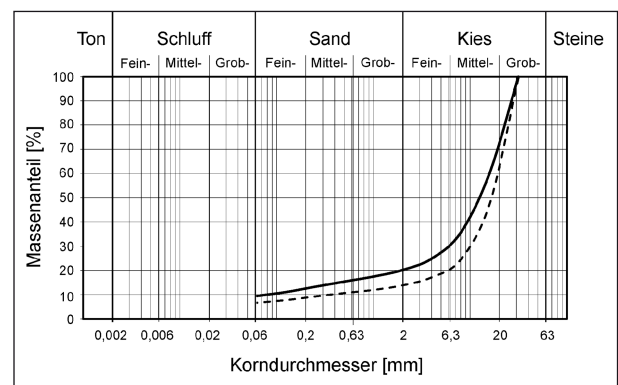


Bild 69: Korngrößenverteilung des Schotterrasens

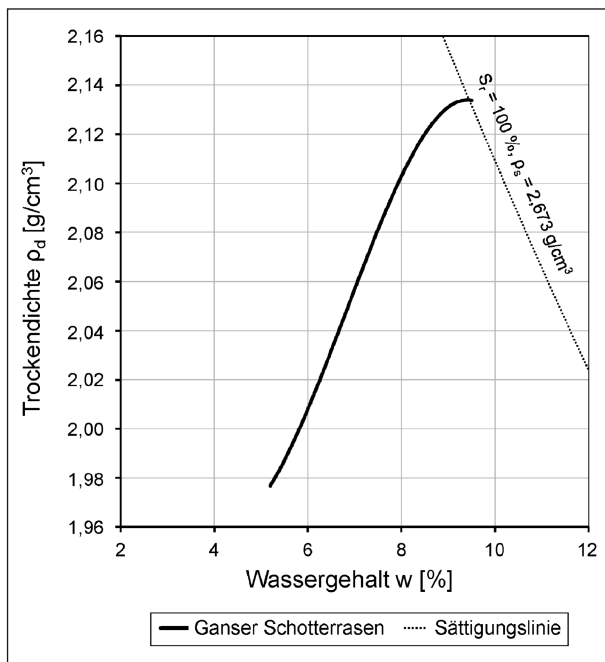


Bild 70: Proctorkurve des Schotterrasens

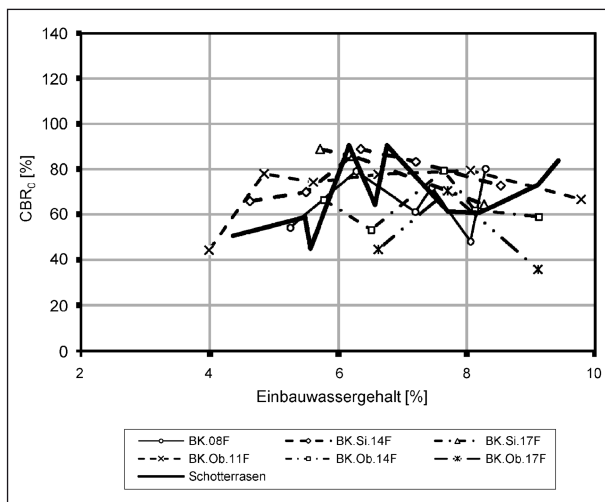


Bild 71: CBR-Werte für Schotterrasens im Vergleich zu den ermittelten Werten für die Mischungen aus gebrochenem Kalkstein

10 Zusammenfassung

Bankettmaterialien sollen zwei gegensätzliche Anforderungen erfüllen. Einerseits sollen sie witterungsunempfindlich sein und eine dauerhaft, hohe Tragfähigkeit aufweisen und andererseits müssen sie ein möglichst hohes Schadstoffrückhalt und -bindevermögen haben.

Für die bestehenden Bankettbauweisen gemäß ZTV E-StB 09 wird von einigen Straßenbauverwaltungen ein Optimierungsbedarf gesehen. Der Verzicht auf die erforderliche Oberbodenschicht aus

Verkehrssicherheitsgründen in der Baupraxis und der unklare Begriff „Schotterrasen“ führen dazu, dass die bau- und umwelttechnischen Anforderungen nicht immer ausreichend erfüllt werden. Deshalb ist es erforderlich, die Bauweisen für Bankette weiter zu entwickeln. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Lösung verfolgt, wonach das Bankett aus einer Mischung von einem 0/32 mm tragfähigen, grobkörnigen Kiesmaterial und Feinkorn bzw. Oberboden aufgebaut wird. Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein geeignetes Kriterium für die Zusammensetzung der Bankettmaterialien zu definieren, wobei der Schwerpunkt auf die Tragfähigkeit gelegt wurde.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 0/32 mm Gemische aus ungebrochenen, gebrochenen und rezyklierten Gesteinskörnungen mit verschiedenen Feinkorn- bzw. Oberbodenanteilen untersucht. Im Labor wurden die Mischungen klassifiziert, die Verdichtungseigenschaften ermittelt und CBR-Versuche in Kombination mit Proctorversuchen durchgeführt. Die gesättigte Durchlässigkeit wurde für zwei Einbaubedingungen je Material bestimmt ($D_{Pr} = 97\%$ und $D_{Pr} = 100\%$).

Weiterhin wurde anhand der Laborergebnisse die Tragfähigkeit von vier Versuchsmischungen (zwei aus gebrochenen, eine aus ungebrochenen und eine aus rezyklierten Gesteinskörnungen) in großmaßstäblichen Technikumsversuchen untersucht. Zur Ermittlung der Tragfähigkeit wurden sowohl statische als auch dynamische Plattendruckversuche durchgeführt. Das Ballon-Verfahren wurde zur Bestimmung des Verdichtungsgrads der Bankettaufbauten angewandt. Der Einfluss des Wassergehalts auf die Tragfähigkeit wurde durch die Bewässerung der aufgebauten Schichten untersucht.

Die CBR-Versuche an den 0/32 mm Gesteinskörnungen zeigen aufgrund des Größenverhältnisses von Größtkorn zum Durchmesser des Druckstempels große Streuungen. Die ermittelten Werte können daher nur als Orientierungshilfe für die erzielbare Tragfähigkeit verwendet werden. Dennoch ist bei allen Gemischen der Trend zu erkennen, dass ein höherer Oberbodenanteil zu niedrigeren CBR-Werten führt. Bei vielen Mischungen werden die CBR-Werte nur gering vom Wassergehalt beeinflusst.

Hinsichtlich der Durchlässigkeit weisen die Materialien eine weite Spanne auf. Die ermittelten

k-Werte liegen zwischen $4,9 \cdot 10^{-3}$ m/s und $1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s und sind von der Kornform, dem Feinkorn- bzw. Oberbodenanteil und dem Verdichtungsgrad abhängig. Die Proben aus ungebrochenen und gebrochenen Gesteinskörnungen weisen niedrigere k-Werte als die Betonbruch-Gemische auf. Außerdem ist festzustellen, dass ein höherer Feinkornanteil und Verdichtungsgrad zu niedrigeren k-Werten führt.

Die Auswertung der Plattendruckversuche hat die Wirkung verschiedener Faktoren auf die Tragfähigkeit nachgewiesen. Die gebrochene Gesteinskörnung, die keine Zugabe von Oberboden enthält, weist wegen der scharfkantigen Körner und des niedrigeren Feinkornanteils eine hohe Tragfähigkeit auf. Die ermittelten E_{V2} -Werte liegen höher als 225 MN/m^2 . Der große Einfluss durch die Zugabe von Oberboden bzw. des Feinkornanteils auf die Tragfähigkeit zeigt sich im Vergleich der Versuchsböden aus gebrochenen Materialien. Eine Erhöhung des Feinkornanteils von ca. 4 M.-% auf 19 M.-% hat eine Reduzierung des Verformungsmoduls E_{V2} von etwa 75 % verursacht. Jedoch sind alle Werte trotz des hohen Feinkornanteils und des geringeren Verdichtungsgrades ($D_{Pr} = 94 \%$) größer als 53 MN/m^2 .

Die an den Mischungen aus ungebrochener Gesteinskörnung und RC-Material durchgeführten statischen und dynamischen Plattendruckversuche zeigen im Vergleich zur Mischung mit gebrochener Gesteinskörnung (BK.Ob.17F) etwas höhere Tragfähigkeiten. Dies ist vermutlich auf den etwas geringeren Feinkornanteil von ca. 14 M.-% zurückzuführen. Vergleicht man die Mischungen aus ungebrochener Gesteinskörnung mit der Mischung aus RC-Beton, die sehr ähnliche Korngrößenverteilungen aufweisen (Bild 72), zeigt sich, dass beim

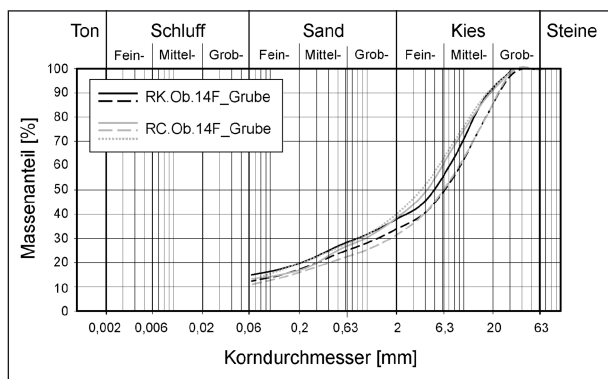


Bild 72: Korngrößenverteilung der Mischungen RK.Ob.14F und RC.Ob.14F für die Technikumsversuche

RC-Material trotz eines geringeren Verdichtungsgrades geringfügig höhere Tragfähigkeiten erreicht werden.

Die Ergebnisse der dynamischen Plattendruckversuche haben größtenteils das in der Literatur beschriebene Verhältnis zu den E_{V2} -Werten bestätigt. Da die Ausführung und die Auswertung dieses Versuchs sehr schnell und einfach sind, und die Fehleranfälligkeit dabei gering ist, hat es sich als ein wertvolles Verfahren für die Bestimmung der Tragfähigkeit erwiesen.

11 Empfehlungen für die Baupraxis

Für den Aufbau von Banketten sind aus Herstellungsgründen einschichtige Bauweisen zu bevorzugen. Bankette werden direkt auf der Frostschuttlage gebaut, die eine hohe Tragfähigkeit aufweist. Eine tragfähige Unterlage fördert eine bessere Verdichtung des Materials und somit ist eine ausreichende Tragfähigkeit der oberen Schicht leichter zu erreichen. Wie in ZTV E-StB 09 beschrieben, werden die Bankettmaterialien gleichmäßig in Lagen von höchstens 30 cm Dicke eingebaut und verdichtet. Ein Verdichtungsgrad D_{Pr} von 100 % sollte unter diesen Baubedingungen erreichbar sein und wird deshalb vorgeschlagen.

Für die Herstellung werden Gemische aus Boden (Kies) bzw. Gesteinskörnungen und Feinkorn bzw. Oberboden mit einem Größtkorn von 32 mm verwendet. Auf Kompostmischungen als Ersatz des Oberbodens sollte aufgrund des hohen organischen Anteils verzichtet werden. Es wird empfohlen als bautechnisches Kriterium für die Zusammensetzung der Bankettmaterialien unabhängig vom Oberbodenanteil einen maximalen Feinkornanteil der Bankettmaterialien vorzugeben.

Basierend auf den Versuchsergebnissen dieser Forschungsarbeit sollte der Feinkornanteil der Bankettmaterialien einen Wert von 15 M.-% nicht übersteigen. Höhere Werte könnten, insbesondere nach Bewässerung des Materials, zu einer Unterschreitung der erforderlichen Trag- und Verformungsverhalten beim Abkommen von Lastwagen führen. Mit solchen Materialien sollte ein Verformungsmodul $E_{V2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ bzw. $E_{Vd} \geq 30 \text{ MN/m}^2$ bei einem Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100 \%$ sicher erreichbar sein. Falls eine höhere Tragfähigkeit für Bankette erforderlich ist, sollte der Feinkornanteil

der Materialien ggf. weiter beschränkt werden. Bei den Technikumsversuchen wurde ein E_{v2} -Wert $\geq 80 \text{ MN/m}^2$ außer bei der Mischung BK.Ob.17F ($D_{Pr} = 94 \%$ und Feinkornanteil von 19,7 M.-%) und ein Versuch bei der Mischung RK.Ob.14 F ($D_{Pr} = 102 \%$ und Feinkornanteil von 13,9 M.-%) erreicht. Es wird deshalb angenommen, dass Verformungsmoduln von $E_{v2} = 80 \text{ MN/m}^2$ bzw. $E_{vd} = 40 \text{ MN/m}^2$ für Kies-Schluff-Gemische mit einem Feinkornanteil von maximal 13 M.-% bei $D_{Pr} = 100 \%$ erreicht werden sollten.

Wie die Technikumsversuche gezeigt haben, könnten für Bankettgemische sowohl natürliche ungebrochene Böden wie auch gebrochene Gesteinskörnungen bzw. Recycling-Baustoffgemische verwendet werden. Bei ungebrochenen Gesteinskörnungen sind in der Regel etwas niedrigere Tragfähigkeitswerte zu erwarten.

Gemäß den RAS-Ew (FGSV, 2005) sollte das Bankett zum Schutz des Bodens und Grundwassers schwach durchlässig, d.h. $k < 10^{-6} \text{ m/s}$, sein. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde dieses Kriterium bei allen Mischungen mit einem Feinkornanteil $> 15 \text{ M.-%}$ durchgehend sichergestellt, unabhängig von der Art des Feinkorns. Bei allen Mischungen mit Oberboden wurden diese k -Werte bereits bei Feinkornanteilen von ca. 10 M.-% erreicht.

Geeignete Gemische für Bankette stellen demnach Baustoffgemische 0/32 mm der Bodengruppen GU bzw. GT nach DIN 18196 dar. Solche Gemische könnten aus 0/32 mm Gesteinskörnungen für Kies- und Schottertragschichten nach TL SoB-StB (FGSV, 2004) mit Oberboden- bzw. Feinkornanreicherung hergestellt werden.

In Hinblick auf die umwelttechnischen Anforderungen wird die Angabe eines minimalen Feinkornanteils empfohlen, der das Schadstoffrückhalte- und -bindevermögen der Bankettmaterialien gewährleistet. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf die Tragfähigkeit von Bankettmaterialien gelegt wurde, können dazu aus den durchgeführten Untersuchungen keine Angaben gemacht werden.

Auf die bisher in den ZTV E-StB verwendeten Begriffe „Schotterrasen“ und „Oberboden“ kann dementsprechend zukünftig aus bautechnischer Sicht verzichtet werden und stattdessen ein Material der Bodengruppe GU bzw. GT gefordert werden. Im

Hinblick auf die erforderliche Tragfähigkeit ist ggf. der Feinkornanteil zu begrenzen. Die Angaben im Standardleistungskatalog STLK LB 112 (2014) sollten dementsprechend angepasst werden.

12 Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur vergleichsweise sandarme Ausgangsmaterialien der Körnung 0/32 mm verwendet, deren Körnungslinien im unteren Bereich des nach TL SoB-StB 04 (FGSV, 2004a) angegebenen Körnungsbandes liegen (siehe Bild 73). Es sollte deshalb geprüft werden, ob die ermittelten Tragfähigkeitswerte auch mit Mischungen erreicht werden, denen sandreiche Gesteinskörnungen nach TL SoB-StB 04 zugrunde liegen.

Hinsichtlich eines Anforderungswertes an die Tragfähigkeit von Banketten ist außerdem zu beachten, dass es dazu unterschiedliche länderspezifische Festlegungen gibt, die durch wissenschaftliche Untersuchungen bisher nicht belegt sind. Insbesondere im Hinblick auf die dauerhafte Standsicherheit von Bankettmaterialien zur Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit besteht Forschungsbedarf. Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Kies-Schluff-Gemische können dazu nur sehr beschränkt Aussagen gemacht werden, da dies nicht Gegenstand der Untersuchungen war. So zeigen die durchgeführten Labor- und Technikumsversuche zwar eine vergleichsweise geringe Wasserempfindlichkeit, für die Dauerhaftigkeit können aber insbesondere auch Temperatureinflüsse (Frost-Tau-Wechsel)

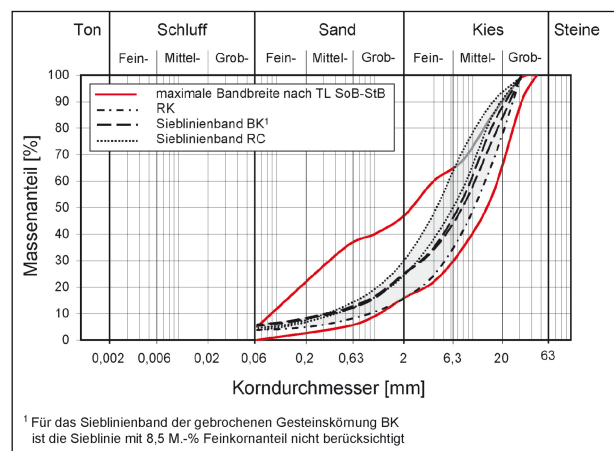


Bild 73: Sieblinienbereich der verwendeten Ausgangsmaterialien im Vergleich zur Bandbreite nach TL SoB-StB 04 (FGSV, 2004a)

maßgebliche Auswirkungen haben. Zur Klärung dieser Fragestellung werden deshalb weitergehende Untersuchungen empfohlen.

Zur Überprüfung der erreichten Tragfähigkeit von Banketten kommen prinzipiell statische und dynamische Plattendruckversuche in Frage. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die für die Oberfläche von Banketten vorgesehene Neigung von bis zu 12 % größer ist als im Regelwerk angegeben (nach TP BF-StB – Teil B 8.3 darf die Neigung der Prüffläche nicht größer als 6 % sein). Weitere Untersuchungen über den Einfluss der Neigung der Prüffläche auf die Ergebnisse des statischen und dynamischen Plattendruckversuchs werden in diesem Zusammenhang empfohlen.

13 Literatur

- AMPADU, S., I., K. (2007): Springer Proceedings in Physics: Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer, Vol. 112, Berlin, S. 137-144
- BAUMGÄRTEL, T. (2008): Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 5.145/2006/ CGB, Technischen Universität München, München
- BENNERT, T.; MAHER, A. (2005): The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material. New Jersey Department of Transportation, New Jersey
- DEMPWOLFF, R. (1952): Bemessung von Asphaltdecken im Flugplatzbau. Bitumen, Heft 6, S. 133-141
- EPPEL, J.; BÖKER, J. (2009): EU-Projekt „Green Concrete“ – Umweltverträglichkeit und Belastbarkeit von Tragschichten aus Recyclingbaustoffe: Versuche in der Landespflege. LWG Veitshöchheim
- EPPEL, J.; FRANK, R.; BÖKER, J. (2007): Schotterrasen aus Recyclingbaustoffen – Zwischenbericht zum EU-Forschungsprojekt – Green Concrete. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Veitshöchheim
- FLOSS, R. (2001): Verdichtungstechnik im Erdbau und Verkehrswegebau – Band 1. BOMAG GmbH, Boppard
- FLOSS, R. (1997): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – Kommentar mit Compendium Erd- und Felsbau. Kirschnaum, Bonn
- FLOSS, R. (1973): Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Auswahl und Dimensionierung von Straßenbefestigungen. Straße und Autobahn, Ausgabe 1/1973, S. 17-26
- FLOSS, R. (1970): Vergleich der Verdichtungs- und Verformungseigenschaften unstetiger und stetiger Kiessande hinsichtlich ihrer Eignung als ungebundenes Schüttmaterial im Straßenbau. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
- FLOSS, R.; SIEDEK, P.; VOSS, R. (1968): Verdichtungs- und Verformungseigenschaften grobkörniger, bindiger Mischböden. Wilhelm Erbst & Sohn, Berlin
- Green Concrete: Broschüre [Online]. Verfügbar unter: www.baunat.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/H87400/Forschungsprojekte/GREEN-CONCRETE-Brosch%C3%BCre.pdf [26.05.2014]
- HASLGRÜBLER, P. (2008): Vegetationsverhalten auf Schotterrasenparkplatzflächen aus Baustoffrecyclingmaterial – Optimierung der Green Concrete Gräser-Kräuter-Saatgutmischung. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Wien
- HEIDGER, C. (1997): Entwicklung, Konstruktion und Ausführung sicherer Schotterrasen. Institute für Grünplanung und Gartenarchitektur, Universität Hannover, Hannover
- HILLMANN, R.; KOCHER, B. (2013): Anforderungen an den Bau von Banketten und den Umgang mit Bankettschälgut. Straßen und Autobahn, Ausgabe 12/2013, S. 929-933
- KUHL, O. (2014): Ausführung von Banketten nach ZTV E-StB, Umsetzung bei Hessen Mobil – Schulungsveranstaltung: Neuerungen und Fortschreibungen im technischen Regelwerk (Vortrag am 25. September 2014)

- LÄNGERT, S.; FLORINETH, F. (2005): Anlage und Monitoring von Schotterrasen-Versuchsflächen im Raum Wien – Empfehlungen für die Errichtung und Erhaltung von Schotterrasen. Institut für Ingenieurbioogie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur Wien, Wien
- LIVNEH, M.; GREENSTEIN, J. (1978): A Modified California Bearing Ration Test for Granular Materials. American Society for Testing and Materials, Vol. 1, Nr. 3, Philadelphia, S. 141-147
- MASLOWSKI, S. (2007): Schotterrasen – Im Spannungsfeld zwischen Theorie und Praxis. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien
- MASLOWSKI, S.; LÄNGERT, S. (2008): Schotterrasen aus gebrochenem Naturstein in Wien – Im Spannungsfeld zwischen Theorie und Praxis. Tagung Freiraum – Grünraum – Bauen – Erhalten, Universität für Bodenkultur Wien, Wien
- MEYER, D. (1980): Veränderung des CBR-Wertes in Abhängigkeit von der Versuchsdurchführung und vom Probenalter. Forschungsbericht FA 5.061 G78E, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität München, München
- OSTERMAYER, H. (1976): Das Verhalten gemischtkörniger Böden in einachsigen Formänderungszustand. Dissertation, Technische Universität München, München
- PITHA, U.; SCHARF, B.; NIEDERSCHICK, M.; HASLGRÜBLER, P. (2008). Green Concrete – Schotterrasen aus Baustoffrecyclingmaterialien. Tagung Freiraum – Grünraum – Bauen – Erhalten, Universität für Bodenkultur Wien, Wien
- SCHWABBAUER, T.; FILLIBECK, J.; FLOSS, R. (2002): Ermittlung von Zusammenhängen zwischen CBR-Wert des Tragschichtmaterials und der Tragfähigkeit E_{v2} von Tragschichten ohne Bindemittel. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Heft 852, Bonn
- SIEDEK, P.; VOSS, R. (1955): Über die Lagerungsdichte und den Verformungswiderstand von Korngemischen. Straße und Autobahn, August 1955, Heft 8, S. 273-277
- VOSS, R. (1961): Lagerungsdichte und Tragwerte von Böden bei Straßenbauten. Straße und Autobahn, Heft 4, S. 115-124
- WEINGART, W. (1998): Einfluss des Natursand- und Brechsandanteils auf die Standfestigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel. Straße und Autobahn, Ausgabe 9/1998, S. 474-478
- WERKENTHIN, M.; WESSOLEK, G.; KLUGE, B. (2014): Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten. Entwurf Kurzbericht FE 05.160/2010/MGB, Technische Universität Berlin – FG Standortkunde Bodenschutz, Berlin

Normen

- Deutsches Institut für Normung (1998): DIN 18121-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt – Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung. Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2012): DIN 18121-2: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt – Teil 2: Bestimmung durch Schnellverfahren. Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2011): DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2011): DIN 18125-2: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Boden – Teil 2: Feldversuche. Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2002): DIN 18128: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Glühverlustes. Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (1998): DIN 18130-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche. Beuth Verlag, Berlin
- Deutsches Institut für Normung (2011): DIN 18196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Beuth Verlag, Berlin

Deutsches Institut für Normung (2004). DIN 66137-2: Bestimmung der Dichte fester Stoffe – Teil 2: Gaspyknometrie. Beuth Verlag, Berlin

Prüfvorschriften, Richtlinien und Merkblätter

BTR RC-StB (2004): Brandenburgische Technische Richtlinien für die Verwendung von Recycling-Baustoffen im Straßenbau; Herstellung, Prüfung, Auslieferung und Einbau. Gemeinsame Richtlinien des Ministeriums für ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz und des Ministeriums für Infrastruktur und Raumordnung des Landes Brandenburg

FGSV (2014): Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau – Leistungsbereich 112: Schichten ohne Bindemittel (STLK LB 112). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (2012a): Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (2012b): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (2012c): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – TP BF-StB – Teil B 7.1, Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio). Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Köln

FGSV (2009): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (2008): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Entwässerung (RAS-Ew). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (2004a): Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische für Böden für die Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (2004b): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (2003): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB – Teil B 8.3. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

FGSV (1977): Merkblatt für die Befestigung von Parkflächen. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln

FLL (2008): Richtlinie für die Planung, Ausführung und Unterhaltung von begrünbaren Flächenbefestigungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, Bonn

Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg (2012): ME 1.2 Querschnittsgestaltung – Standfester Bankettstreifen, Fassung 06/2012

Thüringer Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Verkehr (2010): Erlass zur Einführung von Richtlinien für Straßen im Geschäftsbereich des Thüringer Ministeriums für Bau, Landesentwicklung und Verkehr

ZTV-StB LSBB (2013): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Straßenbauarbeiten für den Geschäftsbereich der Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt (ZTV-StB LSBB 13). Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmeßmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöllner, Pöppel-Decker € 23,00
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalserkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Ripke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier
Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgebundenen, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
Radenberg, Miljković, Schäfer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hünger, Börner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)
Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
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