

FE 15676 N/1

„Festigkeitsprüfung an Baustoffgemischen für Tragschichten ohne
Bindemittel“

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg
Dipl.-Ing. Christian Gottaut

Kurzfassung – Abstract

Festigkeitsprüfung an Baustoffgemischen für Tragschichten ohne Bindemittel.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Eignung weniger fester Gesteinskörnungen (SZ > 28) für eine Verwendung in Tragschichten ohne Bindemittel zu untersuchen.

Hierzu wurde der Einfluss der Festigkeit und der Kornabstufung der Gesteinskörnung in Festigkeits- und Verdichtungsuntersuchungen ermittelt. Deutlich traten einige grundlegende Verfeinerungsmechanismen hervor. So verfeinerten sich grobe Gesteinskörnungsgemische wesentlich stärker als feine. Häufig trat dabei auch eine Verstetigung der Korngrößenverteilung auf. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen klassischen Festigkeitswerten (SZ, LA) und den auftretenden Kornverfeinerungen konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

Die Eignung der Gesteinskörnungsgemische zur Verwendung in Tragschichten ohne Bindemittel wurde durch performance-orientierte Prüfungen untersucht. Durchgeführt wurden CBR-Versuche nach Proctorverdichtung, vor und nach Frostbeanspruchung, sowie Frosthebungs- und Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen. Die Tragfähigkeit (CBR) konnte in den meisten Fällen als unkritisch eingestuft werden, das Frosthebungsverhalten nach heutigem Kenntnisstand als teilweise auffällig, aber insgesamt zumeist tolerierbar. Dabei zeigte vor allem der rezyklierte Betonaufbruch auffällig hohe Hebungen. Bautechnisch kritisch einzustufen sind die erreichten Wasserdurchlässigkeiten. Sie waren bei fast allen Gemischen zu gering.

Vergleichende Untersuchungen in-situ halfen bei der Einordnung der Laborergebnisse. Mittels verschiedener Varianten der Proctorprüfung wurde versucht, die Einbausituation auf Baustellen hinsichtlich Trockendichte, Wasserdurchlässigkeit und Kornverfeinerung im Labor nachzustellen. Ein eindeutiger Zusammenhang konnte dabei zwar nicht gefunden werden. Tendenziell zeigte aber der modifizierte Proctorversuch die bessere Übereinstimmungen mit den in-situ Untersuchungen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhalt

1	Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung	1
1.1	Einleitung.....	1
1.2	Problemstellung.....	1
1.3	Zielsetzung der Untersuchungen.....	2
2	Stand des Wissens	3
2.1	Verdichtung ungebundener Schichten	3
2.2	Spannungs-Verformungsverhalten ungebundener Schichten	5
2.3	Einfluss der Korngrößenverteilung auf das Verdichtungsverhalten	8
2.4	Kornverfeinerung von Gesteinskörnungsgemischen bei mechanischer Verdichtung	10
2.5	Wasserdurchlässigkeit.....	11
2.6	Frostwiderstand.....	15
3	Untersuchungsprogramm	19
3.1	Untersuchungsprogramm	19
3.2	Untersuchungsmaterialien	22
3.3	In situ Untersuchungen (Schritt D)	27
4	Beschreibung der Prüfverfahren	27
4.1	Prüfverfahren der Untersuchungsstufe A.....	27
4.2	Prüfverfahren der Untersuchungsstufe B.....	28
4.3	Prüfverfahren der Untersuchungsstufe C.....	30
4.4	Prüfverfahren der Untersuchungsstufe D.....	35
5	Untersuchungsergebnisse.....	38
5.1	Ergebnisse der Untersuchungsstufe A.....	38
5.2	Ergebnisse der Untersuchungsstufe B.....	40
5.3	Ergebnisse der Untersuchungsstufe C.....	57
6	Diskussion der Ergebnisse	60
6.1	Diskussion der Ergebnisse der Untersuchungsstufe A	60

6.2	Diskussion der Ergebnisse der Untersuchungsstufe B	61
6.3	Diskussion der Ergebnisse der Untersuchungsstufe C	69
6.4	Diskussion der Ergebnisse der Untersuchungsstufe D	72
7	Zusammenfassung und Ausblick	75
8	Literatur.....	80
9	Anhang.....	86
9.1	Teil A: Korngrößenverteilungen	86
9.2	Teil B: Frosthebungsversuche	109
9.3	Teil C: In situ Untersuchungen	116

1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Aufgrund schwindender Gesteinsressourcen und damit einhergehenden Kostensteigerungen, werden Forderungen nach einer nachhaltigen und hochwertigen Wiederverwertung gebrauchter Gesteinskörnungen lauter. Gerade in Bezug auf Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) gewinnt das Thema Recycling damit zunehmend an Bedeutung. Für eine kosteneffiziente ToB kommen jedoch auch industrielle Nebenprodukte und schwächere Natursteine in Frage, denen eine höherwertige Nutzung verwehrt bleibt. Auch im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) (1) wird die industrielle Wiederverwendung bzw. -verwertung industrieller Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe gefordert. Bereits seit einigen Jahren werden diese Baustoffe in großen Mengen im Ober- und Unterbau eingesetzt. So fielen im Jahr 2009 je Einwohner durchschnittlich 3 t Bodenaushub, Bauschutt und Straßenaufbruch an. Hiervon wurden rund 80 % wiederverwertet, Straßenausbaustoffe sogar zu 100 % (2).

Zur Verwertung dieser Gesteinskörnungen müssen im Wesentlichen die Anforderungen erfüllt werden, die auch an natürliche Gesteinskörnungen gestellt werden. Rezyklierte Gesteinskörnungen und einige industrielle Nebenprodukte erreichen aber häufig nicht die Kornfestigkeit gebräuchlicher natürlicher Gesteinskörnungen und können daher nicht in ToB verwertet werden.

1.2 Problemstellung

Die Festigkeit von Gesteinskörnungen wird heute mittels dynamischer Prüfverfahren an Einzelkörnungen bzw. an enggestuften Kornbereichen bestimmt. Hierbei kommt zurzeit sowohl der Schlagzertrümmerungsversuch, als auch die international weiter verbreitete Los-Angeles-Prüfung zum Einsatz. Beide Verfahren sind in der Norm DIN EN 1097-2: Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung (3) beschrieben und beurteilen einen eng begrenzten Kornbereich, z. B. 8/12,5 mm (SZ_{8/12,5}) oder 10/14 mm (LA_{10/14}).

Einflüsse der feineren Gesteinskörnungen in einem Gesteinskörnungsgemisch werden daher nicht berücksichtigt. Unklar ist, in wie weit das Feinkorn bzw. die Tragstruktur des kompletten Kornhaufwerks einen Einfluss auf das Festigkeitsverhalten ungebundener Schichten hat.

Bei der schlagenden Beanspruchung eines eng gestuften, hohlraumreichen Kornhaufwerks werden die aufgebrachten Kräfte über wenige Kontaktpunkte in die Kornstruktur eingeleitet. Daher ist die Einzelkornfestigkeit die dominierende Größe für das Maß der Kornverfeinerung. In der Praxis werden im Allgemeinen keine ungebundenen Einzel-

korngemische eingebaut, so dass die Praxisrelevanz dieser Prüfmethode für ungebundene Baustoffgemische in Frage steht.

Aus wissenschaftlich-technischer Sicht besteht damit die Notwendigkeit, Aussagen über Festigkeiten und Kornverfeinerungen bei dynamischer Belastung nicht nur an Einzelkörnungen, sondern auch am praxisnahen gesamten Korngemisch durchzuführen, um damit Angaben über das Verhalten der Gesteinskörner im Haufwerksverbund machen zu können.

Grundsätzlich wurde der in den 1930er Jahren entwickelte Proctorversuch zur Festlegung optimaler Verdichtungsbedingungen und zur Ermittlung der maximal erreichbaren Verdichtung entwickelt. Ob der Proctorversuch auch für die Festlegung von Festigkeitskriterien für Baustoffgemische herangezogen werden kann, wurde bisher nur wenig untersucht.

1.3 Zielsetzung der Untersuchungen

Ziel der Forschungsarbeit ist, das bisher geltende Festigkeitskriterium an einzelnen Kornklassen mit einem praxisnahen Prüfverfahren am gesamten Korngemisch zu ergänzen, um gegebenenfalls die Kornzertrümmerung und die Zunahme des Feinkorns während der Verdichtung auf der Baustelle vorhersagen zu können. Damit ließe sich auch die beim Einbau entstehende Veränderung der Korngrößenverteilung eines heterogen zusammengesetzten RC-Baustoffes bereits im Rahmen eines Eignungsnachweises im Labor abschätzen. Dieser Nachweis vor der Bauausführung könnte die Akzeptanz solcher Baustoffe nachhaltig verbessern, so dass hiermit ein wesentlicher Beitrag zur hochwertigen Verwertung von Altbaustoffen geleistet würde. Anschließend werden die – unter anderem aus der Kornverfeinerung entstehenden – Auswirkungen auf den Verformungswiderstand, die Frostepfindlichkeit und die Wasserdurchlässigkeit an ausgewählten Baustoffgemischen untersucht, um damit negative Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften zu verhindern.

Schließlich soll eine kritische Gegenüberstellung der Forschungsergebnisse und der konventionellen Festlegung für den Schlagerzertrümmerungswert der Einzelkörnungen in einer Schottertragschicht vorgenommen werden. Die erzielten Ergebnisse sollen eine Grundlage für die Diskussion über Anforderungen und Prüfmethoden für einen Einsatz schwächerer Gesteinskörnungen in Tragschichten ohne Bindemittel liefern.

2 Stand des Wissens

2.1 Verdichtung ungebundener Schichten

Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Straßen der landschaftlichen Topographie folgend gebaut, um Erdbewegungen auf ein Minimum zu limitieren. Loses Material wurde nicht verdichtet, sondern lediglich abgeschüttet, die Schüttung setzte sich im Laufe der Zeit von allein. Das Pflastern oder das Aufbringen einer Tragschicht wurde erst vorgenommen, wenn das Schüttgut bereits ausreichend Zeit hatte, sich zu setzen. Der Zeitpunkt des Abschlusses der Setzung wurde nicht ermittelt (4).

Mit der Zunahme motorisierter Fahrzeuge wurde die Belastungsgrenze dieser Straßen erreicht. Durch die erhöhte Belastung nahmen Aufbrüche und Risse zu, so dass Befestigungen mit höherer Tragfähigkeit notwendig wurden. Laut A. W. Johnson und R. J. Sallberg (5) fand sich für die Verwendung ungebundener Materialien eine Lösung, indem die ungebundenen Schichten befeuchtet eingebracht wurden. Neben einer Verdichtung während des Einbaues durch die für die Verteilung zuständigen schleppenden Geräte erfolgte zudem eine nachfolgende Verdichtung mittels Walzen.

Heutzutage ist die Relevanz einer optimalen Verdichtung des ungebundenen Unterbaus sowohl wissenschaftlich, als auch in der Praxis unumstritten. Wichtige Einflussfaktoren wie ein optimaler Wassergehalt, gute Kornabstufungen und eine ausreichende Verdichtungsenergie sind Stand der Technik. Zudem existieren detaillierte Modellvorstellungen, die den Aufbau, die Kräfteverteilungen und die Versagensmechanismen innerhalb eines Kornhaufwerkes beschreiben.

Definiert ist die Verdichtung als Erhöhung der Trockendichte und somit auch einer Verminderung des Porenvolumens von Böden bzw. Gesteinskörnungsgemischen (6) durch eine künstliche, mechanische Einwirkung ohne eine wesentliche Veränderung der Korngrößenverteilung (7). Neben einer Erhöhung der Lagerungsdichte hat die Verdichtung vor allem eine homogene Stabilisierung der ungebundenen Schichten zum Ziel. Damit einher geht eine Erhöhung der Tragfähigkeit, des Verformungswiderstandes und eine erhöhte Resistenz gegen Umwelteinflüsse (8) (9). Der Verdichtungsprozess kann in Ordnungs-, Transport-, Ausscheidungs- (Luft und Wasser) und Destruktionsprozesse unterteilt werden, die jeweils einen bestimmten Anteil am gesamten Verdichtungsprozess haben (10). Die Verdichtung wird maßgeblich von folgenden Größen beeinflusst (9) (11):

- Gesteinsart
- Korngrößenverteilung
- Kornform und -rauigkeit
- Wassergehalt
- Verdichtungsart (statisch, stoßend oder vibrierend)
- geleistete Verdichtungsarbeit
- Anzahl der Verdichtungsbehandlungen (z. B. Schlagzahl, Einwirkungs-dauer, etc.)

“In situ“ hat zudem das Verformungsverhalten der Unterlage (Widerlager) einen entscheidenden Einfluss auf das Verdichtungsergebnis. Ist die Verformbarkeit der Unterlage zu groß, kann unter Umständen das gewünschte Verdichtungsziel nicht erreicht werden.

Im Labor kommen weitere Faktoren hinzu (12):

- Verdichtungsenergie und Form ihrer Einwirkung
- Auflagerbedingungen für die Prüfform
- Gefäßgröße und -form
- Vorbereitung des Versuchsmaterials
- Prüfmethode zur Wassergehalts- Dichtebestimmung

Großen Einfluss haben die granulatorischen Eigenschaften des Korns. Den größten Einfluss auf die erreichbare Verdichtung haben jedoch die Verdichtungsarbeit und -art (10) (13).

Anfangs weisen die Gesteinskörnungsgemische ein ausgeprägt plastisch-elastisches Verdichtungsverhalten auf, im Laufe der Verdichtung nimmt der plastische Anteil (Kornumlagerungen und Kornverfeinerungen) stark ab, so dass am Ende nahezu die gesamte Verdichtungsenergie durch elastische Verformungen aufgenommen wird. Durch Zunahme der Lagerungsdichte vermehren sich die Kornkontakte und die Kontaktspannungen nehmen ab. Die Steifigkeit erhöht sich somit. Nach Güttler (14) führen dabei schon geringe Dichteänderungen zu starken Steifigkeitsänderungen.

Beim Verdichten ungebundener Schichten spielt der verwendete Wassergehalt eine äußerst wichtige Rolle. Zu geringe oder zu hohe Wassergehalte haben einen schädlichen Einfluss auf das Verdichtungsergebnis (15). Bei einem zu niedrigen Wassergehalt sind die Feuchtigkeitsfilme sehr dünn und es kommt zu einem hohen Verschiebewiderstand zwischen den Körnern. Verantwortlich dafür sind die hohen kohäsiven Kräfte der Wasserfilme. Wenn der Wassergehalt erhöht wird, werden die Filme dicker und die Kohäsionskräfte lassen nach, dies ermöglicht dem Wasserfilm als Schmiermittel zu dienen.

Wenn der optimale Feuchtigkeitsgehalt überschritten wird, verursacht die Zunahme der Wasserfilmdicke eine entsprechende Zunahme in der Separierung der Körner und eine Abnahme in der Dichte. Auch können geringe Mengen Luft durch das Wasser eingeschlossen werden, was zu einer zusätzlich Reduktion der Dichte führt. In seiner Verdichtungstheorie verankerte Arque (16), dass es für alle Materialien in einem losen Zustand einen kritischen Feuchtigkeitsgehalt gibt, an dem die Kohäsion einen maximalen Wert erreicht. Arque's Theorie konnte durch spezifische Untersuchungen zu dieser Thematik von Tjurnbull und Foster (17) an der geführten Zerkleinerungs-Maschine; Lee und Suedkamp (18) an Tönen, Sand, Mischungen von Sand und Ton, und Schiefer-ton; und Poulos (19) an mittlerem Sand (schwach kiesig) bestätigt werden. Sie zeigten, dass ein völlig trockenes Material sehr häufig zu einer höheren Dichte zusammengepresst werden kann, als ein Material, das einen zu niedrigen Wassergehalt hat (4).

In situ werden vor allem schwere statische Walzen, Vibrationswalzen oder auch Gummiradwalzen zur Verdichtung eingesetzt. Vor allem Vibrationswalzen können bei übermäßiger Verdichtung zur Kornzertrümmerung führen. Während bei den ersten beiden Walzübergängen zunächst noch Kornumlagerungen stattfinden, da noch ausreichend freie Hohlräume vorhanden sind (siehe auch Bild 2-4), folgt anschließend die Phase der Kornzertrümmerung (20).

Häufig werden zum Erzielen hoher Verformungsmodule die ungebundenen Tragschichten „überverdichtet“ (21). Durch zahlreiche Walzübergänge mit schwereren Walzen werden höhere Lagerungsdichten (z. B. ein D_{pr} von 103 % statt 97 %) erzielt. Dies bedeutet eine höhere Verformungsbeständigkeit (22) und somit zunächst eine verbesserte Gebrauchstauglichkeit (23). Jedoch wird häufig gerade in der oberen verdichteten Schichten eine erhöhte Kornverfeinerung festgestellt. Diese kann schnell zu einer Verminderung der Wasserdurchlässigkeit (siehe Kapitel 2.5) und dadurch auch zu einer erhöhten Frostempfindlichkeit (siehe Kapitel 2.6) führen.

Um die komplexe Wirkung der Verdichtungsgeräte und Baustellenfahrzeuge im Labor näherungsweise zu simulieren, erlaubt der Proctorversuch eine Reihe von Variationen bei den Prüfbedingungen. Langjährige vergleichende Versuchsreihen von Brandle (20) haben ergeben, dass die erhöhte Verdichtungsarbeit des modifizierten Proctorversuchs zutreffende Werte für die Kornverfeinerung liefert.

2.2 Spannungs-Verformungsverhalten ungebundener Schichten

Der Widerstand, den Gesteinskörnungsgemische aufgetragenen statischen oder dynamischen Lasten entgegen bringen, hängt in starkem Maße von den im Gemisch herrschenden Spannungen ab. Bei einem niedrigen Beanspruchungsniveau nimmt bei stei-

gender Spannung auch die Steifigkeit des Materials zu (verfestigender Bereich). Bei hohen Beanspruchungen hingegen nimmt die Steifigkeit ab, das Gemisch befindet sich im entfestigten Bereich. Hohe plastische Verformungen, bis hin zum Versagen des Bodens sind die Folge. Hingegen ist im verfestigten Bereich die plastische Verformung gering, die elastische jedoch verhältnismäßig hoch. Bild 2-1 verdeutlicht den Zusammenhang exemplarisch.

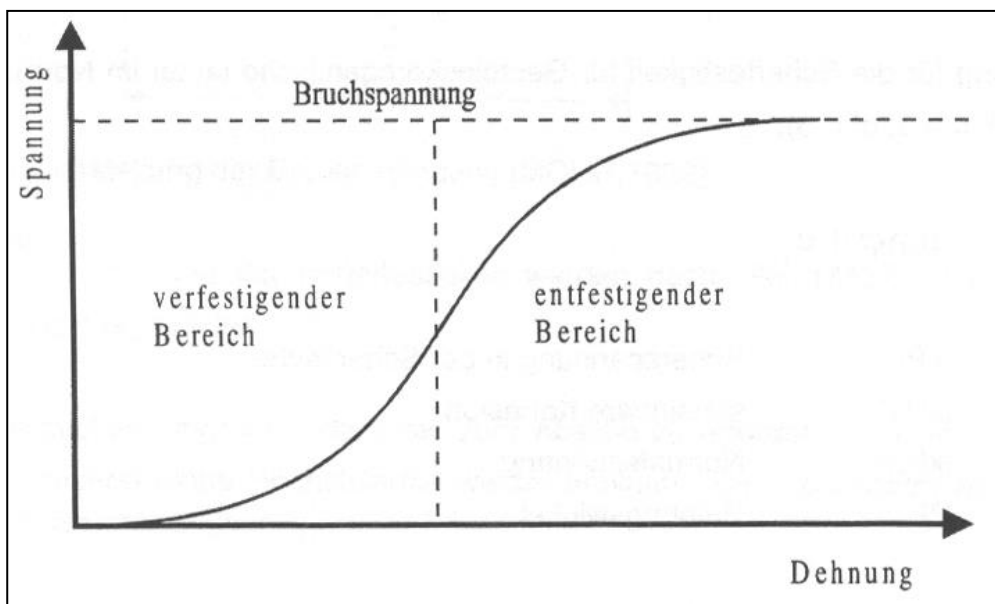


Bild 2-1: Spannungs-Verformungsverhalten unter statischer Last (24)

Neben dem Spannungsniveau beeinflussen aber auch die Gesteinsfestigkeit, der Verdichtungszustand, die Kornform, der Wassergehalt, die Kornabstufung, die Anzahl und Frequenz der Lastwechsel und viele weitere Faktoren das Verformungsverhalten ungebundener Schichten (24). Gerade aufgrund der vielen Parameter und dem grundsätzlichen Problem konstante Versuchsbedingungen sicher zu stellen, ist es bislang nicht gelungen ein allgemeingültiges Materialgesetz herzuleiten. Vielfach widersprechen sich die gefundenen Materialgesetze oder sie gelten nur unter sehr stark eingeschränkten Prüfbedingungen (25).

Zur Erfassung des Spannungs-Verformungsverhaltens wurden verschiedene Modellvorstellungen entwickelt, die das elastische, plastische und auch elastoplastische Verhalten ungebundener Gesteinskörnungsgemische beschreiben. Die elastischen Anteile werden analog zum HOOKschen Gesetz über einen E-Modul und einer Querdehnzahl (beide in Abhängigkeit von der herrschenden Hauptspannung) beschrieben. Es existie-

ren Ansätze wie das BOYCE-Modell (26), das K-Theta-Modell (27) oder das E- μ -Modell (14).

Das elastische Verformungsverhalten allein beschreibt die Vorgänge in ungebundenen Schichten häufig nur ungenügend. Gerade um Versagensmechanismen modellieren zu können, ist das plastische Verformungsverhalten unter dynamischen Lasten von großer Bedeutung. Ein Ansatz der beides beschreibt, ist die SHAKEDOWN-Theorie. Sie teilt das Verdichtungsverhalten in verschiedene Bereiche auf (Bild 2-2), die sich nach unterschiedlichen, voneinander unabhängigen Gesetzmäßigkeiten verhalten.

Der erste Bereich (Bereich A) wird elastischer SHAKEDOWN-Bereich genannt. In ihm klingen die anfänglichen plastischen Dehnungsraten bereits nach wenigen Lastwechseln ab und die Verformungen erreichen einen Endzustand, der sich je nach Belastung nur noch um einen elastischen Anteil ändert. Die Höhe der Verformung ist dann nur von der herrschenden Spannung, nicht aber von der Anzahl der Lastwechsel abhängig. Sollten die sich einpendelnden plastischen Verformungen tolerierbar sein, so ist eine derartige Beanspruchung für den Straßenaufbau erträglich.

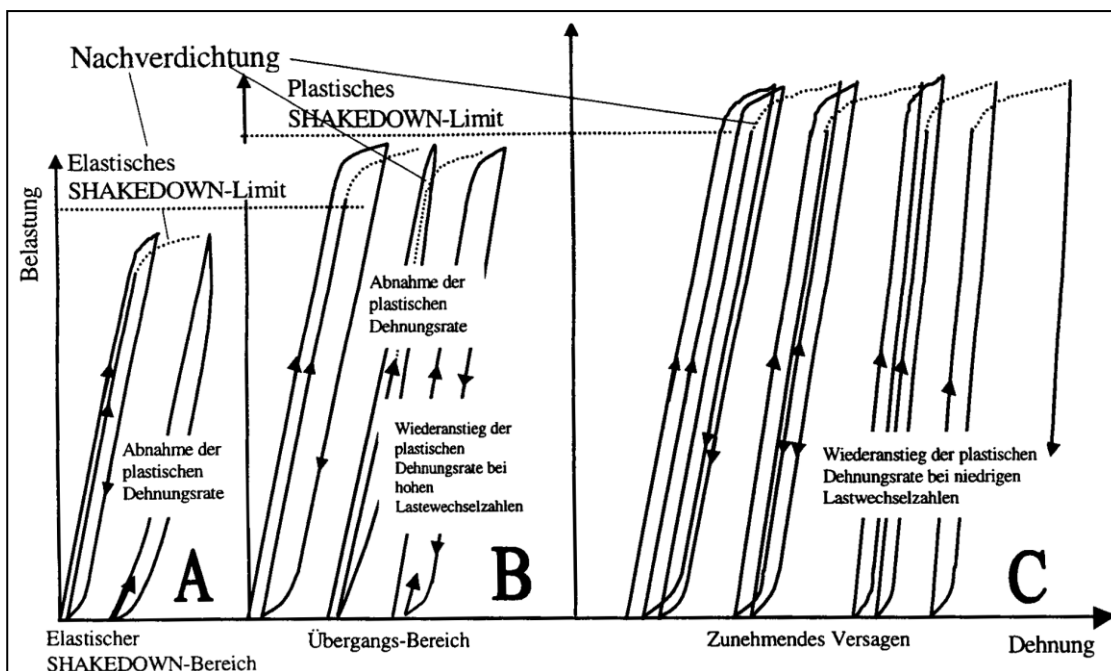


Bild 2-2: Verhalten von Gesteinskörnungsgemischen bei dynamischen Druckbelastungen (24)

Übersteigen die Belastungen das elastische SHAKEDOWN-Limit, so gerät das Gesteinskörnungsgemisch in einen Übergangsbereich (Bereich B), der dadurch gekennzeichnet ist, dass die plastischen Dehnungen eine konstante Rate erreichen. Die Verformungen nehmen immer weiter zu, allerdings nicht progressiv, sondern konstant.

Nach einer entsprechend hohen Anzahl von Lastwechseln ist ein Versagen des Straßenaufbaus zu vermuten.

Im letzten Bereich C – zunehmendes Versagen – klingt die plastische Dehnungsrate mit steigenden Lastwechselzahlen nur langsam ab. Je näher sich der Beanspruchungszustand dem Bruchzustand nähert, desto langsamer nimmt die Dehnungsrate ab. Schlussendlich steigt die Dehnungsrate schlagartig an, der Bruchzustand ist erreicht (Bild 2-3). Belastungen in dieser Größenordnung sind bei einem Straßenaufbau immer zu vermeiden.

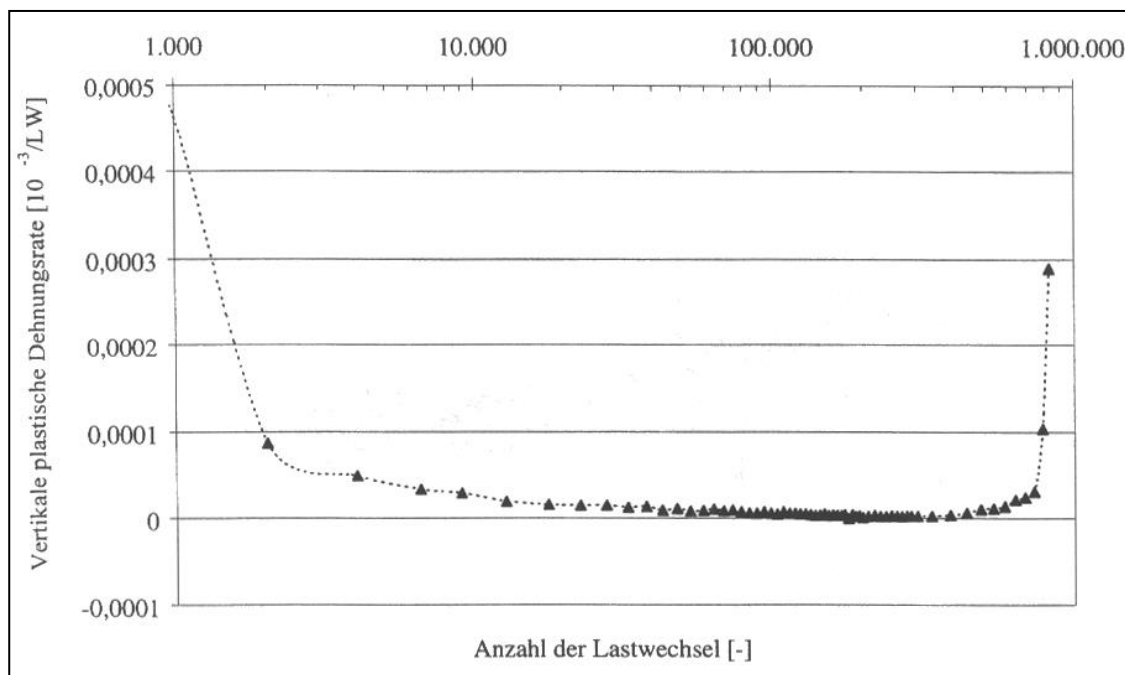


Bild 2-3: Verlauf der plastischen Dehnungsrate (28)

2.3 Einfluss der Korngrößenverteilung auf das Verdichtungsverhalten

Der Einfluss der Korngrößenverteilung auf das Verformungsverhalten ist nur wenig erforscht. Erste Untersuchungen belegen, dass die geringsten plastischen Verformungen bei Materialien auftreten, die eine hohe Lagerungsdichte erreichen (29).

Eine einfache, aber zur Verdeutlichung der erreichbaren Lagerungsdichte, gut geeignete Modelldarstellung, ist das idealisierte Kugelmodell. Die einzelne Gesteinskornform wird hier als kugelförmig idealisiert. Wird das gegenüber dem Gesamtaufwerk geringe Kornvolumen beachtet und eine annähernd gleichmäßige Verteilung angenommen, so ergeben sich die in Bild 2-4 beispielhaft dargestellten Möglichkeiten einer regelmäßigen Anordnung gleich großer Kugeln (30).

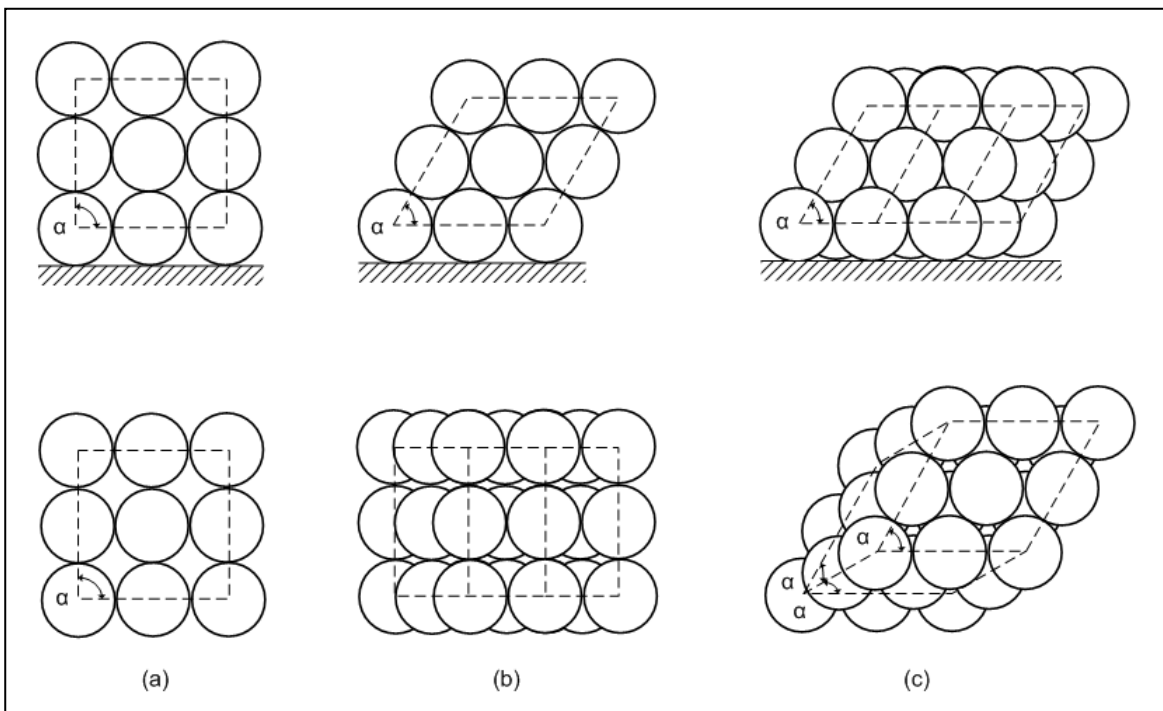


Bild 2-4: Regelmäßige Anordnung gleich großer Kugeln

Wird das in Bild 2-4 dargestellte kubische System auf der Oberseite belastet und ein seitliches Ausweichen weitestgehend verhindert, optimieren sich Lagerungsdichte und Hohlraumgehalt durch ein räumliches Verschieben der Kugelschichten. Das kubische System wird zunächst in eine orthorombische (b) und dann in eine rhomboedrische (c) Stützung überführt. Einkörnige Gemische weisen in der dichtesten Lagerung Hohlraumgehalte von 26 Vol.-% auf, in der lockersten Lagerung 47 Vol.-%.

Bei einer ausreichend hohen Belastung kommt es nach diesen plastischen Verformungen durch Umlagerung nur dann zu weiteren plastischen Verformungen, wenn eine Kornverfeinerungen stattfindet. Zur Zerstörung eines Kornes ist es notwendig, dessen Zug-, Biegezug-, Druck- oder Scherfestigkeit zu überschreiten. Die von der Oberseite eines Kornhaufwerkes angreifenden Kräfte werden über Kontaktflächen der Einzelkörner gegeneinander abgetragen. An den Berührungsflächen treten Druck- und Tangentialkräfte auf, die zu Druck-, Zug-, Biegezug- und Scherspannungen führen. Auch dies kann am Kugelmodell gut veranschaulicht werden (Bild 2-5).

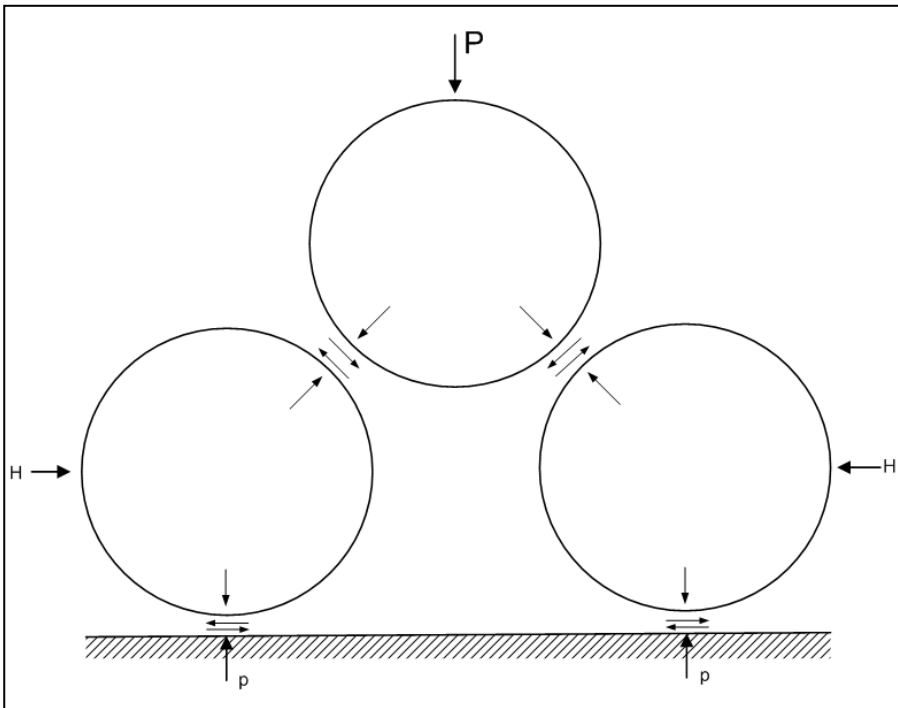


Bild 2-5: Verteilung von Druck- und Tangentialkräften

Seit langem ist bekannt, dass die schadlos aufnehmbaren Druckkräfte auf ein Gestein wesentlich höher sind, als deren Festigkeit gegenüber Zug-, Biegezug- und Scherspannungen (31).

2.4 Kornverfeinerung von Gesteinskörnungsgemischen bei mechanischer Verdichtung

Infolge der Druck- und Scherbeanspruchungen während des Verdichtens können Kornverfeinerungen im Gesteinskörnungsgemisch auftreten. Verursacht wird dies durch Kantenabplatzungen und Brüche an den Schwachstellen der Gesteinskörner (z.B. Mikrorisse durch den Brechvorgang). Die Festigkeit eines Gesteins wird durch die resultierende Kornverfeinerung definiert. Dazu werden die Korngrößenverteilungen vor und nach Beanspruchung verglichen. Als Prüfverfahren kommen zum einen rein schlagende Verfahren, wie z.B. der Schlagzertrümmerungsversuch (3) zum anderen auch Prüfverfahren mit einer kombinierten schlagenden, stoßenden und reibenden Wirkung, wie z. B. die Los-Angeles-Prüfung (3) oder die Prallprüfung in der Kugelmühle nach TP Gestein-StB Teil 5.3.2 (32) zum Einsatz.

Schreiber (33) definierte mit dem Verfeinerungsgrad eine allgemein vergleichbare Maßzahl zum Erfassen und Quantifizieren einer Kornverfeinerung. Dazu bezieht er die aktu-

elle Verfeinerung eines Gesteinskörnungsgemisches auf die maximal erreichbare Verfeinerung (alle Siebdurchgänge 100 %, abzüglich der anfänglichen Kornverteilung).

Die Berechnung des Verfeinerungsgrades V erfolgt nach folgender Formel:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^k D_i - \sum_{i=1}^k d_i}{k * 100 - \sum_{i=1}^k d_i} * 100 \quad [-]$$

mit:

d_i = Siebdurchgang vor Beanspruchung

D_i = Siebdurchgang nach Beanspruchung

k = Anzahl der Fraktionen

Die Berechnung des Schlagzertrümmerungswertes stellt einen Sonderfall dieser Formel dar. Unterschiedlich ist jedoch die Dimension, während der Verfeinerungsgrad eine dimensionslose Größe ist, wird der Schlagzertrümmerungswert in M.-% angegeben (10).

2.5 Wasserdurchlässigkeit

2.5.1 Einflussfaktoren

Als Wasserdurchlässigkeit wird generell der Widerstand des Bodens auf das ihn durchströmende Wasser charakterisiert. Der Fließwiderstand ist der Kehrwert der Wasserdurchlässigkeit und bezeichnet den Widerstand, den die Schicht dem strömenden Wasser entgegensetzt. Ein entscheidender Einflussfaktor ist dabei die Korngrößenverteilung der Schicht (34). Feinkörnige Schichten sind in der Regel schwächer durchlässig, grobkörnige dagegen stärker. Weitere granulatorische Einflussfaktoren sind vor allem der Aufbau und die Verdichtung des Schichtengefüges sowie dessen Korngrößenverteilung und Korngemetrie. Sie beeinflussen die Anzahl, Größe und Kontinuität der Poren maßgeblich. Bei vollständiger Sättigung hängt die Durchlässigkeit einer ungebundenen Schicht fast ausschließlich von dem Porenraum ab. Mit einer steigenden Anzahl großer kontinuierlicher Poren steigt die Wasserdurchlässigkeit stetig.

Nimmt der Wassergehalt ab, entleeren sich die größten Poren zuerst und die Wasserbewegung wird auf immer kleinere Poren und zuletzt auf das Adsorptionswasser beschränkt, dies verringert die Durchlässigkeit. Bei nicht wassergesättigten Böden gewinnen der Wassergehalt und die zugehörige Saugspannung bedeutend an Einfluss.

Zur Berechnung von Wasserströmungen in der konventionellen Bodenmechanik wird die Filtergeschwindigkeit von Darcy verwendet. Es drückt einen linearen Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Gefälle i und der dazugehörigen Filtergeschwindigkeit v aus. Gekennzeichnet wird die Wasserdurchlässigkeit durch den Proportionalitätsfaktor/Durchlässigkeitsbeiwert k . Dieser ist definiert als die Geschwindigkeit der Wasserbewegung bei einem Potentialgefälle i von eins (35).

$$Q = k * A * i \text{ [m}^3\text{/s]}$$

mit

$$k = \frac{v}{i} \text{ [-]}$$

$$v = \frac{Q}{A} \text{ [m/s]}$$

i = hydraulisches Gefälle [-]

v = Filtergeschwindigkeit [m/s]

Q = Durchflussmenge [m³/s]

A = Fließquerschnitt [m²]

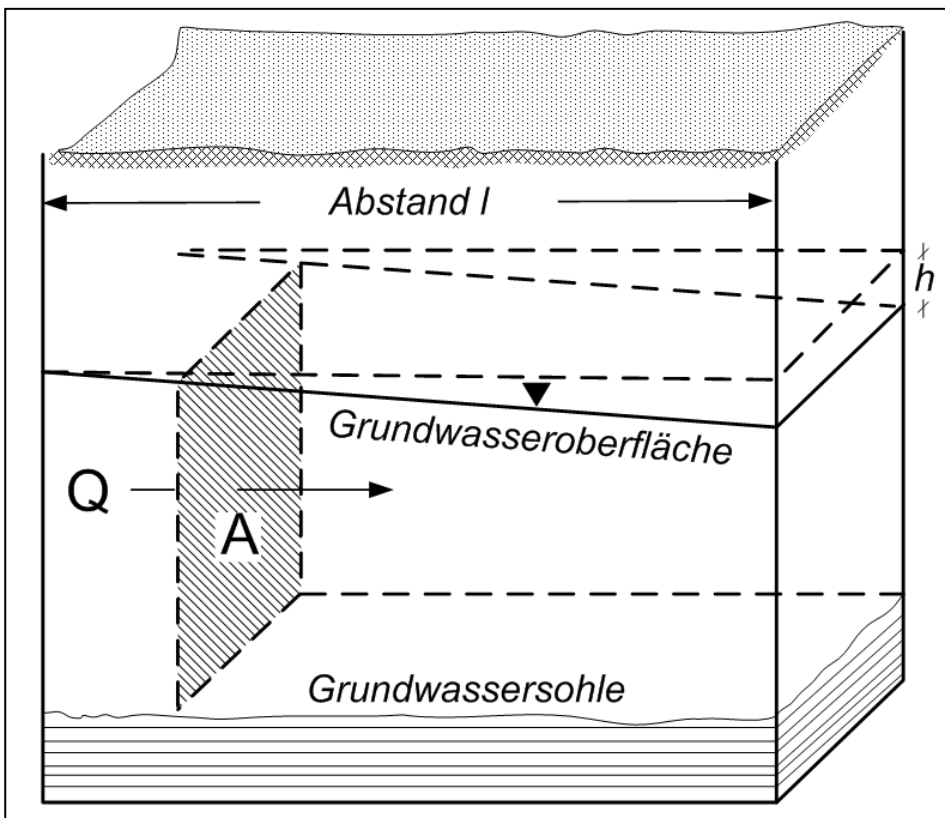


Bild 2-6: Darstellung der Größen des Gesetzes von Darcy

Das Gesetz von Darcy ist nur im laminaren Strömungsbereich gültig. Zudem ist zu beachten, dass der Durchfluss auf die volle Querschnittsfläche und nicht auf den eigentlichen Porenraum bezogen ist.

Die Auswertung der Infiltrationsversuche erfolgt auf Grundlage der Theorie der Potentialströme in Form von Quellenströmungen (36). Einflüsse aus Kapillarität, Saugspannung, Wasserrückhaltevermögen und Ausgangssättigungsgrad bleiben unberücksichtigt (37). Analog zu Darcy lautet die Grundgleichung für Versuche mit variabler Druckhöhe (38) :

$$k_f = \frac{\pi * r^2}{C * \Delta t} * \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [m/s]$$

mit:

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

$h_{1/2}$ = *Aufstauhöhen* [m]

C = *Bereichsfaktor* [m]

Der Bereichsfaktor C ist vergleichbar mit dem Quotienten aus durchflossenem Querschnitt und der Fließlänge nach Darcy. Er hängt von der Form des Strömungsbereiches und von dessen innerer und äußerer Umrandung ab (37) und ist je nach Prüfanordnung verschieden.

2.5.2 Wasserdurchlässigkeit ungebundener Schichten

Eine Anforderung an die Wasserdurchlässigkeit von ungebundenen Tragschichten ergibt sich aus deren Einsatzbereichen. Bei einer zu geringen Wasserdurchlässigkeit der ungebundenen Schichten kann Wasser, welches durch Risse oder andere Schadstellen in den gebundenen Oberbau eindringt, nicht abfließen. Dies begünstigt im Winter die Eislinsenbildung und kann zu Frostaufbrüchen führen. Gefährlicher noch ist die stark reduzierte Tragfähigkeit „aufgeweichter“ ungebundener Schichten in Tauperioden. Dies geschieht, wenn das aufgestaute Wasser einen Porenwasserüberdruck hervorruft und aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit nur langsam entweichen kann. Dadurch werden die effektiven Spannungen zwischen den Körnern herabgesetzt und somit auch die Steifigkeit der gesamten Schicht. Ein niedriger Widerstand gegen Verformung ist die Konsequenz.

Um dies zu vermeiden, fordern sowohl die „Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau“ (39) als auch die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien

für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau“ (40) eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit ungebundener Schichten. Eine genaue Definition oder quantitative Beschränkung der geforderten Wasserdurchlässigkeit hingegen fehlt. Nach Floss und Berner (41) lassen sich jedoch zwei Kriterien definieren, um diesen Anforderungen zu entsprechen. Eindringendes Wasser muss sowohl punktuell als auch flächenhaft aufgenommen werden und möglichst schnell in den Untergrund oder Seitenraum abgeleitet werden. Es muss somit sowohl eine ausreichende Drainagefähigkeit (Ableitung) als auch Infiltrationskapazität (Aufnahme) vorhanden sein. Zur Bestimmung der notwendigen Infiltrationskapazität wird aus der bemessungsrelevanten Regenspende die maximal eindringende Wassermenge abgeleitet. Im „Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigung von Verkehrsflächen“ (42) wird eine Bemessungsregenspende von 270 l/(s * ha) empfohlen. Umgerechnet ergibt dies die Anforderung einer Mindestwasserdurchlässigkeit von $2,7 \cdot 10^{-5}$ m/s. Um den in situ auftretenden Erschwernissen wie Teilsättigung und im Porenraum verbleibenden Lufteinschlüssen Rechnung zu tragen, sollte der geforderte Durchlässigkeitswert um ca. 100 % erhöht werden und somit $5,4 \cdot 10^{-5}$ betragen (43). Dies sollte als maximaler Wert verstanden werden (z. B. für versickerungsfähige Flächenbefestigungen), da unter gebundenen Schichten im Normalfall wesentlich weniger Wasser in den ungebundenen Oberbau infiltriert. In der Literatur schwanken die angegebenen Minderungsfaktoren mit 0,9 bis 0,33 stark.

Bei der Bemessung des Drainagevermögens hingegen interessiert vor allem die Zeit, die das Wasser in der gesättigten Schicht benötigt um abzufließen. Bekannt ist der analytische Ansatz von Casagrande und Shannon. Aus ihm kann abgeleitet werden, dass vor allem der Durchlässigkeitsquotient k einer Schicht, der häufig starken Schwankungen unterworfen ist, die Drainagefähigkeit besonders beeinflusst. Als Grenzwert kann daher der Durchlässigkeitsbeiwert $1 \cdot 10^{-5}$ angesehen werden. Sinkt die Durchlässigkeit unterhalb dieser Grenze, so steigt die Abflusszeit überproportional stark an, ebenso der Einfluss geometrischer Größen, wie z. B. der Querneigung oder Fahrbahnbreite. Dies wird durch Untersuchungen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) von Floss und Berner (41) bestätigt.

Prüfmethoden zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f sind in DIN 18130-1 (44) festgelegt. Zur quantitativen Bewertung der Wasserdurchlässigkeit ungebundener Schichten hat sich jedoch die Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes $k_{i(10)}$ weit verbreitet. Der Vorteil der Infiltrationsverfahren ist vor allem die einfache Durchführung in situ. Eine Entnahme einer ungestörten Probe zwecks Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes nach DIN 18130-1 ist aufgrund der grobkörnigen Anteile der Schichten im Verkehrswegebau hingegen zumeist schwierig. Daher wird in der Praxis auf zerstörungsfreie in situ Infiltrationsversuche zurückgegriffen.

Der Infiltrationswert ist dabei als die Geschwindigkeit, mit der das Wasser senkrecht in die ungebundene Schicht eindringt, definiert. Ein entscheidender Unterschied zu den sonst üblichen Prüfungen nach DIN 18130-1 (44) ist das Vorliegen eines teilgesättigten Zustandes (45). Im Laufe der Untersuchung nimmt über das eingeströmte Wasser die Sättigung der beprobten Schicht zu. Dies führt zu einer Abnahme der Infiltrationsgeschwindigkeit. Erst wenn die Sättigung konstant ist, ist auch der Wasserdurchfluss durch die Schicht konstant. Zu diesem Zeitpunkt ist der Infiltrationsbeiwert zu bestimmen. Da eine vollständige Sättigung der beprobten Fläche in der Regel nicht erreicht werden kann, sind die Ergebnisse nicht direkt mit denen nach DIN 18130-1 vergleichbar. In der Praxis wird zumeist ein geringeres Niveau gemessen (45). Trotzdem kann die Einteilung der Durchlässigkeitsbereiche nach DIN 18130 (Tabelle 2-1) als Grundlage für eine erste Einordnung der Ergebnisse dienen.

Tabelle 2-1: Durchlässigkeitsbereiche der DIN 18130

Bereich	k_f [m/s]
Sehr stark durchlässig	über 10^{-2}
Stark durchlässig	10^{-4} bis 10^{-2}
Durchlässig	10^{-6} bis 10^{-4}
Schwach durchlässig	10^{-8} bis 10^{-6}
Sehr schwach durchlässig	unter 10^{-8}

Nach DIN 18130-1 ist der Durchlässigkeitsbeiwert auf eine Vergleichstemperatur von 10 °C umzurechnen, dies entspricht der in Deutschland herrschenden durchschnittlichen Grundwassertemperatur. Grund für die Umrechnung ist, dass die viskosen Eigenschaften von Wasser stark von dessen Temperatur abhängen. Bei hohen Temperaturen nimmt die Viskosität des Wassers ab und damit die Durchlässigkeit zu.

2.6 Frostwiderstand

Eine ungebundene Schicht im Straßenbau ist frostempfindlich, wenn in der Gefrierphase Hebungen in schädlichen Größenordnungen auftreten oder während der Auftauphase unzulässig hohe Verluste an Tragfähigkeit zu verzeichnen sind. Damit diese Schadensbilder überhaupt auftreten können, müssen jedoch drei Bedingungen erfüllt sein (46):

- der anstehende Boden gefriert
- der gefrierende Boden ist frostempfindlich
- die Frostzone hat Wasser zum Gefrieren zur Verfügung bzw. kann dieses kapillar nachsaugen

Zu Beginn einer Frostperiode friert zuerst das Wasser in den groben Poren, später auch das in den feineren Poren. Bei ungünstigen hydrologischen Verhältnissen (z. B. eine geringe Wasserdurchlässigkeit) schließt das gefrierende Wasser nicht nur die Einzelkörner ein, sondern setzt sich auch in Form von Eislinsen ab (47). Da das Wasser beim Gefrieren eine Volumenzunahme um ca. 9 Prozent erfährt, führt dies zu einer Hebung in den ungebundenen Schichten. Die Ausbildung der Eiskristalle und damit auch die Hebungen, erfolgen unregelmäßig, da in den Poren unterschiedliche Gefrierpunkttiefen und Wasserangebote herrschen. In der Auftauphase können hingegen starke Tragfähigkeitsverluste auftreten, bedingt durch ein „Aufweichen“ der ungebundenen Schichten. Betroffene Straßenbefestigungen zeigen dann starke Verformungen, bis hin zu Schlaglochbildung. Diese reduzierte Tragfähigkeit in der Auftauphase ist eine der wesentlichen Ursachen für die oft in der Presse dokumentierten „Frostschäden“.

Als häufige Ursache für Frostschäden an Straßen sind zu hohe Feinkornanteile (48) und Inhomogenität in der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisch bei Einbau, sowie die verwitterungsbedingte Nachbildung von Feinkorn bei der Verwendung nicht anforderungsgemäßer Materialien erkannt worden (49). Dies haben Langzeitbeobachtungen und Schadensuntersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen an verschiedenen Straßen ergeben (50).

Die Einteilung der Böden in Frostempfindlichkeitsklassen erfolgt nach ZTV E-StB (51) nach deren Korngrößenverteilung und plastischen Eigenschaften. Der Klasse F1 gehören die nicht frostempfindlichen, der Klasse F2 die gering bis mittel frostempfindlichen und der Klasse F3 schlussendlich die sehr frostempfindlichen Böden an.

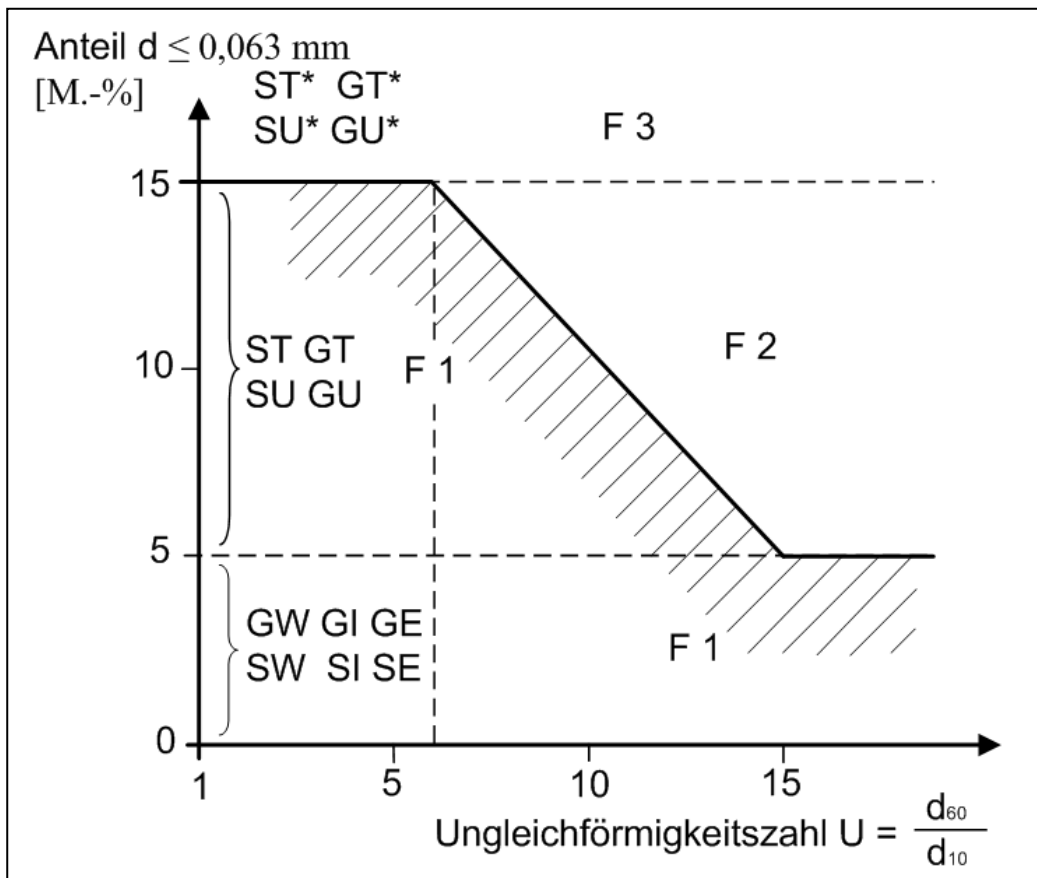


Bild 2-7: Klassifikation der Frostempfindlichkeit von Böden nach (42)

Ergeben sich hinsichtlich der Klassifikation der Frostempfindlichkeit Zweifel, können diese nach den ZTV E-StB durch Frostversuche und mineralogische Untersuchungen ausgeräumt werden. Eine Benennung geeigneter Prüfverfahren oder Grenzwerte erfolgt nicht. International werden dazu als Prüfverfahren häufig Frosthebungsversuche eingesetzt, für die auch Grenzwerte definiert sind. In Österreich wird ein Frosthebungsversuch verwendet, der zum größten Teil dem entspricht, der im Entwurf der TP BF-StB – Teil FHV (52) beschrieben ist. Als Bewertungskriterien werden die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit und die maximale Frosthebung definiert (Tabelle 2-2).

Nach Floss (53) ist ein frostsicherer Boden (F1) über die maximale Frosthebung und die verbleibende Resthebung zu definieren. Die Anforderungen sind ebenfalls in Tabelle 2-2 aufgeführt.

Tabelle 2-2: Kriterien zur Bewertung der Frostempfindlichkeit

Kriterium	ÖNorm B 4810 (Kriterium zum Ausschluss einer Frostgefährdung)	Floss (Kriterium für frostsichere Gesteinskörnung)
maßg. Frosthebungsgeschwindigkeit	< 1 mm/d	k. A.
max. Frosthebung	< 15 mm	5 mm
Resthebung	k. A.	< 2 mm

Um das Tragverhalten in der Auftauphase zu bewerten, werden zumeist CBR-Prüfungen herangezogen. In Österreich sind dafür keine Anforderungen formuliert, in der Schweiz hingegen wird gefordert, dass nach der Frosthebung (CBR_F) mindestens noch die Hälfte des vorherigen CBR-Wertes (CBR_0) erreicht wird. Allerdings erfolgt sowohl der Einbau in den Frosthebungsversuch, als auch die Bestimmung des CBR_0 -Wertes mittels modifizierten Proctorversuch.

In (53) finden sich zudem auch die in Tabelle 2-3 aufgeführten absoluten CBR-Werte. Diese werden allerdings nach einem Frost-Tauwechsel-Versuch bestimmt. Außerdem ist diese Klassifikation in der Fachwelt nicht ganz unumstritten.

Tabelle 2-3: Klassifikation der Frostempfindlichkeit von Böden mit dem CBR-Wert nach (53)

Frostempfindlichkeitsklasse	F1	F2	F3
CBR-Wert nach Frost-Tauwechseln [%]	> 30	> 8	< 8

3 Untersuchungsprogramm

3.1 Untersuchungsprogramm

Grundlage war das Arbeitsprogramm der Forschungsstelle. Während des Untersuchungsprogramms wurden bereits gewonnene Erkenntnisse in dem Projektbegleitenden Ausschuss erörtert und Änderungen an dem Untersuchungsprogramm vorgenommen. In Abstimmung mit dem Betreuungsausschuss wurde schlussendlich das in Bild 3-1 dargestellte Untersuchungsprogramm festgelegt.

Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in die vier Untersuchungsschritte A bis D.

In Schritt A wurden die grundlegenden Gesteinseigenschaften wie Rohdichte, Festigkeit und Kornverteilung bestimmt.

In Schritt B erfolgten die Kornverfeinerungsversuche mittels einfachem und modifiziertem Proctorversuch, sowie dem Zertrümmerungsversuch nach den Deutsche Bahn Standards DBS 918062 (54) (Proctor nach DBS). Um den Einfluss des Größtkorns und der Kornabstufungen auf die Kornverfeinerung zu ermitteln, wurde sowohl ein Gemisch mit einem Größtkorn von 32 mm untersucht, als auch je drei Gemische mit einem Größtkorn von 45 mm. Hier wurde jeweils eine feine Korngrößenverteilung (Verlauf an der oberen Grenze nach ZTV SoB-StB), eine mittlere und eine grobe Korngrößenverteilung (Verlauf an der unteren Grenze nach ZTV SoB-StB (40)) untersucht.

In Schritt C wurden weiterführende Untersuchungen an ausgewählten Gemischen durchgeführt. Dabei handelte es sich vor allem um Untersuchungen, um die Gebrauchseigenschaften und die Eignung der Gesteinskörnungsgemische für ungebundene Schichten zu ermitteln.

In Schritt D wurden an insgesamt zehn Baumaßnahmen Untersuchungen durchgeführt. Geprüft wurden die Wasserdurchlässigkeit, die Dichte und die in-situ Kornverfeinerung. Im Labor erfolgte der Vergleich mit den Verfeinerungen mittels Proctorversuch.

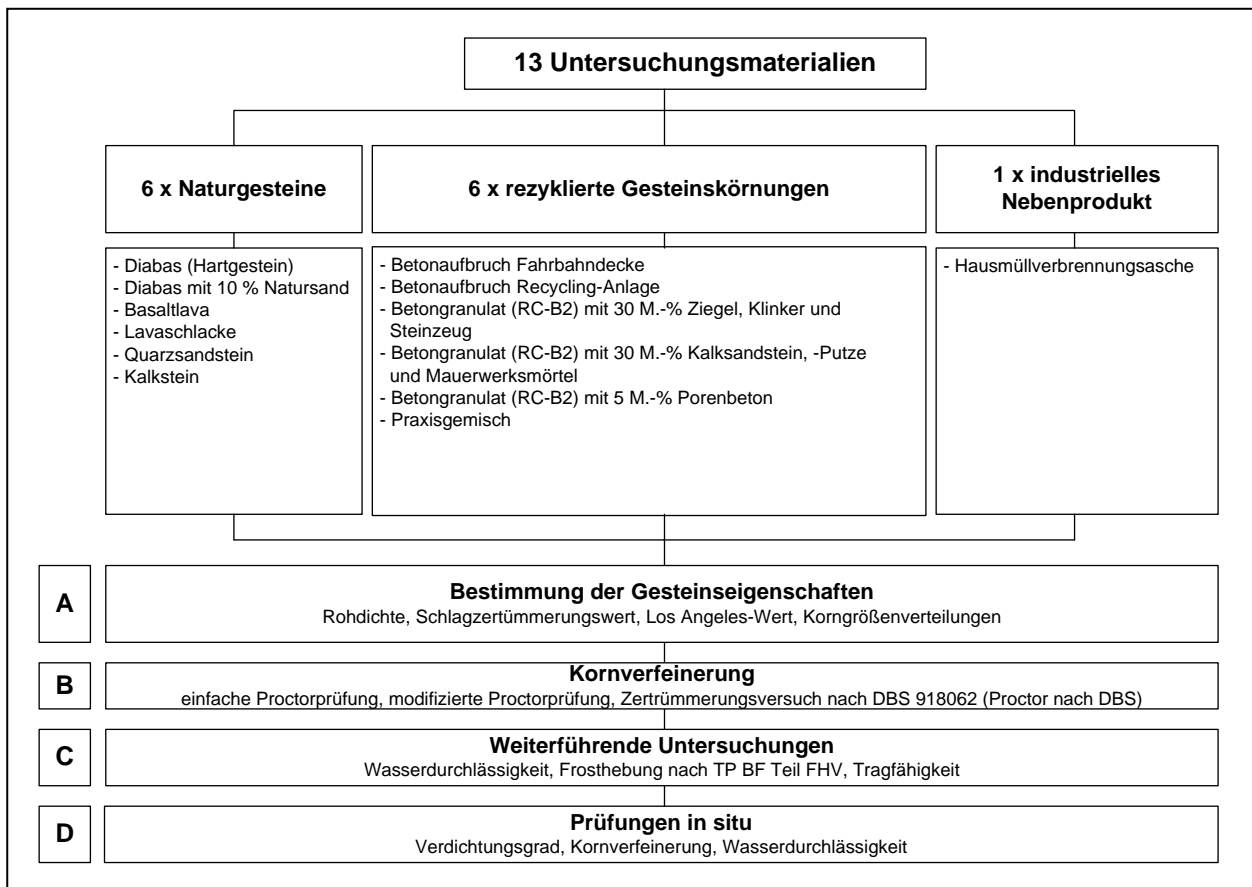


Bild 3-1: Ablaufschema des Untersuchungsprogrammes

Die Materialien, ihre Herkunft sowie die im weiteren Verlauf verwendeten Kurzbezeichnungen für die Untersuchungsschritte A bis C sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1: Herkunft und Bezeichnung des Untersuchungsmaterials, Schritte A bis C

Materialgruppe	Probenbezeichnung	Abkürzung	Herkunft
Natürliche Baustoffgemische	Diabas	DIA	Steinbruch
	Diabas mit 10 M.-% Natursand	DIS	Steinbruch
	Basaltlava	BAS	Steinbruch
	Lavaschlacke	LAV	Steinbruch
	Quarzsandstein	QUA	Steinbruch
	Kalkstein	KAL	Steinbruch
Rezyklierte Baustoffgemische	RC-Beton 1	RCB1	Betonaufbruch Fahrbahn- decke
	RC-Beton 2	RCB2	Betonaufbruch Recycling- Anlage
	Betongranulat (RC-B2) mit 30 M.-% Ziegel, Klinker und Steinzeug	RCZ	Recycling-Anlage
	Betongranulat (RC-B2) mit 30 M.-% Kalksandstein, Putze und Mauerwerksmörtel	RCK	Recycling-Anlage
	Betongranulat (RC-B2) mit 5 M.-% Porenbeton	RCP	Recycling-Anlage
	Praxisgemisch	RPG1	Recycling-Anlage
Industrielle Nebenprodukte	Hausmüllverbrennungsasche	HMV	Hausmüllverbrennungsan- lage

3.2 Untersuchungsmaterialien

3.2.1 Naturgesteine

Insgesamt sieben Gesteinskörnungsgemische aus Naturgesteinen wurden untersucht. Als Vergleichsgestein kam ein Hartgestein (Diabas) zum Einsatz. Es sollte allen Ansprüchen an ein gut geeignetes Gesteinskörnungsgemisch für Tragschichten ohne Bindemittel erfüllen.

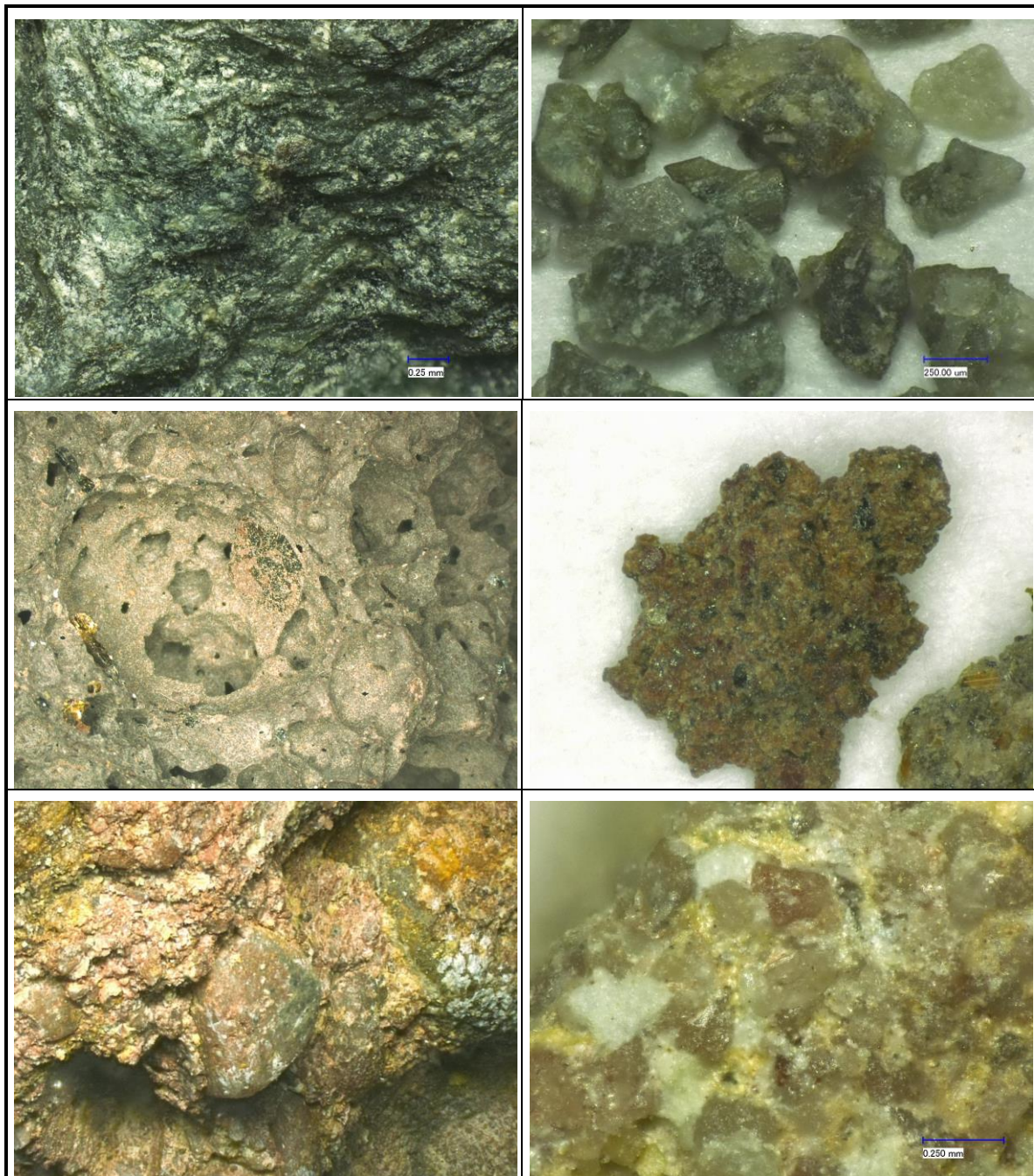


Bild 3-2: Mikroskopische Aufnahmen der Naturgesteine (oben: Diabas; mittig: Lava-schlacke; unten: Quarzsandstein)

Zur Verbesserung der Wasserdurchlässigkeit wurde zudem eine Versuchsreihe mit Diabas unter Zugabe von ca. 10 M.-% Natursand durchgeführt.

Die weiteren Naturgesteine decken eine möglichst große Bandbreite ab. Ihnen gemein sind vor allem die hohen Schlagzertrümmerungswerte. In Bild 3-2 sind exemplarisch mikroskopische Aufnahmen dreier verwendeter Naturgesteine dargestellt. Gut erkennbar sind vor allem die Unterschiede in der Porosität und Homogenität der Mineralien. Der Quarzsandstein stellt mit einem Schlagzertrümmerungskoeffizienten $SZ_{8/12}$ von 37,5 die schwächste untersuchte Gesteinskörnung dar.

3.2.2 Rezyklierte Gesteinskörnung

Intensiv wurde die Eignung verschiedener rezyklierter Baustoffgemische mit hohen Anteilen an Betongranulat untersucht, da deren Frosthebungsverhalten in der Vergangenheit häufig kritisch war. Ziel war es, zunächst für weitere Gemische einen RC-Baustoff mit hohem Anteil an Betonaufbruch zu beschaffen, der zumindest mäßig gute Gebrauchseigenschaften aufweist. Ansonsten ist eine ausreichende Differenzierung in den Ergebnissen bei den Gemischen nicht zu erwarten. Die meisten RC-Baustoffe zeichnen sich zudem durch eine starke Heterogenität aus und enthalten häufig auch schädigende Bestandteile wie z. B. organische Materialien, Glas, Kunststoffe oder Dämmstoffe. Daher wurde jeweils die stoffliche Zusammensetzung der untersuchten RC-Baustoffe nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5 bestimmt.

Bei dem als RCB1 bezeichneten Betonaufbruch handelt es sich um eine rezyklierte Fahrbahndecke aus Beton. In Tabelle 3-2 ist dessen stoffliche Zusammensetzung aufgelistet.

Tabelle 3-2: stoffliche Zusammensetzung des RCB1

Stoffgruppe	Kornklasse			A _m gewogener Mittelwert	Anforderung (TL Gestein (55))
	4/8	8/16	16/45		
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Festgestein	-	-	-	-	-
Kies	-	-	-	-	--
Beton, hydr. gebundene Stoffe	99,3	96,1	98,0	97,7	-
Schlacke	-	-	-	-	-
Klinker, Ziegel, Steinzeug	-	-	-	-	≤ 30,0
Ausbauasphalt	0,7	3,9	2,0	2,3	≤ 30,0
Kalksandstein, Putze	-	-	-	-	≤ 5,0
mineralische Leicht- Dämmbaustoffe	-	-	-	-	≤ 1,0
Fremdstoffe (Gummi, Holz, etc.)	-	-	-	-	≤ 0,2

Dieser RC-Baustoff zeigte in den Frosthebungsversuchen auffällig hohe Hebungen und eine hydraulische Nacherhärtung, daher wurde er nicht als Grundlage für weitere Mischungen benutzt.

Der zweite RC-Baustoff mit hohen Anteilen an Betonaufbruch trägt die Bezeichnung RCB2. Es handelt sich dabei hauptsächlich um einen Betonaufbruch eines alten Sammlers für Abwasser. Dieser zeigte zufriedenstellende Gebrauchseigenschaften und wurde daher als Grundlage der Gemische:

- Betongranulat (RCB2) mit 30 M.-% Ziegel, Klinker und Steinzeug
- Betongranulat (RCB2) mit 30 M.-% Kalksandstein, Putze und Mauerwerksmörtel
- und Betongranulat (RCB2) mit 5 M.-% Porenbeton

verwendet. Die stoffliche Zusammensetzung des RCB2 nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5 ist in Tabelle 3-3 aufgeführt. Wohl sind die Grenzwerte für mineralische Leicht-Dämmstoffe gering und der Grenzwert für Kalksandstein und Putze deutlich überschritten, aber den Gebrauchseigenschaften wurde Vorrang eingeräumt.

Tabelle 3-3: stoffliche Zusammensetzung des RCB2

Stoffgruppe	Kornklasse			A _m gewogener Mittelwert	Anforderung (TL Gestein (55))
	4/8	8/16	16/45		
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Festgestein	2,6	8,9	24,7	19,7	-
Kies	3,6	6,0	0,5	2,0	-
Beton, hydr. gebundene Stoffe	82,0	67,6	50,1	55,9	-
Schlacke	2,4	4,0	5,0	4,6	-
Klinker, Ziegel, Steinzeug	1,2	2,5	6,6	5,3	≤ 30,0
Ausbauasphalt	1,0	1,5	0,5	0,7	≤ 30,0
Kalksandstein, Putze	6,6	9,4	11,2	10,5	≤ 5,0
mineralische Leicht- Dämmstoffe	0,5	0,0	1,5	1,1	≤ 1,0
Fremdstoffe (Gummi, Holz, etc.)	0,0	0,0	0	0,0	≤ 0,2

Die Zuschläge für die Gemische wurden gesondert beschafft und waren bereits gebrochen und aufbereitet. Durch gezieltes Mischen dieser Zuschläge mit dem RCB2 wurden die in Tabelle 3-1 aufgeführten RC-Baustoffe hergestellt.

Zwei weitere Gemische mit hohen Anteilen an Betonaufbruch wurden in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen. Diese wurden nicht gesondert zusammengestellt, sondern praxisnah durch Beprobungen auf den Wertstoffhöfen gewonnen. Sie sollen die in der Praxis anzutreffenden Baustoffgemische repräsentieren. Das erste Praxisgemisch zeichnet sich durch einen hohen Anteil an Festgestein und Betonaufbruch aus und erreicht daher auch eine hohe Festigkeit (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: stoffliche Zusammensetzung des RPG

Stoffgruppe	Kornklasse			A _m gewogener Mittelwert	Anforderung (TL Gestein (55))
	4/8	8/16	16/45		
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Festgestein	25,6	36,6	24,7	30,5	-
Kies	-	-	-	-	-
Beton, hydr. gebundene Stoffe	73,8	63,4	75,3	69,3	-
Schlacke	-	-	-	-	-
Klinker, Ziegel, Steinzeug	0,6	-	-	0,2	≤ 30,0
Ausbauasphalt	-	-	-	-	≤ 30,0
Kalksandstein, Putze	-	-	-	-	≤ 5,0
mineralische Leicht- Dämmbaustoffe	-	-	-	-	≤ 1,0
Fremdstoffe (Gummi, Holz, etc)	-	-	-	-	≤ 0,2

3.2.3 Industrielle Nebenprodukte

Die Hausmüllverbrennungsasche wurde direkt von einer Müllverbrennungsanlage bezogen. Die Asche war gut ausgelagert und wies nur geringe Anteile metallischer und organischer Bestandteile auf. In Tabelle 3-5 ist die stoffliche Zusammensetzung der HMV-Asche aufgeführt.

Tabelle 3-5: stoffliche Zusammensetzung der HMV-Asche

Stoffgruppe	Kornklasse			A _m gewogener Mittelwert	Anforderung (TL Gestein (55))
	4/8	8/16	16/45		
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Asche/Schlacke	82,2	73,7	67,2	69,4	-
Glas/Keramik	17,8	25,9	31,4	29,5	-
restl. metallische Bestandteile	0,0	0,4	1,3	1,1	≤ 5,0
Sonstiges	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Unverbranntes	0,0	0,0	0,1	0,1	≤ 0,5

3.3 In situ Untersuchungen (Schritt D)

Insgesamt zehn Baustellen wurden beprobt. Ausgewählt wurden vor allem Baumaßnahmen, die schwächere Baustoffgemische einbauten. Dies gestaltete sich jedoch schwierig - ebenso die Beprobung bei verschiedenen Verdichtungsgraden. Somit mussten auch einige Baustellen, die relativ starke Gesteine einbauten untersucht werden. Auch konnten nur an drei Baumaßnahmen unterschiedliche Verdichtungsgrade überprüft werden. Bei den schwächeren Baustoffgemischen handelt es sich zumeist um rezyklierte Baustoffgemische, bei den stärkeren um Baustoffgemische aus Kalkstein.

4 Beschreibung der Prüfverfahren

4.1 Prüfverfahren der Untersuchungsstufe A

4.1.1 Dichtekennwerte

Gemäß TP Gestein-StB Teil 3.2.2 (32) und DIN EN 1097-6 (56) wurden die Rohdichten am gesamten Korngemisch und in den Fraktionen für die Schlagzertrümmerungsversuche bestimmt. Bei Gesteinen mit stark unterschiedlichen Rohdichten in den einzelnen Fraktionen (z.B. Lavaschlacke) wurden zudem die Rohdichten an Einzelfraktionen bestimmt. Für die feinen Fraktionen kam das Pyknometer-Verfahren zum Einsatz, für die Rohdichten der groben Fraktionen (größer 31,5 mm) das Drahtkorbverfahren. Als Prüfflüssigkeit wurde luftfrei gekochtes und entsalztes Wasser benutzt.

4.1.2 Widerstand gegen Zertrümmerung mittels Schlagversuch und Los-Angeles-Prüfung

Zur Bestimmung des Widerstands gegen Zertrümmerung dient das Los-Angeles-Prüfverfahren (LA-Versuch) und der Schlagzertrümmerungsversuch (SZ-Versuch). Beide sind nach TP Gestein-StB Teil 5.1.2 (32) und DIN EN 1097-2 (3) an den Kornklassen 8/12,5 bzw. 10/14 mm durchgeführt worden. Das Los-Angeles-Prüfverfahren ist als Referenzverfahren anzusehen. Es beansprucht die Probe sowohl auf Schlag, als auch auf Abrieb. Der Schlagversuch hingegen bringt eine rein schlagende Belastung auf. In (57) ist den Kategorien des Schlagzertrümmerungsversuches jeweils eine Kategorie der Los-Angeles-Prüfung zugeordnet. In Tabelle 4-1 ist die Zuordnung aufgeführt. Da kein exakter funktionaler Zusammenhang zwischen den beiden Prüfungen existiert, kann es zu einer unterschiedlichen Einstufung ein und desselben Materials kommen.

Tabelle 4-1: Zuordnung der Kategorien SZ_{8/12} zu LA_{10/14}

Kategorie Schlagzertrümmerung	Kategorie Los-Angeles-Prüfung
SZ ₁₈	LA ₂₀
SZ ₂₂	LA ₂₅
SZ ₂₆	LA ₃₀
SZ ₃₂	LA ₄₀
SZ ₃₅	LA ₅₀
SZ _{NR}	LA _{NR}

4.1.3 Ermittlung der Korngrößenverteilungen bei Anlieferung

Zur Bestimmung einer Kornverfeinerung muss die Anlieferungskorngrößenverteilung bekannt sein. Daher wurden die angelieferten Materialien nach TP Gestein-StB Teil 4.1.2 (1) bzw. DIN EN 933-1 (4) gesiebt. Es wurde angestrebt, vergleichbare Korngrößenzusammensetzungen der Gemische herzustellen. Die Materialien wurden daher in Fraktionen abgesiebt und die einzelnen Ausgangskorngrößenverteilungen gezielt zusammengesetzt.

4.2 Prüfverfahren der Untersuchungsstufe B

4.2.1 Proctorversuche

Als Festigkeitsprüfverfahren für Korngemische wurde der einfache und der modifizierte Proctorversuch nach TP Gestein-StB Teil 3.2.3 (32) und DIN EN 13286-2 (56) durchgeführt. Die Prüfbedingungen sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Für die Gesteinskörnungsgemische mit einem Größtkorn von über 32 mm wurden die alternativen Prüfbedingungen nach DIN EN 13286-2 Anhang B Tafel A.3 gewählt.

Als eine Variante der im Straßenbau üblichen Proctorprüfung, kam ein Zertrümmerungsversuch aus den Deutsche Bahn Standards (DBS 918062 (54)) zum Einsatz, im weiteren Verlauf Proctor nach DBS genannt. Die Proctorprüfung nach DBS dient der Feststellung des Widerstandes eines Korngemisches gegen Zertrümmerung, um deren Verwendbarkeit als Schutz- und Tragschicht für die Eisenbahnfahrwege der DB Netz AG zu prüfen. Die Zertrümmerung während des Versuches simuliert die Kornbeanspruchung durch Transport, Einbau, Verdichtung und Verkehrsbelastung. Der Versuch ist an

einer Prüfkörnung der Kornklasse 0/32 mm durchzuführen. Als Grundlage des Versuchs dient der Proctorversuch nach DIN EN 13286-2 unter Verwendung der Prüfeinrichtung nach Zeile 5 der Tabelle A.3 im Anhang A (Durchmesser der Prüfform: 150 mm). Die Probe wird unter Zugabe des 0,9-fachen optimalen Wassergehalts in fünf Zyklen verdichtet. Jeder Zyklus besteht aus Homogenisierung, Verdichtung im Prüfzylinder und anschließendem Ausbau der Probe. Das Material wird wie bei dem einfachen Proctorversuch in drei Schichten mit je 22 Schlägen eingebaut. Nach dem letzten Ausbau der Probe werden, analog zum normalen Proctorversuch, der Wassergehalt, die Trockendichte und die Kornverfeinerung bestimmt.

Zur Einordnung der erreichten Trockendichten und Kornverfeinerungen wurden nach folgender Formel die geleisteten Verdichtungsenergien der verschiedenen Proctorprüfungsvarianten berechnet:

$$\text{Spezifische Energie} = \frac{m_R * h_2 * x_1 * x_2 * g}{V_p}$$

h_2 = Fallhöhe

m_R = Fallgewicht

g = Schwerkraft

x_1 = Schläge pro Schicht

x_2 = Anzahl Schichten

V_p = Volumen der Probe

Die Verdichtungsenergien sind ebenfalls in Tabelle 4-2 aufgenommen worden.

Tabelle 4-2: Zusammenstellung der Prüfbedingungen

		einfacher Proctorversuch		modifizierter Proctorversuch		Proctor nach DBS
Größtkorn	[mm]	31,5	45	31,5	45	31,5
Proctortopf: Höhe	[mm]	125	200	125	200	125
Durchmesser	[mm]	150	250	150	250	150
Volumen	[cm ³]	2208,9	9817,4	2208,9	9817,4	2208,9
Fallgewicht	[kg]	4,5	15	4,5	15	4,5
Fallhöhe	[mm]	450	600	450	600	450
Anzahl der Schläge je Schicht	-	22	22	56	98	22
Anzahl Schichten	-	3	3	5	3	5*3
Verdichtungsenergie	[MJ/m ³]	0,594	0,594	2,653	2,644	2,968

Trotz annähernd identischen Verdichtungsenergien bei dem Proctor nach DBS bzw. modifizierten Proctor müssen die fundamentalen Unterschiede (mehrmaliger Ausbau und Durchmischung des Proctor nach DBS) zusätzlich beachtet werden.

4.3 Prüfverfahren der Untersuchungsstufe C

4.3.1 CBR-Prüfverfahren

Die Durchführung des CBR-Versuches erfolgt nach DIN EN 13286-47 (58). Zudem wurden CBR-Prüfungen vor bzw. nach Frosthebung durchgeführt. Dabei konnten nicht die vorgeschriebenen Stahlzylinder als Prüfform verwendet werden, sondern eine Multi-ringzelle aus Teflon (siehe Bild 4-1). Daher können die CBR-Prüfung vor Frosthebung auch nicht dazu verwendet werden, vergleichbare Aussagen zu den üblichen CBR-Prüfungen nach obiger Norm zu treffen. Die CBR-Werte, die in den Stahlformen ermittelt wurden, waren zumeist höher. Es ist anzunehmen, dass sich die Teflonringe während der Versuchsdurchführung ausdehnen und somit wesentlich zur Verformung beitragen.

4.3.2 Frosthebungsversuch

In Deutschland werden verschiedene Frosthebungsversuche durchgeführt, da Versuchsaufbau und Ablauf noch nicht normiert sind. Den meisten Frosthebungsversuchen gemein, ist jedoch die Befrostung von der Oberseite und ein temperiertes Wasserbad aus der der Probekörper Wasser nachsaugen kann. In Österreich sind Frosthebungsversuche in der ÖNORM B4810 (Januar 2001) „Frostsicherheit von Gemischen im Straßen- und Flugplatzbau“ geregelt. In Deutschland liegt die Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau Teil „Frosthebungsversuch“ – Entwurfsfassung 2004 – (TP BF-StB – Teil FHV) (52) als Entwurf vor.

Als Probenvorbereitung ist das Prüfmaterial zusammenzustellen und der Überkornanteil größer 22,4 mm abzusieben. Die Probe wird in drei Lagen mit optimalem Wassergehalt und einfacher Proctorverdichtung eingebaut. Der Prüfzylinder besteht dabei aus fünf Ringscheiben aus reibungsarmem, schlecht wärmeleitendem und druckfestem Material (Teflon). Die Ringscheiben sind durch lösbare Verbindungen mit der gelochten Grundplatte verbunden. Diese ermöglicht eine Wasseraufnahme von der Probenunterseite. In Bild 4-1 ist solch ein zusammengesetzter Probenzylinder aus Teflonringen dargestellt.

Nachdem die Probezylinder in das Kühlsystem eingebaut worden sind, folgt die Temperierungsphase. Unmittelbar nach Einbau wird die Einbauhöhe der Probe s_0 gemessen, anschließend wird die Probe 24 Stunden auf $+ 1,5^\circ\text{C}$ temperiert. Nach 24 Stunden wird die Ausgangshöhe der Probe $s_{\text{FH}, 0}$ für die Befrostung gemessen.

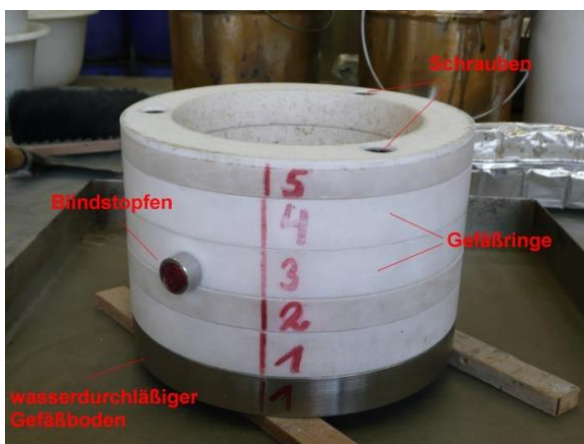


Bild 4-1: Probenzylinder aus Teflonringen

Anschließend wird der Probekörper von der Oberseite beaufrostet, die Unterseite bleibt unbefrostet und wird in einem temperierten Wasserbad gelagert, so dass sie während des Versuchs Wasser nachsaugen kann. Bild 4-2 zeigt eine Prinzipskizze der Frost-

kammer des Frosthebungsgerätes. Das in diesem Forschungsvorhaben verwendete Gerät hat eine identische zweite Frostkammer, die separat angesteuert werden kann.

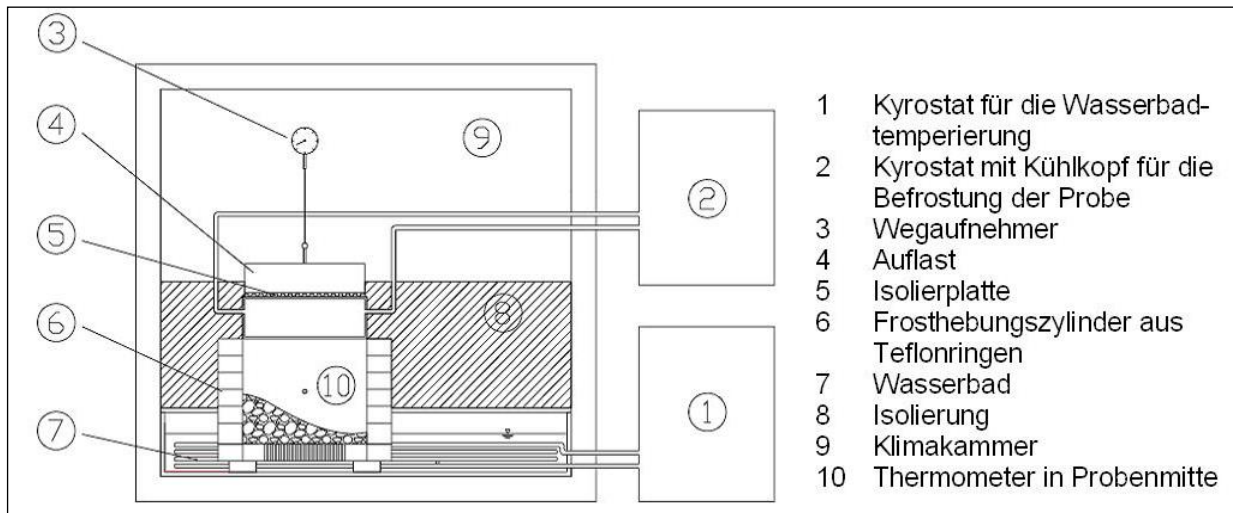


Bild 4-2: Prinzipskizze Frosthebungsgerät (52)

Nach der Vortemperierung wird die Temperierung so eingestellt, dass in Probenmitte innerhalb der nachfolgenden vier Tage eine Temperatur von 0 °C erreicht wird. Dabei beträgt die notwendige Befrostungsgeschwindigkeit 0,38 K/Tag. Für drei weitere Tage wird die 0 °C-Isotherme in dieser Tiefe konstant gehalten.

Anschließend erfolgt eine 24stündige Auftauphase mit einer konstanter Oberflächentemperatur von + 10 °C. Wasserbad- und Umlufttemperatur betragen auch in der Auftauphase + 1,5 °C.

Alle Temperaturen und Frosthebungen werden dabei in einem Intervall von fünf Minuten erfasst. Die gesamte Versuchsdauer beträgt neun Tage, inklusive der oben bereits beschriebenen Vortemperierung.

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt in einem Frosthebungs-Zeit-Diagramm (Bild 4-3). Das Diagramm wird in drei Teile unterteilt, in Temperierungsphase, Befrostungsphase 1 und Befrostungsphase 2. Auf der x-Achse ist der zeitliche Verlauf in Tagen dargestellt, auf der y-Achse die Temperatur in °C, sowie auf einer zusätzlichen vertikalen Achse die Hebung in mm. Die Verläufe zeigen die Solltemperatur, die Proben-temperatur, die Kühkopf-temperatur, die Wasserbadtemperatur und die Hebung.

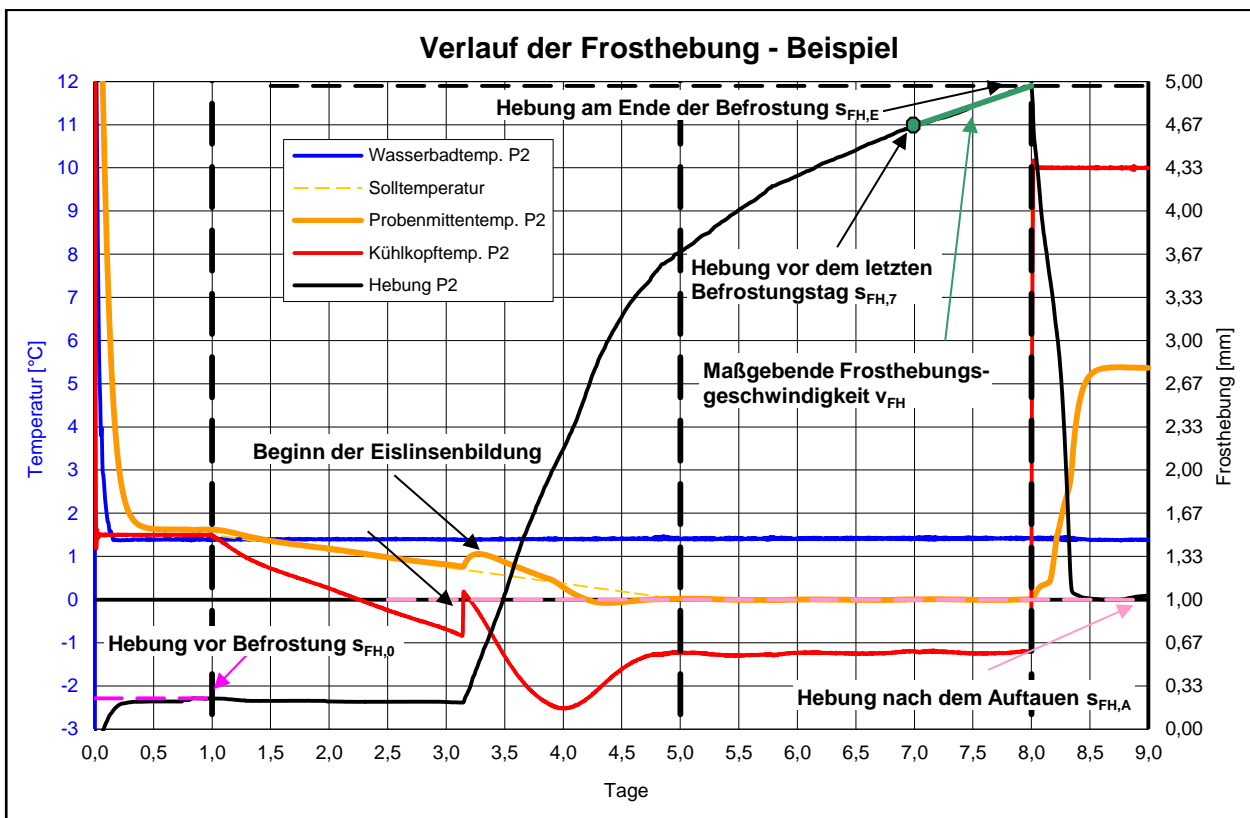


Bild 4-3: beispielhafter Verlauf des Frosthebungsversuches (59)

4.3.3 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Standrohr-Infiltrometer

Die Infiltrationsprüfung mittels Standrohr-Infiltrometer ist in der im Entwurf befindlichen Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes von Tragschichten ohne Bindemittel (45) beschrieben und basiert auf der österreichischen RVS 11.062 (60). Sie wird an mittels modifiziertem Proctorversuch verdichteten, teilgesättigten Proben durchgeführt. Ein künstliches Austreiben der in den Poren verbleibenden Luft erfolgt nicht. Die Prüfung erfolgt mit fallender Druckhöhe.

Der Aufbau der Prüfeinrichtung kann Bild 4-4 entnommen werden. Als Prüfkörper kommt ein mit der modifizierten Verdichtungsarbeit nach Proctor gemäß TP Gestein-StB Teil 3.2.3 (32) in den Proctorzylinder C (Höhe 200 mm, Durchmesser 250 mm) eingebautes Gesteinskörnungsgemisch zum Einsatz. Die Abdichtung des Standrohres auf den Probekörpern erfolgt mittels Bentonitwulst und einer Belastung mit insgesamt 40 kg schweren Auflastungen. Als Prüfliquidität kommt auf Raumtemperatur temperiertes Leitungswasser zum Einsatz.

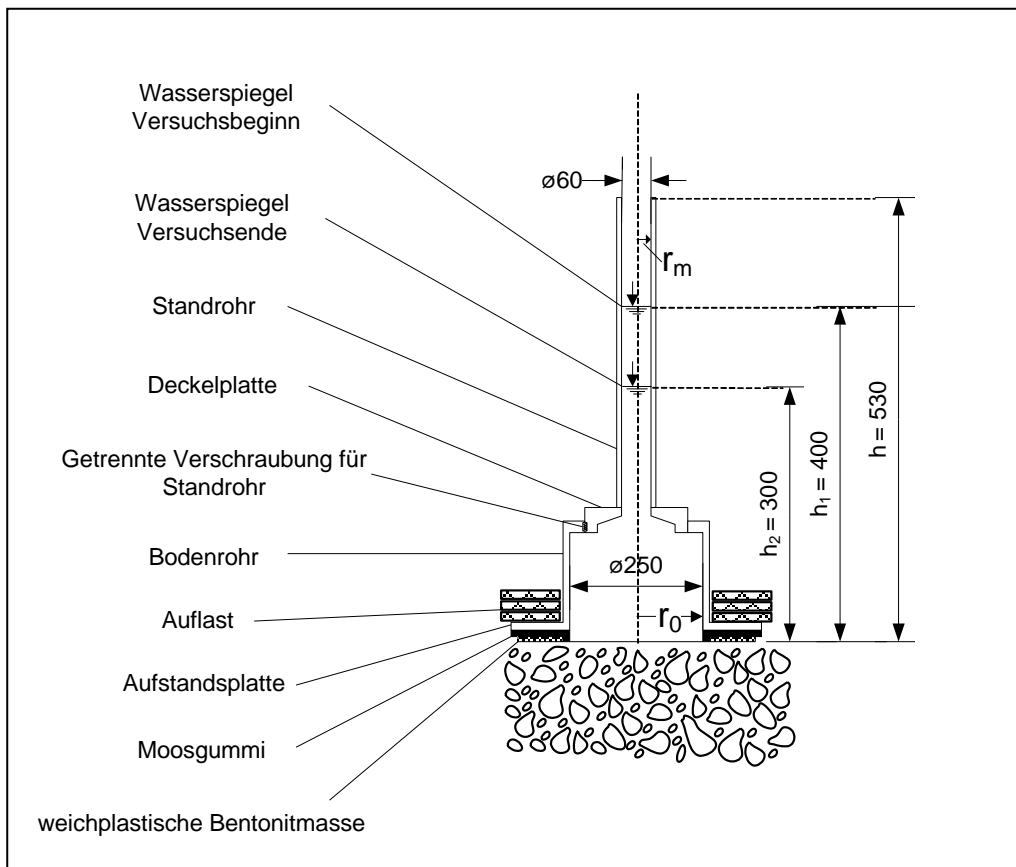


Bild 4-4: schematischer Aufbau des Standrohr-Infiltrometers (45)

Das Infiltrometer wird mit Wasser gefüllt und die Zeit bei Absinken des Wasserspiegels zwischen den Messmarken 400 mm und 300 mm gemessen. Dies wird solange wiederholt, bis eines der folgenden Abbruchkriterien erreicht wird:

- Der errechnete $k_{i(10)}$ -Wert schwankt bei drei aufeinanderfolgenden Ableisungen nur noch um ± 1 Einheit in der ersten Dezimalstelle
- Eine Messung dauert länger als 2.700 Sekunden
- Seitlicher Wasseraustritt ist zu beobachten

Bei letzterem ist der Versuch zu wiederholen. Bei einer Messdauer größer 2700 Sekunden liegt ein Infiltrationsbeiwert von weniger als $5 \cdot 10^{-7}$ [m/s] vor.

Ansonsten erfolgt die Berechnung von $k_{i(10)}$ mit folgender Formel (ÖNORM B 4422-2, halbkugelförmige Ausströmung aus einer kreisförmigen Einströmfläche in den Halbraum ohne Grundwasserberücksichtigung (61), siehe auch 2.5.1):

$$k_{i(10)} = \alpha * \frac{r_m^2}{0,88 * r_0 * \Delta t} * \ln \frac{h_1}{h_2} \text{ [m/s]}$$

$$k_{i(10)} = \text{Infiltrationsbeiwert bei } 10^\circ\text{C}$$

$$r_m = \text{Radius des Standrohres in m (0,017 m)}$$

$$\begin{aligned}
 r_0 &= \text{Radius der Ausströmfläche in m (0,070 m)} \\
 h_1, h_2 &= \text{hydraulische Druckhöhe bei } t_1 \text{ bzw. } t_2 \\
 &\quad \text{in [m] (0,4 m, ;0,3 m)} \\
 \Delta t &= \text{Zeitintervall } t_2 - t_1 \text{ in [s]} \\
 \alpha &= \text{Temperaturkorrektur [-]} \\
 &= \frac{1,359}{1 + 0,0337 * T_i + 0,00022 * T_i^2} \\
 T_i &= \text{Wassertemperatur in } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

4.4 Prüfverfahren der Untersuchungsstufe D

4.4.1 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Standrohr-Infiltrometer (in situ)



Bild 4-5: einfaches Standrohr-Infiltrometer (in situ)

Das einfache Standrohr-Infiltrometer wird sowohl im Labor als auch in situ benutzt (Bild 4-5). In diesem Forschungsvorhaben wurde ausschließlich das „kleine“ Infiltrometer (\varnothing 140 mm) benutzt, das schon unter Punkt 4.3.3 beschrieben wurde. Der Empfehlung der Arbeitsanleitung (45) ein modifiziertes Infiltrometer (\varnothing 250 mm) für in situ Messungen zu benutzen, konnte nicht entsprochen werden, da sich dieses noch in der Entwicklung befand.

4.4.2 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Tropf-Infiltrometer (in situ)

Das Tropf-Infiltrometer (Bild 4-6) besteht aus einer Beregnungseinheit, einem Schwimmschalter, einem Metallring und einem Wasserbehälter einschließlich Pumpe und Elektronik. Über die Beregnungsvorrichtung wird ein gleichmäßiger Modellregen erzeugt, dieser benetzt eine von einem Metallring definierte Untersuchungsfläche von ca. $0,25 \text{ m}^2$ und ebenso die Randbereiche der Prüffläche außerhalb des Metallringes. Im Metallring befindet sich ein Schwimmschalter. Dieser stoppt die Beregnung, wenn der Wasserspiegel im Metallring eine definierte Höhe erreicht und startet die Beregnung

wieder, wenn der Wasserspiegel auf ein definiert niedrigeres Niveau abgesunken ist. Ein Durchflussmesser an der Pumpeinheit misst dabei die zugeführte Wassermenge.

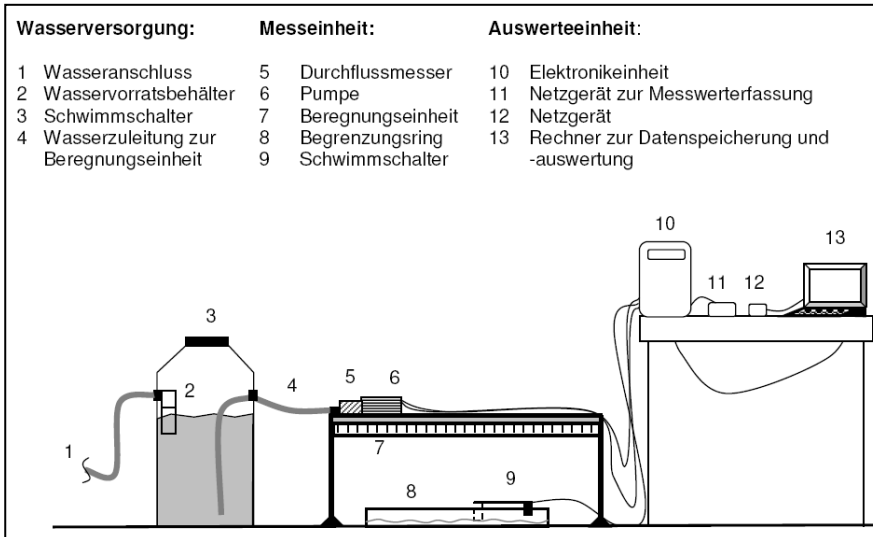


Bild 4-6: Prinzipskizze des Tropf-Infiltrometers (45)

Die Auswerteeinheit berechnet daraus automatisch den Infiltrationsbeiwert. Ist dieser über einen Zeitraum von ca. 30 Minuten konstant, ist die Messung beendet. Mit Hilfe des am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum entwickelte Programms „Tango“ kann die Infiltrationskurve ausgewertet werden. Es erlaubt die Eliminierung der prinzipbedingten hohen Anfangsinfiltrationen (erstmaliges Füllen des Metallringes) und eine Mittelung benachbarter Werte um einen geglätteten, konstanten Infiltrationsverlauf darzustellen (Bild 4-7).

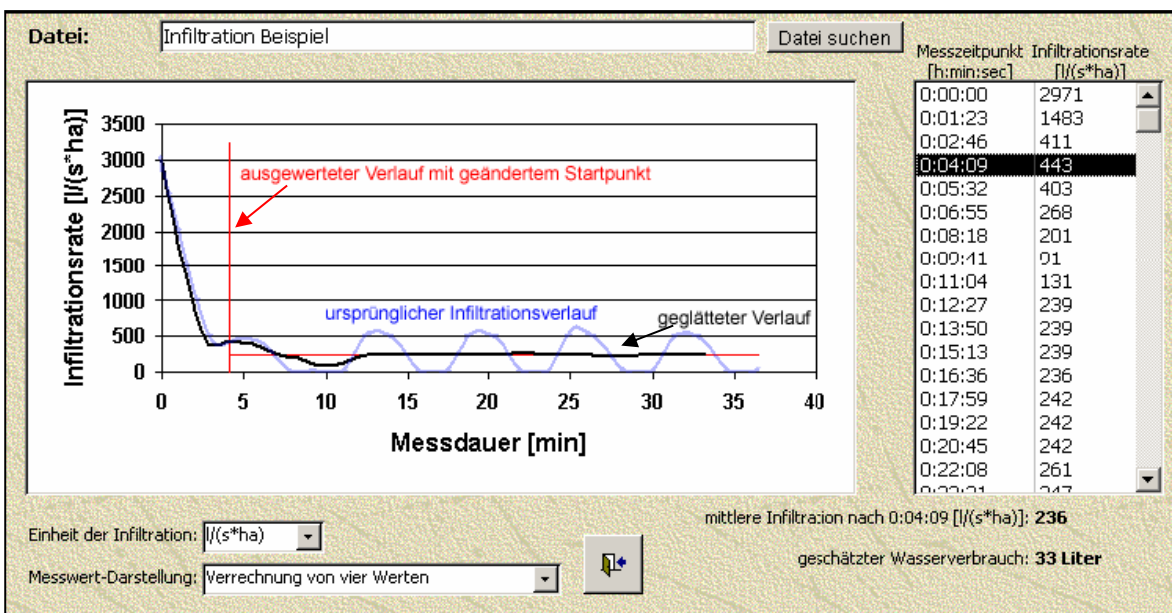


Bild 4-7: graphische Darstellung und Auswertung mittels "Tango"

4.4.3 Bestimmung der Dichte mittels Flüssigkeitsersatz-Verfahren und Ballon-Verfahren

In situ wurden Feldversuche zur Bestimmung der Dichte durchgeführt. Es kamen dabei das Ballon-Verfahren (DIN 18125-2B) und das Flüssigkeitsersatz-Verfahren (DIN 18125-2F) zum Einsatz (62). Als Prüfflüssigkeit für das Flüssigkeitsersatzverfahren wurde Wasser gewählt. Grundsätzlich wurde das Ballon-Verfahren bevorzugt, allerdings traten aufgrund scharfkantiger Gesteinskörner häufig Beschädigungen an der Ballonhaut auf, so dass eine Vielzahl der Dichten schlussendlich mit dem Flüssigkeitsersatzverfahren bestimmt wurde.

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Ergebnisse der Untersuchungsstufe A

5.1.1 Dichtekennwerte

In Tabelle 5-1 sind die Rohdichten der untersuchten Gesteinskörnungen aufgelistet. Da Lavaschlacken über die Kornfraktionen stark unterschiedliche Rohdichte aufweisen, wurde die gesamte Spanne - von grober Fraktion zu Feinanteil – in Tabelle 5-1 aufgeführt.

Tabelle 5-1: Rohdichten der untersuchten Gesteinskörnungen

Probenbezeichnung	Rohdichte [Mg/m ³]
DIA	2,945
DIS	2,860
BAS	2,861
LAV	2,160-3,105
QUA	2,617
KAL	2,630
RCB1	2,559
RCB2	2,642
RCZ	2,561
RCK	2,591
RCP	2,511
RPG	2,521
HMV	2,625

5.1.2 Widerstand gegen Zertrümmerung

Der Schlagzertrümmerungsversuch wurde an Splitt 8/12, die Los-Angeles-Prüfung an Splitt 10/14 durchgeführt. In Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse der Schlagzertümme-

rungsversuche und der Los-Angeles Prüfungen aufgeführt. Die rot (kursiv) markierten Zeilen weisen auf eine Verschiebung der Zertrümmerungskategorien hin.

Tabelle 5-2: Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12}$ und $LA_{10/14}$ der im Labor untersuchten Materialien

Probenbezeichnung	$LA_{10/14}$	$SZ_{8/12}$
DIA	$LA_{20}(10)$	$SZ_{18}(13,0)$
BAS	$LA_{40}(33)$	$SZ_{32}(26,9)$
<i>LAV</i>	<i>$LA_{30}(36)$</i>	<i>$SZ_{32}(29,2)$</i>
QUA	$LA_{NR}(61)$	$SZ_{NR}(37,5)$
KAL	$LA_{40}(34)$	$SZ_{32}(29,7)$
RCB1	$LA_{40}(36)$	$SZ_{32}(26,2)$
<i>RCB2</i>	<i>$LA_{40}(33)$</i>	<i>$SZ_{26}(23,6)$</i>
<i>RCZ</i>	<i>$LA_{40}(38)$</i>	<i>$SZ_{26}(25,2)$</i>
<i>RCK</i>	<i>$LA_{50}(49)$</i>	<i>$SZ_{32}(31,7)$</i>
<i>RCP</i>	<i>$LA_{40}(34)$</i>	<i>$SZ_{26}(22,1)$</i>
<i>RPG1</i>	<i>$LA_{50}(43)$</i>	<i>$SZ_{32}(30,4)$</i>
HMV	$LA_{50}(45)$	$SZ_{35}(32,9)$

5.2 Ergebnisse der Untersuchungsstufe B

5.2.1 Kornverfeinerungen Diabas

Die Ausgangskorngrößenverteilung des Korngemisches 0/32 mm liegt im mittleren Anforderungsbereich der ZTV SoB-StB. Wie bei den guten Schlagzertrümmerungs- bzw. Los-Angeles-Werten zu erwarten, treten nur geringe Verfeinerungen im Gemisch auf. Insbesondere der Feinkornbereich ist konstant, auch der Proctor nach DBS bewirkt nur eine Zunahme des Feinanteils von ca. 2 M.-%.

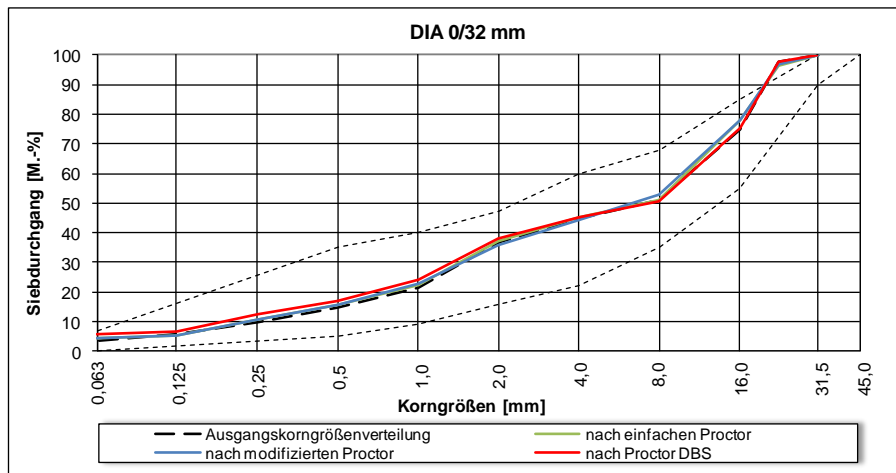


Bild 5-1: Korngrößenverteilungen des Diabas 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

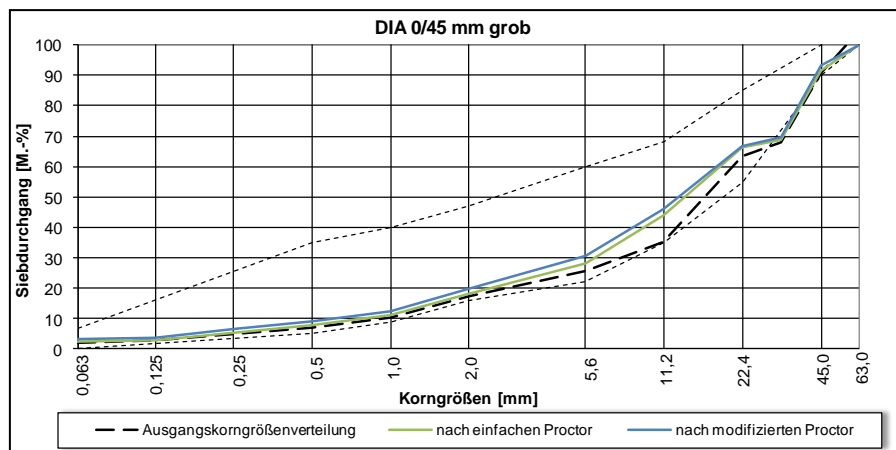


Bild 5-2: Korngrößenverteilungen des Diabas 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

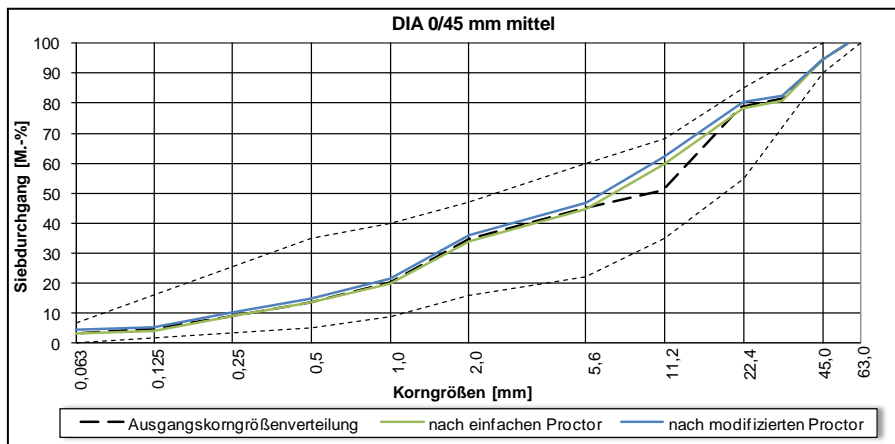


Bild 5-3: Korngrößenverteilungen des Diabas 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

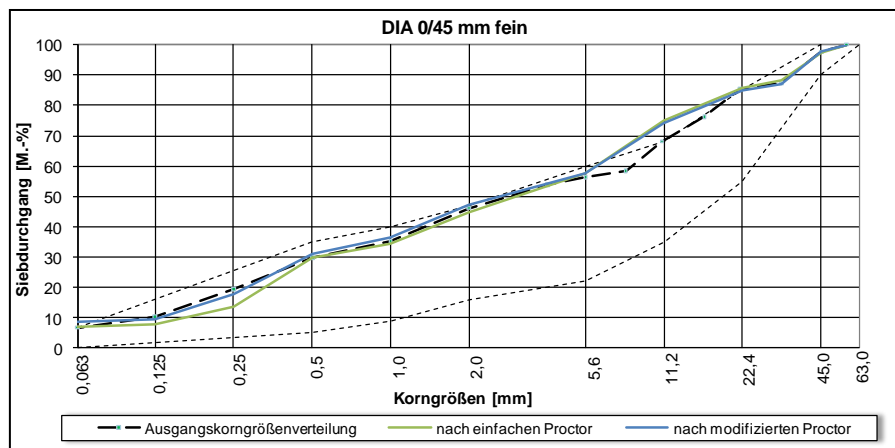


Bild 5-4: Korngrößenverteilungen des Diabas 0/45 fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.2 Kornverfeinerungen Diabas mit 10 M.-% Natursand

Um die Wasserdurchlässigkeit des Baustoffgemisches aus Diabas (DIA) zu verbessern wurde eine zusätzliche Untersuchungsreihe mit dem gleichen Gestein, aber unter Zugabe von 10 M.-% Natursand durchgeführt. Die resultierenden Kornverfeinerungen liegen etwas höher als bei der reinen Gesteinskörnung aus Diabas, sind aber immer noch als geringfügig zu bezeichnen.

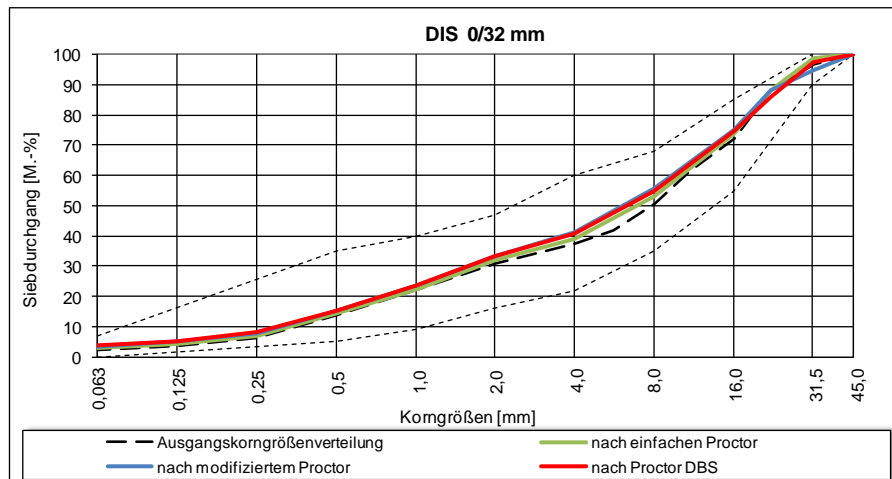


Bild 5-5: Korngrößenverteilungen des Diabas mit 10 M.-% Natursand 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

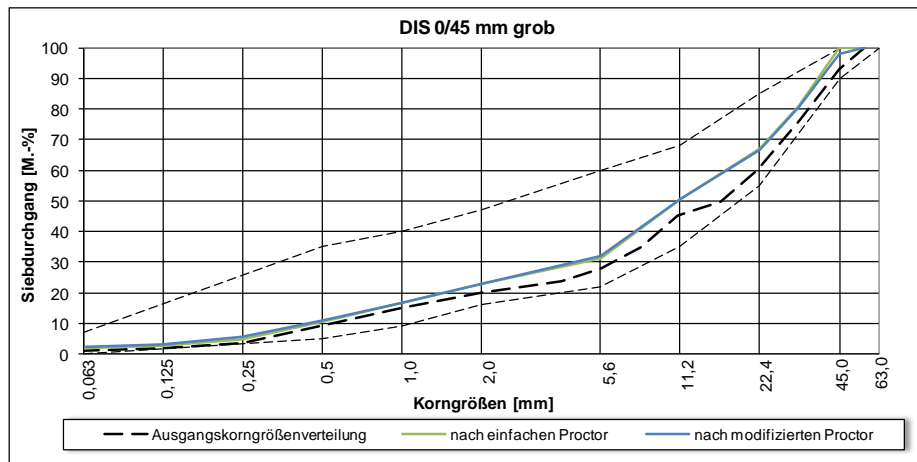


Bild 5-6: Korngrößenverteilungen des Diabas mit 10 M.-% Natursand 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

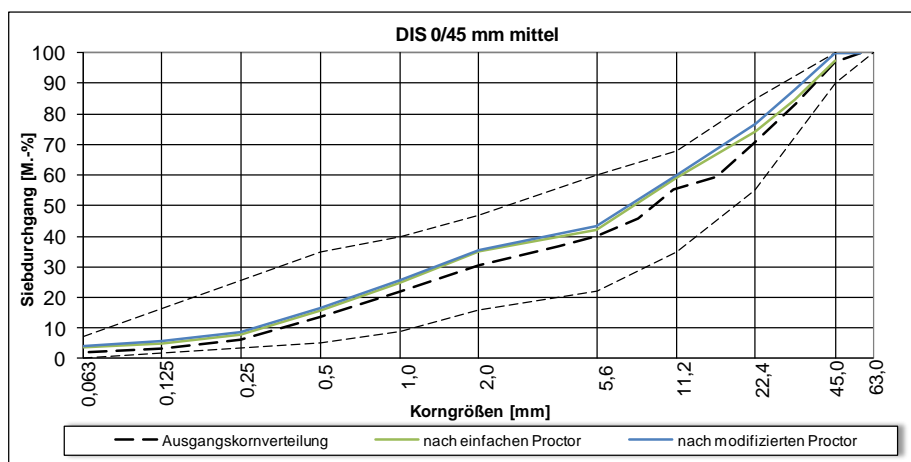


Bild 5-7: Korngrößenverteilungen des Diabas mit 10 M.-% Natursand 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

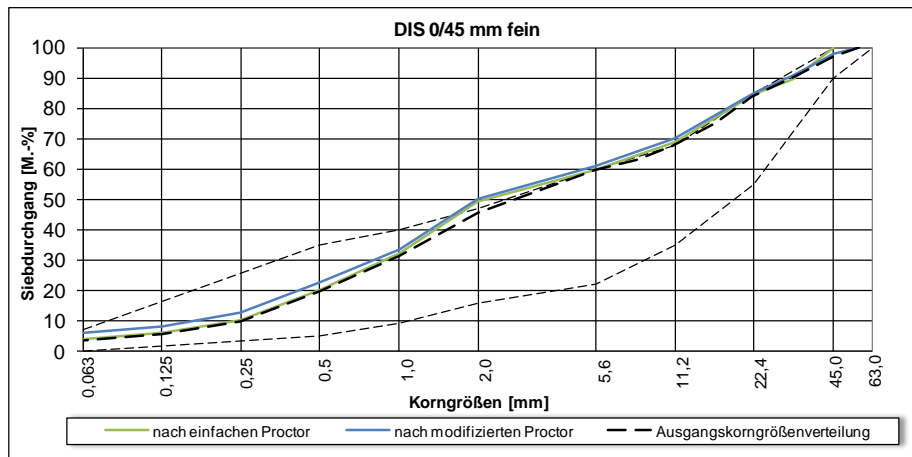


Bild 5-8: Korngrößenverteilungen der Diabas mit 10 M.-% Natursand 0/45 fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.3 Kornverfeinerungen Basaltlava

Von dem Baustoffgemisch aus Basaltlava wurde nur eine mittlere Korngrößenverteilung mit einem Größtkorn von 31,5 mm untersucht. Auf weitere Untersuchungen mit variierender Korngrößenverteilung wurde nach Diskussion mit dem Projektbegleitenden Ausschuss verzichtet. Stattdessen wurden weitergehende Untersuchungen mit der porösen Lavaschlacke durchgeführt.

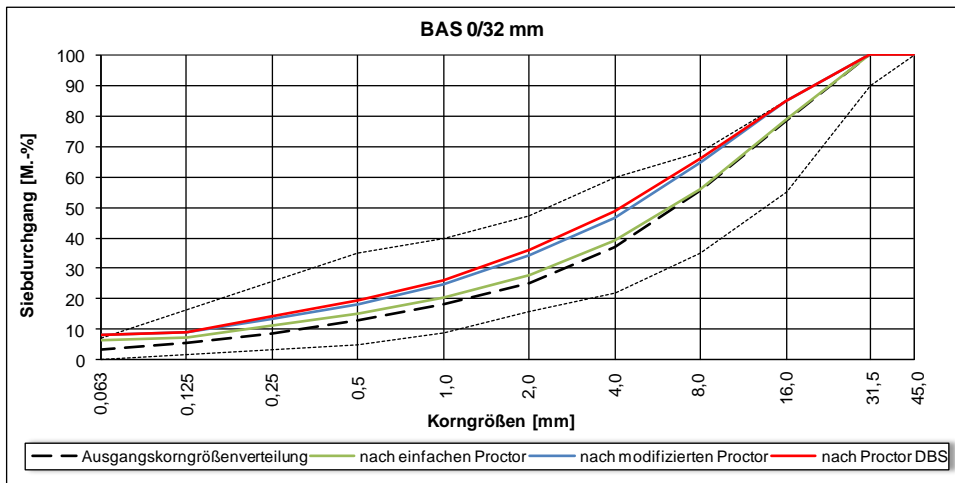


Bild 5-9: Korngrößenverteilungen der Basaltlava 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.4 Kornverfeinerungen Lavaschlacke

Auffallend sind die geringen Kornverfeinerungen in den Kornfraktionen kleiner 0,25 mm.

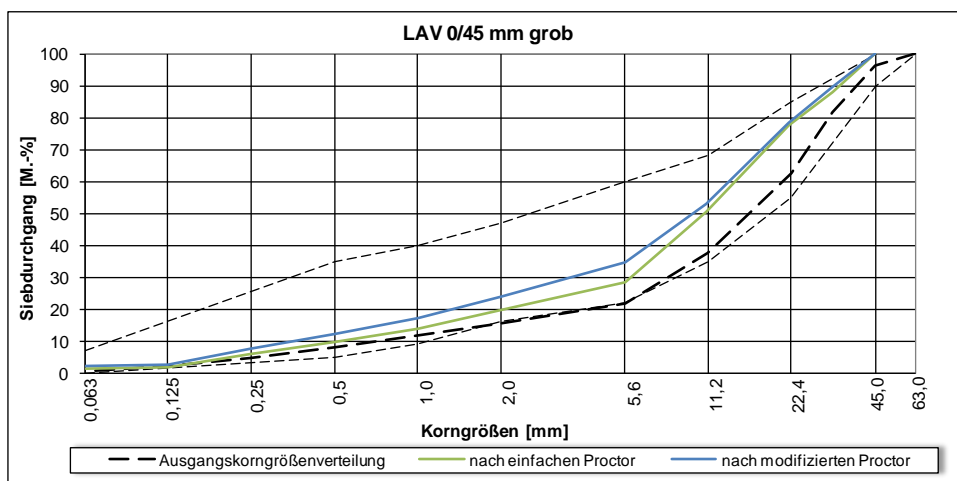


Bild 5-10: Korngrößenverteilungen des Lavaschlackengemisches 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

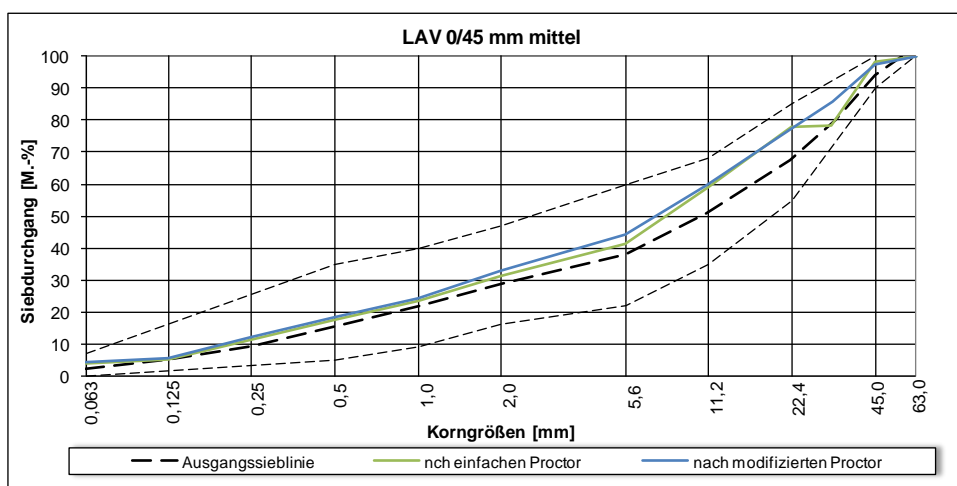


Bild 5-11: Korngrößenverteilungen des Lavaschlackengemisches 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

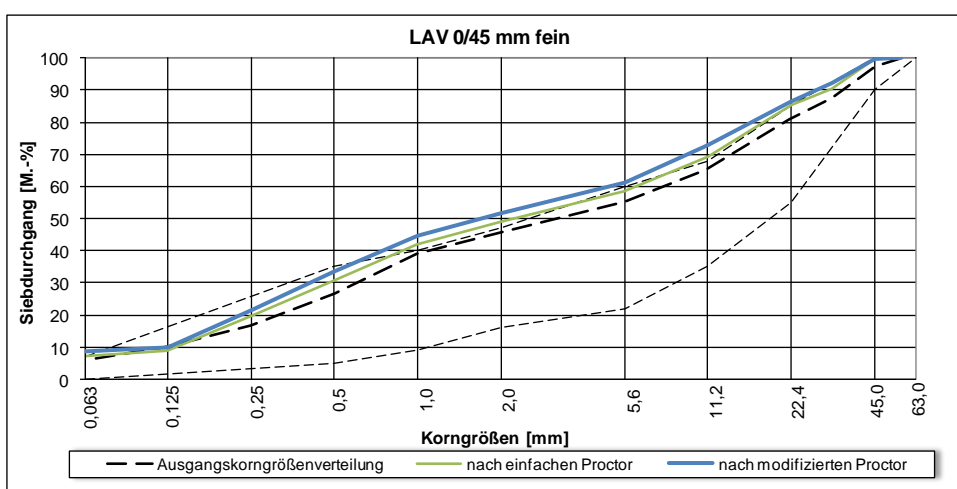


Bild 5-12: Korngrößenverteilungen des Lavaschlackengemisches 0/45 fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.5 Kornverfeinerungen Quarzsandstein

Entsprechend den hohen Schlagzertrümmerungswerten des Quarzsandsteins weisen die Korngemische auch die höchsten Kornverfeinerungen auf. Trotzdem liegen alle Verfeinerungen zum überwiegenden Teil innerhalb des Anforderungsbereiches der TL SoB-StB. Nur die Korngrößenverteilungskurve des Proctor nach DBS liegt außerhalb des Anforderungsbereiches.

Auffällig ist auch die geringe Bildung von zusätzlichem Feinkorn sowie die „Einschnürung“ der Korngrößenverteilungen in dem Kornbereich 0,125 bis 0,25 mm. Dies könnte wiederum an der hohen Inhomogenität des Gesteins – gerade in den kleineren Korngrößen – liegen. Dies ist auch in Bild 3-2 gut zu erkennen.

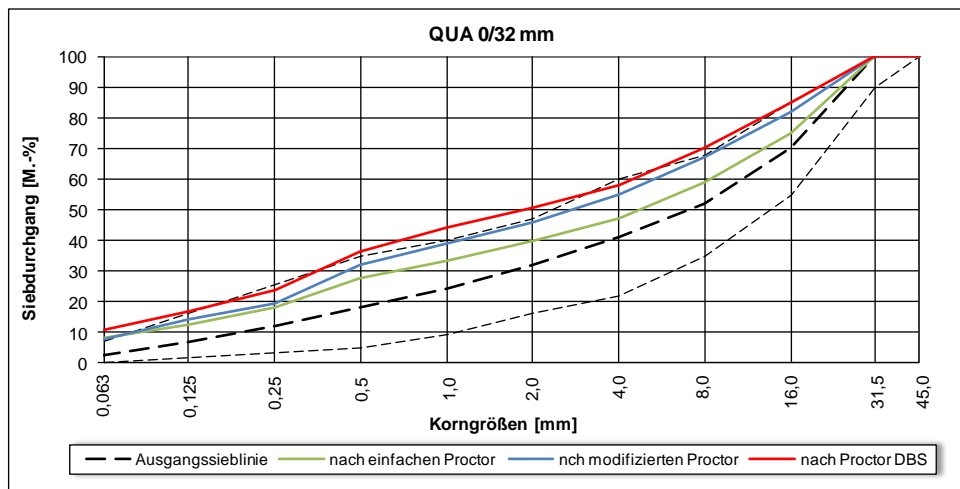


Bild 5-13: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus Quarzsandgestein 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

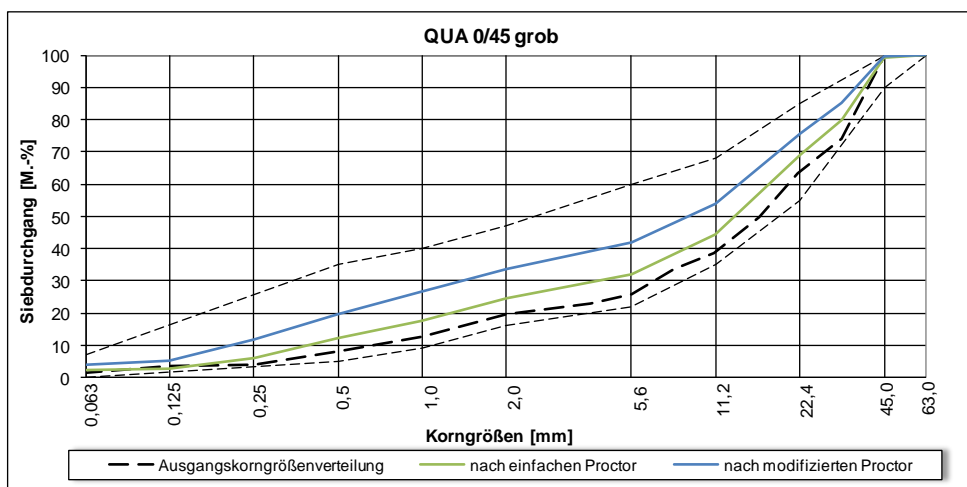


Bild 5-14: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus Quarzsandgestein 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

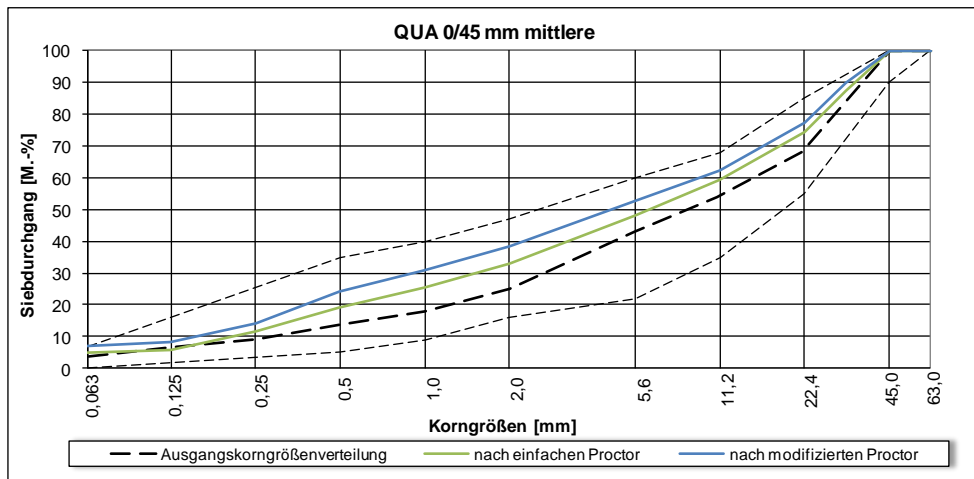


Bild 5-15: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus Quarzsandgestein 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

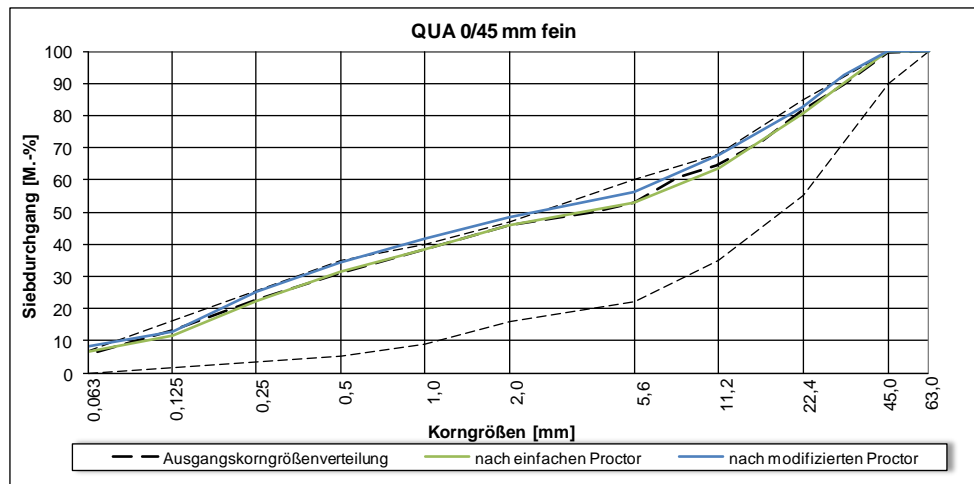


Bild 5-16: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus Quarzsandgestein 0/45 fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.6 Kornverfeinerungen Kalkstein

Der Kalkstein lag in einer sehr groben Korngrößenverteilung vor. Daher war es nicht möglich wie bei den übrigen Materialien, die feine und mittlere Korngrößenverteilung mit so hohen Kornanteilen kleiner 5,6 mm herzustellen.

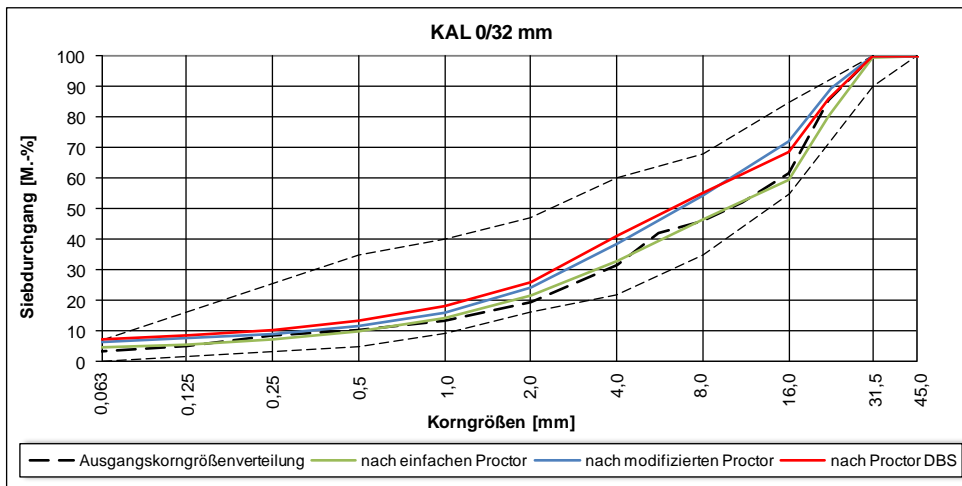


Bild 5-17: Korngrößenverteilungen der Gemische aus Kalkstein 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

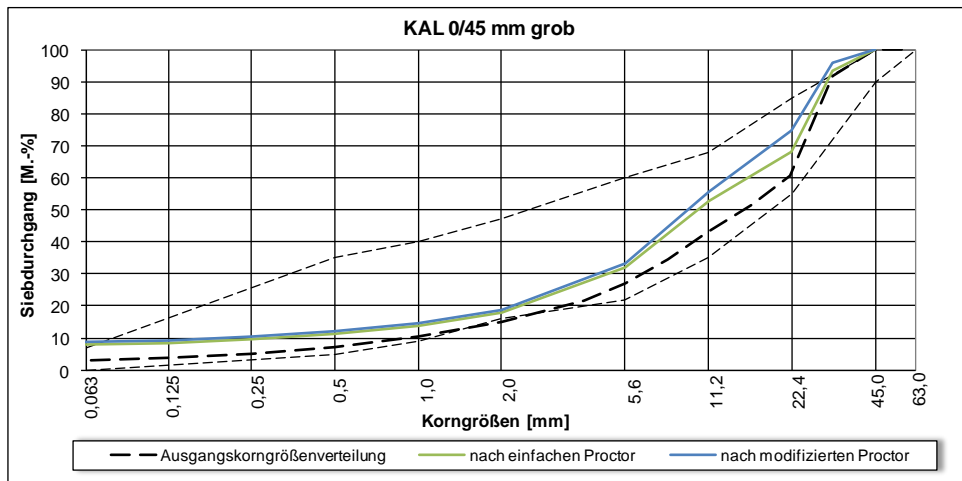


Bild 5-18: Korngrößenverteilungen der Gemische aus Kalkstein 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

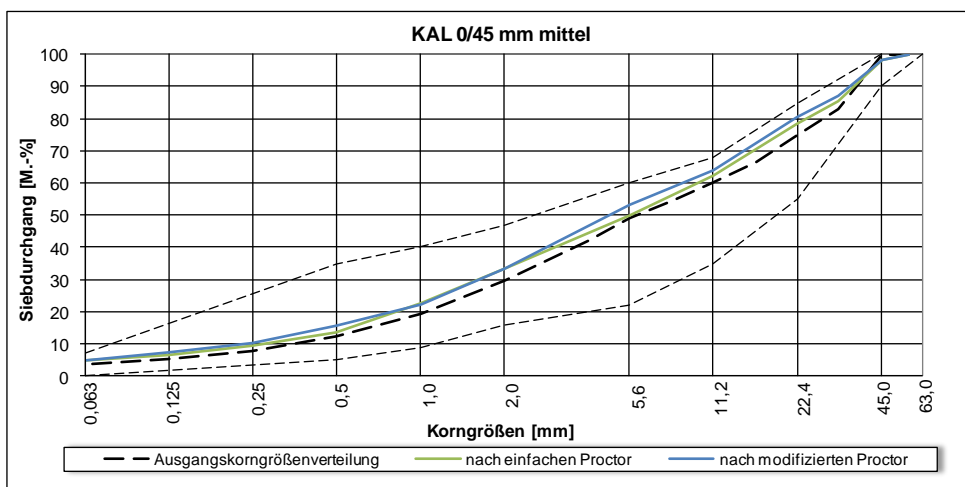


Bild 5-19: Korngrößenverteilungen der Gemische aus Kalkstein 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

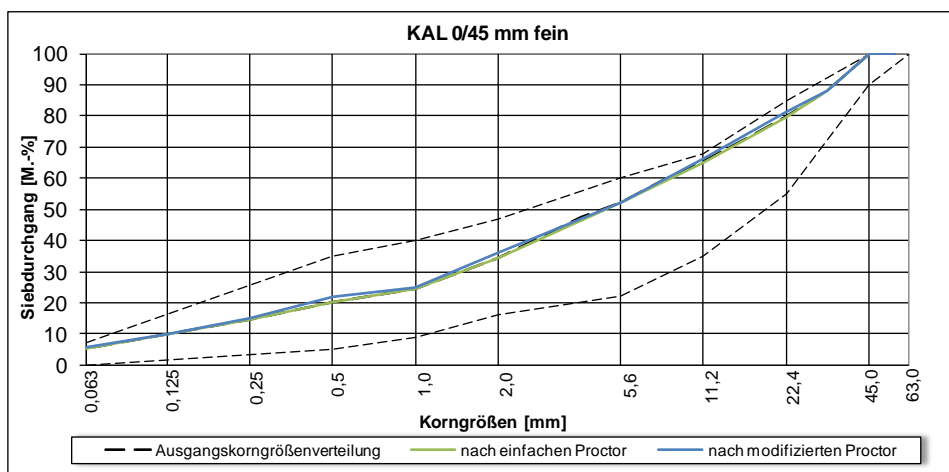


Bild 5-20: Korngrößenverteilungen der Gemische aus Kalkstein 0/45 fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.7 Kornverfeinerungen RCB1

Das rezyklierte Baustoffgemisch RCB1 wurde nur in der Korngrößenverteilung 0/31 mm untersucht. Aufgrund der ungünstigen Gebrauchseigenschaften (Verfestigung bei den CBR-Prüfungen, siehe Bild 6-12) wurde ein anderer rezyklierter Betonaufbruch als Grundlage der Gemische RCZ, RCK und RCP verwendet und auf weitere Prüfungen an Korngrößenverteilungen mit größerem Größtkorn verzichtet.

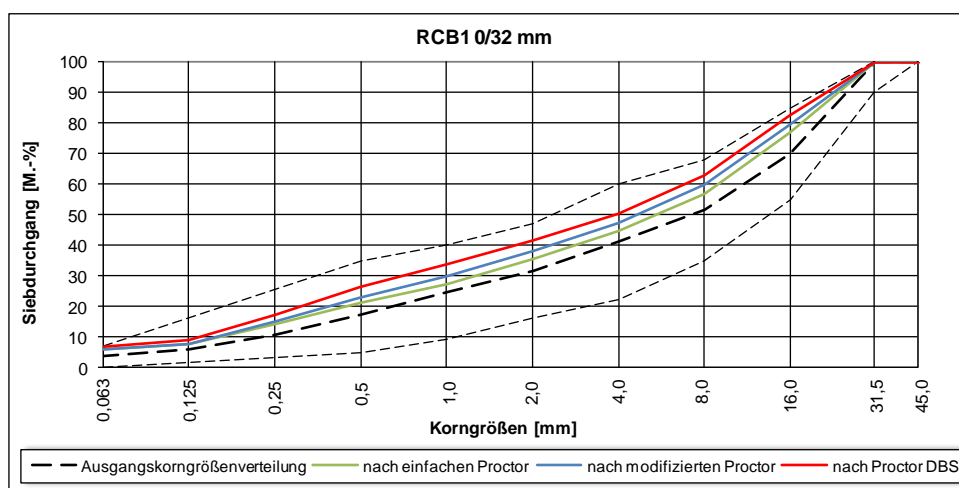


Bild 5-21: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus RCB1 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.8 Kornverfeinerungen RCB2

Auffällig ist die relativ starke Verfeinerung des Kornbereiches 11,2 bis 22,4 mm. Grund könnte die inhomogene Zusammensetzung des Gemisches sein, vor allem der hohe Anteil an Komponenten mit geringer Kornfestigkeit in den gröberen Fraktionen.

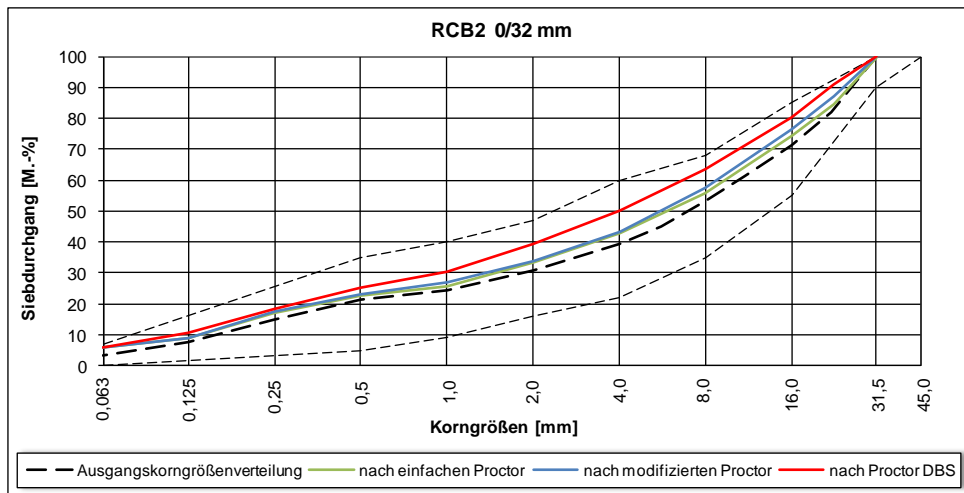


Bild 5-22: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus RCB2 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

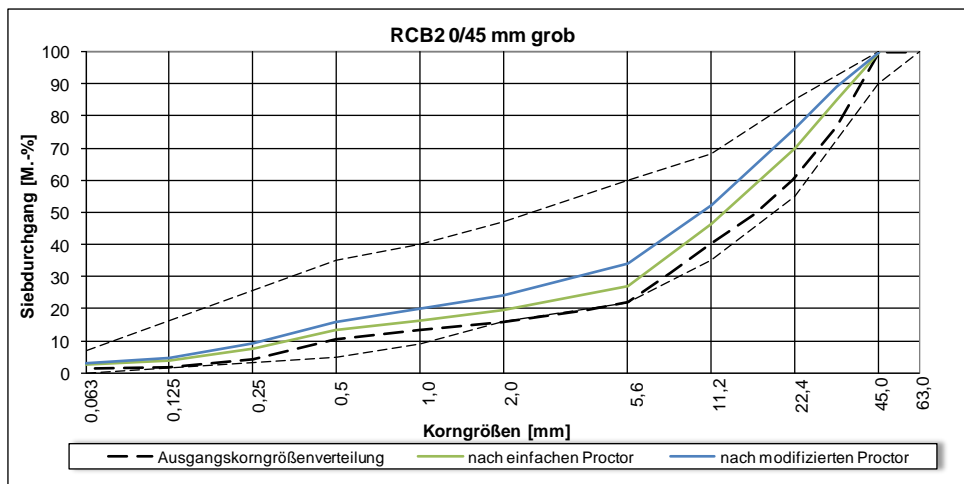


Bild 5-23: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus RCB2 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

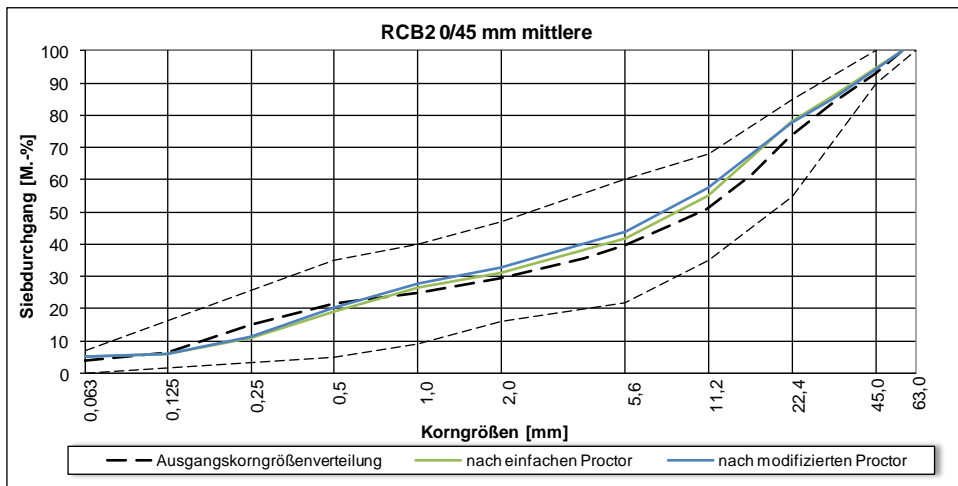


Bild 5-24: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus RCB2 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

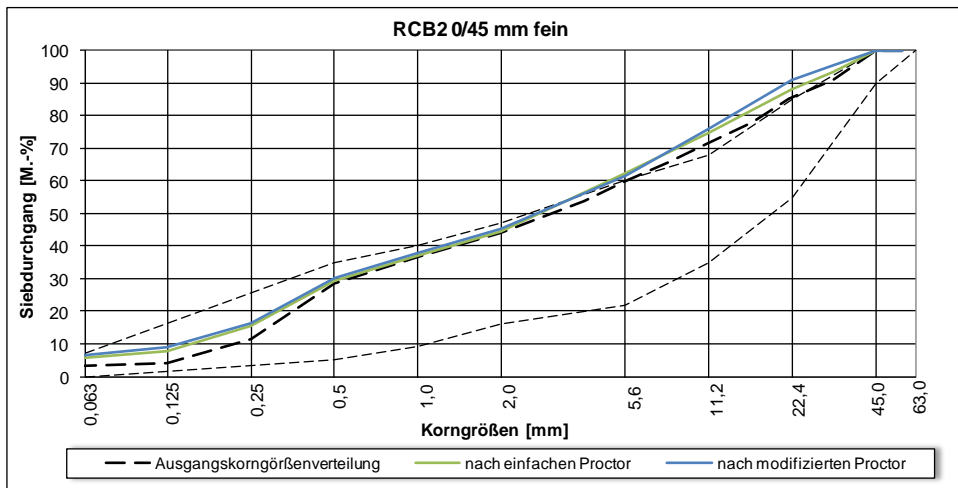


Bild 5-25: Korngrößenverteilungen des Gemisches aus RCB2 0/45 fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.9 Kornverfeinerungen RCZ

Die Zugabe von 30 M.-% Ziegel, Klinker und Steinzeug zum Gemisch RCB2 bewirkt nur eine geringe Zunahme der Kornverfeinerungen in den mittleren bis groben Bereichen.

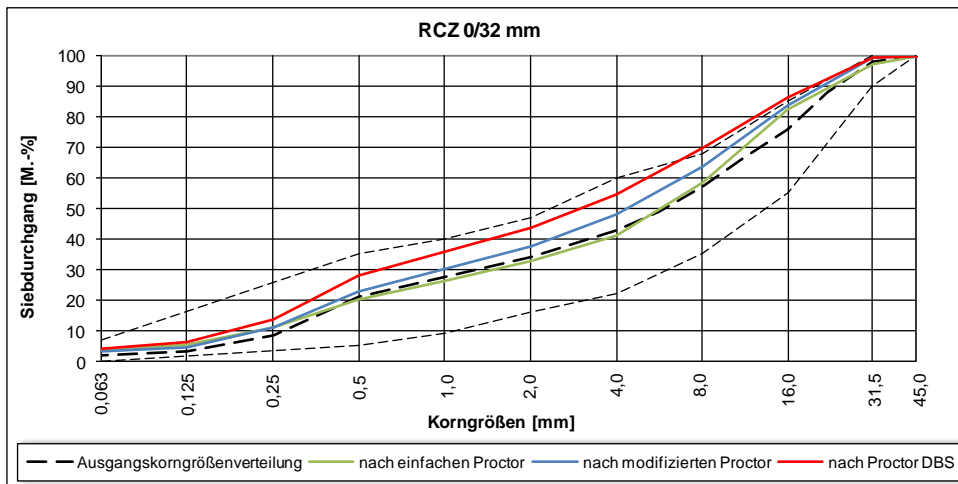


Bild 5-26: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCZ 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

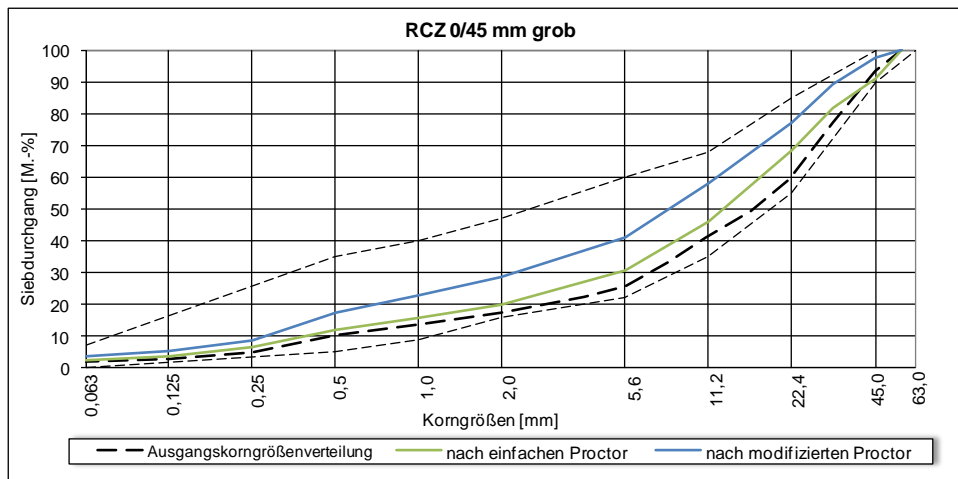


Bild 5-27: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCZ 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

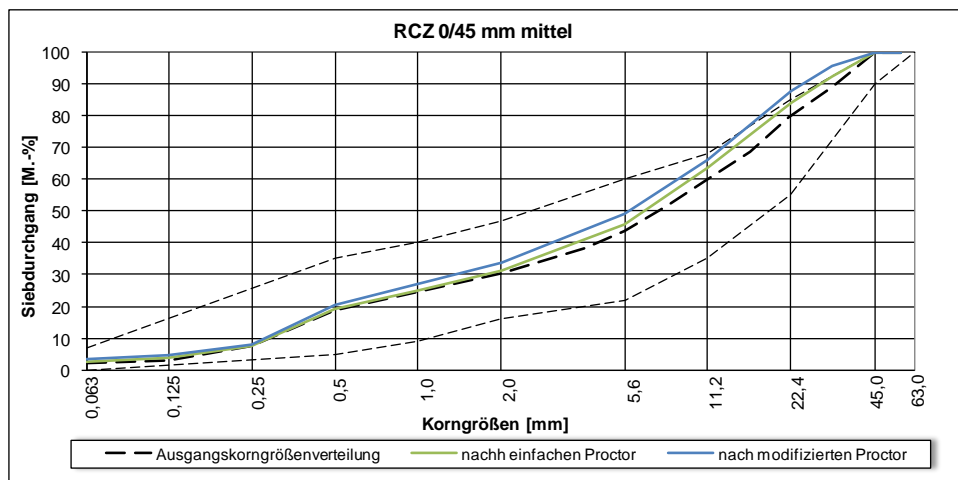


Bild 5-28: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCZ 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

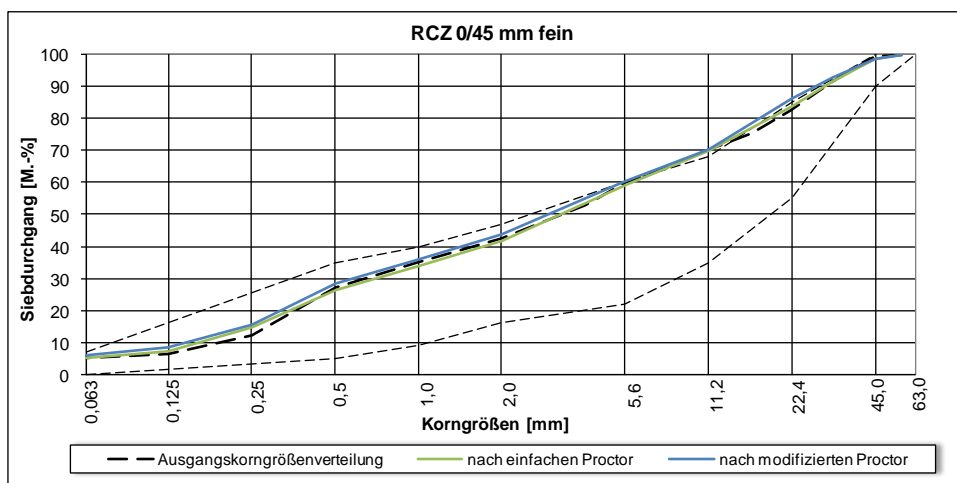


Bild 5-29: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCZ 0/45 fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.10 Kornverfeinerungen RCK

Das Gemisch RCK besteht aus dem Betonaufbruch RCB2 unter Zugabe von 30 M.-% Kalksandstein, Putze und Mauerwerksmörtel. Auffällig ist vor allem die gute Verstetigung der groben Korngrößenverteilung. Abweichend von der übrigen Prüfmethodik wurde für das Korngemisch mit einem Größtkorn von 31 mm eine feine Korngrößenverteilung gewählt, dementsprechend gering sind die erzielten Kornverfeinerungen.

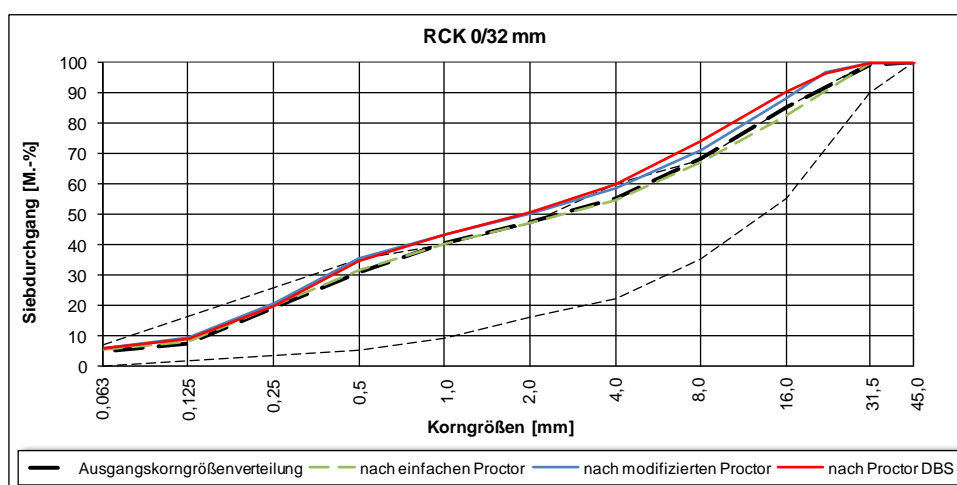


Bild 5-30: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCK 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

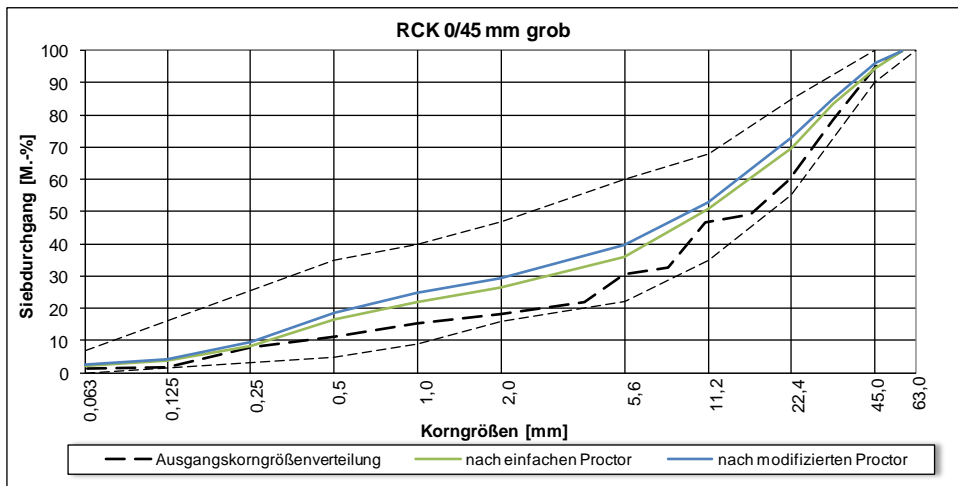


Bild 5-31: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCK 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

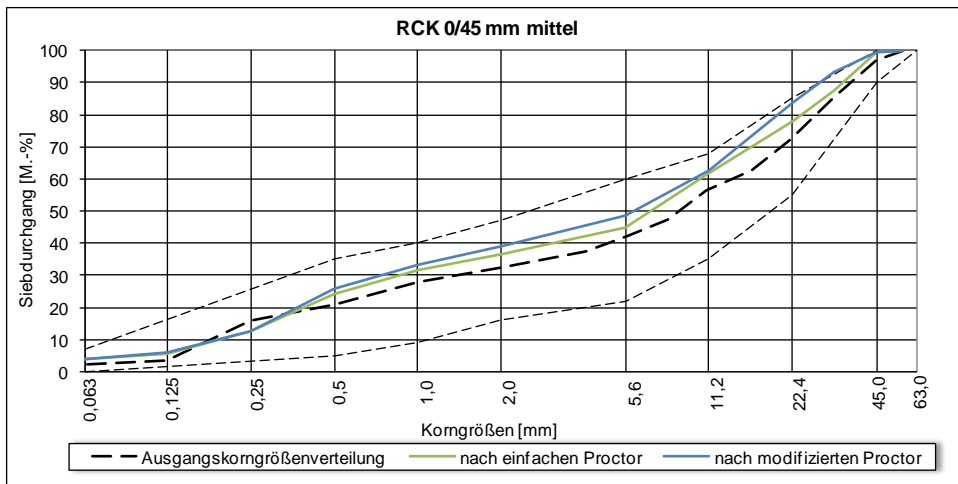


Bild 5-32: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCK 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

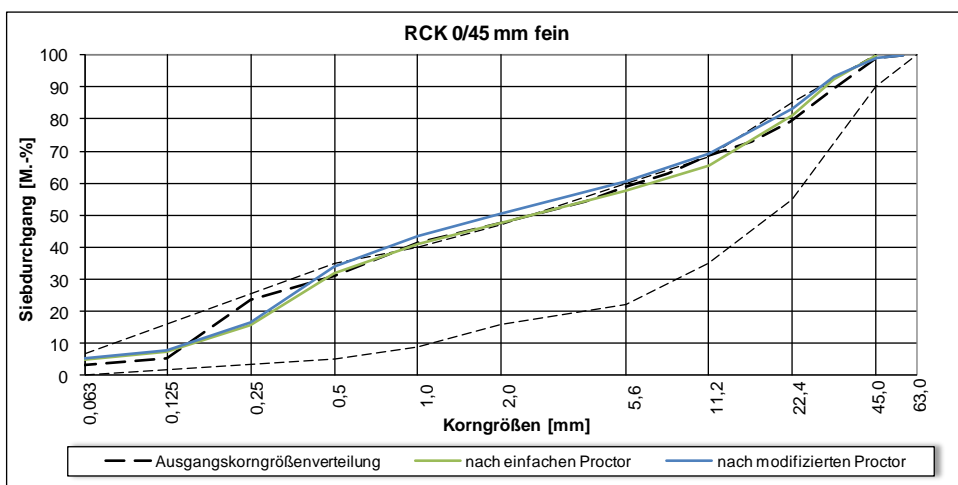


Bild 5-33: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCK 0/45 fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.11 Kornverfeinerungen RCP

Die Zugabe von 5 M.-% Porenbeton zum Betongranulat RCB2 führt zu keiner signifikanten Erhöhung der Kornverfeinerung.

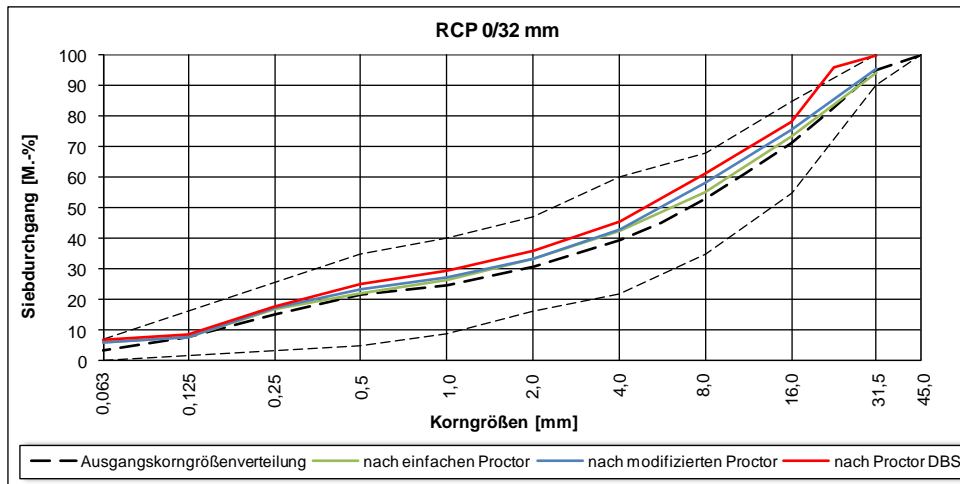


Bild 5-34: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCP 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

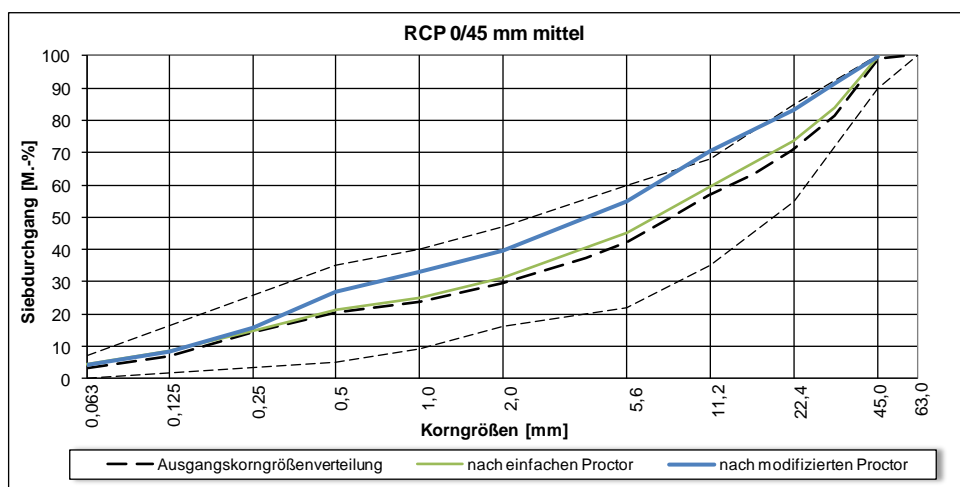


Bild 5-35: Korngrößenverteilungen des Gemisches RCP 0/45 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.12 Kornverfeinerungen RPG

Das Gemisch zeigt auffallend hohe Verfeinerungen nach Beanspruchung mit dem Proctor nach DBS. Ansonsten ähneln die Verfeinerungen des Praxismisches mit hohem Anteil an Betongranulat denen der anderen rezyklierten Betongemische.

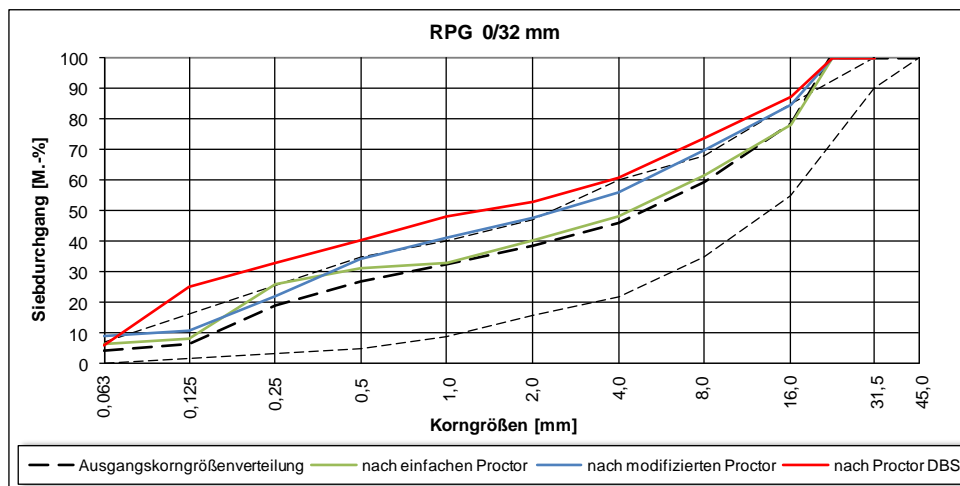


Bild 5-36: Korngrößenverteilungen des Gemisches RPG 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

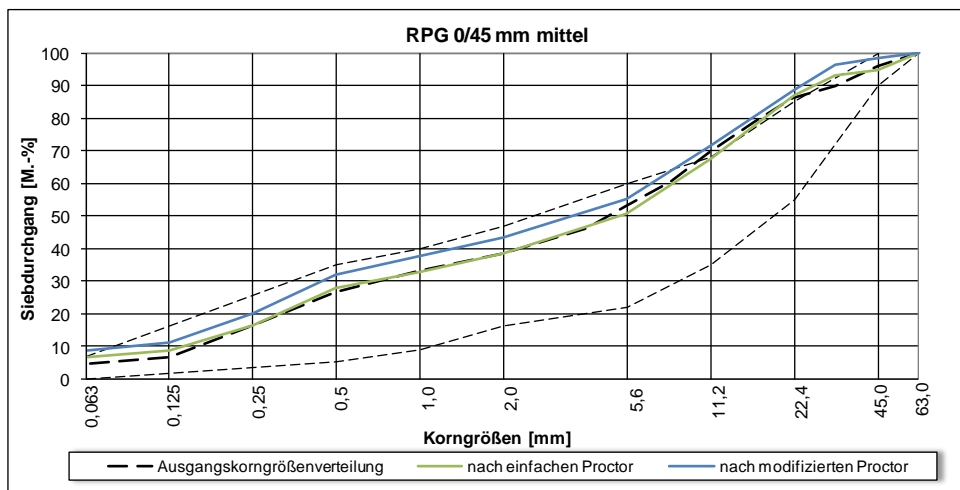


Bild 5-37: Korngrößenverteilungen des Gemisches RPG 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.2.13 Kornverfeinerungen HMV

Das Baustoffgemisch aus HMV-Asche lag nur mit einem Größtkorn von 32 mm vor. Daher war es nicht möglich, Kornanteile größer 32 mm in die übrigen Gemischvarianten zuzugeben.

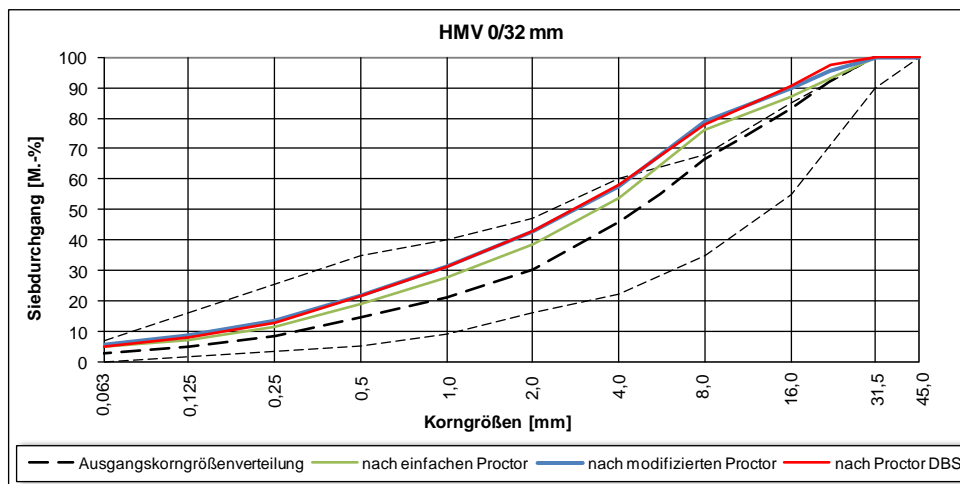


Bild 5-38: Korngrößenverteilungen des Gemisches HMV 0/32 (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

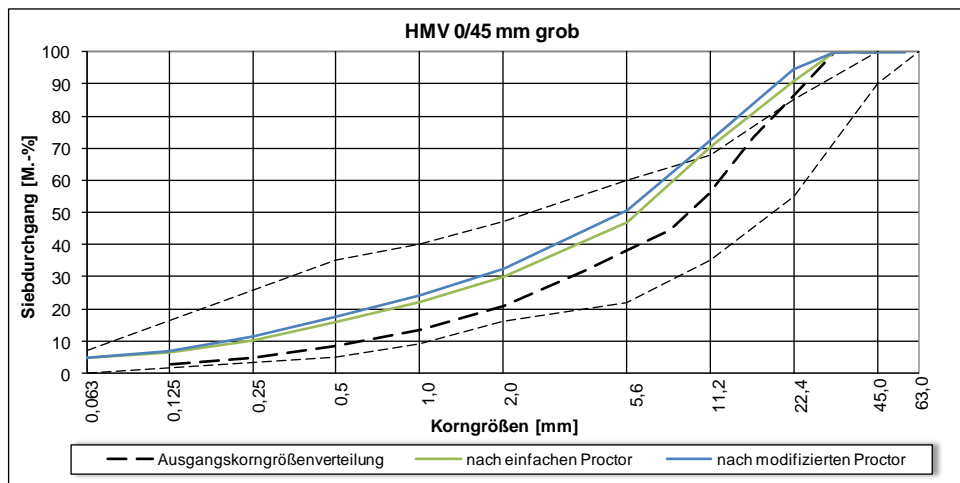


Bild 5-39: Korngrößenverteilungen des Gemisches HMV 0/45 grob (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

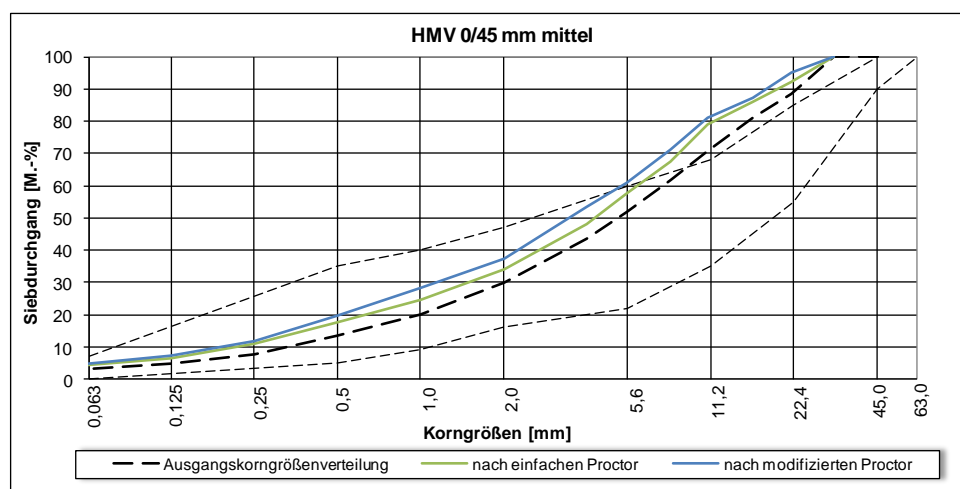


Bild 5-40: Korngrößenverteilungen des Gemisches HMV 0/45 mittel (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

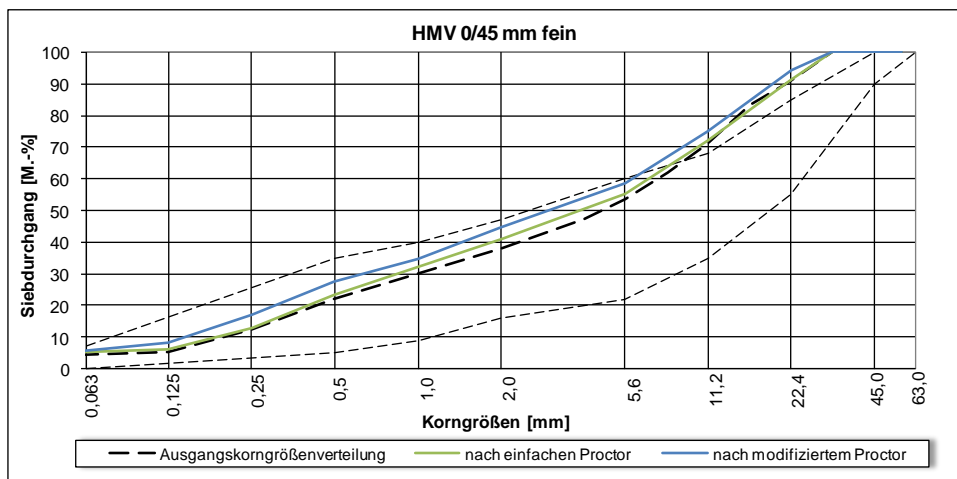


Bild 5-41: Korngrößenverteilungen des Gemisches HMV 0/45 mm fein (vor und nach Beanspruchung mittels Proctorversuch)

5.3 Ergebnisse der Untersuchungsstufe C

5.3.1 Ergebnisse der CBR-Prüfungen

Die CBR-Prüfung wurde nach Einbau der Proben in Stahlzylindern durchgeführt. Das Diabasgemisch erreicht die höchste Festigkeit, die durch Zugabe von Natursand (DIS) allerdings deutlich verringert wird. Die Gemische auf Grundlage des RCB2 liegen in einem vergleichbaren Bereich. Auffallend gering sind die CBR-Werte der Gemische aus Kalkstein und HMV-Asche.

Tabelle 5-3: CBR-Werte der untersuchten Gemische

Probenbezeichnung	CBR [%]	Probenbezeichnung	CBR [%]
DIA	165,2	RCB2	93,4
DIS	97,0	RCZ	104,2
BAS	60,7	RCK	73,9
LAV	70,9	RCP	88,7
QUA	93,4	RPG	63,4
KAL	34,6	HMV	26,3

5.3.2 Ergebnisse der Frosthebungsuntersuchungen

Im Vergleich zu den Naturgesteinen zeigen die rezyklierten Gemische tendenziell höhere maximale Frosthebungen und auch höhere verbleibende Hebungen. Die Gemische auf Grundlage des RCB2 variieren stark in ihrem Hebungsverhalten, überschreiten aber nur in einem Fall die maximale Frosthebung ihres Grundmaterials (RCB2). Sehr gering fallen die Hebungen der porösen Materialien Basaltlava und Lavaschlacke aus.

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Frosthebungsuntersuchungen

Probenbezeichnung	anfängliche Hebung	maßgebliche Hebungsgeschwindigkeit	maximale Frosthebung	verbleibende Resthebung
	[mm]	[mm/d]	[mm]	[mm]
DIA	-0,052	0,317	4,000	0,711
DIS	0,541	0,082	2,383	0,053
BAS	0,386	0,202	2,050	0,387
LAV	-0,007	0,006	0,373	0,067
QUA	0,577	0,604	7,326	1,509
KAL	0,087	0,090	4,209	0,619
RCB1	-0,048	0,307	8,246	2,393
RCB2	0,180	0,354	7,554	1,803
RCZ	0,018	0,201	3,051	0,776
RCK	0,222	0,401	6,834	1,732
RCP	0,011	0,222	4,727	0,693
RPG	0,372	0,357	5,383	1,437
HMV	0,490	0,107	6,166	1,301

5.3.3 Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsprüfung

Bei einem Einbau mit modifizierter Proctorverdichtung sinkt die Wasserdurchlässigkeit im Vergleich zu einem Einbau mit einfacher Proctorverdichtung stark ab (Tabelle 5-5). Kein Gemisch erreicht dann noch eine Wasserdurchlässigkeit von 10^{-5} m/s, die als ausreichend wasserdurchlässig eingestuft wird.

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsprüfung

Probenbezeichnung	einfacher Proctor	modifizierter Proctor
	[m/s]	[m/s]
DIA	5,10E-06	6,30E-06
DIS	1,30E-05	8,69E-06
BAS	2,17E-05	2,46E-06
LAV	1,79E-05	1,24E-05
QUA	1,86E-05	1,30E-06
KAL	7,73E-06	3,51E-06
RCB1	2,36E-06	< 5,00E-07
RCB2	2,20E-06	1,00E-06
RCZ	5,77E-05	4,10E-06
RCK	6,00E-07	< 5,00E-07
RCP	< 5,00E-07	< 5,00E-07
RPG	< 5,00E-07	< 5,00E-07
HMV	1,10E-05	1,40E-06

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Diskussion der Ergebnisse der Untersuchungsstufe A

6.1.1 Widerstand gegen Zertrümmerung

Ziel war es Baustoffgemische mit geringer Festigkeit (Schlagzertrümmerungswerte größer SZ_{28}) zu beschaffen. Dies gelang zumeist, die Grundlage für die rezyklierten Gemische (RCB2) entspricht aber der Kategorie SZ_{28} , daher weisen auch die Gemische eine höhere Festigkeit als gewünscht auf. Die anderen Betongranulate wiesen wohl die schwächeren Festigkeiten auf, waren aber in ihrer Gebrauchstauglichkeit nicht geeignet eine verlässliche Differenzierung der Gemische sicher zu stellen.

Bereits vielfach wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen der Los-Angeles-Prüfung und dem Schlagzertrümmerungsversuch gesucht. Ein statistisch recht gut abgesicherter Zusammenhang wurde von Ballmann (63) gefunden und lautet:

$$SZ_{8/12} = 3,62 * LA_{10/14}^{0,5569}$$

In Bild 6-1 sind die Schlagzertrümmerungswerte im Verhältnis zu den LA-Werten der untersuchten Materialien graphisch aufgetragen. Der von Ballmann gefundene Zusammenhang wird tendenziell bestätigt, wobei ein vergleichsweise größerer Streubereich zu erkennen ist. Anzumerken ist dazu, dass die Zusammenhänge stark von der Gesteinsart und der untersuchten Kornfraktion beeinflusst werden. Nach (24) kann den verschiedenen Kornfraktionen eines Gemisches zum Teil unterschiedliche SZ- bzw. LA-Wert zugeordnet werden. Dies gilt vor allem bei stark inhomogenen Materialien, wie z.B. Lavaschlacken (Rohdichten zwischen 2,160 und 3,105 Mg/m³) oder rezyklierten Gemischen. Da leichte Materialarten im Untersuchungsprogramm vertreten sind, ist der erhöhte Streubereich nicht verwunderlich.

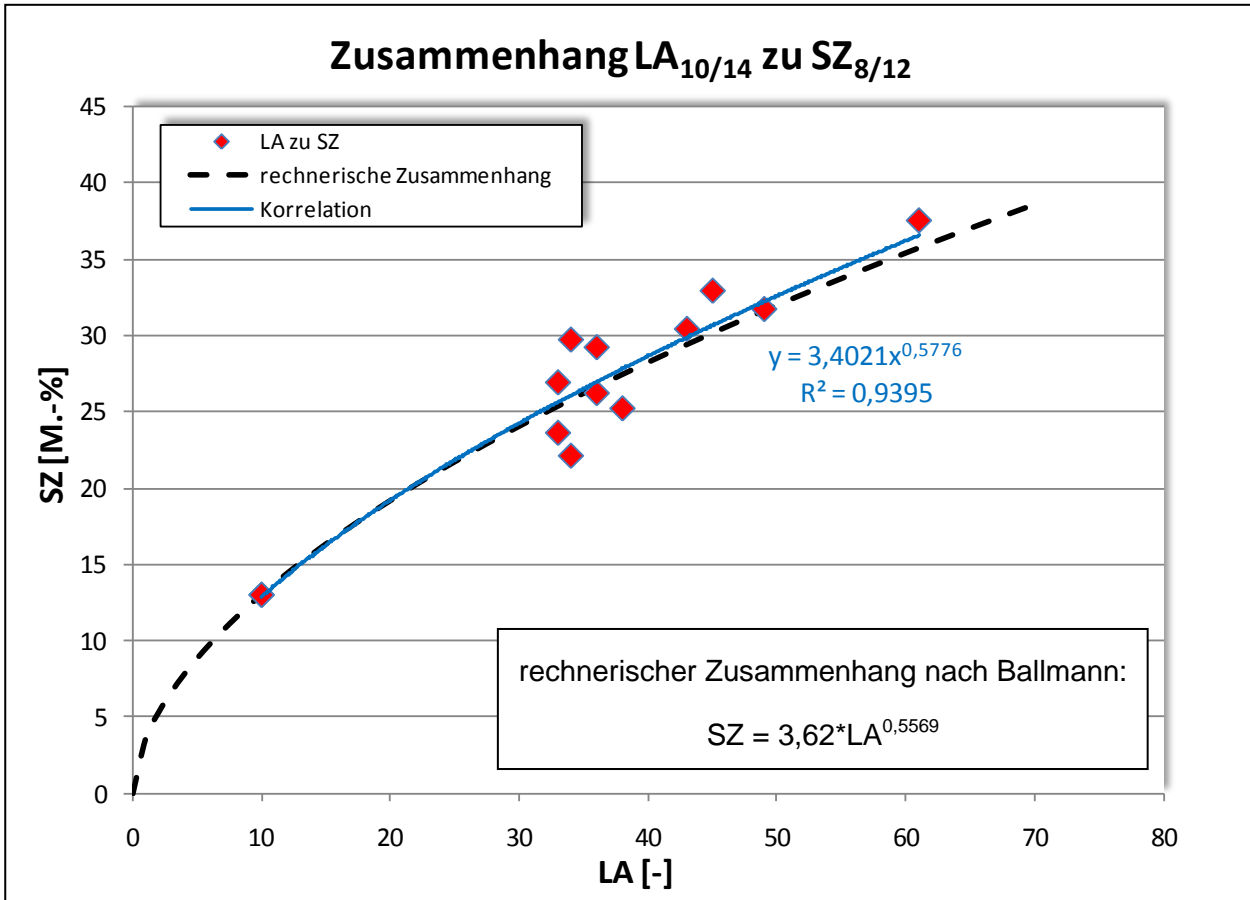


Bild 6-1: Zusammenhang LA zu SZ-Prüfung

6.2 Diskussion der Ergebnisse der Untersuchungsstufe B

6.2.1 Kornverfeinerung, Zusammenhang zu klassischen Festigkeitswerten

In Bild 6-2 und Bild 6-3 sind die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen an den Einzelkörnern und an den Korngemischen zusammengefasst dargestellt. Tendenziell weisen die Gemische mit feiner werdenden Korngrößenverteilungen geringere Verfeinerungen auf. Die Beanspruchungsart, die die höchste Verfeinerung hervorruft, ist der Proctor nach DBS. Er verfeinert die Gemische im Mittel doppelt so stark wie die energetisch gleichwertige modifizierte Proctorprüfung. Die feinen Gemische zeigen gerade bei einem niedrigen Beanspruchungsniveau nur sehr geringe Verfeinerungen, die häufig unterhalb der Messgenauigkeit des Prüfverfahrens liegen. Die daraus resultierenden negativen Verfeinerungen V sind technisch nahezu ausgeschlossen und wurden in der Auswertung daher zu Null gesetzt.

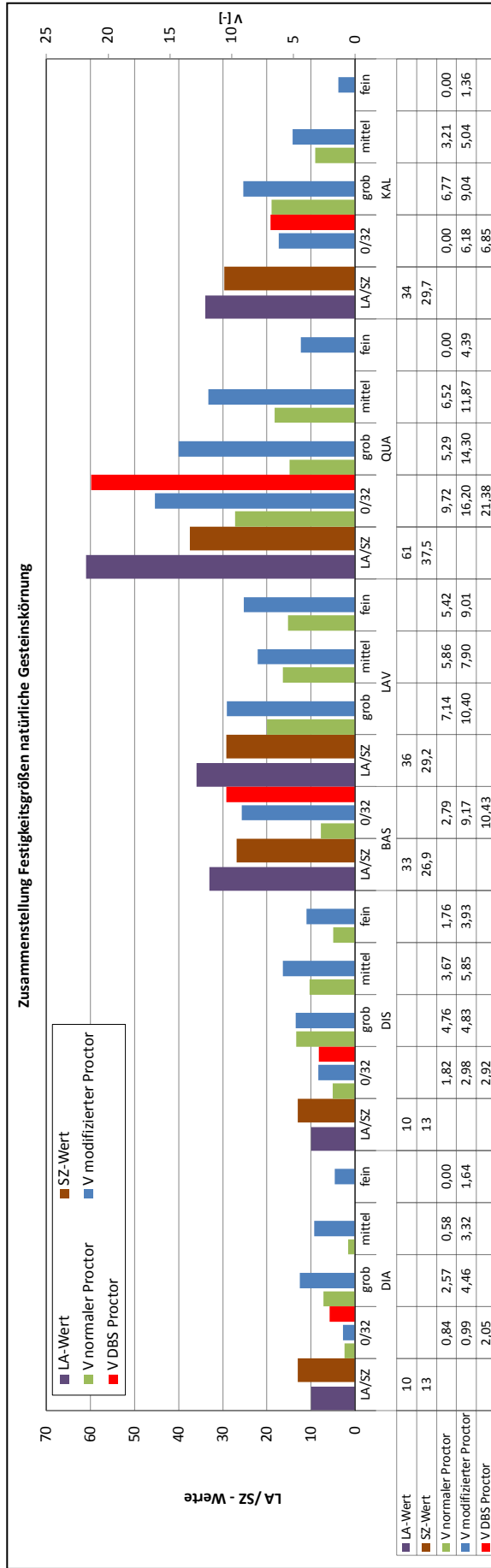


Bild 6-2: Zusammenfassung aller Festigkeitskennwerte der natürlichen Gesteinskörnung

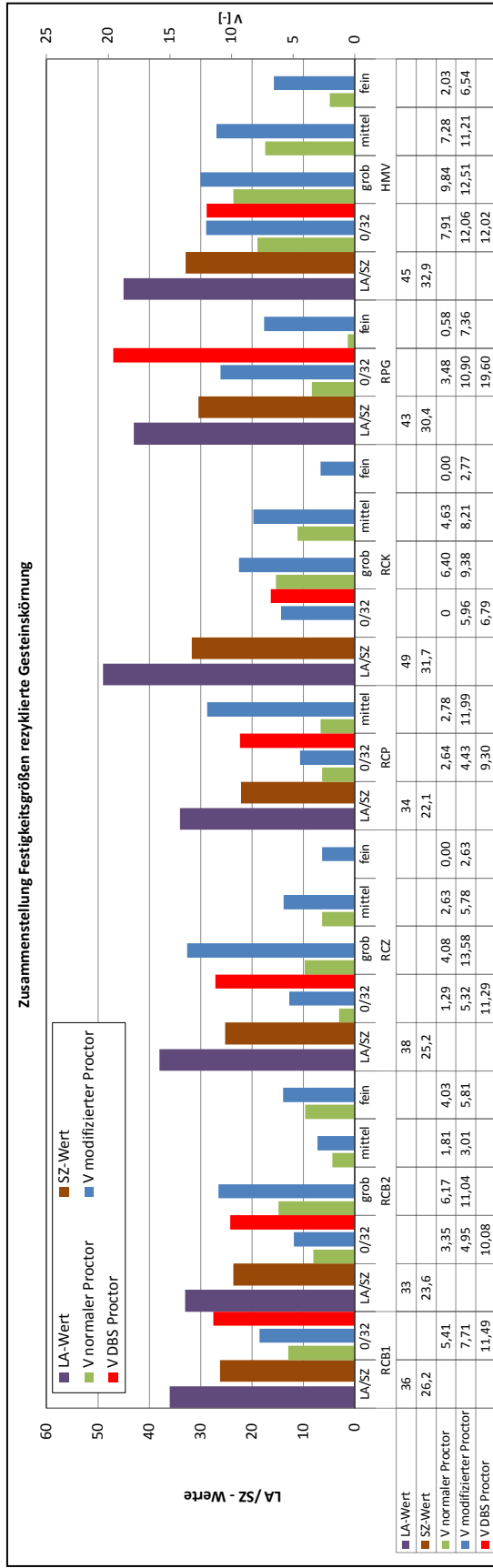


Bild 6-3: Zusammenfassung aller Festigkeitskennwerte der rezyklierten Gesteinskörnung

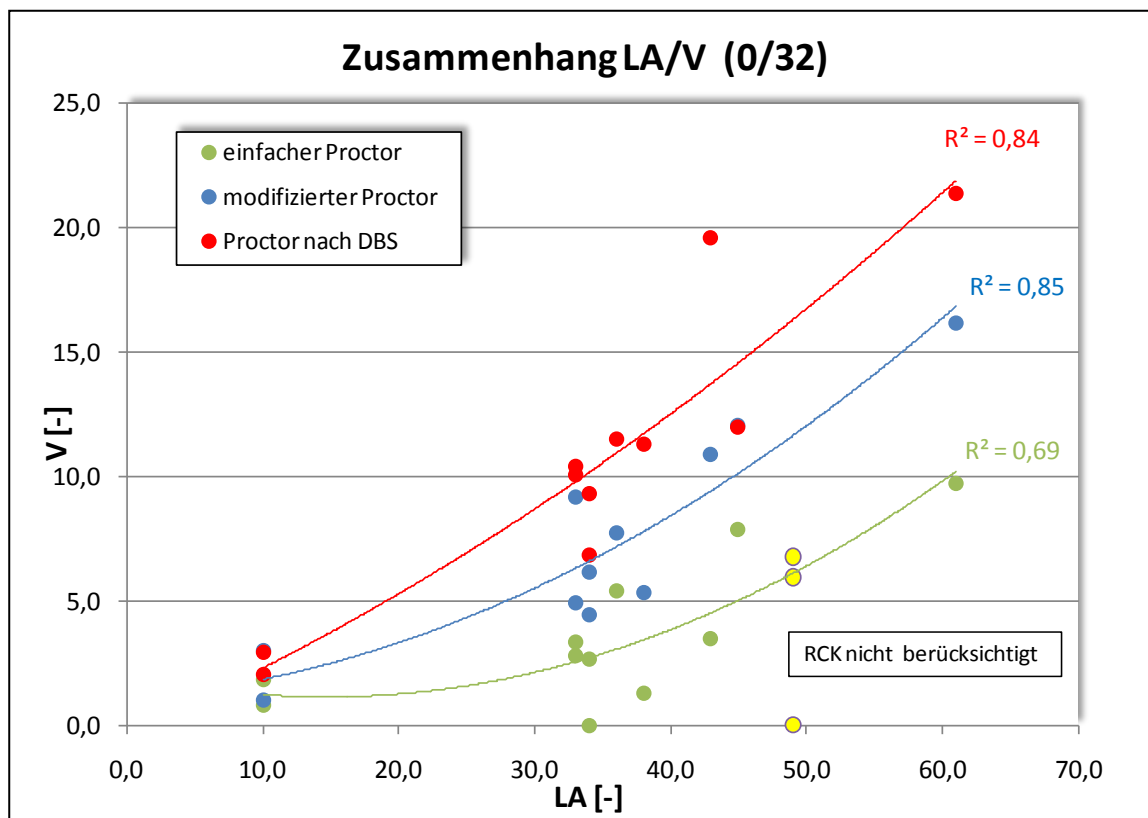


Bild 6-4: Zusammenhang Kornverfeinerung (Größtkorn 32 mm) zu LA-Koeffizient

In Bild 6-4 ist der Zusammenhang der Kornverfeinerung (Gemische mit Größtkorn 32 mm) mit dem LA-Koeffizienten dargestellt. Die Korrelationen nehmen mit dem Beanspruchungsniveau ab. Sowohl die modifizierte Proctorprüfung als auch die Proctorprüfung nach DBS korrelieren gut mit der LA-Prüfung. Voraussetzung dafür ist eine mittlere bis grobe Ausgangskorngrößenverteilung in der Proctorprüfung. Die gelb eingetragenen Punkte des Gemisches RCK weichen deutlich ab und sind in der statischen Auswertung nicht berücksichtigt. Grund dafür ist die Korngrößenverteilung mit einem sehr hohen Feinkornanteil (Bild 6-4).

In Bild 6-5 sind die Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der LA-Prüfungen und der Kornverfeinerung V der Gemische mit einem Größtkorn von 45 mm dargestellt. Die Korrelation der groben Korngrößenverteilung bei Beanspruchung mit dem modifizierten Proctor ist am höchsten. Das mangelnde Auflösungsvermögen bei feiner Korngrößenverteilung wird vor allem bei normaler Proctorbeanspruchung sichtbar. Hier verläuft die Regression in entgegengesetzter Richtung. Tendenziell wäre somit eine Verfeinerung bei härteren Gesteinen eher zu erwarten, als bei schwächeren. Passend dazu signalisiert der Korrelationskoeffizient von 0,07 aber deutlich, dass kein statistischer Zusammenhang vorliegt, was sicherlich nicht der Realität entspricht, aber die Wichtigkeit der Korngrößenverteilung bei der Prüfung der Festigkeit eines Korngemisches untermauert.

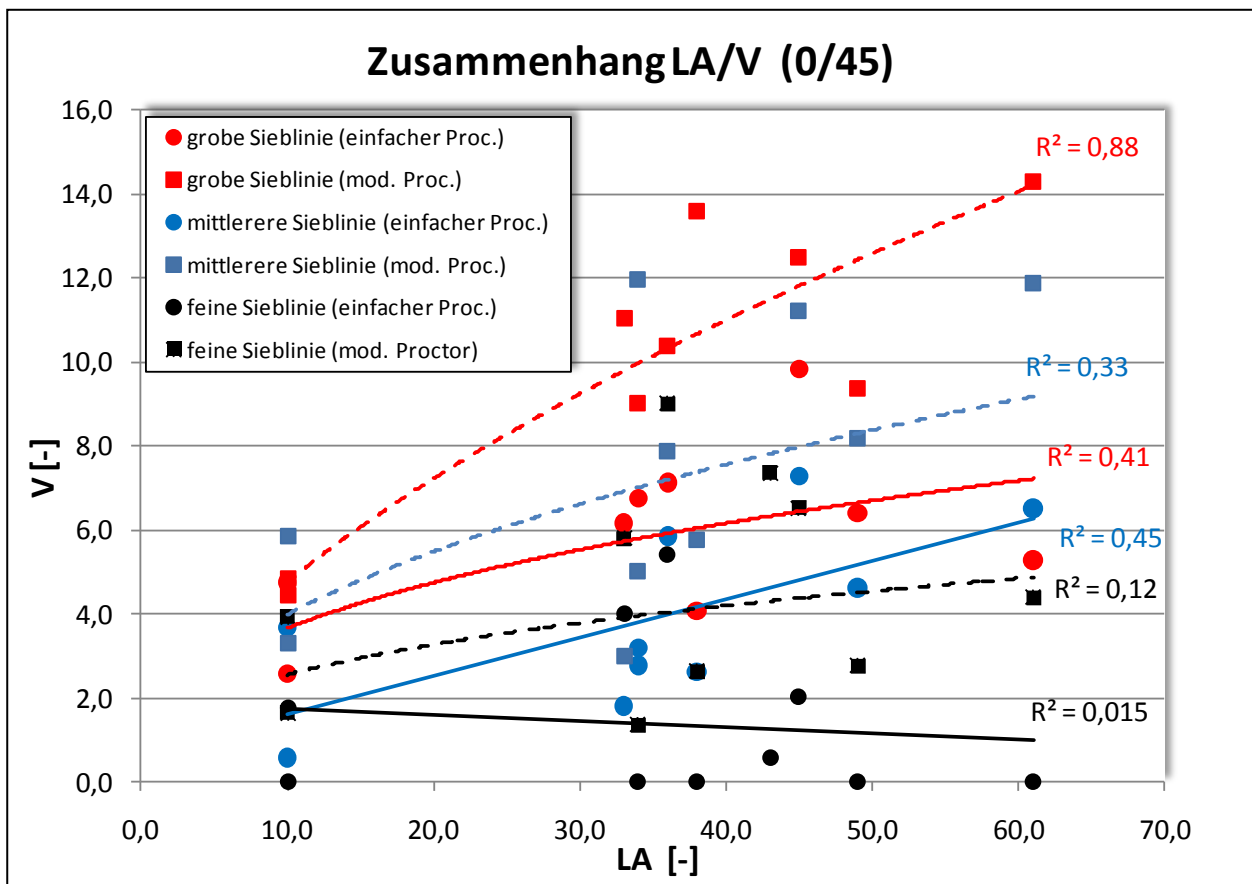


Bild 6-5: Zusammenhang Kornverfeinerung (Größtkorn 45 mm) zu LA-Koeffizient

In Tabelle 6-1 sind die Korrelationskoeffizienten noch einmal zusammengefasst. Die höchste Korrelation zeigt der modifizierte Proctor an den groben Korngemischen.

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Korrelationen LA-Prüfung und Kornverfeinerung am Gemisch 0/45 mm

LA _{10/14} zu V am Gemisch 0/45				
	Korngrößenverteilung			arithm. Mittel
	grob	mittel	fein	
einfacher Proctor	0,41	0,45	0,12	0,33
modifizierter Proctor	0,88	0,33	0,02	0,41
arithm. Mittel	0,65	0,39	0,07	

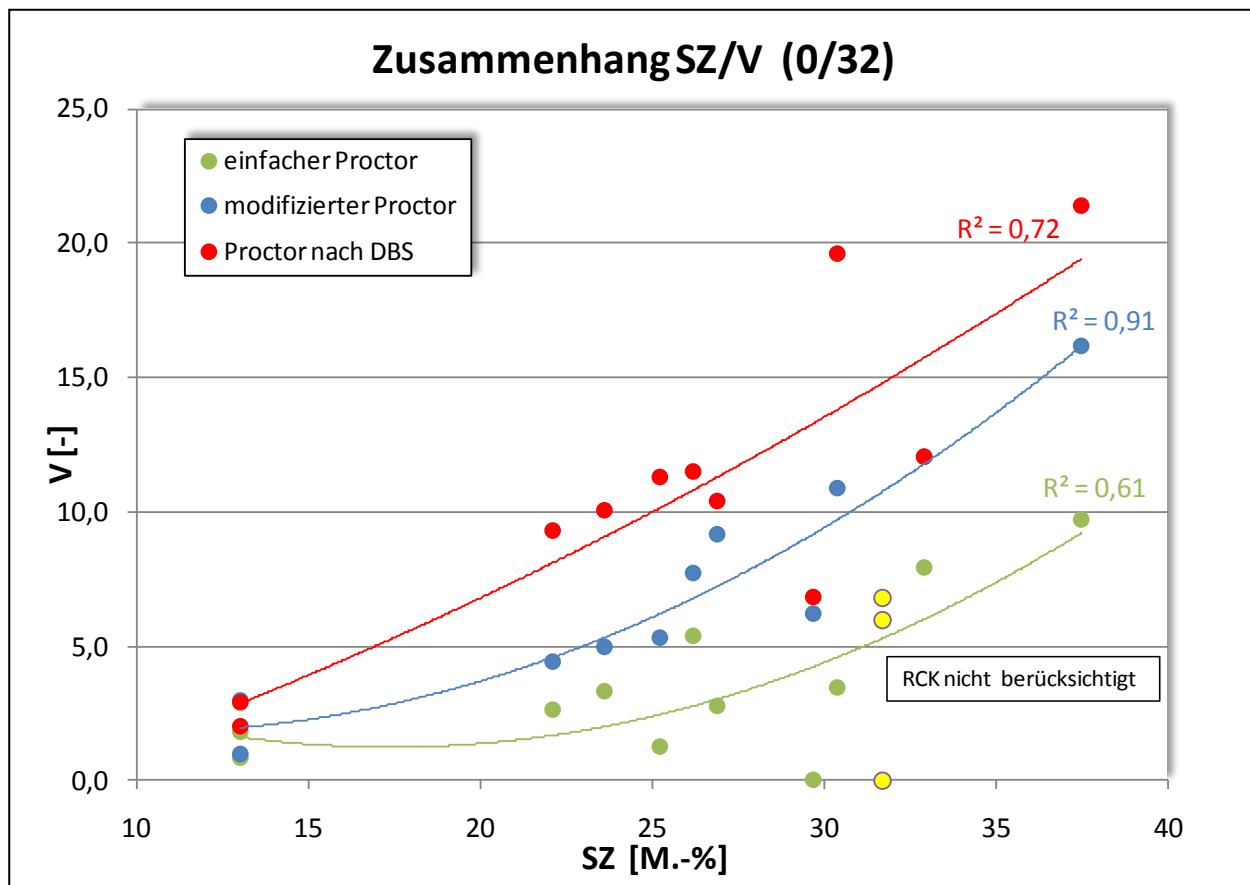


Bild 6-6: Zusammenhang Kornverfeinerung (Größtkorn 32 mm) zu SZ-Koeffizient

Bei einem Vergleich der Schlagzertrümmerungskoeffizienten und der Kornverfeinerung bei Gemischen mit einem Größtkorn von 32 mm (Bild 6-6), weist vor allem der Proctor nach DBS eine schlechtere Korrelation im Vergleich zu den Korrelationen mit dem LA-Wert auf. Auch in dieser Auswertung wurde das Gemisch RCK nicht berücksichtigt. Dies könnte durchaus an den Prüfandbedingungen des Proctor nach DBS liegen. Die Durchmischung des Prüfgutes nach jedem Belastungszyklus könnte die effektive Ausbildung eines Korntragwerkes verzögern und somit den Lastabtragungsmechanismen des Schlagzertrümmerungsversuches stärker zuwider laufen, als denen der LA-Prüfung.

Der Zusammenhang zwischen Schlagzertrümmerung und Kornverfeinerung bei den Gemischen mit einem Größtkorn von 45 mm sind wenig sichtbar (siehe Bild 6-7). Kaum überraschend ist dabei die schlechte Korrelation der feinen Gemische, die sich bereits bei der Gegenüberstellung mit den LA-Werten zeigte. Zudem ist die Differenzierung zwischen normalem und modifiziertem Proctor bei mittlerer oder grober Korngrößenverteilung weniger gut erkennbar.

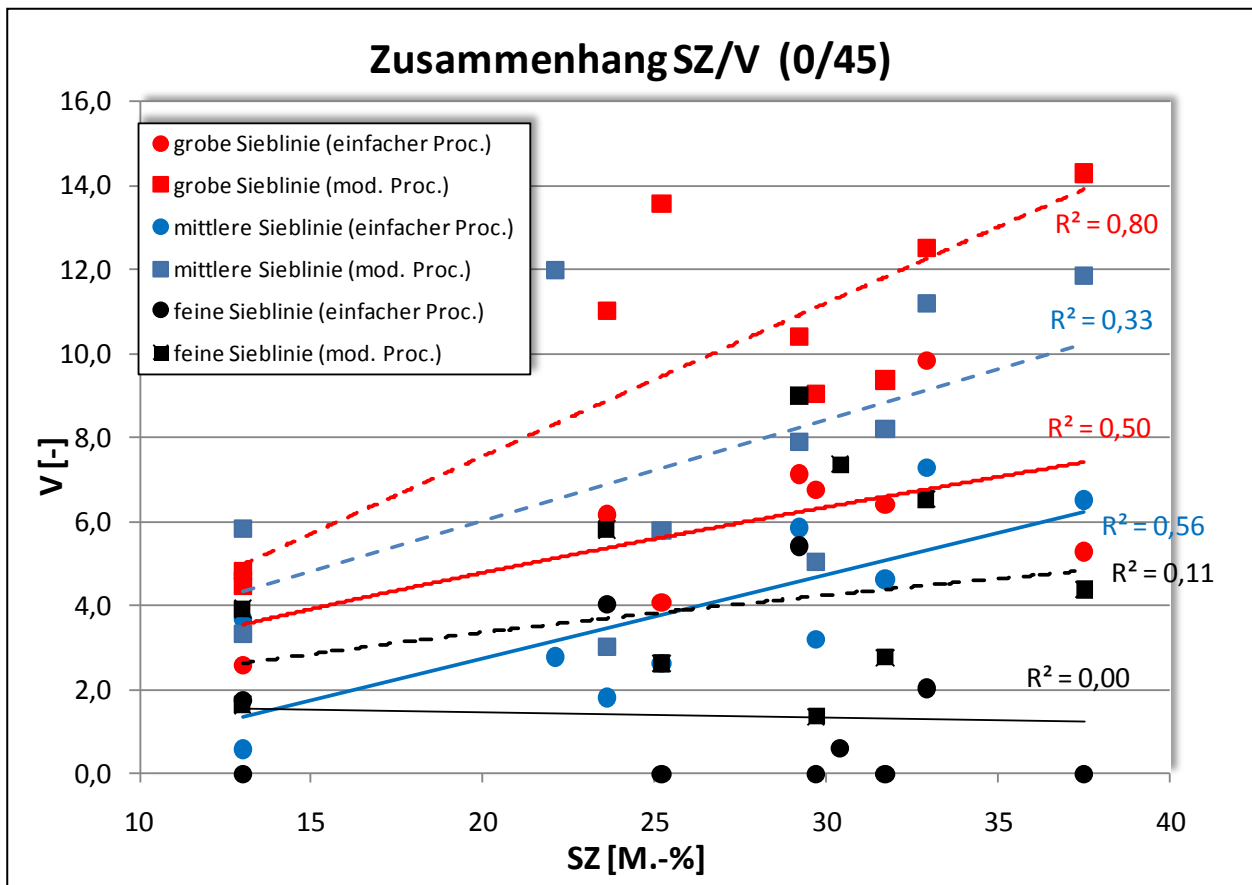


Bild 6-7: Zusammenhang Kornverfeinerung (Größtkorn 45 mm) zu SZ-Koeffizient

Aus der Zusammenstellung der Korrelationen (Tabelle 6-2) geht hervor, dass die höchste Korrelation wieder bei modifizierter Proctorverdichtung an den groben Korngemischen erreicht wird.

Tabelle 6-2: Zusammenstellung der Korrelationen SZ-Prüfung und Kornverfeinerung am Gemisch 0/45 mm

SZ _{8/12} zu V am Gemisch 0/45				
	Korngrößenverteilung			arithm. Mittel
	grob	mittel	fein	
einfacher Proctor	0,50	0,56	0,00	0,35
modifizierter Proctor	0,80	0,33	0,11	0,41
arithm. Mittel	0,65	0,45	0,06	

6.2.2 Bereiche der Kornverfeinerung

Die Kornverfeinerung als absoluter Wert hat momentan keine Aussagekraft bezüglich der Eignung eines Baustoffgemisches für ungebundene Schichten. Ein wichtiges Entscheidungsmerkmal ist sicherlich die Einhaltung der Korngrößenbereiche der ZTV SoB-StB. In Bild 6-8 ist der typische Bereich der Ausgangskorngrößenverteilungen eingetragen und ebenso die Bereiche, in denen die Korngrößenverteilungen typischerweise nach Beanspruchung liegen. Auffällig ist, dass sowohl bei normaler als auch modifizierter Proctorbeanspruchung die Grenzen der ZTV SoB-StB zumeist eingehalten werden, bzw. nur geringfügig überschritten werden. Der Feinanteil überschreite den Grenzwert jedoch häufig. Da der Feinanteil aber einen sehr hohen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit hat, sollte dieser Aspekt eine besondere Berücksichtigung bei der Festigkeitsbetrachtung von Korngemischen finden.

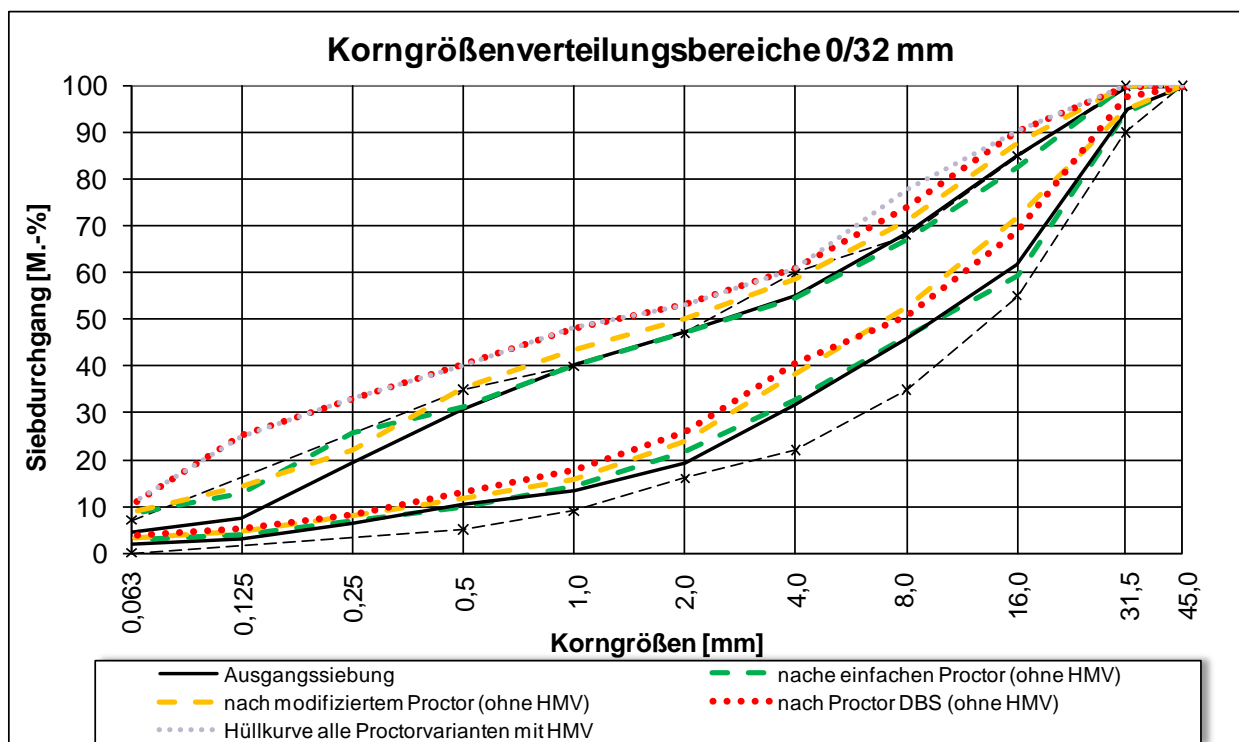


Bild 6-8: Verfeinerungsbereiche der Gemische 0/32 mm (mit und ohne HMV)

Vor allem die Gemische RCK (sehr feine Ausgangskorngrößenverteilung), RPG und HMV verstoßen gegen die Grenzen der ZTV SoB-StB. Würden diese bei einer Betrachtung vernachlässigt, ist die Einhaltung der Grenzwerte noch eindeutiger ersichtlicher.

6.3 Diskussion der Ergebnisse der Untersuchungsstufe C

6.3.1 Diskussion des Frosthebungsverhalten

Wie aus Bild 6-9 ersichtlich, weisen die durchgeführten Prüfungen einen guten Zusammenhang zwischen maximaler Frosthebung und der entsprechenden Resthebung auf. Gesteinskörnungsgemische, die eine hohe Frosthebung aufweisen, zeigen somit auch nach dem Abtauen eine starke verbleibende Resthebung.

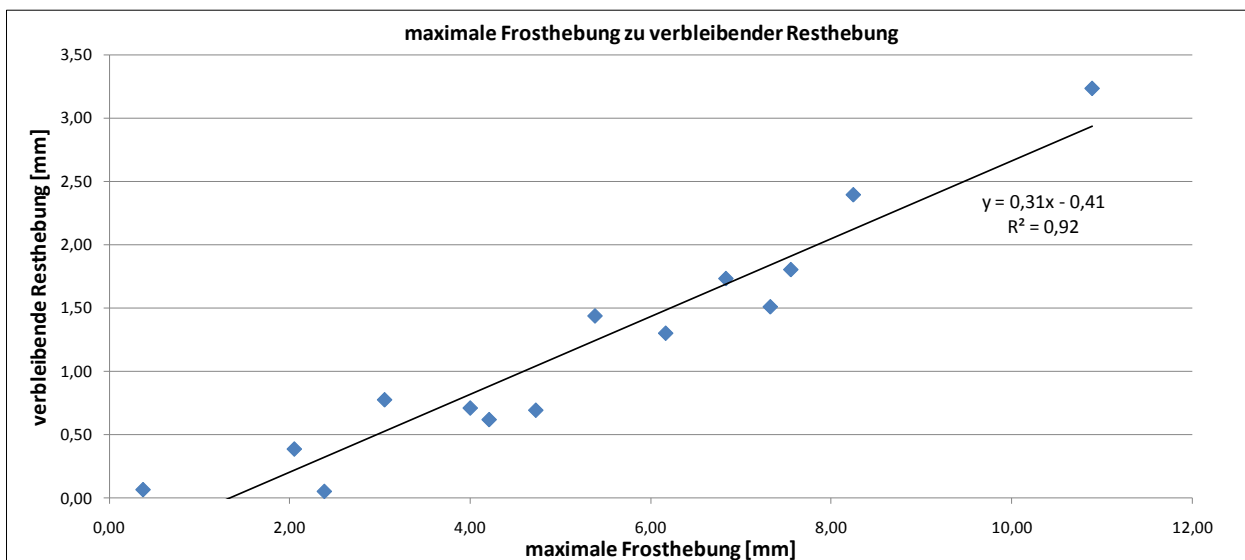


Bild 6-9: Zusammenhang der maximalen Frosthebung zur Resthebung

Qualitativ gilt dies auch für den Zusammenhang zwischen maximaler Frosthebung und Frosthebungsgeschwindigkeit (siehe Bild 6-10). Die schwache Korrelation weist aber auch auf einen nicht eindeutig zu quantifizieren Zusammenhang hin. Einige Gemische haben ihre stärkste Frosthebung schon in der Anfangsphase erreicht und zeigen in der Schlussphase, in der die Frosthebungsgeschwindigkeit bestimmt wird, nur noch geringe Hebungen. Die Frosthebungsgeschwindigkeit kann daher eher als Kriterium angesehen werden, um zu entscheiden, ob innerhalb des Prüfungszeitraums die maßgebende Hebung erfasst wurde. Sie erlaubt keine unmittelbare Aussage über die Frostanfälligkeit eines Gemisches.

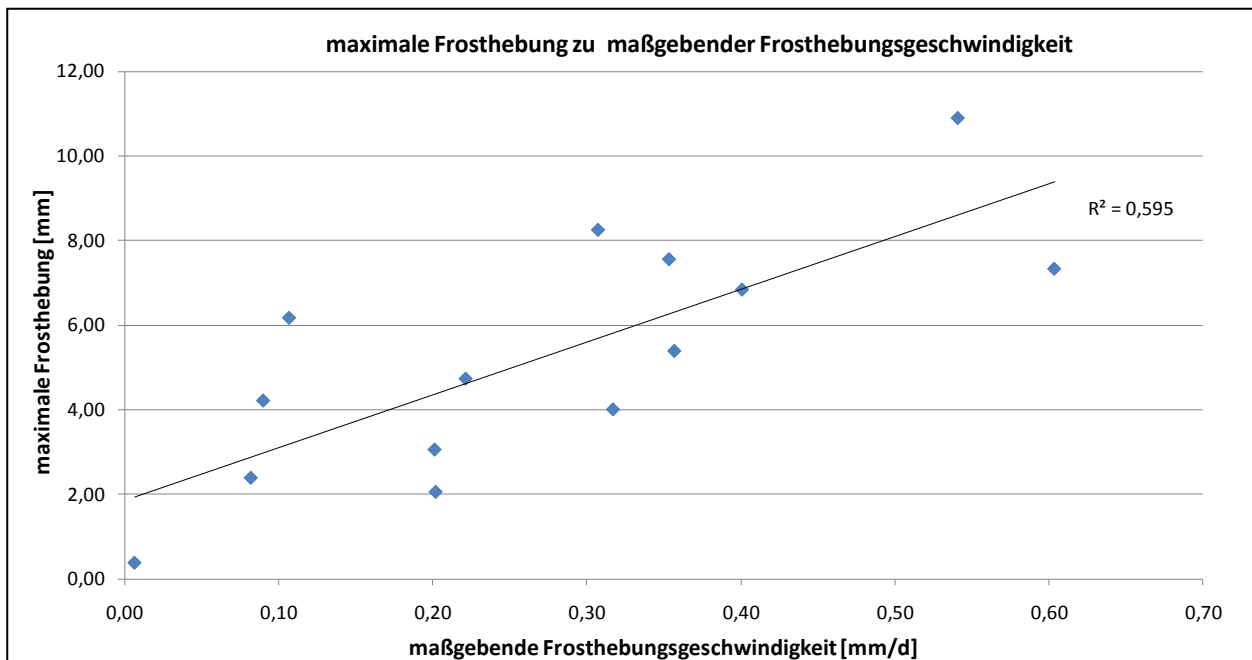


Bild 6-10: Zusammenhang zwischen maximaler Frosthebung und Frosthebungsgeschwindigkeit

Ebenfalls nur qualitativ bewertbar ist die Abhängigkeit der maximalen Frosthebung gegenüber dem Feinanteil der Gemische. Auffällig sind die deutlichen Abweichungen bei den porösen Materialien. Sowohl die Lavaschlacke, als auch die Basaltlava haben Feinanteile von über 8 M.-% und trotzdem Frosthebungen von unter 2 mm (siehe Bild 6-11). Der Feinanteil alleine erlaubt an den untersuchten Materialien folglich keine endgültige Aussage über deren Frostanfälligkeit. Das Bestimmtheitsmaß wurde am Datenkollektiv ohne Ausreißer (BAS, LAV, RCB1 modifiziert) ermittelt.

Um den Einfluss der Verdichtung abzuschätzen, wurde zudem das Baustoffgemisch RCB1 mittels modifizierter Proctorprüfung eingebaut. Die stark erhöhte Frosthebung beim nahezu identischem Feinanteil deutet den starken Einfluss der Einbaudichte an.

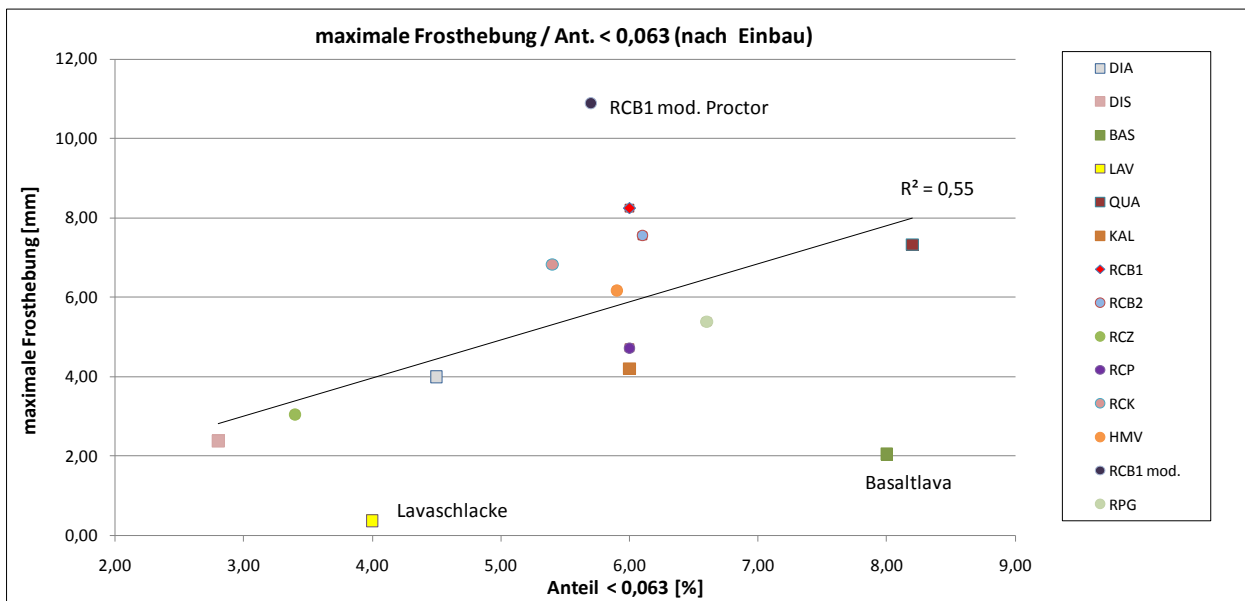


Bild 6-11: Abhängigkeit zwischen maximaler Frosthebung und Feinanteil

Zur Bewertung des Tragfähigkeitsverlustes in der Auftauphase wurden sowohl CBR-Prüfungen vor Befrostung (CBR_0), als auch unmittelbar nach Entnahme der aufgetauten Proben aus der Prüfungsvorrichtung (CBR_{FHV}) durchgeführt (siehe Bild 6-12).

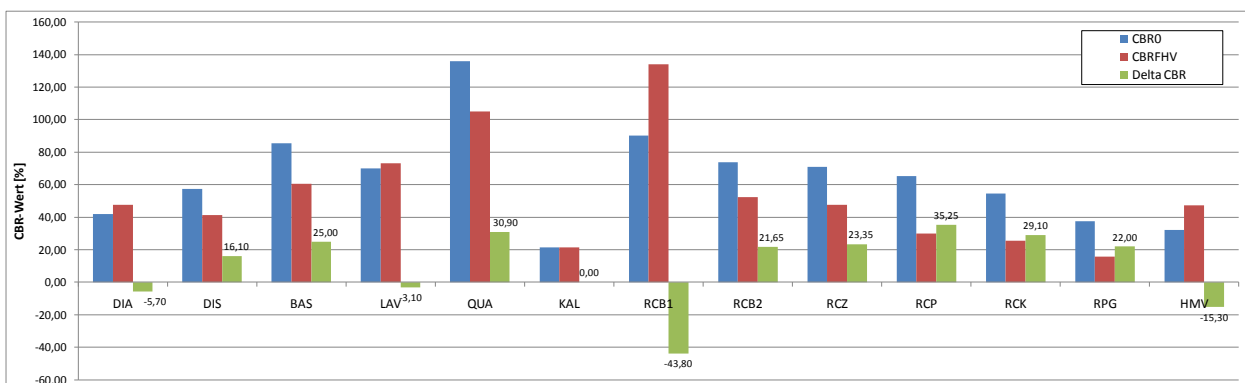


Bild 6-12: CBR-Werte vor und nach Frosthebungsversuch, sowie deren Differenz Delta CBR

Nicht bei allen Baustoffgemischen ist ein Festigkeitsabfall zu erkennen. So weisen sowohl der rezyklierte Betonaufbruch RCB1, als auch die Hausmüllverbrennungasche einen „Verfestigungseffekt“ auf. Bei beiden Materialien tritt bekanntermaßen eine hydraulische Verfestigung durch die Wasserlagerung auf. Bei dem rezyklierten Betonaufbruch RCB2 wurde dies nicht festgestellt. Offensichtlich hat dieses Betongranulat kein ausgeprägtes Verfestigungspotential mehr, was möglicherweise an der Vornutzung liegt (Rinnsteine mit häufigem Wasserkontakt).

Während das Vermischen des RCB2 mit den verschiedenen Zuschlägen das Frosthebungsverhalten zumeist positiv beeinflusst, so ist nun durchgehend eine geringere Tragfähigkeit und zumeist auch ein höherer Tragfähigkeitsverlust zu verzeichnen.

Die leichten Zunahmen an Tragfähigkeit bei dem Gemisch aus Diabas bzw. Lavaschlacke ist entweder auf die Prüfgenauigkeit oder auf leichte Konsolidierungseffekte in den Gemischen zurückzuführen.

6.4 Diskussion der Ergebnisse der Untersuchungsstufe D

In Bild 6-13 sind die Trockendichten die im Labor ermittelt wurden den gemessenen Trockendichten in situ gegenüber gestellt. Die rote, gestrichelte Linie stellt die optimale Korrelationsgerade dar, bei der die im Labor ermittelten Trockendichten denen in situ entsprechen würden. Im Vergleich dazu erreicht der einfache Proctor tendenziell eine zu geringe Dichte, liegt aber bei Trockendichten von bis zu $2,25 \text{ Mg/m}^3$ näher an den Dichtemessungen in situ, als der modifizierte Proctor. Die modifizierte Proctordichte hingegen, nähert sich bei höheren Trockendichten (größer $2,25 \text{ Mg/m}^3$) den in situ Messungen besser an.

Insgesamt korreliert die modifizierte Proctordichte geringfügig besser mit den gemessenen Trockendichten in situ. Eine eindeutige Beziehung lässt sich allerdings wegen mäßiger Korrelationen und gegenläufigen Entwicklungen nicht ableiten.

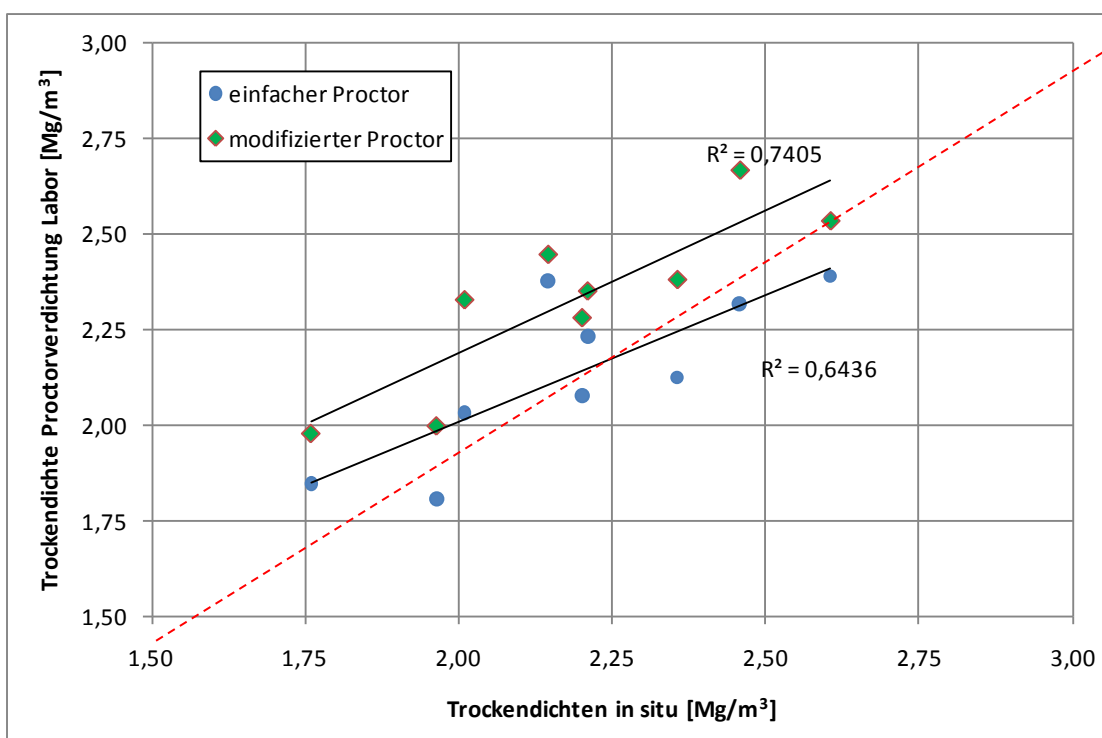


Bild 6-13: Gegenüberstellung Trockendichten Labor und in situ

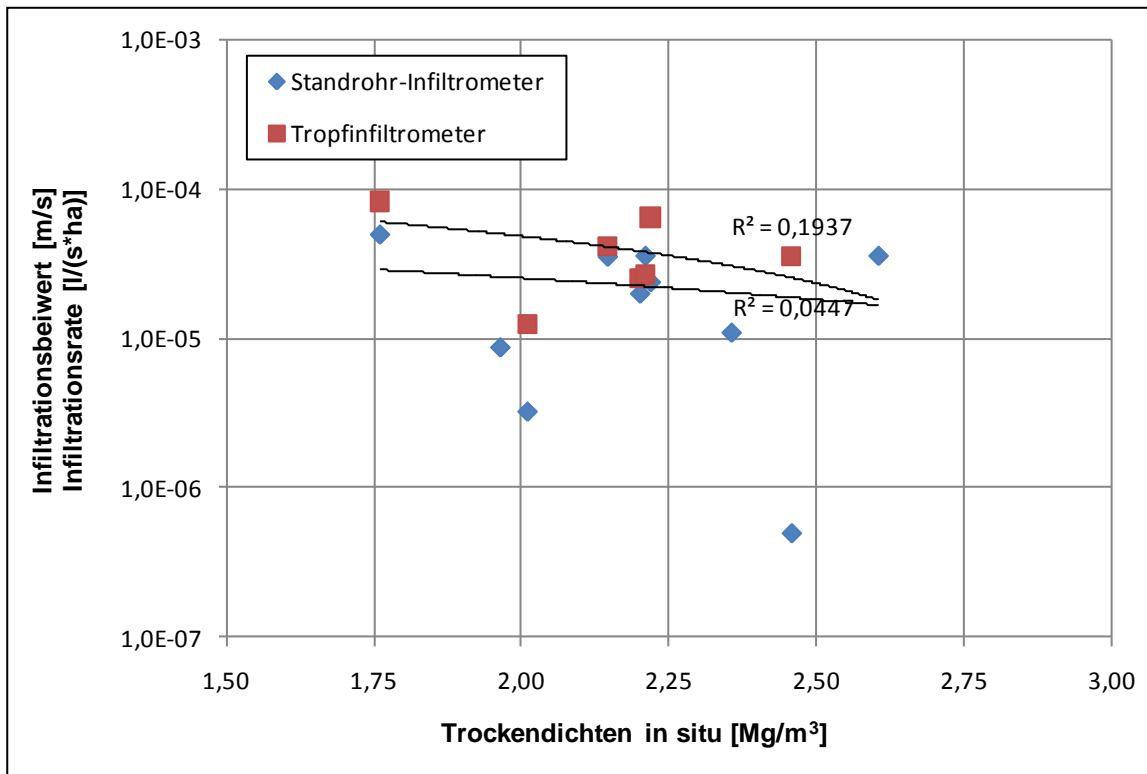


Bild 6-14: Infiltrationsbeiwert bzw. -rate in Abhängigkeit von der Trockendichte in situ

Weder mit dem Tropfinfiltrometer, noch mit dem Standrohr-Infiltrometer kann ein signifikanter Zusammenhang zwischen Wasserdurchlässigkeit und Trockendichte in situ nachgewiesen werden (Bild 6-14). Da die Trockendichte nicht nur durch den Verdichtungszustand, sondern auch durch die unterschiedlichen Rohdichten beeinflusst wird, ist diese Feststellung nicht verwunderlich.

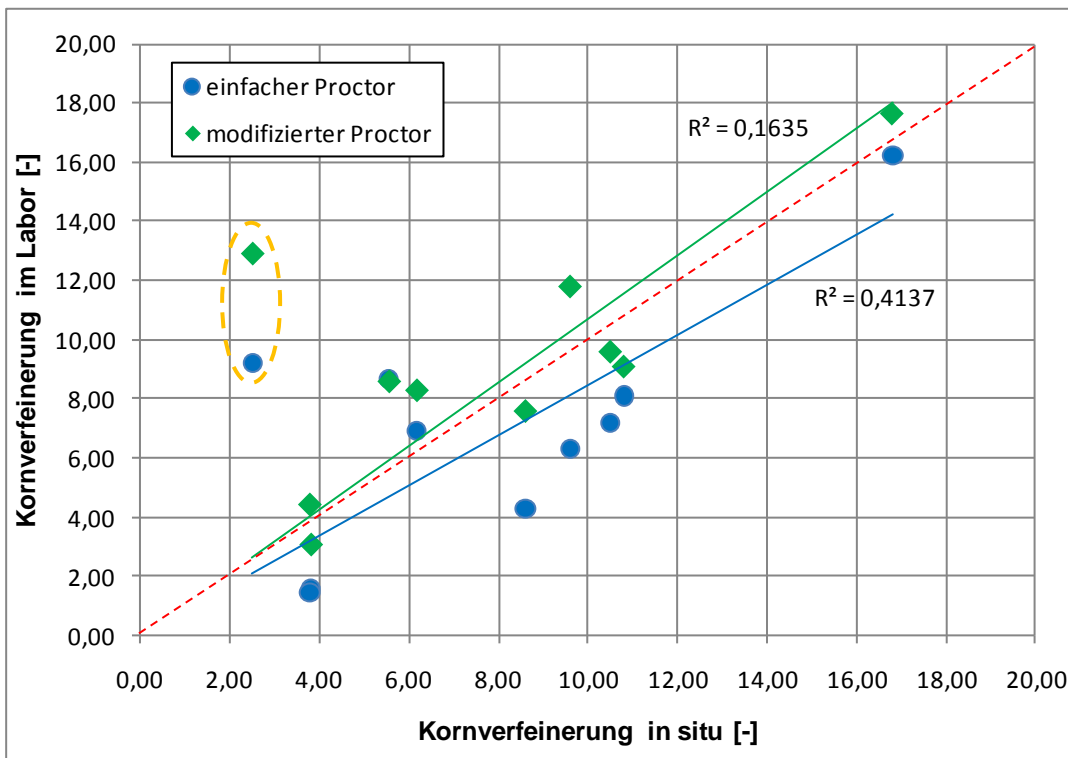


Bild 6-15: Gegenüberstellung Kornverfeinerung Labor und in situ

Die Kornverfeinerungen, die in situ und im Labor ermittelt wurden, sind in Bild 6-15 gegenüber gestellt. Die rote, gestrichelte Linie markiert die optimale Korrelation zwischen den Kornverfeinerungen. Während der einfache Proctorversuch tendenziell zu geringe Verfeinerungen hervorruft, liegt die Korrelationsgerade des modifizierten Proctorversuche näher an der optimalen Korrelation. Der Korrelationskoeffizient ist mit 0,1635 sehr niedrig und weist auf einen großen Streubereich der Kornverfeinerungen um die Korrelationsgerade hin. Ohne Ausreißer (gestricheltes Oval in Bild 6-15) ergibt sich ein deutlich besseres Bestimmtheitsmaß von 0,8298 (modifizierter Proctor) bzw. 0,7182 (einfacher Proctor). Da der Ausreißer auch eine geringe Trockendichte aufweist, kann eine zu geringe Verdichtung und somit auch eine zu geringe Kornverfeinerung in situ vermutet werden.

Tendenziell beschreibt die modifizierte Proctorversuch die Kornverfeinerungen in situ besser.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsprojekt hatte das Ziel, den Einfluss der Einzelkornfestigkeit und der Kornabstufung auf die Festigkeit eines Korngemisches abzugrenzen und zu quantifizieren. Eine wesentliche Bewertungsgröße hierfür ist die Kornverfeinerung.

Anhand der Untersuchungen lassen sich einige grundlegende Verfeinerungsmechanismen ableiten:

- Grobe Sieblinien verfeinerten sich wesentlich stärker als feine Sieblinien, dies unterstützt die eingangs aufgestellte Theorie des positiven Einflusses der Stützwirkung des Gesamtaufwerks. Häufig ging die Verfeinerung einher mit einer Verstetigung der Korngrößenverteilung.
- Ein deutlicher Zusammenhang zwischen klassischen Festigkeitswerten (SZ, LA) und den auftretenden Kornverfeinerungen konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Die Zusammenhänge wurden mit zunehmend feineren Korngrößenverteilungen schwächer.
- Die resultierenden Korngrößenverteilungen liegen größtenteils innerhalb des Bereiches den die ZTV SoB-StB vorgibt. Abweichungen hiervon sind vor allem im Feinkornbereich auszumachen. Dieser Kornbereich beeinflusst allerdings stark die Gebrauchseigenschaften der Gesteinskörnungen.
- Ein eindeutiger Zusammenhang konnte zwischen den Laborprüfungen und den in situ Untersuchungen nicht gefunden werden. Tendenziell zeigte aber der modifizierte Proctorversuch sowohl bei der Kornverfeinerung als auch den erreichten Trockendichten die besten Übereinstimmungen.
- Für eine ausreichend abgesicherte Aussage standen aber zu wenige Baustellen mit einer sicherlich nicht repräsentativen Auswahl von Verdichtungsvorgängen zur Verfügung. Zudem erschweren die stark inhomogenen Bedingungen, die häufig in situ angetroffen werden, eine wohl nur punktuelle, aber doch repräsentative Beprobung.

Insgesamt kann somit der modifizierte Proctorprüfung sowohl eine Vergleichbarkeit mit den in situ Einbausituationen als auch mit klassischen Festigkeitsuntersuchungen unterstellt werden. Zudem erlaubt sie auch eine ausreichend gute Differenzierung bei den erzielten Kornverfeinerungen und hebt sich klar von der relativ hohen Prüfstreuung ab. Trotzdem besteht gerade in dem Vergleich der Kornverfeinerungen von in situ zu Laborprüfung weiterer Forschungsbedarf. Das Anlegen von großmaßstäblichen Versuchsfeldern könnte empfehlenswert sein, da hier die Einflüsse auf die Kornverfeinerung gut isoliert werden können.

Die Eignung der Gesteinskörnungsgemische zur Verwendung in Tragschichten ohne Bindemittel wurde zudem durch Prüfung ihrer Gebrauchseigenschaft untersucht. Schwierig ist dabei die Einordnung der Untersuchungsergebnisse, da eindeutige Festlegungen von Grenzwerten zumeist fehlen. Häufig wurde daher auf Empfehlungen aus der Literatur oder auf Regelungen aus dem benachbarten europäischen Ausland zurück gegriffen.

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit der Gesteinskörnungen wurden CBR-Prüfungen durchgeführt, mit denen langjährige Erfahrungen bestehen. Die Tragfähigkeit (CBR) konnte in allen Fällen als unkritisch eingestuft werden. Ein Abgleich mit den Tragfähigkeiten in situ (z.B. statische Plattendruckversuche) war in dem Untersuchungsprogramm nicht vorgesehen. Das sich eine erhöhte Verdichtung auf die Gebrauchstauglichkeit (z. B. Wasserdurchlässigkeit oder Tragfähigkeit) auswirkt und in direktem Zusammenhang mit der Kornverfeinerung steht, konnte nachgewiesen werden.

Die Frostepfindlichkeit der Gesteinskörnungsgemische wurde mittels Frosthebungsversuch untersucht. Die Bewertung des Frosthebungsverhaltens ist aufgrund fehlender nationaler Anforderungen nur mit einer vergleichenden Betrachtung möglich. Dabei zeigte vor allem der rezyklierte Betonaufbruch auffällig hohe Hebungen.

Als ersten Ansatz für Grenzkriterien kann auf die österreichischen Anforderungen zurück gegriffen werden. Die dort festgelegte maximale Hebung von 15 mm unterschreiten alle Gemische. Da auch viele Baustoffgemische mit vermeintlich frostepfindlicher Korngrößenverteilung diese Anforderungen einhalten, sollte eine Verschärfung des Grenzwertes diskutiert werden.

Neben der maximalen Frosthebung ist auch die Höhe des Tragfähigkeitsverlustes ein wichtiges Kriterium. Der Verlust an Tragfähigkeit wurde wiederum mit der CBR-Prüfung ermittelt. Es erfolgte eine Überprüfung vor Einbau in die Frosthebung und nach Abschluss der Frostprüfung. Hier verzeichneten vor allem die rezyklierten Gemische auf Grundlage des RCB2 einen deutlichen Verlust an Tragfähigkeit. Einige Gemische zeigten aber auch deutlich höhere CBR-Werte, vermutlich aufgrund einer hydraulischen Nacherhärtung.

Keine eindeutige Abhängigkeit zeigt der Anteil des Feinkorns ($< 0,063$) in den Gemischen bei der Beurteilung des Frosthebungsverhaltens. Dies wurde in anderen Untersuchungen bestätigt und auch die verschiedenen international festgelegten Grenzwerte (Tabelle 7-1) sprechen eher gegen einen eindeutigen Zusammenhang (64), (59).

Tabelle 7-1: Granulometrische Kriterien für die Frostempfindlichkeit (Beispiele) (65)

	max. zulässiger Kornanteil des frostkritischen Korngrößenbereichs	
England	10 %	< 0,075 mm
Finnland	10 %	< 0,074 mm
Frankreich	3 – 10 %	< 0,02 mm
Japan	6 %	< 0,075 mm
Kanada	6 %	< 0,074 mm
Norwegen	5 %	< 0,05 mm
Schweden	10 %	< 0,074 mm
Schweiz	3 %	< 0,02 mm ... Kiessand I
	10 %	< 0,02 mm ... Kiessand II
USA	10 %	< 0,074 mm ... untere Tragschicht
	7 %	< 0,074 mm ... bei häufigem Frost-Tau-Wechsel
	regional 15–35 %	< 0,074 mm ... Unterbau
Beskow	15 %	< 0,063 mm ... ungleichkörnige Böden mit kap. Steighöhen $h_k < 1m$
	22 %	< 0,125 mm
Casagrande, A.	3 %	< 0,02 mm ... bei $U > 15 %$
	10 %	... bei $U < 5 %$
Schaible	20 %	< 0,1 mm
	10 %	< 0,2 mm
	1 %	< 0,02 mm

Um die Komplexität der Einflussfaktoren auf die Frostempfindlichkeit hinreichend zu berücksichtigen, sind Frosthebungsversuche am praxisgerecht verdichteten Korngemisch am stärksten zielführend.

Bautechnisch kritisch einzustufen sind die erreichten Wasserdurchlässigkeiten im Labor. Bei Einbau mittels einfacher Proctorverdichtung erreichen die meisten Gemische noch eine zufrieden stellende Durchlässigkeit. Bei praxisnäherem Einbau mittels modifizierter Proctorverdichtung hingegen, wiesen nahezu alle Gemische eine unzureichende Durchlässigkeit auf, die häufig um eine Zehnerpotenz niedriger lag. Abhilfe könnte hier eine eingeschränkte Auswahl der Korngrößenverteilung mit einem deutlich reduzierten Anteil an feinerer Gesteinskörnung schaffen. Die in diesem Vorhaben nachgewiesenen Verfeinerungsmechanismen würden dann aber gerade bei stärkerer Verdichtung wieder auf eine Verstetigung der Korngrößenverteilung hinarbeiten. Dies sollte nicht zuletzt bei der Festlegung einer erhöhten Anforderung an das E_{V2} -Modul beachtet werden.

Insgesamt wurde gerade in situ eine hohe Empfindlichkeit der Wasserdurchlässigkeitsprüfung festgestellt. Bereits geringe Inhomogenitäten können eine große Auswirkung auf die Wasserdurchlässigkeit haben. Dabei scheint eine starke Abhängigkeit zum Verdichtungsgrad zu bestehen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Die Tabelle 7-2 stuft die Ergebnisse der Untersuchungen an den Gemischen in ein einfaches Ampelmodell ein. Grün signalisiert dabei eine positive Einstufung, Gelb (Strich) eine noch unbedenkliche bis schwach bedenkliche, Rot (Kreuz) schlussendlich eine nach Auffassung der Verfasser ungenügende Ausprägung des Prüfmerkmals für einen dauerhaften Straßenoberbau.

Tabelle 7-2: Einstufung der untersuchten Gemische

Probenbezeichnung	CBR	Frosthebung	Frosthebungs- geschwindigkeit	Verbleibende Resthebung	CBR _{FHV}	CBR _{FHV} /CBR ₀	Wasserdurchlässig- keit
Diabas							X
Diabas mit 10 % Natursand			-			-	X
Basaltlava	-					-	X
Lavaschlacke	-						-
Quarzsandstein		-	-			-	X
Kalkstein	-				-		X
RC-Beton 1	-	-	-	-			X
RC-Beton 2		-	-			-	X
RC-B 2 mit 30 % Ziegel, Klinker und Steinzeug				-		-	X
RC-B 2 mit 30 % KSS, Putze und Mauerwerksmörtel	-	-	-		-	X	X
RC-B 2 mit 5 % Porenbeton					-	X	X
Praxisgemisch	-	-	-		-	X	X
Hausmüllverbrennungsasche	-	-					X

Folgende Grenzwerte liegen der Einstufung zugrunde (siehe auch die vorhergehenden Kapitel):

- CBR (nach Floss (53))
 - Grün: >75 % (ausgezeichnete obere Tragschicht)
 - Gelb: < 75 % (gute obere Tragschicht)
 - Rot: < 14 % (mittlere untere Tragschicht)
- Maximale Frosthebung
 - Grün: < 5,0 mm (Floss, Kriterium für Frostklasse F1)
 - Gelb: < 15,0 mm (ÖNorm B 4810, Kriterium für Frostklasse F2 (53))
 - Rot: > 15,0 mm
- Maßgebliche Frosthebungsgeschwindigkeit
 - Grün: < 0,3 mm/d (interpoliert aus Bild 6-10 bei 5,0 mm)
 - Gelb: < 1,0 mm/d (ÖNorm B 4810)
 - Rot: > 1,0 mm/d
- Verbleibende Resthebung
 - Grün: < 2 mm (Floss (53), Kriterium für Frostklasse F1)
 - Gelb: < 4,5 mm (Floss (53), Kriterium für Frostklasse F2)
 - Rot: > 4,5 mm
- CBR_{FHV} (ursprünglich für CBR-Versuch nach Frost-Tauwechsel-Lagerung)
 - Grün: > 30 %
 - Gelb: < 30 %
 - Rot: < 8 %
- CBR_{FHV}/CBR₀
 - Grün: >90 % (laut Floss (53): geringe Festigkeitsabnahme, Wert angenommen)
 - Gelb: > 50 % (laut Floss (53): mittlere Festigkeitsabnahme, Grenzwert aus SN 670321a (66) bei Einbau und Prüfung mit mod. Proctorversuch)
 - Rot: < 50 %
- Wasserdurchlässigkeit nach Einbau mit dem modifizierten Proctor:
 - Grün: > $5,4 \cdot 10^{-05}$ m/s (Bemessungsregenspende)
 - Gelb: > $1,0 \cdot 10^{-05}$ m/s (Literaturwert, siehe auch Abschnitt 2.5.2)
 - Rot: < $1,0 \cdot 10^{-05}$ m/s

8 Literatur

1. Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG vom 27.09.94 BGBl. 1994.
2. **Wistuba, M. P.** Quo vadis Straßenforschung. asphalt. 2010, 3.
3. DIN EN 1097-2: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung. Beuth Verlag GmbH. 2006.
4. **Semmelink, C. J. und Visser, A. T.** Effect of material properties on compaction and bearing capacity. Journal of Transportation. 1992, 120, Number 4.
5. **Johnson, A. W. und Salberg, R.J.** Factors influencing test results. Buletin Number 319, Highway research board. 1962.
6. **Krass, K. und Straube, E.** Straßenbau und Straßenerhaltung. Berlin : Schmidt, 2005.
7. Begriffsbestimmung, Teil Straßenbautechnik. FGSV. 2003.
8. **Paulmann, G. und Grätz, B.** Untersuchung der Verdichtung von Tragschichten ohne Bindemittel (TOB). Forschung für Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. 1989, Bd. 546.
9. **Caprez, M. und Songlin, M.** Dynamische Intensivverdichtung, Energieaufnahme bei dynamischer Verdichtung und Beurteilung der Verdichtungseigenschaften von Böden. Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau. 1994.
10. **Koch, C.** Zum Tragverhalten von Pflasterbefestigungen. Bochum : Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, 1999.
11. **Pietzsch, D.** Untersuchungen zum Schwingungsverhalten und zur Verdichtungswirkung von Vibrationswalzen. s.l. : VDI Verlag, 1991.
12. **Brand, W. und Floss, R.** Der Proctor-Versuch als Eignungsprüfung und Maßstab für die Güteprüfung. Straße und Autobahn. 1965, Bd. 16.
13. **Krzemien, R., Langer, W. und Roth, W.** Oszillierende Verdichtung und flächendeckende Verdichtungskontrolle von ungebundenen Schichten. Schriftenreihe Straßenforschung (Wien). 1995, Bd. 445.
14. **Güttler, U.** Beurteilung des Steifigkeits- und Nachverdichtungsverhaltens von ungebundenen Mineralstoffen,. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum. 1984, Bd. 8.

15. **Allen, H., et al.** Compaction of earth embankments. Highway Research Board Proceedings. 1938, Bd. 18.
16. **Arquié, G.** Verdichting van grond. The Hague. 1973.
17. **Turnbull, W. J. und Foster, C. R.** Compaction of graded crushed stone base. Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1957.
18. **Lee, P. J. und Suedkamp, R. J.** Characteristics of irregular shaped compactions curves of soil. Highway Research Record. 1972.
19. **Poulos, S. J.** Compaction control and the index unit weight. Geotechnical Testing Journal (GTJ). 1988.
20. **Brandl, H.** Ungebundene Tragschichten im Straßenbau. [Hrsg.] Bundesministerium für Bauten und Technik. Straßenforschung. 1977, Bd. 67.
21. **Cohrs, H. H.** Neue Verdichtungstechniken im Erdbau. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau. 1997, Bd. 39.
22. **Niekerk, van, et al.** The effect of compaction on the mechanical behaviour of mix granulate base course materials and on pavement performance. Proc.UNBAR 5. 2000.
23. **Brandl, H.** The importance of optimum compaction of soil and other granular material. s.l. : Technical University of Vienna.
24. FGSV-Arbeitspapier 60, Mechanisches Verhalten von Tragschichten ohne Bindemittel in Befestigungen für Verkehrsflächen. FGSV. 2003.
25. **Numrich, R.** Modellierung des nichtlinear-elastischen Verformungsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel. Dresden : Schriftenreihe der Professur Straßenbau der TU Dresden, 2004.
26. **Boyce.** The behaviour of granular materials under repeated loading. [Hrsg.] University of Nottingham. 1976. Bd. Dissertation.
27. **Brown und Pell.** An experimental investigation of the stresses, strains and deflections in a layered pavement structure subjected to dynamic loads. Proceedings, second international Conference Structural Design of asphalt Pavements. 1967, Bd. 1, S. 487-504.
28. **Werkmeister und Dawson.** Permanent deformation behaviour of unbound granular materials and the shakedown concept. Transportation Research Record. 2001, 1757.
29. **Kolisoja.** Large scale dynamic triaxial tests III. Tampere University of Technology. 1998.

30. **Steinbock, W.** Das Verdichtungsverhalten ungebundener Sande unter einachsiger Druckbeanspruchung bei verhinderter Seitendehnung. Hannover : Schriftenreihe Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, 1982.
31. **Loos, H.** Gesetzmäßigkeiten der Kornzerkleinerung bei der Beanspruchung von Splittkörnung durch Schlag-, Druck- und Scherkräfte im Laboratorium. Darmstadt : Dissertation, 1969.
32. TP Gestein-StB: Technische Prüfvorschrift für Gesteinskörnungen im Straßenbau. FGSV. 2008.
33. **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.
34. **Hartge, K.H. und Horn, R.** Die physikalische Untersuchung von Böden. Stuttgart : Ferdinand Enke Verlag, 1989.
35. **Prinz, H. und Strauß, R.** Abriss der Ingenieurgeologie. s.l. : Spektrum Akademischer Verlag, 2006.
36. **Schneider, G.** Ermittlung des Durchlässigkeitswertes von mineralischen Dichtungsschichten aus Insitu-Versuchen. Bautechnik. Bd. 65.
37. **Henögl, O.** Untersuchungen zur Strömungsausbreitung bei der Insitu-Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit oberflächennaher Bodenschichten. [Hrsg.] Bauhaus-Universität Weimar. 2. Workshop Teilgesättigte Böden, Schriftenreihe Geotechnik, Deutschland. 2000, Bd. 4.
38. **Hengelhaupt, F. und Scheytt, T.** Auffüllversuche in der wassergesättigten und ungesättigten Zone - ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrologie. 2001, Bd. 2.
39. TL SoB-StB: Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau. FGSV. 2007.
40. ZTV SoB-StB: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau. FGSV. 2007.
41. **Floss, R. und Berner, U.** Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel; Anforderungen an die Durchlässigkeit ungebundener Tragschichten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. 1992, Bd. Heft 619.
42. Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen. FGSV. 1998.

43. **Kellermann, C.** Zur Bewertung des Infiltrationsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel. Bochum : Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, 2003.
44. DIN 18130-1: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1 Laborversuche. Beuth Verlag GmbH. 1998.
45. Arbeitsausschuss: Schichten ohne Bindemittel, Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes von Tragschichten ohne Bindemittel - Entwurf. FGSV. 2010.
46. **Anderson, D. M., et al.** Principles of soil freezing and frost heaving, Frost action and its control. American society of Civil Engineers (ASCE). 1984.
47. **Fuchs, E.** Baugrund und Bodenmechanik. Berlin : VEB Verlag, 1974.
48. **Brandl, H.** Freezing-thawing behaviour of soil and other granular material-influence of compaction. Geotechnics for roads, rail tracks and earth structures. 2001.
49. **Krzemien, R. und Langer, W.** Frostsichere, ungebunden Tragschichten aus sandarmen Korngemischen. Schriftenreihe Straßenforschung. 1995, Bd. 430.
50. **Toussaint, A.** Gebrauchsverhalten von Tragschichten ohne Bindemittel in Abhängigkeit von den Mineralstoffeigenschaften. Schriftenreihe des Lehrstuhls Straßenbau der TU Dresden. 1998, Bd. 8.
51. ZTV E-StB: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. FGSV. 2009.
52. TP BF-StB: Entwurf Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau - Frosthebungsversuch. FGSV. 2009.
53. **Floss, R.** Handbuch ZTVE - Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau. 3. Auflage. Bonn : Kirschbaum Verlag, 2006.
54. DBS 918062 Technische Lieferbedingungen Korngemische für Trag- und Schutzschichten zur Herstellung von Eisenbahnfahrwegen. DB AG. 2007.
55. TL Gestein-StB 04: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau. FGSV. 2007.
56. DIN EN 13286-2: Ungebundene und hydraulische gebundene Gemische - Teil 2: Laborprüfverfahren für Trockendichte und den Wassergehalt-Proctorversuch. Beuth Verlag GmbH. 2004.
57. **Westiner, Erhard und Neidinger, Sara.** Entwurf: Sachgerechte Beurteilung der Gesteinsfestigkeit - Vergleich SZ/LA. Arbeitsgruppe "Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen". 2010.

58. DIN EN 13286-47: Ungebundene und hydraulische gebundene Gemische - Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California Bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes. Beuth Verlag GmbH. 2004.
59. **Blume, U.** Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. 2009.
60. RVS 11.062, Blatt 16: Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen; Grundlagen, Prüfverfahren, Steinmaterial: Bestimmung der Durchlässigkeit von Tragschichtmaterial im Zuge der Eignungsprüfung im Labor. Österreichische Forschungsgemeinschaft für Straße und Verkehr. 2000.
61. ÖNORM B 4422-2: Erd- und Grundbau - Untersuchung von Böden - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit - Feldmethoden für obeflächennahe Schichten. s.l. : Österreichische Normeninstitut, 2002.
62. DIN 18125-2: Baugrund. Untersuchungen von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 2: Feldversuche. Beuth Verlag GmbH. 1999.
63. **Ballmann, P.** Vergleichende Untersuchungen zwischen Los Angeles-Prüfverfahren und Schlagversuch. Die Naturstein-Industrie. 1996, Bd. 6.
64. **Krass, K. und Kollar, J.** Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel. Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des BMV. 2004, Bd. 884.
65. **Floss, R.** Handbuch ZTVE - Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau. 2. Auflage. Bonn : Kirschbaum Verlag, 1997.
66. SN 670321a: Versuche an Böden. Frosthebungsversuch und CBR-Versuch nach dem Auftauen (CBRF). Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleuten (VSS). 2001.
67. RStO 01 - Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen. FGSV. Ausgabe 2001.
68. DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren. Beuth Verlag GmbH. 2006.
69. DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Beuth Verlag GmbH. 2005.

70. **Eymann, P., Mentlein, H. und Velske, S.** Straßenbau, Straßenbautechnik. Köln : Werner Verlag, 2008.
71. **Güttler.** Beurteilung des Steifigkeits- und Nachverdichtungsverhaltens von ungebunden Mineralstoffen. Schriftenreihe des Instituts Grundbau, Wasser-und Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum. 1984, Bd. 8.
72. **Krass, K., Brüggemann, M. und Görener, E.** Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 2001 – Teil 1: Recycling-Baustoffe. Straße und Autobahn. 2004, 4.
73. **Weingart, W. und Wieland, M.** Weiterentwicklung des Frosthebungsversuches. Forschungsprojekt FE05.136. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnwesen. 2005, Bd. 927.

9 Anhang

9.1 Teil A: Korngrößenverteilungen

Tabelle 9-1: Zusammenfassung der Kornverfeinerung DIA 0/32 (Durchgänge in M.-%)

DIA 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	97,7	96,4	96,8	97,8
16	74,7	77,8	78,1	75,4
8	51,1	51,0	52,8	50,6
4	44,9	45,1	44,3	45,3
2	36,7	37,1	35,6	38,1
1	21,6	22,5	22,7	24,1
0,5	14,5	15,4	15,6	17,1
0,25	9,7	10,5	10,6	12,3
0,125	5,6	5,1	5,2	6,7
0,063	3,3	4,4	4,5	5,7
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-3: Zusammenfassung der Kornverfeinerung DIS 0/32 (Durchgänge in M.-%)

DIS 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	97,0	98,7	94,9	97,6
22,4	88,0	88,5	88,2	86,3
16	72,0	73,7	75,0	74,5
8	50,4	53,2	55,6	54,7
4	37,3	39,2	41,2	40,6
2	30,8	31,8	33,2	33,1
1	22,0	22,4	23,6	23,5
0,5	13,7	14,1	15,2	15,2
0,25	6,3	6,8	7,9	8,3
0,125	3,3	4,1	4,9	5,2
0,063	2,1	2,8	3,3	3,7
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-5: Zusammenfassung der Kornverfeinerung BAS 0/32 (Durchgänge in M.-%)

BAS 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
16	78,2	78,8	84,9	84,8
8	55,5	56,2	64,9	66,0
4	36,9	39,1	46,6	48,7
2	25,0	28,0	34,3	35,9
1	18,0	20,2	24,7	26,2
0,5	12,8	15,2	18,2	19,4
0,25	8,6	11,1	13,4	14,1
0,125	5,4	7,3	9,0	9,2
0,063	3,5	6,3	8,0	8,0
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-7: Zusammenfassung der Kornverfeinerung QUA 0/32 (Durchgänge in M.-%)

QUA 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
16	70,0	74,9	82,0	85,1
8	52,0	59,0	67,2	70,1
4	41,0	47,4	54,9	58,2
2	32,0	39,8	45,8	50,7
1	24,0	33,3	39,1	44,1
0,5	18,0	27,5	32,0	36,5
0,25	12,0	18,0	19,5	23,8
0,125	7,0	12,7	14,2	16,6
0,063	2,5	8,2	7,7	10,5
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-9: Zusammenfassung der Kornverfeinerung KAL 0/32 (Durchgänge in M.-%)

KAL 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	99,5	100,0	100,0
22,4	85,4	80,2	89,4	85,9
16	61,7	59,4	72,1	68,7
8	45,8	46,3	54,1	55,1
4	31,8	32,8	38,4	41,0
2	19,3	21,7	24,0	26,0
1	13,3	14,2	15,9	17,9
0,5	10,4	9,8	11,7	13,1
0,25	8,4	7,2	9,1	10,2
0,125	5,1	5,6	7,6	8,5
0,063	3,4	4,7	6,5	7,2
< 0,063	0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-11: Zusammenfassung der Kornverfeinerung RCB1 0/32
(Durchgänge in M.-%)

RCB1 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
16	70,0	76,7	79,4	82,4
8	51,5	56,9	59,7	63,0
4	41,0	44,7	47,1	50,1
2	31,5	35,6	38,1	41,3
1	24,5	27,4	29,8	33,6
0,5	17,0	21,1	22,9	26,1
0,25	10,6	14,2	14,9	17,1
0,125	5,8	7,7	7,5	8,9
0,063	3,5	6,0	5,7	6,9
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-12: Zusammenfassung der Kornverfeinerung RCB2 0/32
(Durchgänge in M.-%)

RCB2 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	99,4	100,0	100,0
22,4	82,2	84,4	87,1	90,8
16	71,1	74,4	76,3	80,3
8	53,0	55,6	57,4	63,4
4	39,4	42,7	43,3	50,0
2	30,8	33,5	34,0	39,2
1	24,6	25,9	26,8	30,3
0,5	21,4	22,5	23,2	25,2
0,25	15,0	17,1	17,4	18,5
0,125	7,6	8,8	9,1	10,5
0,063	3,4	6,1	6,1	6,1
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-14: Zusammenfassung der Kornverfeinerung RCZ 0/32 (Durchgänge in M.-%)

RCZ 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	98,2	97,2	99,5	99,5
16	76,1	82,4	83,7	86,4
8	57,3	58,6	63,5	69,9
4	42,9	41,2	47,9	54,4
2	34,1	32,7	37,7	43,5
1	27,5	26,2	30,0	35,9
0,5	20,9	20,2	22,9	27,8
0,25	8,4	11,1	11,1	13,8
0,125	3,0	5,4	4,6	6,4
0,063	2,0	3,4	3,1	3,9
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-16: Zusammenfassung der Kornverfeinerung RCK 0/32
(Durchgänge in M.-%)

RCK 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	99,0	100,0	100,0	100,0
22,4	91,2	91,0	96,6	96,4
16	85,1	82,5	87,9	90,3
8	68,3	67,2	71,3	73,9
4	55,0	54,7	58,6	59,9
2	47,4	47,3	50,2	50,7
1	40,4	40,1	43,3	43,4
0,5	30,9	31,4	35,5	34,7
0,25	17,1	16,0	20,6	19,6
0,125	7,1	8,1	9,2	9,0
0,063	4,6	5,4	5,8	5,7
< 0,063	0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-18: Zusammenfassung der Kornverfeinerung RCP 0/32
(Durchgänge in M.-%)

RCP 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	95,0	94,1	95,5	100,0
22,4	82,2	83,6	85,4	96,0
16	71,1	73,3	75,4	78,3
8	53,0	55,1	58,1	61,1
4	39,4	42,3	42,9	45,7
2	30,8	33,4	33,5	35,9
1	24,6	26,5	27,2	29,4
0,5	21,4	22,3	23,4	25,0
0,25	15,0	16,9	17,4	17,7
0,125	7,6	7,6	7,7	8,6
0,063	3,4	6,0	6,2	7,0
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-19: Zusammenfassung der Kornverfeinerung RCP 0/45
(Durchgänge in M.-%)

RCP 0/45			
Kornklasse [mm]	mittlere Korngrößenverteilung		
	Ausgangskorngrößen- verteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor
63	100,0	100,0	100,0
45	99,0	100,0	99,7
31,5	81,6	83,9	91,4
22,4	70,9	73,6	83,4
11,2	56,9	59,4	70,6
5,6	42,5	45,2	54,8
2	29,5	31,4	39,7
1	23,9	25,0	32,9
0,5	20,6	21,1	26,9
0,25	14,4	14,8	15,8
0,125	7,1	8,6	8,4
0,063	3,2	4,5	4,0
< 0,063	0	0,0	0,0

Tabelle 9-20: Zusammenfassung der Kornverfeinerung RPG 0/32
(Durchgänge in M.-%)

RPG 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
16	78,8	78,1	84,9	87,1
8	59,6	61,5	70,1	73,8
4	46,2	48,1	56,1	60,9
2	38,5	40,2	47,6	53,1
1	32,7	33,1	41,3	48,2
0,5	26,7	31,2	34,3	40,2
0,25	19,1	25,9	22,2	33,1
0,125	6,6	8,3	11,0	25,1
0,063	4,3	6,4	8,9	6,0
< 0,063	0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-21: Zusammenfassung der Kornverfeinerung RPG 0/45
(Durchgänge in M.-%)

RPG 0/45			
Kornklasse [mm]	mittlere Korngrößenverteilung		
	Ausgangskorngrößen- verteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor
63	100,0	100,0	100,0
45	96,0	94,7	98,3
31,5	90,0	93,2	96,2
22,4	86,0	87,0	88,7
11,2	69,5	67,5	71,4
5,6	53,0	50,6	55,2
2	38,3	38,3	43,4
1	33,0	32,9	37,7
0,5	26,7	27,8	32,1
0,25	16,5	16,3	19,9
0,125	6,7	8,6	11,2
0,063	4,5	6,8	8,8
< 0,063	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-22: Zusammenfassung der Kornverfeinerung HMV 0/32
(Durchgänge in M.-%)

HMV 0/32				
Kornklasse [mm]	Ausgangs- korngrößenverteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Proctor nach DBS
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	92,2	93,4	95,4	97,5
16	83,1	87,2	90,0	90,4
8	66,3	76,0	78,9	77,7
4	45,9	53,8	57,7	58,0
2	30,0	38,6	42,5	42,9
1	21,1	27,6	31,2	31,2
0,5	14,3	18,9	21,7	21,4
0,25	8,2	11,2	13,2	12,8
0,125	4,7	7,1	8,5	7,8
0,063	2,8	4,7	5,7	4,9
< 0,063	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 9-23: Zusammenfassung der Kornverfeinerung HMV 0/45
(Durchgänge in M.-%)

HMV 0/45									
Kornklasse [mm]	grobe Korngrößenverteilung			mittlere Korngrößenverteilung			feine Korngrößenverteilung		
	Ausgangskorngrößen- verteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Ausgangskorngrößen- verteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor	Ausgangskorngrößen- verteilung	normaler Proctor	modifizierter Proctor
63	100	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0	100,0	100,0
22,4	85,6	90,8	94,4	88,3	92,2	95,1	90,5	91,5	94,2
11,2	55,5	70,5	72,5	70,9	78,8	81,1	70,9	72,2	74,8
5,6	38,4	46,9	50,6	51,8	57,6	61,0	53,7	55,3	58,6
2	21,0	29,8	32,6	29,9	34,3	37,4	38,2	40,8	44,8
1	13,5	22,0	24,3	20,3	24,8	28,2	29,9	32,2	34,5
0,5	8,3	15,9	17,8	13,4	17,6	19,5	22,3	23,5	27,6
0,25	4,6	10,1	11,2	7,8	11,1	11,8	12,6	12,9	16,9
0,125	2,9	6,6	7,0	4,8	6,7	7,4	5,3	6,0	8,2
0,063	1,9	4,8	4,9	3,2	4,6	4,8	4,5	5,1	5,7
< 0,063	0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0

9.2 Teil B: Frosthebungsversuche

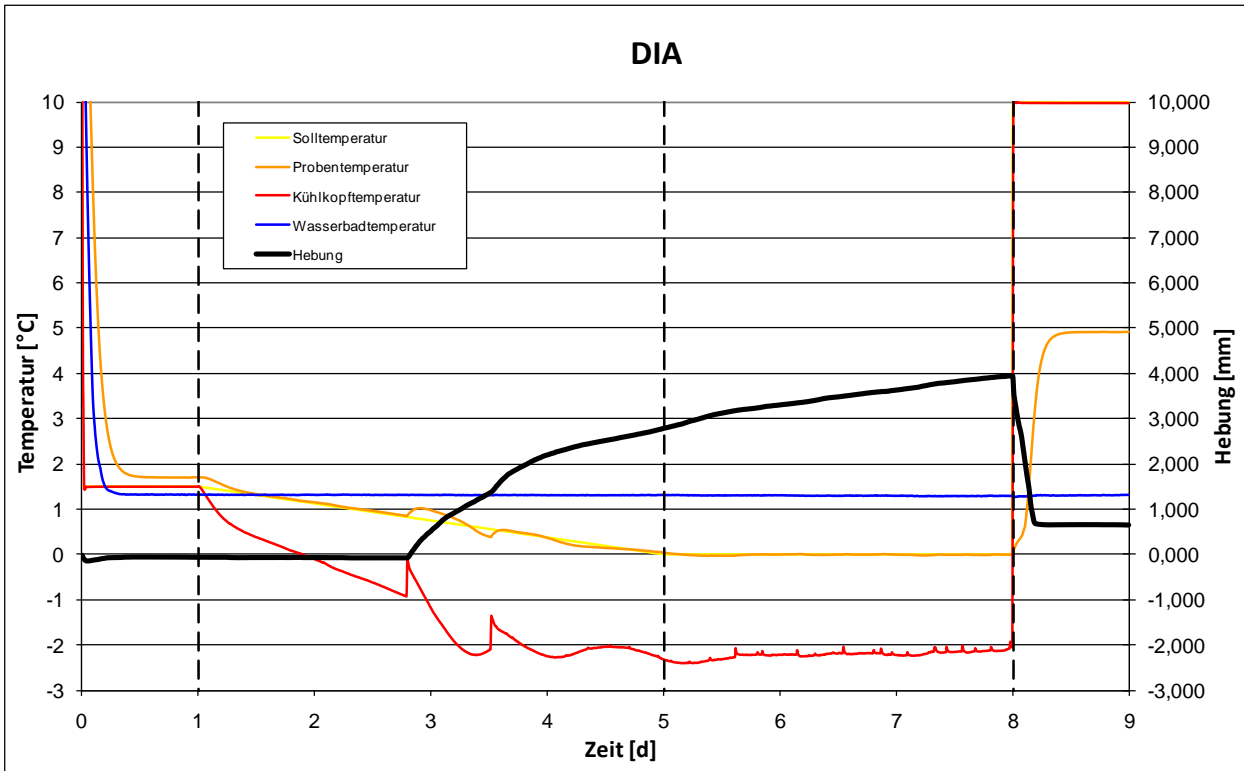


Bild 9-1: Frosthebungsdiagramm DIA

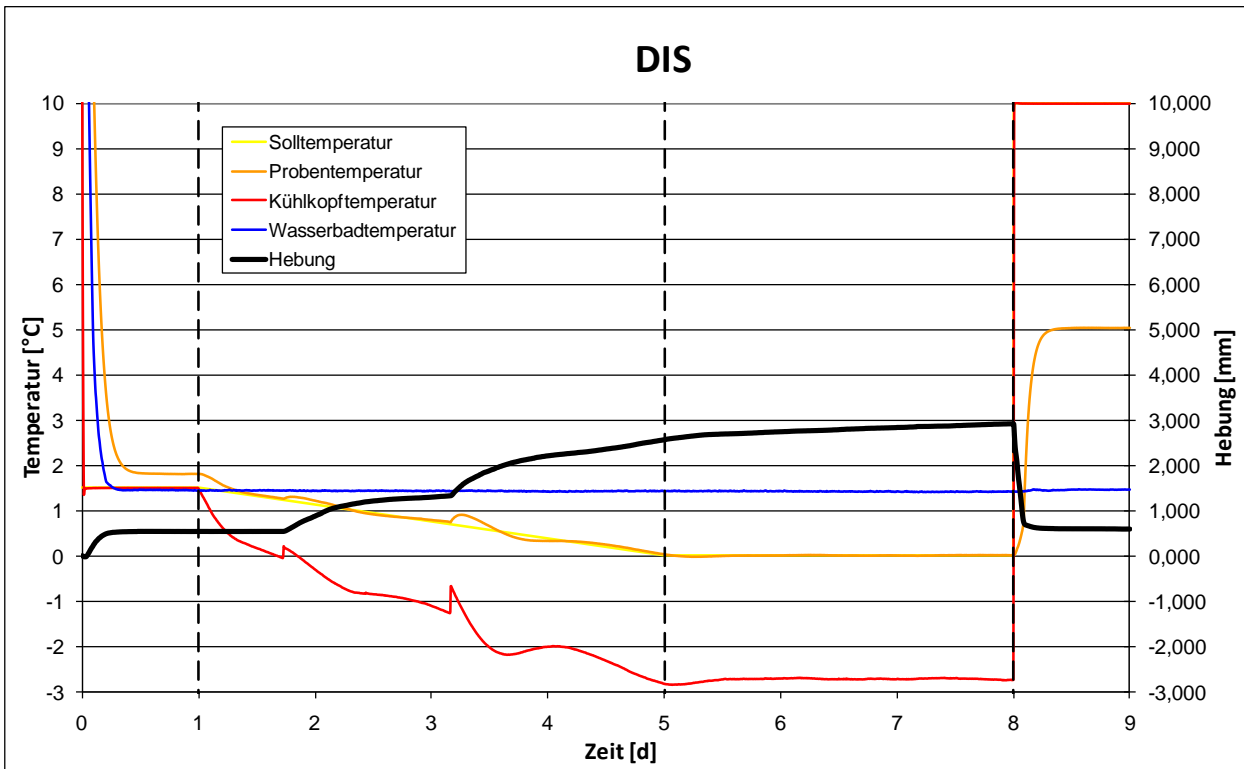


Bild 9-2: Frosthebungsdiagramm DIS

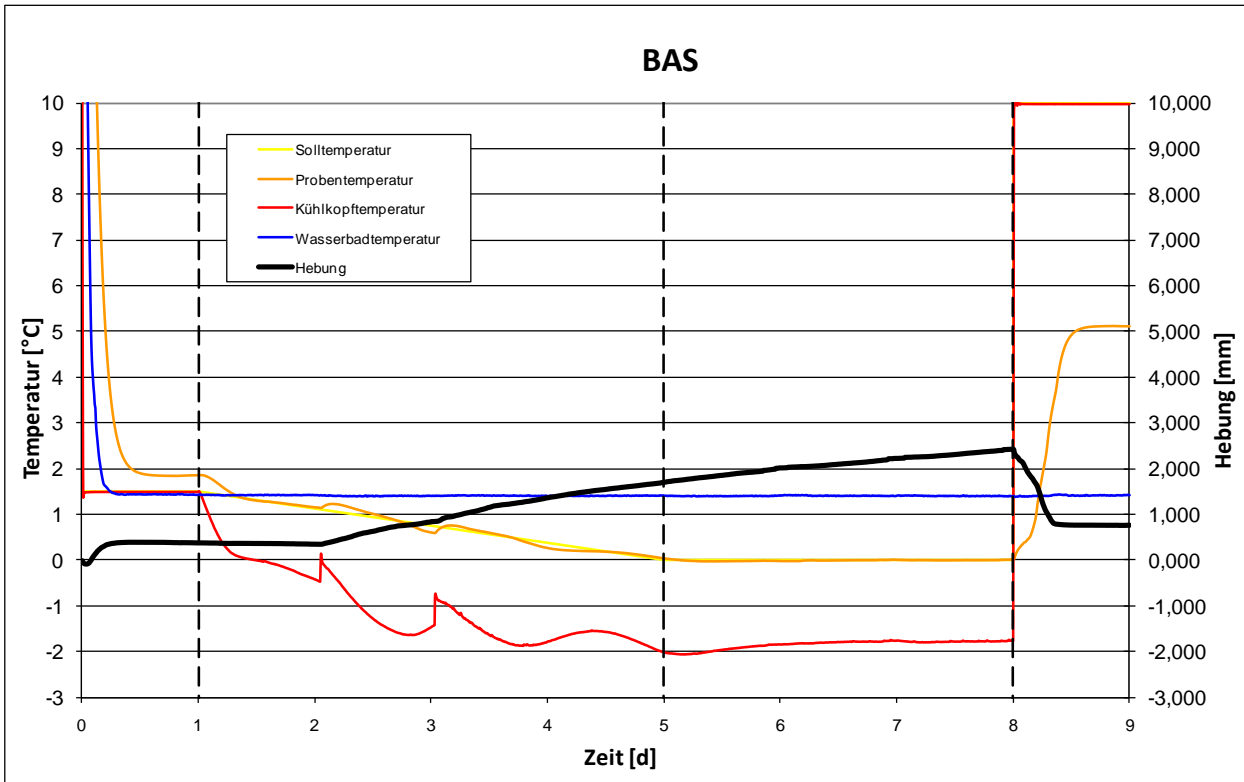


Bild 9-3: Frosthebediagramm BAS

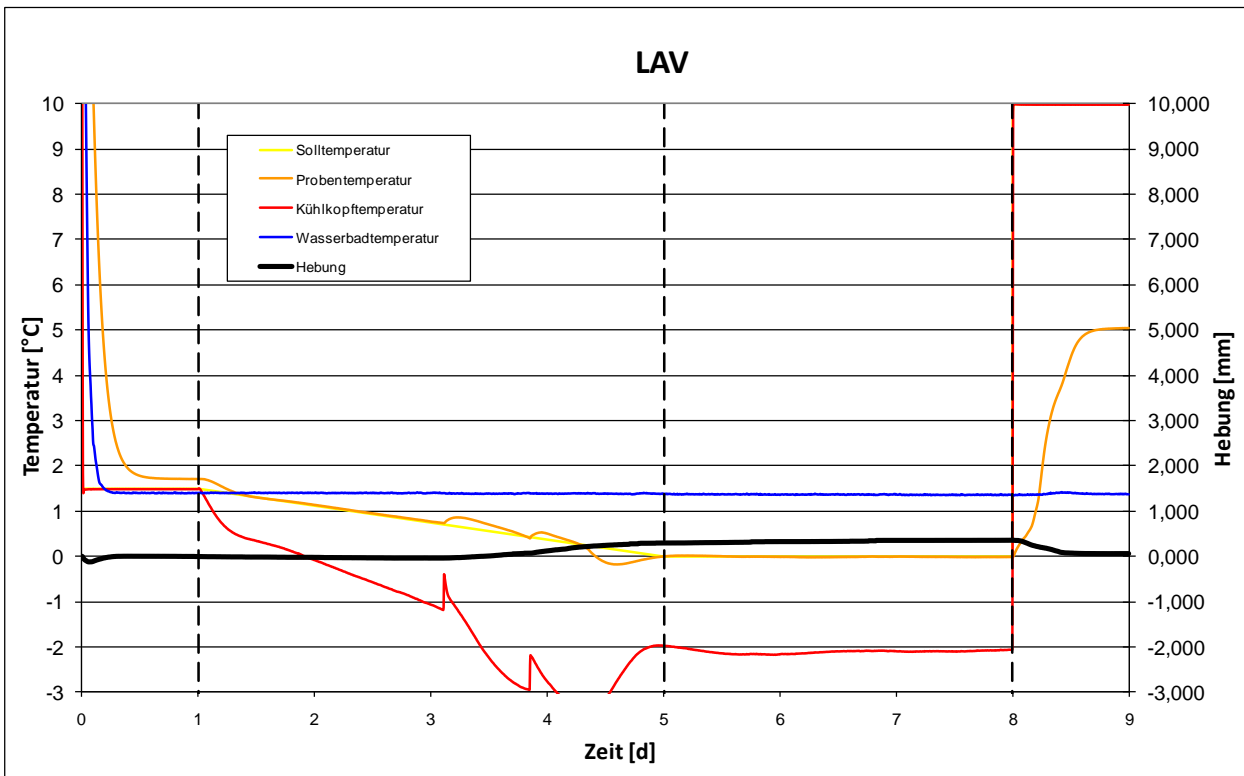


Bild 9-4: Frosthebediagramm LAV

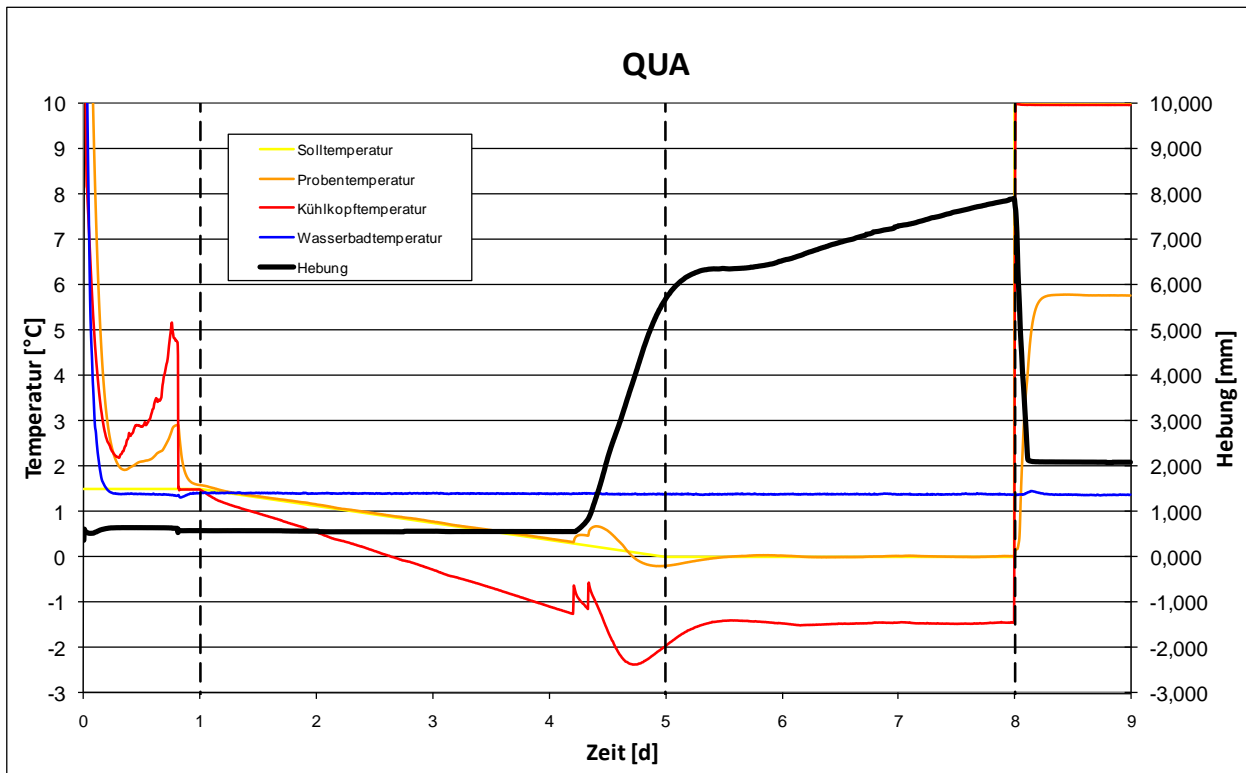


Bild 9-5:Frosthebungsdiagramm QUA

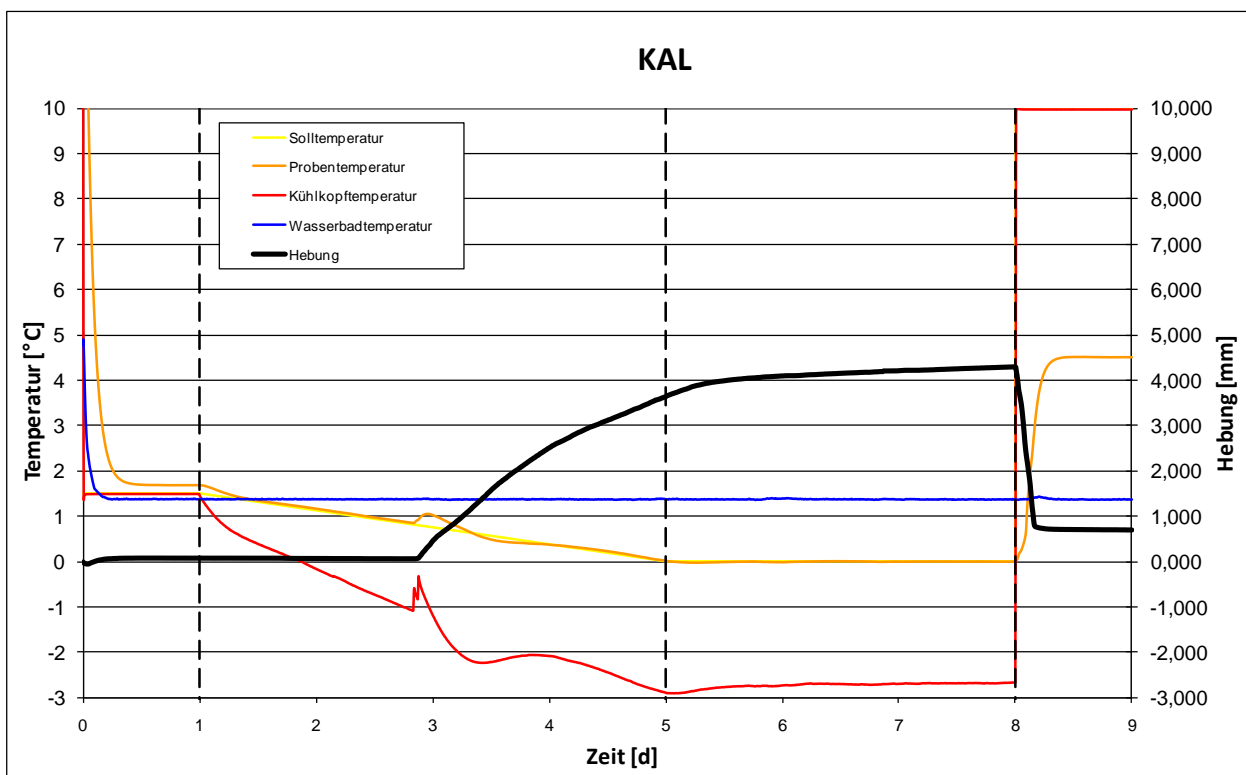


Bild 9-6: Frosthebungsdiagramm KAL

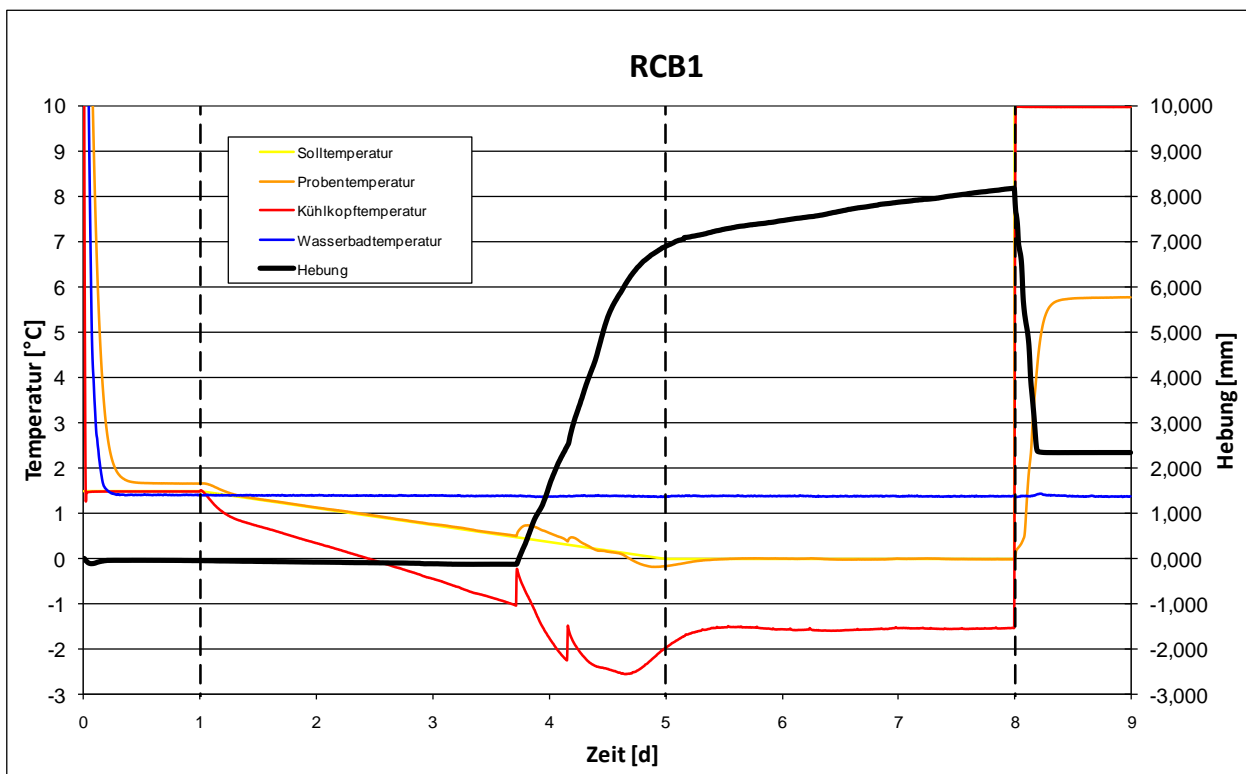


Bild 9-7:Frosthebungsdiagramm RCB1 einfacher Proctor

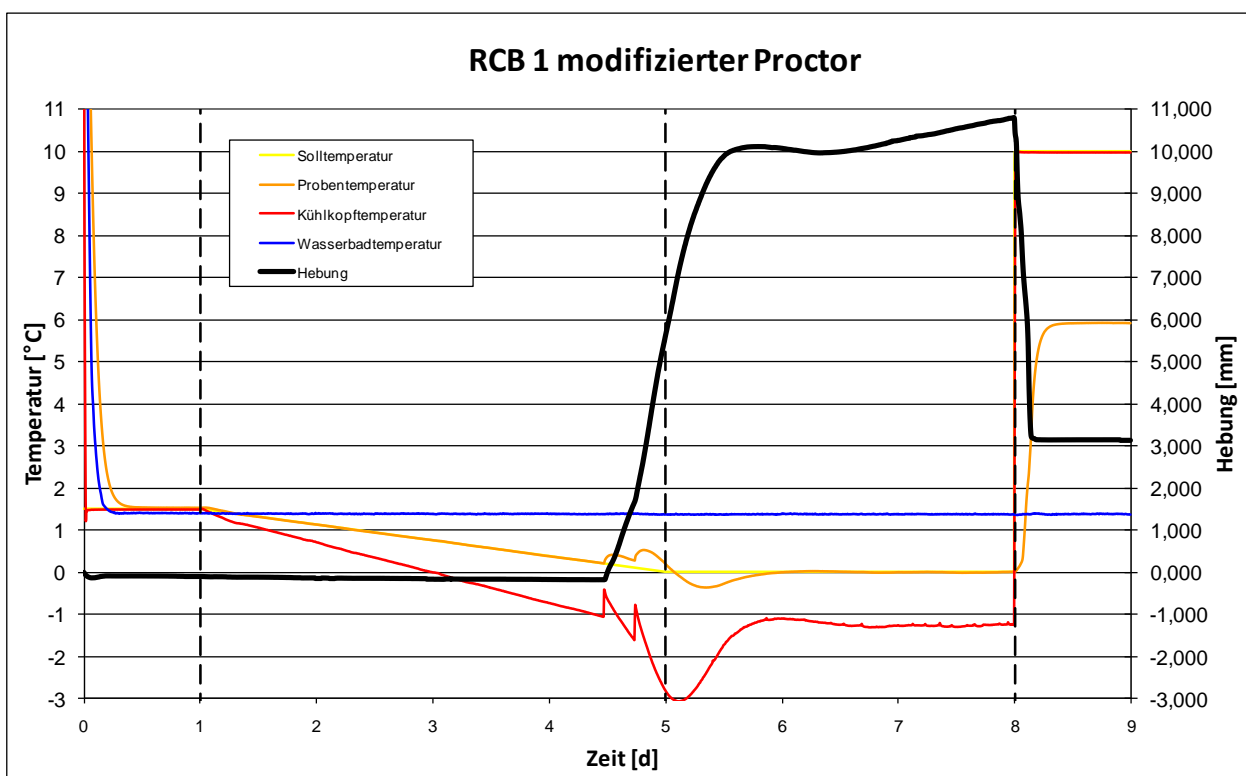


Bild 9-8:Frosthebungsdiagramm RCB1 modifizierter Proctor

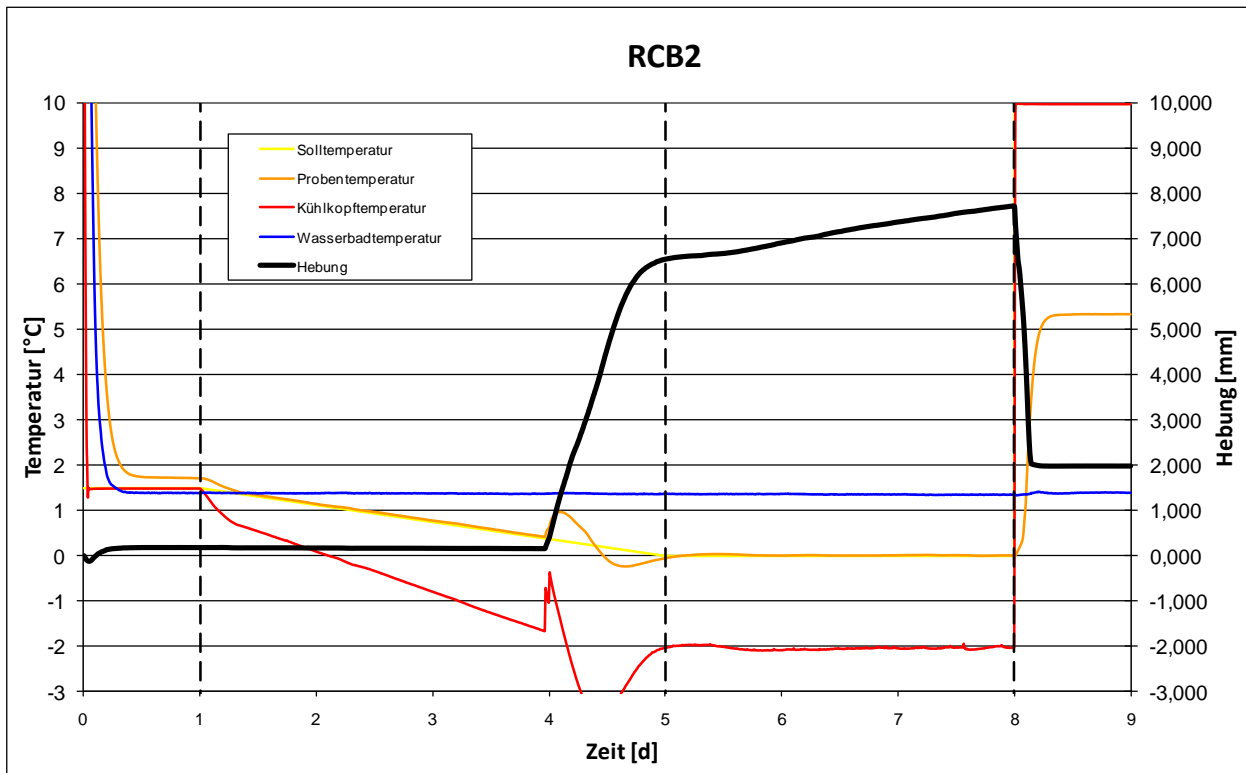


Bild 9-9:Frosthebungsdiagramm RCB2

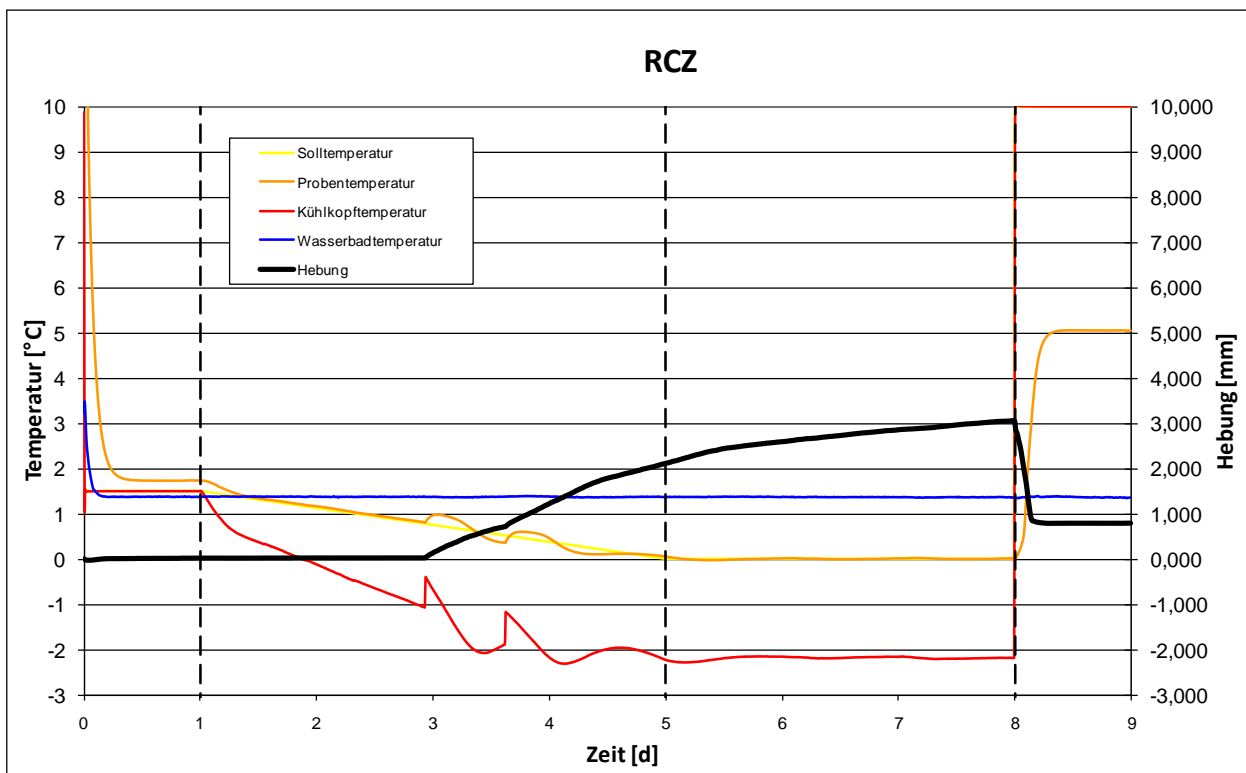


Bild 9-10:Frosthebungsdiagramm RCZ

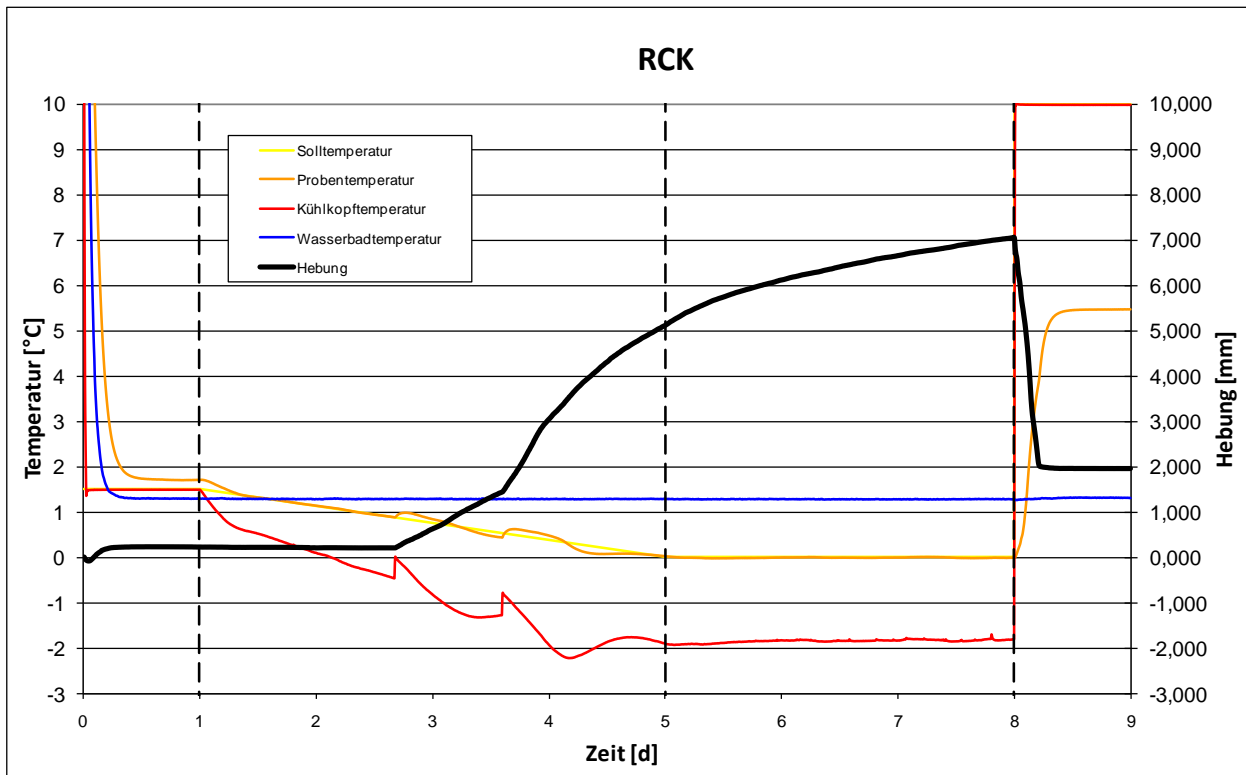


Bild 9-11: Frosthebediagramm RCK

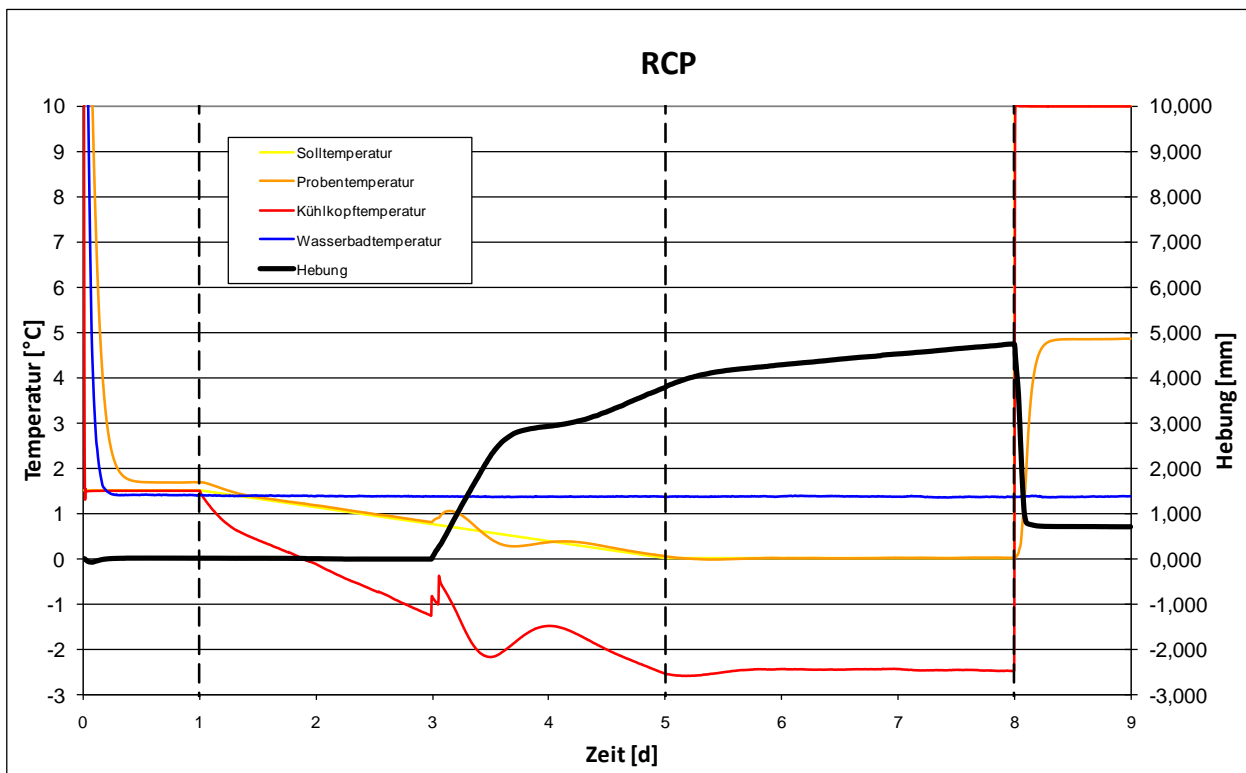


Bild 9-12: Frosthebediagramm RCP

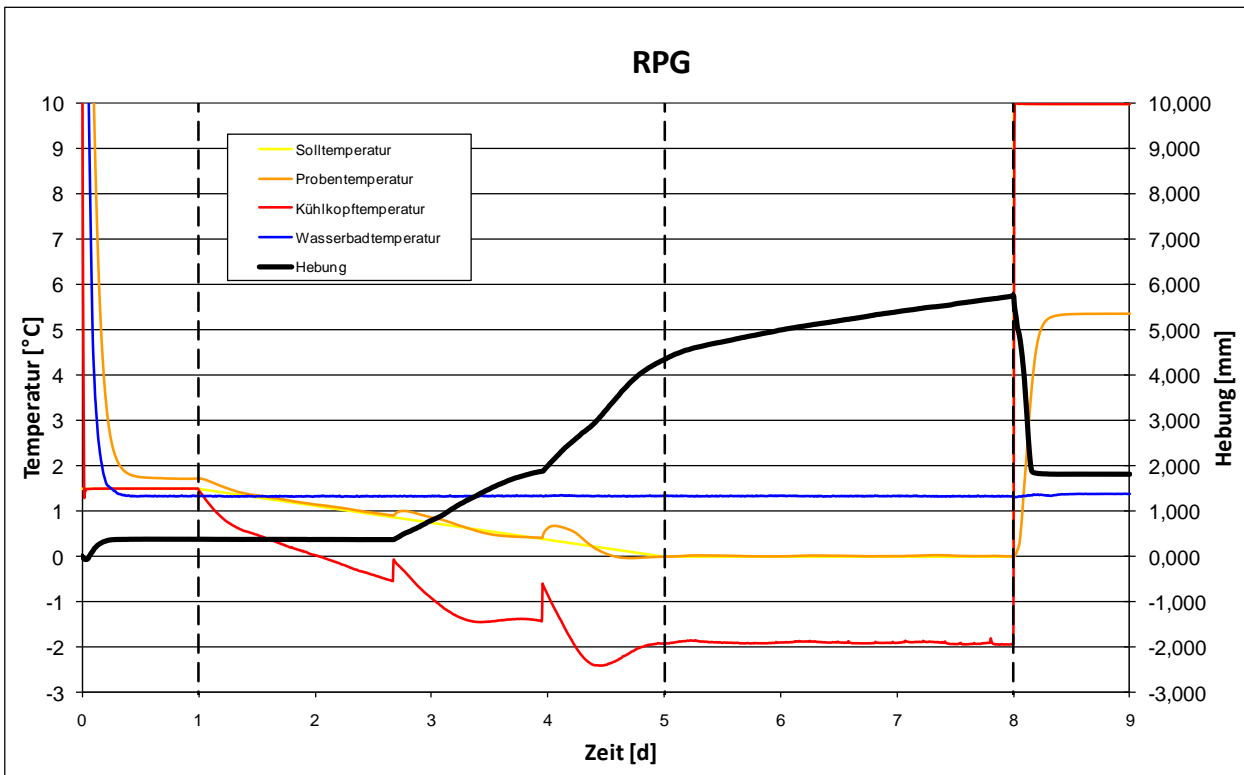


Bild 9-13: Frosthebediagramm RPG

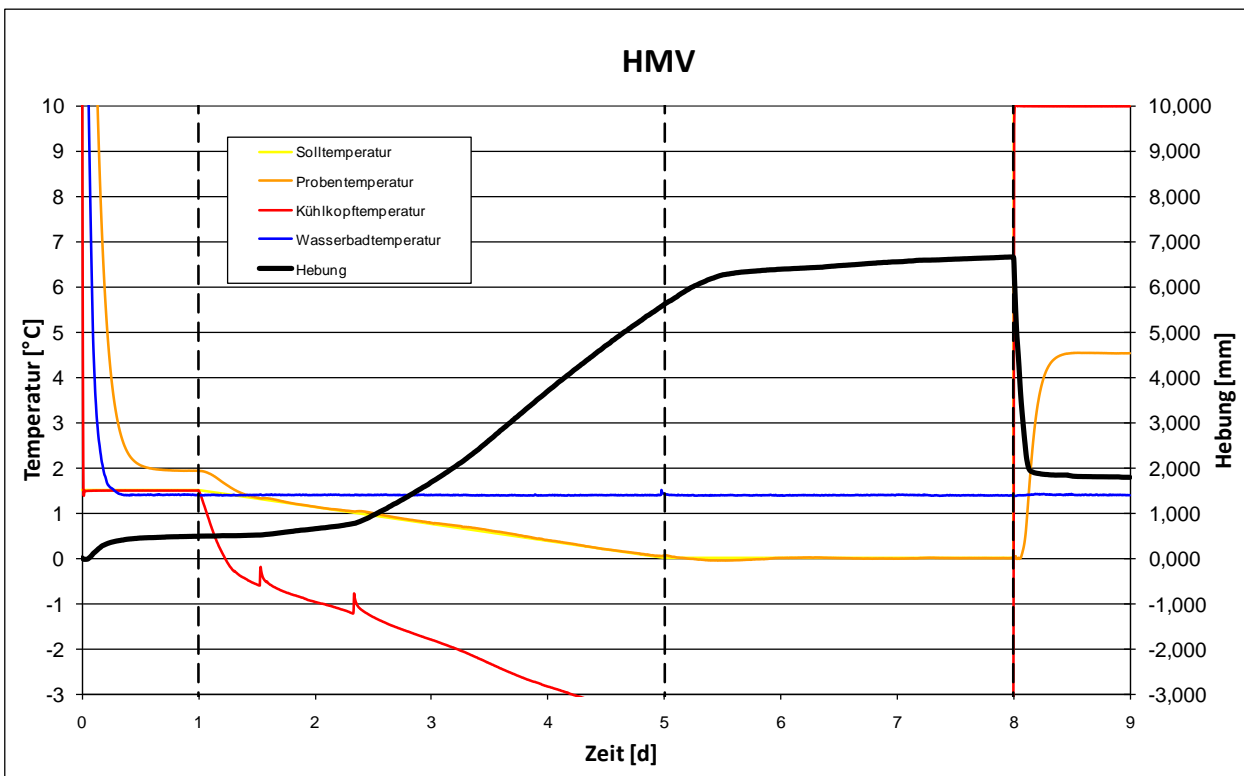


Bild 9-14: Frosthebediagramm HMV

9.3 Teil C: In situ Untersuchungen

Tabelle 9-24: Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungsstufe D

Baustelle	In situ				Labor				
	Trockendichte	Kornverfeinerung V	Wasserdurchlässigkeit Standrohr-Infiltrrometer	Wasserdurchlässigkeit Tropfinfiltrrometer	Trockendichte einfacher Proctor	Trockendichte modifizierter Proctor	Kornverfeinerung einfacher Proctor	Kornverfeinerung modifizierter Proctor	Los-Angeles Wert
	[Mg/m ³]	[-]	[m/s]	[m/s]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[-]
1	2,458	6,17	5,00E-07	3,54E-05	2,316	2,668	6,90	8,30	39
2 ²	1,760	2,49	5,00E-05	8,21E-05	1,848	1,977	9,21	12,91	36
3	2,01	5,55	3,26E-06	1,23E-05	2,033	2,328	8,69	8,63	28
4	2,201	10,5	2,01E-05	2,51E-05	2,076	2,281	7,22	9,65	38
5	2,210	3,80	3,60E-05	2,69E-05	2,231	2,351	1,61	3,17	24
6	2,146	9,60	3,55E-05	4,13E-05	2,376	2,447	6,38	11,8	22
7	2,219	10,8	2,40E-05	6,43E-05	- ¹	- ¹	8,14 ¹	9,10 ¹	38
8	2,605	3,77	3,60E-05	-	2,390	2,535	1,43	4,45	22
9	1,964	16,81	8,80E-06	-	1,805	1,997	16,22	17,63	44
10	2,356	8,60	1,10E-05	-	2,124	2,381	4,30	7,62	37

- 1) zu wenig Untersuchungsmaterial, keine sichere Ermittlung der Trockendichten möglich, Kornverfeinerung evtl. nicht bei optimalen Wassergehalt