

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

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 166

bast

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

von

Derik Demond
Thomas Reiche

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

Sonja Haas
Sven-Olaf Schmidt

Institut für Kalk- und Mörtelforschung e.V.
Köln

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 166

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 06.0115

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

Fachbetreuung

Christine Kellermann-Kinner

Referat

Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und Erdbaustoffe im Straßenbau

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-649-8

Bergisch Gladbach, Dezember 2021

Kurzfassung – Abstract

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

In Deutschland ist zur Bestimmung der Referenzdichte ungebundener Baustoffgemische der Proctorversuch nach DIN EN 13286-2 [1] festgelegt. Die Laborpraxis hat gezeigt, dass der Proctorversuch für dränierende Baustoffgemische, die für ungebundene Schichten verwendet werden, nicht optimal geeignet ist. Im Forschungsvorhaben FE-Nr. 06.099/2012/EGB [2] wurde die Eignung des Vibrationshammerverfahrens nach DIN EN 13286-4 [3] als alternatives Laborverdichtungsverfahren untersucht und festgehalten, dass dieses Laborverdichtungsverfahren in-situ konform verdichtet und sehr vergleichbare Ergebnisse zum Proctorverfahren unter Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes erzielt. Hinzu kommt eine leichtere Handhabung, kostengünstigere Anschaffung und eine Prüfdurchführung, die deutlich weniger zeitintensiv ist. Ein weiterer Vorteil dieses Verdichtungsverfahrens ist, dass es wahrscheinlich zu einer geringeren Kornverfeinerung während der Probenverdichtung neigt [4]. Weiterhin wurde festgestellt, dass der optimale Wassergehalt des Vibrationshammerverfahrens etwa 5 bis 10 Prozent unterhalb dem des Standard-Proctorversuches lag [5] und somit etwa dem optimalen Wassergehalt eines modifizierten Proctorversuches (nahezu in-situ konform) entspricht.

Seit vielen Jahren wird die Wasserdurchlässigkeit von SoB-Gemischen im Labor mit einer in der DIN 18130-1 [6] beschriebenen Methode bestimmt, bei denen die Wasserdurchlässigkeit im gesättigten Probenzustand ermittelt wird. Während der Herstellung und der Nutzungsphase einer SoB hingegen werden immer ungesättigte Zustände vorliegen, weshalb die Ergebnisse des Laborversuches nach DIN 18130-1 [6], nicht der in-situ Wasserdurchlässigkeit entsprechen. Durch die Entwicklung des Standardrohr-Infiltrometerverfahrens nach TP Gestein-StB, Teil 8.3.1 [7], wurde versucht, die in-situ Wasserdurchlässigkeit im Labor besser abzubilden, beispielsweise, indem zum einen Probekörper mit modifizierter Proctorenergie hergestellt werden und zum anderen Wassergehalte während der Probenherstellung zum Einsatz kommen, die unterhalb des optimalen modifizierten Wassergehaltes ($0,8 \cdot \text{mod. } w_{Pr} < w < \text{mod. } w_{Pr}$) liegen.

In-situ konforme Prüfbedingungen auf Laborebene sind notwendige Voraussetzungen, um hier Messergebnisse zu generieren, die mit Felddaten vergleichbar sind. Sowohl für die Referenzdichte (Proctordichte) des Verdichtungsgrades, der einen Rückschluss auf die geleistete Verdichtungsarbeit ermöglicht, als auch für die Wasserdurchlässigkeit stehen bis dato Prüfmethoden im Labor zur Verfügung, die aufgrund ihrer Verfahrensparameter nicht den Feldbedingungen entsprechen und häufig nicht vergleichbare Ergebnisse liefern. Entsprechend ist es notwendig mit performance orientierten Prüfverfahren diesen Umstand zu optimieren. Bzgl. der Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen bietet sich womöglich das Verdichtungsverfahren nach DIN EN 13286-4 [3] als zukunftsweisendes Laborprüfverfahren an, das nach ersten Erkenntnissen besser zur Verdichtung von ungebundenen Gemischen geeignet ist. Zur Weiterentwicklung des Kenntnisstandes zum Vibrationshammer war zu untersuchen, welchen Einfluss die Verwendung eines Vibrationshammers auf die Kornzertrümmerung hat und wie eine Probenherstellung im Verdichtungstopf C (250 mm) mittels Vibrationshammer zur Messung des Infiltrationsbeiwertes $k_{i(10)}$ erfolgen kann, da dies bis dato nicht in der DIN EN 13286-4 [3] beschrieben wird. Ergänzend sollten diese beiden Aspekte auch unter Verwendung unterschiedlicher Vibrationshämmer mit unterschiedlicher Schlagenergie untersucht und bewertet werden.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde eine Literaturstudie durchgeführt, über die dargelegt werden konnte, dass die Fragestellungen des Forschungsvorhabens bzgl. der Kornzertrümmerung und Verdichtung von Baustoffen im Verdichtungstopf C unter Verwendung eines Vibrationshammers teils, wenn auch thematisch anders gelagert, behandelt wurden und gute Ansätze für das weitere Vorgehen innerhalb des vorliegenden Forschungsprojektes lieferten. Primäre Elemente dabei waren die Verdichtung in einem elf inch (279 mm) Probentopf mittels Vibrationshammer nach DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [15] und der Verfeinerungsgrad nach SCHREIBER [25]. Entsprechend wurden diese Ansätze in das For-

schungsvorhaben integriert, um die Eignung des Vibrationshammerverfahrens als zukunftsorientiertes Laborverdichtungsverfahren von ungebundenen Gemischen weiter zu belegen.

In das Forschungsvorhaben wurden vierzehn ungebundene Baustoffgemische eingebunden, an denen eine Materialcharakterisierung durchgeführt wurde. Aus dieser ging hervor, dass die Baustoffgemische anforderungsgerechte Eigenschaften entsprechend dem nationalen Regelwerk aufwiesen und aufgrund ihrer variablen technischen Bandbreite als charakteristische Stellvertreter handelsüblicher Baustoffgemische eingestuft werden konnten.

Erste Laborversuche zur Fragestellung der erzielbaren Trockendichten durch Proctorverdichter und Vibrationshammer und zur Kornzertrümmerung erfolgten an 0/32 mm Korngemischen ohne Überkorn. Über diese Versuche konnte gezeigt werden, dass der Einsatz eines Vibrationshammers mit einer Schlagenergie von 8,3 Joule zu einer leichten Trockendichtezunahme (2 bis 15 %) für rezyklierte und industrielle Baustoffgemische im Vergleich zum Proctorergebnis führte und sich eine Ergebniszunahme unter Verwendung eines Vibrationshammers mit nahezu doppelter Schlagenergie (16,8 Joule) für alle untersuchten Baustoffgemische einstellte (natürliche Baustoffgemische: 2 bis 7 %, rezyklierte und industrielle Baustoffgemische: 16 bis 31 %). Bzgl. der bestimmten optimalen Wassergehalte zeigten rezyklierte und industrielle Baustoffgemische unter Einsatz eines Vibrationshammers tendenziell eine leichte Reduktion und natürliche Gesteinskörnungen einen nahezu gleichen Ergebniswert wie beim Proctorverfahren.

Im Folgenden wurde die im FE-Nr.06.0099/2012/EGB [2] aufgestellte These, dass Baustoffgemische mit einem festgelegten Wassergehalt von 3 M.-% bzw. 5 M.-% verdichtet werden können und dennoch gleichwertige Trockendichten, wie bei einer Verdichtung mit einem optimalen Wassergehalt, erzielen, überprüft. Vorteil bei dieser Vorgehensweise wäre für viele Baustoffgemische die Vermeidung einer Wasserdränage während des Verdichtungsversuches und eine Reduktion der Einzelprobenanzahl. Zwischen der Vorgehensweise einer Verdichtung mit optimalen Wassergehalt und eines festgelegten Wassergehaltes konnten sowohl für das Proctorverfahren als auch für das Vibrationshammerverfahren Korrelationskoeffizienten minimal kleiner 1 bestimmt werden. Die Trockendichtekorrelationen zwischen den Vibrationshammerergebnissen (fester Wassergehalt) und den Proctorergebnissen (optimaler Wassergehalt) ergaben Korrelationskoeffizienten oberhalb von 0,8. Bei der Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes für das Vibrationshammerverfahren wurde eine Ergebniszunahme bei der Trockendichte von gemittelt ca. 6,5 % (Vibrationshammervariante A mit 8,3 Joule) bzw. ca. 11,5 % (Vibrationshammervariante B mit 16,8 Joule) festgestellt. Anhand von Siebanalysen, die nach der Probenherstellung mittels Vibrationshammervariante A durchgeführt wurden, konnte gezeigt werden, dass ein festgelegter Wassergehalt zu einer vermehrten Kornzertrümmerung für industrielle und RC-Baustoffgemische, im Vergleich zu einer Verdichtung mit einem optimalen Wassergehalt, führt. Für die untersuchten natürlichen Baustoffgemische stellte sich eher ein konstantes bis gegenläufiges Ergebnisbild bzgl. der Kornzertrümmerung ein. Beim Einsatz der Vibrationshammervariante B mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule wurde nahezu durchweg eine stärkere Zunahme der Kornzertrümmerung unter Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes belegt.

Abschließend wurde untersucht, wie eine Baustoffgemischverdichtung mit einem Vibrationshammer in einem 250 mm Verdichtungstopf durchgeführt werden kann, welche Trockendichten erzielt werden, welche Kornzertrümmerung dabei auftritt, welche Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$ mit derart hergestellten Probekörpern erzielt werden und ob die potenziell auftretende Kornzertrümmerung evtl. einen Einfluss auf den Infiltrationsbeiwert hat. Die Ergebnisse der dazu durchgeführten Untersuchungen wurden im Vergleich zu Proctorversuchen bewertet. Die Trockendichten der für die Infiltrationsmessungen hergestellten Probekörper zeigten, auf das jeweilige Verdichtungsverfahren und ungebundene Baustoffgemisch bezogen, sehr geringe Standardabweichungen. Entsprechend lieferten die Verdichtungsverfahren reproduzierbare Trockendichten. Für das Vorgehen mittels Proctorverfahren konnte eine Trockendichtezunahme zwischen ca. 4 und 25 % (im Mittel ca. 12 %) beim Wechsel von Verdichtungstopf B (\varnothing 150 mm) zu C (\varnothing 250 mm) bestimmt werden, wobei hierbei beachtet werden muss, dass die Probeherstellung im Verdichtungstopf C mit modifizierter Proctorenergie erfolgte. Eine ähnliche Tendenz zeigte sich beim Wechsel von Verdichtungstopf B zu Verdichtungstopf C unter Einsatz des Vibrationshammers A mit 8,3 Joule Schlagenergie. Hier lag die Ergebniszunahme bzgl. der Trockendichte zwischen ca. 2 und 14 % (im Mittel bei ca. 6 %). Konträr dazu zeigte sich das Ergebnisbild durch den Wechsel von Verdichtungstopf B zu Verdichtungstopf C unter Verwendung des Vibrationshammers B mit 16,8 Joule Schlagenergie. Hier kam es zu einer Abnahme der Trockendichteergebnisse zwischen ca. 1 und 7 % (im Mittel bei ca. 4 %).

Die mit dem Proctor- bzw. Vibrationshammer hergestellten Probekörper zeigten überwiegend einen Infiltrationsbeiwert oberhalb, zum Teil weit oberhalb, von 10^{-6} m/s. Da die Ergebnisschwankungen der Infiltrationsresultate, die mit Proctor- bzw. Vibrationshämmern hergestellt wurden, relativ gering ausfielen, konnte mit Ausnahme weniger Messwerte kein verdichtungsverfahrenabhängiger Einfluss auf das Infiltrationsergebnis aufgezeigt werden. Ergänzend wurden auch Siebanalysen nach der Probenherstellung zur Bestimmung der auftretenden Kornzertrümmerung vorgenommen, die die folgenden Interpretationen zuließen. Das modifizierte Proctorverfahren bedingt während der Probekörperherstellung im 250 mm Verdichtungstopf C den größten und der Vibrationshammer A mit einer Schlagenergie von 8,3 Joule den geringsten Einfluss auf die Kornzertrümmerung. Verfahrensunabhängig zeigten industrielle und RC-Baustoffgemische eine größere Tendenz zur Kornzertrümmerung als natürliche Baustoffgemische. Anhand der Nachsiebungen bzw. berechneten Verfeinerungsgrade konnte kein direkter mathematischer Zusammenhang zwischen An- oder Abstieg des Infiltrationsbeiwertes und An- oder Abstieg an Kornzertrümmerung nachgewiesen werden.

Das Forschungsvorhaben konnte weiterführend die Eignung des Vibrationshammerverfahrens als Alternative zum Proctorverfahren aufzeigen und ermöglichte die Abfassung eines Entwurfs einer TP Gestein-StB zur Herstellung von Prüfkörpern mit einem Vibrationshammer für Infiltrationsversuche im 250 mm Verdichtungstopf. Auch die These einer Verdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt konnte weiter ausgebaut werden. Damit verbunden sind eine leichte Zunahme an Trockendichte und Kornzertrümmerung. Infiltrationsversuche an Proben, die mit ähnlichen Wassergehalten hergestellt wurden und eine ähnliche Kornzertrümmerung aufwiesen, zeigten jedoch, dass die Kornzertrümmerung keinen Einfluss auf den Infiltrationsbeiwert der untersuchten Proben hatte.

Vibrating hammer method to determine the reference density of the degree of compaction of layers without binders

In Germany, the Proctor test according to DIN EN 13286-2 [1] is widely used to determine the reference density of unbound materials. Laboratory practice has shown that the Proctor test is not optimal for draining unbound mixtures that are used for unbound layers. In research project FE-Nr. 06.099 / 2012 / EGB [2] the vibration hammer method according to DIN EN 13286-4 [3] was presented as a compaction method, which works in-situ conform and delivers very similar results compared to the Proctor method using a specified water content. In addition, the handling is easier, less cost intensive and the test procedure is less time consuming. Another advantage of this compaction method is that it tends to have a lower grain size refinement during sample compaction [4]. Furthermore, it was found that the optimal water content by using the vibratory hammer test was about 5 to 10 percent below the standard Proctor test [5] and thus gives approximately optimal water contents of the modified Proctor test (approx in-situ compliant).

For many years, the laboratory water permeability of unbound mixtures was determined by a method described in DIN 18130-1 [6], where the water permeability of a saturated sample is determined. In contrast, during the production and use of an unbound layer, there will always be an unsaturated state. Therefore the results of the laboratory test according to DIN 18130-1 [6] cannot correspond to the in-situ water permeability. The development of the vertical tube infiltrometer method according to TP Gestein-StB, Part 8.3.1 [7], attempted to better illustrate the in-situ water permeability in the laboratory, for example by preparing a test specimen with modified Proctor energy and by using water contents during sample preparation below the modified optimum water content ($0.8 \cdot \text{mod. } w_{Pr} < w < \text{mod. } w_{Pr}$).

In-situ compliant test conditions during laboratory testing are necessary prerequisites for generating results that are comparable with field results. For the reference density (proctor density) of the degree of compaction, which allows a conclusion on the performed compaction work, as well as for the water permeability testing, laboratory test methods are in use, which do not correspond to field conditions. In addition, they do not provide comparable results. Accordingly, it is necessary to optimize this circumstance with performance-oriented test methods.

Concerning the laboratory sample compaction maybe the compaction method according to DIN EN 13286-4 [3] offers a future-oriented laboratory test procedure, which, according to preliminary findings, is better suited for the compaction of unbound mixtures. One goal of the research project is to understand the influence of the vibration hammer on grain size fragmentation and how a sample preparation in Proc-

tor mold C (250 mm) can be carried out by using the vibratory hammer, since this is not described in DIN EN 13286-4 [3]. In addition, these two aspects should also be investigated and evaluated using vibration hammers with different impact energy.

At the beginning of this research project, a literature study was carried out. This study has shown that the questions of the research project concerning the grain size fragmentation and compaction of building materials in the compression mold C by using a vibratory hammer were partly treated and good approaches for the further procedure within the present research project were provided. Primary elements were densification in an 11-inch sample mold using a vibration hammer according to DRENEVICH et al.[15] and the degree of refinement according to SCHREIBER [25]. Accordingly, these approaches were integrated into the research to further validate the suitability of the vibrating hammer as a future orientated laboratory densification method of unbound mixtures.

Fourteen unbound materials were included in the research project. On these materials a material characterization was carried out. From this it emerged that the unbound mixtures had requirements oriented properties in accordance with national regulations and could be classified as characteristic representatives of common unbound mixtures due to their variable technical range.

Initial laboratory tests to investigate the achievable dry densities by the Proctor respectively vibration hammer compaction and the induced grain size fragmentation were carried out on 0/32 mm mixtures without oversize material. Through these experiments, it was shown that the use of a vibrating hammer with a striking energy of 8.3 Joule resulted in a slight increase in dry density (2 to 15 %) for recycled and industrial unbound mixtures compared to the Proctor results. An increase of dry density was observed by using a vibratory hammer with almost twice the impact energy (16.8 Joule) for all examined unbound mixtures (natural unbound mixtures: 2 to 7 %, recycled and industrial unbound mixtures: 16 to 31 %). Concerning the determined optimum water contents, recycled and industrial unbound mixtures showed a reduction and natural aggregates nearly the same values by using a vibrating hammer in comparison to Proctor densification.

In the following, the theory stated in FE No. 06.0099 / 2012 / EGC [2] that unbound mixtures can be densified with a specified water content of 3 M.-% respectively 5 M.-% and achieve equivalent dry densities, as during a compaction with an optimal water content, was verified. An advantage of this approach would be the avoidance of water drainage during the compaction for many unbound mixtures and a reduction of test samples. Between the procedure of a compaction with optimal water content and a fixed water content, correlation coefficients could be determined slightly smaller than 1 for the Proctor method as well as for the vibration hammer method. The dry density correlations between the vibration hammer results (fixed water content) and the Proctor results (optimal water content) gave correlation coefficients above 0.8. By using the vibratory hammer method and a fixed water content an increase in dry density of about 6.5 % (vibration hammer variant A with 8.3 Joule) respectively about 11.5 % (vibration hammer variant B with 16.8 Joule) was found. On basis of sieve analyzes, which were carried out after sample compaction with the vibration hammer variant A, it was shown that a fixed water content leads to an increase in grain size fragmentation for industrial and recycled unbound mixtures, compared to a compaction with an optimal water content. For the investigated natural unbound mixtures a rather constant to opposite picture with regard to grain size fragmentation occurred. By using the vibration hammer variant B with a strike energy of 16.8 Joule, a greater increase in grain size fragmentation was demonstrated for almost all investigated materials.

Finally, it was shown how compaction of an unbound mixture can be carried out with a vibrating hammer in a 250 mm compaction mold. The investigated parameters included dry densities, grain size fragmentation occurs, infiltration coefficients $k_{i(10)}$ and whether the potentially occurring grain size fragmentation may have an influence on the infiltration coefficient. The results of the investigations were evaluated in comparison to Proctor experiments. The dry densities of the specimens prepared for the infiltration measurements showed very low standard deviations with respect to the particular compaction method and unbound mixture. Likewise, the compression processes produced reproducible dry densities. For the procedure by means of the Proctor method, an increase of dry density between approx. 4 and 25 percent (average approx. 12 percent) could be determined when changing from compaction mold B (\varnothing 150 mm) to C (\varnothing 250 mm), whereby it has to be considered that the sample preparation in the compression mold C was conducted with modified proctor energy. A similar tendency was observed when changing from compression mold B to compression mold C using the vibratory hammer A with 8.3 Joule impact energy. In per-

centage of dry density the increase was calculated between 2 and 14 percent (average around 6 percent). Conversely, the switch from compression mold B to compression mold C by using the vibrating hammer B with 16.8 Joule impact energy resulted in a decrease of dry density between about 1 and 7 percent (average about 4 percent).

The specimens produced with the Proctor or vibration hammer method showed mostly an infiltration coefficient above 10^{-6} m/s. Since the fluctuations in the results of the infiltration results produced with Proctor or vibration hammers were relatively small, no method-dependent influence on the infiltration result could be demonstrated, with exception of a few measured values. In addition, sieve analyzes were carried out after the sample preparation to determine the occurring grain size fragmentation. From these tests the following interpretations could be formulated. The modified Proctor test causes the largest and the vibrating hammer A with impact energy of 8.3 Joule the smallest effect on grain size fragmentation during test sample preparation in the 250 mm compaction mold C. Irrespective of the test method, industrial and recycled materials showed a greater tendency to grain size crushing than natural building materials. On basis of the sieving analysis and the calculated refinement coefficient, no direct mathematical correlation could be established between increase or decrease in infiltration coefficient and increase or decrease in grain size fragmentation.

The research project was able to demonstrate the suitability of the vibration hammer method as an alternative to the Proctor method and enabled the draft version of a TP Gestein-StB for test specimen fabrication with a vibratory hammer for infiltration experiments in a 250 mm densification mold.

The thesis of a compaction with a fixed water content could be further developed. Associated with this is a slight increase in dry density and grain size fragmentation. Infiltration experiments on samples that were prepared with similar water contents and similar grain size fragmentation, leads to the conclusion that grain size fragmentation had no influence on the infiltration coefficient of the investigated test samples.

Summary

Vibrating hammer method to determine the reference density of the degree of compaction of layers without binders

1 Motivation

On the one hand, layers without binder for road construction must be able to absorb and dissipate loads on the road construction by their bearing capacity. On the other hand, they must allow the percolation of water that penetrates the road construction. The bearing capacity and water permeability of unbound mixtures are primarily influenced by in-situ densification and both technical properties influence each other.

On the construction site, the proof of the compaction performance is dependent on the degree of compaction D_{Pr} , which results from the ratio of Proctor and in situ density. Alternatively, the reference density (Proctor density) of the degree of compaction could be determined as via the vibrating hammer method, as this laboratory densification method has proven advantages compared to the Proctor method, particularly for the compaction of unbound mixtures (e.g. in-situ-compliant process parameters, implementation, time aspects, etc.).

An easy to use and well reproducible laboratory test method for compaction of unbound mixtures is useful for customers and contractors. Disputes regarding the evidence of performance can be avoided when the conditions during the laboratory test are similar to the conditions of in-situ compaction of unbound layers, leading to improved technical results

2 Research objectives

One of the main objectives of the research project was to review and, if possible, to verify the promising results of the preliminary project (FE-No.06.0099 / 2012 / EGB) [1] and the solution formulated for draining mixtures. In addition, the knowledge about the vibrating hammer e.g. with respect to varying compaction energy should be expanded and the influence of the alternative compaction method on parameters such as grain size fragmentation and water permeability should be examined.

As the vibrating hammer may be an advantageous alternative for the compaction of unbound mixtures compared to the Proctor method, the research project should examine the mentioned characteristics and gather further experience and knowledge. In summary, the research project pursued the following goals:

- Verification of a specified water content of 3 M.-% or 5 M.-% to prevent water drainage during the experimental procedure on fourteen different unbound mixtures
- Determination of the grain size fragmentation and its influence on dry density by the Proctor and vibrating hammer method
- Investigations on the influence of different vibrating hammers on dry density and grain size fragmentation
- Testing of a 250 mm pot during vibratory hammer compaction, followed by process description
- Comparative studies on the influence of the compaction methods on water permeability (infiltration coefficient $k_{i(10)}$) using a vertical tube infiltrometer according to TP Steins-StB 8.3.1 [2]

Finally, the research project should prove the suitability of the vibrating hammer method as a performance-oriented laboratory method for the compaction of unbound mixtures.

Therefore, it would be necessary to modify the current DIN EN 13286-4 [3] for unbound mixtures with a maximum grain size larger than 32 mm or for compaction in a densification pot with a diameter of 250 mm. This approach should be preliminary treated by formulating a draft version of a TP Gestein-StB for national application.

3 Testing program

The research project was divided into six work packages (AP), starting with a literature review.

In the following, fourteen unbound mixtures were organized and a characterization study was conducted. With this study the requirement for a large range of material and the technical specifications in accordance with TL Gestein-StB [3] and TL SoB-StB [4] should be confirmed.

Within the third work package, compaction experiments were carried out on 0/32 mm mixtures without oversized material using a 150 mm diameter compaction pot (pot B). This was done using the Proctor compactor, as well as using a vibrating hammer with 6.3 Joule impact energy and a vibrating hammer with an impact energy of 16.8 joules. In addition, the grain size fragmentation caused by the compaction methods was calculated by conducting grain size analyses after sample preparation and using the degree of refinement after Schreiber [5].

Based on the research project FE-Nr.06.0099/2012/EGB [1], the fourth work package should verify the thesis that the compaction of unbound mixtures with a water content of approx. 3 M.-% respectively 5 M.-% leads to comparable dry densities corresponding to a compaction with an optimal water content.

In work packages 3 and 4 only grain sizes up to 32 mm were used and oversized particles were not considered, due to the size of the compaction pot (\varnothing 150 mm). One aim of the research project was the conduction of infiltration measurements. For this infiltration measurements clarification should be given how samples in a 250 mm sample pot can be compacted with a vibratory hammer. In this context, the influence of the compaction methods, respectively the occurring grain size fragmentation during sample preparation on the water permeability should be answered. Accordingly, compaction trials in the large compaction pot with a diameter of 250 mm (pot C) and infiltration measurements as well as grain size distributions after sample preparation were processed.

On basis of the current literature study, the extensive laboratory experiments and their results, as well as the experiences that both testing institutes have acquired through the past [1] and current research project, the final work package should lead to the formulation of a draft version of a TP Gestein-StB. It should be explained which additional technical conditions are appropriate for a vibrating hammer and how a unbound mixture compaction with a vibratory hammer in a 250 mm compression pot (pot C) is practicable, since this information is missing in DIN EN 13286-4 [3].

4 Presentation of the used compaction equipment

The respective compaction tests were conducted by using the Proctor compactor, as well as the vibratory hammer from the predecessor project [1] i.e. a Bosch GSH 5 CE. Additional examinations included compaction experiments with another impact drill (or vibrating hammer) with the identification mark: Bosch GSH 11 E, with an impact energy of 16.8 joules which spends approximately twice the impact energy as the vibrating hammer used in the predecessor project [1]. Images of the three compactors are shown in image 1 to image 3.



Image 1: Proctor compactor



Image 2: Vibrating hammer A



Image 3: Vibrating hammer B

5 Test results

The literature study showed that the questions of the research project concerning the grain size fragmentation and compaction of building materials in the compression pot C by using a vibratory hammer were partly treated and good approaches for the further procedure within the present research project were provided. Primary elements were densification in an 11-inch sample pot using a vibratory hammer according to DRENEVICH et al. [6] and the degree of refinement according to SCHREIBER [5]. Accordingly, these approaches were integrated into the research project.

Fourteen unbound materials were included in the research project. The materials were characterized and showed properties that are aligned with national regulations. Based on the results, the unbound mixtures represent common unbound mixtures within their technical range.

Initial laboratory tests to investigate the achievable dry densities by the Proctor respectively vibration hammer compaction and the induced grain size fragmentation were carried out on 0/32 mm mixtures without oversize material. Through these experiments, it was shown that the use of a vibrating hammer with a striking energy of 8.3 Joule resulted in a slight increase in dry density (2 to 15 %) for recycled and industrial unbound mixtures compared to the Proctor results. An increase of dry density was observed by using a vibratory hammer with almost twice the impact energy (16.8 Joule) for all examined unbound mixtures (natural unbound mixtures: 2 to 7 %, recycled and industrial unbound mixtures: 16 to 31 %). Concerning the determined optimum water contents, recycled and industrial unbound mixtures showed a reduction and natural aggregates nearly the same result value by using a vibratory hammer in comparison to Proctor densification.

In the following, the theory stated in FE No. 06.0099/2012/EGB [1] that unbound mixtures can be densified with a specified water content of 3 M.-% respectively 5 M.-% and achieve equivalent dry densities, as during a compaction with an optimal water content, was verified. An advantage of this approach would be the avoidance of water drainage during the compaction for many unbound mixtures and a reduction of test samples. Between the procedure of a compaction with optimal water content and a fixed water content, correlation coefficients showed values slightly below 1 for the Proctor method as well as for the vibration hammer method. The dry density correlations between the vibration hammer results (fixed water content) and the Proctor results (optimal water content) gave correlation coefficients above 0.8. By using the vibratory hammer method and a fixed water content an increase in dry density of about 6.5 % (vibration hammer variant A with 8.3 Joule) respectively about 11.5% (vibration hammer variant B with 16.8 Joule) was found. On basis of sieve analyzes, which were carried out after sample compaction with the vibration hammer variant A, it was shown that a fixed water content leads to an increased grain size fragmentation for industrial and recycled unbound mixtures, compared to a compaction with an optimal water content. For the investigated natural unbound mixtures a rather constant to opposite result with regard to grain size fragmentation occurred. Using the vibration hammer variant B with impact energy of 16.8 Joule led to a greater increase in grain size fragmentation for almost all investigated materials.

Finally, it was shown how compaction of an unbound mixture can be carried out with a vibratory hammer in a 250 mm compaction pot. The investigated parameters included dry densities grain size fragmentation occurs, infiltration coefficients $k_{i(10)}$ whether the potentially occurring grain size fragmentation may have an influence on the infiltration coefficient. The results of the investigations were evaluated in comparison to Proctor experiments. The dry densities of the specimens prepared for the infiltration measurements showed very low standard deviations with respect to the particular compaction method an unbound mixture. Likewise, the compression processes produced reproducible dry densities. For the procedure by means of the Proctor method, an increase of dry density between approx. 4 and 25 percent (average approx. 12 percent) could be determined when changing from compaction pot B (\varnothing 150 mm) to C (\varnothing 250 mm), whereby it has to be considered that the sample preparation in the compression pot C was conducted with modified proctor energy. A similar tendency was observed when changing from compression pot B to compression pot C using the vibratory hammer A with 8.3 Joule impact energy. In percentage of dry density the increase was calculated between 2 and 14 percent (average around 6 percent). Conversely, the switch from compression pot B to compression pot C by using the vibrating hammer B with 16.8 Joule impact energy resulted in a decrease of dry density between about 1 and 7 percent (average about 4 percent).

The specimens produced with the Proctor test or vibration hammer test showed mostly an infiltration coefficient above 10^{-6} m/s. Since the fluctuations in the results of the infiltration results produced with Proctor or vibration hammers were relatively small, no method-dependent influence on the infiltration result could be demonstrated, with exception of a few measured values. In addition, sieve analyzes were carried out after the sample preparation to determine the occurring grain size fragmentation. From these tests the following interpretations could be formulated. The modified Proctor test causes the largest and the vibratory hammer A with impact energy of 8.3 Joule the largest effect on grain size crushing during test sample preparation in the 250 mm compaction pot C. Irrespective of the test method, industrial and recycled materials showed a greater tendency to grain size crushing than natural building materials. On basis of the sieving analysis the calculated refinement coefficient, no direct mathematical correlation could be established between increase or decrease in infiltration coefficient and increase or decrease in grain size fragmentation.

6 Summary and Outlook

The research project ultimately contributes to the promotion of the vibrating hammer method as an alternative performance-oriented laboratory compaction method for unbound mixtures.

In summary it can be concluded that the vibrating hammer method according to DIN EN 13286 4 continues to be a good alternative to the Proctor method. Further questions could be answered and a draft version of a TP Gestein-StB for sample preparation of specimens in a 250 mm compression pot, e.g. for infiltration experiments could be formulated. The aspect of compaction with a fixed water content were pursued quite well, but this is associated with an increase in dry density and grain size fragmentation. However, it was demonstrated that the grain size fragmentation has a minor influence on the infiltration coefficient of the investigated unbound mixtures.

Further investigations on the suitability of the vibrating hammer method on laboratory level should necessarily include the influence of sidewall leakage during an infiltration experiment. Likewise, experiments on the occurrence of grain size fragmentation on idealized standard grain size distributions would be conceivable. As shown, there is the problem that it is impossible to determine the current reference (Proctor dry density) of the degree of compaction for unbound mixtures and thus, the results are not compliant with in-situ results. In terms of results and processes the same applies to water permeability. For further experience and establishment regarding the vibrating hammer method, complementary investigations in comparison to field results are suggested. Here, the achieved dry density or the degree of compaction and its infiltration coefficients would have to be determined from real unbound constructions. As a result, they would have to be reproduced as much as possible in comparison to the Proctor process with the vibrating hammer method on the same unbound mixtures in order to prove the conformity of the vibrating hammer method as a laboratory test method which consistently complies with in-situ results.

- [1] BIALUCHA R., MERKEL TH., DEMOND D., RITTER H.-J., HAAS S.: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel, Schlussbericht, FE-Nr.: 06.0099/2012/EGB, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Veröffentlichung in Vorbereitung
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TP Gestein-StB, Teil 8.3.1: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer – Laborverfahren, Ausgabe 2012
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau - TL Gestein-StB, Ausgabe 2004 / Fassung 2018
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau - TL SoB-StB, Ausgabe 2004 / Fassung 2007
- [5] SCHREIBER, F. R.: Zur Frage der Kornverfeinerung eines Gesteinshaufwerks unter praxisnaher Beanspruchung. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Technischen Universität Hannover. 1977, Bd. 37.
- [6] DRENEVICH V. P., EVANS A. C., PROCHASKA A. B.: A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils, Purdue University, 2007

Inhalt

1	Motivation und Forschungsziele	15
2	Stand der Wissenschaft und Technik	16
3	Lösungsweg und Ergebnisse des Forschungsprojektes	20
3.1	AP 1: Literaturstudie.....	20
3.2	AP 2: Baustoffgemischauswahl und Charakterisierungsuntersuchungen	22
3.3	AP 3: Verdichtungsversuche (Topf B, optimaler Wassergehalt)	24
3.4	AP 4: Verdichtungsversuche (Topf B, 3 M.-% bzw. 5 M.-% Wassergehalt)	33
3.5	AP 5: Verdichtungsversuche (Topf C, mod. opt. Wassergehalt) und Infiltrationstests	41
3.6	AP 6: Entwurfssfassung einer TP Gestein-StB Vibrationshammerdichte.....	51
4	Fazit und Ausblick	54
	Literatur	56
	Bilder	58
	Tabellen	59

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

Abkürzungen

D_{Pr}	Verdichtungsgrad
EOS	Elektroofenschlacke
HMVA	Hausmüllverbrennungssasche
HOS	Hochofenstückschlacke
LDS	Konverterschlacke nach dem Linz-Donawitz-Verfahren (LD-Schlacke)
mod.	modifiziert
n. a.	nicht auswertbar
RC-Baustoff	Recycling-Baustoff
SoB	Schichten ohne Bindemittel
ToB	Tragschichten ohne Bindemittel
W_{Pr}	Optimaler Wassergehalt (Proctorversuch)
SD	Standard Deviation = Standardabweichung
Ø	Durchmesser

1 Motivation und Forschungsziele

Schichten ohne Bindemittel (SoB) für den Straßenoberbau haben zum einen die Aufgabe von außen einwirkende Belastungen auf den Straßenaufbau über ihre Tragfähigkeit aufnehmen und ableiten zu können. Zum anderen müssen sie Wasser, das in den Straßenaufbau eindringt, abtransportieren. Wobei Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit von ungebundenen Baustoffgemischen primär von der in-situ Baustoffverdichtung beeinflusst wird und beide technischen Eigenschaften sich gegenseitig beeinflussen.

In der Baupraxis erfolgt der Nachweis der erbrachten Verdichtungsleistung in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad D_{Pr} , der sich als Verhältnis aus Proctordichte und in-situ Einbaudichte ergibt. Die Referenzdichte (Proctordichte) des Verdichtungsgrades könnte zukünftig alternativ zum Proctorverfahren auch über das Vibrationshammerverfahren bestimmt werden, da dieses Laborverdichtungsverfahren nachgewiesene Vorteile im Vergleich zum Proctorverfahren bei der Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen aufweist (z. B. in-situ konforme Verfahrensparameter, Durchführung, Zeitaspekte, etc.).

Ein einfach zu verwendendes und gut reproduzierbares Laborprüfverfahren zur Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen ist sowohl für (oftmals öffentlich-rechtliche) Auftraggeber, als auch für Auftragnehmer von Nutzen. Auseinandersetzungen im Zusammenhang mit dem Leistungsnachweis werden weitgehend vermieden, wenn das Laborprüfverfahren die Verhältnisse der Praxis bzgl. der Verdichtung von Frostschutz-, Kies- und Schottertragschichten besser widerspiegelt.

Im Vorgängerprojekt FE-Nr. 06.099/2012/EGB [2] des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde dargelegt, dass das Vibrationshammerverfahren in-situ konform verdichtet, weniger zeitintensiv in der Versuchsdurchführung und leichter zu handhaben ist. Eines der Hauptziele des vorliegenden Forschungsvorhabens war es daher, die vielversprechenden Ergebnisse des Vorläuferprojektes FE-Nr.06.0099/2012/EGB [2] und den darin formulierten Lösungsansatz, einer Baustoffverdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt (zur Vermeidung einer Wasserdränage), zu überprüfen und ggf. zu verifizieren. Weiterhin sollte mit dem Forschungsvorhaben der Kenntnisstand zum Vibrationshammer z. B. bzgl. variierender Schlagenergie erweitert werden und der Einfluss des alternativen Verdichtungsverfahrens auf Kenngrößen wie Kornzertrümmerung und Wasserdurchlässigkeit untersucht werden.

Da das Vibrationshammerverfahren möglicherweise eine vorteilhafte Alternative zur Verdichtung von ungebundenen SoB-Gemischen im Vergleich zum Proctorverfahren darstellt, sollten mit dem Forschungsprojekt die oben genannten Aspekte untersucht und weitere Erfahrungen und Erkenntnisse gesammelt werden. Zusammenfassend verfolgte das Forschungsvorhaben folgende Ziele:

- Überprüfung eines festgelegten Wassergehaltes von 3 M.-% (natürliche und industrielle Baustoffgemische) bzw. 5 M.-% (RC und HMVA-Baustoffgemische) zur Unterbindung einer Wasserdränage während der Versuchsdurchführung an vierzehn verschiedenen SoB-Baustoffgemischen
- Bestimmung des Verfahrenseinflusses auf die Kornzertrümmerung und die Trockendichte durch das Proctor- und Vibrationshammerverfahren
- Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Vibrationshämmer auf die Trockendichte und Kornzertrümmerung
- Festlegung einer Vorgehensweise bei der Verwendung eines 250 mm-Topfes bei der Vibrationshammerverdichtung
- Vergleichsuntersuchungen zum Einfluss der Verdichtungsverfahren auf die Wasserdurchlässigkeit (Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$) mittels Standrohrinfiltrrometer nach TP Gesteins-StB 8.3.1 [7]

Schlussendlich sollten die Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt sowie die aus den aktuellen Forschungsprojekt gewonnenen Ergebnisse genutzt werden, um die Eignung des Vibrationshammerverfahrens als performance orientiertes Laborprüfverfahren zur Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen weiter zu belegen. Hierfür wäre eine Anpassung der DIN EN 13286-4 [3] für Baustoffgemische mit einem Größtkorn größer 32 mm bzw. bzgl. der Verdichtung in einem Probentopf mit 250 mm Durchmesser notwendig, da dieser Punkt nicht in der aktuellen Ausgabe der DIN EN 13286-4 [3] behandelt wird. Vorläufig sollte dieser Ansatz daher für die nationale Anwendung durch eine technische Prüfvorschrift in Form eines Entwurfs einer TP Gestein-StB formuliert werden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Allgemein lässt sich der Straßenaufbau in Unter- und Oberbau untergliedern, wobei diese durch das Planum getrennt werden. Wesentliche Schichten des Oberbaus sind die Asphaltsschichten und die ungebundenen Frost- wie Schottertragschichten, wobei letztere unter dem Begriff der Schichten ohne Bindemittel (SoB) zusammengefasst bzw. behandelt werden. Innerhalb des Straßenoberbaus haben die ungebundenen Schichten zwei wesentliche Aufgaben. Zum einen müssen sie von außen in den Straßenaufbau einwirkende Belastungen durch den Verkehr über ihre Tragfähigkeit aufnehmen bzw. in den Unterbau weiterleiten und zum anderen in den Straßenaufbau eindringendes Wasser über ihre Wasserdurchlässigkeit weiterleiten können.

Die Soleigenschaften Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit einer ungebundenen Straßenschicht werden maßgeblich durch die in-situ Verdichtung und dem verwendeten Verdichtungswassergehalt beeinflusst. Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit beeinflussen sich gegenseitig, sodass sich zumeist eine hohe Tragfähigkeit nur mit einer einhergehenden Abnahme der Wasserdurchlässigkeit realisieren lässt und umgekehrt.

In Deutschland ist zur Verdichtung ungebundener Baustoffgemische im Labor der Proctorversuch, der in den 1930er Jahren von PROCTOR [8] entwickelt wurde, nach DIN EN 13286-2 [1] festgelegt. PROCTOR verdeutlichte in seinen: „Fundamental Principles of Soil Compaction“ [8] den Zusammenhang von Probenwassergehalt und erzielbarer Trockendichte (s. Bild 1) von Böden unter Verwendung einer konstanten Verdichtungsenergie.

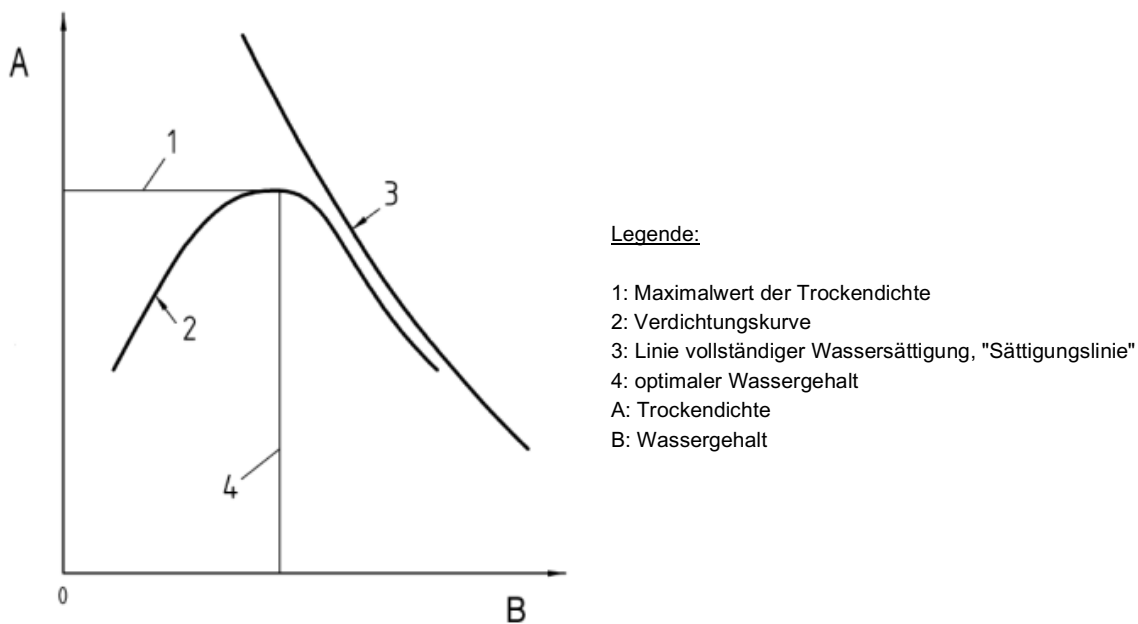


Bild 1: Beziehung zwischen Trockendichte und Wassergehalt nach DIN EN 13286-1 [9]

PROCTOR konnte zeigen, dass Proben, die mit unterschiedlichen Wassergehalten versehen wurden und in die eine konkret definierte Verdichtungsenergie über ein Fallgewicht eingetragen wird, unterschiedliche Trockendichten erzielen. Werden diese Trockendichten gegen die verwendeten Wassergehalte aufgetragen lässt sich ein material- und versuchsspezifisches Kurvenmaximum (s. Bild 1) erzielen. Dieses Kurvenmaximum symbolisiert die maximal erzielbare Trockendichte unter Verwendung eines optimalen Wassergehaltes und einer konstanten Verdichtungsenergie für einen Boden bzw. ein Baustoffgemisch.

Schlussendlich verfolgt die Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen im Feld, als auch im Labor, das Ziel den Hohlraumanteil eines Baustoffes zu reduzieren. Die Verdichtung von Baustoffgemischen bewirkt also eine Anhebung der Masse pro Einheitsvolumen und führt so durch eine Verzahnung der Gemischkomponenten zu einer Steigerung ihrer Scher- und Tragfestigkeit [10]. Allerdings zeigt die Laborpraxis bei der Versuchsdurchführung und Auswertung deutlich, dass die Eignung des ursprünglich für Böden und andere Erdbaustoffe vorgesehenen Proctorversuchs bei ungebundenen Baustoffgemischen für den Straßenoberbau nur eingeschränkt gegeben ist [11,12,13]. Grund hierfür ist, dass die Sieblinien von Frostschutz-, Kies- und Schottertragschichten gezielt hinsichtlich einer kapillarbrechenden Wirkung nach TL SoB-StB [14] zusammengesetzt sind, damit auch die Solleigenschaft der Wasserdurchlässigkeit der eingebauten ungebundenen Schicht im Straßenaufbau ermöglicht wird. In der Laborpraxis macht sich diese kapillarbrechende Zusammensetzung derart bemerkbar, dass Proben mit einem Wassergehalt nah am oder über dem optimalen Wassergehalt hinausgehend zur Entwässerung neigen (s. Bild 2). In Folge zeigen Proctorversuche an ungebundenen Gemischen häufig keinen Kurvenverlauf entsprechend Bild 1 wodurch die Bestimmung eines optimalen Wassergehaltes und einer maximalen Trockendichte für Baustoffgemische sich häufig problematisch gestaltet.



Bild 2: Entwässerung einer ungebundenen Baustoffgemischprobe während eines Proctorversuches

Dieser Umstand wird in der DIN EN 13286-2 [1] im Anhang D aufgenommen, der den Titel: „Proctorversuch für selbstentwässernde Gemische“ trägt. Jedoch ist hierfür, entgegen der allgemeinen Praxis kein Standard- sondern ein modifizierter Proctorversuch vorgesehen, und das Procedere beinhaltet prinzipiell die Bestimmung der Differenz (s. Bild 3) zwischen zugefügtem und realem Endwassergehalt einer Probe und eines sog. „Ausblutwassergehaltes“. Das materialbedingte grundsätzliche Problem wird hierbei jedoch im Sinne der Versuchsdurchführung und -auswertung nur wenig befriedigend gelöst.

Ein Ansatz zur Optimierung der Problems lässt sich in der Arbeit von DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [15] finden. Darin wird aufgezeigt, dass für dränierende Baustoffgemische häufig die maximale Trockendichte für ofentrockene Proben erzielt werden kann. Andere Quellen bestätigen dieses Bild oder lassen darauf schließen, dass die Trockendichte für ofentrockene Proben leicht über dem Ergebnis der mit einem optimalen Wassergehalt verdichteten Proben liegt. Hierzu wird beispielsweise auch auf die Arbeiten von KRASS und KELLERMANN [16], LEE und SUEDEKAMP [17] sowie WEBSTER [18] verwiesen.

ELLIS [19] und O'CONNELL et al. [20] verwendeten bei der Laborverdichtung von Baustoffen einen Wassergehalt von ca. 1 bis 3 M.-%, wobei derartige Wassergehalte oft unterhalb des Proctoroptimums lagen. Sie konnten jedoch belegen, dass derartig verdichtete Proben Trockendichten erzielen, die in etwa einer Verdichtung mit einem optimalen Wassergehalt entsprach.

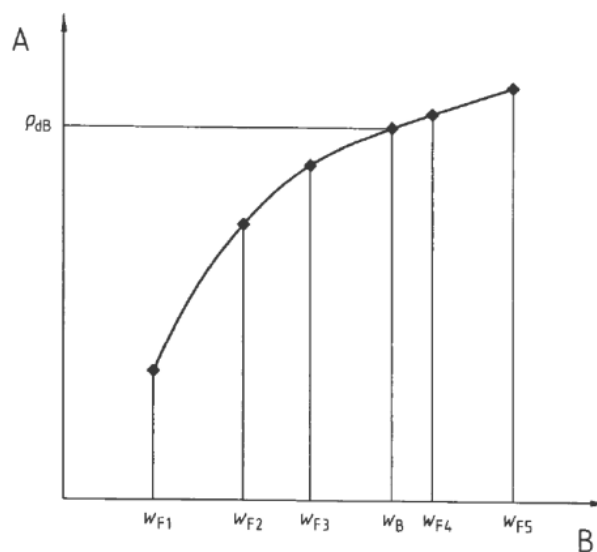


Bild 3: Auswertung von selbstentwässernden Gemischen gemäß DIN EN 13286-2, Anhang D [1]

Zu einem ähnlichen Schluss kam das Forschungsvorhaben FE-Nr. 06.099/2012/EGB [2]. Darin wurde das Vibrationshammerverfahren nach DIN EN 13286-4 [3] als Verdichtungsverfahren identifiziert, welches in-situ konform verdichtet und mit dem sehr vergleichbare Ergebnisse zum Proctorverfahren unter Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes von 3 M.-% erzielt werden können (s. Bild4). Dieser Ansatzpunkt würde für viele ungebundene Baustoffgemische die Entwässerungsproblematik lösen, da dieser Wassergehalt häufig unterhalb des optimalen Wassergehaltes von ungebundenen Baustoffgemischen liegt. Weiterhin könnte bei dieser Vorgehensweise der Prüfaufwand stark reduziert werden, da zukünftig nur noch eine Einzelprobe verdichtet werden müsste. Hinzu kommen der verfahrenstechnische Vorteil einer leichteren Handhabung und eine Prüfdurchführung, die deutlich weniger zeitintensiv ist. Weiterhin scheint das Vibrationshammerverfahren eine geringere Neigung zur Kornverfeinerung aufzuweisen [4]. Dadurch bedingt könnte möglicherweise eine Beeinflussung auf den Durchlässigkeitsbeiwert durch eine verdichtungsbedingte Erhöhung des Feinkornanteils vermieden und quasi reale materialspezifische Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte bestimmt werden.

Seit vielen Jahren wird die Wasserdurchlässigkeit von ungebundenen Baustoffgemischen im Labor mit einem in der DIN 18130-1 [6] beschriebenen Laborprüfverfahren bestimmt, bei denen die Wasserdurchlässigkeit im gesättigten Probenzustand ermittelt wird. Während der Herstellung und speziell in der Nutzungsphase einer ungebundenen Schicht werden jedoch immer ungesättigte Zustände herrschen, weshalb die Ergebnisse des Laborversuches nach DIN 18130-1 [6] nicht der in-situ Wasserdurchlässigkeit entsprechen können. Die zugrunde liegende Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Durchlässigkeit haben z. B. HEIDER [21], WELLNER und WOLF [22] oder DAS und SOBHAN (s. Bild 5) [23] festgehalten. Entsprechend dieser Arbeiten zeigte sich, dass eher trocken verdichtete Gemische höhere Wasserdurchlässigkeiten aufweisen, als Gemische, die mit einem optimalen Wassergehalt verdichtet wurden (s. Bild 5).

Durch die Entwicklung des Standrohr-Infiltrometerverfahrens nach TP Gestein-StB, Teil 8.3.1 [7], wurde versucht, die in-situ Wasserdurchlässigkeit im Labor besser abzubilden, beispielsweise, indem zum einen Probekörper nach dem modifizierten Proctorversuch hergestellt werden und zum anderen Wassergehalte während der Probenherstellung zum Einsatz kommen, die unterhalb des modifizierten optimalen Wassergehaltes ($0,8 \cdot \text{mod. } w_{Pr} < w < \text{mod. } w_{Pr}$) liegen, was einer ungesättigten Vorgehensweise während der Versuchsdurchführung zugutekommen soll.

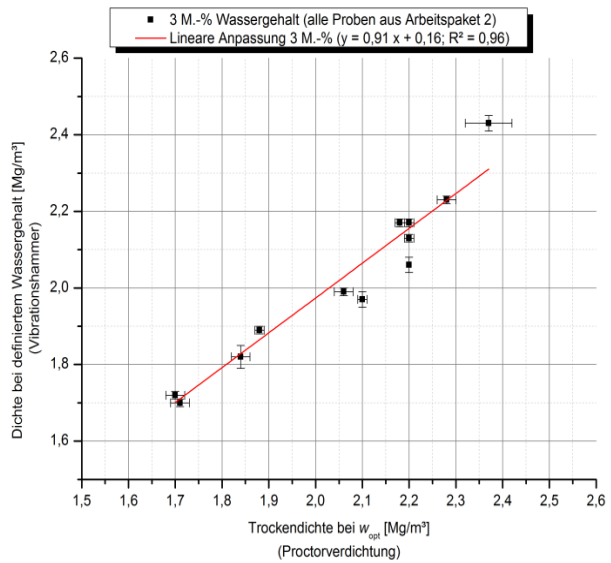


Bild 4: Erzielte Trockendichtekorrelation unter Verwendung eines optimalen Wassergehaltes (Proctorverdichter) und eines festgelegten Wassergehaltes (Vibrationshammer) [2]

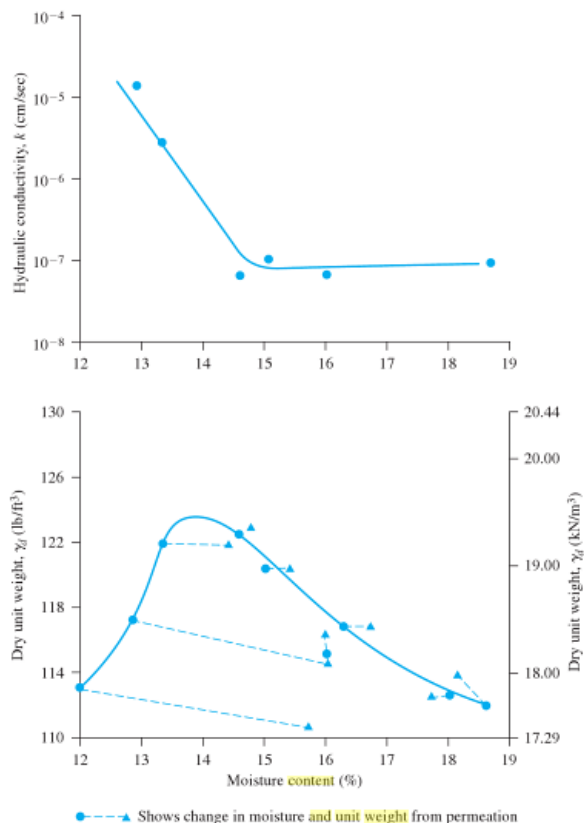


Bild 5: Zusammenhang zwischen verwendetem Wassergehalt, erzielbarer Trockendichte und Wasserdurchlässigkeit nach Das und Sobhan [23]

In-situ konforme Prüfbedingungen auf Laborebene sind notwendige Voraussetzungen, um hier Messergebnisse zu generieren, die mit Felddaten vergleichbar sind. Sowohl für die Referenzdichte (Proctordichte) des Verdichtungsgrades, der einen Rückschluss auf die geleistete Verdichtungsarbeit ermöglicht, als auch für die Wasserdurchlässigkeit von ungebundenen Baustoffgemischen stehen bis dato Prüfmethoden im Labor zur Verfügung, die aufgrund ihrer Verfahrensparameter, Auswertung und Ergebnisse im Vergleich zu Feldparametern und -ergebnissen diskutiert werden. Entsprechend ist es notwendig performance orientierte Laborprüfverfahren zu etablieren, die diesen Umstand optimieren. Bzgl. der Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen bietet sich voraussichtlich das Verdichtungsverfahren nach DIN EN 13286-4 [3] als zukunftsweisendes Laborprüfverfahren an.

Es bleibt zu belegen, ob die mit einem Vibrationshammer hergestellten Probekörper eine moderate Kornzertrümmerung und ausreichende Wasserdurchlässigkeit aufweisen, was über das vorliegende Forschungsvorhaben nachgewiesen werden sollte. Hinzu kommt das zu lösende Defizit, dass es bisher keine nationale Anweisung zur Verdichtung von Baustoffgemischen mit dem Vibrationshammer in einem Verdichtungstopf mit 250 mm Durchmesser (Verdichtungstopf C) gibt, der für Wasserdurchlässigkeitsversuche nach TP Gestein-StB 8.3.1 [7] benötigt wird. Auch dieser Aspekt sollte mit dem Forschungsvorhaben durch Abfassung eines Entwurfs einer TP Gestein-StB bearbeitet werden.

3 Lösungsweg und Ergebnisse des Forschungsprojektes

3.1 AP 1: Literaturstudie

Die Aufgabenstellungen des Forschungsvorhabens beinhaltete primär die Verwendung des Vibrationshammerverfahrens nach DIN EN 13286-4 [3] im Vergleich zum gängigen Proctorverfahren [1]. Es sollte zum einen die These einer Verdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt gemäß Vorgängerprojekt [2] verifiziert werden. Zum anderen sollte der Einfluss des Vibrationshammerverfahrens auf die erzielbare Trockendichte als auch die potenziell damit einhergehende Kornzertrümmerung gemessen und dessen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit bestimmt werden. Schlussendlich sollten die Untersuchungen dazu dienen eine Herangehensweise in Form eines Entwurfs einer TP Gestein-StB zu formulieren, die die Verdichtung mit dem Vibrationshammer unter Verwendung eines Verdichtungstopfes mit einem Durchmesser von 250 mm beschreibt.

Aufgrund der erweiterten Fragestellung zum Einfluss des Vibrationshammers auf die Kornzertrümmerung und Wasserdurchlässigkeit und da es bisher keine nationale Anweisung zur Verdichtung von Baustoffgemischen mit einem Vibrationshammer in einem 250 mm Verdichtungstopf gibt, war es notwendig vorab eine umfassende Literaturstudie durch zu führen, um möglicherweise schon vorliegende Erkenntnisse für das Forschungsprojekt berücksichtigen zu können. Entsprechend wurde die nationale und internationale Literatur bzgl. der Fragestellungen gesichtet.

Bzgl. der Verdichtung mit einem Vibrationshammer im 250 mm Proctortopf konnten hilfreiche Kenntnisse aus der Arbeit von DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [15] gezogen werden. Ihr Forschungsprojekt bzw. dessen Ergebnisse dienten auch als Grundlage zur Erstellung der ASTM D7382-08 [24]. Im Kapitel drei dieser Forschungsarbeit geht es primär um die Verdichtung von Baustoffgemischen mit einem Vibrationshammer unter Berücksichtigung von Überkorn (> 32 mm). Darin werden zwei Varianten zur Verdichtung mit einem Vibrationshammer beschrieben. Methode A im 6 Zoll mm Topf (152 mm; nahezu Verdichtungstopf B), Methode B im 11 Zoll Topf (279 mm; annähernd Verdichtungstopf C). Im folgenden Bild 6 und Bild 7 wird die verwendete Methode B und die Vorgehensweise bei der Materialverdichtung mit dem Vibrationshammer im 11 Zoll Probenstopf gezeigt.



Bild 6: Ansicht des 11 Zoll Probenstopf mit eingesetzten Stampfer des Vibrationshammers [15]

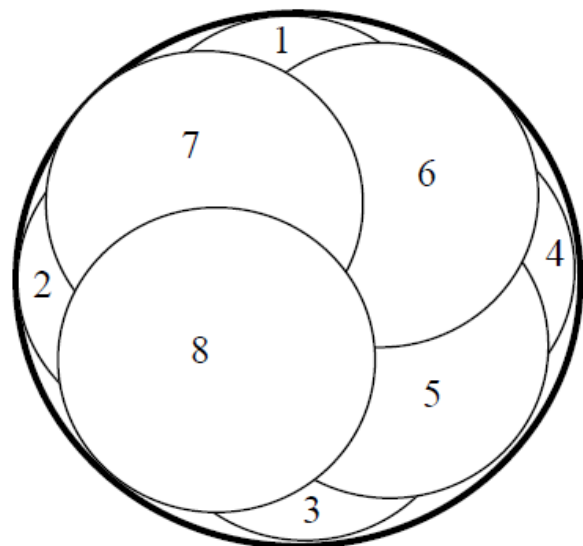


Bild 7: Laufweg des Stampfers zur Materialverdichtung innerhalb des 11 Zoll Probenstopf [15]

Innerhalb der Forschungsarbeit von DRENEVICH [15] ging die maximale Korngröße bis 37,5 mm. In Bild 8 werden einige Versuchsergebnisse aus dem Forschungsbericht gezeigt, die verdeutlichen, dass Verdichtungsversuche mit dem Vibrationshammer im 6 bzw. 11 Zoll Verdichtungstopf vergleichbare Trockendichten erzielten.

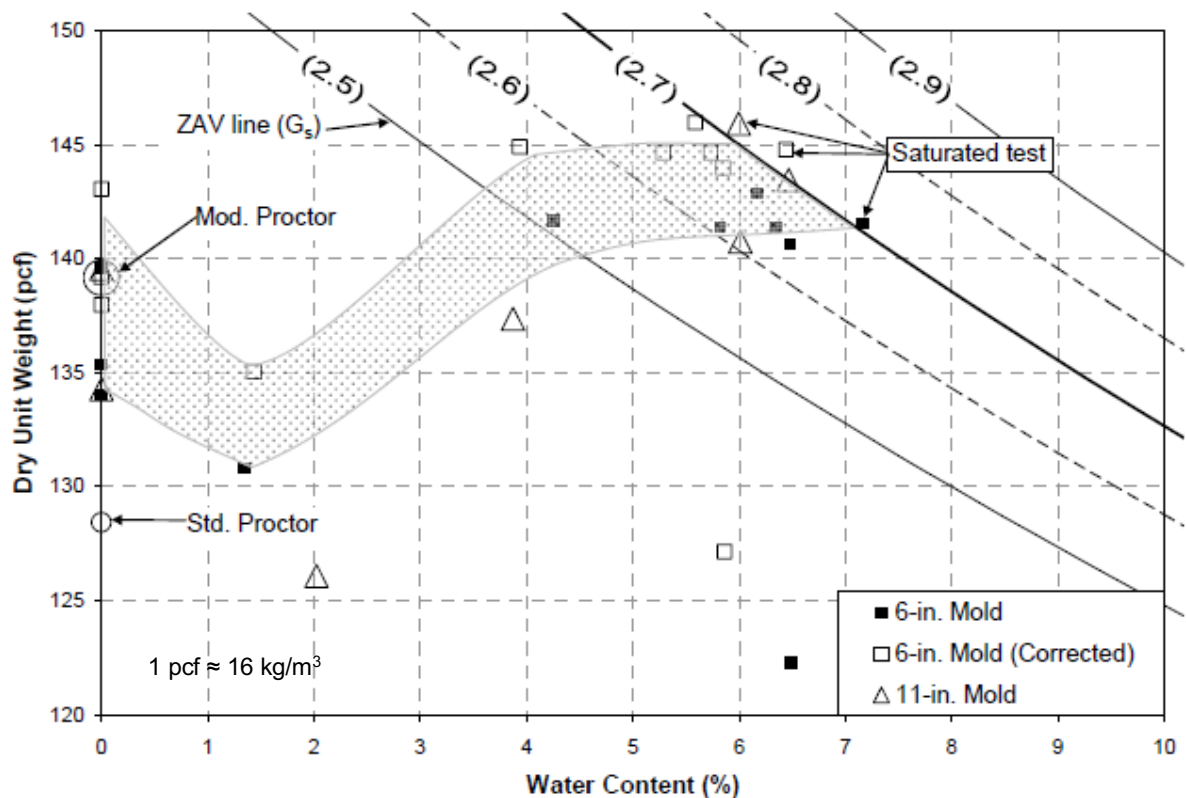


Bild 8: Ergebnisse bei der Vibrationshammerverdichtung im 6 und 11 Zoll Probentopf [15]

Auf Basis dieser Arbeit wurden die Verdichtungsversuche für das vorliegende Forschungsvorhaben mit dem Vibrationshammer im Verdichtungstopf C für das Arbeitspaket 5 gemäß der vorgestellten Vorgehensweise durchgeführt.

Daneben ist auch die Beantwortung der Frage nach der Kornzertrümmerung durch das Vibrationshammerverfahren ein Faktor, der berücksichtigt werden sollte, da eine Zunahme an Feinkorn zu einer Reduktion der Wasserdurchlässigkeit führen kann. Zur Bestimmung der potenziellen Kornzertrümmerung durch die Laborverdichtungsverfahren (Proctor und Vibrationshammer) wurden in den weiteren Arbeitspaketen Siebungen an den verdichteten Proben durchgeführt, die nach der Versuchsauswertung dem bestimmten optimalen Wassergehalt wertetechnisch am nächsten lagen bzw. diesen entsprachen. Die bestimmten Post-Sieblinien (nach der Materialverdichtung) wurden in Kombination mit der jeweiligen Pre-Sieblinie (Ausgangssieblinie) verglichen. Zur Bewertung der Kornzertrümmerung bietet sich der Verfeinerungsgrad nach SCHREIBER [25] an, der nach folgender Formel berechnet wird.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^k Di - \sum_{i=1}^k di}{k \cdot 100 - \sum_{i=1}^k di} \cdot 100[-]$$

Hierbei bedeuten:

di = Siebdurchgang vor Verdichtung

Di = Siebdurchgang nach Verdichtung

k = Anzahl der Kornfraktionen

Den Einfluss von Vibrationshämmern mit unterschiedlicher Schlagenergie untersuchte SHAHIN [26]. Unter Verwendung einer Schlagenergie von 27 Joule (Hersteller: Kango, s. Bild 9) erzielte er im Vergleich zu einem Vibrationshammer mit einer Schlagenergie von 10 Joule (Hersteller: Metabo, s. Bild 9) eine Anhebung der Trockendichte zwischen ca. 10 und 20 %, wobei die Trockendichten, die mit den verwendeten Vibrationshämmern erzielt wurden, noch oberhalb der Ergebnisse des Standard- und modifizierten Proctorversuches lagen (s. Bild 9).

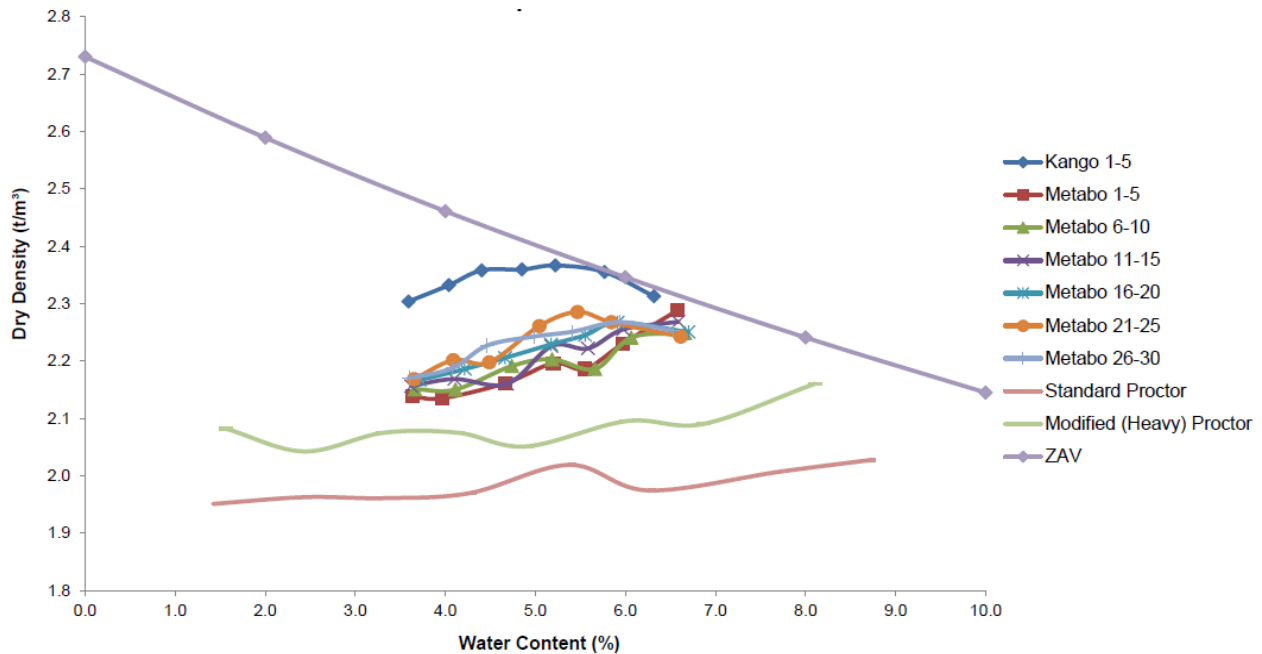


Bild 9: Erzielte Trockendichten mittels Proctorverfahren und Vibrationshämmern (Metabo und Kango) mit ungleicher Schlagenergie nach Shahin [26]

Der Stand des Wissens (s. Kapitel 2), als auch die in diesem Kapitel vorgestellten themenrelevanten Literaturquellen verdeutlichen, dass es Lösungsansätze zur den Fragestellungen des vorliegenden Forschungsvorhabens gibt. Entsprechend wurde diese in das Forschungsvorhaben integriert, um die Eignung des Vibrationshammerverfahrens als Laborverdichtungsverfahren von ungebundenen Gemischen weiter zu belegen.

3.2 AP 2: Baustoffgemischauswahl und Charakterisierungsuntersuchungen

Die in dem Forschungsprojekt zu untersuchenden Baustoffgemische sollten eine möglichst umfassende Abdeckung der in Deutschland üblichen Baustoffgemische für Schichten ohne Bindemittel im Straßenoberbau und deren technischen Eigenschaften widerspiegeln. Dies betraf im Wesentlichen die Sieblinie nach DIN EN 933-1 [27], die den Anforderungen eines Frostschutzschichtmaterials entsprechen sollte. Weitere technische Faktoren waren die Kornform nach DIN EN 933-4 [28], Rohdichte und Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 [29], Schüttdichte nach DIN EN 1097-3 [30] sowie der Widerstand gegen Zertrümmerung (Schlagzertrümmerung) nach DIN EN 1097-2 [31], die an den bezogenen Baustoffgemischen durch Laborversuche bestimmt wurden. Die allgemeine Charakterisierung der Baustoffgemische diente nicht zuletzt zum Nachweis der hinreichenden Bandbreite der ausgewählten Baustoffgemische.

Um eine möglichst repräsentative Bandbreite der handelsüblichen Gesteinsarten abzudecken, wurde Anhang A der TL Gestein–StB [32] herangezogen. Hier werden die Gesteine Gesteinsgruppen zugeordnet. Folgende Gesteine wurden für das Forschungsprojekt berücksichtigt:

- Plutonit:	Granit
- Vulkanit:	Diabas, Quarzporphyr
- Sedimentgestein:	Kalkstein, Grauwacke
- Metamorphes Gestein:	Quarzit
- Kies:	Rundkies
- Industriell hergestelltes Gestein:	Stahlwerkschlacke (LDS und EOS) Hochofenstückschlacke (HOS) Hausmüllverbrennungssasche (HMVA)*
- RC-Baustoff:	Recycling-Baustoff*

* Es wurden zwei HMVA und zwei RC-Baustoffe berücksichtigt.

In Summe wurden 14 Baustoffgemische für die durchzuführenden Arbeiten innerhalb der Arbeitspakete 2 bis 5 festgelegt. Je Baustoffgemisch wurde für das Forschungsvorhaben ca. 1 Tonne Baustoffgemisch, in Summe folglich ca. 14 Tonnen organisiert, getrocknet und für die durchzuführenden Laborversuche gelagert.

Um einen optimalen Bezug zu den Verhältnissen in der Baupraxis zu gewährleisten, wurden die Probenahmen an lieferfertigen Baustoffgemischen durchgeführt, die den Sieblinienvorgaben der TL SoB-StB [14] für Frostschutzschichten entsprechen sollten. Eine nachträgliche Korrektur der Korngrößenverteilung im Labor war nicht vorgesehen. Allerdings wurde bei der Auswahl der Lieferquellen auf eine größtmögliche Abdeckung der Variationsmöglichkeiten geachtet.

Probenahmen und Charakterisierung der Baustoffgemische erfolgten durch beide Projektpartner derart, dass jedes Prüfinstitut die Hälfte der Proben beprobte und untersuchte. Aufgrund von langjähriger Erfahrungen mit den jeweiligen Baustoffgemischen wurde entschieden, dass die industriellen und rezyklierten Baustoffgemische vom FEhS-Institut und die Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinskörnungen vom IKM bearbeitet wurden.

Die Ergebnisse der technischen Eingangscharakterisierung zeigt Tabelle 1. Eine grafische Darstellung der Sieblinien der Baustoffgemische inkl. der Grenzwertanforderungen an Baustoffgemische für Frostschutzschichten gemäß TL SoB-StB [14] zeigt Bild 10.

	Kornform [-]	Rohdichte [Mg/m ³]		SZ [M.-%]	Wasseraufnahme WA [M.-%]		Schüttdichte [Mg/m ³]
Körnung [mm]	4/8 - 8/16 - 16/32	8/12	32/45	8/12	8/12	32/45	0/D
LDS	2	3,50	3,53	17,2	2,5	1,1	1,75
EOS	0	3,77	3,63	19,9	1,8	1,6	1,60
HOS	5	2,60	2,47	29,1	3,7	3,7	1,38
HMVA-A	14	2,47	-*	32,4	5,0	-*	1,20
HMVA-B	14	2,48	-*	34,1	4,7	-*	1,16
RC-A	6	2,47	2,37	28,1	4,1	6,0	1,32
RC-B	6	2,57	2,52	27,7	6,1	5,0	1,50
Granit	16	2,68	2,63	20,5	0,5	0,4	1,75
Diabas	20	2,82	2,74	15,2	0,9	0,6	1,60
Quarzporphyr	20	2,54	2,44	21,9	1,9	1,3	1,38
Kalkstein	8	2,75	2,68	26,4	0,9	1,3	1,77
Grauwacke	30	2,71	2,86	15,9	0,5	0,3	1,68
Quarzit	18	2,63	2,57	24,3	1,1	0,9	1,70
Rundkies	4	2,69	2,67	19,9	0,7	0,4	1,93

Tabelle 1: Technische Labor Kennwerte der untersuchten Baustoffgemische

* Kornklasse 32/45 mm nicht im Gemisch vorhanden.

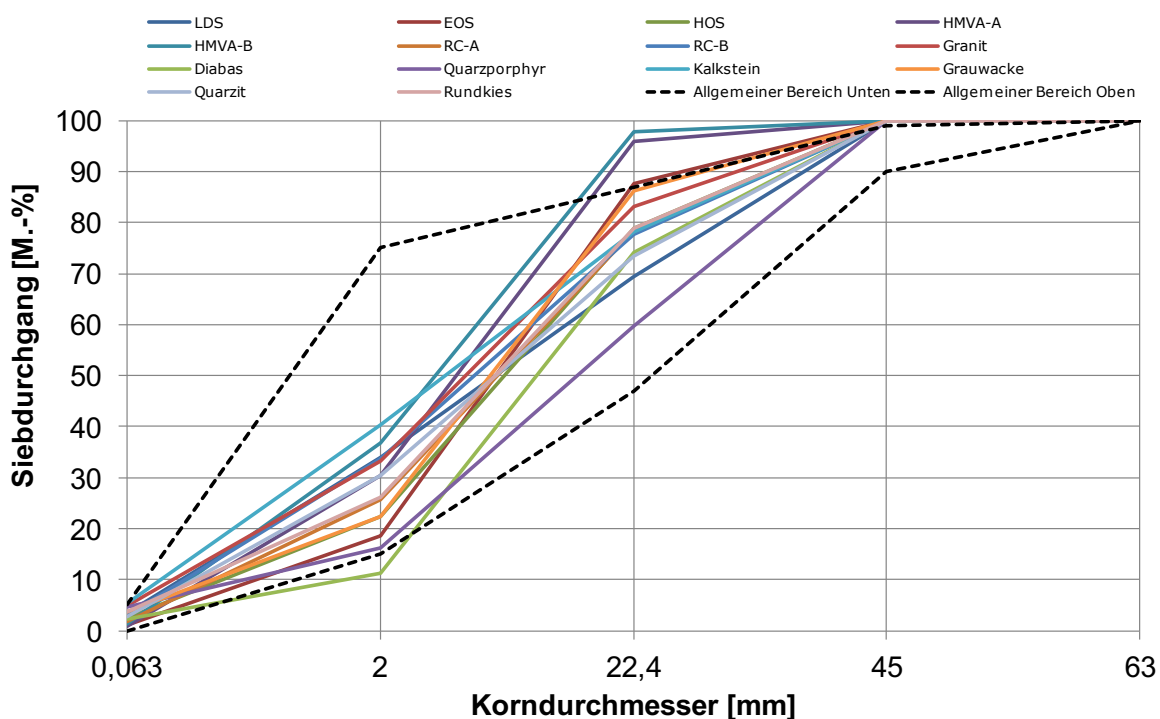


Bild 10: Darstellung der Korngrößenverteilungen der vierzehn untersuchten Baustoffgemische

Die in Tabelle 1 vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die ausgewählten Baustoffgemische zum einen die Anforderung an eine große Materialbandbreite erfüllten und zum anderen, dass diese die technischen Vorgaben entsprechend der TL Gestein-StB [32] einhielten. Auf Seiten der Korngrößenverteilungen sind für drei Baustoffgemische (HMVA-A, HMVA-B und Diabas) punktuell leichte Abweichungen von den Sieblinienvorgaben der TL SoB-StB [14] für Frostschutzschichten festzuhalten. Da die Abweichungen nur geringfügig punktuell auftraten und grundsätzlich auch diese Materialien den anderen technischen Anforderungen der TL Gestein-StB [32] entsprachen, wurden diese leichten Abweichungen als vernachlässigbar im Sinne einer großen Materialbandbreite gewertet.

3.3 AP 3: Verdichtungsversuche (Topf B, optimaler Wassergehalt)

Innerhalb des dritten Arbeitspaketes wurden Verdichtungsversuche an 0/32 mm Korngemischen ohne Überkorn unter Verwendung eines Verdichtungstopfes mit 150 mm Durchmesser (Topf B) durchgeführt. Dies erfolgte sowohl unter Verwendung des Proctorverdichters, als auch unter Einsatz des Vibrationshammers aus dem Vorgängerprojekt [2] mit der Kennzeichnung: Bosch GSH 5 CE. Zusätzliche Untersuchungen durch das FEhS-Institut umfassten Verdichtungsversuche mit einem weiteren Schlagbohrer (bzw. Vibrationshammer) mit der Kennzeichnung: Bosch GSH 11 E, der mit einer Schlagenergie von 16,8 J in etwa die doppelte Schlagenergie aufwendet, wie der Vibrationshammer, der im Vorgängerprojekt [2] verwendet wurde. Darstellungen der drei verwendeten Verdichtungsapparaturen zeigen die Bilder 11 bis 13.



Bild 11: Proctorverdichter



Bild 12: Vibrationshammer A



Bild 13: Vibrationshammer B

Sachlich inhaltlicher Aspekt der Untersuchungen war die Fragestellung nach dem Einfluss von baugleichen Schlagbohrern mit unterschiedlicher Schlagenergie auf die Trockendichte und den Wassergehalt, da hierzu keine Anforderung in der DIN EN 13286-4 [3] gefordert wird, bzw. dort nur eine Anforderung zur Leistungsaufnahme und Arbeitsfrequenz eines Schlaghammers genannt wird.

An jedem Baustoffgemisch wurden mit dem Proctorverdichter und den Vibrationshämern der optimale Wassergehalt und die maximale Trockendichte der Baustoffgemische bestimmt. Hierfür wurden je Material und Verdichtungsgerät jeweils fünf Einzelproben mit variierenden Wassergehalten in drei Schichten verdichtet. Um eine gewisse statistische Sicherheit der Messungen zu gewährleisten, wurden pro Baustoffgemisch drei Einzelversuche mit je 5 Einzelproben durchgeführt. Durch diese Vorgehensweise wurde eine Grundlage zur Bewertung des Einflusses der Verdichtungsgeräte auf das Versuchsergebnis geschaffen.

Um der Frage nach der Kornzertrümmerung durch die Verdichtungsgeräte nach gehen zu können, wurde eine Nachsiebung an denjenigen Proben durchgeführt, die dem optimalen Verdichtungswassergehalt der jeweiligen Verdichtungskurve am nächsten lag oder im besten Fall diesem sogar entsprach. Für die Nachsiebungen wurden zwei Einzelproben aus zwei Verdichtungsversuchen je Verdichtungsapparatur gesiebt. Das Ergebnis der verursachten Kornzertrümmerungen wurde über den Verfeinerungsgrad nach SCHREIBER [25] berechnet und gemittelt.

In Tabelle 2 bis Tabelle 4 werden die Ergebnisse der Verdichtungsversuche tabellarisch zusammengefasst. Anhang A1 bis A3 zeigt die erzielten Verdichtungskurven aller Versuche des dritten Arbeitspaketes.

	Proctordichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Proctordichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Proctordichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Gemittelte Proctordichte [Mg/m ³]	SD Proctordichte [Mg/m ³]	Gemittelter Wassergehalt [M.-%]	SD optim. Wassergehalt [M.-%]
LDS	2,117	6,8	2,182	8,3	2,228	6,5	2,176	0,056	7,2	1,0
EOS	2,205	1,8	2,253	2,0	2,247	1,9	2,235	0,026	1,9	0,1
HOS	1,623	6,2	1,581	6,0	1,624	6,0	1,609	0,025	6,1	0,1
HMVA-A	1,531	12,7	1,497	12,5	1,488	12,9	1,505	0,023	12,7	0,2
HMVA-B	1,381	14,4	1,446	17,5	1,420	16,8	1,416	0,033	16,2	1,6
RC-A	1,650	9,2	1,638	6,8	1,652	8,6	1,647	0,008	8,2	1,2
RC-B	1,545	9,9	1,617	9,9	1,582	8,4	1,581	0,036	9,4	0,9
Granit	2,217	3,6	n. a.	n. a.	2,124	2,5	2,171	0,066	3,1	0,8
Diabas	2,109	2,9	2,142	4,6	2,125	3,5	2,125	0,017	3,7	0,9
Quarzporphyr	1,910	4,7	1,875	4,5	1,906	5,3	1,897	0,019	4,8	0,4
Kalkstein	2,236	2,8	2,244	2,8	2,213	2,7	2,231	0,016	2,8	0,1
Grauwacke	2,064	3,6	2,114	4,5	2,087	3,6	2,088	0,025	3,9	0,5
Quarzit	2,035	2,9	2,086	4,5	2,081	4,6	2,067	0,028	4,0	1,0
Rheinkies	2,224	2,6	2,227	2,6	2,228	2,5	2,226	0,002	2,6	0,1

Tabelle 2: Erzielte Trockendichten und opt. Wassergehalte der Verdichtungsversuche (Proctorverdichter, Topf B)

	Hammerdichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Hammerdichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Hammerdichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Gemittelte Hammerdichte [Mg/m ³]	SD Hammerdichte [Mg/m ³]	Gemittelter Wassergehalt [M.-%]	SD optim. Wassergehalt [M.-%]
LDS	2,251	4,9	2,285	4,9	2,429	4,8	2,322	0,094	4,9	0,1
EOS	2,304	2,5	2,301	2,5	2,258	2,4	2,288	0,026	2,5	0,1
HOS	1,642	5,3	1,727	6,7	1,681	5,7	1,683	0,043	5,9	0,7
HMVA-A	1,739	9,5	1,770	11,3	1,675	8,5	1,728	0,048	9,8	1,4
HMVA-B	1,554	12,4	1,605	13,4	1,597	11,9	1,585	0,027	12,6	0,8
RC-A	1,739	9,9	n. a.	n. a.	1,615	6,5	1,677	0,088	8,2	2,4
RC-B	1,659	5,0	2,001	9,0	1,765	7,3	1,808	0,175	7,1	2,0
Granit	2,133	2,8	2,114	2,7	2,108	2,8	2,118	0,013	2,8	0,1
Diabas	n. a.	n. a.	2,056	4,6	2,044	4,6	2,050	0,008	4,6	0,0
Quarzporphyr	1,869	5,0	1,885	4,5	1,777	4,4	1,844	0,058	4,6	0,3
Kalkstein	2,217	2,6	2,217	2,7	2,211	2,2	2,215	0,003	2,5	0,3
Grauwacke	2,064	4,4	2,043	3,6	2,015	2,9	2,041	0,025	3,6	0,8
Quarzit	2,035	2,9	2,086	4,5	2,081	4,6	2,067	0,028	4,0	1,0
Rheinkies	2,256	2,7	2,267	2,4	2,255	2,7	2,259	0,007	2,6	0,2

Tabelle 3: Erzielte Trockendichten und opt. Wassergehalte der Verdichtungsversuche (Vibrationshammer A, Topf B)

	Hammerdichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Hammerdichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Hammerdichte [Mg/m ³]	Optimaler Wassergehalt [M.-%]	Gemittelte Hammerdichte [Mg/m ³]	SD Hammerdichte [Mg/m ³]	Gemittelter Wassergehalt [M.-%]	SD optim. Wassergehalt [M.-%]
LDS	2,572	5,7	2,710	5,7	2,718	5,8	2,667	0,082	5,7	0,1
EOS	2,652	2,6	2,595	2,7	2,528	2,4	2,592	0,062	2,6	0,2
HOS	2,120	5,3	2,160	5,2	2,025	5,2	2,102	0,069	5,2	0,1
HMVA-A	1,825	13,0	1,817	11,0	1,775	11,7	1,806	0,027	11,9	1,0
HMVA-B	1,701	11,2	1,757	13,2	1,748	13,9	1,735	0,030	12,8	1,4
RC-A	1,983	7,2	2,005	7,2	1,972	6,7	1,987	0,017	7,0	0,3
RC-B	1,882	8,3	2,063	8,7	1,910	7,5	1,952	0,097	8,2	0,6
Granit	2,283	2,5	2,296	2,2	2,288	2,4	2,289	0,007	2,4	0,2
Diabas	2,160	3,7	2,141	3,3	2,208	3,1	2,170	0,035	3,4	0,3
Quarzporphyr	1,894	5,4	2,036	4,4	2,039	4,4	1,990	0,083	4,7	0,6
Kalkstein	2,310	3,2	2,360	2,8	2,363	3,0	2,344	0,030	3,0	0,2
Grauwacke	2,146	3,1	2,276	3,1	2,224	3,1	2,215	0,065	3,1	0,0
Quarzit	2,195	3,8	2,203	3,0	2,247	3,8	2,215	0,028	3,5	0,5
Rheinkies	2,348	2,7	2,402	3,0	2,407	3,1	2,386	0,033	2,9	0,2

Tabelle 4: Erzielte Trockendichten und opt. Wassergehalte der Verdichtungsversuche (Vibrationshammer B, Topf B)

Eine Bewertung der mit den verwendeten Verdichtungsgeräten erzielten Trockendichten (s. Tabelle 2 bis Tabelle 4) erfolgte anhand von zwei grafischen Darstellung, die in Bild 14 und Bild 15 gezeigt werden. Bild 14 verdeutlicht, dass unter Verwendung des Vibrationshammers A mit einer Schlagenergie von 8,3 Joule für industrielle und RC-Baustoffgemische eine leichte Zunahme der Trockendichte im Vergleich zum Proctorergebnis erzielt wurde. Diese Ergebniszunahme erhöhte sich weiter unter Verwendung des Vibrationshammers B mit nahezu doppelter Schlagenergie (16,8 Joule) und trat für alle untersuchten Baustoffgemische auf. Prozentual betrachtet verdeutlicht Bild 15, dass unter Verwendung eines Vibrationshammers mit einer Schlagenergie von 8,3 Joule eine Ergebniszunahme zwischen knapp 2 und 15 % (rezyklierte und industrielle Baustoffgemische) erzielt wurde. Für die natürlichen Baustoffgemische wurden zum Teil leichte Zunahmen (ca. 2 %), aber auch Trockendichteabnahmen (bis zu 3,5 %) berechnet. Für den Vibrationshammer mit nahezu doppelter Schlagenergie (16,8 J) wurde durchweg eine Ergebniszunahme gemessen bzw. berechnet. Für natürliche Baustoffgemische lag diese zwischen knapp 2 und 7 % und für rezyklierte und industrielle Baustoffgemische bei 16 bis 31 % (s. Bild 15).

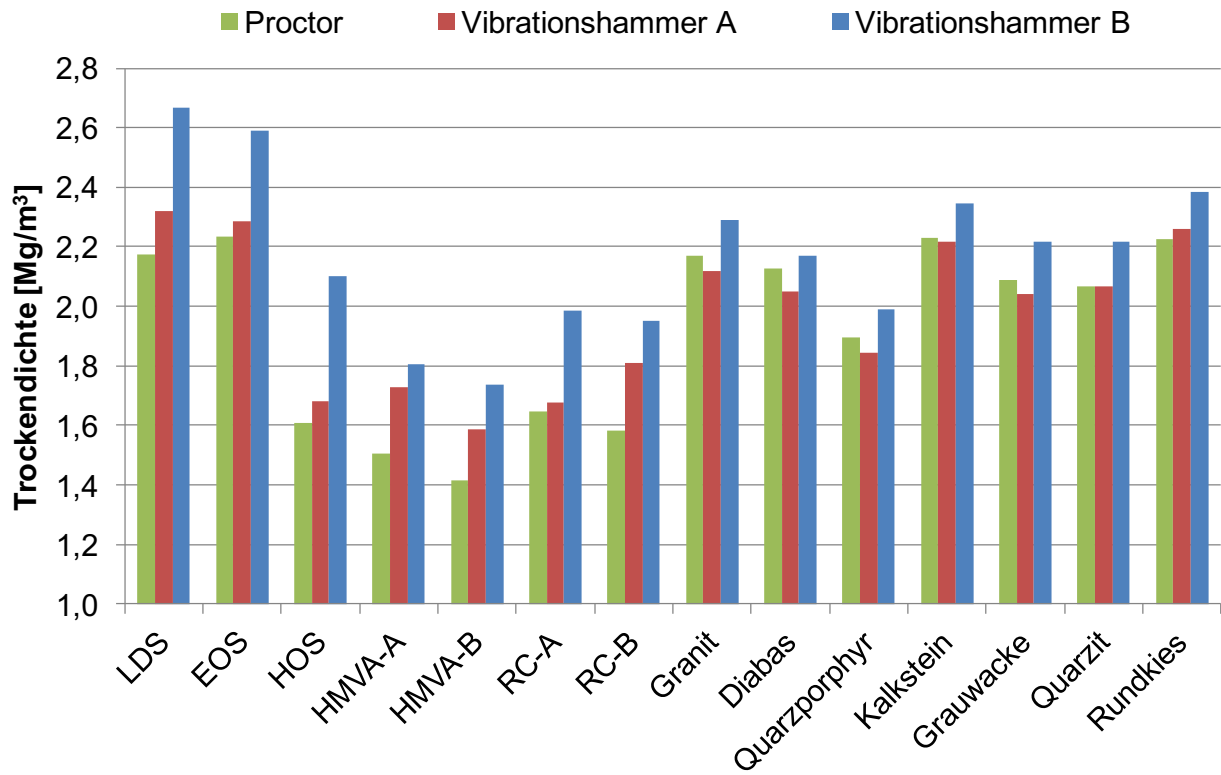


Bild 14: Erzielte Trockendichten mittels Proctorverdichter und Vibrationshammer

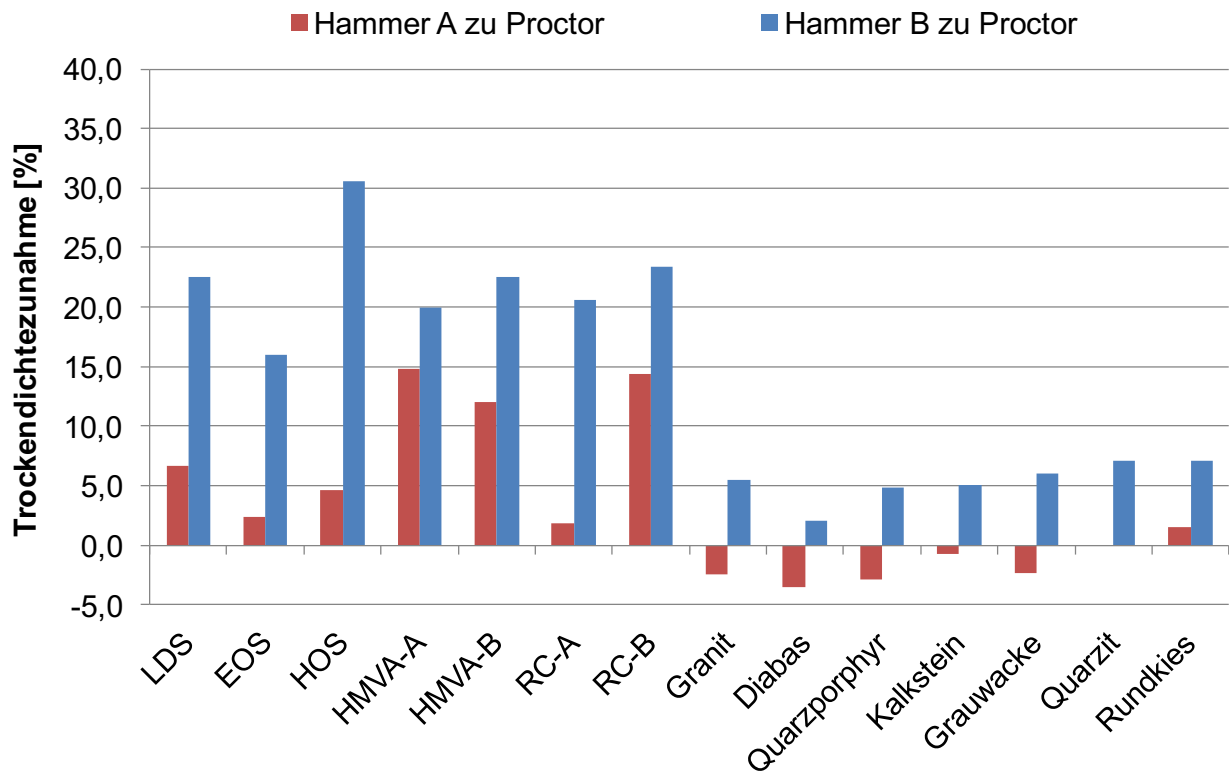


Bild 15: Prozentuale Trockendichtezunahme unter Verwendung eines Vibrationshammers im Vergleich zum Proctorergebnis

Auf Seite der ausgewerteten optimalen Wassergehalte zeigt Bild 16, dass für rezyklierte und industrielle Baustoffgemische tendenziell geringere Wassergehalte unter Verwendung eines Vibrationshammers notwendig waren, während die optimalen Wassergehalte für natürliche Gesteinskörnungen auch unter Verwendung eines Vibrationshammers mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule nahezu konstant, im Vergleich zu den optimalen Wassergehalten der Proctorversuche, blieben.

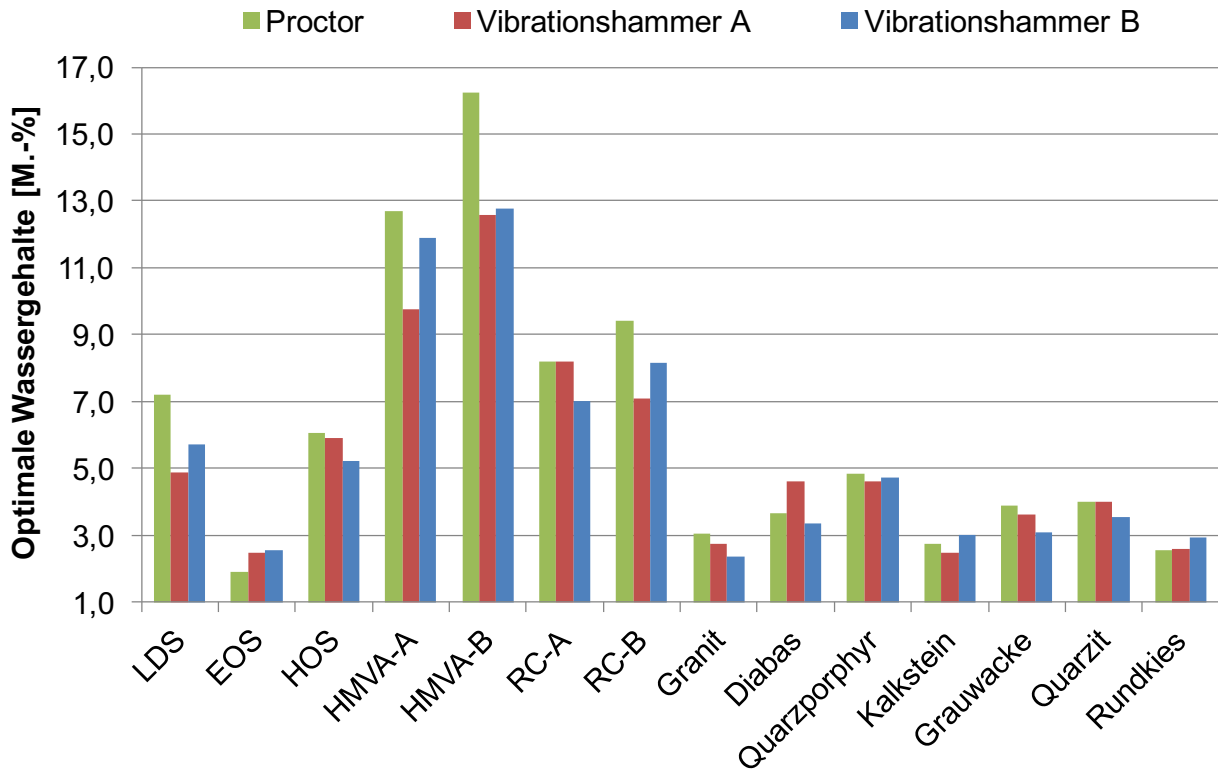


Bild 16: Optimale Wassergehalte unter Einsatz des Proctorverdichters bzw. eines Vibrationshammers

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Arbeitspaketes und des Forschungsprojektes war die Frage nach der Kornzertrümmerung, die potenziell durch die Verdichtungsgeräte hervorgerufen wird. Hierfür wurden je Verdichtungsapparat und Baustoffgemisch jeweils zwei Proben nach deren Verdichtung gesiebt und die Ausgangssieblinie aus der Eingangscharakterisierung mit der Sieblinie nach den Verdichtungsversuchen verglichen. Die Differenzen der Siebdurchgänge lassen sich als aufsummierte Zahlenwerte über den dimensionslosen Verfeinerungsgrad nach SCHREIBER [25] angeben. Die Ergebnisse dieser Arbeiten und Berechnungen zeigt Tabelle 5. Eine grafische Darstellung der gemittelten Ergebnisse zeigt Bild 17. Die jeweiligen Rohdaten der Ausgangs- und Nachsieblinien sind als Daten und grafisch dem Anhang B1 bis B3 angefügt.

	Verfeinerungsgrad Proctor, KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Proctor, KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Proctor [-]	Verfeinerungsgrad Hammer A, KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Hammer A, KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Hammer A [-]	Verfeinerungsgrad Hammer B, KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Hammer B, KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Hammer B [-]
LDS	3,97	4,48	4,23	2,41	5,42	3,91	2,58	2,62	2,60
EOS	2,63	3,15	2,89	1,78	2,65	2,21	2,07	2,06	2,07
HOS	1,04	2,80	1,92	0,38	1,69	1,03	1,45	1,82	1,63
HMVA-A	6,24	1,43	3,84	26,24	11,91	19,07	15,50	11,22	13,36
HMVA-B	3,58	2,90	3,24	8,10	11,30	9,70	9,75	7,23	8,49
RC-A	15,62	13,86	14,74	9,31	14,22	11,77	17,27	18,81	18,04
RC-B	7,46	6,18	6,82	15,98	12,46	14,22	6,52	7,78	7,15
Granit	1,75	3,43	2,59	3,68	-0,10	1,79	5,27	13,97	9,62
Diabas	11,00	11,19	11,10	8,29	8,70	8,49	28,95	29,51	29,23
Quarzporphyr	13,73	13,93	13,83	9,38	8,70	9,04	24,85	20,53	22,69
Kalkstein	0,76	1,11	0,93	2,51	4,90	3,70	1,58	1,40	1,49
Grauwacke	6,70	5,32	6,01	3,55	4,20	3,88	11,56	5,49	8,52
Quarzit	13,52	5,92	9,72	11,60	5,50	8,55	-0,82	1,94	0,56
Rheinkies	3,84	6,44	5,14	2,64	4,94	3,79	5,20	10,37	7,78

Tabelle 5: Durch die Verdichtungsapparaturen bedingte Verfeinerungsgrade nach SCHREIBER [25] (optimaler Wassergehalt)

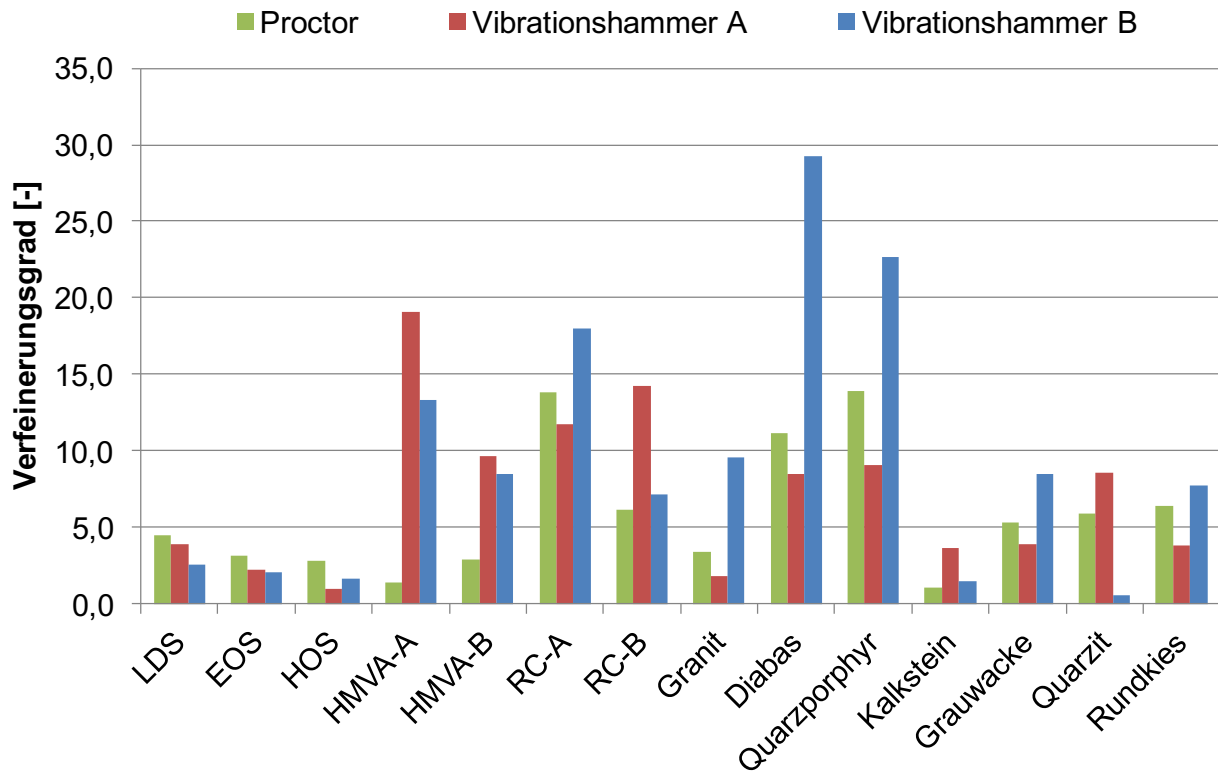


Bild 17: Darstellung der durch die Verdichtungsgeräte hervorgerufenen gemittelten Verfeinerungsgrade nach SCHREIBER [25]

Bild 17 zeigt auf den ersten Blick ein nicht eindeutiges Bild. Allgemein lassen sich jedoch folgende Punkte festhalten:

- Bei den industriellen Baustoffgemischen ist eine leichte Abnahme der Kornzertrümmerung vom Proctorverdichter zum Vibrationshammer zu erkennen.
- Für HMVA, recycelte und natürliche Baustoffgemische ist tendenziell eine Zunahme der Kornzertrümmerung vom Proctorverdichter zu einem Vibrationshammer festzustellen. Diese Beobachtung scheint unabhängig vom eingesetzten Vibrationshammer zu sein, da mal eine Zunahme, mal eine Abnahme der Verfeinerungsgrade beim jeweiligen Vibrationshammertyp zu sehen ist.
- Für acht Baustoffgemische zeigt Vibrationshammer A den geringsten Einfluss auf die Kornzertrümmerung.

Ergänzend zum Verfeinerungsgrad wurde auch der Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil ($< 0,063$ mm) in Bild 18 dargestellt. Hierfür wurden die Ausgangswerte der Feinkornanteile den Feinkornanteilen gegenübergestellt, die nach der Materialverdichtung bestimmt wurden. Aus der Darstellung lässt sich entnehmen, dass alle Baustoffgemische unabhängig vom Verdichtungsverfahren eine Feinkornzunahme zeigen. Stark ausgeprägt von dieser Feinkornzunahme sind die HMVA und RC-Baustoffgemische.

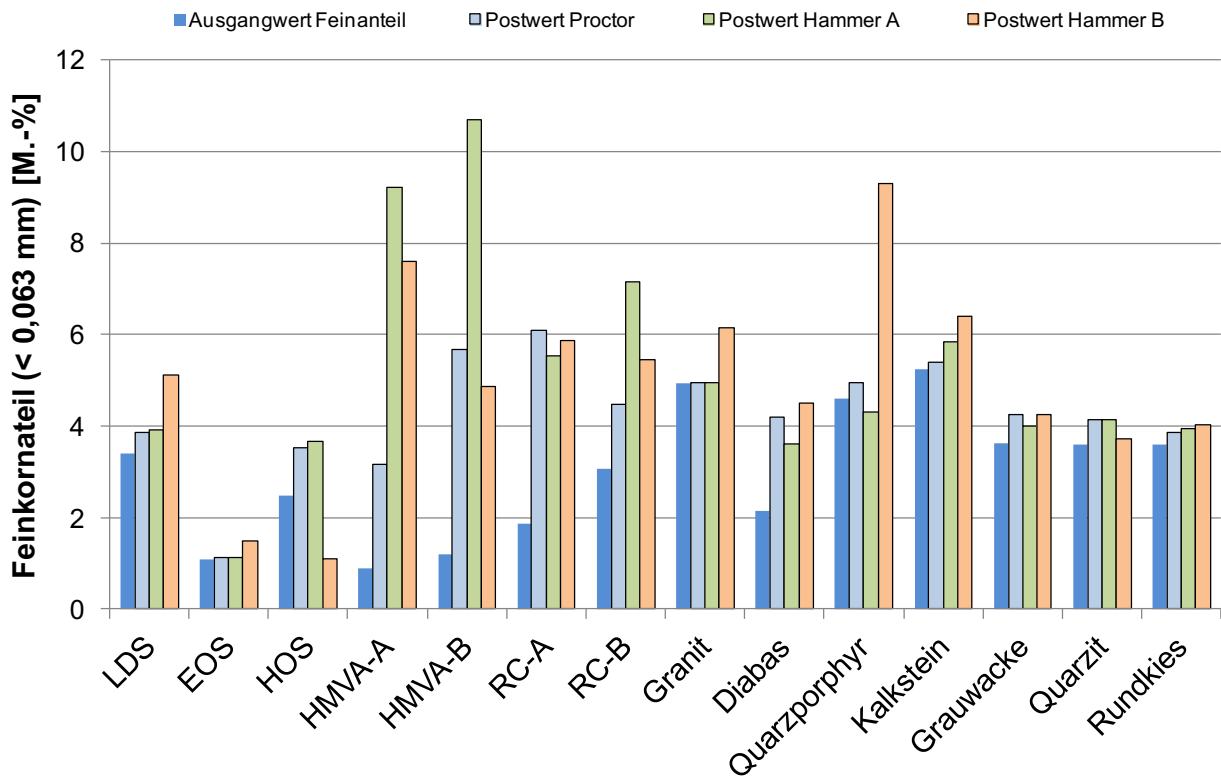


Bild 18: Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil (< 0,063 mm); Topf B, tendenziell optimaler Wassergehalt

3.4 AP 4: Verdichtungsversuche (Topf B, 3 M.-% bzw. 5 M.-% Wassergehalt)

Die Arbeiten innerhalb des vierten Arbeitspaketes hatten die primäre Aufgabe zu verifizieren, ob die über das Vorgängerprojekt [2] aufgestellte These einer Materialverdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt von ca. 3 M.-% vergleichbare Trockendichten entsprechend einer Verdichtung mit einem optimalen Wassergehalt liefert. Die Überprüfung erfolgte an allen Baustoffgemischen unter Verwendung des Proctorverdichters und der Vibrationshämmer. Hierzu wurden je Baustoffgemisch drei Einzelproben im Verdichtungstopf B (\varnothing 150 mm) mit einem festgelegten Wassergehalt von 3 M.-% verdichtet und die erzielten Trockendichten mit den Ergebnissen aus dem Arbeitspaket 3 verglichen. Für Baustoffgemische wie RC-Baustoffe und HMVA wurde im Vorgängerprojekt darauf hingewiesen, dass für diese hohlräumreichen Baustoffgemische tendenziell ein Wassergehalt um etwa 5 M.-% vergleichbare Trockendichte zu einer optimalen Verdichtung liefert. Auch dieser Aspekt wurde in diesem Arbeitspaket berücksichtigt und überprüft.

Eine tabellarische Zusammenfassung der erzielten Trockendichten unter Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes von 3 bzw. 5 M.-% zeigt die folgende Tabelle 6.

	Proctordichte 1 [Mg/m ³]	Proctordichte 2 [Mg/m ³]	Proctordichte 3 [Mg/m ³]	Mittelwert Proctordichte [Mg/m ³]	Hammerdichte (A) 1 [Mg/m ³]	Hammerdichte (A) 2 [Mg/m ³]	Hammerdichte (A) 3 [Mg/m ³]	Mittelwert Hammerdichte A [Mg/m ³]	Hammerdichte (B) 1 [Mg/m ³]	Hammerdichte (B) 2 [Mg/m ³]	Hammerdichte (B) 3 [Mg/m ³]	Mittelwert Hammerdichte B [Mg/m ³]
LDS	2,219	2,255	2,166	2,213	2,526	2,521	2,540	2,529	2,579	2,611	2,612	2,601
EOS	2,361	2,344	2,333	2,346	2,384	2,447	2,455	2,429	2,491	2,497	2,665	2,551
HOS	1,800	1,684	1,728	1,737	1,740	1,715	1,855	1,770	1,874	1,948	1,966	1,929
HMVA-A	1,542	1,536	1,526	1,535	1,646	1,604	1,647	1,632	1,719	1,686	1,703	1,703
HMVA-B	1,506	1,483	1,493	1,494	1,651	1,621	1,647	1,640	1,717	1,701	1,686	1,701
RC-A	1,685	1,698	1,680	1,688	1,747	1,752	1,779	1,759	1,863	1,852	1,858	1,858
RC-B	1,764	1,757	1,771	1,764	1,923	1,928	1,944	1,932	2,004	2,012	2,005	2,007
Granit	2,130	2,112	2,131	2,124	2,186	2,187	2,192	2,188	2,264	2,257	2,304	2,275
Diabas	2,094	2,108	2,109	2,104	2,027	2,045	2,022	2,031	2,192	2,203	2,150	2,182
Quarzporphyr	1,856	1,880	1,885	1,874	1,919	1,885	1,868	1,891	2,050	2,029	2,025	2,035
Kalkstein	2,204	2,231	2,213	2,216	2,241	2,245	2,245	2,244	2,320	2,330	2,306	2,319
Grauwacke	2,081	2,094	2,044	2,073	2,110	2,093	2,098	2,100	2,197	2,194	2,293	2,228
Quarzit	2,112	2,097	2,077	2,095	2,133	2,113	2,115	2,120	2,157	2,165	2,191	2,171
Rheinkies	2,245	2,251	2,241	2,246	2,270	2,294	2,279	2,281	2,359	2,369	2,328	2,352

Tabelle 6: Trockendichten der Verdichtungsversuche unter Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes von 3 bzw. 5 M.-%

Auf Grundlage der gemittelten Trockendichteergebnisse aus Tabelle 2 bis Tabelle 6 verdeutlicht das folgende Bild 19 bis Bild 21 die erzielten Korrelationen zwischen den beiden Verdichtungsoptionen mit einem optimalen Wassergehalt bzw. einem festgelegten Wassergehalt von 3 bzw. 5 M.-% unter Verwendung der jeweiligen Verdichtungsapparaturen.

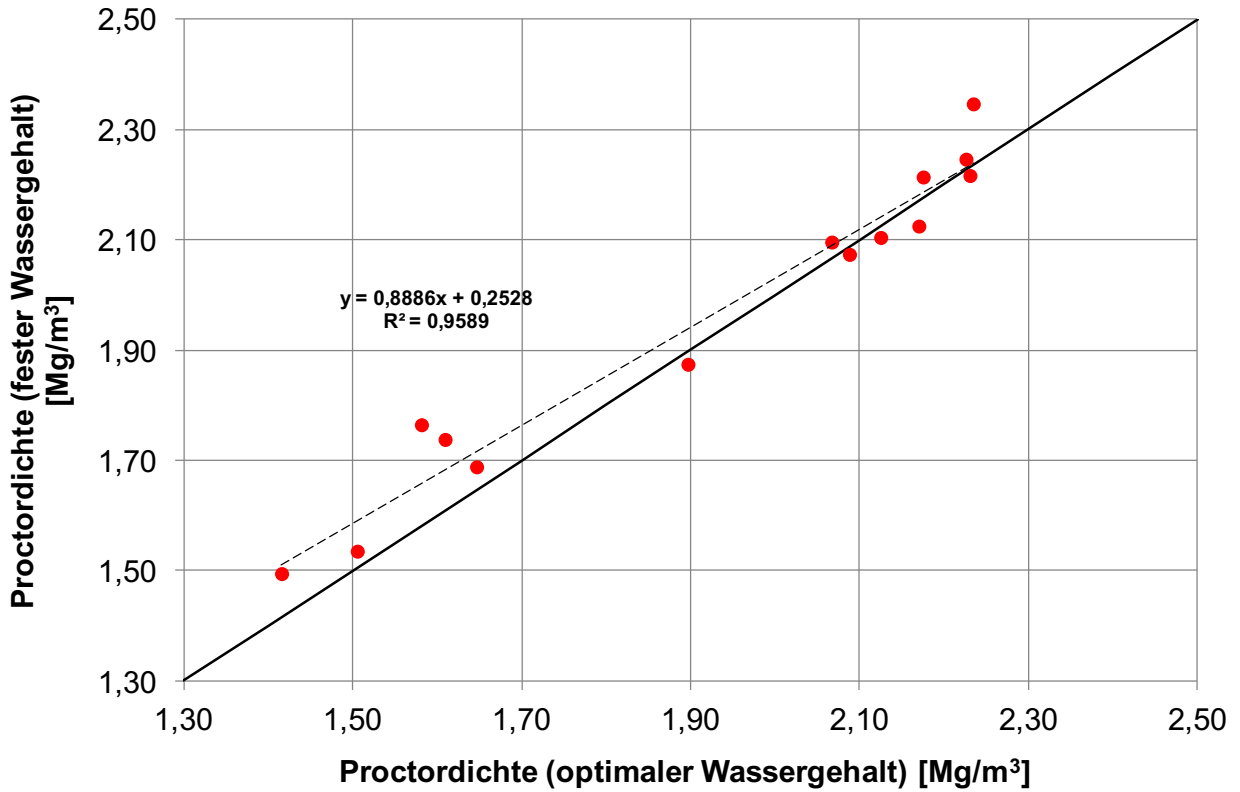


Bild 19: Korrelation Proctortrockendichten (opt. Wassergehalt vs. fester Wassergehalt)

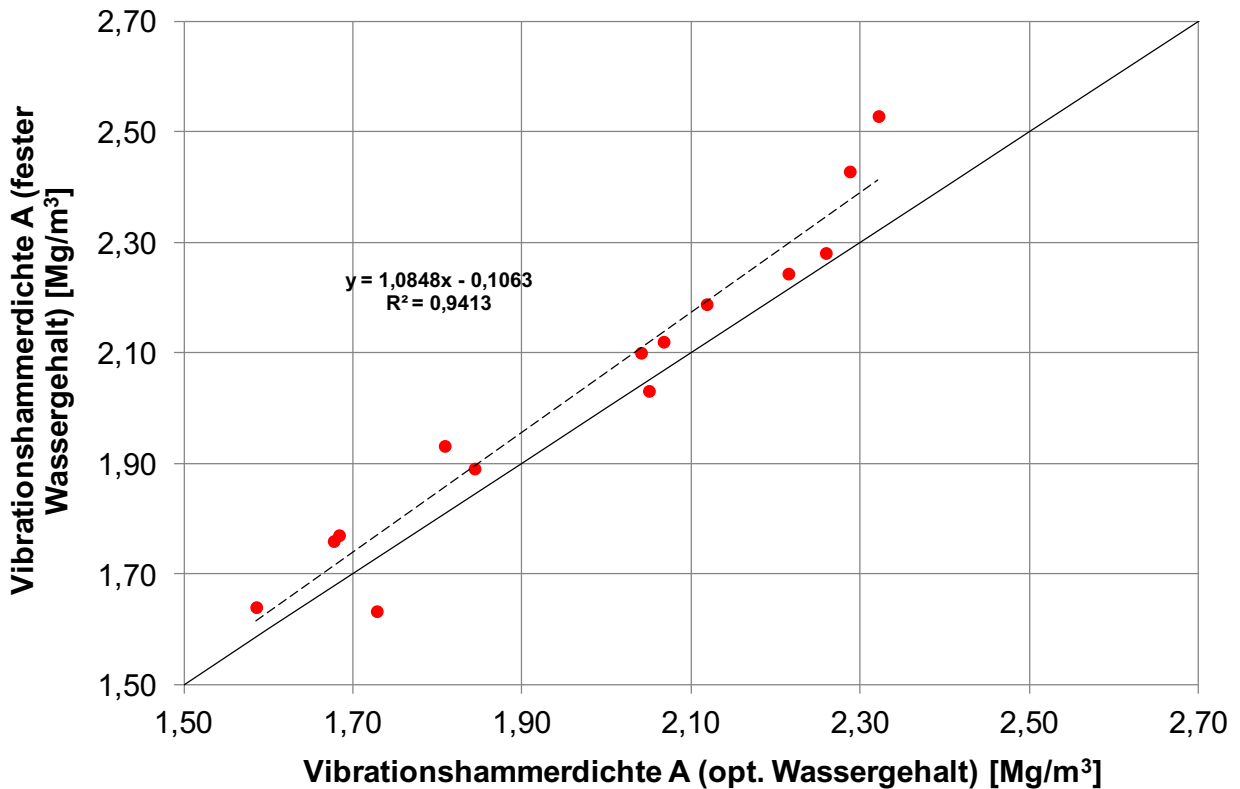


Bild 20: Korrelation Vibrationshammertrockendichten A (opt. Wassergehalt vs. fester Wassergehalt)

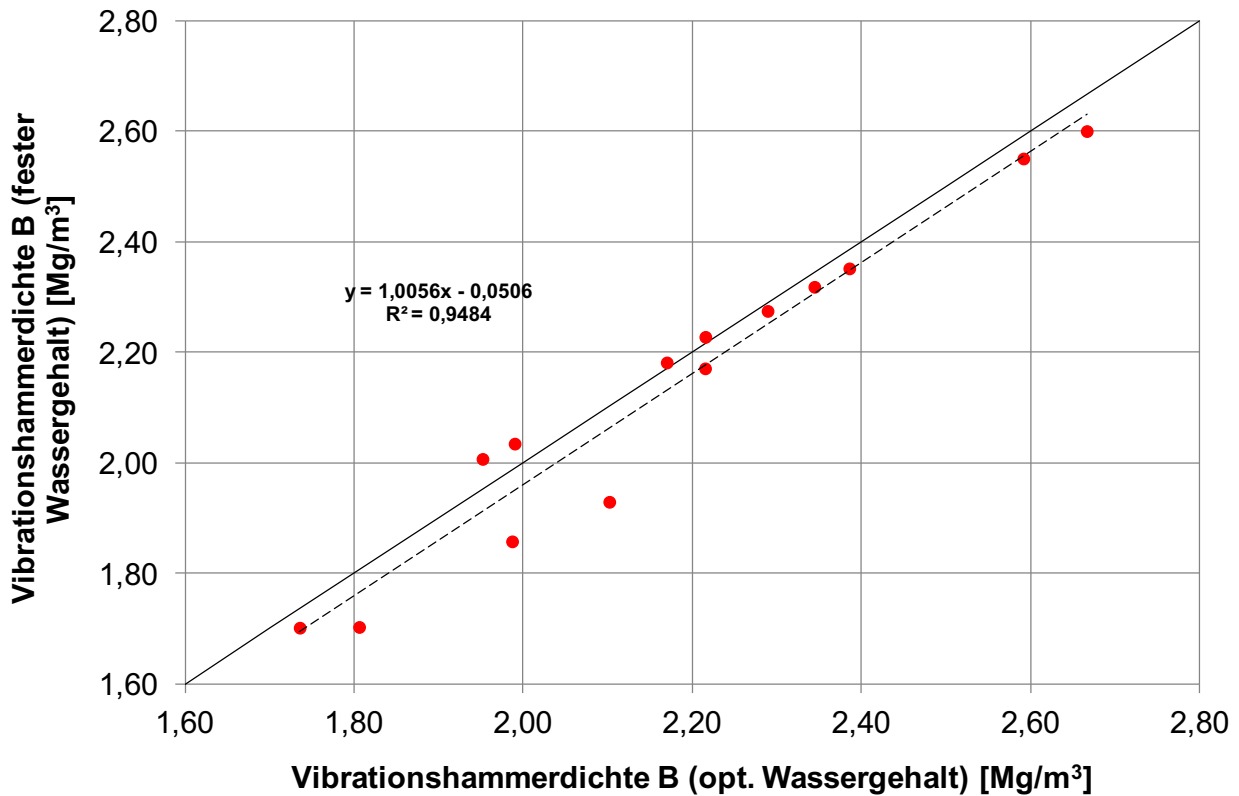


Bild 21: Korrelation Vibrationshammertrockendichten B (opt. Wassergehalt vs. fester Wassergehalt)

Bild 19, Bild 20 und Bild 21 verdeutlichen, dass eine eindeutige lineare Korrelation für das jeweilige Verdichtungsverfahren unter Verwendung eines optimalen Wassergehaltes und eines festgelegten Wassergehaltes vorhanden ist. Der Korrelationswert liegt für alle drei Verfahren bei nahezu 1.

Neben diesen Ergebnissen war auch der Ergebnisvergleich zwischen dem Proctorverdichter unter Einsatz eines optimalen Wassergehaltes und dem alternativen Vibrationshammerverfahren mit einem festgelegten Wassergehalt zur Verifizierung der im Vorgängerprojekt [2] aufgestellten These wichtig. Entsprechende Darstellungen zeigt Bild 22 und Bild 23.

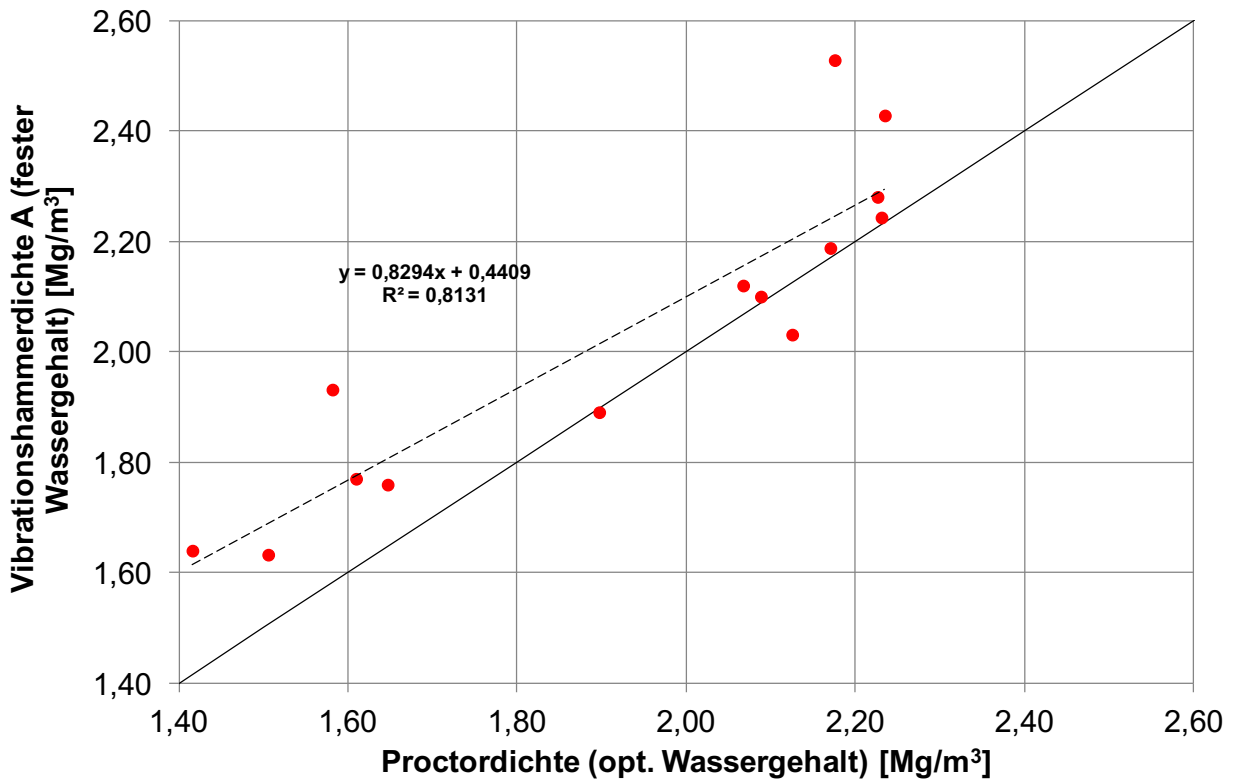


Bild 22: Korrelation Proctortrockendichten (opt. Wassergehalt) vs. Vibrationshammertrockendichten A (fester Wassergehalt)

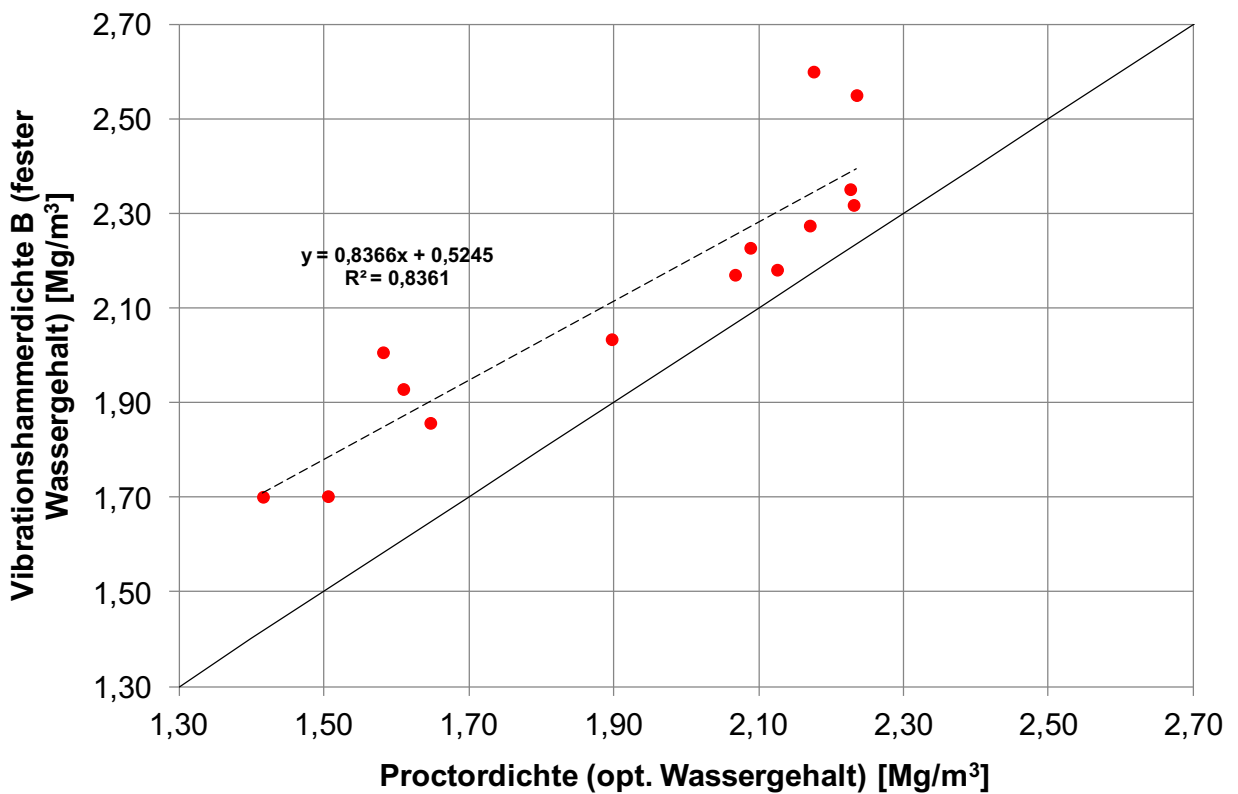


Bild 23: Korrelation Proctortrockendichten (opt. Wassergehalt) vs. Vibrationshammertrockendichten B (fester Wassergehalt)

Bild 22 und Bild 23 zeigen, dass die im Vorgängerprojekt [2] postulierte Korrelation zwischen den Trockendichteergebnissen unter Verwendung des Proctorverfahrens und einem optimalen Probenwassergehalt sowie eines Vibrationshammers und einem festgelegtem Probenwassergehalt mit einem Korrelationskoeffizient $> 0,8$ relativ gut reproduziert werden konnte. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei beiden Vibrationshämmer eine Zunahme der Trockendichten unter Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes von 3 bzw. 5 M.-% bedingt wird (s. Bild 24).

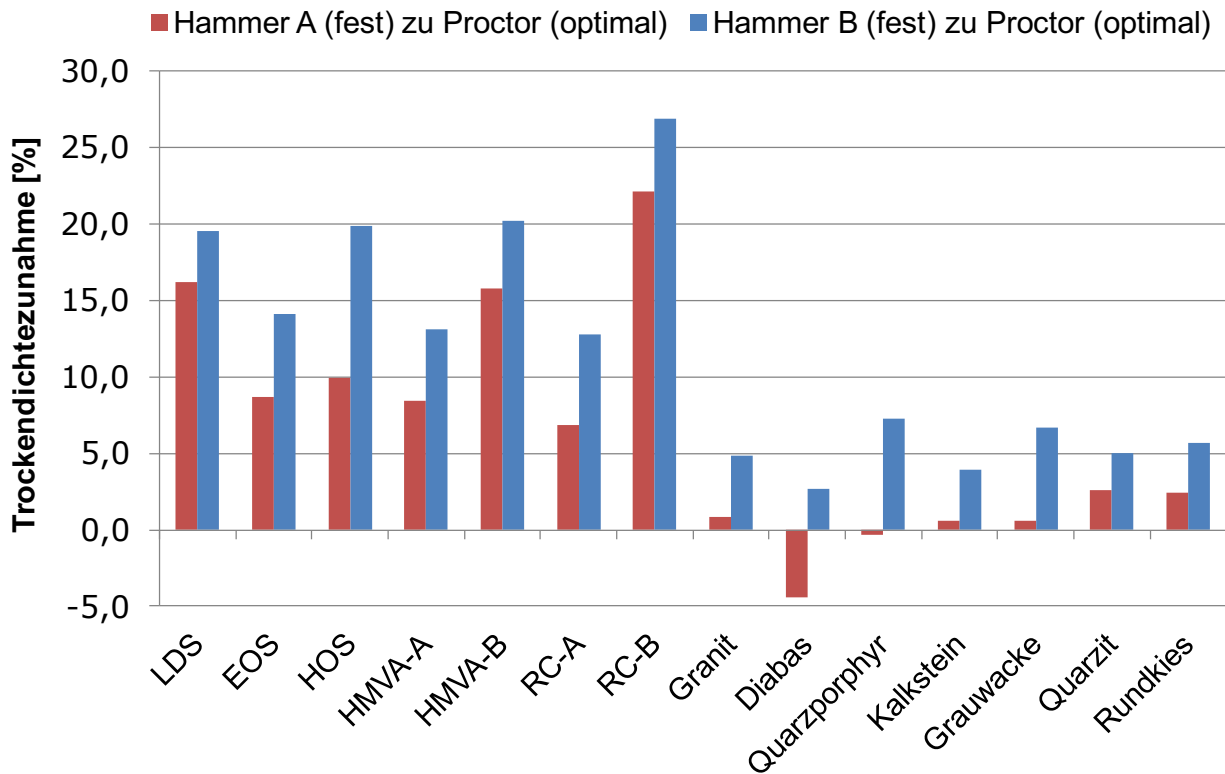


Bild 24: Prozentuale Trockendichtezunahmen zwischen Proctorverdichter (optimaler Wassergehalt) und Vibrationshämmer (fester Wassergehalt)

Von dieser Ergebniszunahme sind im höheren Maße die industriellen, HMVA und RC-Baustoffgemische betroffen. Prozentual gemittelt liegen die Ergebniszunahmen im Vergleich zu den Proctoreergebnissen für den Vibrationshammer A bei ca. 6,5 % und für den Vibrationshammer B bei ca. 11,5 %, was darauf schließen lässt, dass die Ergebniszunahme unter Verwendung des Vibrationshammer B zusätzlich höher ausfallen, als beim Vibrationshammer A.

Um Rückschlüsse auf den Einfluss eines festgelegten Wassergehaltes und der variierenden Verdichtungs- bzw. Schlagenergie auf die Kornzertrümmerung vergleichend zu Arbeitspaket 3 vornehmen zu können, wurde an zwei Versuchsproben je Baustoffgemisch eine Nachsiebung und eine Berechnung des Verfeinerungsgrades nach SCHREIBER [25] durchgeführt. Die jeweiligen Rohdaten der Ausgangs- und Nachsieblinien sind als Daten und grafisch dem Anhang C1 bis C3 angefügt. Tabelle 7 fasst die Einzelergebnisse und deren Mittelwerte zusammen. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Tabelle 5 und Tabelle 7 verdeutlicht Bild 25 den Einfluss der beiden Verdichtungsvarianten (optimaler und festgelegter Wassergehalt) sowie der Verdichtungsapparaturen auf die Kornzertrümmerung.

	Verfeinerungsgrad Proctor KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Proctor KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Proctor [-]	Verfeinerungsgrad Hammer A, KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Hammer A, KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Hammer A [-]	Verfeinerungsgrad Hammer B, KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Hammer B, KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Hammer B [-]
LDS	20,17	12,63	16,40	23,40	20,61	22,00	22,61	15,02	18,82
EOS	7,42	6,25	6,83	5,16	7,21	6,18	2,31	0,63	1,47
HOS	10,40	8,57	9,48	3,68	4,72	4,20	6,43	9,15	7,79
HMVA-A	14,18	12,02	13,10	15,83	12,77	14,30	14,49	15,73	15,11
HMVA-B	10,65	12,54	11,60	11,73	13,04	12,38	15,46	13,30	14,38
RC-A	12,73	16,13	14,43	9,79	14,13	11,96	16,23	13,73	14,98
RC-B	3,77	2,40	3,08	13,63	12,21	12,92	15,91	15,02	15,47
Granit	5,58	0,89	3,23	1,34	0,20	0,77	4,66	6,11	5,39
Diabas	12,04	9,23	10,63	7,81	8,92	8,36	29,24	27,80	28,52
Quarzporphyr	10,15	11,14	10,65	10,69	8,88	9,79	25,88	23,80	24,84
Kalkstein	-0,14	1,06	0,46	2,22	0,52	1,37	3,16	4,85	4,00
Grauwacke	6,67	8,91	7,79	6,74	4,05	5,40	8,46	8,68	8,57
Quarzit	5,52	9,05	7,29	4,30	4,30	4,30	3,12	1,65	2,38
Rheinkies	5,98	6,00	5,99	3,19	5,32	4,26	13,19	15,00	14,10

Tabelle 7: Durch die Verdichtungsapparaturen bedingte Verfeinerungsgrade nach SCHREIBER [25] (festgelegter Wassergehalt)

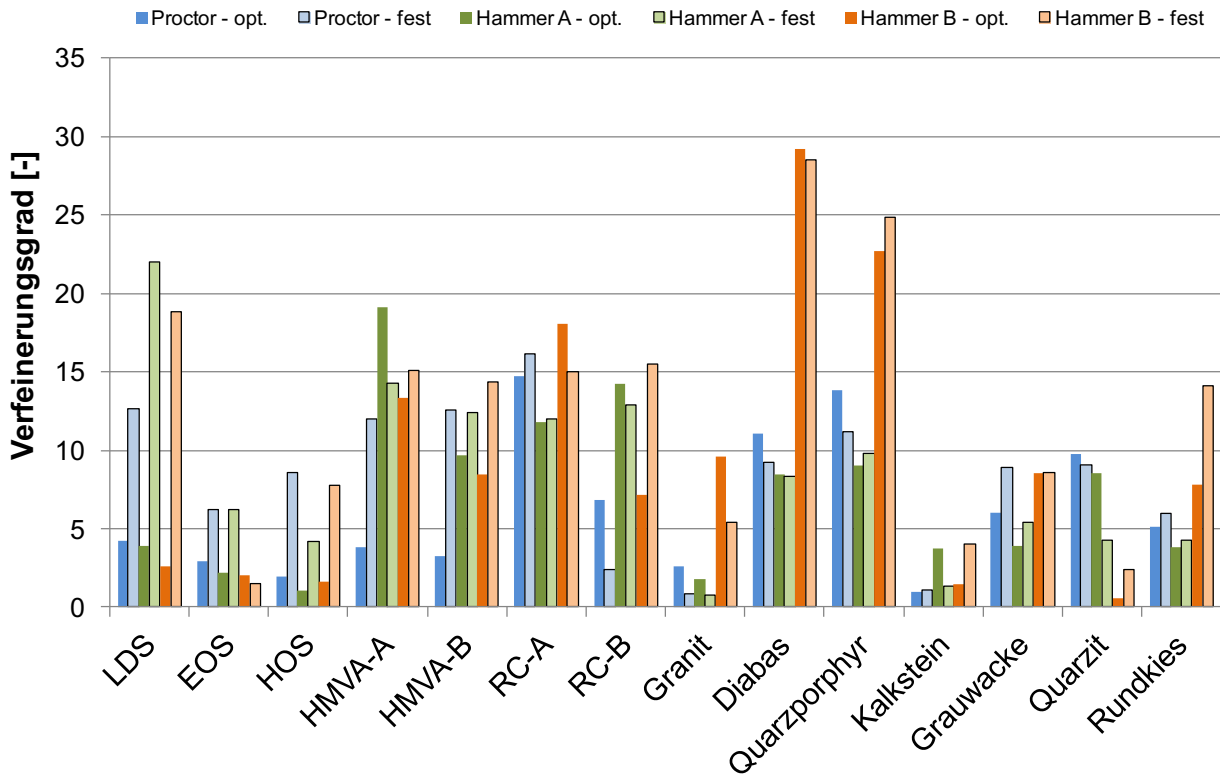


Bild 25: Verfeinerungsgrade der Verdichtungsapparaturen unter Verwendung eines optimalen bzw. festgelegten Wassergehaltes

Aus Bild 25 lässt sich die wesentliche Information ziehen, dass die Kornzertrümmerung für industrielle und RC-Baustoffe unter Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes zunimmt. Bei natürlichen Gesteinskörnungen stellte sich eher ein konstantes Ergebnisbild ein. Für einige Baustoffgemische ist jedoch eine zusätzliche Zunahme der Kornzertrümmerung unter Verwendung des Vibrationshammers B mit einer Schlagenergie von 16,8 J zu erkennen.

Auch bzgl. der Proben die mit einem festgelegten Wassergehalt verdichtet wurden, wurde der Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil ($< 0,063$ mm) bestimmt und in Bild 26 dargestellt. Tendenziell zeigen die Proben die mit einem festen Wassergehalt verdichtet wurden, das gleiche Ergebnisniveau wie in Bild 18. Ausnahme hierbei bilden die Baustoffgemische LDS und HOS, die im Vergleich zu den in Bild 18 dargestellten Ergebnis einen zusätzlichen Anstieg an Feinkorn zeigen.

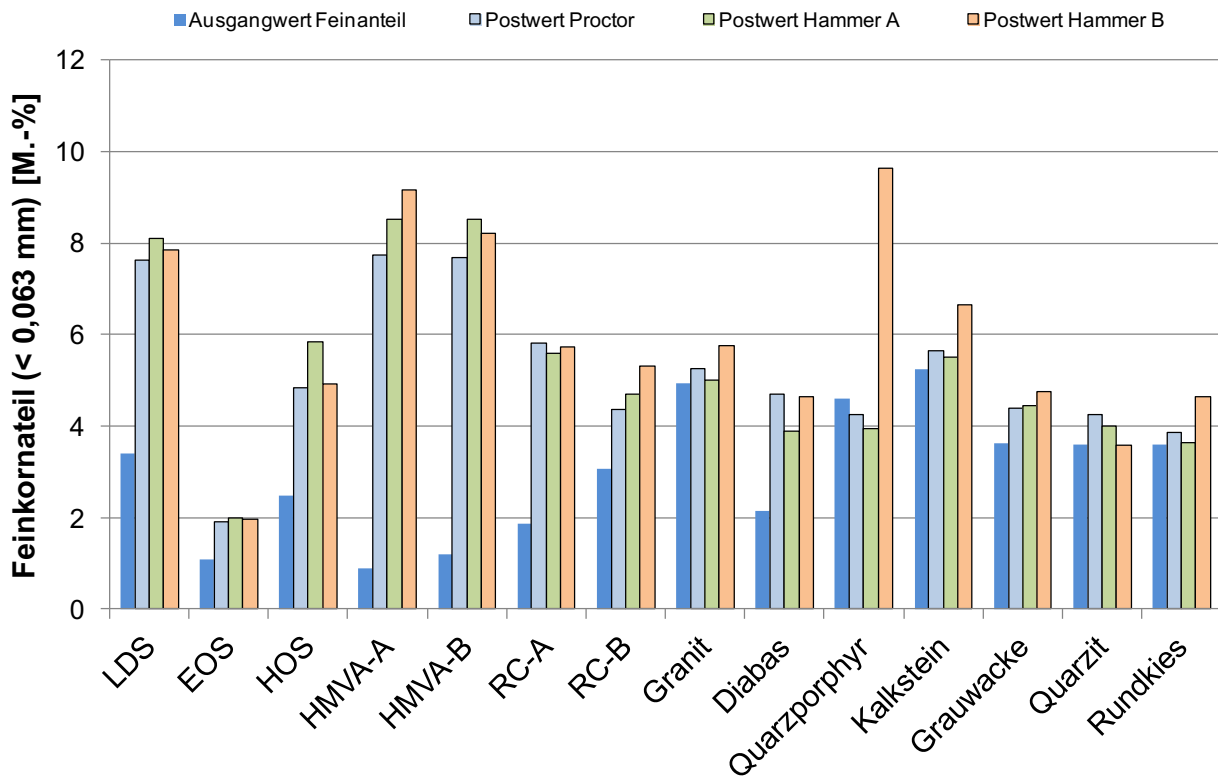


Bild 26: Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil (< 0,063 mm); Topf B, festgelegter Wassergehalt

3.5 AP 5: Verdichtungsversuche (Topf C, mod. opt. Wassergehalt) und Infiltrationsstests

In den Arbeitspaketen 3 und 4 wurden aufgrund der Größe des Verdichtungstopfes (\varnothing 150 mm) nur Korngrößen bis 32 mm verwendet und Überkornanteile wurden entsprechend nicht berücksichtigt. Ein Ziel des Forschungsvorhabens waren auch Infiltrationsmessungen, wobei zu klären war, wie Proben in einem 250 mm Probentopf mit einem Vibrationshammer verdichtet werden sollten. Ergänzend sollten diese Proben vom Ergebnis her den Proben, die mit einem Proctorverdichter hergestellt wurden, gleichen. Zudem sollte auch der Einfluss der Verdichtungsverfahren und die auftretende Kornzertrümmerung bei der Probenherstellung auf die Wasserdurchlässigkeit beantwortet werden. Entsprechend wurden in diesem Arbeitspaket Verdichtungsversuche im großen Verdichtungstopf mit einem Durchmesser von 250 mm (Topf C) und Infiltrationsmessungen sowie Korngrößenverteilungen nach der Probenherstellung bearbeitet.

Aufgrund des großen Arbeitsaufwandes und der benötigten Materialmenge für die Verdichtungsversuche wurde zunächst an jedem Baustoffgemisch ein einzelner modifizierter Proctorversuch mit fünf Einzelproben zur Ermittlung des modifizierten optimalen Wassergehaltes und der Trockendichte durchgeführt. Ein gleiches Procedere mit einem Vibrationshammer war aufgrund einer fehlenden bzw. nicht vorhandenen Möglichkeit der Durchführung eines modifizierten Vibrationshammerversuches mit einer äquivalent zum modifizierten Proctorversuch einhergehenden Anhebung der Verdichtungsenergie nicht realisierbar. Anhand der vielversprechenden Ergebnisse aus der Arbeit von DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [15], die aufzeigten, dass modifizierte Proctorversuche und Vibrationshammerversuche in einem 11 Inch-Topf nahezu identische Ergebnisse liefern (s.Bild 9), wurden die erzielten optimalen Wassergehalte der modifizierten Proctorversuche auch zur Probenherstellung der Vibrationshammerproben für die weiteren Infiltrationsmessungen verwendet und die erzielten Trockendichten untereinander verglichen. Hierfür wurden fünf Einzelproben pro Baustoffgemisch und Verdichtungsapparatur mit 90 Prozent des festgelegten modifizierten optimalen Wassergehaltes verdichtet und die erzielten Trockendichten berechnet. An

drei dieser fünf Proben erfolgten Infiltrationsmessungen im Labor entsprechend TP Gestein-StB Teil 8.3.1 [7].

Das modifizierte Proctorverfahren weist in etwa die fünffache Verdichtungsenergie des Standard-Proctorverfahrens auf und wird allgemein als dasjenige Verfahren angesehen, mit dem Trockendichten erzielt werden, die mit denen in der Praxis vergleichbar sind. Allerdings kann bei der modifizierten Proctorverdichtung aufgrund der erhöhten Verdichtungsenergie eine verstärkte Kornverfeinerung auftreten. Da die Kornzertrümmerung eines Baustoffgemisches hohen Einfluss auf die in-situ Wasserdurchlässigkeit haben kann, war die Überprüfung der Kornverfeinerung ein weiterer wesentlicher Untersuchungsschritt in diesem Arbeitspaket. Entsprechend wurde, wie in den vorherigen Arbeitspaketen, an den zwei verbleibenden Einzelproben Sieblinienanalysen zur Bestimmung der potenziellen Kornzertrümmerung durch die Verdichtungsapparaturen vorgenommen.

Damit eine einheitliche Durchführung der Infiltrationsmessungen im Labor mit Probenherstellung, Aufbau der Messapparatur und eigentlicher Messung des Infiltrationsbeiwertes durch beide Prüfinstitute unter gleichen Rahmenbedingungen sichergestellt war, erfolgte durch die wissenschaftlichen Mitarbeiter und Baustoffprüfer beider Institute gemeinsam ein Vorgehensabgleich. Grundsätzlich wurden alle Probekörper in drei Schichten hergestellt. Die Verdichtung mittels Proctorverdichter erfolgte nach DIN EN 13282 [1]. Die Verdichtung mittels Vibrationshammer erfolgte an acht Verdichtungspunkten, die auf der Probenoberfläche gemäß der Vorgehensweise nach DRENEVICH, EVANS und PROCHASKA [15] (s. Kapitel 3.1) verteilt wurden. Für weitere Details wird auf den Entwurf der TP Gestein-StB im Kapitel 3.6 verwiesen.

In Tabelle 8 bis Tabelle 10 werden die Trockendichten der auf diese Weise hergestellten Probekörper vorgestellt, die mit dem Proctorverdichter bzw. dem Vibrationshammer A und B unter Verwendung des 250 mm Topfes erzielt wurden. In Bild 27 wurden die gemittelten Trockendichten (Topf B) aus Tabelle 2 bis Tabelle 4 den gemittelten Trockendichten (Topf C) aus Tabelle 8 bis Tabelle 10 als Balkendiagramm gegenübergestellt.

	Mod. Trockendichte [Mg/m ³]	Mod. Wassergehalt [M.-%]	0,9 * mod. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte 1 [Mg/m ³]	Trockendichte 2 [Mg/m ³]	Trockendichte 3 [Mg/m ³]	Trockendichte 4 [Mg/m ³]	Trockendichte 5 [Mg/m ³]	Gemittelte Trockendichte [Mg/m ³]	SD Trockendichte [Mg/m ³]
LDS	2,618	2,9	2,6	2,589	2,580	2,604	2,596	2,601	2,594	0,010
EOS	2,622	1,6	1,4	2,594	2,569	2,616	2,612	2,573	2,593	0,022
HOS	2,041	4,2	3,8	2,023	1,980	1,964	2,002	2,012	1,996	0,024
HMVA-A	1,818	11,6	10,5	1,760	1,766	1,752	1,801	1,766	1,769	0,019
HMVA-B	1,745	16,1	14,5	1,661	1,635	1,654	1,689	1,650	1,658	0,020
RC-A	1,860	8,5	7,7	1,777	1,793	1,717	1,745	1,699	1,746	0,039
RC-B	1,952	9,3	8,4	1,994	1,953	1,964	1,973	1,987	1,974	0,017
Granit	2,252	4,2	3,8* (2,9)	2,240	2,233	2,243	2,257	2,255	2,246	0,010
Diabas	2,274	4,4	4,0* (3,2)	2,327	2,304	2,348	2,342	2,312	2,327	0,019
Quarzporphyr	2,032	4,5	4,1	2,040	2,044	2,064	2,057	2,080	2,057	0,016
Kalkstein	2,338	3,4	3,1* (2,7)	2,259	2,269	2,282	2,287	2,295	2,278	0,014
Grauwacke	2,257	4,4	4,0	2,254	2,253	2,252	2,276	2,227	2,252	0,017
Quarzit	2,213	3,4	3,1	2,184	2,198	2,205	2,186	2,202	2,195	0,009
Rheinkies	2,376	4,0	3,6* (2,7)	2,333	2,335	2,318	2,302	2,326	2,323	0,013

Tabelle 8: Ergebnisse der mod. Proctorversuche und Trockendichten der Infiltrationsprobekörper (Verdichtungstopf C - Proctor)

* Da die berechneten 90 % des mit dem mod. Proctorversuch erzielten Wassergehaltes zu einer Wasserdrainage während der Probenherstellung führte bzw. das verdichtete Probenmaterial zu feucht ausfiel, wurden die in den Klammern gesetzten Wassergehalte zur Probenherstellung verwendet.

	0,9 * mod. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte 1 [Mg/m ³]	Trockendichte 2 [Mg/m ³]	Trockendichte 3 [Mg/m ³]	Trockendichte 4 [Mg/m ³]	Trockendichte 5 [Mg/m ³]	Gemittelte Trockendichte [Mg/m ³]	SD Trockendichte [Mg/m ³]
LDS	2,6	2,573	2,579	2,637	2,598	2,562	2,590	0,026
EOS	1,4	2,564	2,545	2,568	2,580	2,536	2,559	0,016
HOS	3,8	1,919	1,918	1,909	1,912	1,898	1,911	0,008
HMVA-A	10,5	1,735	1,709	1,622	1,650	1,722	1,688	0,044
HMVA-B	14,5	1,508	1,475	1,483	1,476	1,460	1,480	0,016
RC-A	7,7	1,798	1,764	1,723	1,755	1,711	1,750	0,031
RC-B	8,4	1,860	1,814	1,803	1,902	1,835	1,843	0,035
Granit	3,8* (2,9)	2,204	2,215	2,207	2,198	2,189	2,203	0,009
Diabas	4,0* (3,2)	2,119	2,117	2,070	2,136	2,139	2,116	0,025
Quarzporphyr	4,1	1,846	1,840	1,849	1,832	1,826	1,839	0,009
Kalkstein	3,1* (2,7)	2,246	2,249	2,272	2,257	2,237	2,252	0,012
Grauwacke	4,0	2,187	2,188	2,155	2,133	2,101	2,153	0,033
Quarzit	3,1	2,117	2,105	2,096	2,134	2,123	2,115	0,013
Rheinkies	3,6* (2,7)	2,324	2,326	2,336	2,335	2,337	2,332	0,005

Tabelle 9: Trockendichten der Infiltrationsprobekörper (Verdichtungstopf C - Vibrationshammer A)

* Da die berechneten 90 % des mit dem mod. Proctorversuch erzielten Wassergehaltes zu einer Wasserdrainage während der Probenherstellung führte bzw. das verdichtete Probenmaterial zu feucht ausfiel, wurden die in den Klammern gesetzten Wassergehalte zur Probenherstellung verwendet.

	0,9 * mod. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte 1 [Mg/m ³]	Trockendichte 2 [Mg/m ³]	Trockendichte 3 [Mg/m ³]	Trockendichte 4 [Mg/m ³]	Trockendichte 5 [Mg/m ³]	Gemittelte Trockendichte [Mg/m ³]	SD Trockendichte [Mg/m ³]
LDS	2,6	2,586	2,615	2,609	2,616	2,601	2,605	0,013
EOS	1,4	2,767	2,729	2,743	2,707	2,781	2,745	0,081
HOS	3,8	1,970	1,963	1,965	1,794	2,038	1,946	0,082
HMVA-A	10,5	1,622	1,746	1,826	1,800	1,767	1,752	0,075
HMVA-B	14,5	1,741	1,692	1,714	1,707	1,706	1,712	0,096
RC-A	7,7	1,934	1,989	1,899	1,942	1,955	1,944	0,084
RC-B	8,4	2,028	2,017	1,983	1,992	2,001	2,004	0,068
Granit	3,8* (2,9)	2,173	2,124	2,156	2,142	2,136	2,146	0,029
Diabas	4,0* (3,2)	2,143	2,131	2,152	2,137	2,124	2,137	0,013
Quarzporphyr	4,1	1,897	1,834	1,863	1,851	1,922	1,873	0,035
Kalkstein	3,1* (2,7)	2,209	2,298	2,227	2,251	2,204	2,238	0,035
Grauwacke	4,0	2,229	2,198	2,248	2,248	2,220	2,229	0,036
Quarzit	3,1	2,139	2,149	2,155	2,138	2,162	2,149	0,017
Rheinkies	3,6* (2,7)	2,273	2,286	2,279	2,277	2,289	2,281	0,022

Tabelle 10: Trockendichten der Infiltrationsprobekörper (Verdichtungstopf C - Vibrationshammer B)

* Da die berechneten 90 % des mit dem mod. Proctorversuch erzielten Wassergehaltes zu einer Wasserdrainage während der Probenherstellung führte bzw. das verdichtete Probenmaterial zu feucht ausfiel, wurden die in den Klammern gesetzten Wassergehalte zur Probenherstellung verwendet.

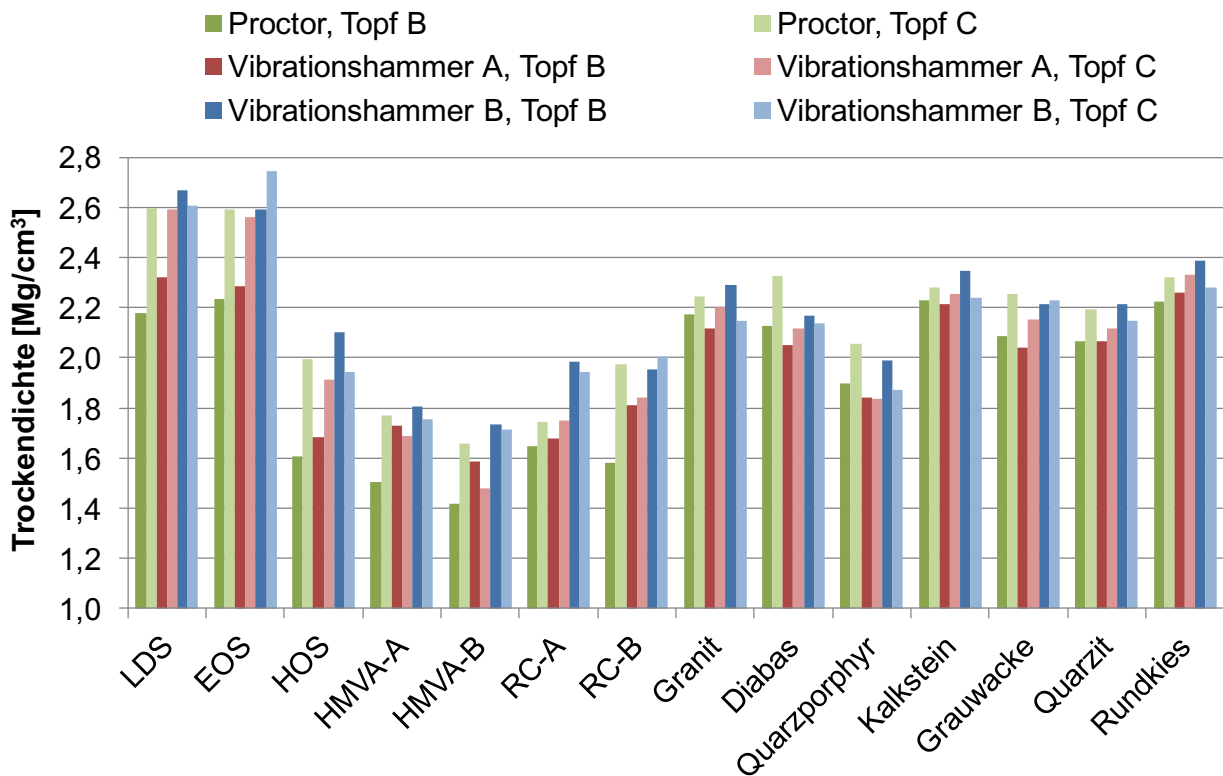


Bild 27: Ergebnisvergleich der gemittelten Trockendichten, die mit den Verdichtungsverfahren unter Verwendung des Proctortopfes B (ohne Überkorn) und C (mit Überkorn) erzielt wurden

Aus Tabelle 8 bis Tabelle 10 und Bild 27 lassen sich folgende Rückschlüsse formulieren:

- Die gemittelten Standardabweichungen der erzielten Trockendichten der jeweiligen Baustoffgemische fallen für das Proctorverfahren und den Vibrationshammer A und für den Vibrationshammer B sehr gering aus. Somit sind die Trockendichteergebnisse der jeweiligen Verdichtungsapparaturen als reproduzierbar einzustufen.
- Beim Proctorverfahren ist für alle Baustoffgemische eine Zunahme der Trockendichte unter Verwendung des Topfes C im Vergleich zu den erzielten Ergebnissen im Topf B zu verzeichnen. Prozentual liegt die Ergebniszunahme zwischen ca. 4 und 25 Prozent (im Mittel bei ca. 12 Prozent). Diese Zunahme ist auf die erhöhte Verdichtungsenergie des bei der Probenherstellung im 250 mm Topf verwendeten modifizierten Proctorverfahrens zurückzuführen.
- Unter Verwendung des Proctortopfes B wurde für industrielle und recycelte Baustoffgemische eine Zunahme der Trockendichte von Proctorverfahren zu Vibrationshammer A zu Vibrationshammer B gemessen. Für die untersuchten natürlichen Baustoffgemische wurde tendenziell eine Ergebnisabnahme von Proctorverfahren zu Vibrationshammer A und eine Ergebniszunahme von Proctorverfahren zu Vibrationshammer B gemessen.
- Mit Ausnahme der Trockendichteergebnisse der Baustoffgemische HMVA-A, HMVA-B und Quarzporphyr wurde durch den Wechsel von Topf B zu Topf C unter Verwendung des Vibrationshammers A eine Zunahme der Trockendichte erzielt. Prozentual liegt diese Ergebniszunahme zwischen ca. 2 und 14 Prozent (im Mittel bei ca. 6 Prozent).
- Mit Ausnahme der Baustoffgemische EOS, RC-B und Grauwacke wurde durch den Wechsel von Topf B zu Topf C unter Verwendung des Vibrationshammers B eine Abnahme der Trockendichte erzielt. Prozentual liegt diese Ergebnisabnahme zwischen ca. 1 und 7 Prozent (im Mittel bei ca. 4 Prozent).

An drei von fünf hergestellten Probekörpern wurden deren Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$ nach TP Gestein-StB Teil 8.3.1 [7] bestimmt. Die Abdichtung zwischen Probenoberfläche und Standrohrinfiltrometer erfolgte unter Verwendung einer Betonitmasse unterhalb des Standrohrinfiltrometers auflag. Folgend wurde das Infiltrometer mit den vorgesehenen Gewichten beschwert und das Standrohr aufgesetzt. Die Resultate der Labormessungen fasst Tabelle 11 zusammen und Bild 28 zeigt eine grafische Darstellung der Infiltrationsergebnisse.

	Proctorverfahren			Vibrationshammer A			Vibrationshammer B		
	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 1 [m/s]	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 2 [m/s]	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 3 [m/s]	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 1 [m/s]	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 2 [m/s]	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 3 [m/s]	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 1 [m/s]	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 2 [m/s]	Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ 3 [m/s]
LDS	7,9E-7	7,9E-7	1,1E-6	1,8E-6	2,1E-6	1,6E-6	1,5E-6	1,2E-6	1,7E-6
EOS	6,9E-4	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-3	1,0E-3	1,0E-3	1,2E-3	1,2E-3	1,2E-3
HOS	1,1E-4	9,3E-5	5,8E-5	9,2E-4	9,6E-4	6,6E-4	1,8E-3	9,6E-4	1,8E-3
HMVA-A	7,8E-6	1,4E-5	1,9E-5	n. B.	2,8E-5	2,0E-5	6,5E-5	2,4E-5	3,3E-5
HMVA-B	3,9E-6	2,6E-6	6,4E-6	5,0E-5	8,1E-5	8,7E-5	1,7E-8	8,1E-7	1,2E-6
RC-A	8,2E-5	1,7E-5	3,1E-5	2,7E-4	5,0E-4	6,1E-4	4,2E-8	3,3E-8	2,9E-8
RC-B	2,6E-6	1,6E-6	8,6E-11	7,3E-5	9,2E-5	6,6E-5	8,6E-9	8,3E-9	8,2E-9
Granit	1,1E-5	1,1E-5	9,3E-6	3,8E-5	3,2E-5	4,1E-5	4,0E-5	1,8E-5	2,7E-5
Diabas	8,5E-4	1,1E-3	9,5E-4	9,7E-4	9,9E-4	9,7E-4	1,2E-5	2,9E-5	2,7E-5
Quarzporphyr	1,0E-3	4,6E-4	5,2E-4	9,7E-4	1,1E-3	1,1E-3	8,3E-4	8,3E-4	8,3E-4
Kalkstein	5,5E-5	4,9E-5	4,9E-5	3,2E-4	1,9E-4	2,3E-4	1,0E-4	8,6E-5	1,4E-4
Grauwacke	2,9E-5	2,0E-5	1,8E-5	3,6E-4	1,3E-3	9,7E-4	3,3E-5	2,6E-5	1,1E-5
Quarzit	1,1E-5	1,8E-5	1,0E-5	2,9E-5	2,8E-5	2,8E-5	2,6E-4	7,3E-5	1,2E-4
Rheinkies	1,1E-5	1,3E-5	1,8E-5	7,5E-5	3,8E-5	4,3E-5	2,9E-5	3,4E-5	2,0E-5

Tabelle 11: Ergebnisse der Infiltrationsmessungen (Verdichtungstopf C)

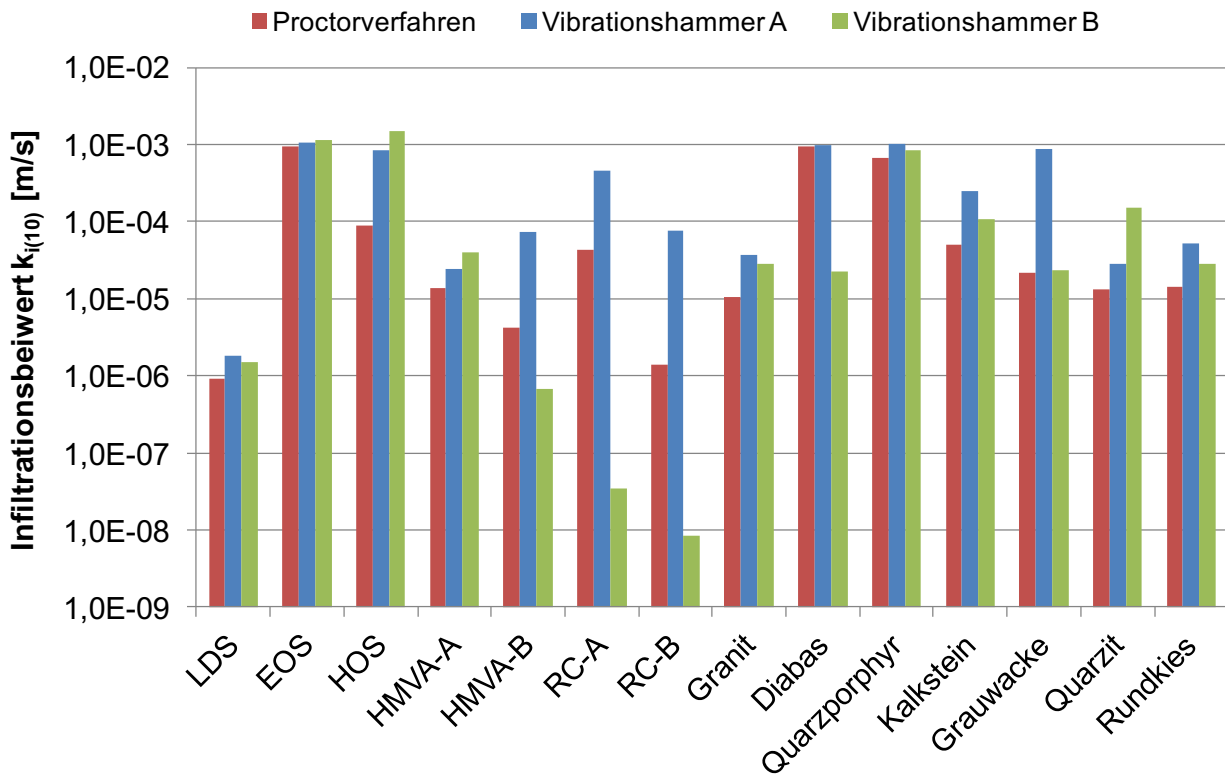


Bild 28: Gemittelte Infiltrationsbeiwerte der Probekörper, welche mit Proctor- bzw. Vibrationshammerverfahren hergestellt wurden.

Aus Tabelle 11 und Bild 28 lassen sich folgende Beobachtungen formulieren:

- Mit Ausnahme der HMVA-B, RC-A und RC-B Probekörper, die mit dem Vibrationshammer B hergestellt wurden, zeigen alle anderen Probekörper ein Infiltrationsbeiwert, der weit oberhalb bzw. nah bei 10^{-6} m/s liegt. Bei den Ergebnissen sollte beachtet werden, dass im Rahmen des FE 06.0112/2015/FGB [33] der BAST darauf hingewiesen wurde, dass es aufgrund von Randumläufigkeiten zu einer Ergebnisanhebung bis in den Potenzenbereich kommen kann.
- Für alle Probekörper liegt der gemittelte Infiltrationsbeiwert bei $3,0 \cdot 10^{-4}$ m/s. Bezogen auf das Verdichtungsverfahren liegen die gemittelten Infiltrationsbeiwerte bei $2,0 \cdot 10^{-4}$ m/s (Proctorverdichter), $4,1 \cdot 10^{-4}$ m/s (Vibrationshammer A) und $3,0 \cdot 10^{-4}$ m/s (Vibrationshammer B).
- Bezogen auf das jeweilige Baustoffgemisch fallen die Ergebnisunterschiede zwischen den Probekörpern, die mit dem Proctor- bzw. Vibrationshämmer hergestellt wurden, relativ gering aus. Würde berücksichtigt, dass nach TP Gesteins-StB 8.3.1 das Infiltrationsergebnis als ganze Zahl mit Exponent anzugeben wäre, würden die Ergebnisschwankungen noch geringer ausfallen. Folglich lässt sich ein verfahrensabhängiger Einfluss auf das Infiltrationsergebnis für industrielle und natürliche Baustoffgemische nicht belegen. Ausnahmen scheinen hierbei die drei Baustoffgemische HMVA-B, RC-A und RC-B zu bilden, die unter Verwendung des Vibrationshammers A eine stärkere Anhebung der Wasserdurchlässigkeit und unter Verwendung des Vibrationshammers B eine größere Absenkung der Wasserdurchlässigkeit zeigen.
- Die gemittelten Infiltrationsergebnisse der Probekörper die mit dem Vibrationshammer A hergestellt wurden, zeigen im Vergleich zu den Probekörpern die mit dem Proctorverfahren hergestellt wurden eine leichte bis stärkere Zunahme der Wasserdurchlässigkeit. Mit Ausnahme der Baustoffgemische HMVA-B, RC-A, RC-B und Diabas trifft diese Beobachtung auch für die Probekörper, die mit dem Vibrationshammer B hergestellt wurden, zu.

An den zwei verbliebenen Probekörpern wurde, vergleichend zu der Ausgangsieblinie der untersuchten Baustoffgemische, der Zertrümmerungsgrad nach SCHREIBER [25] mittels einer Materialsiebung nach der Probenherstellung und Trockendichtebestimmung bestimmt. Die jeweiligen Rohdaten der Ausgangs-

und Nachsieblinien sind als Daten und grafisch dem Anhang D1 bis D3 angefügt. In Tabelle 12 werden die berechneten Verfeinerungsgrade zusammengefasst. Eine grafische Darstellung hierzu zeigt Bild 29.

	Verfeinerungsgrad Proctor KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Proctor KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Proctor [-]	Verfeinerungsgrad Hammer A, KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Hammer A, KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Hammer A [-]	Verfeinerungsgrad Hammer B, KGV 1 [-]	Verfeinerungsgrad Hammer B, KGV 2 [-]	Gemittelter Verfeinerungsgrad Hammer B [-]
LDS	19,53	21,46	20,50	7,55	8,68	8,12	14,52	18,46	16,49
EOS	5,64	6,26	5,95	0,86	1,10	0,98	1,07	2,17	1,62
HOS	18,04	18,79	18,42	5,30	9,92	7,61	1,80	1,89	1,85
HMVA-A	18,66	19,83	19,24	12,47	5,33	8,90	11,79	22,05	16,92
HMVA-B	13,60	5,49	9,55	2,69	6,00	4,35	10,72	13,74	12,23
RC-A	8,05	14,00	11,03	12,74	1,97	7,36	7,47	12,03	9,75
RC-B	13,76	15,39	14,57	6,90	2,82	4,86	1,39	1,10	1,24
Granit	1,38	4,87	3,12	1,10	0,00	0,55	5,58	6,10	5,84
Diabas	3,40	2,01	2,71	0,81	2,31	1,56	20,99	22,38	21,69
Quarzporphyr	3,99	3,16	3,58	-0,20	0,49	0,15	7,29	7,19	7,24
Kalkstein	0,76	-3,00	-1,12	1,11	0,05	0,58	1,31	0,84	1,08
Grauwacke	-0,61	-1,40	-1,00	-3,39	-0,85	-2,12	2,02	3,35	2,69
Quarzit	2,58	2,86	2,72	5,82	1,12	3,47	0,91	1,83	1,37
Rheinkies	-0,55	0,30	-0,13	-1,12	-2,98	-2,05	0,91	0,68	0,80

Tabelle 12: Durch die Verdichtungsapparaturen bedingte Verfeinerungsgrade nach SCHREIBER [25] (Verdichtungstopf C)

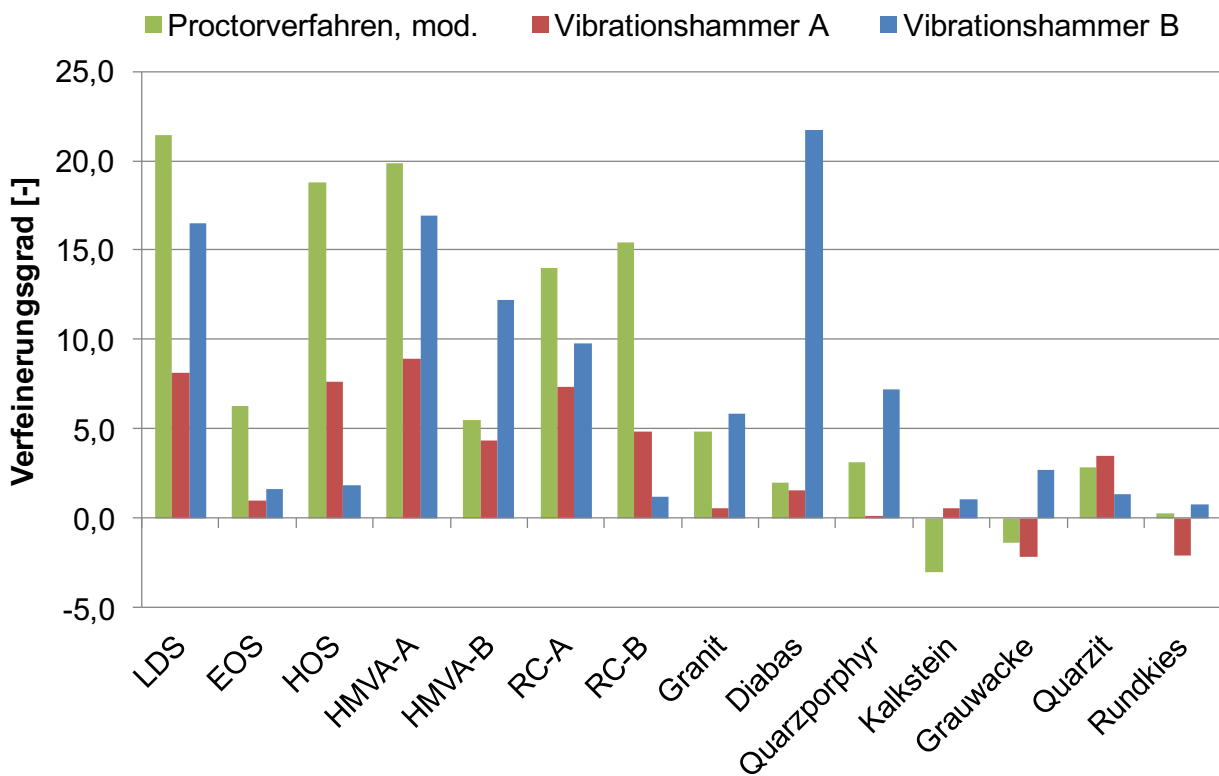


Bild 29: Berechnete Verfeinerungsgrade der drei Verdichtungsapparaturen unter Verwendung des Verdichtungstopfes C

Aus Tabelle 12 und Bild 29 lassen sich folgende Aspekte zusammenfassen:

- Das mod. Proctorverfahren zeigt überwiegend den größten Einfluss auf die Kornzertrümmerung und der eingesetzte Vibrationshammer A den geringsten.
- Unabhängig von der Verdichtungsapparatur zeigen die untersuchten industriellen und RC-Baustoffgemische eine größere Tendenz zur Kornzertrümmerung als die natürlichen Baustoffgemische.
- Die Ermittlung negativer Verfeinerungsgrade zeigt, dass die Probenteilung bzw. inhomogene Probensieblinien einen starken Einfluss auf die Berechnung des Verfeinerungsgrades nach SCHREIBER [25] haben.
- Werden Bild 28 und Bild 29 betrachtet, könnte für einige Ergebniskombinationen (z.B. LDS, HOS, HMVA-B und HMVA-B) ein Zusammenhang zwischen zunehmender bzw. abnehmender Kornzertrümmerung und Abnahme bzw. Zunahme des Infiltrationsbeiwertes formuliert werden. Jedoch ist dies nur über die erwähnten Zu- und Abnahme möglich. Eine direkte mathematische Ergebniskorrelation konnte nicht belegt werden.

Ergänzend zum Verfeinerungsgrad, der eine zusammenfassende Bewertung der Kornzertrümmerung auf das gesamte Kornband ermöglicht, wurde auch bzgl. der Probenherstellung im 250 mm Verdichtungstopf der Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil ($< 0,063$ mm) bestimmt und grafisch in Bild 30 festgehalten. Auch bei diesen Versuchen zeigten alle Baustoffgemische unabhängig vom Verdichtungsverfahren eine Feinkornzunahme. Da mal das Proctorverfahren, mal eine Vibrationshammervariante eine vermehrte Feinkornanreicherung bewirkte, ist keine Verfahrensabhängigkeit bzgl. der Feinkornanreicherung erkennbar.

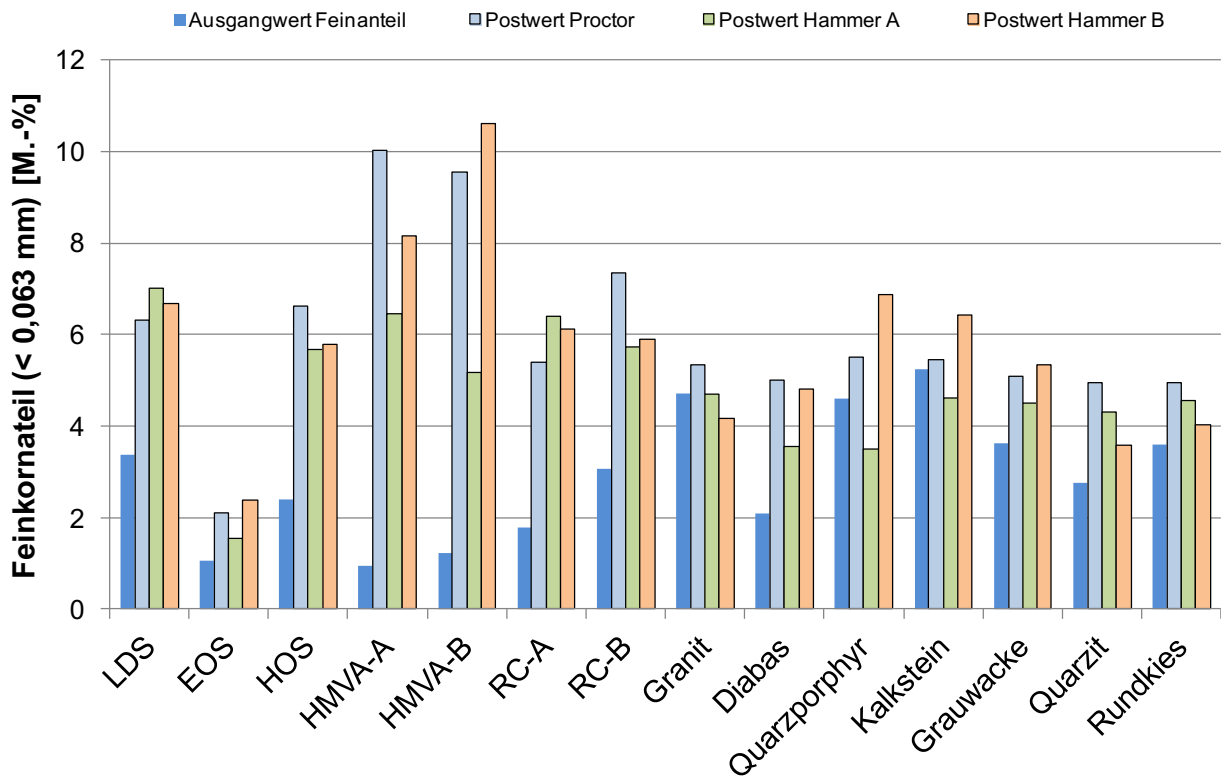


Bild 30: Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil (< 0,063 mm); Topf C, mod. optimaler Wassergehalt

3.6 AP 6: Entwurfsfassung einer TP Gestein-StB Vibrationshammerdichte

Das Forschungsprojekt sollte letztlich dazu beitragen das Vibrationshammerverfahren als alternatives performance orientiertes Laborverdichtungsverfahren für ungebundene Baustoffgemische des Straßenoberbaus zu fördern. Anhand der aktuellen Literaturstudie, der umfangreichen Laborversuche und deren Ergebnisse, sowie der Erfahrungen, die sich beide Prüfinstitute durch das vergangene [2] wie aktuelle Forschungsprojekt angeeignet haben, sollte dieses Ziel auch durch die Formulierung eines Entwurfs einer TP Gestein-StB umgesetzt werden. Es sollte dargelegt werden, welche zusätzlichen Voraussetzungen an einen Vibrationshammer sinnvoll sind und wie eine Baustoffverdichtung mit einem Vibrationshammer in einem 250 mm Verdichtungstopf (Topf C) durchführbar ist, da diese Punkte nicht in der DIN EN 13286-4 [3] beschrieben werden. Nach Auffassung der Forschungsnehmer könnte die TP Gestein-StB Vibrationshammerdichte wie folgt formuliert werden:

Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau

TP Gestein-StB

Teil 8.1.2

Bestimmung der Vibrationshammerdichte

Ausgabe 2020

Aufgestellt: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen“

Veröffentlicht: FGSV Verlag, Köln – FGSV 610 (R 1)

Ersetzt: Erstfassung

Zweck und Anwendungsbereich

Dieser Teil der TP Gestein-StB präzisiert und ergänzt die Festlegungen der DIN EN 13286-4 „Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 4: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt - Vibrationshammer“. Es werden ergänzende Angaben zur Gerätespezifikation und zur Herstellung von Probekörpern im 250 mm Topf (Verdichtungstopf C) gemacht.

Mitgeltende Normen und Regelwerke

DIN EN 13286-2 „Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes – Proctorversuch“

DIN EN 13286-4 „Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 4: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt - Vibrationshammer“

DIN 18130-1 Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Laborversuche“, Ausgabe 1998

TP Gestein-StB Teil 8.3.1 „Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer - Laborverfahren“

Präzisierungen und Ergänzungen zur DIN EN 13286-4

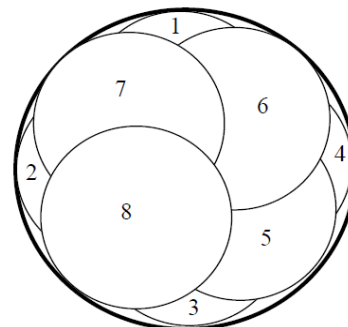
Präzisierungen zum Abschnitt 5.3 und 5.4

Zur Erzielung von vergleichbaren Trockendichten zum Proctorverfahren und zur Vermeidung einer im größeren Maße auftretenden Kornzertrümmerung wird ergänzend zu den technischen Anforderungen der DIN EN 13286-4 (Leistungsaufnahme: 600 W, Arbeitsfrequenz 25 Hz und 60 Hz, abwärts wirkende Gesamtkraft: 300 bis 400 N) ein Vibrationshammer mit einer regelbarer Frequenz bis ca. 50 Hz mit einer Schlagenergie von ca. 8 bis 10 Joule empfohlen. Die Stellfläche des Verdichtungsstempels sollte einen Durchmesser von 150 mm haben.

Ergänzungen zum Abschnitt 6.3 und 7.1

Zur Herstellung von Probekörpern zur Messung des Infiltrationsbeiwertes nach TP Gestein-StB Teil 8.3.1 im 250 mm Verdichtungstopf ist eine Probenmenge von ca. 30 kg erforderlich. Diese Probenmenge wird mit einem bestimmten bzw. vorliegenden Verdichtungswassergehalt von: $0,8 \text{ mod } w_{Pr} < w < \text{mod } w_{Pr}$ versehen und das Wasser gründlich mit der Probenmenge vermischt, sodass das Probenmaterial gleichmäßig durchfeuchtet ist. Anschließend sollte die Probe für mindestens 2 Stunden in einem geschlossenen Gefäß aufbewahrt und im Anschluss nochmal gründlich durchgemischt werden.

Die Materialverdichtung erfolgt in drei Schichten im Verdichtungstopf C. Hierfür wird Probenmaterial homogen mit einer Schaufel eingefüllt, sodass sich eine unverdichtete in etwa ebene Schicht ergibt. Die Materialverdichtung erfolgt punktuell und nach der Zahlenfolge entsprechend Abbildung 1. Der Verdichtungsstempel wird folglich auf Punkt 1 aufgesetzt und das Material für 60 ± 2 s verdichtet. Im Folgenden werden die Punkte 2 bis 8 nach gleicher Vorgehensweise verdichtet. Damit der Verdichtungsstempel bzw. Vibrationshammer zu den nächsten Positionen gelangen kann, wird dieser angehoben und der Verdichtungstopf unterhalb des Stempels zum nächsten Punkten rotiert und dieser ebenfalls für 60 ± 2 s verdichtet. Der beschriebene Ablauf wird für die zweite und dritte Schicht wiederholt. Zur besseren Materialverzahnung wird die verdichtete Oberfläche der ersten und zweiten Schicht leicht angeraut. Nach der Verdichtung ist die Oberfläche der dritten Schicht von losem, nichtverdichtetem Material zu bereinigen.



1: Laufweg des Stampfers zur Verdichtung im 250 mm Probentopf nach [1]

Nach der Verdichtung sollte die Probenhöhe der drei Schichten jeweils 1/3 der Gesamtzylinderhöhe einnehmen, wobei die dritte Schicht ca. 1 cm unterhalb der Zylinderoberkante enden sollte, um eine optimale Abdichtung zwischen Probeoberfläche und Standrohrinfiltrrometer zu gewährleisten.

Anmerkung: Damit der Probentopf während der Materialverdichtung fixiert ist und nicht wandert, ist es sinnvoll bündig zur Stellfläche des Verdichtungstopfes in die Unterlage an mindestens drei Positionen (120 Grad Anordnung) einen Metallstift als Bewegungsgrenze einzusetzen.

Literaturverzeichnis

- [1] DRENEVICH V. P., EVANS A. C., PPROCHASKA A. B.: A Study of Effective Soil Compaction of Granular Soils, Purdue University, 2007

4 Fazit und Ausblick

Schichten ohne Bindemittel und ihre technischen Eigenschaften haben im Straßenaufbau eine zentrale, tragende Rolle. Sowohl ihre Tragfähigkeit, als auch ihre Wasserdurchlässigkeit bilden zwei Kernelemente für die Nutzungsdauer einer Straße. Entsprechend müssen beide Faktoren sowohl in-situ als auch im Labor messtechnisch optimal erfassbar und untereinander vergleichbar sein.

Zur Berechnung des Verdichtungsgrades, der als Beurteilungskriterium der Tragfähigkeit herangezogen werden kann, wird auf Laborebene die Proctordichte mittels Proctorversuch nach DIN EN 13286-2 [1] bestimmt. Ungebundene Baustoffgemische weisen zur Sicherstellung ihrer Wasserdurchlässigkeit sieblinienbedingt dränierende Eigenschaften auf. Diese Eigenschaft zeigt sich auch während eines Proctorversuches in Folge dessen der Laborversuch oft nicht ausgewertet werden kann. Auf Seiten der Wasserdurchlässigkeit erfolgt die Labormessung bisher nach DIN 18130-1 [6], dessen Verfahrensparameter nicht den Feldbedingungen entspricht. Folglich werden im Labor Prüfmethode verwendet, die aufgrund der Eigenschaften der zu untersuchenden Materialien und/oder aufgrund ihrer Verfahrensparameter keine optimale Bewertungsgrundlage liefern. In diesem Sinne ist es notwendig performance orientierte Prüfverfahren zu etablieren, die diesen Umstand optimieren. Auf Seiten der Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen scheint nach ersten Erkenntnissen [2] das Verdichtungsverfahren nach DIN EN 13286-4 [3] aussichtsreich. Bzgl. der Wasserdurchlässigkeit ist möglicherweise das Standrohrinfiltrometer nach TP Gestein-StB 8.1.3 [7] geeignet.

Mit einer umfassenden Laborstudie an vierzehn praxisgerechten Baustoffgemischen konnte der Kenntnisstand zum Vibrationshammerverfahren ausgebaut werden. Es wurde die These einer Verdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt zur Vermeidung einer Wasserdrainage während des Verdichtungsversuches nahezu bestätigt und Untersuchungen zur auftretenden Kornzertrümmerung durchgeführt. Weiterhin wurde eine Vorgehensweise zur Herstellung von Prüfkörpern im 250 mm Verdichtungstopf mit einem Vibrationshammer aufgezeigt und der Einfluss eines Vibrationshammers auf die Wasserdurchlässigkeit bestimmt. Bzgl. der technischen Untersuchungen lassen sich zusammenfassend die primären Erkenntnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens wie folgt festhalten:

- Aus Standardverdichtungsversuchen mit variierenden Probenwassergehalten unter Einsatz des Proctor- bzw. Vibrationshammerverfahrens an 0/32 mm Baustoffgemischen wurde aufgezeigt, dass die Trockendichten bei Nutzung eines Vibrationshammers mit einer Schlagenergie von 8,3 Joule leicht über dem Ergebnisniveau des Proctorergebnis liegen. Diese Ergebniszunahme wurde zusätzlich durch die Nutzung eines Vibrationshammers mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule begünstigt. Bzgl. der ausgewerteten optimalen Wassergehalte zeigte sich tendenziell eine leichte Reduktion beim Vibrationshammer mit 8,3 Joule Schlagenergie und ein nahezu gleiches Ergebnisniveau für den Vibrationshammer mit 16,8 Joule Schlagenergie im Vergleich zum Proctorergebnis. Bzgl. der auftretenden Kornzertrümmerung zeigte der Vibrationshammer mit 8,3 Joule Schlagenergie in der Regel den geringsten Einfluss.
- Die Ergebniskorrelation einer Materialverdichtung mittels Vibrationshammer mit einem festgelegten Probenwassergehalt von 3 M.-% bzw. 5 M.-% im Vergleich zu einer Verdichtung mittels Proctorverfahren und einem optimalem Probenwassergehalt konnte mit einem Korrelationskoeffizienten größer 0,8 quasi bestätigt werden. Tendenziell steigen jedoch die Trockendichten bei Nutzung eines Vibrationshammers mit einer Schlagenergie von 8,3 Joule und eines festen Probenwassergehaltes an (gemittelt ca. 6,5 %). Diese Zunahme wird zusätzlich verstärkt durch die Nutzung eines Vibrationshammers mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule (gemittelt ca. 11,5 %). Bzgl. der auftretenden Kornzertrümmerung zeigten alle Verdichtungsverfahren unter Anwendung eines festgelegten Wassergehaltes eine deutliche Zunahme der Kornzertrümmerung, wobei der Vibrationshammer mit 16,8 Joule Schlagenergie bei einigen Baustoffgemischen zu einer zusätzlichen Kornzertrümmerung führte.
- Verdichtungsversuche im 250 mm Verdichtungstopf mittels Vibrationshammer sind nach der Vorgehensweise von DREENVICH V.P., EVANS A.C., PROCHASKA A. B. [15] durchführbar und liefern nahezu identische Trockendichten zum modifizierten Proctorverfahren.
- Fast alle Infiltrationsprobekörper, die mit den Proctorverfahren und Vibrationshämern mit 8,3 bzw. 16,8 Joule Schlagenergie hergestellt wurden, zeigten nahezu identische Infiltrationsbeiwerte. Ein

verfahrensabhängiger Einfluss auf das Infiltrationsergebnis konnte somit ausgeschlossen werden. Ausnahme hierbei bilden die untersuchten HMVA und RC-Baustoffgemische.

- Das modifizierte Proctorverfahren bedingte bei der Probeherstellung im 250 mm Verdichtungstopf den größten Einfluss auf die Kornzertrümmerung und der Vibrationshammer mit 8,3 Joule Schlagenergie den geringsten. Ein direkter Zusammenhang zwischen Kornzertrümmerung und Wasserdurchlässigkeit konnte nicht nachgewiesen werden.

Bzgl. der verfahrenstechnischen Aspekte lässt sich festhalten, dass die Gerätespezifikation bzgl. der Schlagenergie eines Vibrationshammers im Rahmen der berücksichtigten Vibrationshammervariante mit 8,3 Joule liegen sollte. Hierdurch wird eine verstärkt auftretende Kornzertrümmerung und eine zusätzliche, weit über den Proctorniveau liegende Trockendichtezunahme, vermieden. Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass ein permanenter Schallpegel eines Bohrhammers mit 16,8 Joule für das ausführende Personal und dessen Umgebung, eine enorme Herausforderung darstellt.

Ergänzend zeigte der Verfeinerungsgrad nach SCHREIBER [25], dass das Ergebnis stark von der Probeanteile abhängt, da teils auch negative Verfeinerungsgrade berechnet wurden. Bei Anwendung der Formel nach SCHREIBER sollten daher besser zusammengesetzte Sieblinien verwendet werden, um verfahrensbedingte Kornzertrümmerungen besser beurteilen zu können.

Zusammenfassend lässt sich aus dem durchgeführten Forschungsvorhaben festhalten, dass das Vibrationshammerverfahren nach DIN EN 13286-4 als gute Alternative zum Proctorverfahren verifiziert wurde. Es konnten weiterführende Fragestellungen beantwortet und daraus folgend ein Entwurf für eine TP Gestein-StB zur Probenherstellung von Prüfkörpern im 250 mm Verdichtungstopf z. B. für Infiltrationsversuche abgefasst werden. Der Aspekt einer Verdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt lässt sich durchaus weiter verfolgen. Zwar sind damit eine Zunahme an Trockendichte und Kornzertrümmerung verbunden, jedoch konnte gezeigt werden, dass die Kornzertrümmerung nur eine untergeordnete Bedeutung für den Infiltrationsbeiwert der untersuchten Baustoffgemische hatte.

Weiterführende Untersuchungen zur Eignung des Vibrationshammerverfahrens auf Laborebene sollten unbedingt den Einfluss von Randumläufigkeiten während eines Infiltrationsversuches beinhalten. Ebenso wären Versuche zur auftretenden Kornzertrümmerung an idealisierten Standardsieblinien denkbar. Wie dargestellt, besteht das Problem, dass die aktuelle Bezugsgröße (Proctortrockendichte) des Verdichtungsgrades für ungebundene Gemische nur bedingt bestimmt werden kann und nicht in-situ konforme Ergebnisse liefert. Ergebnis- und Verfahrenstechnisch trifft gleiches auf die Wasserdurchlässigkeit zu. Zur weiteren Erfahrungssammlung und Etablierung des Vibrationshammerverfahrens würden sich entsprechend ergänzende Untersuchungen im Vergleich zu Feldergebnissen anbieten. Hier müssten aus realen Baumaßnahmen die erzielte Trockendichte bzw. der Verdichtungsgrad und deren Infiltrationsbeiwerte bestimmt werden. In Folge müssten diese vergleichend zum Proctorverfahren mit dem Vibrationshammerverfahren an den gleichen Baustoffgemischen möglichst reproduziert werden, um die Eignung des Vibrationshammerverfahrens als durchweg in-situ konformes Laborprüfverfahren zu belegen.

Literatur

- [1] DIN EN 13286-2:2010-12: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes; Proctorversuch
- [2] BIALUCHA R., MERKEL TH., DEMOND D., RITTER H.-J., HAAS S.: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel, Schlussbericht, FE-Nr.: 06.0099/2012/EGB, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Veröffentlichung in Vorbereitung
- [3] DIN EN 13286-4:2003-07: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 4: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationshammer
- [4] BIALUCHA R., MERKEL TH., DEMOND D.: Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit von Baustoffgemischen unter Berücksichtigung neuer europäischer Regelungen, Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel, Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben: 16733/N
- [5] BIALUCHA R., MERKEL Th., DEMOND D., RITTER H.-J., HAAS S.: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel, Schlussbericht, FE-Nr.: 06.0099/2012/EGB, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 08.2014
- [6] DIN 18130-1:1998-05: Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes - Teil 1: Laborversuche
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TP Gestein-StB, Teil 8.3.1: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer – Laborverfahren, Ausgabe 2012
- [8] PROCTOR, R. R.: Fundamental Principles of Soil Compaction, Engineering News-Record, Volume III, Number 9, 31.08.1933, pp. 245-248
- [9] 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
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt für die Herstellung von Tragschichten ohne Bindemittel, Ausgabe 1980
- [11] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau, Köln, 2003
- [12] PAULMANN, G.; GRÄTZ, B.: Untersuchung der Verdichtung von Tragschichten ohne Bindemittel. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, Heft 546, Bonn 1989
- [13] BRANDL, H.: Ungebundene Tragschichten im Straßenbau (Verdichtung, Kornverfeinerung, Frostbeständigkeit, Tragverhalten, Dimensionierung, Qualitätsanforderungen, Prüfung), Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 67, 1977

-
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau - TL SoB-StB, Ausgabe 2004 / Fassung 2007
- [15] DRENEVICH V. P., EVANS A. C., PROCHASKA A. B.: A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils, Purdue University, 2007
- [16] KRASS, K.; KELLERMANN, C.: Verfahren zum Nachweis der erreichten Verdichtung bei Tragschichten ohne Bindemittel, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 768, 1999
- [17] LEE, P. J.; SUEDKAMP, R. J.: Characteristics of irregular shaped compactions curves of soil. Highway Research Record, 1972
- [18] WEBSTER, C. R.: A laboratory Investigation of Vibratory Compaction of Dry Soils, Texas A & M University, College Stadium, Master-Thesis, 1984
- [19] 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
- [20] 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
- [21] HEIDER, T.: Experimentelle Untersuchungen zum Zusammenhang der Einbaudichte und der Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel, Diplomarbeit, TU-Dresden, 2000
- [22] WELNNER F., WOLF M.: Einfluss der Tragfähigkeit auf die Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1081, 2013
- [23] DAS, B.; SOBHAN, K.: Principles of Geotechnical Engineering, Cengage Learning Verlag ; Auflage: 00008, 2013
- [24] ASTM D7382 – 08: Standard Test Methods for Determination of Maximum Dry Unit Weight and Water Content Range for Effective Compaction of Granular Soils Using a Vibrating Hammer
- [25] SCHREIBER, F. R.: Zur Frage der Kornverfeinerung eines Gesteinshaufwerks unter praxisnaher Beanspruchung. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Technischen Universität Hannover. 1977, Bd. 37.
- [26] SHAHIN, A. W.: Investigation of the Variability in the Results of the NZ Vibrating Hammer Compaction Test, Masterarbeit, University of Auckland, 2010
- [27] DIN EN 933-1:2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren
- [28] DIN EN 933-4:2008-06: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl

- [29] DIN EN 1097-2:2010-12: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung
- [30] DIN EN 1097-3: 1998-06: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt
- [31] DIN EN 1097-6:2005-12: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
- [32] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau - TL Gestein-StB, Ausgabe 2004 / Fassung 2018
- [33] WOLF M., SPANIER T.: Schaffung eines Bewertungshintergrundes für die Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer im Labor, Schlussbericht, FE-Nr.: 06.0112/2015/FGB, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, unveröffentlicht

Bilder

- Bild 1: Beziehung zwischen Trockendichte und Wassergehalt nach DIN EN 13286-1
- Bild 2: Entwässerung einer ungebundenen Baustoffgemischprobe während eines Proctorversuches
- Bild 3: Auswertung von selbstentwässernden Gemischen gemäß DIN EN 13286-2, Anhang D [1]
- Bild 4: Erzielte Trockendichtekorrelation unter Verwendung eines optimalen Wassergehaltes (Proctorverdichter) und eines festgelegten Wassergehaltes (Vibrationshammer) [2]
- Bild 5: Zusammenhang zwischen verwendetem Wassergehalt, erzielbarer Trockendichte und Wasserdurchlässigkeit nach Das und Sobhan [23]
- Bild 6: Ansicht des 11 Zoll Probentopf mit eingesetzten Stampfer des Vibrationshammers [15]
- Bild 7: Laufweg des Stampfers zur Materialverdichtung innerhalb des 11 Zoll Probentopf [15]
- Bild 8: Ergebnisse bei der Vibrationshammerverdichtung im 6 und 11 Zoll Probentopf [15]
- Bild 9: Erzielte Trockendichten mittels Proctorverfahren und Vibrationshämmer (Metabo und Kango) mit ungleicher Schlagenergie nach Shahin [26]
- Bild 10: Darstellung der Korngrößenverteilungen der vierzehn untersuchten Baustoffgemische
- Bild 11: Proctorverdichter
- Bild 12: Vibrationshammer A
- Bild 13: Vibrationshammer B
- Bild 14: Erzielte Trockendichten mittels Proctorverdichter und Vibrationshammer
- Bild 15: Prozentuale Trockendichtezunahme unter Verwendung eines Vibrationshammers im Vergleich zum Proctorergebnis
- Bild 16: Optimale Wassergehalte unter Einsatz des Proctorverdichters bzw. eines Vibrationshammers

- Bild 17: Darstellung der durch die Verdichtungsgeräte hervorgerufenen gemittelten Verfeinerungsgrade nach SCHREIBER [25]
- Bild 18: Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil ($< 0,063$ mm); Topf B, tendenziell optimaler Wassergehalt
- Bild 19: Korrelation Proctortrockendichten (opt. Wassergehalt vs. fester Wassergehalt)
- Bild 20: Korrelation Vibrationshammertrockendichten A (opt. Wassergehalt vs. fester Wassergehalt)
- Bild 21: Korrelation Vibrationshammertrockendichten B (opt. Wassergehalt vs. fester Wassergehalt)
- Bild 22: Korrelation Proctortrockendichten (opt. Wassergehalt) vs. Vibrationshammertrockendichten A (fester Wassergehalt)
- Bild 23: Korrelation Proctortrockendichten (opt. Wassergehalt) vs. Vibrationshammertrockendichten B (fester Wassergehalt)
- Bild 24: Prozentuale Trockendichtezunahmen zwischen Proctorverdichter (optimaler Wassergehalt) und Vibrationshämmer (fester Wassergehalt)
- Bild 25: Verfeinerungsgrade der Verdichtungsapparaturen unter Verwendung eines optimalen bzw. festgelegten Wassergehaltes
- Bild 26: Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil ($< 0,063$ mm); Topf B, festgelegter Wassergehalt
- Bild 27: Ergebnisvergleich der gemittelten Trockendichten, die mit den Verdichtungsverfahren unter Verwendung des Proctortopfes B (ohne Überkorn) und C (mit Überkorn) erzielt wurden
- Bild 28: Gemittelte Infiltrationsbeiwerte der Probekörper, welche mit Proctor- bzw. Vibrationshammerverfahren hergestellt wurden.
- Bild 29: Berechnete Verfeinerungsgrade der drei Verdichtungsapparaturen unter Verwendung des Verdichtungstopfes C
- Bild 30: Einfluss der Verdichtungsapparaturen auf den Feinkornanteil ($< 0,063$ mm); Topf C, mod. optimaler Wassergehalt

Tabellen

- Tabelle 1: Technische Laborkennwerte der untersuchten Baustoffgemische
- Tabelle 2: Erzielte Trockendichten und opt. Wassergehalte der Verdichtungsversuche (Proctorverdichter, Topf B)
- Tabelle 3: Erzielte Trockendichten und opt. Wassergehalte der Verdichtungsversuche (Vibrationshammer A, Topf B)
- Tabelle 4: Erzielte Trockendichten und opt. Wassergehalte der Verdichtungsversuche (Vibrationshammer B, Topf B)
- Tabelle 5: Durch die Verdichtungsapparaturen bedingte Verfeinerungsgrade nach SCHREIBER [(optimaler Wassergehalt)
- Tabelle 6: Trockendichten der Verdichtungsversuche unter Verwendung eines festgelegten Wassergehaltes von 3 bzw. 5 M.-%
- Tabelle 7: Durch die Verdichtungsapparaturen bedingte Verfeinerungsgrade nach SCHREIBER [25] (festgelegter Wassergehalt)

Tabelle 8: Ergebnisse der mod. Proctorversuche und Trockendichten der Infiltrationsprobekörper (Verdichtungstopf C - Proctor)

Tabelle 9: Trockendichten der Infiltrationsprobekörper (Verdichtungstopf C - Vibrationshammer A)

Tabelle 10: Trockendichten der Infiltrationsprobekörper (Verdichtungstopf C - Vibrationshammer B)

Tabelle 11: Ergebnisse der Infiltrationsmessungen (Verdichtungstopf C)

Tabelle 12: Durch die Verdichtungsapparaturen bedingte Verfeinerungsgrade nach SCHREIBER [25] (Verdichtungstopf C)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Botor, Tost € 15,50

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

Augter, Kayser € 16,50

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

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

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

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

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

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

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

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

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

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

2020

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

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

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

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

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

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

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

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

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

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

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

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

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

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

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

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

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

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

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

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

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ
Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)
Büchler, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte
Villaret, Augter, Kayser, Riwe
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen
Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW
Schipek, Steffen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette
Cudmani, Henzinger, Birle, Barka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren
Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton
Rigo, Unterderweide
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz
Kathmann, Schroeder
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013
Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie
Beginn
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff
Cudmani, Heyer, Birle, Möller
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen
Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel
Demond, Reiche, Haas, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

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

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

www.schuenemann-verlag.de

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