

Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 95

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed to give a 3D effect. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs down the right edge of the cover.

Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

von

Ruth Bialucha
Thomas Merkel
Heribert Motz
Derik Demond

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.
Duisburg

Sven-Olaf Schmidt
Hans-Josef Ritter
Sonja Haas

IKM – Institut für Kalk- und Mörtelforschung e.V.
Köln

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 95

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. 06.0099/2012/EGB:
Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Fachbetreuung

Christine Kellermann-Kinner

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 978-3-95606-236-0

Bergisch Gladbach, Februar 2016

Kurzfassung – Abstract– Summary

Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Für die Kontrolle der Herstellung von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) im Straßenoberbau wird eine Referenzdichte benötigt, die in Deutschland und vielen anderen europäischen Staaten durch den Proctorversuch nach DIN EN 13286-2 ermittelt wird. Während eines Proctorversuches wird mit einem Fallgewicht, das auf die Prüfkörperoberfläche nach festgesetzten Parametern fällt, der Hohlraumanteil einer Versuchsprobe reduziert und die Raumdichte erhöht. Durch Wasserzugabe wird der Verdichtungsprozess gefördert, wobei es für eine Versuchsprobe einen Wassergehalt gibt, bei dem sie sich in Abhängigkeit von der eingesetzten Verdichtungsenergie optimal verdichten lässt und eine maximal erreichbare Trockendichte erzielt.

Aufgrund des relativ geringen Feinanteils der Sieblinie eines Baustoffgemisches für ToB ist der Proctorversuch hier jedoch nur eingeschränkt verwendbar, da sich vollständige Verdichtungskurven aufgrund von Entwässerungsprozessen während des Versuches häufig nicht generieren lassen. Statt konvexen werden auch konkave Kurven, lineare Anstiege oder nicht zweckdienliche Kurvenverläufe gemessen, die eine Bestimmung eines optimalen Wassergehaltes und einer Trockendichte nach der gängigen Auswertemethode (Kurvenmaximum) nicht ermöglichen.

Zur Herstellung einer ToB werden Baustellenfahrzeuge und -geräte eingesetzt, die zur Verdichtung die Parameter Frequenz, Amplitude und Eigenlast nutzen. Konträr dazu erfolgt die Laborverdichtung, die für die Verdichtung entsprechend Proctorverfahren ein Fallgewicht nutzt. Neben der Tatsache, dass der Proctorversuch für dränierende Baustoffe nicht optimal geeignet ist, besteht somit eine Diskrepanz zwischen der Labor- und der In-situ-Verdichtung.

Neben dem Proctorverfahren stehen europäisch genormte Laborverdichtungsverfahren zur Verfügung, die Verdichtungsparameter nutzen, die der In-situ-Verdichtung entsprechen. Aufgrund der vorgestellten Problematik des Proctorversuches wurde daher ein umfassendes Forschungsprojekt durchgeführt, welches das Ziel hatte, Lösungsansätze für dränierende Baustoffe während der Laborverdich-

tung zu finden. Dies beinhaltet im primären Sinne die Suche nach einem alternativen Verdichtungsverfahren, das die Problematik für dränierende Baustoffe nicht aufweist und das mehr der In-situ-Verdichtung entspricht.

Das Forschungsprojekt identifizierte das Vibrationshammerverfahren nach DIN EN 13286-4 als das Verfahren, welches sehr vergleichbare Ergebnisse zum Proctorverfahren liefert. Weiterhin ist dieses Verfahren sehr in-situ konform, leicht in der Handhabung und weniger kostenintensiv. Anhand von Literaturquellen konnte die scheinbare Kohäsion als Ursache für konvexe Verdichtungskurven identifiziert werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass Auswertevorgaben für derartige Kurvenverläufe existieren. Weiterhin besteht eindeutig die Möglichkeit ofentrockene Proben zu verdichten und dennoch ein vergleichbares oder leicht erhöhtes Trockendichteergebnis im Vergleich zu einer optimalen Verdichtung zu erzielen. Nachteil hierbei ist jedoch die fehlende Angabe für den Wassergehalt auf der Baustelle. Daher scheint die Vibrationshammerverdichtung mit einem Wassergehalt knapp über der Trockenverdichtung, die beide notwendigen Parameter liefert, ein erfolgversprechender Ansatz zur Lösung der Problematik des Proctorversuches für ToB-Baustoffgemische zu sein.

Determination of laboratory reference density for unbound granular base layers

The monitoring of production of unbound base layers requires a reference density. In Germany and many other European countries this reference density is determined by the Proctor test according to DIN EN 13286-2. During a Proctor test a falling weight falls on a sample surface in accordance with established parameters. This process reduces the cavity of a sample and raises the bulk density. By adding water to the sample, the compression process is encouraged and maximum dry density can be achieved as a function of compaction energy and water content.

Due to the relative low fine content of a grading curve corresponding to a unbound subbase layer the Proctor test is limited in application, since the

necessary densification curve cannot be established due to drainage processes during the experiment. Instead of convex, concave curves, linear increases or not appropriate gradients are recorded that do not allow a determination of an optimum water content and corresponding dry density according to the standard evaluation method (curve maximum).

Frequency, amplitude and dead load are used by construction vehicles during in-situ compaction of building materials. The laboratory test uses a drop weight for the compression process contrary to the field compaction. Besides the fact that the Proctor test is not well suitable for draining building materials there is a discrepancy between laboratory and in-situ compaction parameters.

The Proctor test is faced by alternative standardized European laboratory densification test that are using densification parameters corresponding to the in-situ compaction. On basis of the presented Proctor test problems a comprehensive research project was carried out. The primary aim of this project was a solution for draining building materials during laboratory compaction. This included two aspects. First: an alternative densification method or an alternative proceeding which are more reliable. Second: a compaction method that is more similar to field compaction.

The research project identified the vibratory hammer method according to DIN EN 13286-4 as the method that provides comparable results to the Proctor test. Furthermore, this method is very in-situ compliant, easy to use and less cost intensive than the Proctor method.

The apparent cohesion could be identified as the reason of convex compaction curves. In addition it was shown that evaluation instructions already for convex curves exist. Furthermore there is a distinct possibility to compact oven-dried samples and still achieve a comparable or slightly increased dry density result in comparison to the optimal compression during Proctor testing. However, disadvantage of this proceeding is a lack of water content information for the test-site. Therefore, the vibratory hammer compaction with a water content just slightly above the dry compaction appears to be a promising approach to solve the drainage problem of the Proctor test for subbase materials.

Determination of laboratory reference density for onbound granular base layers

1 Research aim

Aim of the research project was a comparative assessment of European standardized laboratory tests methods (Proctor compaction, Vibrating hammer and Vibrating table) which are used for the densification of unbound mixtures.

The result of a Proctortest is used to determine a required reference density to calculate the density degree of an unbound base layer. Depending on the test results of the presented comprehensive laboratory study it should be investigated if the Proctortest can be replaced by another densification method, which would lead to the required reference density.

The research project should also result in an adjustment of the regulatory framework for unbound base layers in road construction in Germany.

2 Problem setting

The compaction of unbound building mixtures in accordance with DIN EN 13286-2 [2] reduces the void content of the mixtures. The compaction generates a higher mass per volume unit. The achievable dry density depends inter alia on the moisture content of the test sample, but also on the applied effective compression work. Figure 1 shows the relationship between achievable dry density and moisture content.

Compaction curves as shown in Figure 1 can only be clearly measured for unbound building materials, from which the supplied sample water cannot drain. However, antifreeze and gravel base layers are composed by specifying appropriate particle size distributions specifically with regard to a capillary breaking effect. Therefore, the laboratory compaction of unbound building mixture materials results into difficulties to determine the dry density and optimal moisture content. Instead of a convex compaction curve according to Figure 1 concave

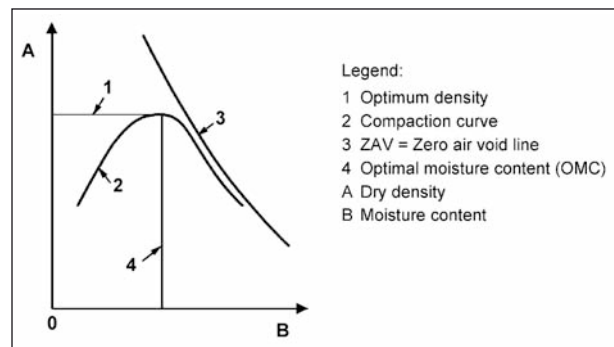


Fig. 1: Relationship between dry density and moisture content after DIN EN 13286-1 [1]

curves, linear increases or other forms of curves are measured.

One approach to solve the drainage problem during the Proctor compaction could be an in-situ-compliant operating laboratory compaction method. These include the Vibrating hammer according to DIN EN 13286-4 [3] and the Vibrating table according to EN 13286-5 [4]. An in-situ equivalent compaction in the laboratory or an optimized experimental procedure could possibly lead to a solution with draining material mixtures.

3 Investigation programm

In addition to a laboratory comparison of both involved research institutes, which should ensure a consistent approach to the experimental procedure and enable to identify possible sources of errors, two test materials with a maximum grain size of 32 mm according to the SDV requirements by the TL SoB-StB [6] were selected and compaction tests according to EN 13286-4 [3] and DIN EN 13286-5 [4] compared to Proctortest according to EN 13286-2 [2] were accomplished. The goal of this proceeding was to select a compression procedure, which was studied within the second work package through a comprehensive comparative material number compared to the Proctor method.

For the second work package twelve different unbound mixtures with a particle size distribution of 0/32 mm were examined. The selection of the building materials were conducted with respect to the rock groups in Annex A of the draft TL Gestein-StB [5]. Comparative compaction tests were performed on dried and moistened test samples.

4 Introduction of the compaction methods

Within the research project three European standardized compression methods were compared, which are shown in Figure 2 to Figure 4.

During a Proctortest a drop weight is used to obtain a denser grain matrix. During the compression with the Vibration hammer a densification of a test material is realized by frequented blows of an impact-drill that is directly vertical connected to a sample surface by a masher plate. The compression of a test material with the Vibrating table is reached by a vibration with predetermined amplitude and frequent and a load weight.



Fig. 2: Proctorverdenser nach DIN EN 13286-2



Fig. 3: Vibrationshammer nach DIN EN 13286-4



Fig. 4: Vibrationstisch nach DIN EN 13286-5

5 Results and discussion

The input characterization of all integrated building material mixtures was carried out by the determination of particle density, water absorption, particle shape, resistance to fragmentation and particle size distribution. The achieved results complied the requirements by the TL Gestein-StB and the particle size distribution of the building material mixtures fulfill the SDV-boundary-lines for gravel base layers corresponding to TL SoB-StB.

Based on the results of the first work package, the Vibration hammer proceeding could be selected as the method which was compared in the second work package of the research project with the Proctor application. From the measured data of the compaction tests conducted within the first work package a working hypothesis, which provides a compression test with a water content of about 3 M.-%, could be formulated. Moreover, the test results demonstrate that dry compacted test samples are achieving equivalent or slightly higher dry densities as test samples that were compacted with an optimal water content.

The entire tests of the comprehensive second work package confirmed the results of first work package. The compaction with the Vibration hammer yielded equivalent results compared to the Proctor method. This applies for optimal water content test samples and for compaction of dry test samples (see Figure 5 and Figure 6).

The achieved correlation coefficient of nearly one obtained for optimum moisture content or dry compacted samples highlights the result equivalence of the two compaction methods.

The transfer of a dry compaction from the laboratory to building practice cannot be performed due to the problem of dust occurrence during in-situ densification. To solve this problem, the working hypothesis of the first work package was further investigated. Figure 7 shows the averaged density results for all test materials achieved from compaction with the Vibration hammer using a 3 M.-% water content compared to results from Proctortests with optimal water content.

From Figure 7 it can be clearly seen that the test with 3 M.-% water content conducted with the Vibration hammer and the test with optimal moisture content conducted by the Proctor

proceeding are achieving results that are nearly equivalent. The linear regression of the measured results obtained a correlation coefficient of $R^2 = 0,96$.

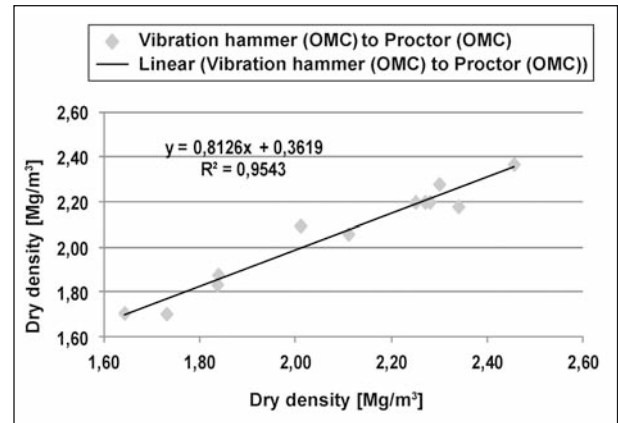


Fig. 5: Achieved correlation between DIN EN 13286-4 (OMC) and DIN EN 13286-2 (OMC)

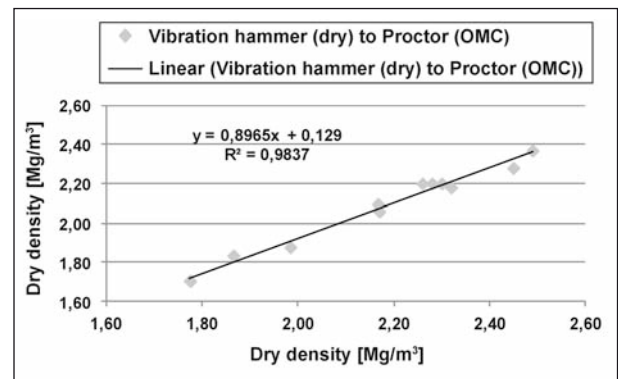


Fig. 6: Achieved correlation between DIN EN 13286-4 (dry samples) and DIN EN 13286-2 (OMC)

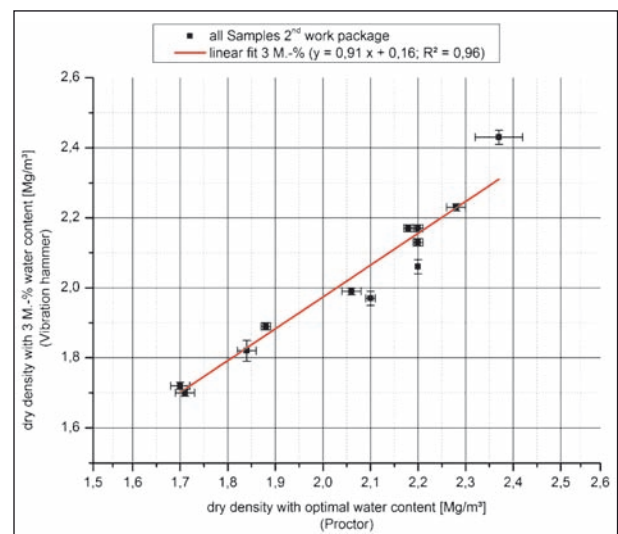


Fig. 7: Achieved correlation between Proctor-tests with an optimal water content and Vibration hammer compaction with 3 M.-% water content

6 Summary and outlook

Ordinarily the Proctor method is used in Germany to determine the required reference density to calculate the density degree of an unbound base layer. On basis of the comprehensive laboratory study on fourteen building material mixtures it could be shown that the Vibration hammer method is an adequate laboratory compaction method compared to the previously used Proctor method in Germany.

With this method, approximately the same results can be obtained compared to the Proctor test. The advantages of the Vibration hammer method are in better handling, easier and faster implementation of the test and lower investment costs for the test machine. In addition, the vibration parameters of the Vibration hammer compaction are nearly analogous to the in-situ compression methods.

Based on the results and the motivation of the research project respectively the issue of the Proctor-test for unbound mixtures used in the field for unbound base layers the following solution options for determining the dry density with the Vibration hammer can be mentioned:

- Dry densification of test samples,
- densification of test samples with a fixed water content.

When using the dry compaction in the laboratory a suitable water content for in-situ compaction must be defined. Therefore the research institutes prefer the laboratory compaction with a fixed water content. The selected water content can be applied to the construction site, because usually moistened mixtures of building materials are delivered. Furthermore the results of the dry densities of unbound building mixtures show a low sensitivity with respect to changes in water content during a compression tests. Therefore the research contractors propose the use of an uniform water content during laboratory compaction. The results of this research project lead to the conclusion that a water content of 3 M.-% appear to be suitable.

Due to the comparable densification parameters of the Vibrating hammer method it is also expected that test samples prepared with a Vibrating hammer are reaching more realistic practical relevant water permeabilities for unbound mixtures.

The verification of the proposed uniform water content and its influence on sample permeabilities must be objects of further investigations. The presented results and further research investigations could have consequences on the existing proceedings and the in-situ construction practice.

7 Literature

- [1] DIN EN 13286-1:2003-07: Test methods for laboratory reference density and water content; Introduction, general requirements and sampling
- [2] DIN EN 13286-2:2010-12: Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content; Proctor compaction
- [3] DIN EN 13286-4:2003-07: Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 4: Test methods for laboratory reference density and water content; Vibrating hammer
- [4] DIN EN 13286-5:2003-07: Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 5: Test methods for laboratory reference density and water content; Vibrating table
- [5] TL Gestein-StB: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Entwurf 2013-02
- [6] TL SoB-StB 04: Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004/Fassung 2007

Inhalt

Abkürzungen	10	6 Ergebnisse Arbeitspaket 2	32
1 Motivation und Forschungsziel	11	6.1 Probenmaterialien.	32
2 Stand der Wissenschaft und Technik	11	6.2 Kenndaten der Baustoffgemische	33
3 Lösungsweg des Forschungsprojektes	16	6.3 Korngrößenverteilungen	33
3.1 Arbeitspaket 1.	16	6.4 Proctor- und Vibrationshammerversuche	33
3.2 Arbeitspaket 2.	16	6.5 Analyse der Ergebnisse	34
4 Beschreibung der verwendeten Verdichtungsverfahren	18	6.6 Schlussfolgerungen aus Arbeitspaket 2.	39
4.1 Proctorversuch nach DIN EN 13286-2.	18	7 Fazit und Ausblick	40
4.2 Vibrationshammerversuch nach DIN EN 13286-4.	19	8 Literatur	40
4.3 Vibrationstischversuch nach DIN EN 13286-5.	20		
4.4 Anmerkungen und Anpassungen zu den Verdichtungsverfahren	21	Anhänge	
5 Ergebnisse Arbeitspaket 1	22	Die Anhänge A – F zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:	
5.1 Probenmaterialien.	22	http://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar	
5.2 Kenndaten der Baustoffgemische	22		
5.3 Korngrößenverteilung und Kornzertrümmerung (Nachverfeinerung)	23		
5.4 Interlaboratoriumsvergleich	25		
5.4.1 Vergleichsversuche Proctorverdichter	25		
5.4.2 Vergleichsversuche Vibrationshammer.	26		
5.4.3 Vergleichsversuche Vibrationstisch	27		
5.5 Zusammenfassung	28		
5.6 Analyse der Ergebnisse	28		
5.7 Verfahrenstechnische Aspekte	31		
5.8 Schlussfolgerungen aus Arbeitspaket 1.	32		

Abkürzungen

ASTM	American Society for Testing and Materials, ASTM International	TL Gestein-StB	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
BSI	British Standard Institution		
DIN	Deutsches Institut für Normung	TL SoB-StB	Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
EDS	Edelstahlschlacke		
EN	Europäische Norm		
FEhS	FEhS-Institut, FEhS – Institut für Baustoff-Forschung	ToB	Tragschicht ohne Bindemittel
		US	Untere Sieblinie
HMVA	Hausmüllverbrennungsasche	σ_r	Präzisionsgröße, Wiederholstandardabweichung
HOS	Hochfenstückschlacke		
IKM	Institut für Kalk- und Mörtelforschung	σ_R	Präzisionsgröße, Vergleichsstandardabweichung
KGV	Korngrößenverteilung	\emptyset	Durchmesser
LDS	Konverterschlacke nach dem Linz-Donawitz-Verfahren (LD-Schlacke)		
M	Mean = Mittelwert		
M.-%	Massenprozent		
Mod.	Modifiziert		
n. B.	nicht bestimmbar		
Opt.	Optimal (im Sinne des Wassergehaltes)		
OS	Obere Sieblinie		
RC-Baustoff	Recycling-Baustoff		
SD	Standard Deviation = Standardabweichung		
SDV	Suppliers Declared Value (entsprechend Anforderungen durch TL SoB-StB)		
SoB	Schicht ohne Bindemittel		
Stand.	Standard		
SWS	Stahlwerksschlacke		

1 Motivation und Forschungsziel

Die Motivation dieses Forschungsprojektes war in der Tatsache begründet, dass speziell für den Bereich der Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) häufig Probleme bei der Durchführung und Auswertung von Proctorversuchen vorliegen. Die Hauptursache hierfür liegt darin begründet, dass der Proctorversuch für den Erdbau entwickelt wurde. Die Baustoffgemische aus diesem Baubereich weisen in der Regel einen hohen Feinkornanteil auf, der für die Wasseraufnahme hauptverantwortlich ist. Hingegen tendieren ToB aufgrund ihres relativ geringen Feinkornanteils dazu, Wasser nicht „halten“ zu können. Aufgrund dessen entwässern Baustoffgemische für ToB häufig während eines Verdichtungsversuches und ermöglichen daher keine eindeutigen Kurvenmaxima und somit eine Bestimmung des Wertepaares aus Trockendichte und optimalem Wassergehalt.

Hauptziel des Forschungsprojektes war es, aufgrund der durchgeführten Untersuchungen eine vergleichende Bewertung der europäisch genormten Prüfverfahren zur Verdichtung von Baustoffgemischen (Proctor-, Vibrationshammer- und Vibrationstischversuch) für den Straßenoberbau vorzunehmen. Mit den neben dem Proctorversuch genannten Laborverdichtungsverfahren lagen in Deutschland bislang keine weitreichenden Erfahrungen vor. Insofern war es zusätzlich von Interesse, inwieweit durch diese Laborverdichtungsverfahren nach DIN EN 13286-4 [10] und -5 [11] die Verhältnisse bei der Verdichtung auf der Baustelle realistischer wiedergegeben werden.

In Abhängigkeit von den Untersuchungsergebnissen sollte geprüft werden, inwieweit der in Deutschland bisher geltende Bezug des Verdichtungsgrades auf das Ergebnis des Proctorversuchs zur Beurteilung der Verdichtung von SoB für den Straßenoberbau geändert werden könnte. Als Alternative würde dann eines der anderen europäisch genormten Laborprüfverfahren genutzt werden, wobei auch Modifikationen der Verfahren oder in der Versuchsdurchführung als Lösungsoption herangezogen würden. Das Forschungsprojekt sollte zudem zu einer Grundlage zur Anpassung des Regelwerkes für ToB im Straßenoberbau führen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Verdichtung ungebundener Baustoffgemische dient dazu, den Hohlraumanteil der Gemische zu verringern. Sie führt zu einer dichteren Lagerung der Körner eines Baustoffgemisches, wodurch sich Scher- und Tragfestigkeit erhöhen [16]. Messtechnisch ergibt sich eine höhere auf das Volumen bezogene Trockendichte. Die in der Praxis erreichbare Trockendichte hängt unter anderem vom Wassergehalt eines Baustoffgemisches, aber auch von der eingebrachten wirksamen Verdichtungsarbeit ab. Bei den angewandten Laborprüfverfahren zur Probenverdichtung wird eine konkret definierte Verdichtungsarbeit in ein zu prüfendes Gemisch eingetragen. Für diese spezifische Verdichtungsarbeit gibt es einen Wassergehalt, bei dem die zugehörige Trockendichte einen Höchstwert erreicht, man spricht hier vom optimalen Wassergehalt. Bild 1 zeigt das Grundprinzip der Beziehung zwischen Trockendichte und Wassergehalt.

Das Ergebnis des Laborversuches liefert grundsätzlich einen Bezugswert für die auf einer Baustelle erreichbare Dichte und lässt erkennen, bei welchem Wassergehalt sich ein Baustoffgemisch günstig verdichten lässt. Allerdings sind Verdichtungskurven entsprechend Bild 1 oft nur bei Baustoffgemischen eindeutig ermittelbar, aus denen das Wasser nicht frei abfließen kann. Frostschutz-, Kies- und Schottertragschichten dagegen werden durch die Vorgabe entsprechender Sieblinienbereiche gezielt hinsichtlich einer kapillarbrechenden Wirkung zusammengesetzt. Damit ergeben sich Schwierigkeiten sowohl bei der Ermittlung der erreichbaren Dichte als auch bei der des optimalen Wassergehaltes.

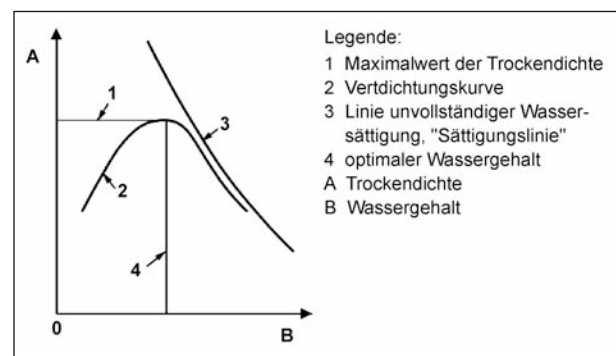


Bild 1: Beziehung zwischen Trockendichte und Wassergehalt nach DIN EN 13286-1 [7]

In Deutschland und einer Reihe weiterer europäischer Länder ist zur Bestimmung der Referenzdichte ungebundener Baustoffgemische der Proctorversuch, der in den 1930er Jahren von Ralph R. PROCTOR [24] entwickelt wurde, nach DIN EN 13286-2 [8] festgelegt. Allerdings zeigt die Praxis der Versuchsdurchführung deutlich, dass die Eignung des ursprünglich für Böden und andere Erdbaustoffe vorgesehenen Proctorversuchs bei Baustoffgemischen für den Straßenoberbau nur sehr eingeschränkt gegeben ist, weshalb seit Jahren über Alternativen diskutiert wird.

Der Proctorversuch nutzt zur Verdichtung von Probenmaterialien ein Fallgewicht, das mit einer festgelegten Schlaganzahl vertikal auf eine Prüfkörperoberfläche fällt. Verfahrenstechnisch ist diese Art der Verdichtung mit der In-situ-Verdichtung von Schichten ohne Bindemittel (SoB) nicht vergleichbar. Hier kommen je nach Anwendungsbereich verschiedene Verdichtungsgeräte in Form von Vibrationsplatten und -walzen zum Einsatz, die sich noch nach ihren Anregersystemen (Richtschwinger und Kreiserreger) weiter unterscheiden lassen. Allen gemein ist, dass sie als primäre Verdichtungsparameter die Größen Frequenz und Amplitude nutzen, um eine Verdichtung von Baustoffgemischen zu erzielen. Zusätzlich agieren die Eigenlasten der Geräte als Verdichtungselement. Einen Überblick über In-situ-Verdichtungsgeräte und deren Funktionsweise liefert z. B. PARSONS [21]. Theoretische Aspekte der In-situ-Verdichtung behandeln z. B. PAULMANN und GRÄTZ [22]. In Tabelle 1 sind einige typische Frequenz- und Amplitudenbereiche nach DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [14] angegeben, die während der In-situ-Verdichtung genutzt werden.

Zur Lösung der Problematik des Proctorversuches für Baustoffgemische im Straßenoberbau bietet sich aufgrund der gleichen Verfahrensparameter zunächst an, die Laborverdichtungsverfahren, die in europäischen Normen standardisiert sind, einer näheren Betrachtung zu unterziehen. Hierzu zählen

Verdichter	Frequenz [Hz]	Amplitude [mm]
Große Vibrationswalzen	30-43	0,5-2,0
Kleine Vibrationswalzen	41-77	0,5-1,8
Vibrationsplatten	38-108	0,8-2,5

Tab. 1: Frequenz- und Amplitudenbereiche während der In-situ-Verdichtung nach DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [14]

die Vibrationsverdichtung mit vertikalem Druck nach DIN EN 13286-3 [9], das Verdichtungsverfahren mittels Vibrationshammer nach DIN EN 13286-4 [10] und der Vibrationstisch nach DIN EN 13286-5 [11]. Ein weiteres Verdichtungsverfahren mittels Vibrationstisch mit anderen Kennwerten, das der Probenvorbereitung für den Dampfversuch zur Prüfung einer möglichen Volumenzunahme von Stahlwerksschlacke dient, wird in DIN EN 1744-1 [6] beschrieben. All diese Laborverdichtungsverfahren nutzen die gleichen Verdichtungsparameter der In-situ-Verdichtung in Form von statischer Auflast, Amplitude und/oder Frequenz. Ebenso liegen die Festlegungen zur Frequenz und Amplitude für diese Laborverfahren in einem Bereich, der im Mittel mit dem Frequenz- und Amplitudenbereich der In-situ-Verdichtung vergleichbar ist.

Entsprechend DIN EN 13286-1 [7] sind diese Laborprüfverfahren in Abhängigkeit vom Korngrößenbereich anzuwenden. Tabelle 2 enthält die in den Normen genannten Festlegungen zu den Korngrößenbereichen. Da die in DIN EN 13286-3 [9] und DIN EN 1744-1 [6] beschriebenen Verdichtungsverfahren auf ein Größtkorn unter 45 mm begrenzt sind, stellen sie in Deutschland keine praxisrelevanten Verfahren für Tragschichten ohne Bindemittel dar, weil Baustoffgemische mit einem Größtkorn von 45 mm und mehr eine große Bedeutung für die Baupraxis haben.

Norm	Prüfverfahren	Korngrößenbereich
DIN EN 13286-2	Proctorversuch	
	Zylinder-Ø 100 mm	Größtkorn 16 mm
	Zylinder-Ø 150 mm	Siebdurchgang bei 31,5 mm \geq 75 %
	Zylinder-Ø 250 mm	Siebdurchgang bei 63 mm \geq 75 %
DIN EN 13286-3	Vibrationsverdichtung mit vertikalem Druck	Größtkorn 31,5 mm
DIN EN 13286-4	Vibrationshammer	Siebdurchgang bei 20 mm \cdot 90 % Siebdurchgang bei 40 mm \geq 70 %
DIN EN 13286-5	Vibrationstisch	Größtkorn 80 mm, Siebdurchgang bei 0,063 mm $<$ 12 %
DIN EN 1744-1	Vibrationstisch	Größtkorn 22,4 mm, Sieblinie nach Fuller

Tab. 2: Anwendungsbegrenzungen der Laborverdichtungsverfahren in Abhängigkeit vom Korngrößenbereich nach DIN EN 13286-1 [7]

Die oben genannten Verdichtungsverfahren werden in Europa nicht von allen Ländern genutzt und haben sich aufgrund ihrer bisherigen Anwendungen nur landesbegrenzt etabliert. In Tabelle 3 ist ein Anwendungsüberblick der Verdichtungsverfahren inkl. des Proctorversuches innerhalb einiger europäischer Staaten nach KRASS und KELLERMANN [18] zusammengefasst.

Neben Großbritannien wird der Vibrationshammer auch in Schweden verwendet. FORSSBLAD [17] beschrieb 1967 den Verdichtungsversuch von Bodenproben mit einem Vibrationshammer. Eine Darstellung der damals verwendeten Apparatur zeigt Bild 3 [21]. Zwischenzeitlich haben sich die

Optik und vor allem die Handhabung der Apparatur umfassend verändert, sodass heutige Vibrationshammergeräte sich am schematischen Aufbau entsprechend DIN EN 13286-4 [10] (s. Bild 2 und Kapitel 4.2) orientieren.

Präzisionsergebnisse zu einem Vibrationshammer wurden 1988 in einer Ringanalyse der British Standards Institution (BSI) [13] vorgestellt. Die Ergebnisse dieser Studie flossen in die Präzisionsangaben innerhalb der DIN EN 13286-4 [10] ein und sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

SHAHIN [27] führte 2010 eine Variabilitätsstudie für einen in Neuseeland genutzten Vibrationshammer durch. In dieser Studie werden Präzisionsdaten

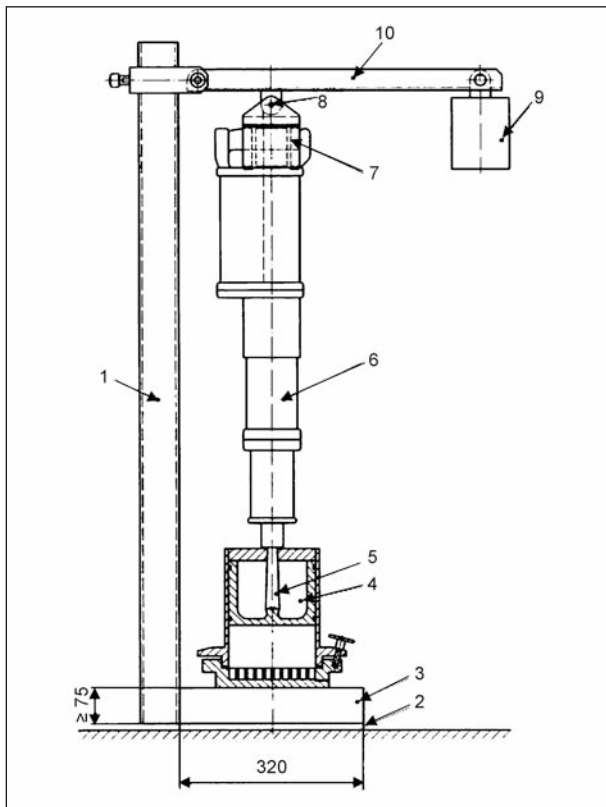


Bild 2: Schema Vibrationshammer nach DIN EN 13286-4 [10]



Bild 3: Schwedischer Vibrationshammer nach FORSSBLAD [17] aus PARSONS [21]

Verfahren	D	F	GB	A	CH	NL	CEN
Proctor	X		X	X	X	X	X
Modifizierter Proctor	X	X	X		X	X*	X
Vibrationsverdichtung mit vertikalem Druck (VCPC)		X					X
Vibrationshammer			X				X
Rütteltisch			X				X

* Für die Verdichtungskontrolle im Erdbau entwickelt

Tab. 3: Gegenüberstellung der in Europa angewandten Laborverfahren zur Bestimmung der Referenzraumdicke nach KRASS und KELLERMANN [18]

Merkmal	Material	σ_r unter Wiederholbedingungen	σ_R unter Vergleichsbedingungen
Trockendichte [Mg/m ³]	Kohlenkalk	0,029	0,122
	Kies	0,033	0,054
Optimaler Wassergehalt [%]	Kohlenkalk	0,4	1,3
	Kies	0,6	1,2

Tab. 4: Präzisionsdaten bzgl. der Verdichtung mit einem Vibrationshammer nach BSI [13] und DIN EN 13286-4 [10]

vorgestellt, die im Bereich der Angaben entsprechend Tabelle 4 liegen.

Die Anwendung eines Vibrationstisches ist gängige Praxis in vielen Bereichen der Baustoffindustrie und wird beispielsweise zur Entlüftung von Medien und Flüssigkeiten verwendet. Die Nutzung des Vibrationstisches zur Verdichtung von Baustoffgemischen erfolgt nach Tabelle 3 in Großbritannien. In den USA untersuchten PETTIBONE und HARDIN [23] 1965 für die American Society of Testing and Materials (ASTM) verschiedene Einflussgrößen (Auflastgewicht, Versuchsdauer, Feuchtegehalt etc.) auf die Trockendichte bei der Anwendung des Vibrationstisches. Die Ergebnisse flossen in die Grundlage der amerikanischen Vibrationstischnorm ein. Bild 4 zeigt den in dieser Arbeit verwendeten Versuchsstand. Ein Vergleich der in Bild 4 und der in der DIN EN Norm vorgestellten Verdichtungsapparatur zeigt, dass sich an der Versuchsapparatur bis heute keine signifikanten Änderungen erkennen lassen (vgl. auch Bild 10 und Bild 11 in Kapitel 4.3).

Präzisionsergebnisse für den Vibrationstisch sind in der DIN EN 13286-5 [11] als zu ergänzen vermerkt. In Tabelle 5 sind die Präzisionsdaten der ASTM-Norm [1] bzgl. der erzielten Trockendichten für einen schwach abgestuften Sand angegeben.

Zur Lösung der Problematik mit dem Proctorversuch stehen alternative Verdichtungsverfahren zur Verfügung, die zwar in Deutschland nur gering erprobt sind, jedoch auf internationaler Ebene seit geraumer Zeit eingesetzt werden und in diversen Arbeiten validiert und präzisiert wurden.

Möglicherweise könnte durch eine verfahrenstechnisch gleichwertige Verdichtung im Laborversuch durch die Nutzung des Vibrationshammers oder des Vibrationstisches eine bessere Bewertung der in der Praxis erzielten Dichte von ungebundenen Schichten im Straßenoberbau in Deutschland er-



Bild 4: Vibrationstischversuchsstand nach PETTIBONE und HARDIN [23]

Merkmal	Material	σ_r unter Wiederholbedingungen	σ_R unter Vergleichsbedingungen
Trockendichte [Mg/m ³]	Sand	0,01	0,016

Tab. 5: Präzisionsdaten entsprechend der ASTM-Vibrationstisch-Norm [1] bzgl. der Trockendichte eines Sandes

reicht werden. Evtl. lässt sich auch durch eine Anpassung in der Versuchsdurchführung oder der Auswertung von Verdichtungsversuchen im Labor eine Lösung für die Problematik mit dränierenden Baustoffgemischen finden. DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [14] schreiben hierzu, dass für dränierende Baustoffgemische häufig die maximale Trockendichte für ofentrockene Proben oder gesättigte Proben erzielt wird, während alle dazwischen liegenden Versuchsproben mit unterschiedlichen

Wassergehalten darunter liegende Trockendichten erzielen. Kurz: Die Verdichtungskurve zeigt statt eines konvexen einen konkaven Verlauf. Ein typischer konkaver Kurvenverlauf ist in Bild 5 dargestellt.

KREBS und ARAND [19] bestätigen dieses Bild und erklären derartige Kurvenverläufe mit der scheinbaren Kohäsion, die ihren Ursprung in der Oberflächenspannung des Probenwassers hat. Während die Oberflächenspannung in trockenen und optimal gesättigten Proben gegen null tendiert, bewirkt sie für alle Proben zwischen diesen beiden Wassergehalten eine Reduzierung der erreichbaren Trockendichte. Diese Erklärung scheint in der DIN EN 13286-4 [10] berücksichtigt worden zu sein, da dort in der Auswertung einer Verdichtungskurve neben der konvexen auch die Vorgehensweise für konkave und flache Kurven vorgestellt wird. Wenn die Kurve für ein gut abgestuftes Baustoffgemisch annähernd konkav verläuft, kann die Trockendichte in Abhängigkeit vom Wassergehalt ein Maximum bei einem Porengehalt von etwa 0 % ergeben. Verläuft die Kurve konvex, werden die Werte für die Trockendichte und für den optimalen Wassergehalt aus den Endwerten bestimmt. Ergibt sich aus den Daten keine Kurve, sondern eine nahezu horizontal verlaufende Linie muss die Trockendichte unabhängig vom Wassergehalt angegeben werden, da sich kein optimaler Wassergehalt ermitteln lässt.

Aus Bild 5 ist auch zu entnehmen, dass mit ofentrockenen Proben gleiche Trockendichten erzielt werden können wie mit optimal gesättigten Proben. Andere Quellen bestätigen dieses Bild oder lassen darauf schließen, dass die Trockendichte für ofentrockene Proben leicht über dem Ergebnis der optimal gesättigten Proben liegt. Neben der Arbeit von DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [14] wird hierzu beispielsweise auch auf die Arbeiten von KRASS und KELLERMANN [18], LEE und SUEDKAMP [20] sowie WEBSTER [30] verwiesen.

Neben der optimalen und trockenen Verdichtung verweisen ELLIS [15] und O'CONNELL et al. [25] auf die Möglichkeit, Baustoffgemische mit einem Wassergehalt zu verdichten, der gering über der trockenen Verdichtung liegt und dennoch Trockendichten erzielt, die quasi der optimalen Verdichtung entsprechen. Die in diesen Arbeiten ausschlaggebenden Wassergehalte für die verwendeten Baustoffe lagen bei ca. 1 bis 3 M.-%. Dies bedeutet, dass bei trocken verdichteten Proben Trockendich-

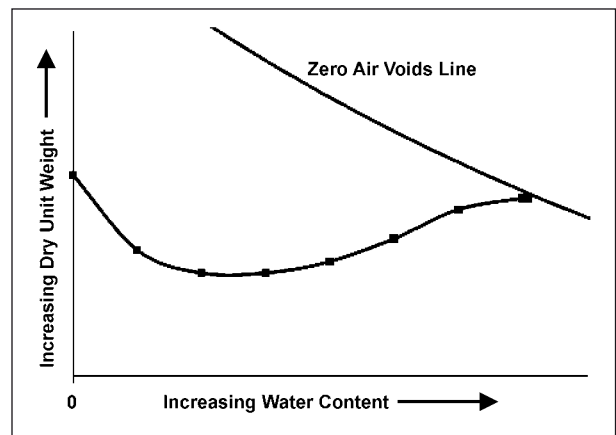


Bild 5: Verdichtungskurve für dränierende Baustoffgemische nach DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [14]

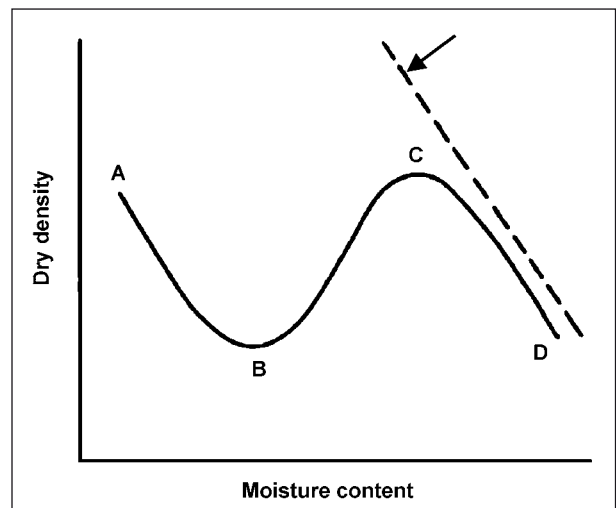


Bild 6: Verdichtungskurve eines Bodens nach O'CONNELL et al. [25]

ten erzielt werden können, die leicht über der optimalen Verdichtung liegen. Hingegen liefern Proben mit einem Wassergehalt leicht über der trockenen Verdichtung Trockendichten, die quasi der optimalen Verdichtung entsprechen. Eine grafische Zusammenfassung zeigt Bild 6.

Aus den vorherigen Aspekten lässt sich der Schluss ziehen, dass Verdichtungskurven aufgrund unterschiedlicher Effekte und Einflussgrößen verschiedene Kurvenformen annehmen können und zu mehreren Auswerteoptionen führen. Weiterhin scheint es Alternativen zu der gängigen Vorgehensweise des Proctorversuches zu geben, die nicht eine komplette Verdichtungskurve benötigen und dennoch zu einem verwendbaren und gleichwertigen Ergebnis führen. Ebenso existiert die Option auf eine Trockenverdichtung, die generell jede Problematik mit dränierenden Baustoffgemischen aufheben würde.

3 Lösungsweg des Forschungsprojektes

Die Federführung für das Forschungsvorhaben lag bei dem FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (im folgenden FEhS-Institut genannt). Die Durchführung des Forschungsprojektes und der Laborversuche erfolgte in direkter Zusammenarbeit mit dem Institut für Kalk- und Mörtelforschung e. V., Köln (im folgenden IKM genannt). Beide Forschungsstellen führten die Verdichtungsversuche in ihren Laboren durch, die die Anforderungen gemäß DIN EN ISO/IEC 17025 [12] und RAP Stra [26] erfüllen.

Die Arbeiten innerhalb des Forschungsauftrages waren in zwei Arbeitspakete untergliedert. Inhaltlich umfasst dieser Abschlussbericht die Arbeiten und Ergebnisse des ersten und zweiten Arbeitspaketes, deren durchzuführende Aufgaben zu gleichen Teilen auf beide Institute aufgeteilt wurden.

3.1 Arbeitspaket 1

Im ersten Arbeitspaket wurden, die Verdichtungsverfahren nach DIN EN 13286-4 [10] und DIN EN 13286-5 [11] im Vergleich zum Proctorverfahren nach DIN EN 13286-2 [8] eingesetzt, um so die Auswahl eines Verfahrens zu ermöglichen, das innerhalb des zweiten Arbeitspaketes durch eine umfassende Materialanzahl vergleichend zum Proctorverfahren untersucht wurde.

Für das erste Arbeitspaket wurden ein Baustoffgemisch mit Rundkorn (Rheinkies) und ein Baustoffgemisch mit gebrochener Gesteinskörnung (Basalt) in der Körnung 0/32 mm ohne Überkorn verwendet. Zur Charakterisierung der untersuchten Gesteinskörnungen wurden folgende Eigenschaften in den Laboren der Institute bestimmt:

- Sieblinien der Einzelkörnungen nach DIN EN 933-1 [2],
- Rohdichte und Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 [5],
- Widerstand gegen Zertrümmerung (Schlagzertrümmerung) nach DIN EN 1097-2 [4],
- Kornform nach DIN EN 933-4 [3].

Um den ggf. bestehenden Einfluss unterschiedlicher Sieblinien auf die Verdichtung zu erfassen, wurden die jeweiligen Baustoffgemische mit zwei verschiedenen Sieblinien untersucht. Die Proben

für die einzelnen Versuche wurden aus Einzelkörnungen so zusammengesetzt, dass sie den Vorgaben der TL SoB-StB [28] entsprechend der Ober- bzw. der Untergrenze des SDV-Bereiches für eine Kies- bzw. Schottertragschicht 0/32 mm ohne Überkorn entsprachen. Zudem wurden beide Baustoffgemische vor Beginn der Verdichtungsversuche hinsichtlich ihrer Neigung zur Kornverfeinerung untersucht, die durch den modifizierten Proctorversuch entsprechend DIN EN 13286-2 [8] geprüft und durch eine Siebung nach Beanspruchung entsprechend DIN EN 933-1 [2] quantifiziert wurde.

Um die gleichartige Durchführung der Verdichtungsversuche mit den an beiden Forschungsstellen verfügbaren Verdichtungsgeräten sicherzustellen, wurden an den beiden o. g. Baustoffgemischen Proctor- und Vibrationshammerversuche in beiden Instituten durch die Laboranten im Wechsel durchgeführt. Ziel dieser Vorgehensweise sollte es sein, ein einheitliches Vorgehen bei der Versuchsdurchführung zu gewährleisten (Interlaboratoriumsvergleich) und mögliche Fehlerquellen zu ermitteln und abzustellen. Hierfür wurden die beiden Baustoffgemische von den Institutslaboranten in Form eines kompletten Verdichtungsversuches (1 Probe trocken und 4 Proben mit abgestuften Wassergehalten) verdichtet. Dieses Procedere wurde für beide Baustoffgemische für den Proctorverdichter und den Vibrationshammer im Personal- und Lokationswechsel vollzogen.

Als Grundlage für das zweite Arbeitspaket wurden die ausgewählten Verdichtungsverfahren Proctor, Vibrationshammer und Vibrationstisch hinsichtlich Praxisnähe, Wirtschaftlichkeit, Handhabbarkeit und Reproduzierbarkeit bewertet. Auf Basis dieser Bewertung und der erzielten Ergebnisse wurde dann gemeinsam mit dem Betreuungsausschuss das Verfahren ausgewählt, das sich für das Arbeitspaket 2 als das geeignetste Vergleichsverfahren anbot.

3.2 Arbeitspaket 2

Mit dem zum Abschluss des ersten Arbeitspaketes ausgewählten Verdichtungsverfahren wurden im zweiten Arbeitspaket – vergleichend zum Proctorversuch – Verdichtungsversuche unter Verwendung von zwölf verschiedenen praxisgerechten Baustoffgemischen durchgeführt. Die Baustoffgemische wurden gemeinsam mit dem Betreuungsausschuss unter Berücksichtigung sämtlicher Gesteinsgruppen des Anhangs A des Entwurfes der

TL Gestein-StB [29] festgelegt (siehe Tabelle 6), sodass aus jeder Gesteinsgruppe mindestens eine Gesteinsart vertreten war.

Im Gegensatz zum Arbeitspaket 1 wurden die Baustoffgemische nicht gezielt hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung zusammengesetzt, sondern lieferfertige Baustoffgemische 0/32 mm verwendet, um den Bezug zu den Verhältnissen in der Baupraxis zu erhalten. Allerdings wurden die Gemische überkornbereinigt, um nicht einen größeren Prüf-

zylinder verwenden oder eine Überkornkorrektur vornehmen zu müssen. Als Charakterisierung wurden die Sieblinien der zu prüfenden Baustoffgemische ermittelt und identisch zum ersten Arbeitspaket relevante gesteinspezifische Eigenschaften (Rohdichte, Schlagzertrümmerung, Kornform und Wasseraufnahme) bestimmt.

Zentraler Punkt des zweiten Arbeitspaketes waren Verdichtungsversuche an den ausgewählten Baustoffgemischen mit dem zuvor festgelegten Ver-

Gesteinsgruppe/Gestein ²			Rohdichte ρ_p	Widerstand gegen Zertrümmerung ¹				
				LA (10/14)	SZ (8/12,5)	Schotter- schlagwert (35,5/45) SD	Los-Angeles- Koeffizient (35,5/45) LA35/45	
				Mg/m ³	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
1	Plutonite	a	Granit Granodiorit	2,60-2,80	≤ 30	≤ 26	≤ 22	≤ 30
		b	Syenit Anorthosit	2,60-2,80	≤ 30	≤ 26	≤ 22	≤ 30
		c	Diorit Gabbro	2,70-3,00	≤ 25	≤ 20	≤ 18	≤ 18
2	Vulkanite	a	Rhyolith Rhyodazit	2,50-2,85	≤ 25	≤ 22	≤ 22	≤ 35
		b	Trachyt Phonolith	2,50-2,85	≤ 25	≤ 22	≤ 22	≤ 35
		c	Mikrodiorit Andesit	2,50-2,85	≤ 25	≤ 22	≤ 22	≤ 35
		d	Basalt	2,85-3,05	≤ 25	≤ 20	≤ 17	≤ 13
		e	Basaltlava	2,40-2,85	≤ 25	≤ 22	≤ 20	--
		f	Lavaschlacke	s. Merkblatt: Lavaschlacke im Straßen- und Wegebau				
		g	Diabas	2,75-2,95	≤ 25	≤ 20	≤ 17	≤ 20
3	Sediment- gesteine	a	Kalkstein Dolomitstein	2,65-2,85	≤ 25	≤ 28	≤ 30	≤ 40
		b	Quarz. Sandsteine	2,60-2,75	≤ 30	≤ 26	≤ 22	≤ 25
		c	Grauwacke					
4	metamorphe Gesteine	a	Gneis Granulit Amphibolit Serpentinit	2,65-3,10	≤ 30	≤ 26	≤ 22	≤ 22
		b	Quarzit	2,60-2,75	≤ 30	≤ 26	≤ 22	≤ 25
5	Kiese	a	Kies gebrochen	2,60-2,75	≤ 30	≤ 26	--	--
		b	Kies rund	2,55-2,75	≤ 40	≤ 35	--	--
6	industriell hergestellte Gesteine	a	Metallhüttenschlacke	3,40-4,00	≤ 40	≤ 35	≤ 33	≤ 33
		b	Hochofenstückschlacke	2,10-2,80	≤ 40	≤ 35	≤ 33	≤ 33
		c	Stahlwerksschlacke	3,20-3,80	≤ 30	≤ 26	≤ 29	≤ 25
		d	Hausmüllverbrennungssasche	2,20-2,70	≤ 45	≤ 40	--	--
7	RC-Baustoff		Recycling-Baustoffe		≤ 40	≤ 32	≤ 33	≤ 40

¹ Gesteine bzw. Gesteinsgruppen, die die Anforderungen an den Widerstand gegen Zertrümmerung nicht einhalten, können verwendet werden, wenn die Brauchbarkeit durch ein Gutachten oder durch positive Erfahrungen nachgewiesen wird.

² Die Aufzählung der Gesteine in den Gruppen ist nicht abschließend. Andere Gesteine als die aufgeführten können in eine der genannten Gruppen eingeordnet werden, sofern durch ein Gutachten eine sinnvolle Zuordnung bestätigt wird.

Tab. 6: Entwurf TL Gestein-StB 2013, Anhang A: Rohdichte und Widerstand gegen Zertrümmerung

dichtungsverfahren. Um den Vergleich zur bisherigen Prüfmethode zu gewährleisten, wurden parallel Proctorversuche durchgeführt.

4 Beschreibung der verwendeten Verdichtungsverfahren

Innerhalb des Forschungsprojektes wurden die folgenden europäisch genormten Verdichtungsverfahren verwendet.

4.1 Proctorversuch nach DIN EN 13286-2

Der Verdichtungsversuch nach DIN EN 13286-2 „legt ein Verfahren zur Bestimmung der Beziehung zwischen dem Wassergehalt und der Trockendichte ungebundener und hydraulisch gebundener Gemische nach einer Proctorverdichtung unter vorgegebenen Prüfbedingungen fest“ [8].

Für einen Proctorversuch werden mehrere Versuchsproben mit unterschiedlichen Wassergehalten angesetzt und jede Probe mit einem Proctorversuchsstand in je drei Schichten verdichtet. Der Verdichtungsprozess erfolgt bei diesem Verfahren über ein Fallgewicht, das eine definierte Verdich-

tungsenergie in eine Versuchsprobe einwirken lässt. Die durch das Fallgewicht erzeugte Verdichtungsenergie bewirkt eine Kornumlagerung der Probenmatrix. Hierdurch wandern kleinere Probenpartikel in die Hohlräume der neu entstehenden Probenmatrix, was zu einer Reduzierung des Hohlraumanteils und einer Erhöhung der Raumdichte führt. Zur Förderung der Verdichtungswilligkeit dient das zugeführte Wasser, das bei einem sogenannten optimalen Anteil zu einer, bezogen auf die eingesetzte Verdichtungsenergie, maximal erzielbaren Trockendichte führt (s. Bild 1).

Ausgehend von einem Baustoffgemisch mit einem Größtkorn von 32 mm sind die Versuchsparameter für den Standard- und modifizierten Proctorversuch und die daraus resultierenden Energieeinträge in die Probenmasse in Tabelle 7 zusammengefasst. Zur Durchführung der Versuche wurde an beiden Instituten ein baugleicher Proctorverdichter desselben Herstellers (s. Bild 7) verwendet.

Versuch	Kennwerte	Einheit	Proctor- topf B ($\varnothing =$ 150 mm)	Verdich- tungs- energie MJ/m ³
Standard- Proctor- versuch	Masse des Fallgewichtes	kg	2,5	0,5935
	Durchmesser des Fallgewichtes	mm	50	
	Fallhöhe	mm	305	
	Anzahl der Schichten	-	3	
	Anzahl der Schläge je Schicht	-	56	
Modi- fizierter Proctor- versuch	Masse des Fallgewichtes	kg	4,5	2,653
	Durchmesser des Fallgewichtes	mm	50	
	Fallhöhe	mm	457	
	Anzahl der Schichten	-	5	
	Anzahl der Schläge je Schicht	-	56	

Tab. 7: Kennwerte des Standard- und modifizierten Proctorversuches nach DIN EN 13286-2 [8]



Bild 7: Proctorverdichter nach DIN EN 13286-2 [8]

Die Versuchsdurchführung erfolgte entsprechend Normanweisung in folgenden Schritten:

- Wasserzugabe und Mischen der Versuchspröben 24 Stunden vor der Verdichtung,
- Einfüllen des Probenmaterials in drei (Standard-Proctorversuch) bzw. fünf Schichten (modifizierter Proctorversuch) und anschließende Verdichtung pro Schicht nach den vorgegebenen Versuchsparametern,
- Messung der relevanten Messgrößen (Probenhöhe und Massen),
- Berechnung der Parameter Trockendichten und Wassergehalte,
- Auswertung der Datenpunkte und Bestimmung des optimalen Wassergehaltes mit korrespondierender Trockendichte.

4.2 Vibrationshammerversuch nach DIN EN 13286-4

Der Vibrationshammerversuch nach DIN EN 13286-4 „legt ein Verfahren zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der Trockendichte und



Bild 8: Vibrationshammer nach DIN EN 13286-4 [10] am FEHS-Institut

dem Wassergehalt eines Gemisches fest, das mit einem Vibrationshammer verdichtet wird“ [10].

Ziel des Versuches ist es auch hier, möglichst ein Maximum anhand der Wassergehalts-Trockendichte-Kurve (s. Bild 1) zu ermitteln. Analog zum Proctorversuch sind Proben mit unterschiedlichen Wassergehalten zu testen, wobei je Versuchspröbe drei Schichten für je sechzig Sekunden durch den Betrieb eines Vibrationshammers zu verdichten sind. Im Gegensatz zum Proctorverfahren werden Vibrationshammerversuche nicht mit einem Fallgewicht, sondern mit einem Stempel, der kraft- und form-schlüssig auf der gesamten Probenfläche aufsitzt, durchgeführt. Die Verdichtungsenergie wird durch einen rotierenden Schlagbolzen in eine Werkzeugaufnahme geleitet, an deren Ende ein Stampfer (s. Bild 8 und Bild 9) angebracht ist.

Aufgrund des Energieeintrags und der daraus resultierenden Neuordnung der Probenpartikel, erhöht sich die Lagerungsdichte des Probenmaterials. Dieser Verdichtungsprozess wird zudem durch das konstant wirkende Eigengewicht der Verdichtungsapparatur von 300 bis 400 N unterstützt.



Bild 9: Vibrationshammer nach DIN EN 13286-4 [10] am IKM

Apparatur	Kennwerte	Einheit	Probentopf
Vibrationshammer	Zylinderdurchmesser	mm	152 ± 0,5
	Zylinderhöhe	mm	127 ± 1,0
	Leistungsaufnahme	Watt	≥ 600
	Arbeitsfrequenz	Hz	25-60
	Statische Auflast	N	300-400
	Verdichtungszeit pro Schicht	s	60 ± 2

Tab. 8: Technische Kenndaten und Versuchsparameter des Vibrationshammers entsprechend DIN EN 13286-4

Ausgehend von einem Baustoffgemisch mit einem Größtkorn von 32 mm wurden in Tabelle 8 die technischen Kenndaten der Verdichtungsapparatur entsprechend DIN EN 13286-4 [10] zusammengefasst.

Die Versuchsdurchführung beinhaltet folgende Abschnitte:

- Wasserzugabe und Mischen der Versuchsproben 24 Stunden vor der Verdichtung,
- Einfüllen des Probenmaterials in drei Schichten und anschließende Verdichtung pro Schicht nach den vorgegebenen Versuchsparametern,
- Messung der relevanten Messgrößen (Probenhöhe und Massen),
- Berechnung der Parameter Trockendichten und Wassergehalte,
- Auswertung der Datenpunkte und Bestimmung des optimalen Wassergehaltes mit korrespondierender Trockendichte.

Anmerkung: Die zugrunde liegende DIN EN 13286-4 berücksichtigt neben konkaven auch konvexe und lineare Verdichtungskurven.

4.3 Vibrationstischversuch nach DIN EN 13286-5

Der Vibrationstischversuch (s. Bild 10 und Bild 11) „legt ein Verfahren zur Bestimmung der höchsten Trockendichte und des Wassergehalts von nicht bindigen Materialien fest [...]“ [11].

Dynamische Verdichtungsversuche mit einem Vibrationstisch nach DIN EN 13286-5 erfolgen mit einer Verdichtungsfrequenz von 50 Hz und einer Amplitude von ± 0,4 mm. Durch die Auf- und Abwärtsbewegung des Tisches geraten die Proben-



Bild 10: Vibrationstisch nach DIN EN 13286-5 [11] mit einem 280-mm-Ø-Probentopf am FEHS-Institut



Bild 11: Vibrationstisch nach ASTM D4253 [1] mit einem 150-mm-Ø-Probentopf am FEHS-Institut

partikel innerhalb des Probentopfes in eine schwingende Bewegung, sodass es zu einer kompakteren Neuordnung und einer Reduzierung des Hohlraumanteils kommt. Die Raumdichte nimmt somit zu. Damit die Verdichtung während des Versuches stetig gewährleistet ist, wird ein statisches

Versuch	Kennwerte	Einheit	Proben- topf*	Proben- topf**
Vibrations- tisch	Zylinder- durchmesser	mm	150 ± 1	280 ± 1
	Zylinderhöhe	mm	152	230 ± 2
	Schwingungs- amplitude	mm	0,40 ± 0,05	
	Statische Auflast	kg	86	24,6
	Verdichtungszeit	s	720 ± 15	
* ASTM (s. a. Kapitel 4.4)				
** DIN EN				

Tab. 9: Technische Kenndaten und Versuchsparameter des Vibrationstisches entsprechend DIN EN 13286-5 [11] bzw. ASTM D4253 [1]

Gewicht mit einer Auflast von ca. 13,9 kPa verwendet.

Die wesentlichen Versuchsparameter des elektromagnetisch betriebenen Versuchsstandes werden in Tabelle 9 zusammengefasst.

Die Versuchsdurchführung beinhaltet folgende Schritte:

- Wasserzugabe und Mischen der Versuchsproben ca. 30 Minuten vor der Verdichtung,
- Einfüllen von kleineren Materialmengen in den Proben topf bei laufendem Versuchsstand (doppelte Amplitude und/oder doppelte Frequenz) zur Einstellung des optimalen Wassergehaltes. Manuelles Entfernen von überschüssigem Wasser auf der Probenoberfläche bzw. Zuführung weiteren Wassers bei zu geringem Wasseranteil,
- Aufsetzen der Auflast und Durchführung des eigentlichen Verdichtungs Vorgangs nach den vorgegebenen Versuchsparametern,
- Messung der relevanten Messgrößen (Probenhöhe und Massen),
- Berechnung der Parameter Trockendichte und optimaler Wassergehalt.

4.4 Anmerkungen und Anpassungen zu den Verdichtungsverfahren

Vibrationshammer

An beiden Instituten steht der Vibrationshammer in unterschiedlicher Geräteausführung zur Verfügung. Dadurch bedingt weisen die Geräte folgende bauliche Unterschiede auf:

Versuchszylinder	DIN EN 13286-2	DIN EN 13286-4
Innendurchmesser [mm]	150 ± 1	152 ± 0,5
Höhe [mm]	120 ± 1	127 ± 1
Höhe Aufsatzring [mm]	≥ 50	≥ 50
Gesamthöhe [mm]	170 ± 1	177 ± 1

Tab. 10: Dimensionen der Versuchszylinder

Versuchszylinder	DIN EN 13286-2	DIN EN 13286-4
Durchmesser [mm]	150	152
Probenhöhe [mm]	133,5	130
Fläche [mm ²]	17.671,46	18.145,84
Volumen [cm ³]	2.359,14	2.358,96
ΔVolumen [cm ³]	0,18	

Tab. 11: Berechnung der Versuchszylindervolumina

- Verdichtungsfrequenz:
48,3 Hz (FEhS-Institut) bzw. 50,8 Hz (IKM),
- Schlagenergie:
8,3 J (FEhS-Institut) bzw. 8,8 J (IKM).

Abweichend von den Festlegungen der DIN EN 13286-4 [10] zum Versuchszylinder, wurde für die Versuchsdurchführung der Proctorzylinder nach DIN EN 13286-2 [8] gewählt (s. Tabelle 10).

Zur Erhaltung der massenbezogenen Verdichtungsenergie wurde die Gesamthöhe der verdichteten Probe angepasst (s. Tabelle 11). Bei der festgelegten Probenhöhe von 133,5 mm im verdichteten Zustand weist die Probe im Proctorzylinder ein um 0,18 cm³ höheres Volumen auf. Die Volumendifferenz von ca. 0,008 % wurde als vernachlässigbar gewertet.

Zur besseren Handhabung der Versuchsapparatur wurde der Vibrationshammer am FEhS-Institut mit folgenden zusätzlichen Komponenten versehen: stabile Bauweise, pneumatische Hebehilfe für den Schlaghammer, leichtläufige Laufführung, ausschwenkbarer Proben topf, schall- und vibrationshemmende Unterlage und eine Schallkabine (s. Bild 8).

Vibrationstisch

Die Durchführung der Versuche nach DIN EN 13286-5 [11] sieht die Nutzung eines Proben topfes mit einem Durchmesser von 280 mm und einer Probenmasse von ca. 45 kg vor. Inklusive Auflastgewicht muss der Anwender mit ca. 160 kg Ver-

suchsmasse (Probentopf, Probenmasse und Auflastgewicht) arbeiten. Aufgrund der enormen Belastung für das ausführende Personal und der einfacheren Handhabung der Versuche wurde die amerikanische Norm ASTM D4253 [1], die ebenso die Vibrationstischversuche beschreibt, genutzt. Hier wird zusätzlich ein Verfahren beschrieben, das Verdichtungsversuche mit einem Probentopf mit 150 mm Innendurchmesser ermöglicht, ohne dass die primären Versuchsparameter (Amplitude, Versuchszeit etc.) entsprechend DIN EN 13286-5 [11] angepasst werden müssen. Aufgrund dieser Gegebenheit, die in der DIN EN 13286-5 [11] keine Erwähnung findet, wurden die Versuche mit diesem Probentopf (Innendurchmesser 150 mm) durchgeführt. Hierdurch wurden zudem bessere Vergleichsmöglichkeiten geschaffen, da alle Verdichtungsversuche mit einer identischen Topfgröße durchgeführt wurden. Weiterhin beantwortet die ASTM-Norm offene Fragen bzgl. der Versuchsdurchführung, die durch die DIN EN 13286-5 [11] nicht beantwortet werden. Hier sei speziell die Durchführung der Versuche mit optimalem Wassergehalt genannt, die in der DIN EN 13286-5 [11] nur unzureichend beschrieben wird. Hilfestellung lässt sich im amerikanischen Pendant ASTM D4253 [1], auf das die DIN/EN-Norm in ihrem Literaturverzeichnis verweist, finden.

5 Ergebnisse Arbeitspaket 1

5.1 Probenmaterialien

Für das erste Arbeitspaket wurden als ungebrochene Gesteinskörnung ein Rheinkies und als gebrochene Gesteinskörnung ein Basalt in der Körnung 0/32 mm ohne Überkorn verwendet. Eine Übersicht der ausgewählten Materialien und deren Herkunft zeigt Tabelle 12.

Um die angestrebten Korngrößenverteilungen (KGV) der Baustoffgemische 0/32 mm (untere und obere Grenzlinie des SDV-Bereiches nach TL SoB-StB) herstellen zu können, wurden in den

Gesteinsgruppe	Gesteinsart	Herkunft
Vulkanite	Basalt	Rheinland-Pfalz
Kiese	Kies rund	NRW

Tab. 12: Auflistung und Herkunft der verwendeten Baustoffgemische des ersten Arbeitspaketes

Werken folgende Einzelkörnungen in ausreichenden Mengen entnommen:

- Basalt: 0/2, 1/3, 2/5, 5/8, 8/11, 11/16, 16/22 und 22/32 [mm],
- Kies: 0/1, 0/2, 2/4, 4/8, 8/16, 16/32 [mm]

und diese nach der Probennahme getrocknet und entsprechend gelagert.

5.2 Kenndaten der Baustoffgemische

An allen Einzelkörnungen wurden die Korngrößenverteilungen durch Trockensiebung nach vorherigem nassem Abtrennen der Feianteile (< 0,063 mm) gemäß DIN EN 933-1 bestimmt. Die Siebergebnisse der Einzelkörnungen wurden als Grundlage zur Zusammensetzung der Baustoffgemische 0/32 mm genutzt. Auf eine Darstellung der Einzelsiebungen wird daher verzichtet.

Die Eingangskarakterisierung der Gesteinskörnungen erfolgte durch die Bestimmung von Trockenrohddichte, Wasseraufnahme, Kornform und Widerstand gegen Zertrümmerung. Die ermittelten Ergebnisse aus diesen Versuchen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Die in Tabelle 13 aufgeführten Messdaten belegen, dass die verwendeten Gesteinskörnungen typische Vertreter ihrer Gesteinsgruppen sind (s. Tabelle 6).

Messgröße	Basalt		Kies	
	Korngruppe	Messwert	Korngruppe	Messwert
Trockenrohddichte [Mg/m ³]	0/2	2,99	8/12	2,62
	8/16	2,95	0/32	2,63
Wasseraufnahme [M.-%]	8/16	0,6	8/16	1,0
Kornformkennzahl (SI) [M.-%]	2/5	6,7	4/8	21,3
	5/8	6,3	8/16	13,4
	8/11	8,0	16/32	25,2
	11/16	7,1	-	-
	16/22	7,2		
	22/32	3,8		
Widerstand gegen Zertrümmerung (SZ) [M.-%]	8/12	16,7	8/12	23,5

Tab. 13: Ergebnisse der Eingangskarakterisierung der Gesteinskörnungen für die Baustoffgemische des ersten Arbeitspaketes

Die Trockenrohdichten konnten für beide Gesteine in verschiedenen Korngruppenbereichen relativ konstant bestimmt werden und die Wasseraufnahme ist als gering zu werten. Der Basalt weist über alle Korngruppen eine sehr gute Kornform auf und der Widerstand gegen Zertrümmerung liegt für beide Baustoffgemische im Rahmen der Vorgabe durch die TL Gestein-StB.

5.3 Korngrößenverteilung und Kornzertrümmerung (Nachverfeinerung)

Alle Verdichtungsversuche des ersten Arbeitspaketes wurden innerhalb des Korngrößenbereiches, der durch die untere und obere SDV-Grenzlinie nach TL SoB-StB festgelegt wird, durchgeführt. Die typische KGV eines Baustoffgemisches 0/32 mm eines Produzenten, der Baustoffgemische für Schottertragschichten (STS) herstellt, muss innerhalb dieser beiden SDV-Grenzlinien liegen. Für die labortechnische Herstellung dieser Baustoffgemische mit der geforderten KGV wurden die jeweiligen Sieblinien aufgrund der Korngrößenverteilungen der Einzelkörnungen berechnet und zusammengesetzt. Die Überprüfung der zusammengesetzten Sieblinie mit den Anforderungen erfolgte durch eine Kontrollsiebung, wobei auftretende geringe Abweichungen von den Anforderungen toleriert wurden.

Die während der Verdichtungsversuche eingebrachte Verdichtungsenergie kann bei Gesteinen zu einer Zertrümmerung einzelner Körner innerhalb des Baustoffgemisches führen. Diese Nachverfeinerung führt zu einer Änderung der Ausgangs-KGV, die den „realen“ Wasseranspruch eines Baustoffgemisches verändern kann. Um Kenntnis über die potenzielle Verfeinerungsneigung zu erhalten, wurden modifizierte Proctorversuche nach DIN EN 13286-2 (s. Tabelle 7) an den Versuchsmaterialien Basalt und Kies durchgeführt. Erwartet wurde, dass die Neigung zur Nachverfeinerung bei Baustoffgemischen mit einer KGV an der unteren Grenzlinie des SDV-Bereiches (KGV-US) größer ausfällt. Aufgrund des geringeren Anteils der Kornklasse 0/2 mm dieser Baustoffgemische erfolgt eine stärkere Beanspruchung der größeren Körner des Baustoffgemisches als bei einer Korngrößenverteilung an der oberen Grenzlinie des SDV-Bereiches (KGV-OS) mit einem wesentlich höheren Anteil der Kornklasse 0/2 mm und der damit verbundenen Einbettung der größeren Körner im Baustoffgemisch.

Um den notwendigen optimalen Wassergehalt der beiden Baustoffgemische festzulegen, wurden im Voraus Standard-Proctorversuche durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 14 zusammengefasst sind.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Tabelle 14 wurden weitere Proben der Baustoffgemische auf den ermittelten optimalen Wassergehalt eingestellt und jeweils in einem Einzeltest der modifizierte Proctorversuch durchgeführt. Im Anschluss wurden an den beanspruchten Baustoffgemischen erneut die Korngrößenverteilungen bestimmt und mit der Ausgangskorngrößenverteilung verglichen. Die Sieblinien vor und nach dem modifizierten Proctorversuch sind in Bild 12 bis Bild 15 dargestellt.

Der Vergleich der Siebergebnisse (s. Bild 12 bis Bild 15) zeigt deutlich, dass eine Verfeinerung des jeweiligen Gemisches aufgrund der fünffach höheren Verdichtungsenergie durch den modifizierten Proctorversuch erfolgt. Hierbei ist die Verfeinerung des Baustoffgemisches mit der „KGV-US“ größer als bei dem Baustoffgemisch mit der „KGV-OS“. Die Veränderung der „KGV-US“ führt im Grobkornbereich zu einer Annäherung an die „KGV-OS“. Die Korngrößenverteilungen der verfeinerten Baustoffgemische liegen aber noch innerhalb des nach ZTV SoB-StB [31] zulässigen Bereiches für eingebaute Kies- und Schottertragschichten.

Für die folgenden Verdichtungsversuche wurde angenommen, dass eine starke Verfeinerung der im Rahmen dieses Arbeitspaketes verwendeten Baustoffgemische im Standard-Proctorversuch aufgrund der in diesem Fall wesentlich geringeren Verdichtungsenergie (s. Tabelle 7) nicht stattfindet. Eine weitere Untersuchung des Einflusses der Verdichtungsverfahren auf die Sieblinie wurde daher in diesem Arbeitspaket nicht vorgenommen.

Baustoffgemisch 0/32	SDV-Bereich	Opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m ³]
Basalt	unterer SDV	3,7	2,16
	oberer SDV	7,6	2,40
Kies	unterer SDV	4,9	2,04
	oberer SDV	4,5	2,06

Tab. 14: Ergebnisse der Standard-Proctorversuche zur Bestimmung der benötigten Wassergehalte der Baustoffgemische

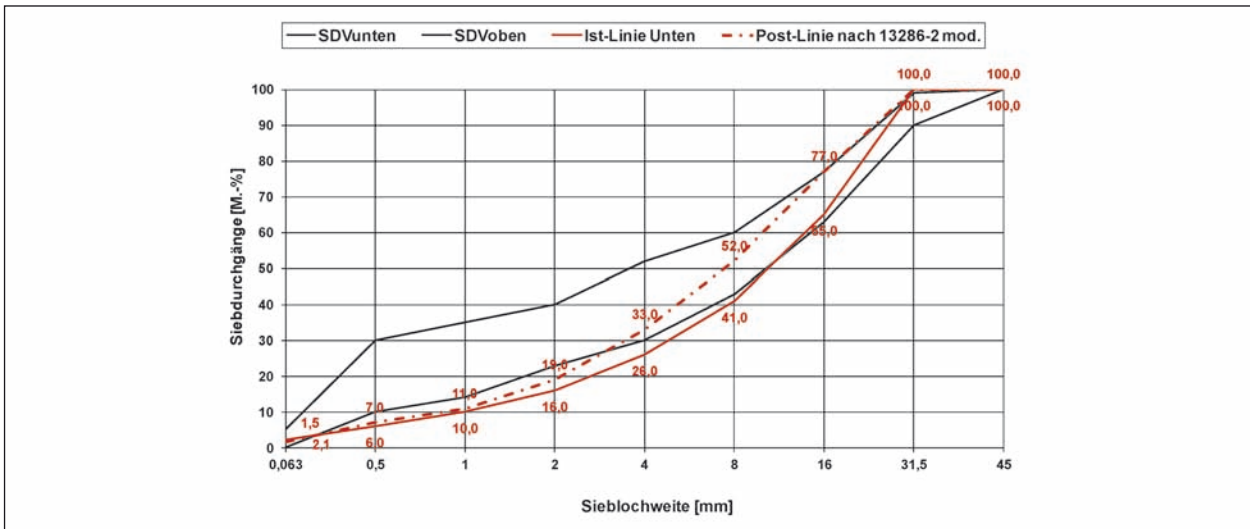


Bild 12: Darstellung der Sieblinien vor und nach dem modifizierten Proctorversuch; SDV unten Basalt

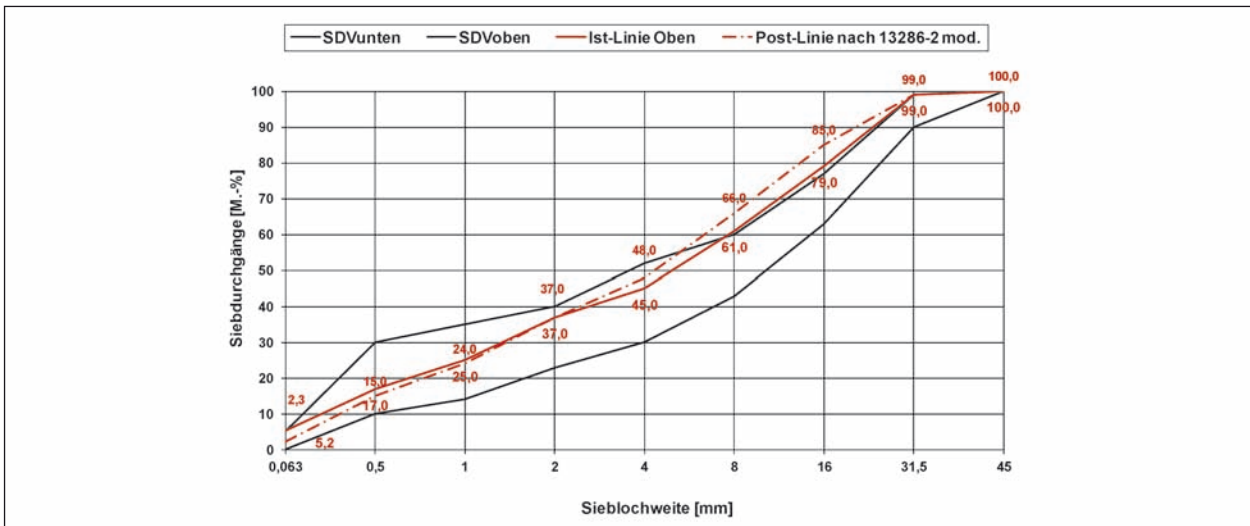


Bild 13: Darstellung der Sieblinien vor und nach dem modifizierten Proctorversuch; SDV oben Basalt

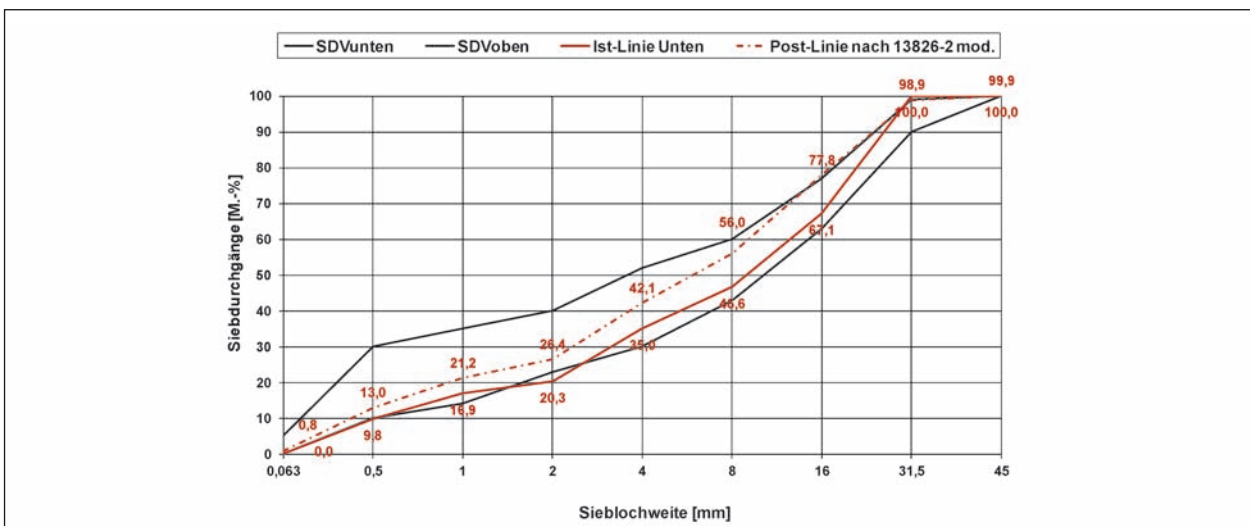


Bild 14: Darstellung der Sieblinien vor und nach dem modifizierten Proctorversuch; SDV unten Kies

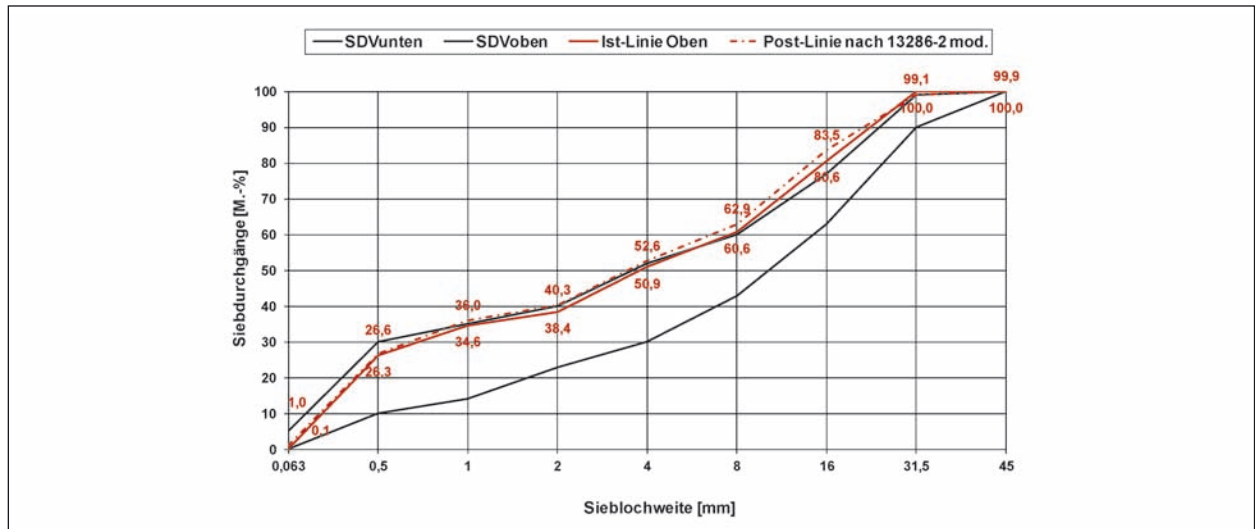


Bild 15: Darstellung der Sieblinien vor und nach dem modifizierten Proctorversuch; SDV oben Kies

5.4 Interlaboratoriumsvergleich

Der Interlaboratoriumsvergleich sollte zum einen eine einheitliche Vorgehensweise beider Institute bei den verschiedenen Verdichtungsversuchen sicherstellen und potenzielle Fehlerquellen aufdecken. Zum anderen sollte der Laborvergleich genutzt werden, um erste Erfahrungen bei der Durchführung von Verdichtungsversuchen entsprechend DIN EN 13286-4 und -5 zu sammeln.

Der Vergleich wurde für den Proctorversuch, dessen Prüfgerät in gleicher Ausfertigung an beiden Instituten zur Verfügung stand, durchgeführt. In beiden Forschungsstellen werden Vibrationshämmer in unterschiedlicher Geräteausführung (s. Kapitel 4.4) genutzt. Um Einflüsse der unterschiedlichen Gerätekonfiguration ausschließen zu können, wurde auch diesbezüglich ein Vergleich vorgenommen.

Vergleichsversuche mit dem Vibrationstisch konnten aufgrund technischer Probleme und zeitlicher Aspekte nicht durchgeführt werden. Die Voruntersuchungen wurden daher nur vom FEhS-Institut an beiden Baustoffgemischen vorgenommen.

5.4.1 Vergleichsversuche Proctorverdichter

Für die Durchführung wurde eine einheitliche Vorgehensweise auf der Basis der DIN EN 13286-2 festgelegt. Die Versuche wurden nur an Baustoffgemischen 0/32 mm mit einer Korngrößenverteilung an der unteren Grenzlinie des SDV-Bereiches durchgeführt. Grundlage für diese Festlegung war

Personal	Lokation	Baustoffgemisch	Körnung [mm]	Opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m ³]
FEhS	FEhS	Basalt	0/32	3,9	2,14
IKM		Basalt	0/32	3,7	2,14
Mittelwert				3,8 ± 0,1	2,14 ± 0,00

Tab. 15: Ergebnisse Interlaboratoriumsvergleich – Proctorversuche Basalt

die Annahme, dass aufgrund des geringeren Feinanteils eher bei dieser grobkörnigeren Sieblinie dränierende Effekte auftreten können als bei der oberen Grenzlinie des SDV-Bereiches. Die Proben wurden 24 Stunden vor den Versuchen mit vier abgestuften Wassergehalten angesetzt. Eine Probe wurde trocken verdichtet.

Baustoffgemisch Basalt

Die Ergebnisse der durchgeführten Proctorversuche sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Beide Versuche erzielten identische Trockendichten und die ermittelten Wassergehalte weisen nahezu identische Ergebnisse auf. Der Mittelwert liegt bei 3,8 M.-% mit einer Abweichung von 0,1 M.-%.

Für die beiden trocken verdichteten Proben wurden Trockendichten von 2,08 Mg/m³ bzw. 2,10 Mg/m³ bestimmt. Beide Werte liegen nah an den Trockendichten, die mit optimalen Wassergehalten erzielt wurden. Weiterhin weisen auch diese Werte eine akzeptable Übereinstimmung auf.

Personal	Lokation	Baustoffgemisch	Körnung [mm]	Opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m ³]
IKM	IKM	Kies	0/32	4,6	2,12
FEhS		Kies	0/32	4,2	2,12
Mittelwert				4,4 ± 0,2	2,12 ± 0,00

Tab. 16: Ergebnisse Interlaboratoriumsvergleich – Proctorversuche Kies

Baustoffgemisch Kies

Tabelle 16 zeigt die Resultate der Untersuchungen am Baustoffgemisch Kies.

Auch die Versuche an dem Baustoffgemisch 0/32 mm aus Kies erzielten identische Trockendichten. Die korrespondierenden Wassergehalte divergieren leicht mit einer Abweichung von 0,2 M.-% und einem Mittelwert von 4,4 M.-%.

Die trocken verdichteten Proben erzielten Trockendichten von 1,90 Mg/m³ bzw. 1,99 Mg/m³. Beide Werte weisen untereinander eine Abweichung von ca. 0,1 Mg/m³ auf. Zusätzlich weichen diese Trockendichten stärker von den Ergebnissen mit optimalem Wassergehalt ab.

5.4.2 Vergleichsversuche Vibrationshammer

Für die Durchführung wurde eine einheitliche Vorgehensweise auf der Basis der DIN EN 13286-4 festgelegt. Abweichend von der vorgenannten Norm wurde ein Proctorzylinder nach DIN EN 13286-2 (s. Kapitel 4.4) verwendet.

Da mit diesem Verdichtungsverfahren nur geringe Erfahrungen bei beiden Forschungsstellen vorlagen, wurden die Versuche an den beiden Baustoffgemischen mit Korngrößenverteilungen an der unteren und oberen Grenzlinie des SDV-Bereiches durchgeführt. Die Proben wurden 24 Stunden vor den Versuchen mit vier abgestuften Wassergehalten angesetzt. Eine Probe wurde trocken verdichtet.

Baustoffgemisch Basalt

In Tabelle 17 sind die Versuchsergebnisse aufgelistet.

Die beiden Versuche an der oberen Sieblinie, die mit unterschiedlichen Vibrationshammergeräten durchgeführt wurden, erzielten nah beieinander liegende Trockendichten mit einem Mittelwert von 2,26 Mg/m³ und einer Abweichung von 0,03 Mg/m³.

Personal	Lokation	Baustoffgemisch	Körnung [mm]	Opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m ³]
IKM	IKM	Basalt US	0/32	5,0	2,23
FEhS	FEhS	Basalt US	0/32	n. B.	n. B.
Mittelwert				–	–
IKM	IKM	Basalt OS	0/32	5,9	2,29
FEhS	FEhS	Basalt OS	0/32	5,8	2,23
Mittelwert				5,9 ± 0,1	2,26 ± 0,03

Tab. 17: Ergebnisse Interlaboratoriumsvergleich – Vibrationshammerversuche Basalt

Die ermittelten Wassergehalte weisen nahezu identische Ergebnisse auf. Der Mittelwert liegt bei 5,9 M.-% mit einer Abweichung von 0,1 M.-%. Für die untere Sieblinie konnte nur ein Versuch ausgewertet werden. Dieser lieferte eine Trockendichte vergleichbar zu den Ergebnissen der oberen Sieblinie. Der Wassergehalt entsprach mit 5,0 M.-% der Tendenz, dass Sieblinien mit einem geringeren Feinanteil weniger Wasser während der Verdichtung benötigen.

Für die beiden trocken verdichteten Proben, wurden Trockendichten von 2,30 Mg/m³ bzw. 2,25 Mg/m³ (Mittelwert: 2,28 Mg/m³) erzielt. Beide Messwerte liegen mit einer Abweichung von ± 0,03 Mg/m³ im Bereich der Trockendichten, die mit optimalen Wassergehalten erzielt wurden.

Baustoffgemisch Kies

Die Ergebnisse der durchgeführten Vibrationshammerversuche zeigt Tabelle 18.

Die Versuche an dem Baustoffgemisch Kies OS ergaben fast identische Trockendichten. Die zugehörigen Wassergehalte weichen leicht mit einer Abweichung von 0,1 M.-% voneinander ab. Der Mittelwert liegt bei 3,8 M.-%.

Auch die Versuche an dem Baustoffgemisch Kies US erzielten vergleichbare Trockendichten mit einem Mittelwert von 2,15 Mg/m³ und einer Abweichung von 0,02 Mg/m³. Die zugehörigen Wassergehalte spreizen etwas weiter mit einer Abweichung von 0,3 M.-% und einem Mittelwert von 3,9 M.-%.

Für die beiden trocken verdichteten Proben des Baustoffgemisches Kies OS wurden Trockendichten von 2,13 Mg/m³ bzw. 2,20 Mg/m³ erzielt. Der Mittelwert liegt bei 2,17 Mg/m³ mit einer Abweichung von 0,04 Mg/m³. Die Trockendichte

Personal	Lokation	Baustoffgemisch	Körnung [mm]	Opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m ³]
IKM	FEhS	Kies OS	0/32	3,9	2,13
FEhS	IKM	Kies OS	0/32	3,7	2,12
Mittelwert				3,8 ± 0,1	2,13 ± 0,00
IKM	IKM	Kies US	0/32	4,2	2,13
FEhS	FEhS	Kies US	0/32	3,6	2,16
Mittelwert				3,9 ± 0,3	2,15 ± 0,02

Tab. 18: Ergebnisse Interlaboratoriumsvergleich – Vibrationshammerversuche Kies

2,20 Mg/m³ weicht etwas stärker von dem Ergebnis mit optimalem Wassergehalt ab.

Die beiden trocken verdichteten Proben des Baustoffgemisches Kies US erzielten Trockendichten von 2,11 Mg/m³ bzw. 2,14 Mg/m³. Beide Werte weisen untereinander eine Abweichung von 0,02 Mg/m³ auf. Diese Trockendichten liegen im Bereich der Trockendichte die mit einem optimalen Wassergehalt erzielt wurde.

5.4.3 Vergleichsversuche Vibrationstisch

Für diese Versuche wurden pro Baustoffgemisch vier Versuchsproben mit abgestuften Wassergehalten und eine trockene Probe genutzt. Obwohl diese Vorgehensweise nicht der Vorgabe durch DIN EN 13286-5 entspricht, war die Intention, bessere Vergleichsmöglichkeiten zu den Ergebnisse entsprechend DIN EN 13286-2 und 13286-4 zu erzielen. Eine weitere Serie von Versuchen an der oberen und unteren Sieblinie wurde für beide Baustoffgemische entsprechend Normvorgabe nur trocken und mit einem optimalen Wassergehalt verdichtet.

Baustoffgemisch Basalt

Die Ergebnisse der durchgeführten Vibrationstischversuche sind in Tabelle 19 aufgeführt.

Die Versuche, die mit abgestuften Wassergehalten durchgeführt wurden, ergaben Verdichtungskurven, die eine Bestimmung des optimalen Wassergehaltes nicht ermöglichten (s. Bild 16).

Die Proben, die trocken verdichtet wurden, erzielten Trockendichten von 2,33 Mg/m³ (obere Sieblinie) bzw. 2,09 Mg/m³ (untere Sieblinie). Das Ergebnis der oberen Sieblinie von 2,33 Mg/m³ liegt nah am Wert, der mit optimalem Wassergehalt für die obere Sieblinie erzielt wurde (2,31 Mg/m³). Die Ergebnisse der trockenen und optimalen Verdichtung der un-

Personal	Lokation	Baustoffgemisch	Körnung [mm]	Opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m ³]
FEhS	FEhS	Basalt OS*	0/32	n. B.	
		Basalt US*	0/32	n. B.	
		Basalt OS**	0/32	6,8	2,31
		Basalt US**	0/32	4,3	1,93

* Versuche mit abgestuften Wassergehalten

** Versuche mit optimalem Wassergehalt

Tab. 19: Ergebnisse Interlaboratoriumsvergleich – Vibrations-tisch Basalt

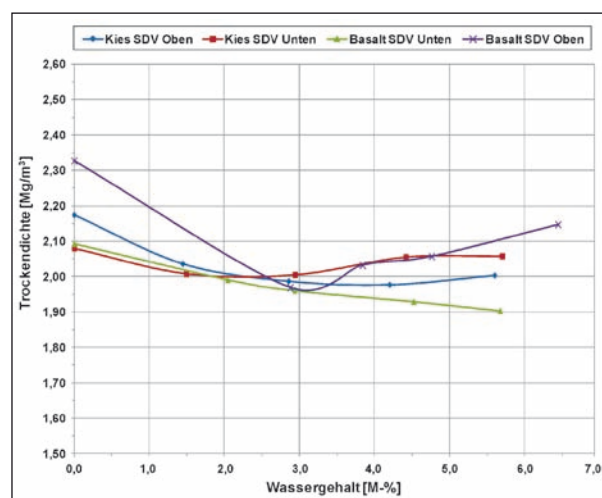


Bild 16: Verdichtungskurven Vibrationstisch nach DIN EN 13286-5

Personal	Lokation	Baustoffgemisch	Körnung [mm]	Opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m ³]
FEhS	FEhS	Basalt OS*	0/32	n. B.	
		Basalt US*	0/32	4,7	2,06
		Basalt OS**	0/32	7,3	1,93
		Basalt US**	0/32	4,6	2,01

* Versuche mit abgestuften Wassergehalten

** Versuche mit optimalem Wassergehalt

Tab. 20: Ergebnisse Interlaboratoriumsvergleich – Vibrations-tisch Kies

teren Sieblinie weisen aufgrund fehlender Resultate keinen Vergleichsansatz auf. Bei der Gegenüberstellung von Proctor- und Vibrationshammerergebnissen zeichnet sich die obere Sieblinie bei optimaler Verdichtung mit dem Vibrationstisch durch einen höheren Wasserbedarf von 6,8 M.-% aus.

Baustoffgemisch Kies

Die erzielten Messergebnisse der durchgeführten Vibrationstischversuche am Baustoffgemisch Kies sind in Tabelle 20 zusammengefasst.

Der Versuch, der mit abgestuften Wassergehalten für die obere Sieblinie durchgeführt wurde, lieferte eine nicht interpretierbare Verdichtungskurve (s. Bild 16). Für die untere Sieblinie konnten aus den abgestuften Wassergehalten eine Trockendichte von $2,06 \text{ Mg/m}^3$ und ein optimaler Wassergehalt von $4,7 \text{ M.-%}$ bestimmt werden. Diese Werte entsprechen in etwa dem Resultat des Einzelversuchs, der nur mit einem optimalen Wassergehalt durchgeführt wurde. Für die obere Sieblinie liegen die Trockendichte bei $1,93 \text{ Mg/m}^3$ und der Wassergehalt bei $7,3 \text{ M.-%}$. Dieses Ergebnis liegt im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Verdichtungsgeräte unterhalb von ca. $2,1 \text{ Mg/m}^3$. Die Proben, die trocken verdichtet wurden, erzielten Trockendichten von $2,11 \text{ Mg/m}^3$ und $2,17 \text{ Mg/m}^3$ (obere Sieblinie) und jeweils $2,08 \text{ Mg/m}^3$ (untere Sieblinie). Die Mittelwerte dieser Ergebnisse ($2,14 \text{ Mg/m}^3$ – obere Sieblinie und $2,08 \text{ Mg/m}^3$ – untere Sieblinie) liegen über den Ergebnissen, die mit abgestuften Wassergehalten erzielt wurden.

5.5 Zusammenfassung

Aufgrund der Ergebnisse wurden die Versuche als erfolgreicher Laborvergleich angesehen. Im Hinblick auf das zweite Arbeitspaket des Forschungsvorhabens, für das der Vergleich der Durchführung der Verdichtungsversuche ursprünglich geplant war, zeigen die oben genannten Ergebnisse eine gute Übereinstimmung auf. Die Abweichungen fallen relativ gering aus bzw. bewegen sich im Rahmen von bekannten Ergebnisschwankungen für Proctorversuche.

Die Absprachen zwischen dem FEhS-Institut und dem IKM zur einheitlichen Vorgehensweise ermöglichten einen erfolgreichen Interlaboratoriumsvergleich beider Institute. Aufgrund dessen wurde eine einheitliche Vorgehensweise auch für die folgenden Verdichtungsversuche sichergestellt und dementsprechend Ergebnisschwankungen minimiert.

Weiterhin konnte belegt werden, dass die leicht unterschiedlichen Vibrationshammergeräte beider Institute zu sehr vergleichbaren Ergebnissen führen. Aufgrund dessen war ein Geräteeinfluss auf die Ergebnisse nicht ersichtlich.

5.6 Analyse der Ergebnisse

Um einen Eindruck zu möglichen Verläufen von Verdichtungsversuchen zu erlangen, die auch ein

Aspekt der Motivation zu diesem Forschungsprojekt waren, sind beispielhaft in Bild 17 bis Bild 19

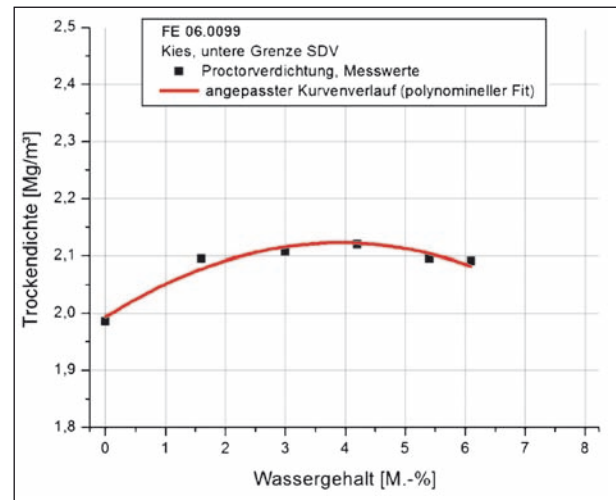


Bild 17: Verdichtungskurve mittels Proctorversuch

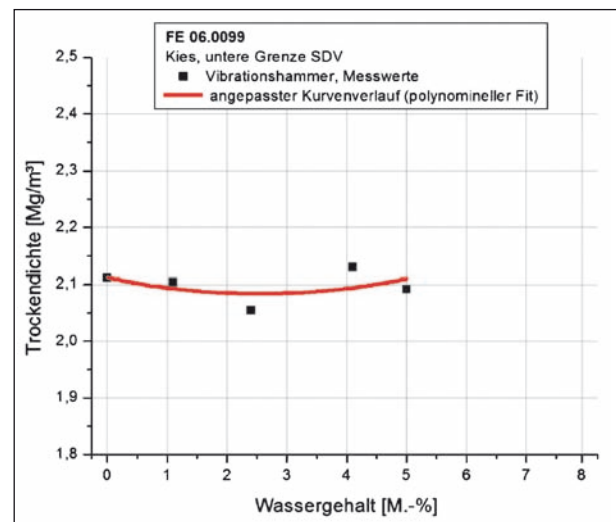


Bild 18: Verdichtungskurve mittels Vibrationshammerversuch

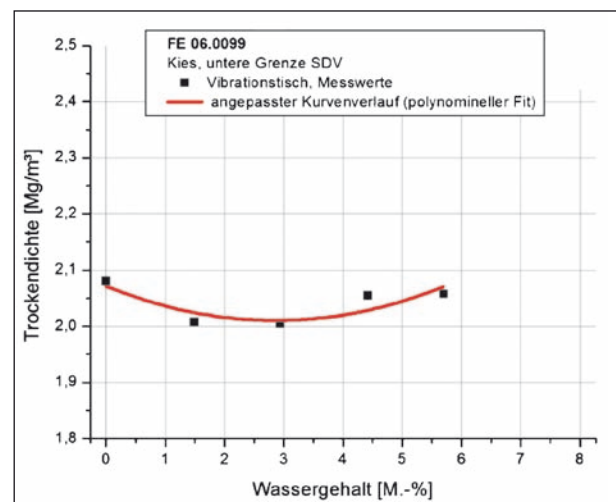


Bild 19: Verdichtungskurve mittels Vibrationstischversuch

gemessene Verdichtungskurven des ersten Arbeitspaketes für einen Proctor-, einen Vibrationshammer- und einen Vibrationstischversuch dargestellt, deren Datenpunkte mit einem polynominellen Fit versehen wurden. Aus den dargestellten Kurvenverläufen lässt sich erkennen, dass ein eindeutiges Kurvenmaximum oft nicht gegeben ist. Die bisherigen Kurvenverläufe weisen des Öfteren anstatt eines Maximums ein Minimum im Kurvenverlauf auf und die Angabe des Wertepaares Trockendichte und optimaler Wassergehalt ist aufgrund dessen nicht möglich. Hiermit war die Option eines Gerätevergleichs aufgrund der erzielten Ergebnisse in Form von Trockendichte und optimalem Wassergehalt ohne weitere Bearbeitung der Daten nur bedingt gegeben.

Um einen aussagekräftigen Vergleich der Verdichtungsverfahren zu ermöglichen, wurden die bis dato erzielten Ergebnisse der durchgeführten Versuche pro Verdichtungsverfahren und Sieblinie in jeweils einem Graphen dargestellt (s. Bild 20 bis Bild 23). Datengrundlage bildeten die Versuchsergebnisse (inklusive aller Verdichtungsschritte). Die entsprechenden Daten sind im Anhang A hinterlegt.

Im nächsten Schritt wurden die gemessenen Kurvenverläufe der Verdichtungsverfahren gemittelt, mit Standardabweichungen versehen und nochmals vergleichend dargestellt (s. Bild 24 bis Bild 26). Aufgrund der geringen Datenmenge der Versuche mit dem Vibrationstisch konnte dieses Auswertvorgehen nur für die Proctor- und Vibrationshammer-

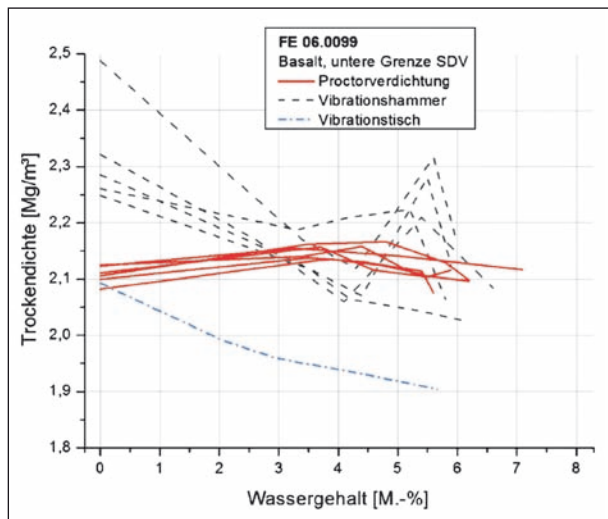


Bild 20: Verdichtungskurven aller durchgeführten Verdichtungsversuche des AP1 – Basalt unterer SDV

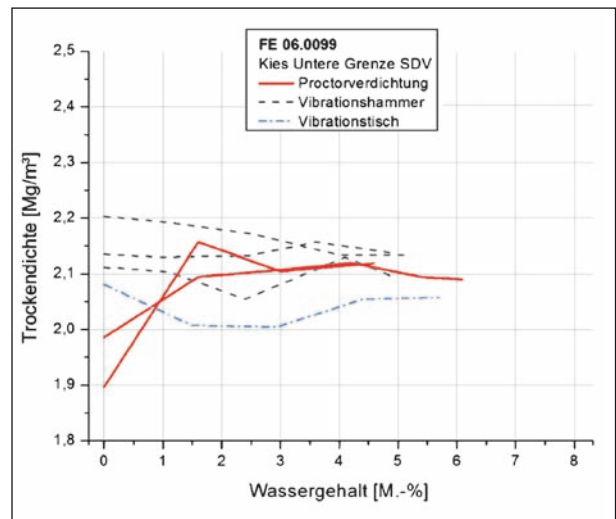


Bild 22: Verdichtungskurven aller durchgeführten Verdichtungsversuche des AP1 – Kies unterer SDV

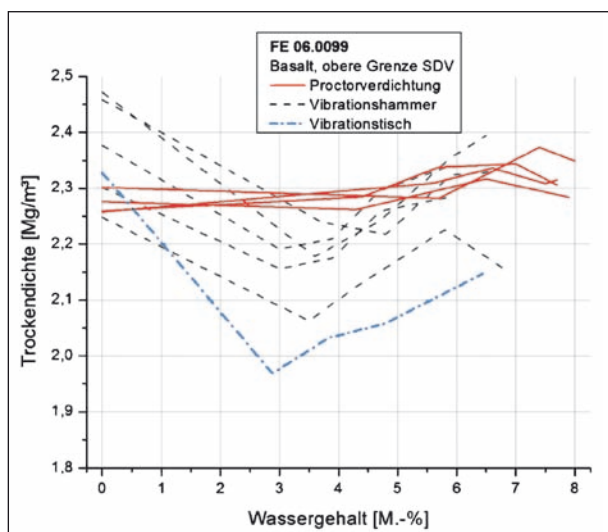


Bild 21: Verdichtungskurven aller durchgeführten Verdichtungsversuche des AP1 – Basalt oberer SDV

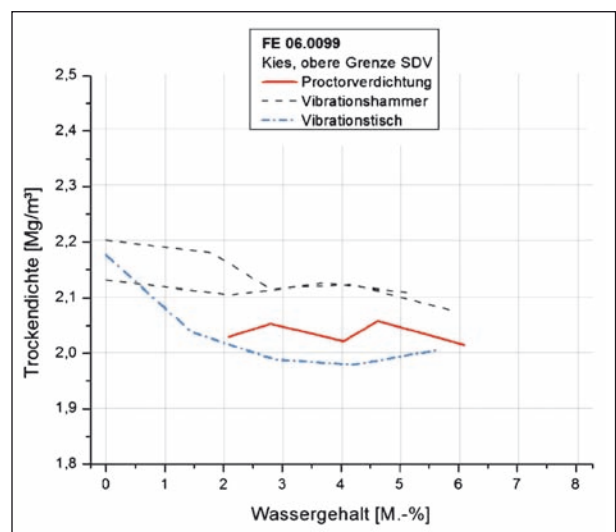


Bild 23: Verdichtungskurven aller durchgeführten Verdichtungsversuche des AP1 – Kies oberer SDV

merergebnisse erfolgen. Zusätzlich konnte diese Art der Auswertung für die obere Sieblinie Kies aufgrund der geringen Zahl auswertbarer Versuche (s. Bild 23) nicht durchgeführt werden

Anhand der Bilder 20 bis 23 und besonders der Bilder 24 bis 26 lassen sich für die Ergebnisse der beiden verwendeten Baustoffgemische folgende Schlüsse ziehen:

- Die Trockendichten des Vibrationshammerverfahrens weisen im Bereich der optimalen Verdichtung nahezu identische Ergebnisse wie beim Proctorverfahren auf.

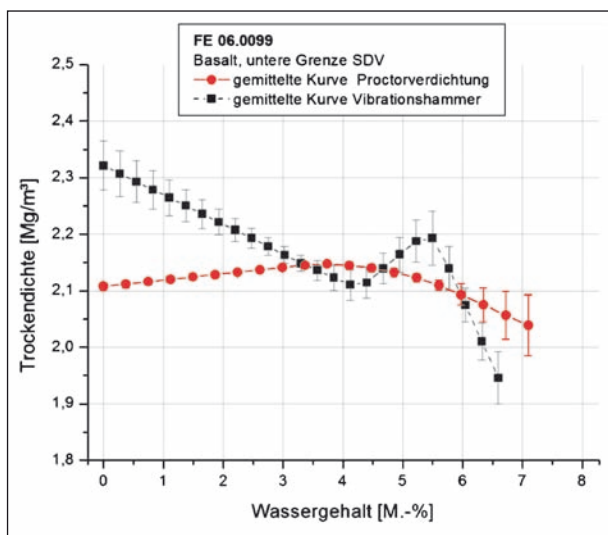


Bild 24: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereichen für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – Basalt unterer SDV

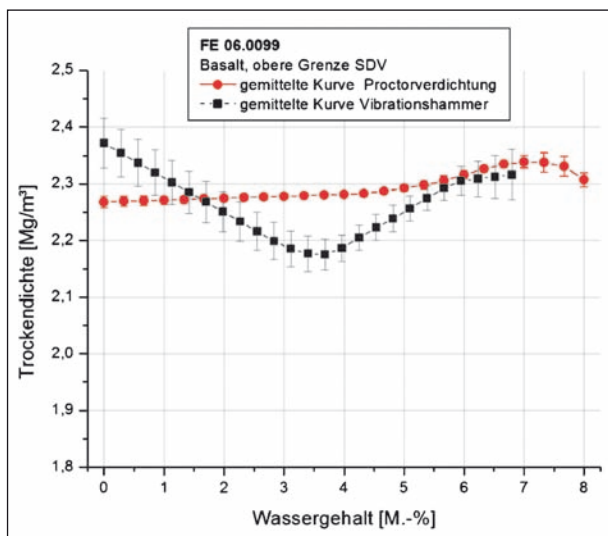


Bild 25: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereichen für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – Basalt oberer SDV

- Abseits von der optimalen Verdichtung (linker und rechter Kurvenast) liegt die Fehlerstreuung des Hammerverfahrens zumeist über der des Proctorverfahrens.

- Im Bereich der optimalen Verdichtung fällt die Fehlerstreuung des Vibrationshammers für die untere und obere Sieblinie des Basaltes im Vergleich zum Proctorverfahren höher aus. Für die untere Sieblinie des Kieses gleicht sich die Fehlerstreuung beider Verfahren an.

- Die Trockendichten, die mit abgestuften Wassergehalten mit dem Vibrationstisch erzielt wurden, liegen stetig unterhalb der beiden anderen Verfahren. Die Differenz liegt ca. zwischen 0,1 und 0,2 Mg/m³. Jedoch muss hier auf die geringe Anzahl an Vibrationstischversuchen hingewiesen werden.

- Im Vergleich Proctor- zu Vibrationshammerverfahren fallen die Ergebnisse bei der Trockenverdichtung mittels Proctorverdichter höher aus als beim Vibrationshammerverfahren. Der Unterschied liegt bei ca. 0,2 Mg/m³. Die Dichten der Trockenverdichtung bzgl. des Vibrationstisches liegen je nach Material und Sieblinie im Mittel im Bereich des Vibrationshammers oder des Proctorverfahrens.

- Für die Verdichtung mit einem optimalen Wassergehalt ergeben sich für das Proctor- und das Vibrationshammerverfahren Schnittpunkte, die tendenziell bei einem Wassergehalt von 2 bis

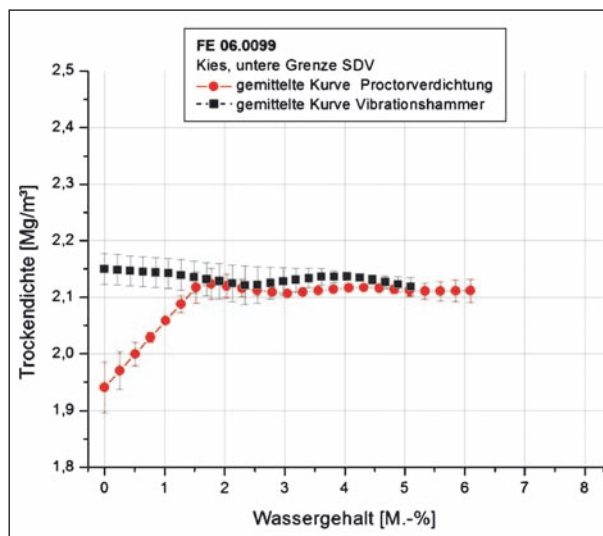


Bild 26: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereichen für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – Kies unterer SDV

3 M.-% liegen und sehr vergleichbare Trocken-dichten wie bei einer optimalen Verdichtung erzielen. Dies deutet darauf hin, dass hier eine mögliche Vergleichsgrundlage für beide Verfahren und ein Aspekt zur Lösung der Problematik von dränierenden Baustoffgemischen gefunden wurden. Aufgrund der stetig geringer ausfallenden Ergebnisse bzgl. des Vibrationstischverfahrens ist diese Vergleichsgrundlage für dieses Verfahren nicht gegeben.

5.7 Verfahrenstechnische Aspekte

Im Folgenden werden Erfahrungen und Aspekte aufgezeigt, die sich während der Versuche mit den „neuen“ Verdichtungsgeräten im ersten Arbeitspaket einstellten und zusätzlich zur Auswahl des Vergleichsgerätes zum Proctorverdichter für das zweite Arbeitspaket herangezogen wurden.

Vibrationshammer

- Die Durchführung gestaltet sich im Vergleich zum Proctorverfahren mindestens gleichwertig.
- Der Zeitaufwand ist im Vergleich zum Proctorversuch geringer (reine Versuchszeit: ca. 10 Minuten für eine Probe).
- Bzgl. der Handhabbarkeit lassen sich speziell durch die Modifikationen am Vibrationshammer am FEhS-Institut Vorteile nennen. Diese liegen zum einen in der Ergonomie bzw. Versuchsdurchführung und zum anderen in der geringeren Belastung für den Laboranten.
- Der Platzbedarf für das Gerät ist geringer als für den Vibrationstisch.
- Die Anschaffungskosten für das Prüfgerät können ca. 50 % unterhalb der Kosten des Proctorprüfgerätes liegen.

Vibrationstisch

- Der Vorteil liegt bei der geringen Anzahl der Versuche für ein Material. Wird nach Normvorgabe gearbeitet, soll nur ein Versuch mit einem optimalen Wassergehalt durchgeführt werden. Somit steht eine Versuchsprobe für den Vibrationstisch ca. fünf Versuchsproben für den Proctorverdichter bzw. Vibrationshammer gegenüber.

- Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, trocken oder mit optimalem Wassergehalt zu verdichten. Beide Versuche sollen laut ASTM-Norm nahezu das gleiche Ergebnis bzgl. der Trocken-dichte liefern (s. a. Bild 5).
- Die Versuchsdurchführung ist im Vergleich zum Proctor- und Vibrationshammerverdichter bedingt akzeptabel. Trotz der Nutzung eines 150-mm-Topfes sind die Arbeitsergonomie (tiefer und flächiger Versuchsstand) und die dadurch bedingte Belastung für den Laboranten nicht akzeptabel.
- Der Zeitaufwand für die Durchführung ist im Vergleich zum Proctor- bzw. Vibrationshammerversuch höher. Für einen Versuch mit optimalem Wassergehalt wurde ca. eine Stunde benötigt. Bei Trockenverdichtung dauert der Versuch ca. 20 Minuten.
- Der Platzbedarf ist eher flächig ausgelegt und das Gerät bedarf entsprechend notwendiger Stellfläche.
- Das Procedere zur Bestimmung des optimalen Wassergehaltes eines Baustoffgemisches wird nur unzureichend in der DIN EN 13286-5 beschrieben. Hilfestellung lässt sich in der amerikanischen ASTM-Norm finden.
- Die Bestimmung des optimalen Wassergehaltes eines Baustoffgemisches vor der Verdichtung mit dem Vibrationstisch ist aufwändig und fehlerbehaftet, da die Festlegung nicht über eine Auswertung, sondern über eine subjektive Wassergehaltseinstellung erfolgt. Daher ist hier mit Fehlerquellen zu rechnen.
- Die Anschaffungskosten für das Prüfgerät können ca. 50 % unterhalb der Kosten des Proctorgerätes liegen.

Zusammenfassende Bewertung

- Anhand der erzielten Ergebnisse und der unter Kapitel 6.7 beschriebenen Aspekte der anderen europäisch genormten Laborverdichtungsverfahren wurde ein Bewertungsschema der Verdichtungsverfahren erarbeitet (Tabelle 21). Nach Auswertung dieses Bewertungsschemas wurde das Verdichtungsverfahren mit dem Vibrationshammer für die weitere Bearbeitung in Betracht gezogen und dem Betreuungsausschuss vorge-schlagen.

Bewertungsaspekt	DIN EN 13286-2	DIN EN 13286-4	DIN EN 13286-5
Handhabung	2	3	1
Zeitaufwand	2	3	1
Reproduzierbarkeit	2	2	3
Wassergehaltsbestimmung	3	3	1
Praxisnähe	1	3	3
DIN-EN-Anweisung	3	3	1
Platzbedarf	1	3	2
Anschaffungskosten	1	2	3
Σ	15	22	15

Tab. 21: Bewertung der Verdichtungsverfahren (1 – gering, 2 – mittel, 3 – gut)

5.8 Schlussfolgerungen aus Arbeitspaket 1

Das erste Arbeitspaket des Forschungsprojektes beinhaltete als primäre Aufgabe, ein geeignetes Verfahren zu identifizieren, das einer intensiven Betrachtung im Vergleich zum Proctorverfahren unterzogen werden soll. Dem von den Forschungsnehmern vorgeschlagenen Laborverdichtungsverfahren – Vibrationshammer nach DIN EN 13286-4 – stimmte der Betreuungsausschuss zu. Der Vibrationshammer wurde somit für die weiteren Vergleichsuntersuchungen zum Proctorverfahren verwendet.

Aufgrund der vergleichenden Untersuchungen zwischen Proctor- und Vibrationshammerverfahren wurde zudem eine Arbeitshypothese für das zweite Arbeitspaket formuliert, die eine Verdichtungsprüfung im Bereich von ca. 2 bis 3 M.-% Wassergehalt vorsieht.

Weiterhin wurde festgehalten, dass die im zweiten Arbeitspaket verwendeten Baustoffgemische auch trocken verdichtet werden, da die bisherigen Ergebnisse tendenziell zu gleichen Trockendichten führen wie Versuche, die mit einem optimalen Wassergehalt durchgeführt wurden. Zusätzlich wurde festgelegt, dass die Kornzertrümmerung durch Siebungen der Proben nach dem Verdichtungsverfahren bestimmt werden soll. Eine Untersuchung und Beurteilung der Kornverfeinerung durch die beiden Verdichtungsverfahren werden daher voraussichtlich im Rahmen einer Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, erfolgen.

6 Ergebnisse Arbeitspaket 2

6.1 Probenmaterialien

Für das zweite Arbeitspaket wurden lieferfertige Baustoffgemische 0/32 mm ohne Überkorn verwendet. Die Baustoffgemische wurden in Absprache mit dem Betreuungsausschuss anhand des Entwurfes für die TL Gestein-StB 2013 (siehe Tabelle 6) derart ausgewählt, dass aus jeder Gesteinsgruppe mindestens ein Gestein und somit eine umfassende Spannweite an Materialeigenschaften vertreten waren. In der Summe wurden zwölf ToB-Baustoffgemische für das zweite Arbeitspaket berücksichtigt. Eine Übersicht der ausgewählten Materialien und deren Herkunft zeigt Tabelle 22. Eine Fotodokumentation der Baustoffgemische ist im Anhang B enthalten.

Nr.	Gesteinsgruppe	Gesteinsart	Herkunft
AP2-1	Sedimentgesteine	Grauwacke	Bergisches Land
AP2-2		Kalkstein 1 (Devon)	Harz
AP2-3		Kalkstein 2 (Muschelkalk)	Baden-Württemberg
AP2-4	Vulkanite	Basalt	Hessen
AP2-5	metamorphe Gesteine	Quarzit	Hunsrück
AP2-6	Kiese	Kies, rund	Oberrhein
AP2-7	Plutonite	Granit	Hessen
AP2-8	Industriell hergestellte Gesteine	Stahlwerksschlacke (LDS)	Ruhrgebiet
AP2-9		Hochofenschlacke (HOS)	Niedersachsen
AP2-10		Hausmüllverbrennungsgasche (HMVA)	Westfalen
AP2-11	RC-Baustoff	RC-A	Ruhrgebiet
AP2-12		RC-B	Ruhrgebiet

Tab. 22: Auflistung und Herkunft der verwendeten Baustoffgemische des zweiten Arbeitspaketes

6.2 Kenndaten der Baustoffgemische

Die Eingangscharakterisierung der Baustoffgemische erfolgte durch Bestimmung der gesteinspezifischen Parameter: Trockenrohddichte, Wasseraufnahme, Widerstand gegen Zertrümmerung und Kornform. Die Ergebnisse dieser Laborprüfungen sind in Tabelle 23 zusammengefasst.

Die in Tabelle 23 vorgestellten Ergebnisse belegen, dass alle ausgewählten Baustoffgemische die Vorgaben entsprechend dem Entwurf der TL Gestein-StB 2013 (s. Tabelle 6) erfüllen und somit auch diese Materialien als typische Vertreter ihrer Gesteinsgruppen angesehen werden können.

6.3 Korngrößenverteilungen

Für die Verdichtungsversuche wurden lieferfertige Baustoffgemische verwendet. Zur Eingangscharakterisierung wurden auch die Sieblinien der Baustoffgemische bestimmt. Die Baustoffgemische sollten den Anforderungen der SDV-Vorgabe oder zumindest dem allgemeinen Bereich der Korngrößenverteilung von Kies- bzw. Schottertragschichten der TL SoB-StB entsprechen. Aus den Sieblinien in Anhang C ist zu erkennen, dass alle Baustoffgemische grundsätzlich den Vorgaben des SDV-Bereiches nachkommen und teils nur minimale Abweichungen auftreten. Ausnahme bildet der Baustoff LDS. Hier entspricht die Sieblinie den allgemeinen Anforderungen entsprechend den TL SoB-StB.

6.4 Proctor- und Vibrationshammerversuche

Da an beiden Forschungsinstituten baugleiche Proctorverdichter zur Verfügung standen und – wie die Ergebnisse des ersten Arbeitspaketes zeigten – kein signifikanter Einfluss der leicht unterschiedlichen Vibrationshammergeräte vorhanden ist, wurden zur Bearbeitung der Verdichtungsversuche des zweiten Arbeitspaketes die Baustoffgemische auf die beiden Laboratorien der Forschungsstellen aufgeteilt. Pro Baustoffgemisch und Verdichtungsgerät wurden fünf Versuchsreihen durchgeführt. Die erste Versuchsreihe beinhaltete fünf Proben mit abgestuften Wassergehalten, aus deren Verdichtungskurve der optimale Wassergehalt bestimmt wurde. Die folgenden vier Versuchsreihen wurden mit drei abgestuften Wassergehalten bearbeitet, wobei die Proben mit Wassergehalten angemischt wurden, die sich am Ergebnis der ersten Versuchsreihe orientierten. Zusätzlich wurde innerhalb jeder Versuchsreihe eine Probe trocken verdichtet.

Die Auswertung der Versuchsreihen erfolgte entsprechend den Normenanweisungen nach folgendem Schema:

- Auftragung der erzielten Trockendichten auf der Abszisse und der Wassergehalte auf der Ordinate,
- Versuche nach DIN EN 13286-2: Bestimmung des Kurvenmaximums, sofern möglich. Versuchsreihen ohne eindeutiges Maximum wurden nicht berücksichtigt,

Nr.	Gesteinsart	Rohddichte [Mg/m ³]	Wasseraufnahme [M.-%]	Schlagzertrümmerung [M.-%]	Kornform S/ [M.-%]
AP2-1	Grauwacke	2,71	1,1	21,6	22,5
AP2-2	Kalkstein A	2,70	0,3	26,8	14,5
AP2-3	Kalkstein B	2,71	0,9	23,5	13,8
AP2-4	Basalt	3,02	0,6	13,3	2,5
AP2-5	Quarzit	2,67	0,8	21,9	24,9
AP2-6	Kies	2,68	1,1	21,4	7,0
AP2-7	Granit	2,71	1,5	24,4	13,0
AP2-8	LDS	3,52	1,8	16,3	6,3
AP2-9	HOS	2,50	3,7	28,9	4,5
AP2-10	HMVA	2,43	5,1	34,0	7,7
AP2-11	RC-A	2,40	7,4	30,6	7,7
AP2-12	RC-B	2,52	3,6	26,0	3,6

Tab. 23: Ergebnisse aus der Eingangscharakterisierung der Baustoffgemische des zweiten Arbeitspaketes

- Versuche nach DIN EN 13286-4: Bestimmung des konkaven Kurvenmaximums. Bei konvexen Kurvenverläufen wurde der Verdichtungsschritt als Resultat herangezogen, der wertetechnisch am höchsten lag.

Die Untersuchungsergebnisse in Form von optimalem Wassergehalt und korrespondierender Trockendichte sowie die Ergebnisse der Proben, die trocken verdichtet wurden, sind in Tabelle 24 als gemittelte Werte inkl. Standardabweichungen aufgelistet. Die einzelnen Verdichtungsschritte der Laborprüfungen zur Erstellung der Verdichtungskurven sind im Anhang D zu finden. Die daraus erzielten Ergebnisse inkl. graphischer Darstellungen sind im Anhang E für die Proctorversuche und im Anhang F für die Vibrationshammerversuche hinterlegt.

6.5 Analyse der Ergebnisse

Um die gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Proctorverfahrens und des Vibrationshammerverfahrens zu verdeutlichen, wurden Korrelationen gebildet und der erzielte Determinationskoeffizient bestimmt. In Bild 27 bis Bild 32 sind die zugrunde liegenden Grafiken dargestellt.

Für nahezu alle Korrelationen wurden Determinationskoeffizienten bestimmt, die sehr nah bei eins liegen. Die Korrelation der beiden Verfahren bezüglich des Wassergehaltes ist mit $R^2 \approx 0,8$ nicht so gut ausgeprägt wie bei der erzielten Trockendichte. Eine Erklärung für die Abweichung der Übereinstimmung bzgl. der Wassergehalte ist möglicherweise die erhöhte Verdich-

Baustoffgemisch	Verfahren	Feuchtverdichtung		Trockenverdichtung
		Opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m ³]	Trockendichte [Mg/m ³]
AP2-1 Grauwacke	Proctor	6,0 ± 0,4	2,20 ± 0,00	2,14 ± 0,02
	Hammer	6,9 ± 0,2	2,25 ± 0,01	2,26 ± 0,03
AP2-2 Kalkstein A	Proctor	5,4 ± 0,4	2,20 ± 0,01	2,18 ± 0,01
	Hammer	5,3 ± 0,1	2,28 ± 0,01	2,30 ± 0,01
AP2-3 Kalkstein B	Proctor	6,1 ± 0,2	2,20 ± 0,01	2,16 ± 0,02
	Hammer	6,6 ± 0,3	2,27 ± 0,00	2,28 ± 0,02
AP2-4 Basalt	Proctor	5,8 ± 0,4	2,28 ± 0,02	2,28 ± 0,01
	Hammer	7,3 ± 0,3	2,30 ± 0,01	2,45 ± 0,02
AP2-5 Quarzit	Proctor	5,3 ± 0,2	2,06 ± 0,02	2,06 ± 0,02
	Hammer	6,7 ± 0,3	2,11 ± 0,01	2,17 ± 0,03
AP2-6 Kies	Proctor	5,9 ± 0,2	2,18 ± 0,01	2,16 ± 0,02
	Hammer	6,2 ± 0,6	2,34 ± 0,02	2,32 ± 0,01
AP2-7 Granit	Proctor	3,7 ± 1,0	2,10 ± 0,01	2,05 ± 0,02
	Hammer	3,4 ± 0,6	2,01 ± 0,05	2,17 ± 0,02
AP2-8 LDS	Proctor	3,5 ± 0,3	2,37 ± 0,05	2,37 ± 0,06
	Hammer	2,7 ± 0,5	2,46 ± 0,09	2,49 ± 0,05
AP2-9 HOS	Proctor	5,0 ± 0,9	1,84 ± 0,02	1,84 ± 0,02
	Hammer	3,4 ± 0,2	1,84 ± 0,03	1,87 ± 0,05
AP2-10 HMVA	Proctor	11,2 ± 0,6	1,70 ± 0,02	1,68 ± 0,02
	Hammer	10,9 ± 1,1	1,73 ± 0,04	1,78 ± 0,04
AP2-11 RC-A	Proctor	9,5 ± 0,6	1,71 ± 0,02	1,69 ± 0,01
	Hammer	8,5 ± 0,8	1,64 ± 0,03	1,77 ± 0,02
AP2-12 RC-B	Proctor	8,3 ± 0,2	1,88 ± 0,01	1,73 ± 0,01
	Hammer	6,1 ± 0,7	1,84 ± 0,01	1,98 ± 0,02

Tab. 24: Gemittelte Ergebnisse inkl. Standardabweichungen der durchgeführten Verdichtungsversuche

tungsenergie des Vibrationshammerverfahrens, die in die Probenmasse einwirkt. Zusammenfassend betrachtet belegen die Korrelationskoeffizienten jedoch, dass mit dem Vibrationshammerverfahren gleichwertige Ergebnisse im Vergleich zum Proctorverfahren erzielt werden können und dass das Vibrationshammerverfahren insofern ein adäquates Verfahren zum Proctorversuch darstellt.

Obwohl die Trockenverdichtung mit dem Vibrationshammer tendenziell etwas höhere Ergebnisse liefert als bei der Vibrationshammerverdichtung mit abgestuften Wassergehalten, ist die daraus resultierende Ergebnisdifferenz als gering einzustufen, da sie nur bei maximal 5 % liegt. Daraus lässt sich folgern, dass die Option, eine Trockenverdichtung von Baustoffgemischen zu etablieren, durchaus sinnvoll erscheint. Hierdurch könnten bei der Prü-

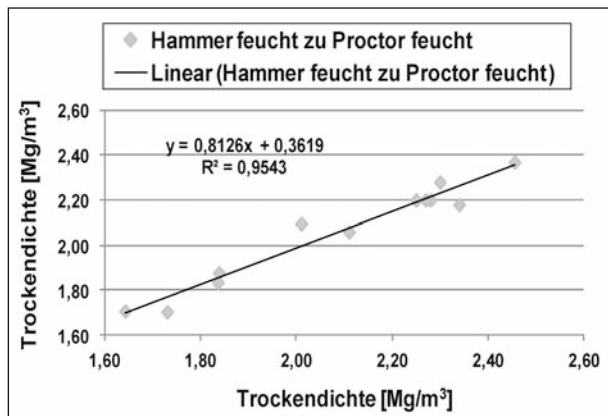


Bild 27: Erzielte Determinationskoeffizienten für Relation DIN EN 13286-4 (feucht) zu DIN EN 13286-2 (feucht)

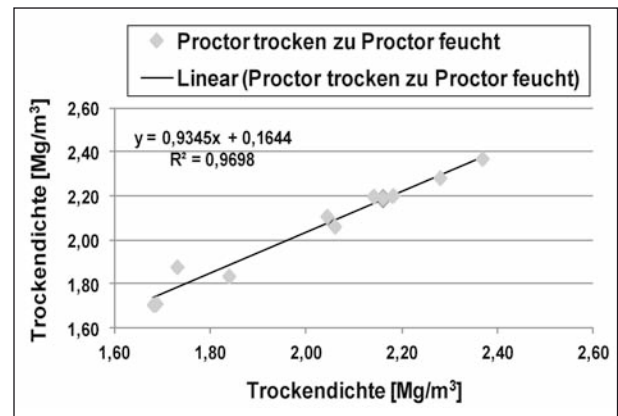


Bild 30: Erzielte Determinationskoeffizienten für Relation DIN EN 13286-2 (trocken) zu DIN EN 13286-2 (feucht)

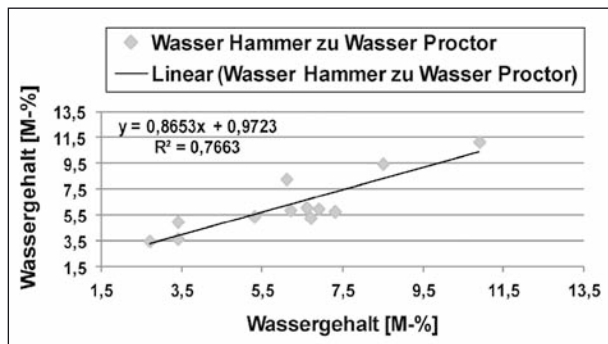


Bild 28: Erzielte Determinationskoeffizienten für Relation Wassergehalt DIN EN 13286-4 zu Wassergehalt DIN EN 13286-4

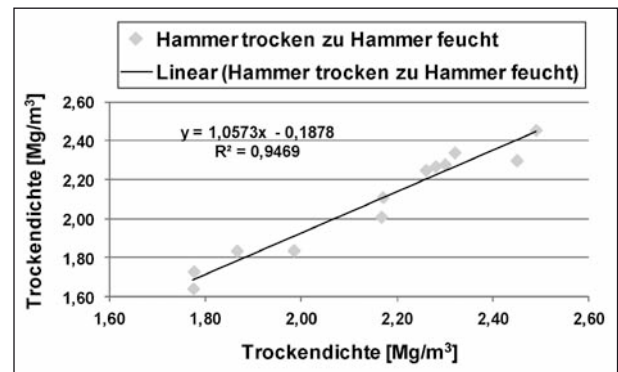


Bild 31: Erzielte Determinationskoeffizienten für Relation DIN EN 13286-4 (trocken) zu DIN EN 13286-2 (feucht)

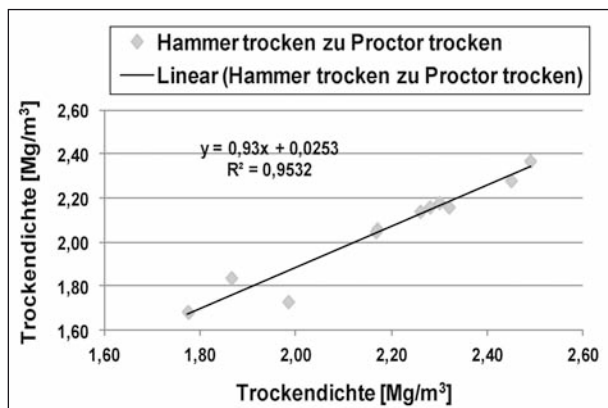


Bild 29: Erzielte Determinationskoeffizienten für Relation DIN EN 13286-4 (trocken) zu DIN EN 13286-2 (trocken)

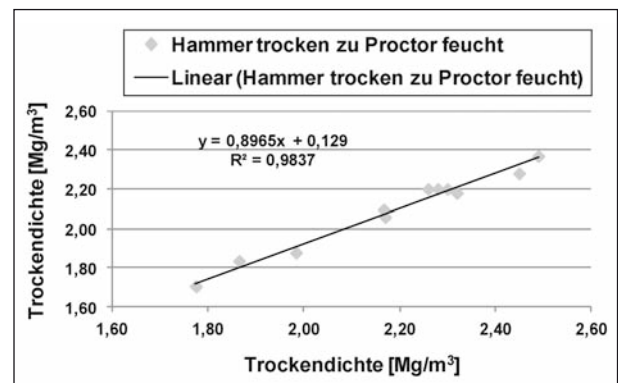


Bild 32: Erzielte Determinationskoeffizienten für Relation DIN EN 13286-4 (trocken) zu DIN EN 13286-2 (feucht)

fung im Labor Zeit- und somit Kosteneinsparungen erzielt werden.

Bei Übertragung des Verfahrens der Trockenverdichtung im Labor in die Baupraxis besteht jedoch das Problem, dass die In-situ-Verdichtung aufgrund der entstehenden Staubeentwicklung keineswegs trocken durchgeführt werden kann. Trotzdem bestünde im Labor die Möglichkeit der Trockenverdichtung zur Erzielung eines Kennwertes für das Baustoffgemisch, während in situ weiterhin eine Verdichtung mit einem feuchten Baustoffgemisch durchgeführt werden würde. Bei einem solchen Vorgehen muss allerdings die Frage nach dem Wassergehalt des einbaufertigen Baustoffgemisches diskutiert werden, da diese Angabe aufgrund der trockenen Laborverdichtung fehlen würde. Zur

Lösung dieser Problematik wurde die Arbeitshypothese des ersten Arbeitspaketes, die im Kapitel 5.6 und Bild 23 bis Bild 25 vorgestellt wurde, weiter verfolgt. Gemäß Vorgehen in Kapitel 5.6 wurden die gemittelten Verdichtungskurven aller Versuche und Verdichtungsverfahren pro Baustoffgemisch mit ihren Standardabweichungen gegeneinander aufgetragen (s. Bild 33 bis Bild 44).

Das Procedere bestätigte für nahezu alle verwendeten Baustoffgemische des zweiten Arbeitspaketes, dass die gemittelten Kurvenverläufe, die mit dem Proctor- und dem Vibrationshammerverfahren erzielt wurden, Schnittpunkte ergeben. Der erste Schnittpunkt liegt für Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinskörnungen tendenziell bei einem Wassergehalt um etwa 3 M.-%. Bei industriellen

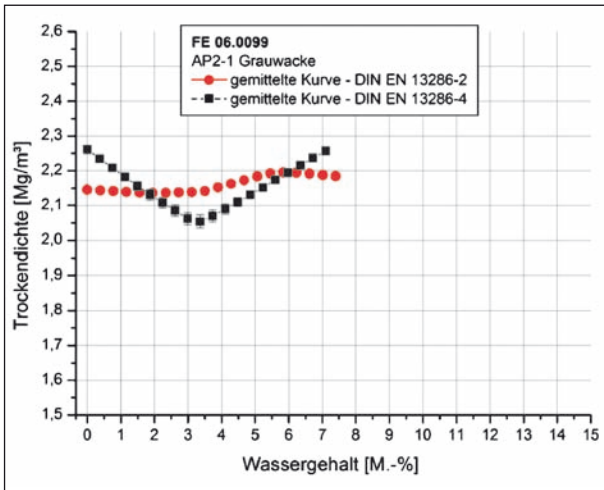


Bild 33: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-1 Grauwacke

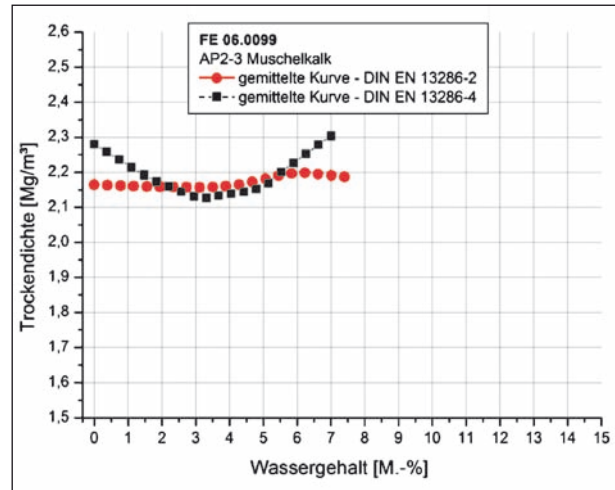


Bild 35: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-3 Muschelkalk

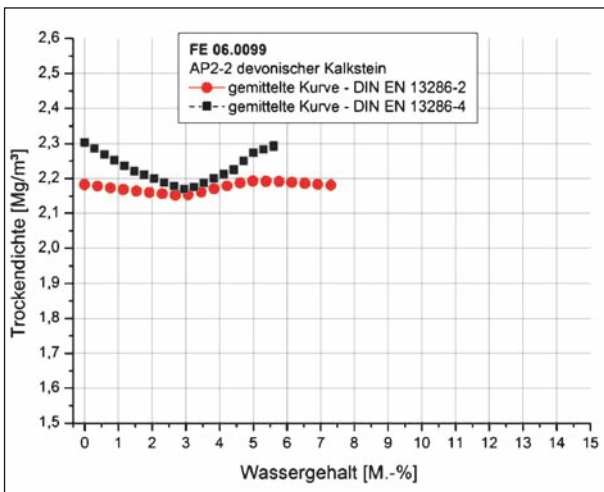


Bild 34: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-2 devonischer Kalkstein

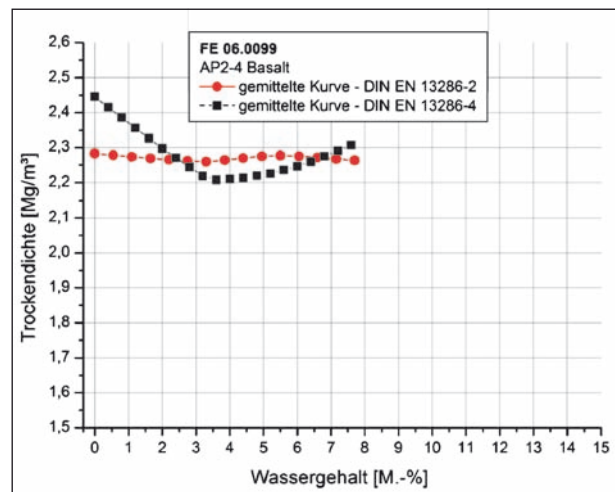


Bild 36: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-4 Basalt

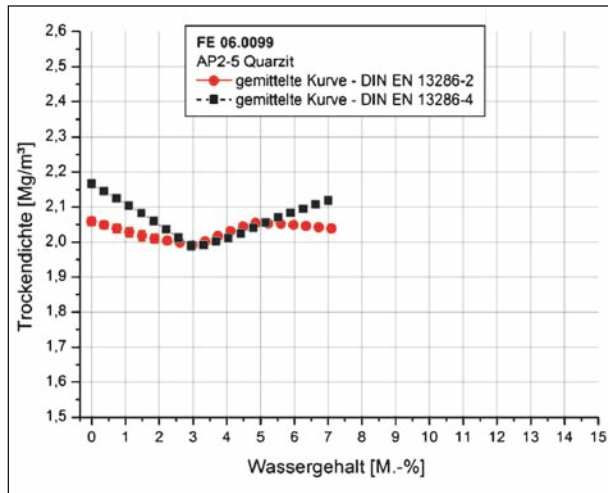


Bild 37: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-5 Quarzit

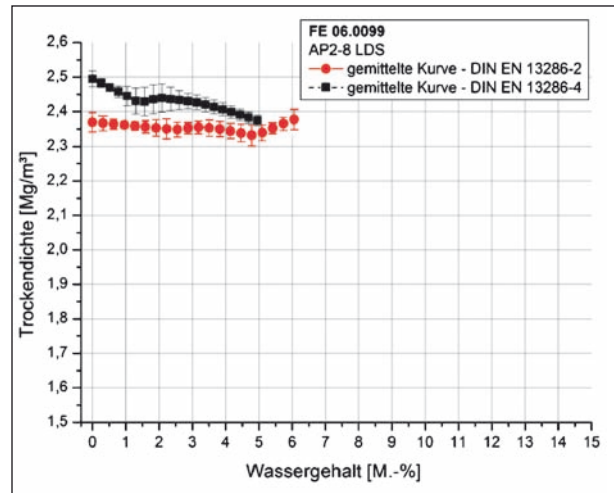


Bild 40: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-8 LDS

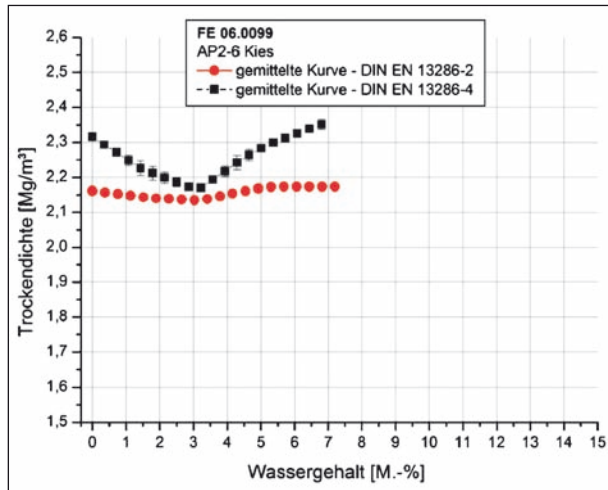


Bild 38: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-6 Kies

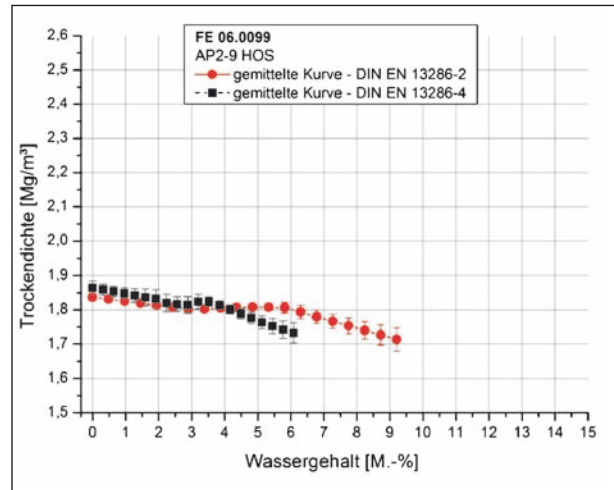


Bild 41: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-9 HOS

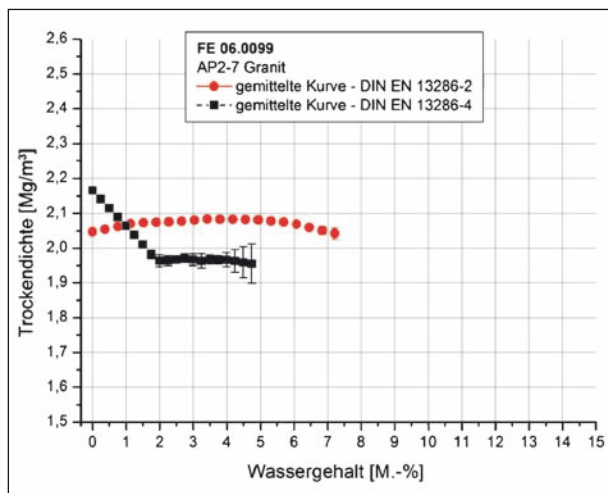


Bild 39: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-7 Granit

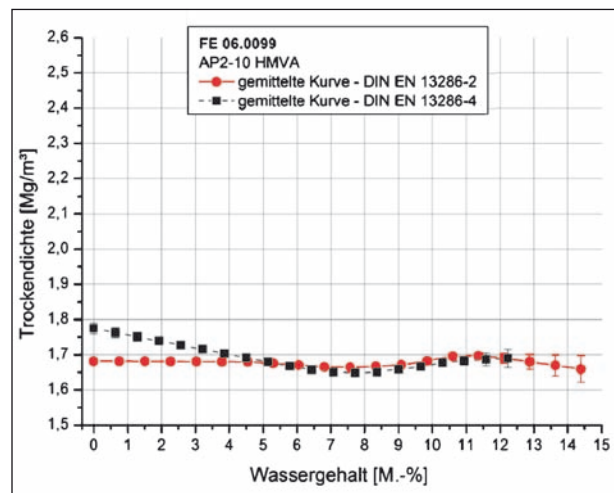


Bild 42: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-10 HMVA

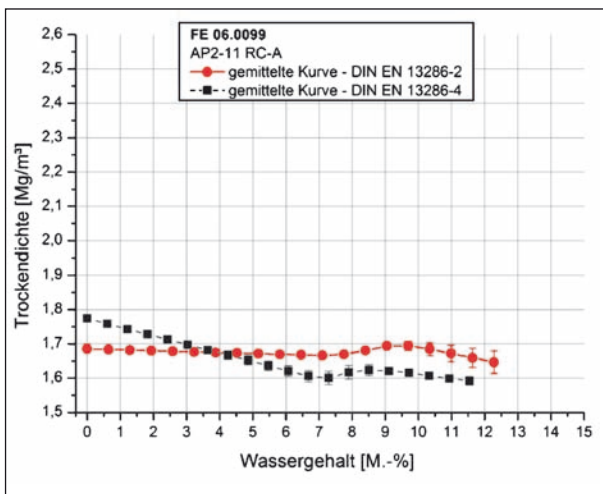


Bild 43: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-11 RC-A

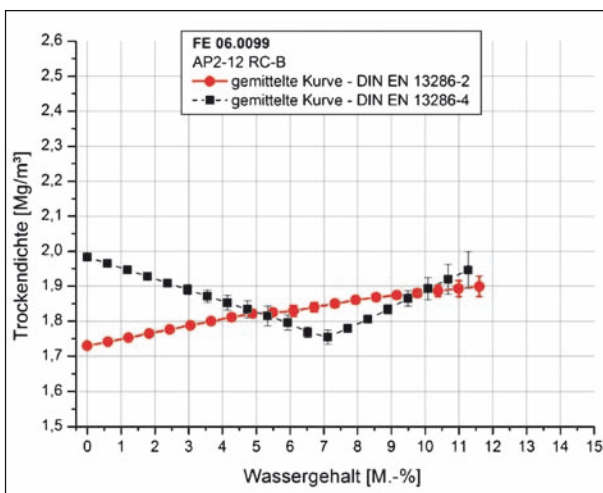


Bild 44: Gemittelte Verdichtungskurven inkl. Fehlerbereiche für Ergebnisse aus Proctor- und Vibrationshammerversuchen – AP2-12 RC-B

Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen liegt dieser Schnittpunkt tendenziell bei einem Wassergehalt um ca. 5 M.-%.

An diesen Schnittpunkten werden mit einem Wassergehalt unterhalb des Optimums mittels beider Verfahren Trockendichten erzielt, die vergleichbar zu den Trockendichten sind, die mit einem optimalen Wassergehalt erzielt wurden. Um den Zusammenhang besser zu verdeutlichen, wurden in den Bildern 45 und 46 die erzielten Trockendichten bei Nutzung von 3 M.-% Wasser gegen die erzielten Trockendichten bei einer optimalen Verdichtung gesetzt. Dies erfolgte sowohl für den Proctorverdichter (s. Bild 45) als auch für den Vibrationshammer (s. Bild 46). Die Begrenzung auf 3 M.-% Wassergehalt erfolgte aufgrund der Tatsache, dass laut der

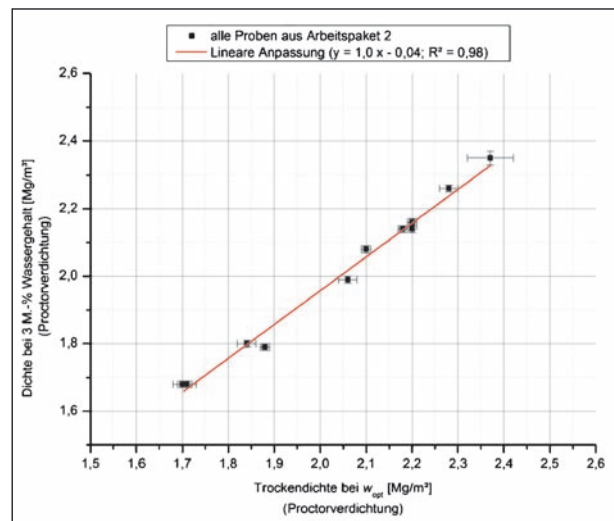


Bild 45: Erzielte Ergebnisse bei einer optimalen und einer 3-M.-%-Wassergehaltsverdichtung mittels Proctorapparat und erzielter Determinationskoeffizient

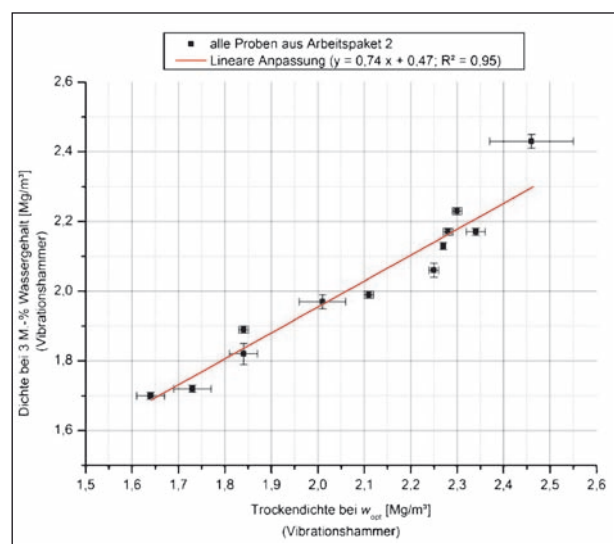


Bild 46: Erzielte Ergebnisse bei einer optimalen und einer 3-M.-%-Wassergehaltsverdichtung mittels Vibrationshammer und erzielter Determinationskoeffizient

vorgestellten Ergebnisse in Tabelle 24 einige verwendete Baustoffgemische bei einem Wassergehalt von 5 M.-% schon ihren optimalen Wassergehalt überschritten hätten und die Problematik der Probenentwässerung, die Lösungsgegenstand des Forschungsprojektes war, wieder aufgetreten wäre.

Die vorgestellten Aspekte und die dazu erstellten Grafiken (s. Bild 45 und Bild 46) lassen darauf schließen, dass eine Vergleichsgrundlage für beide Verfahren und ein Aspekt zur Lösung der Problematik von dränierenden Baustoffgemischen gefunden wurden, da Wassergehalte unterhalb einer optimalen Verdichtung per se nicht entwässern können. Zudem sind die Trockendichten, die mit einem

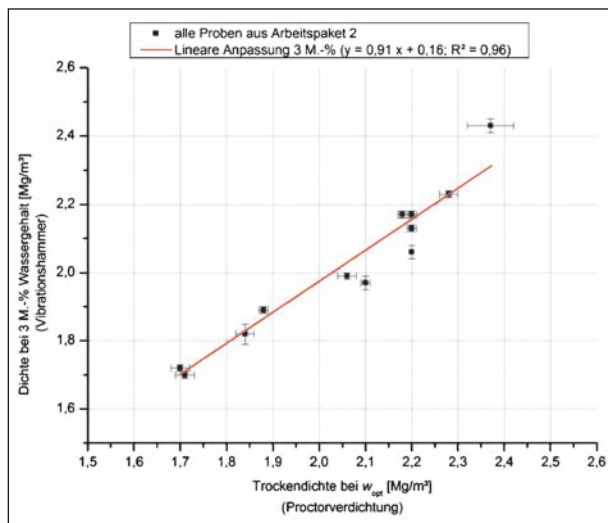


Bild 47: Erzielte Ergebnisse bei einer optimalen mit Proctorverdichter und einer 3-M.-%-Wassergehaltsverdichtung mittels Vibrationshammer und erzielter Determinationskoeffizient

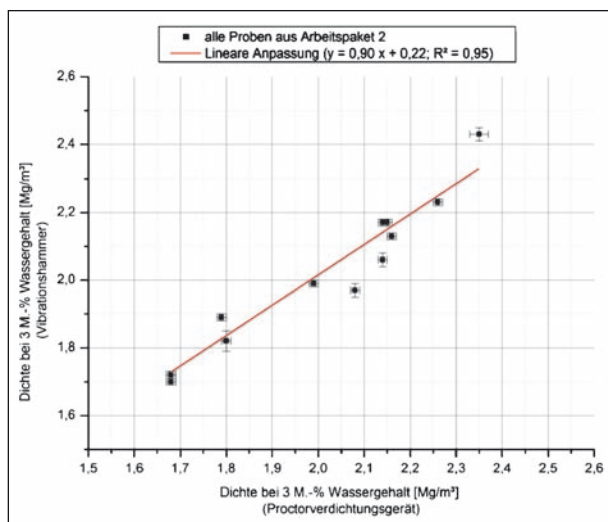


Bild 48: Erzielte Ergebnisse bei einer 3-M.-%-Wassergehaltsverdichtung mittels Proctorverdichter und Vibrationshammer und erzielter Determinationskoeffizient

Wassergehalt von 3 M.-% erzielt wurden auf dem gleichen Ergebnisniveau wie bei einer optimalen Verdichtung. Dies belegen die erzielten Determinationskoeffizienten von $R^2 = 0,98$ für das Proctorverfahren bzw. $R^2 = 0,95$ für das Vibrationshammerverfahren.

Bzgl. des Aspektes der Einführung eines alternativen Verdichtungsverfahrens für ToB-Baustoffe wurde in Bild 47 anhand der vorliegenden Resultate der Zusammenhang zwischen der Verdichtung von Baustoffen durch den Vibrationshammer bei 3 M.-% Wassergehalt und einer optimalen Verdichtung mittels Proctorverdichter dargestellt. Im nächsten Schritt erfolgte die Darstellung von

3 M.-% Wassergehalt für den Vibrationshammer und den Proctorverdichter (s. Bild 48).

Entsprechend Bild 47 und Bild 48 liefert der Vibrationshammer Trockendichteergebnisse, die sich eindeutig mit dem erzielten Proctorergebnis vergleichen lassen. Dies gilt sowohl für die Verdichtung mit dem Proctorverfahren bei Verwendung eines optimalen Wassergehalts als auch für einen Wassergehalt von 3 M.-%.

6.6 Schlussfolgerungen aus Arbeitspaket 2

Die Vergleichsversuche zwischen dem Proctor- und dem Vibrationshammerverfahren zeigen, dass das Vibrationshammerverfahren für alle untersuchten Baustoffgemische anwendbar ist. Mit dem Vibrationshammerverfahren werden vergleichbare Ergebnisse zum Proctorverfahren erzielt (s. Bild 27 bis Bild 32). Dies betrifft die erzielte Dichte sowohl bei der Feucht- als auch bei der Trockenverdichtung. Obwohl die Trockenverdichtung vergleichbare Resultate liefert wie eine optimale Verdichtung, bleibt bei diesem Verdichtungsprozess die Frage nach einem Wassergehalt für die Baustelle offen.

Aufgrund der vergleichenden Untersuchungen zwischen Proctor- und Vibrationshammerverfahren im ersten Arbeitspaket wurde als Arbeitshypothese für den zweiten Teil der Untersuchungen eine Verdichtungsprüfung im Bereich um 2 bis 3 M.-% Wassergehalt formuliert. Bei der Überprüfung der Baustoffgemische des zweiten Arbeitspaketes wurde die vorgenannte Arbeitshypothese in der Art bestätigt, dass sich als erster Schnittpunkt der Proctor- und Vibrationshammerverdichtungskurven bei Baustoffgemischen aus natürlichen Gesteinskörnungen ein Wassergehalt um 3 M.-% ergab, bei Baustoffgemischen aus industriellen bzw. RC-Baustoffen lag dieser Schnittpunkt um ca. 5 M.-% (s. Bild 33 bis Bild 44). Die weitere Auswertung wurde auf einen Wassergehalt von 3 M.-% beschränkt, da einige Baustoffgemische in dieser Studie bei Verwendung von 5 M.-% Wassergehalt schon über ihrem optimalen Wassergehalt gelegen hätten und dräniert wären. Die bei 3 M.-% Wassergehalt erzielten Trockendichten liegen in der gleichen Größenordnung wie die Trockendichten, die beim Proctor- und Vibrationshammerversuch mit einem optimalen Wassergehalt erzielt wurden (s. Bild 45 und Bild 46). Die Verdichtung von Baustoffgemischen bei einem Wassergehalt von 3 M.-% mittels Vibrationshammer

mer erscheint eindeutig verwendbar und praktikabel zu sein.

7 Fazit und Ausblick

Mit der umfassenden Laborstudie an zwei explizit zusammengesetzten und zwölf praxisgerechten Baustoffgemischen (0/32 mm) konnte gezeigt werden, dass das Vibrationshammerverfahren (DIN EN 13286-4) ein adäquates Laborverdichtungsverfahren für die Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von SoB im Vergleich zum bisher in Deutschland angewendeten Proctorverfahren (DIN EN 13286-2) ist.

Mit diesem Verfahren werden annähernd gleiche Ergebnisse wie mit dem Proctorverfahren erzielt. Die Vorteile des Vibrationshammerverfahrens liegen in der besseren Handhabung, der einfacheren und schnelleren Durchführung der Prüfung und den geringeren Investitionskosten für das Prüfgerät. Zudem ist die Vibrationsverdichtung analog zu den auf den Baustellen eingesetzten Verdichtungsverfahren.

Aufgrund der Ergebnisse des Forschungsprojektes bzw. der Problematik des Proctorversuches für ungebundene Baustoffgemische für Tragschichten ohne Bindemittel bieten sich die folgenden beiden Optionen zur Bestimmung der Trockendichte mit dem Vibrationshammerverfahren an:

- Verdichtung eines Baustoffgemisches im trockenen Zustand,
- Verdichtung eines Baustoffgemisches mit einem festgelegten Wassergehalt für alle Baustoffgemische.

Bei Anwendung der Verdichtung im trockenen Zustand im Labor müsste ein für die In-situ-Verdichtung geeigneter Wassergehalt festgelegt werden, dies ist jedoch aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse nicht möglich. Daher wird von den Forschungsnehmern die Laborverdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt als die geeignetste Lösung betrachtet. Der bei diesem Vorgehen gewählte Wassergehalt lässt sich auf die Baustelle übertragen, da in der Regel angefeuchtete Baustoffgemische angeliefert werden. Der Kurvenverlauf der Trockendichte von Baustoffgemischen für SoB im Straßenoberbau zeigt in den Verdichtungsversuchen eine geringe Empfindlichkeit bezogen auf Änderungen des Wassergehaltes. Auf dieser

Grundlage schlagen die Forschungsnehmer die Verwendung eines einheitlichen Wassergehaltes vor. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens lassen einen Wert von 3 M.-% als geeignet erscheinen.

Aufgrund der Praxisnähe des Vibrationshammerverfahrens ist zudem zu erwarten, dass Laborprüfkörper, die mit einem Vibrationshammer hergestellt wurden, eine praxisnähere Wasserdurchlässigkeit des ungebundenen Baustoffgemisches ergeben.

Vor der Umsetzung der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens in das Regelwerk des Straßenbaus müssten weitere Punkte bearbeitet werden.

Für die Anwendung in der Praxis ist es notwendig, die in der DIN EN 13286-4 beschriebene Vorgehensweise durch eine neue technische Prüfvorschrift für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) zu optimieren. In dieser Prüfvorschrift sollten auch die gerätetechnischen Spezifikationen des Vibrationshammers festgelegt werden.

Auf der Grundlage der oben genannten TP Gestein-StB sollten vor Änderungen des Regelwerkes für Schichten ohne Bindemittel Ringversuche mit dem Vibrationshammer zur Feststellung der Präzision des Verfahrens durchgeführt werden.

Die Übertragbarkeit der Laborergebnisse mit festgelegtem Wassergehalt auf die Verdichtung auf der Baustelle unter Praxisbedingungen ist noch zu prüfen. Ebenso muss die Verifizierung des vorgeschlagenen einheitlichen Wassergehaltes und dessen Einflusses auf die Wasserdurchlässigkeit Inhalt weiterer Untersuchungen sein.

8 Literatur

- [1] ASTM D4253:2000: Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table
- [2] DIN EN 933-1:2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren
- [3] DIN EN 933-4:2008-06: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl

- [4] DIN EN 1097-2:2010-12: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zerkümmerung
- [5] DIN EN 1097-6:2005-12: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
- [6] DIN EN 1744-1:2010-04: Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Chemische Analyse
- [7] DIN EN 13286-1:2003-07: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 1: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Einführung, allgemeine Anforderungen und Probenahme
- [8] DIN EN 13286-2:2010-12: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes; Proctorversuch
- [9] DIN EN 13286-3:2003-07: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 3: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationsverdichtung mit vertikalem Druck
- [10] DIN EN 13286-4:2003-07: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 4: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationshammer
- [11] DIN EN 13286-5:2003-07: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 5: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationstisch
- [12] DIN EN ISO/IEC 17025: 2005-08: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025: 2005)
- [13] Draft prEN WI 00227411: Unbound and hydraulic bound mixtures for roads – Test methods for laboratory reference density, European committee for Standardization, 1997
- [14] DRENEVICH, V. P.; EVANS, A. C.; PROCHASKA, A. B.: A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils, Purdue University, 2007
- [15] ELLIS, C. J.: Soil compaction at low moisture content. Field trials in Sudan, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berks., U.K., Seventh Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Accra, 1980
- [16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau, Köln, 2003
- [17] FORSSBLAD, L.: New method for laboratory soil compaction by vibration, Symposium on Compaction of Earthwork and Granular Bases, Highway Research Record No 177, Highway Research Board, Washington, 219-24
- [18] KRASS, K.; KELLERMANN, C.: Verfahren zum Nachweis der erreichten Verdichtung bei Tragschichten ohne Bindemittel, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 768, 1999
- [19] KREBS, H. G.; ARAND, W.: Bestimmung der Rütteldichte von brechkornhaltigen Mineralstoffgemischen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 196, 1976
- [20] LEE, P. J.; SUEDKAMP, R. J.: Characteristics of irregular shaped compactions curves of soil. Highway Research Record 1972
- [21] PARSONS, A. W.: Compaction of Soils and Granular Materials: A Review of Research Performed at the Transport Research Laboratory, London: HMSO, 1992
- [22] PAULMANN, G.; GRÄTZ, B.: Untersuchung der Verdichtung von Tragschichten ohne Bindemittel (TOB), Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 546, 1989
- [23] PETTIBONE, H. C.; HARDIN, J.: Research on vibratory maximum density test for cohesionless soils, American Society for Testing and Materials, 1965
- [24] PROCTOR, R. R.: Fundamental Principles of Soil Compaction, Engineering News-Record, Volume III, Number 9, 31.08.1933, pp. 245-248
- [25] O'CONNELL, M. J.; WAMBURA, J. H. G.; NEWILL, D.: Soil compaction at low moisture contents in Kenya, Transport and Road Research Laboratory, U.K, 9th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lagos, 1987

- [26] RAP Stra 10: Richtlinien für die Anerkennung von Prüfstellen für Baustoffe und Baustoffgemische im Straßenbau. Ausgabe 2010
- [27] SHAHIN, A. W.: Investigation of the Variability in the Results of the NZ Vibrating Hammer Compaction Test, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland, 2010.
- [28] TL SoB-StB 04: Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
- [29] TL Gestein-StB: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Entwurf 2013-02
- [30] WEBSTER, C. R.: A laboratory Investigation of Vibratory Compaction of Dry Soils, Texas A&M University, College Stadium, Master-Thesis, 1984
- [31] ZTV SoB-StB 04: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004/Fassung 2007

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

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
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöllner, Pöppel-Decker € 23,00

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 Polierreinheit 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, Jähnig, 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

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.