

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

FA 6.115

Forschungsstellen: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V., Duisburg
Institut für Kalk- und Mörtelforschung e. V., Köln

Bearbeiter: Demond, D. / Schmidt, S.-O. / Haas, S. / Reiche, T.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Dezember 2019

1 Problemstellung

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 werden 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 Proctor- und In-situ-Einbaudichte ergibt. Die Referenzdichte (Proctordichte) des Verdichtungsgrads könnte zukünftig alternativ zur Proctormethode auch über das Vibrationshammerverfahren bestimmt werden, da dieses Laborverdichtungsverfahren nachgewiesene Vorteile im Vergleich zum Proctorverfahren bei der Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen aufweist (zum Beispiel in-situ-konforme Verfahrensparameter, Durchführung, Zeitaufwand etc.).

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

2 Forschungsziele

Eines der Hauptziele des Forschungsvorhabens war es, die vielversprechenden Ergebnisse des Vorläuferprojekts (FE-Nr. 06.0099/2012/EGB) und den darin formulierten Lösungsansatz für dränierende Baustoffgemische zu überprüfen und gegebenenfalls zu verifizieren. Zusätzlich sollte mit dem Forschungsvorhaben der Kenntnisstand zum Vibrationshammer zum Beispiel bezüglich variierender Verdichtungsenergie erweitert 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 Baustoffgemischen im Vergleich zum Proctorverfahren darstellt, sollten

mit dem Forschungsprojekt die oben genannten Kenngrößen untersucht und weitere Erfahrungen und Erkenntnisse gesammelt werden. Zusammenfassend verfolgte das Forschungsvorhaben folgende Ziele:

- Überprüfung eines festgelegten Wassergehalts von 3 M.-% (natürliche und industrielle Baustoffgemische) beziehungsweise 5 M.-% (RC- und HMVA-Baustoffgemische) zur Vermeidung einer Wasserdrainage während der Versuchsdurchführung an vierzehn verschiedenen ungebundenen Baustoffgemischen,
- Bestimmung des Verfahrenseinflusses auf die Kornzertrümmerung und 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-Topfs bei der Vibrationshammerverdichtung und
- Vergleichsuntersuchungen zum Einfluss der Verdichtungsverfahren auf die Wasserdurchlässigkeit (Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$) mittels Standrohrinfiltrometer nach TP Gestein-StB, Teil 8.3.1.

Schlussendlich sollten das Forschungsvorhaben die Eignung des Vibrationshammerverfahrens als performance-orientiertes Laborverfahren zur Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen weiter belegen. Hierfür wäre eine Anpassung der DIN EN 13286-4 für ungebundene Baustoffgemische mit einem Größtkorn größer 32 mm beziehungsweise bezüglich der Verdichtung in einem Probentopf mit 250 mm Durchmesser notwendig, da diese Punkte nicht in der aktuellen Ausgabe der DIN EN 13286-4 behandelt werden. Vorläufig sollte dieser Ansatz daher für die nationale Anwendung durch eine technische Prüfvorschrift in Form eines Entwurfs einer TP Gestein-StB formuliert werden.

3 Untersuchungsprogramm

Zu Beginn des Forschungsvorhabens, das in sechs Arbeitspakete (AP) aufgeteilt wurde, wurde eine Literaturstudie bezüglich der Fragestellungen des Forschungsvorhabens durchgeführt.

Im Folgenden wurden vierzehn ungebundene Baustoffgemische organisiert und an diesen eine Charakterisierungsuntersuchung durchgeführt. Durch diese sollte die Anforderung an eine große Materialbandbreite sowie die technischen Vorgaben entsprechend der TL Gestein-StB und TL SoB-StB bestätigt werden.

Innerhalb des dritten Arbeitspakets wurden Verdichtungsversuche an 0/32 mm Korngemischen ohne Überkorn unter Verwendung eines Verdichtungstopfs mit 150 mm Durchmesser (Topf B) durchgeführt. Dies erfolgte sowohl unter Verwendung des Proctorverdichters, als auch unter Einsatz eines Vibrationshammers mit 6,3 Joule Schlagenergie sowie mit einem Vibrationshammer mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule. Zusätzlich

wurde die Kornzertrümmerung, die durch die Verdichtungsapparaturen hervorgerufen wurden, mittels Siebungen nach der Probenherstellung über den Verfeinerungsgrad nach Schreiber, berechnet. Aufbauend auf das Forschungsvorhaben FE-Nr. 06.0099/2012/EGB sollte über das vierte Arbeitspaket die These verifiziert werden, dass die Verdichtung von ungebundenen Baustoffgemischen mit einem Wassergehalt von ca. 3 M.-% (natürliche und industrielle Baustoffgemische) beziehungsweise 5 M.-% (RC- und HMVA-Baustoffgemische) vergleichbare Trockendichten entsprechend einer Verdichtung mit einem optimalen Wassergehalt liefert.

In den Arbeitspaketen 3 und 4 wurden aufgrund der Größe des Verdichtungstopfs (\varnothing 150 mm) nur Korngrößen bis 32 mm verwendet und Überkornanteile wurden 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 können. Zudem sollte in diesem Zusammenhang auch der Einfluss der Verdichtungsverfahren beziehungsweise 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 Kornverteilungen nach der Probenherstellung bearbeitet. Anhand der aktuellen Literaturstudie, der umfangreichen Laborversuche und dessen Ergebnissen sowie der Erfahrungen, die

sich beide Prüfinstitute durch das vergangene als auch aktuelle Forschungsprojekt angeeignet haben, sollte das abschließende sechste Arbeitspaket in die Formulierung eines Entwurfs einer TP Gestein-StB münden. 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 beschrieben werden.

4 Vorstellung der verwendeten Verdichtungsapparaturen

Die jeweiligen Verdichtungsversuche wurden unter Verwendung des Proctorverdichters als auch unter Einsatz des Vibrationshammers aus dem Vorgängerprojekt mit der Kennzeichnung Bosch GSH 5 CE durchgeführt. Zusätzliche Untersuchungen umfassten Verdichtungsversuche mit einem weiteren Schlagbohrer (beziehungsweise Vibrationshammer) mit der Kennzeichnung Bosch GSH 11 E, der mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule in etwa die doppelte Schlagenergie aufwendet wie der Vibrationshammer, der im Vorgängerprojekt verwendet wurde. Darstellungen der drei verwendeten Verdichtungsapparaturen zeigen Bilder 1 bis 3.



Bild 1: Proctorverdichter



Bild 2: Vibrationshammer A



Bild 3: Vibrationshammer B

5 Untersuchungsergebnisse

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde eine Literaturstudie durchgeführt, über die dargelegt werden konnte, dass die Fragestellungen des Forschungsvorhabens bezüglich 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 Forschungsprojekts lieferten. Primäre Elemente dabei waren die Verdichtung in einem 11-Zoll-Probentopf mittels Vibrations-

hammer nach Drenevich, Evans und Prochaska und der Verfeinerungsgrad nach Schreiber. Entsprechend wurden diese Ansätze in das Forschungsvorhaben integriert.

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 des 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 %). Bezüglich 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 aufgestellte These, dass Baustoffgemische mit einem festgelegten Wassergehalt von 3 M.-% (natürliche und industrielle Baustoffgemische) beziehungsweise 5 M.-% (RC- und HMVA-Baustoffgemische) 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 Wasserdrainage während des Verdichtungsversuchs und eine Reduktion der Einzelprobenanzahl. Zwischen der Vorgehensweise einer Verdichtung mit optimalem Wassergehalt und einem festgelegten Wassergehalt konnten 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 Wassergehalts für das Vibrationshammerverfahren wurde eine Ergebniszunahme bei der Trockendichte von gemittelt ca. 6,5 % (Vibrationshammervariante A mit 8,3 Joule) beziehungsweise 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 bezüglich der Kornzertrümmerung ein. Unter Einsatz der Vibrationshammervariante B mit einer Schlagenergie von 16,8 Joule wurde nahezu durchweg eine stärkere Zunahme der Kornzertrümmerung belegt.

Abschließend wurde untersucht, wie eine Baustoffmischverdichtung 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 Probenkörpern erzielt werden und ob die potenziell auftretende Kornzertrümmerung eventuell 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 bezüglich der Trockendichte prozentual 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- beziehungsweise Vibrationshammer hergestellten Probenkörper zeigten überwiegend einen Infiltrationsbeiwert oberhalb, zum Teil weit oberhalb, von 10^{-6} m/s. Da die Ergebnisschwankungen der Infiltrationsresultate, die mit Proctor- beziehungsweise Vibrationshammer 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 mod. Proctorverfahren bedingt während der Probenkörperherstellung 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 beziehungsweise berechneten Verfeinerungsgrade konnte kein direkter mathematischer Zusammenhang zwischen An- oder Abstieg des Infiltrationsbeiwerts und An- oder Abstieg an Kornzertrümmerung nachgewiesen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsprojekt sollte letztlich dazu beitragen, das Vibrationshammerverfahren als alternatives performance-orientiertes Laborverdichtungsverfahren für ungebundene Baustoffgemische zu fördern.

Zusammenfassend lässt sich aus dem durchgeführten Forschungsvorhaben festhalten, dass das Vibrationshammerverfahren nach DIN EN 13286-4 weiterhin eine gute Alternative zum Proctorverfahren darstellt. Es konnten weiterführende Fragestellungen beantwortet und daraus folgend ein Entwurf für eine TP Gestein-StB zur Probenherstellung von Prüfkörpern im 250-mm-Verdichtungstopf zum Beispiel für Infiltrationsversuche abgefasst werden. Der Aspekt einer Verdichtung mit einem festgelegten Wassergehalt lässt sich durchaus weiterverfolgen. Zwar sind damit eine Zunahme an Trockendichte und Kornzertrümmerung verbunden, jedoch konnte nachgewiesen werden, dass die

Kornzertrümmerung nur eine untergeordnete Bedeutung für den Infiltrationsbeiwert der untersuchten Baustoffgemische hat.

Weiterführende Untersuchungen zur Eignung des Vibrationshammerverfahrens auf Laborebene sollten unbedingt den Einfluss von Randumläufigkeiten während eines Infiltrationsversuchs beinhalten. Ebenso wären Versuche zur auftretenden Kornzertrümmerung an idealisierten Standardsieblinien denkbar. Wie dargestellt, besteht das Problem, das die aktuelle Bezugsgröße (Proctortrockendichte) des Verdichtungsgrads 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 Feldeergebnissen anbieten. Hier müssten aus realen Baumaßnahmen die erzielte Trockendichte beziehungsweise der Verdichtungsgrad und deren Infiltrationsbeiwerte bestimmt werden. In Folge müssten diese vergleichend zum Proctorverfahren mit dem Vibrationshammerverfahren an den gleichen ungebundenen Baustoffgemischen möglichst reproduziert werden, um die Eignung des Vibrationshammerverfahrens als durchweg in-situ-konformes Laborprüfverfahren zu belegen.

7 Literatur

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

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

DIN EN 13286-4:2003-07: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 4: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationshammer

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB, Ausgabe 2004 / Fassung 2018

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

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.

DRENEVICH, V. P., EVANS A. C., PROCHASKA, A. B.: A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils, Purdue University, 2007