

**Dipl.-Ing. Wolfgang Eden**  
**Dr.-Ing. Guntram Kohler**  
**Dipl.-Ing. Jan Kollar**  
**Dipl.-Ing. Harald Kurkowski**  
**Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg**  
**Dr. rer. nat. Frank Schlütter**  
**Dipl.-Ing. Nina Sliwa**



**Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk  
für Tragschichten ohne Bindemittel**

Forschungsbericht Nr. 111, März 2010

# Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV



Amtliche Materialprüfungsanstalt  
der Freien Hansestadt Bremen\*  
ein Geschäftsbereich der  
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen



## Impressum

Forschungsbericht Nr. 111  
„Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel“  
April 2010

Herausgeber:  
Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover  
Entenfangweg 15  
30419 Hannover  
Wolfgang.Eden@Kalksandstein.de

# Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV

## Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel

Berichtersteller:

**Dipl.-Ing. Wolfgang Eden**, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover

**Dr.-Ing. Guntram Kohler**, Consultant

**Dipl.-Ing. Jan Kollar**, Ruhr-Universität Bochum,  
Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum

**Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski**, Terra Textura GmbH, Soest

**Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg**, Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum

**Dr. rer. nat. Frank Schlütter**, Amtliche Materialprüfanstalt der Freien Hansestadt Bremen

**Dipl.-Ing. Nina Sliwa**, Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum

Veröffentlicht, alle Rechte vorbehalten. Dieses Forschungsvorhaben (**AiF-Nummer: 15517-N**) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ eV (AiF) gefördert.

## INHALTSVERZEICHNIS

---

	Seite
<b>1. Zusammenfassung</b>	5
<b>2. Einleitung und Zielsetzung</b>	8
<b>3. Untersuchungsmaterialien</b>	9
3.1 Bezeichnung der unterschiedlichen Ausgangsmaterialien	9
3.2 Probenahmen und Aufbereitung	10
<b>4. Untersuchungsprogramm</b>	13
<b>5. Ergebnisse der Untersuchungsstufe A</b>	16
5.1. Korngrößenverteilung	16
5.2 Stoffliche Zusammensetzung	17
5.3 Kornform	17
5.4 Dichtekennwerte	18
5.5 Wasseraufnahme	19
5.6 Porosität und Volumenbezogener Wasseraufnahmegrad	20
5.7 Frostwiderstand	21
5.8 Widerstand gegen Zertrümmerung	22
5.9 Physikalische und chemische Kennwerte der Kalksandsteine	22
5.9.1 Steindruckfestigkeit nach EN 772-1	23
5.9.2 Steinrohddichte nach EN 772-13	23
5.9.3 Wasseraufnahme nach EN 772- 11	24
5.9.4 Gehalt an Ca(OH) <sub>2</sub> mittels Differenzial-Thermoanalyse	25
5.9.5 Frostwiderstandsfähigkeit der Kalksandsteine nach EN 772-18	27
5.9.6 Porenradienverteilung der Kalksandsteine mittels Quecksilberdruckporosimetrie	27
5.10 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen	29
5.10.1 Ausgangsmaterialien	29
5.10.2 Materialien aus den CBR-Versuchen	33
<b>6. Ergebnisse der Untersuchungsstufe B</b>	34
6.1 Herstellung der Korngemische 0/32 mm	34
6.2 Proctorversuche	34
6.3 Wasserdurchlässigkeit	35
6.4 Frosthebungs- und CBR-Versuche	37
6.5 Frostwiderstand	40
6.6 Kornverfeinerung	41
6.7 Wasserwirtschaftliche Merkmale	42
<b>7. Eigenschaften der Ausgangsmaterialien</b>	44
7.1 Zusammenfassende Bewertung	44
7.2 Auswahl eines Recycling-Baustoffes	46

<b>8.</b>	<b>Ergebnisse der Untersuchungsstufe C</b>	<b>47</b>
8.1	Herstellung der Baustoffgemische	47
8.2	Frosthebungs- und CBR-Versuche der Baustoffgemische 60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4	47
8.3	Kornverfeinerung der Baustoffgemische 60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4	49
8.4	Frosthebungs- und CBR-Versuche sowie Kornverfeinerung des Baustoffgemisches 60 % Diabas + 40 % KS 1	50
8.5	Eigenschaften der Baustoffgemische 60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4	52
8.6	Eigenschaften des Baustoffgemisches 60 % RCB 3 + 40 % Diabas	53
<b>9.</b>	<b>Ergebnisse der Untersuchungsstufe D</b>	<b>54</b>
9.1	Herstellung der Baustoffgemische	54
9.2	Frosthebungs- und CBR-Versuche der Baustoffgemische RCB 3 + P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1	54
9.3	Kornverfeinerung der Baustoffgemische RCB 3 + P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1	56
9.4	Einfluss Eigenschaften der Baustoffgemische RCB 3 + P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1	57
<b>10.</b>	<b>Bewertung der Untersuchungsergebnisse</b>	<b>58</b>
10.1	Straßenbautechnische Untersuchungen	58
10.2	Mikroskopische Analyse	62
<b>11.</b>	<b>Literatur</b>	<b>64</b>
<b>Anhang</b>		
Anhang A:	Ergebnisse zu den Ausgangsmaterialien und Gemischen	67
Anhang B:	Ergebnisse der Mörteluntersuchungen	109
Anhang C:	Bilder	113
Anhang D:	Ergebnisse der Licht- und Rasterelektronenmikroskopie	121
Anhang E:	Liste der Forschungsberichte der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV	168

## 1. Zusammenfassung

In der Praxis fallen zunehmend größere Mengen an rückgebautem Kalksandstein-Mauerwerk zur Verwertung an. Derzeitige Schätzungen gehen von einer jährlich anfallenden Menge in Höhe von ca. 6 Mio. t Kalksandstein-Mauerwerk (Mauerwerk insgesamt ca. 20 Mio. t/a) in Deutschland aus. Diese Mengen können aber derzeit im Erd- und Straßenbau nur für untergeordnete Verfüllmaßnahmen verwendet werden. Für den Straßenoberbau begrenzen die TL Gestein-StB und die TL SoB-StB für die Tragschicht ohne Bindemittel - dem Hauptanwendungsgebiet für Recycling-Baustoffe - den Anteil der stofflichen Komponente Kalksandstein im Baustoffgemisch auf maximal 5 M.-%. Damit ist eine gezielte Wiederverwertung von rückgebauten Kalksandstein-Mauerwerksmassen im Oberbau von Verkehrsflächen heute noch nahezu ausgeschlossen. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist deshalb eine deutliche Erhöhung dieser Verwertungsrate.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden vier verschiedene Kalksandstein-Materialien hinsichtlich ihrer straßenbautechnischen Eignung untersucht. Diese vier Materialien decken die in der Praxis auftretenden Kalksandsteinqualitäten hinsichtlich der Porositätseigenschaften und der Festigkeit ab. Für Recyclingbetriebe wird keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Kalksandstein-RC-Materialien erforderlich sein. Folgende Kalksandstein-Materialien wurden verwendet:

- Gemisch aus hochfesten Kalksandstein-Schnittabfällen (KS 1),
- Gemisch aus normalfesten Kalksandstein-Schnittabfällen (KS 2),
- Kalksandstein-Mauerwerksbruch einer einzelnen Großbaustelle (KS 3) und
- an einer Aufbereitungsanlage anstehender Kalksandstein-Mauerwerksbruch von verschiedenen Baustellen (KS 4).

Darüber hinaus wurde aus drei RC-Baustoffen aus überwiegend rückgebautem Beton auf Basis der Ergebnisse einer straßenbautechnischen Grundlagenuntersuchungen ein Beton-RC-Material als Referenzmaterial für die weiteren Untersuchungen ausgewählt (RCB 3).

An den nahezu stofflich reinen Ausgangsmaterialien wurden zunächst die stofflichen Kennwerte ermittelt sowie an daraus hergestellten Korngemischen Prüfungen zum Nachweis der Eignung für Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) durchgeführt. In weiteren Untersuchungsschritten wurden Baustoffgemische - in stofflich gemischter Form - aus den Kalksandstein-Ausgangsmaterialien (KS 1 bis KS 4), dem ausgewählten Beton-RC-Baustoff (RCB 3) und z.T. mit einer definierten Zugabe von Gipsputz (P) in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen untersucht.

Grundsätzlich ist eine Zuordnung des gebrochenen Kalksandstein-Mauerwerks aufgrund seiner äußeren Beschaffenheit zu einer „Stoffgruppe Kalksandstein“ im RC-Baustoffgemisch eindeutig möglich. Dazu ist eine Abtrennung der Mörtel- und/oder Putzanteile in eine eigene Stoffgruppe für die Anforderungen an RC-Baustoffe für ToB's (im geltenden Regelwerk TL Gestein StB) notwendig. Besonders Putzanteile, können die Qualität des RC-Baustoffgemisches stark beeinflussen.

Bei den Untersuchungen an den sortenreinen Korngemischen stellten sich mit den rezyklierten Kalksandsteinmaterialien (KS 3, KS 4) geringere maximale Frosthebungen ein als mit den „fabrikneuen“ (KS 1, KS 2). Diese Unterschiede zeigten sich bei den Baustoffgemischen aus 60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4 nicht mehr. Auch wurde festgestellt, dass mit einer 40 %igen Zugabe von Kalksandstein die Frostempfindlichkeit des RC-Baustoffgemisches nicht beeinträchtigt wird.

Die maximalen Frosthebungen der untersuchten Baustoffgemische sind nur unwesentlich höher, als die der sortenreinen Ausgangsmaterialien. Es scheint, dass tendenziell der Materialanteil mit dem höheren Hebungspotential im Baustoffgemisch dessen maximale Hebungen beeinflusst. Dieses spiegelt sich bei den Ergebnissen der Frosthebungsversuch (FHV) am Baustoffgemisch mit einer definierten Zugabe von Innenputz wieder. Unabhängig von den Mischungsverhältnissen des RC-Baustoffs mit Kalksandsteinen weisen die Gemische mit einer 5 %igen Zugabe von Gipsputz höhere maximale Frosthebungen auf.

Allen Baustoffgemischen (60 % RCB 3 + 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4) gemein ist ein Tragfähigkeitsverlust von ca. 10 bis 30 % durch die Frostbeanspruchung, der aus der Differenz der CBR-Werte vor und nach dem FHV ermittelt wird. Die CBR-Werte nach FHV liegen nach dem FHV bei 20 % und 30 % und damit nach Floss [34] im Bereich einer mittleren bis guten unteren Tragschicht sowie gering bis mittel frostempfindlich. Aufgrund des zum Teil jedoch deutlichen Tragfähigkeitsverlustes der Baustoffgemische RCB 3 + KS 3 oder KS 4 sind diese beiden Gemische als mittel bis sehr frostempfindlich einzustufen. Durch den FHV konnte eine Kornverfeinerung an den Baustoffgemischen ermittelt werden. Eine mögliche Ursache für diese Feststellungen liefern ggf. die mikroskopischen Untersuchungen, bei denen aufbereitungsbedingte Mikrorisse in einzelnen Betonstücken festgestellt wurden. Einen Hinweis auf solche Risse findet sich auch in [??]. Diese Effekte haben aber keinen Einfluss auf die grundsätzliche Verwertbarkeit solcher Gemische im Straßenbau. Negative Auswirkungen auf das Praxisverhalten von Beton-RC-Baustoffen sind hierdurch nicht bekannt.

Ferner zeigen die mikroskopischen Untersuchungen, dass das Kalksandstein-Material keinerlei Risse aufweist.

Durch die Zugabe von Gipsputz findet eine weitere Reduzierung der Tragfähigkeit um rd. 10 %, sowie auch eine im Gegensatz zu den vorhergehenden Baustoffgemischen, signifikante Kornverfeinerung über alle Kornklassen, statt. Die CBR-Werte liegen dann zwischen 10 % bis 20 %, was eine Verwendung als RC-Baustoff hier in Frage stellt. Die Frostempfindlichkeit des Gipsputzes limitiert unabhängig von den anderen Anteilen das Gesamtfrost- und Gesamttragverhalten des Baustoffgemisches.

Wichtig für eine erhöhte Zugabe von KS-Material im RC-Baustoff ist daher auch eine Begrenzung des Feinkornanteils  $< 0,063$  mm, welcher aber auch unabhängig der stofflichen Bestandteile eines RC-Baustoffs heute schon zur Sicherstellung einer ausreichenden Wasserdurchlässigkeit von ToB's gefordert wird.

Beim Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Anforderungen der TL Gestein-StB bzw. der TL SoB-StB scheint es sinnvoll, für die Beurteilung der Eignung von RC-Baustoffgemischen für Tragschichten ohne Bindemittel Festlegungen zur Prüfung des Gesamtkorngemisches zu treffen. Mit Hilfe des Frosthebungsversuchs in Verbindung mit einem abschließenden CBR-Versuch lässt sich die Frostempfindlichkeit von Korngemischen besser und praxisrelevanter beurteilen als mit der im Regelwerk geforderten Frost-Tau-Wechsel-Prüfung an Einzelkörnungen. Im Gegensatz zu einer Bewertung gemäß den geltenden Anforderungen für die Schlagzertrümmerung und den Frostwiderstand, geprüft an Kornklassen, weisen die Untersuchungsergebnisse zur Beurteilung der Kornverfeinerung und der Frosthebung auf ein tendenziell positives straßenbautechnisches Verhalten der Baustoffgemische hin.

Eine Zugabe von 40 M.-% Kalksandstein - und damit deutlich mehr als die heutige zulässige Menge von max. 5 M.-% - in Baustoffgemischen für Tragschichten ohne Bindemittel scheint auf Basis der Untersuchungsergebnisse im Labor unabhängig vom eingesetzten KS-Ausgangsmaterials möglich zu sein.

Mit entscheidend für die Verwendung solcher Baustoffgemische ist der Ausschluss von Gipsputz, da schon geringe Mengen das Gesamttragverhalten des Baustoffgemisches deutlich reduzieren.

**Das Forschungsziel wurde erreicht.** Alle Untersuchungen wurden gemäß dem Forschungsantrag an großtechnisch aufbereiteten KS-RC-Materialien durchgeführt und im Labor untersucht. Mit einem Folgeprojekt sollten daher die gewonnenen Erkenntnisse in einer Erprobungsstrecke unter den Einflüssen von Wetter und Verkehr weiter analysiert und bestätigt werden.

In den einschlägigen Gremien der FGSV sollte in der TL Gestein StB eine gesonderte Zeile für Kalksandsteine eingeführt werden. Die verbleibende Zeile für "Putz und ähnliche Stoffe" sollte in diesem Zusammenhang ebenfalls hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung und zulässige Mengen angepasst werden.



## 2. Einleitung und Zielsetzung

Die Hauptanwendungsgebiete von Recycling-Baustoffen sind Tragschichten ohne Bindemittel im Straßenbau. Hierfür müssen die Baustoffgemische den Anforderungen der Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB) [1] und den für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Tragschichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB) [2] genügen. Unter anderem begrenzen die TL Gestein-StB den Anteil an Kalksandstein im recycelten Baustoffgemisch bei der stofflichen Zusammensetzung auf max. 5 M.-%. Zu der Stoffgruppe, die auch als Mauerwerksbruch bezeichnet wird, gehören neben Kalksandstein auch Putze und dem ähnliche Stoffe. In der Praxis fallen bei der Aufbereitung zunehmend größere Mengen an rückgebautem Kalksandstein-Mauerwerk an, was einen höheren Anteil an Kalksandstein im recycelten Baustoffgemisch zur Folge hat. Daraus resultiert, dass eine Verwendung solcher Baustoffgemische im Straßenoberbau derzeit nicht möglich ist. Diese Baustoffgemische werden daher ausschließlich für untergeordnete Verfüllmaßnahmen verwendet, was dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [3] nicht gerecht wird. Im Sinne dessen sind Recycling-Baustoffe einer möglichst hochwertigen Wiederverwertung zuzuführen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher die Klärung der Frage, inwieweit der Anteil an Kalksandstein im recycelten Baustoffgemisch aus straßenbautechnischer Sicht gesteigert werden kann und welche Anforderungen, möglicherweise über das bestehende Regelwerk hinaus, an das Baustoffgemisch zu stellen sind. Auch soll verglichen werden, ob sich die Eigenschaften von recycelten und fabrikneuen gebrochenen Kalksandsteinen unterscheiden und inwieweit dadurch möglicherweise das Gebrauchsverhalten einer Tragschicht ohne Bindemittel beeinflusst wird.

An rückgebautem Kalksandstein-Mauerwerk haften z.T. Mörtelreste an, die bei der Aufbereitung nicht ausgesondert werden können. Die Kalksandsteine stammen aus Bauwerken, die am Ende ihrer Nutzung abgerissen wurden. Somit handelt es sich um Baukörper, die verschiedenen Einflüssen aus Wetter und Belastung ausgesetzt waren. Diese Einflüsse können zu strukturellen Änderungen des Baustoffs führen, was sich auf dessen technische Eigenschaften auswirken kann. Im Recycling-Baustoff sind daher in der Regel auch Materialien unterschiedlichen Alters verarbeitet. Für dieses Forschungsvorhaben wurde das breite Spektrum an möglichen Kalksandsteinqualitäten wie folgt abgedeckt:

- je ein Kalksandsteingemisch hochfester und mittlerer Festigkeitsklasse
- Mauerwerksbruch einer einzelnen Großbaustelle
- an der Aufbereitungsanlage anstehender Mauerwerksbruch verschiedener Baustellen

Neben den grundlegenden straßenbautechnischen Laborprüfungen an Kornklassen und Korngemischen werden Baustoffgemische mit definierten Zugabemengen von 20 M.-%, 30 M.-% und 40 M.-% recycelten Kalksandstein analysiert. Im Anschluss an die Charakterisierung der einzelnen Materialien wird eine der vier Kalksandsteinsorten für die weitergehenden Untersuchungen ausgewählt. Des Weiteren werden dann im Hinblick auf die Praxis Baustoffgemische mit z.T. zusätzlichem Putzanteil hergestellt. Bei einer möglichen Anwendung dieser Baustoffgemische in den ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus ist sowohl der Widerstand gegen Frost als auch die Tragfähigkeit der Schicht von zentraler Bedeutung. Daher standen bei diesen Untersuchungen insbesondere das Verhalten der Materialgemische bei Frosteinwirkung und den daraus möglicherweise veränderten Tragfähigkeitseigenschaften im Vordergrund.

### 3. Untersuchungsmaterialien

#### 3.1 Bezeichnung der unterschiedlichen Ausgangsmaterialien

Als Referenz für die Herstellung von kalksandsteinhaltigen Baustoffgemischen diente ein Recycling-Baustoff, der aus drei anderen im Anschluss an deren straßenbautechnische Charakterisierung auszuwählen war. Da die Qualität von RC-Baustoffgemischen in der Praxis aufgrund ihrer Rohmaterialien und deren Aufbereitung Schwankungen unterliegt, wurden orientierend auch Baustoffgemische mit Diabas (Naturstein) und Kalksandstein in die Untersuchungen mit einbezogen.

Alle Materialien mit Ausnahme des Putzes, eines Recycling-Baustoffes und des Diabas wurden an einer Recycling-Anlage in Nützen aufbereitet. Die Auswahl der Ausgangsmaterialien wurde nach Diskussion und in Abstimmung mit der Betreuungsgruppe getroffen. Tabelle 1 bietet einen Überblick über die verwendeten Materialien.

Material	Probenbezeichnung	Herkunft	Aufbereitung	Art der Probe
RC-Baustoff	RCB 1	BAB A30 bei Rheine	Brechanlage vor Ort	Korngemisch 0/32 mm
	RCB 2		Recycling-Anlage Nützen	Korngemisch 0/32 mm
	RCB 3		Recycling-Anlage Essen	Korngemisch 0/45 mm
Naturstein	DIA	Halbeswig, Sauerland	Mobile Brechanlage	alle Kornklasse bis 45 mm
Kalksandstein	KS 1	Werk X	Recycling-Anlage Nützen	Ungebrauchte hochfeste Kalksandstein-Schnittabfälle Korngruppe 0/8, 8/32 mm
	KS 2	Werk Y	Recycling-Anlage Nützen	Ungebrauchte mittelfeste Kalksandsteine Korngruppe 0/8, 8/32 mm
Kalksandstein mit anhaftenden Mörtelresten	KS 3	Baustelle, Raum Hamburg	Recycling-Anlage Nützen	Korngemisch 0/8 und 8/32 mm
	KS 4		Recycling-Anlage Nützen	Korngruppen 0/8 mm und 8/32 mm
Zementmörtel	ZM		Recycling-Anlage Nützen	Korngemisch 0/32 mm
Kalkmörtel	KM		Recycling-Anlage Nützen	Korngemisch 0/32 mm
Innenputz	P	Gebäude in Essen	Laboraufbereitung	Korngemisch 0/32 mm

**Tabelle 1:** Untersuchte Materialien sowie deren Bezeichnung und Herkunft

### 3.2 Probenahmen und Aufbereitung

Die Probenahme erfolgt durch den Forschungsnehmer mit Ausnahme der Mörtelproben. Die Probenmenge betrug je Kalksandstein-Material ca. eine Tonne und wurde direkt an der Recycling-Anlage mit einem mobilen Backenbrecher aufbereitet. Die Bilder 1 bis 6 zeigen aufbereiteten Probematerialien (hier: RCB 3, KS 1, Mörtel und Putz). Weitere Bilder der verschiedenen Baustoff-Haufwerke und Brechanlagen sind in Anhang zusammen gestellt.

Die beiden Mörtel- und die Putzproben wurden manuell aus Haufwerken von Mauerwerksbruch gewonnen und im Labor aufbereitet. Die Probemengen der beiden Mörtel waren jedoch insgesamt gering, so dass nur orientierende Untersuchungen durchgeführt werden konnten, die im Anhang zusammengefasst sind.

Der Diabas wurde am Steinbruch in Halbeswig in den Kornklassen 0/2 mm, 2/5 mm, 5/8 mm, 8/11 mm, 11/16 mm, 16/22 mm, 22/45 mm entnommen.

Für die Untersuchungen am Korngemisch 0/32 mm wurden alle Materialien zu einer annähernd mittleren Sieblinie für Schottertragschichten gemäß den TL SoB-StB zusammen gesetzt.



**Bild 1:** aufbereitete Probe RCB 3,  
Korngemisch 0/45 mm



**Bild 2:** aufbereitete Probe KS 1,  
Korngemisch 8/32 mm



**Bild 3:** aufbereitete Mörtelproben,  
Korngemisch 0/32 mm

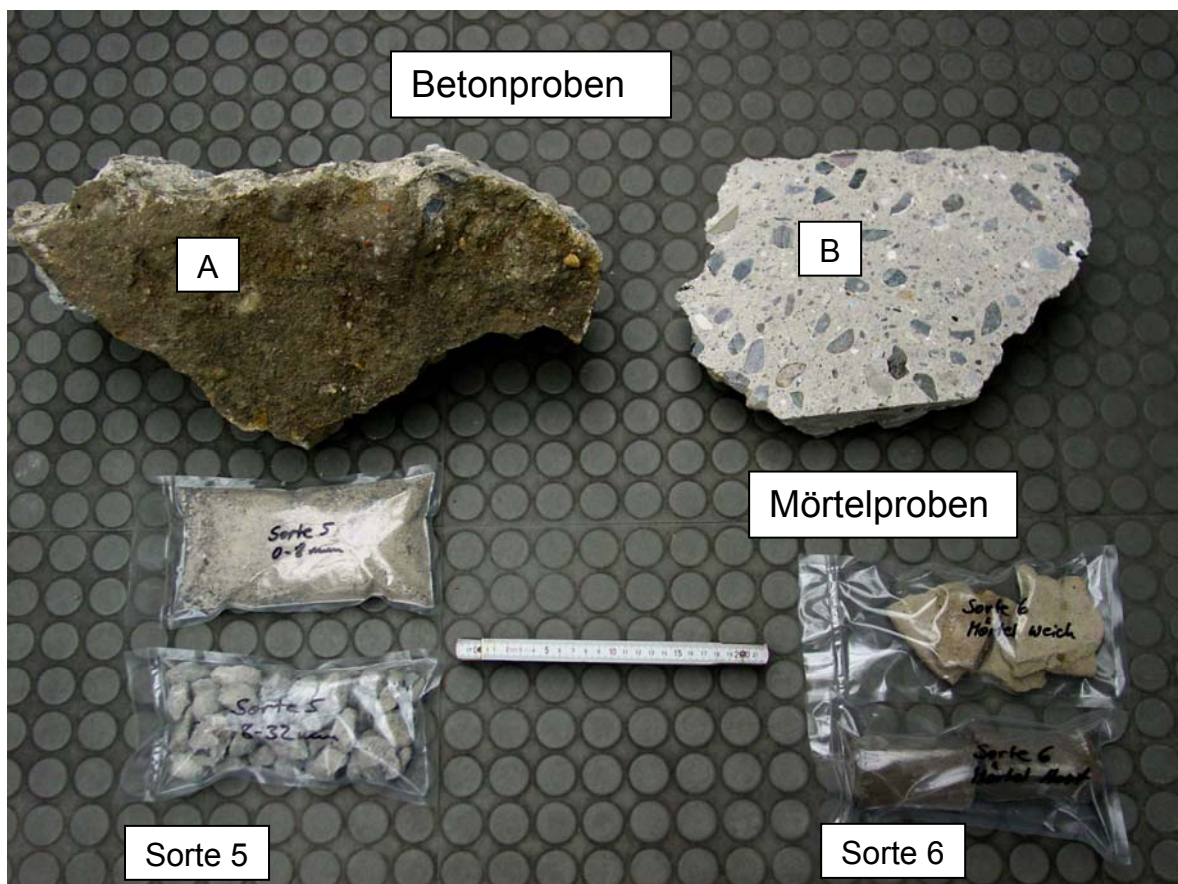


**Bild 4:** aufbereitete Putzprobe,  
Korngemisch 0/32 mm





**Bild 5:** Proben im Anlieferungszustand - Kalksandsteinproben

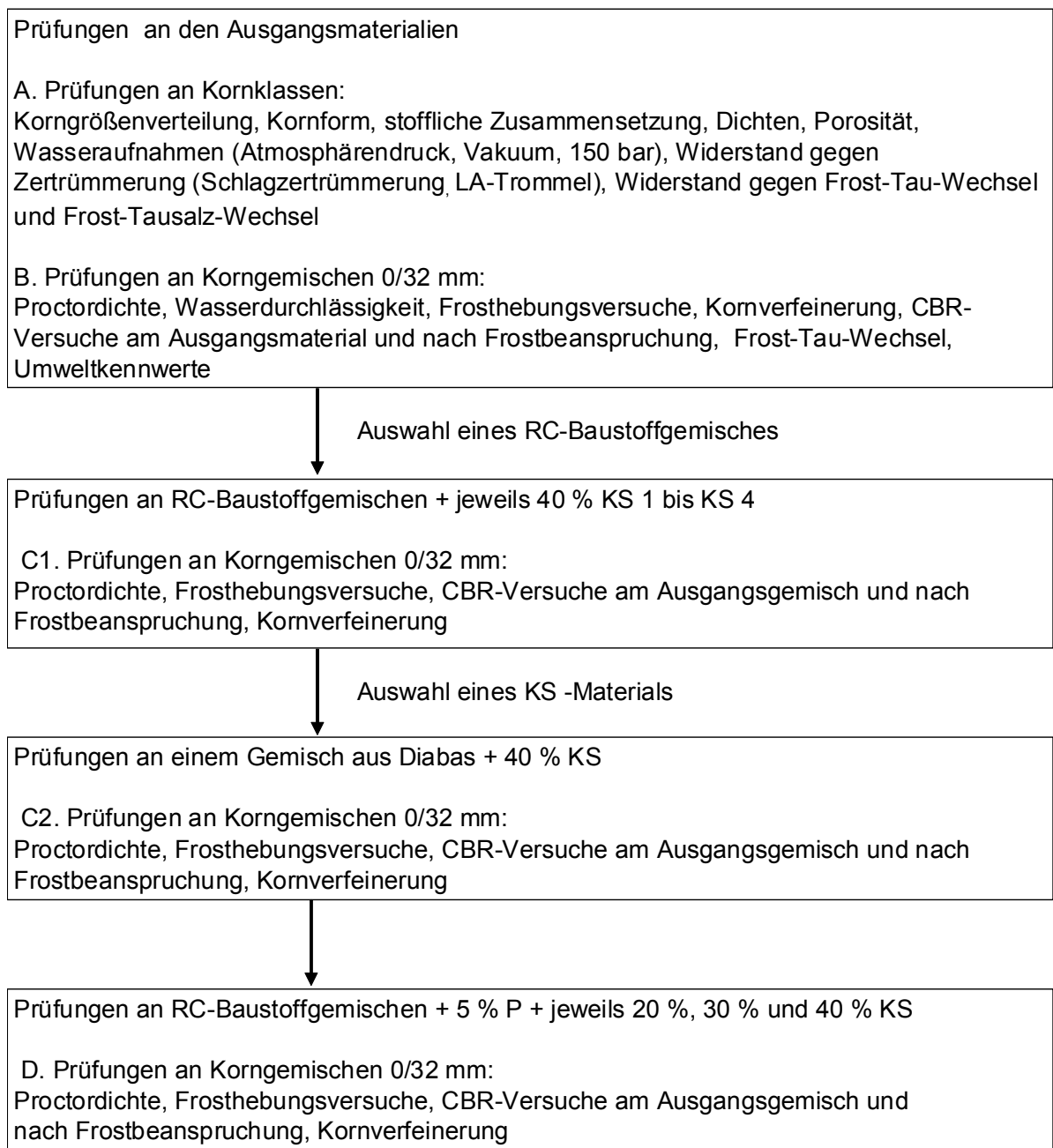


**Bild 6:** Proben im Anlieferungszustand - Betonproben und Mörtelproben

## 4. Untersuchungsprogramm

### RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM:

Die durchzuführenden Prüfungen wurden nach Diskussion und in Abstimmung mit der Betreuungsgruppe festgelegt. Erfahrungen aus bereits abgeschlossenen Untersuchungen und das Arbeitsprogramm des Forschungsnehmers bildeten die Grundlage für die Vorgehensweise. Während der Bearbeitungszeit wurden die erzielten Ergebnisse schrittweise mit der Betreuungsgruppe besprochen und die für weitere Erkenntnisse als sinnvoll erachteten Materialvarianten für die Untersuchungen festgelegt. Bild 7 zeigt das Ablaufschema des Untersuchungsprogramms an der Ruhr-Universität Bochum, wie es letztendlich durchgeführt wurde.



**Bild 7:** Ablaufschema des Untersuchungsprogramms (Ruhruniversität Bochum)

Die Ausgangsmaterialien wurden in zwei Teilen untersucht. In Teil A wurden die Eigenschaften der Stoffe und in Teil B deren grundsätzliche Eignung für Frostschutz- bzw. Schottertragungsschichten ermittelt. In Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse an den drei Recycling-Baustoffen (RCB 1, RCB 2 und RCB 3) wurde ein RC-Baustoff als Referenzmaterial ausgewählt.

Auch die Untersuchungen an den Baustoffgemischen teilten sich in zwei Teile. In Teil C wurden mit dem ausgewählten RC-Baustoff und jeweils 40 % Kalksandstein KS 1, KS 2, KS 3 und KS 4 Gemische hergestellt und geprüft. Aus diesen Untersuchungsergebnissen ging hervor, welcher Kalksandstein für weitergehende Prüfungen geeignet war. Da in der Praxis die Zusammensetzung von RC-Baustoffen Schwankungen unterliegt, wurden zusätzlich orientierend Untersuchungen mit Diabas als Referenzmaterial durchgeführt.

An den beim Rückbau von Mauerwerk recycelten Kalksandsteinen haften in der Regel Mörtel und Putz an. In Teil D erfolgte Untersuchung zum Einfluss variierender Mengen von Kalksandstein und Innenputz auf das Baustoffgemisch hinsichtlich seiner Frostbeständigkeit und Tragfähigkeit.

### **FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND EV:**

An den Ausgangsmaterialien wurden bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV des Weiteren folgende charakterisierende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der Steindruckfestigkeit nach EN 772-1
- Bestimmung der Steinrohichte nach EN 772-13
- Bestimmung der Wasseraufnahme nach EN 772- 11
- Bestimmung des Gehaltes an  $\text{Ca(OH)}_2$  mittels Differenzial-Thermoanalyse
- Bestimmung der Frostwiderstandsfähigkeit nach EN 772-18
- Bestimmung der Porenradienverteilung mittels Quecksilberhochdruckporosimetrie

### **AMTLICHE MATERIALPRÜFUNGSANSTALT DER FREIEN UND HANSESTADT BREMEN**

Im Rahmen des Projektes hatte die Abteilung Analytische Baustoffmikroskopie der MPA Bremen die Aufgabe, die Ausgangsmaterialien mikroskopisch zu analysieren. Hierzu waren die Materialien ggf. zu identifizieren, vor allem aber waren die Gefügemerkmale zu erfassen. Die wesentlichen Kriterien waren evtl. vorhandene Vorschädigungen durch Lösungsangriffe, Treibmineralbildungen und die Erfassung von Rissen, die durch den Brechvorgang hervorgerufen wurden. Im Vordergrund standen dabei die verschiedenen Kalksandsteine, die im Projekt eingesetzt wurden.

Von den aufgeführten Probenmaterialien wurden Dünnschliffe hergestellt. Hierfür mussten aus den Stückproben Teile passender Größe herausgesägt werden. Von den gebrochenen Materialien (Körnungen 0/8 bzw. 8/32) wurden einzelne Körner verwendet. Diese Probenstücke wurden unter Vakuum mit Kunstharz getränkt. Nach Aushärtung des Harzes erfolgte die Herstellung orientierter Dünnschliffe, an denen zunächst die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen und später die REM/EDX-Untersuchungen durchgeführt wurden.

### **Polarisationsmikroskopie (PolMi)**

Im Polarisationsmikroskop können mineralische Bestandteile aufgrund ihres spezifischen lichtoptischen Verhaltens identifiziert und von anderen Materialien unterschieden werden.

Im Kontext des Projektes wurden die Materialgefüge hinsichtlich folgender Kriterien untersucht:

- Zusammensetzung der mineralischen Baustoffe
- Homogenität
- Art und Verteilung des Bindemittels
- Art und Größe der Zuschläge
- Nachweis von Materialveränderungen (Gefügeschäden, Entfestigungsprofile, Mineralumwandlungen bzw. -neubildungen)

Die PolMi-Untersuchungen liefern einen ersten Überblick über Art und Beschaffenheit des Materials. Durch die anschließende Untersuchung der Dünnschliffe im REM können die Erkenntnisse aus dem PolMi präzisiert und erweitert werden. Hierfür wird der Dünnschliff mit einer leitfähigen Schicht überzogen werden (Kohlebedampfung).

### **Raster-Elektronenmikroskopie (REM) / Energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX)**

Durch den Elektronenbeschuss werden aus der Oberfläche des Probenmaterials verschiedene Signale freigesetzt (Sekundär- (SE-) und Rückstreuелеktronen (RE-), elementspezifische Röntgenstrahlen), die durch spezielle Detektorsysteme erfasst werden. Aus den Sekundärelektronen bzw. den Rückstreuелеktronen wird jeweils ein sichtbares Bild auf dem Bildschirm zusammengesetzt. Die Sekundärelektronenabbildung enthält im Wesentlichen morphologische und topographische Aussagen der untersuchten Probenbereiche. Damit können Probestructuren oder Formen einzelner Bestandteile bis in die Details untersucht werden.

Für Untersuchungen an polierten Schliffen ist die Rückstreuелеktronenabbildung von entscheidender Bedeutung. Sie liefert aufgrund der Abhängigkeit des Rückstreuevermögens von der Ordnungszahl Informationen über die Materialzusammensetzung. Chemische Verbindungen, die schwerere Elemente enthalten, erscheinen in der Rückstreuabbildung heller als Verbindungen, die aus leichteren Elementen aufgebaut sind. Durch diesen Materialkontrast können im REM unterschiedliche Bestandteile (Phasen) einer Probe erkannt und unterschieden werden.

Aus den elementspezifischen Röntgenstrahlen wird mit einem energiedispersiven Detektorsystem ein Spektrum des Elementbestandes erzeugt. Durch diese Röntgenmikroanalyse (EDX) kann die Elementzusammensetzung (der einzelnen Bestandteile oder Phasen) bis in mikrometerfeine Bereiche halbquantitativ ermittelt werden. Das Rückstreueverhalten, die morphologischen Informationen (Form), Größe und Verteilung der Bestandteile sowie deren Elementbestand sind häufig ausreichend spezifisch für eine Identifizierung und Bewertung.

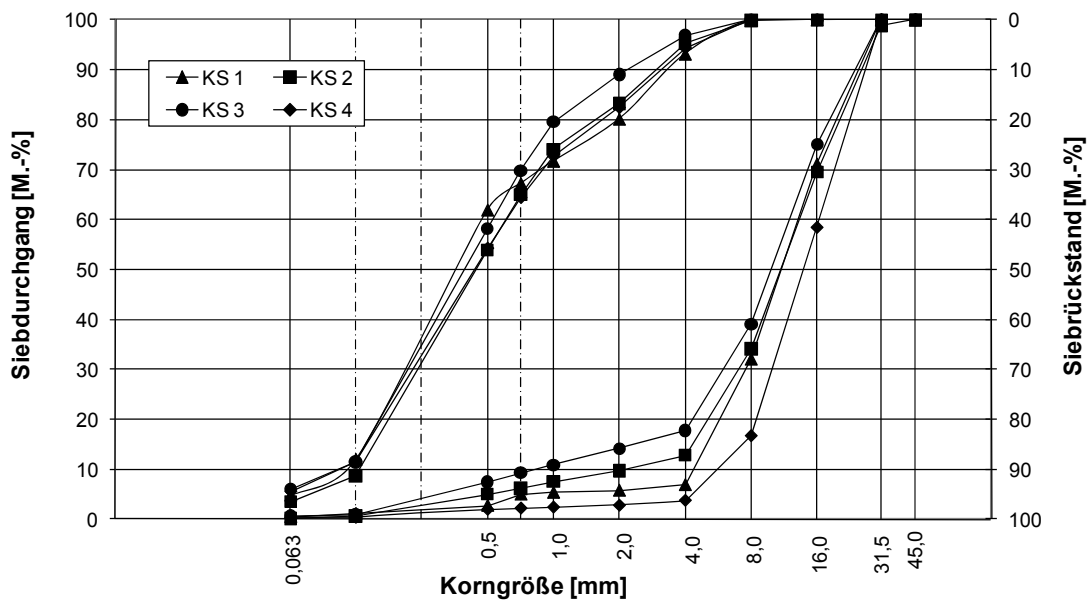


## 5. Ergebnisse der Untersuchungsstufe A

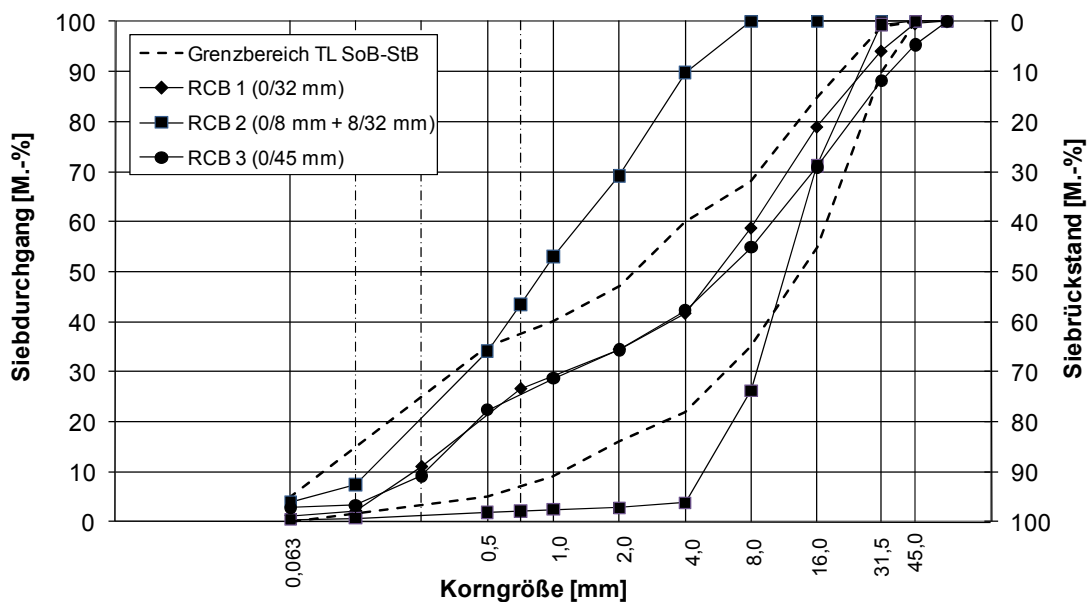
### RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM:

#### 5.1. Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung wurde gemäß DIN EN 933-1 [4] an den aus den Aufbereitungsanlagen entnommenen Korngemischen (0/8 mm, 8/32 mm, 0/32 mm) bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 8 und 9 dargestellt.



**Bild 8:** Korngrößenverteilungen der aufbereiteten Kalksandsteine



**Bild 9:** Korngrößenverteilung der aufbereiteten RC-Baustoffe

## 5.2 Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung wurde von den drei RC-Baustoffen und den zwei Mörteln nach Augenschein gemäß den „Technischen Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB)“ [5] ermittelt. Dafür wurden die Baustoffgemische in Kornklassen > 4 mm aufgeteilt. Die Ergebnisse sind als Massenanteile der charakteristischen Stoffgruppe mit den gewichteten Anteilen der Kornklasse 4/32 mm in Tabelle 2 zusammen gestellt. Die Anforderungen für die stoffliche Zusammensetzung sind in den TL Gestein-StB formuliert. Bei den vier Kalksandsteinmaterialien konnte nur bei KS 3 augenscheinlich unterschiedliche Stoffgruppen festgestellt werden, der Mörtel- und der Betonanteil betrug hier durchschnittlich über alle Kornklassen jeweils 7 M.-%.

Stoffgruppe		RCB 1 [M.-%]	RCB 2 [M.-%]	RCB 3 [M.-%]	ZM [M.-%]	KM [M.-%]
Naturstein	-	-	30,5	14,9	-	-
Kies	-	-	-	2,8	-	-
Beton	-	97,7	69,3	64,8	-	-
Schlacke	-	-	-	3,5	-	-
Asphaltgranulat	≤ 30	2,3	-	1,1	-	-
Klinker, Ziegel, Steinzeug	≤ 30	-	0,2	3,4	0,5	0,9
Kalksandstein, Putze, Mörtel, u.ä.	≤ 5	-	-	9,0	98,2 (Mörtel)	98,8 (Mörtel)
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe	≤ 1	-	-	1,8	1,3 (Gips)	0,3 (Gips)
Fremdstoffe	≤ 0,2	-	-	-	-	-

**Tabelle 2:** Stoffliche Zusammensetzung der drei RC-Baustoffe und der Mörtel

## 5.3 Kornform

Die Bestimmung der Kornform grober Gesteinskörnungen wurde entsprechend DIN EN 933-4 [6] durchgeführt. Mit Hilfe des Kornform-Messschiebers werden Proben aus Einzelkörnern der einzelnen Kornklassen aus dem Baustoffgemisch 4/32 mm nach ihrem Verhältnis Länge zu Korndicke eingestuft. Daraus resultiert die Kornform-Kennzahl, die für alle in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Materialien bestimmt worden ist (Tabelle 3).

Probe	Anforderungen nach den TL Gestein-StB SI [-]	Kornformkennzahl SI [-]
RCB 1	< 50	6
RCB 2		3
RCB 3		8
KS 1		7
KS 2		9
KS 3		4
KS 4		4

**Tabelle 3:** Kornform-Kennzahlen SI für die verschiedenen Baustoffe

#### 5.4 Dichtekennwerte

Die Trockenrohdichten wurden nach DIN EN 1097-6 [7] bestimmt. An allen Materialien erfolgte die Dichtebestimmung an Kornklassen, mit Ausnahme des RCB 3 und des Diabas. Hier wurde die Dichte am Korngemisch bestimmt. Bei den Kornklassen > 4 mm der vier Kalksandsteinmaterialien wurde die Wassersättigung bei der Dichteberechnung berücksichtigt. Als Prüfflüssigkeit kam entmineralisiertes Wasser zur Anwendung. Die Dichten der Kornklasse < 0,063 mm wurden nach DIN EN 1097-7 [8] mit Trichlorethylen als Prüfflüssigkeit bestimmt. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Probe	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Trockenrohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]					
	< 0,063	0/2	2/4	4/8	8/16	16/32	0/32
RCB 1	2,568	2,453	2,453	2,500	2,503	2,427	-
RCB 2	2,441	2,632	2,571	2,567	2,533	2,511	-
RCB 3	2,808	-	-	-	-	-	2,642
DIA	3,011	-	-	-	-	-	2,900
KS 1	2,519	2,711	2,520	1,770	1,774	1,797	-
KS 2	2,490	2,635	2,523	1,888	1,885	1,874	-
KS 3	2,515	2,568	2,497	1,954	1,947	1,925	-
KS 4	2,572	2,615	2,499	1,908	1,920	1,888	-

**Tabelle 4:** Ergebnisse der Dichtebestimmungen

## 5.5 Wasseraufnahme

Die Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck erfolgte nach DIN EN 1097-6 [7] und der unter Vakuum bzw. unter Druck nach DIN 52009 [9]. Geprüft wurden die Kornklassen 4/8, 8/16 und 16/32 mm. Aufgrund der geringen Differenzen zwischen den Wasseraufnahmen der Baustoffgemische nach Vakuum- bzw. nach Druckbeanspruchung wurde zum Vergleich die Druckwasseraufnahme nur an der Kornklasse 16/32 mm durchgeführt. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der Wasseraufnahme.

Probe	Massebezogener Wasseraufnahmegrad [%]									Sättigungswert [-]
	unter Atmosphärendruck				unter Vakuum				unter Druck	
	4/8	8/16	16/32	Arith. Mittel	4/8	8/16	16/32	Arith. Mittel	16/32	
RCB 1	5,2	3,8	4,0	4,3	7,3	5,8	4,4	5,8	5,9	0,68
RCB 2	7,4	5,5	5,3	6,1	6,7	5,5	5,2	5,7	6,0	0,88
RCB 3	-	-	3,3	-	4,1	3,7	3,7	3,8	3,8	0,87
KS 1	16,8	16,2	15,1	16,0	18,0	17,2	17,4	17,5	17,7	0,86
KS 2	11,8	11,9	11,7	11,8	13,1	14,1	14,2	13,8	-	-
KS 3	10,8	10,4	9,5	10,2	13,7	13,7	13,3	13,6	13,2	0,72
KS 4	11,6	11,0	10,7	11,1	14,6	14,2	13,5	14,1	14,2	0,81

**Tabelle 5:** Wasseraufnahmegrad der untersuchten Materialien

## 5.6 Porosität und Volumenbezogener Wasseraufnahmegrad

Aus den ermittelten Dichten und Trockenrohdichten wurde nach DIN EN 1936 [10] die Gesamtporosität  $p$  wie folgt berechnet:

$$p = (1 - (\rho_R/\rho_0)) * 100 \quad \text{mit: } \begin{array}{ll} p & \text{Gesamtporosität [Vol.-%]} \\ \rho_0 & \text{Dichte [g/cm}^3\text{]} \\ \rho_R & \text{Trockenrohdichte [g/cm}^3\text{]} \end{array}$$

Die Berechnungen wurden ausschließlich für die vier verschiedenen Kalksandsteinmaterialien durchgeführt. Die Baustoffgemische blieben aufgrund ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung hier unberücksichtigt. Für die Berechnung wurden die Trockendichtekennwerte der Kornklasse 8/16 mm verwendet. Mit Hilfe des massebezogenen Wasseraufnahmegrades nach Vakuum- bzw. Druckbeanspruchung wird der volumenbezogene Wasseraufnahmegrad berechnet. Dies ermöglicht eine Abschätzung des von außen zugänglichen, kommunizierenden Porenraums im wassergesättigten Kornaufwerk. Der volumenbezogene Wasseraufnahmegrad wird nach [7] folgenderweise bestimmt:

$$W_V = W_m * (\rho_R/\rho_W) * 100 \quad \text{mit: } \begin{array}{ll} W_V & \text{volumenbez. Wasseraufnahmegrad [Vol.-%]} \\ W_m & \text{massebez. Wasseraufnahmegrad [M.-%]} \\ \rho_R & \text{Trockenrohdichte [g/cm}^3\text{]} \\ \rho_W & \text{Dichte des Wassers [g/cm}^3\text{]} \end{array}$$

Die Ergebnisse der Porositätsberechnungen und der Bestimmung des volumenbezogenen Wasseraufnahmegrades sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Probe 8/16 mm	Gesamtporosität [Vol.-%]	Vol. Wasseraufnahmegrad nach Vakuum- beanspruchung [Vol.-%]
KS 1	29,6	30,6
KS 2	24,3	26,7
KS 3	22,6	26,8
KS 4	25,3	27,4

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Berechnungen der Porosität und des volumenbezogenen Wasseraufnahmegrades an der Kornklasse 8/16 mm

## 5.7 Frostwiderstand

An den Ausgangsmaterialien wurde nach DIN EN 1367-1 [11] die Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel (FTW) geprüft. Die Ausgangsmaterialien sind für die Verwendung in Tragschichten vorgesehen. Stichprobenartig wurde zudem an ausgewählten Proben die Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel in Gegenwart von Salz nach DIN EN 1367-6 [12] untersucht. Alle Proben wurden vorab zum Erreichen einer starken Durchfeuchtung 24 Stunden unter Wasser gelagert. Als Maß für die Frostbeständigkeit der untersuchten Probe gilt die Absplitterung als Siebdurchgang durch das nächst kleinere Analysensieb unterhalb der kleineren Prüfkorngröße. In Tabelle 7 sind alle Ergebnisse der Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen und die Anforderungen gemäß den TL Gestein-StB zusammengestellt. Eine Überschreitung dieser Anforderungen bis 5 M.-% ist zulässig, wenn der Kornanteil < 0,71 mm nach den FTW 1 M.-% nicht überschreitet.

Probe	Anforderungen nach den TL Gestein-StB [M.-%]	Absplitterungen nach 10 FTW [M.-%]					
		in H <sub>2</sub> O			mit 1%iger NaCl-Lösung		
		4/8	8/16	16/32	4/8	8/16	16/32
RCB 1	≤ 4	2,3	1,3	2,1	32,1	33,7	20,4
	≤ 1 <sup>*)</sup>	-	-	-	-	-	-
RCB 2	≤ 4	12,9	19,3	23,7	-	-	56,1
	≤ 1 <sup>*)</sup>	3,7	3,3	3,2	-	-	27,4
RCB 3	≤ 4	6,3	4,3	4,3	-	-	31,7
	≤ 1 <sup>*)</sup>	3,1	1,5	1,3	-	-	9,5
DIA	≤ 4	0,6	0,3	0,1	-	-	-
	≤ 1 <sup>*)</sup>	0,4	0,2	0,1	-	-	-
KS 1	≤ 4	45,2	80,5	88,2	83,8	98,8	98,9
	≤ 1 <sup>*)</sup>	19,3	18,9	16,0	38,0	46,6	36,4
KS 2	≤ 4	46,9	67,9	73,2	-	-	98,6
	≤ 1 <sup>*)</sup>	21,3	20,6	17,6	-	-	39,1
KS 3	≤ 4	61,7	63,0	76,5	-	-	81,0
	≤ 1 <sup>*)</sup>	31,8	26,1	11,0	-	-	45,4
KS 4	≤ 4	70,7	75,6	77,6	-	-	92,0
	≤ 1 <sup>*)</sup>	35,0	33,9	29,2	-	-	32,3

<sup>\*)</sup> Eine Überschreitung der nach den TL Gestein-StB geforderten 4 M.-% bis zu 5 M.-% ist zulässig, wenn der Kornanteil < 0,71 mm höchstens 1 M.-% beträgt.

**Tabelle 7:** Absplitterungen nach den FTW an Kornklassen

### 5.8 Widerstand gegen Zertrümmerung

Die Festigkeit der verschiedenen Ausgangsmaterialien wurde mittels Schlagzertrümmerungsversuch und Prüfung in der Los-Angeles-Trommel geprüft. Sowohl die Bestimmung des Schlagzertrümmerungswertes  $SZ_{8/12}$  als auch des Los-Angeles-Koeffizienten  $LA_{10/14}$  wurde gemäß DIN EN 1097-2 [13] durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Probe	Anforderungen TL Gestein-StB $SZ_{8/12} / LA_{10/14}$	$SZ_{8/12}$ [M.-%]	$LA_{10/14}$ [-]
RCB 1	$SZ_{32} / LA_{40}$	26,2	37
RCB 2		33,9	54
RCB 3		23,6	33
DIA	$SZ_{20} / LA_{25}$	13,0	11
KS 1	$SZ_{32} / LA_{40}$	40,3	57
KS 2		44,8	77
KS 3		50,7	85
KS 4		46,4	80

**Tabelle 8:** Schlagzertrümmerungswerte und Los-Angeles-Koeffizienten der verschiedenen Materialien

## FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND EV:

### 5.9 Physikalische und chemische Kennwerte der Kalksandsteine

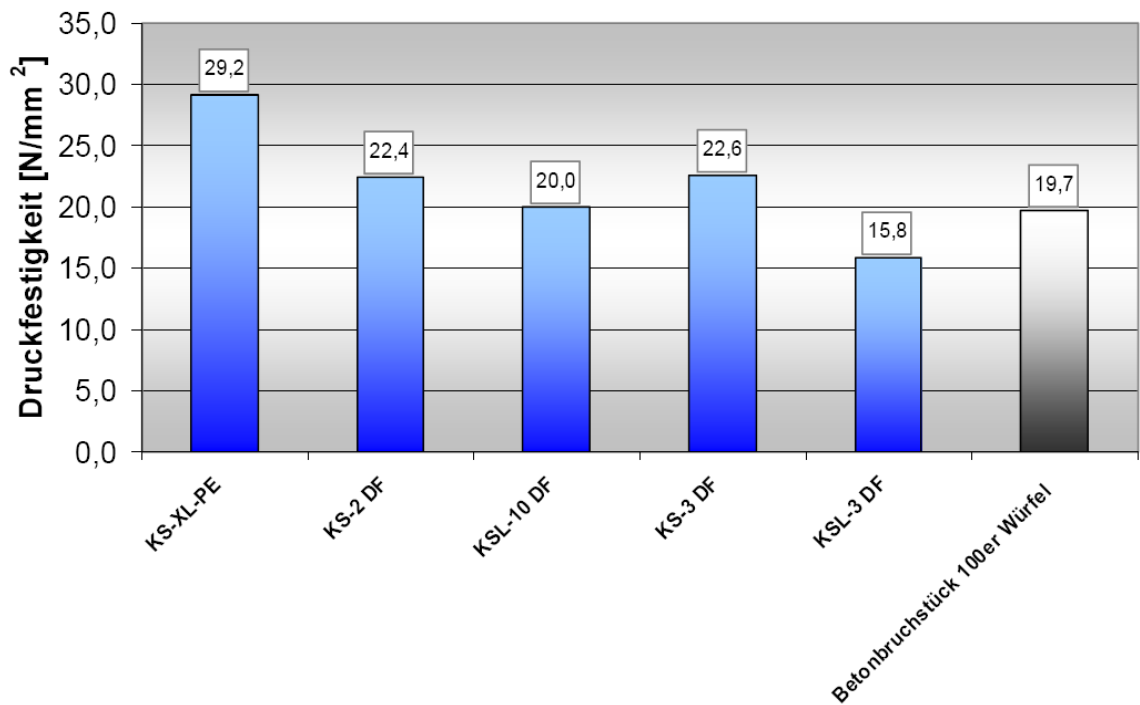
Die nachfolgende Tabelle 9 enthält die physikalischen und chemischen Kennwerte der ausgewählten Kalksandsteine.

Serie	Steinroh-dichte	Raum-dichte	Stein-druck-festig-keit	Wasser-auf-nahme	Frei-kalk-gehalt DTA	Frostwider-stand Schadenfreie Frost-Tau-Wechsel
	trocken kg/dm <sup>3</sup>	trocken kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	M.-%	M.-%	n
KS 1	1,73	1,74	29,2	16,5	0,00	50
KS 2a	1,76	1,76	22,4	13,1	0,00	50
KS 2b	1,31	1,75	20,0	12,5	0,25	50
KS 3	1,76	1,79	22,6	11,5	0,00	50
KS 4	1,46	1,80	15,8	12,6	0,00	25

**Tabelle 9:** Physikalische und chemische Kennwerte der Kalksandsteine

### 5.9.1 Steindruckfestigkeit

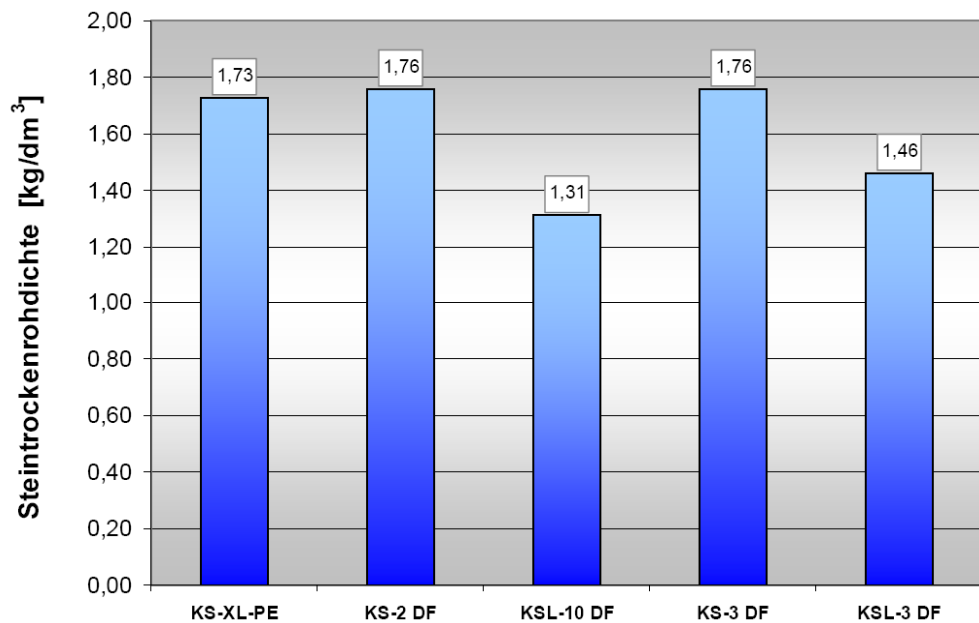
Die Steindruckfestigkeiten des Ausgangsmaterials (ganze Kalksandsteine) liegen zwischen  $\beta_D = 15,8$  und  $29,2 \text{ N/mm}^2$  und repräsentieren das übliche Festigkeitsspektrum von Kalksandsteinen. Siehe Bild 10.



**Bild 10:** Steindruckfestigkeiten der Kalksandsteinproben

### 5.9.2 Steinrohddichte

Die Steinrohddichten des Ausgangsmaterials (ganze Kalksandsteine) liegen zwischen  $\rho_{tr} = 1,31$  und  $1,76 \text{ kg/dm}^3$  und repräsentieren ebenfalls das übliche Rohdichtespektrum von Kalksandsteinen. Siehe Bild 11.

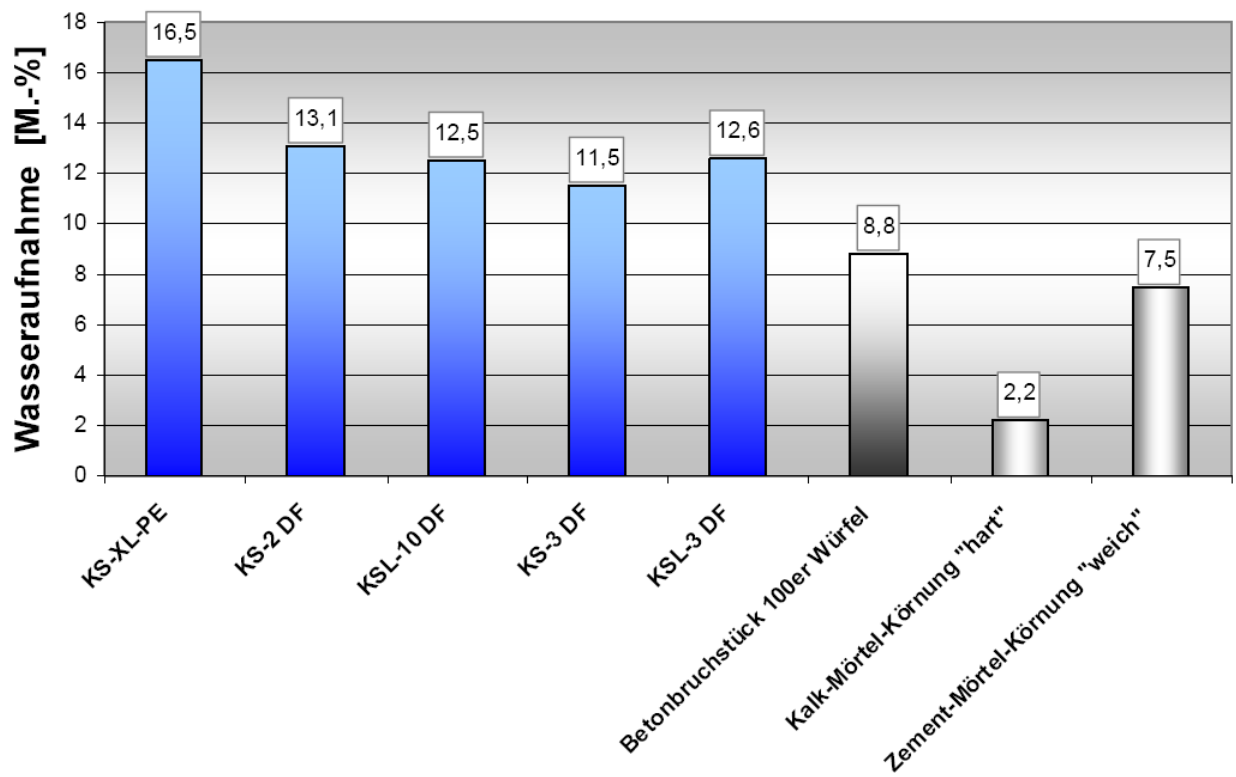


**Bild 11:** Steinrohddichten



### 5.9.3 Wasseraufnahme nach EN 772- 11

Die Wasseraufnahme des Ausgangsmaterials (ganze Kalksandsteine) liegen zwischen  $w = 11,5$  und  $16,5 \text{ kg/dm}^3$  und repräsentieren ebenfalls das übliche Rohdichtespektrum von Kalksandsteinen. Siehe Bild 12.



**Bild 12:** Wasseraufnahme der Kalksandsteinproben

### 5.9.4 Gehalt an $\text{Ca(OH)}_2$ mittels Differenzial-Thermoanalyse

Bei den Kalksandsteinen wurden keine nennenswerten Gehalte an Freikalkgehalt festgestellt. Lediglich in einem Fall lag ein sehr geringer Gehalt an  $\text{Ca(OH)}_2$  in Höhe von 0,25 M.-% vor. Dieser Befund belegt, dass die Kalksandsteine bzw. Rohlinge bei ihrer Herstellung einer ausreichenden Hydrothermalsynthese unterzogen wurden. Die nachfolgenden Thermogramme zeigen den Befund für die Serien KS 1 bis KS 4. Der bei Vorliegen von  $\text{Ca(OH)}_2$  für die Hydratentwässerung typische endotherme Peak ist nicht vorhanden. Siehe Bilder 13 bis 17.

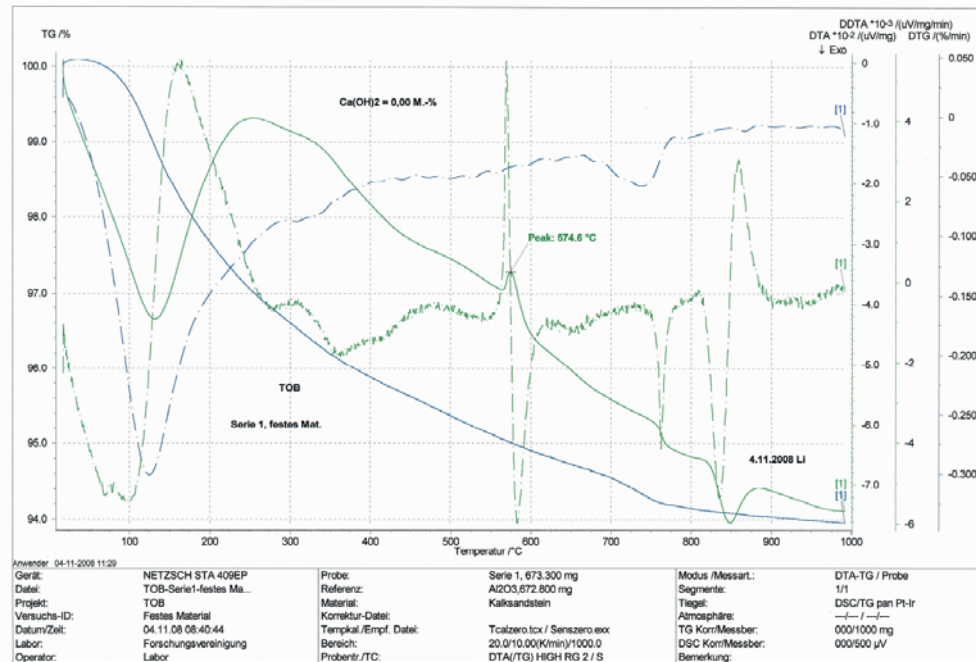


Bild 13: Thermogramm des Kalksandsteinmaterial der Serie 1 KS-XL-PE

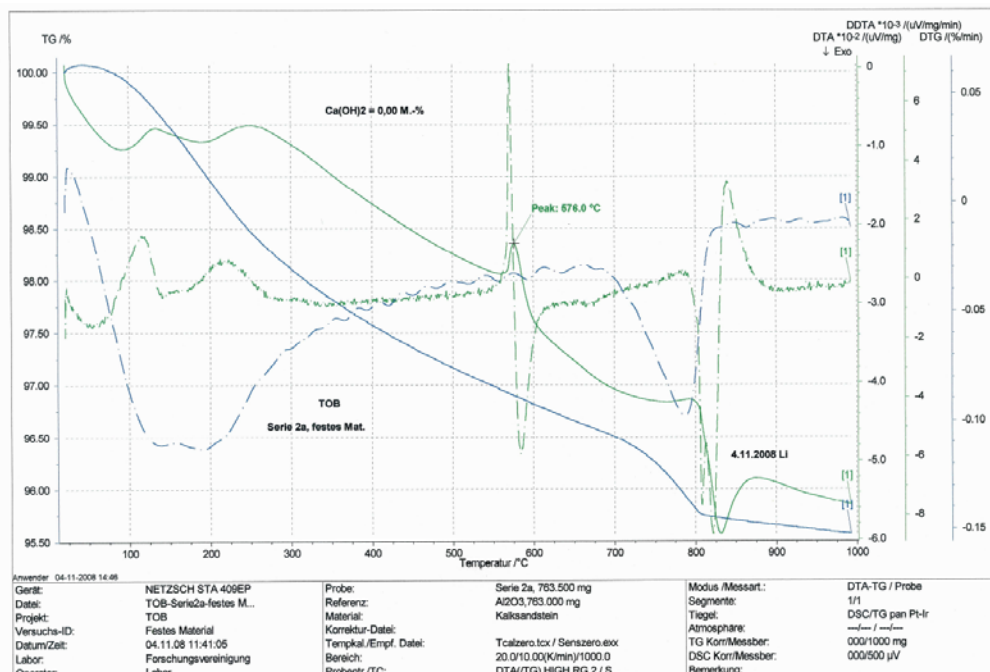
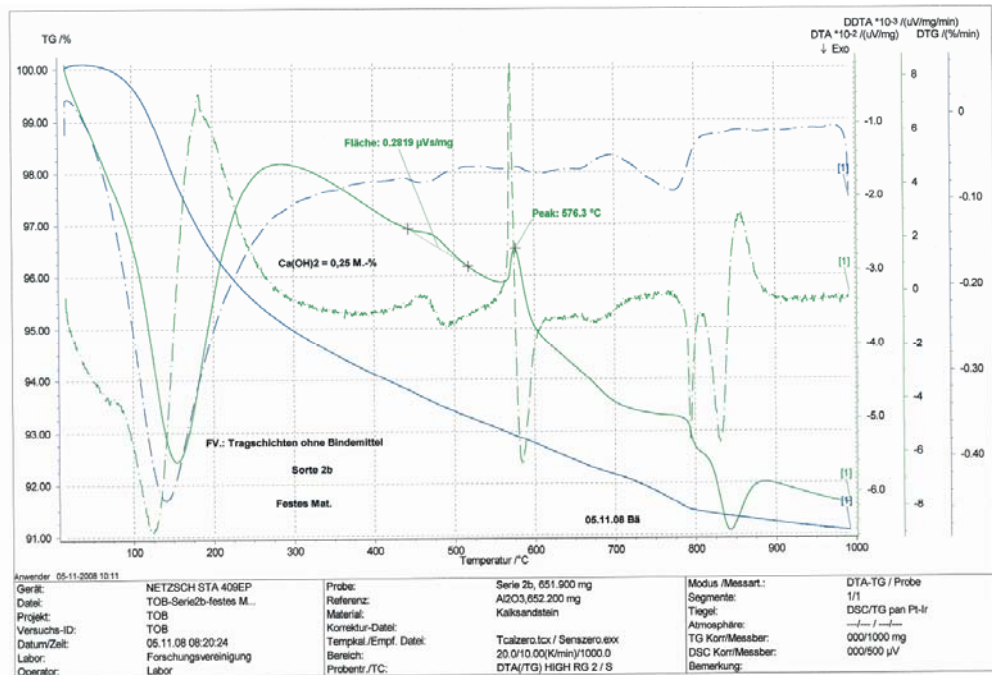
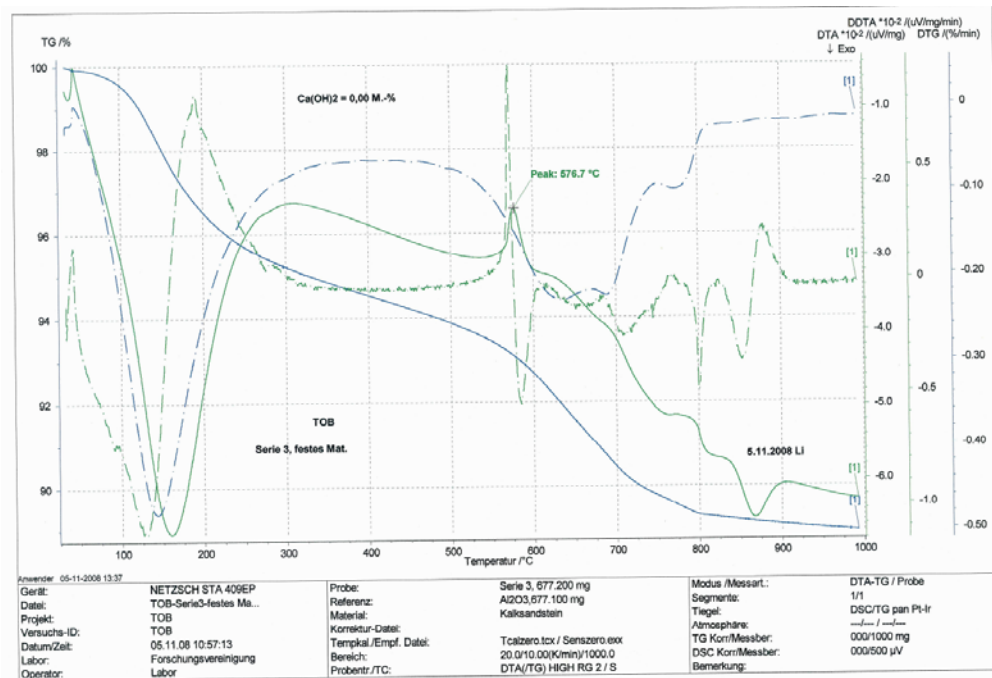


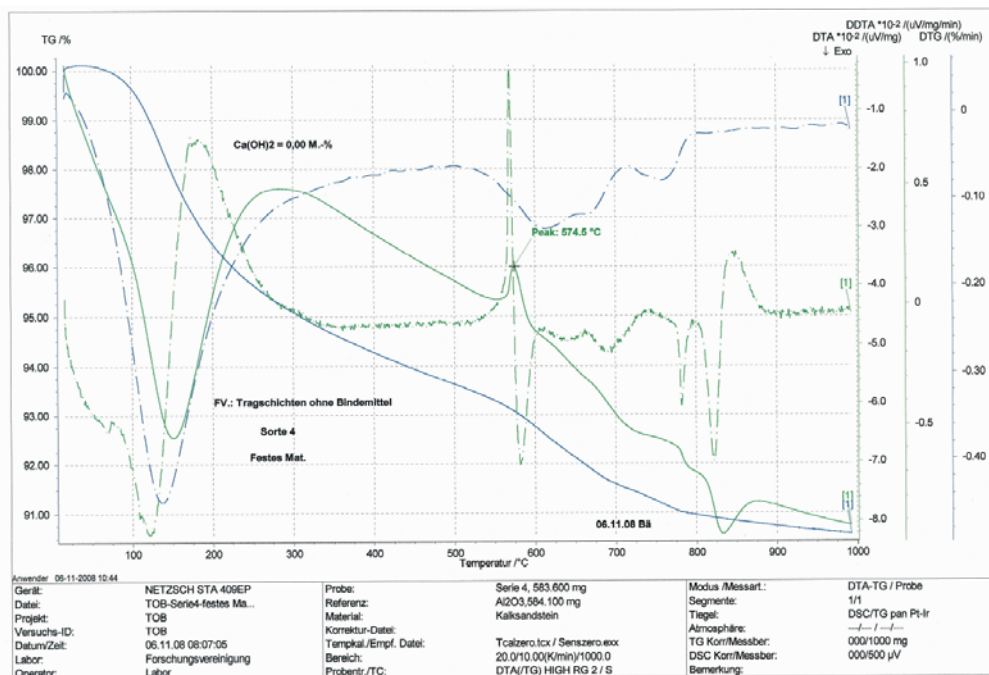
Bild 14: Thermogramm des Kalksandsteinmaterial der Serie 2a KS-2DF



**Bild 15:** Thermogramm des Kalksandsteinmaterial der Serie 2b KSL-10DF



**Bild 16:** Thermogramm des Kalksandsteinmaterial der Serie 2a KS-2DF



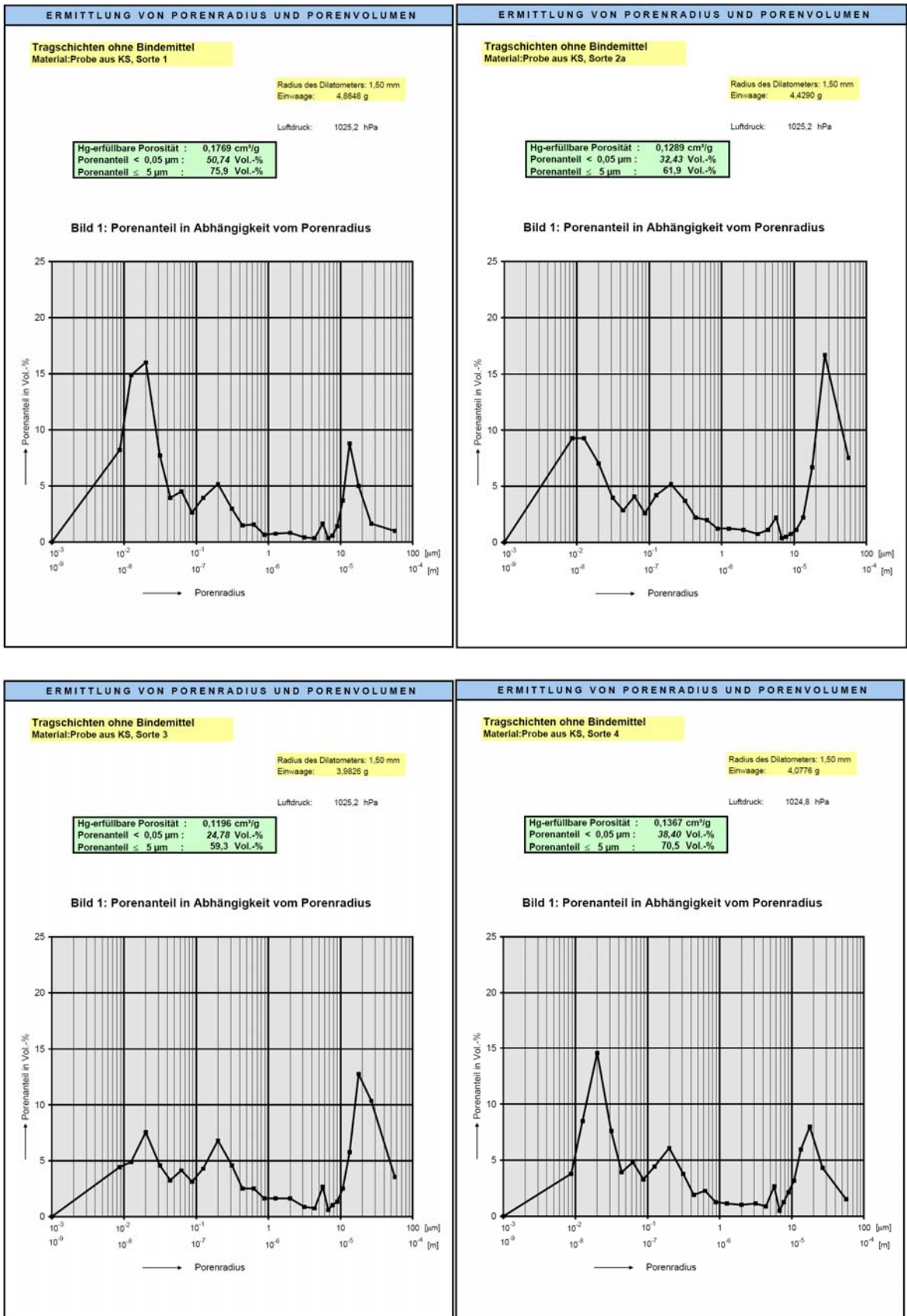
**Bild 17:** Thermogramm des Kalksandsteinmaterial der Serie 2b KSL-10DF

### 5.9.5 Frostwiderstandsfähigkeit der Kalksandsteine nach EN 772-18

Die Untersuchung der Frostwiderstandsfähigkeit der Kalksandsteine nach DIN EN 772-18 (50 Frost-Tau-Wechsel im wassersatten Zustand) hat zu dem Ergebnis geführt, dass alle untersuchten Kalksandsteine eine Frostwiderstandsfähigkeit aufweisen, die mindestens der Qualität Vormauerstein (Anzahl der schadenfrei überstandenen Frost-Tau-Wechsel  $\geq 25$ ) entspricht. Dies trifft für die Serie 4 (KSL-3 DF) zu. Alle anderen Serien weisen eine noch höhere Frostwiderstandsfähigkeit auf. In diesen Fällen wurden jeweils 50 Frost-Tau-Wechsel schadenfrei überstanden, so dass eine Verblenderqualität vorliegt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die in diese Untersuchungen einbezogenen Kalksandsteine nicht für Außenmearwerk vorgesehen sind, aber dennoch eine hohe Frostwiderstandsfähigkeit aufweisen.

### 5.9.6 Porenradienverteilung der Kalksandsteine mittels Quecksilberdruckporosimetrie

Bild 18 zeigt exemplarisch die Porenradienverteilungen der Kalksandsteinproben aus den Serien 1 bis 4. Die für Kalksandsteine typischen Maxima um  $d = 10^{-8}$  m und  $10^{-5}$  m sind gut erkennbar.



**Bild 18:** Porenradienverteilungen der Kalksandsteine (Serien 1 bis 4)

**5.10 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen**

**5.10.1 Ausgangsmaterialien**

**Kalksandsteine Sorte KS 1:**

Die Bilder D1 bis D18 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

PolMi- und REM/EDX-Untersuchung am Dünnschliff:

**Stückprobe**

- keine längeren Risse
- sehr vereinzelt Risse in Quarzkörnern
- sehr vereinzelt kurze Risse in der Matrix
- sehr vereinzelt Saumporen

**Körnung 8-32 mm**

- einzelne, lange Risse in den Körnern (vermutlich Folge des Brechens)
- Risse in Quarzkörnern wie Stückprobe
- Saumporen wie Stückprobe
- Körner nicht gleichmäßig von Rissen durchzogen
- nicht alle Körner betroffen

**Kalksandsteine Sorte KS 2:**

Die Bilder D19 bis D27 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

PolMi- und REM/EDX-Untersuchung am Dünnschliff:

**Stückprobe**

keine Stückprobe zum Vergleich

**Körnung 8-32 mm**

- einzelne, lange Risse in den Körnern (vermutlich Folge des Brechens)
- mehr Saumporen als Sorte 1

⇒ **praktisch identisch Sorte 1**

### **Kalksandsteine Sorte KS 3:**

Die Bilder D28 bis D33 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### **PolMi-Untersuchung am Dünnschliff:**

##### **Stückprobe**

- keine längeren Risse
- sehr vereinzelt Risse in Quarzkörnern
- sehr vereinzelt kurze Risse in der Matrix
- sehr vereinzelt Saumporen

##### **Körnung 8-32 mm**

- einzelne, lange Risse in den Körnern (vermutlich Folge des Brechens)
- Risse in Quarzkörnern wie Stückprobe
- Saumporen wie Stückprobe
- Körner nicht gleichmäßig von Rissen durchzogen
- nicht alle Körner betroffen

⇒ **praktisch identisch Sorten 1 und 2**

### **Kalksandsteine Sorte KS 4:**

Die Bilder D34 bis D45 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### **PolMi- und REM/EDX-Untersuchung am Dünnschliff:**

##### **Stückprobe**

- keine längeren Risse
- zahlreiche Saumporen (herstellungsbedingt)
- zahlreiche Risse in Quarzen (herstellungsbedingt)

##### **Körnung 8-32 mm**

- sehr ähnlich der Stückprobe
- Risse im Randbereich der Körner (vermutlich Folge des Brechens)

⇒ **praktisch identisch Sorten 1 bis 3**

### **Beton - RCB 1:**

Die Bilder D46 bis D66 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### **PolMi-Untersuchung am Dünnschliff:**

##### **Stückprobe**

- sehr inhomogenes Gefüge (stellenweise sehr porös)
- Kalksinterkruste am Rand
- Diese Probe hat sich als nicht repräsentativ herausgestellt und wurde verworfen.

##### **Sorte 5 / 8-32:**

- Diese Probe hat sich als nicht repräsentativ für einen RC-Beton herausgestellt und wurde deshalb verworfen.
- stellenweise Risse (v.a. am Probenrand)

### **Beton - RCB 2:**

Die Bilder D67 bis D75 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### **PolMi- und REM/EDX-Untersuchung am Dünnschliff:**

- überwiegend dichter Beton
- kein Flugaschebeton
- porösere Gefügebereiche am Rand sind carbonatisiert
- Gesteinskörnung: Quarz, Feldspäte, silikatische Gesteinsbruchstücke, Flint
- sehr gute Packungsdichte der Zuschläge (gute Kornabstufung)
- stellenweise Portlandit
- zahlreiche feine Risse im Zementstein (möglicherweise beim Brechen entstanden)
- keine Treibmineralbildung

### **Beton - RCB 1:**

Die Bilder D76 bis D78 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### **PolMi- und REM/EDX-Untersuchung am Dünnschliff:**

- dichter Beton
- Flugaschebeton
- höherer Anteil an Zementstein als RCB 2
- Kalkstein als Bestandteil der Gesteinskörnung
- ein breiterer Riss am Rand des Kornes (um die Zuschläge herum laufend)
- zahlreiche feine Risse im Zementstein (möglicherweise beim Brechen entstanden)
- keine Treibmineralbildung



## **Mörtel und Putz**

### **Probe 6h- harter Mörtel:**

Die Bilder D84 bis D86 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### **PolMi-Untersuchung am Dünnschliff:**

- Kalk-Zement-Mörtel mit hohem Zementgehalt
- Zuschlag: Glazialer Sand (Modalbestand: v.a. Quarz, Feldspäte, Kalkstein, silikatische und carbonatische Gesteinsbruchstücke)
- Größtkorn 2 mm
- Zuschläge überwiegend gut gerundet, gute Kornabstufung
- hoch porös
- homogenes, rissfreies Gefüge

### **Probe 6h- weicher Mörtel:**

Die Bilder D87 bis D87 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### **PolMi-Untersuchung am Dünnschliff:**

- Kalk-Zement-Mörtel mit gegenüber der Probe 6h niedrigem Zementgehalt
- Zuschlag: Glazialer Sand (Modalbestand: v.a. Quarz, Feldspäte, silikatische Gesteinsbruchstücke)
- Größtkorn 1 mm
- Zuschläge überwiegend gut gerundet, gute Kornabstufung
- hoch porös
- homogenes, rissfreies Gefüge
- Kalkkomponente des Bindemittels stark rekristallisiert (sekundär durch Feuchteeinwirkung verändert)

### **Probe Putz B:**

Die Bilder D90 bis D101 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### **PolMi- und REM/EDX-Untersuchung am Dünnschliff:**

- Gipsputz mit Leichtzuschlägen
- Zuschläge: Quarz, Feldspäte, Perlite, Glimmer
- Bindemittel: überwiegend Gips, untergeordnet Kalk (v.a. in der Nähe der Perlite)
- homogenes, gleichmäßiges Gefüge
- sehr hohe Porosität
- keine Gefügeschäden

## 5.10.2 Materialien aus den CBR-Versuchen

### **Probe CBR-O: Baustoffgemisch (65% RC-Material; 30% KS, 5% Putz (Material A) Ausgangszustand (Proctor-Verdichtungsenergie + CBR-Stempelkraft)**

Die Bilder D102 bis D119 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### PolMi- und REM/EDX-Untersuchung am Dünnschliff:

- 3 augenscheinlich unterscheidbare Körner als DS präpariert
  1. **Kalksandstein**
    - keine Auffälligkeiten
    - nahezu rissfrei
  2. **Beton 1** (dichter Flugasche-Beton, mit Holzkohle schwarz pigmentiert)
    - zahlreiche Risse im Zementstein (möglicherweise beim Brechen entstanden)
  3. **Beton 2** (porös, sekundär verändert (carbonatisiert))
    - zahlreiche Risse im Zementstein (möglicherweise beim Brechen entstanden)

### **Probe CBR-FH Baustoffgemisch (65% RC-Material; 30% KS, 5% Putz (Material A) Frosteinwirkung + CBR-Stempelkraft**

Die Bilder D120 bis D137 im Anhang zeigen die Ergebnisse der mikroskopischen Analyse.

#### PolMi- und REM/EDX-Untersuchung am Dünnschliff:

- 4 augenscheinlich unterscheidbare Körner als DS präpariert
  1. **Silikatisches Gesteinsbruchstück** (dicht)
    - keine Risse
  2. **Beton** (dicht, Risse im Korn)
    - entspricht dem Flugasche-Beton von CBR-O
    - gleicher Zustand wie an CBR-O (zahlreiche Risse im Zementstein)
  3. **Kalksandstein**
    - entspricht dem Kalksandstein von CBR-O
    - gleicher Zustand wie an CBR-O (rissfrei)
  4. **Gipsputz**
    - rissfreier, hoch poröser Gipsputz

⇒ die untersuchten Körner zeigen gegenüber CBR-O keine Zunahme der Risse

## 6. Ergebnisse der Untersuchungsstufe B

### Ruhr-Universität Bochum

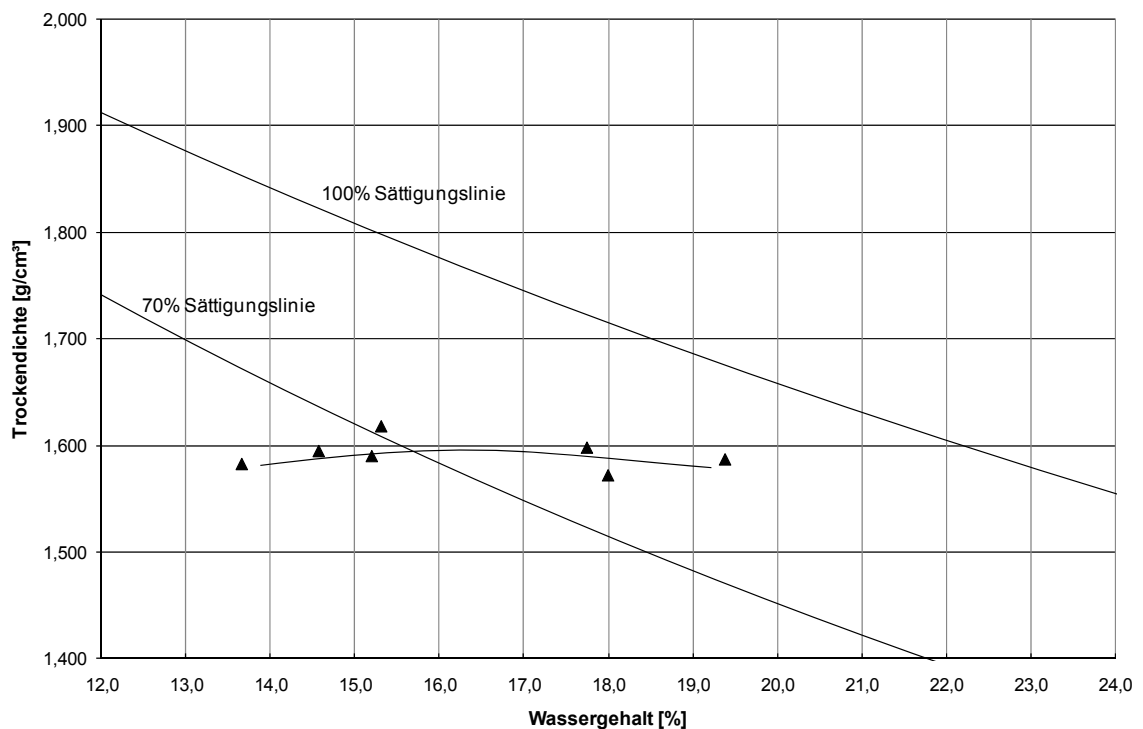
#### 6.1 Herstellung der Korngemische 0/32 mm

Für die Untersuchungen an den Korngemischen 0/32 mm wurde eine vergleichbare Kornzusammensetzung angestrebt. Daher wurden die beiden Lieferkörnungen aller aufbereiteten recycelten Kalksandstein-Materialien (KS 1 bis KS 4) und der des RC-Baustoffes RCB 2 mit stets gleichen Massenanteilen zusammengesetzt. Von den RC-Baustoffen RCB 1 und RCB 3 wurde das anstehende Korngemisch verwendet. Das Korngemisch aus Diabas wurde entsprechend einer mittleren Sieblinie für Schottertragschichten gemäß TL SoB-StB aus den Lieferkörnungen zusammengesetzt.

#### 6.2 Proctorversuche

Die Bestimmung der optimalen Lagerungsdichte erfolgte mit Hilfe des Proctorversuches nach DIN EN 13286-2 [14] an Korngemischen 0/32 mm mit einfacher Verdichtungsarbeit. Die verschiedenen Baustoffe weisen ein sehr unterschiedliches Wasseraugvermögen auf. Daher wurden vor Beginn jeder Versuchsreihe die einzelnen mit entsprechend Wasser angefeuchteten Proben mindestens eine Stunde abgedeckt gelagert und während dessen mehrfach homogenisiert.

Die Trockendichten der einzelnen Versuche wurden in Abhängigkeit des jeweiligen Wassergehaltes aufgetragen. Beispielhaft zeigt Bild 19 die Proctorkurve für das Kalksandsteinmaterial KS 2. Die Proctorkurven der anderen Materialien sind im Anhang dargestellt. In Tabelle 10 sind die optimalen Wassergehalte und die Proctordichten der einzelnen Materialien zusammengestellt.



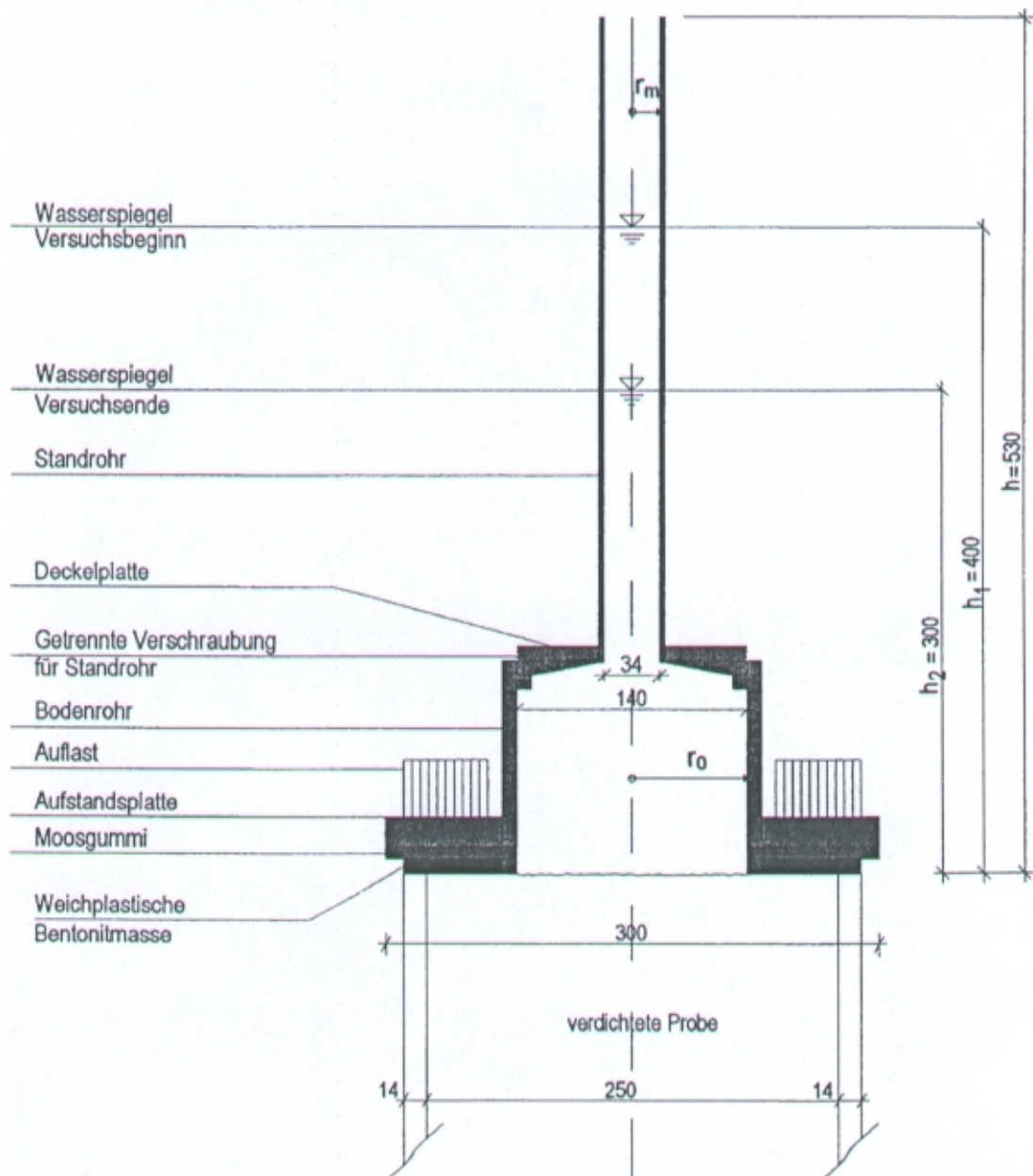
**Bild 19:** Proctorkurve für das Kalksandsteingemisch KS 2

Probe	Proctordichte $\rho_{Pr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Wassergehalt $w_{Pr}$ [%]
RCB 1	1,843	12,2
RCB 2	1,704	13,7
RCB 3	2,032	9,6
DIA	2,234	7,5
KS 1	1,525	19,6
KS 2	1,600	16,3
KS 3	1,655	15,8
KS 4	1,626	15,6

**Tabelle 10:** Ergebnisse der Proctorversuche an Korngemischen 0/32 mm

### 6.3 Wasserdurchlässigkeit

Die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit (mit fallender Druckhöhe) von Baustoffgemischen erfolgte mittels eines Ausflussmessgerätes in Anlehnung an RVS 11.06.27 [15]. Dieses Prüfverfahren hat sich im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens [16] als geeignet für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit grobkörniger Baustoffgemische erwiesen. Das Baustoffgemisch 0/32 mm wurde in eine Prüfform ( $\varnothing = 250$  mm,  $h = 200$  mm) mit Hilfe einfacher Proctorverdichtung und einem Wassergehalt zwischen 80 % und 100 %  $w_{opt}$  eingebracht. Der Prüfszylinder des Ausflussmessgerätes besteht aus einem Kunststoffrohr und einer Bodenplatte. Unter dieser Bodenplatte ist eine Moosgummiabdichtung angebracht, die wiederum vor Versuchsbeginn mit Hilfe einer plastischen Dichtungsmasse verstärkt wird. Bild 20 zeigt die Versuchsanordnung.



**Bild 20:** Ausflussmessgerät nach RVS 11.06.27 [15]

Das Ausflussmessgerät wird auf die Prüffläche aufgesetzt, beschwert und mit Wasser gefüllt. Das Maß für die Durchlässigkeit des Baustoffgemisches ist die Zeit, in der der Wasserspiegel von 40 cm auf 30 cm hydraulische Druckhöhe über der Probenoberkante absinkt. Mit diesem Messintervall und den Abmessungen des Gerätes wird der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_{10}$ -Wert wie folgt berechnet:

$$k_{10} = \alpha * ((1,35 * 10^{-3}) / \Delta t) \quad \text{mit: } \begin{array}{ll} k_{10} & \text{Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]} \\ \alpha & \text{Temperaturkorrektur [-]} \\ \Delta t & \text{Zeitintervall } t_2 - t_1 \text{ [s]} \end{array}$$

Ist das Messintervall länger als 45 Minuten, beträgt der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_{10} < 5 * 10^{-7}$  m/s.

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsprüfungen an den einzelnen Korngemischen zusammengefasst. Anforderungen an einen Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von Baustoffgemischen bestehen in Deutschland nicht.

Probe	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert $k_{10}$ [m/s]
RCB 1	$2,8 \times 10^{-6}$
RCB 2	$2,4 \times 10^{-5}$
RCB 3	$2,0 \times 10^{-6}$
DIA	$6,7 \times 10^{-6}$
KS 1	$1,3 \times 10^{-6}$
KS 2	$9,7 \times 10^{-6}$
KS 3	$7,1 \times 10^{-6}$
KS 4	$3,9 \times 10^{-6}$

**Tabelle 11:** Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k_{10}$  der Korngemische 0/32 mm

#### 6.4 Frosthebungs- und CBR-Versuche

Die Frostempfindlichkeit von Baustoffen für den Einsatz im Straßenbau wird bis heute mit Hilfe von Ergebnissen aus der Prüfung zum Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel an wassergesättigten Materialien bewertet. Seit geraumer Zeit laufen sowohl international als auch national Bestrebungen, das Verhalten von Baustoffgemischen bei Frostbeanspruchung durch den wesentlich praxisbezogeneren Frosthebungsversuch abzuschätzen [17, 18, 19]. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden diese Prüfungen entsprechend der „Arbeitsanweisung der Bundesanstalt für Straßenwesen zum Frosthebungsversuch im Rahmen des Ringversuchs“ [20] durchgeführt.

Beim Frosthebungsversuch (FHV) wird ein Prüfkörper aus einem Baustoffgemisch ausschließlich von der Oberseite befroren, während die Prüfkörperunterseite im Wasserbad bei konstanter Temperatur von  $+ 1,5 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$  gelagert wird und dabei ungefroren bleibt. Vor Beginn der Befrostung wird der in die Teflonzylinder eingebaute Prüfkörper (Bild 21) 24 h in einer der beiden Prüfkammern bei konstanter Umlufttemperatur von  $+ 1,5 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$  des Tischgerätes (Bild 22) temperiert. Eine schematische Darstellung des Tischgerätes befindet sich im Anhang. Anschließend wird die Temperatur an der Oberseite so abgesenkt, dass in Prüfkörpermitte die Temperatur innerhalb von 4 Tagen annähernd linear mit einer Geschwindigkeit von rd.  $0,38 \text{ K/d}$  auf  $0 \text{ °C}$  fällt. Die  $0 \text{ °C}$ -Isotherme wird für 3 Tage konstant gehalten. Abschließend erfolgt über einen Zeitraum von 24 h der Auftauprozess. Es wird eine Doppelbestimmung durchgeführt.

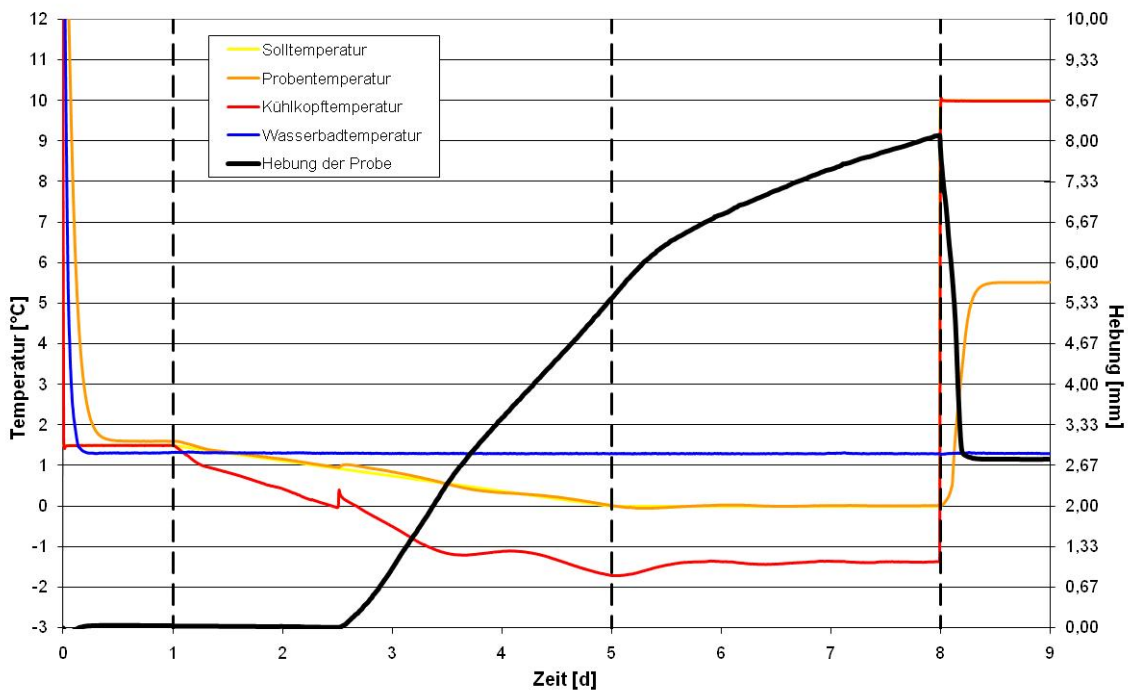


**Bild 21:** Prüfzylinder aus Teflon mit Edelstahlgrundplatte und Temperaturfühler [21]



**Bild 22:** Frosthebungsprüfgerät als Tischgerät an der RUB

Im Abstand von 5 Minuten werden während des Versuchs die verschiedenen Temperaturen messtechnisch erfasst und aufgezeichnet. Bild 23 zeigt beispielhaft das Frosthebungsdiagramm einschließlich der Temperaturganglinien der Materialsorte KS 2. Die Frosthebungsdiagramme der anderen Materialsorten sind in Anhang zusammengestellt.



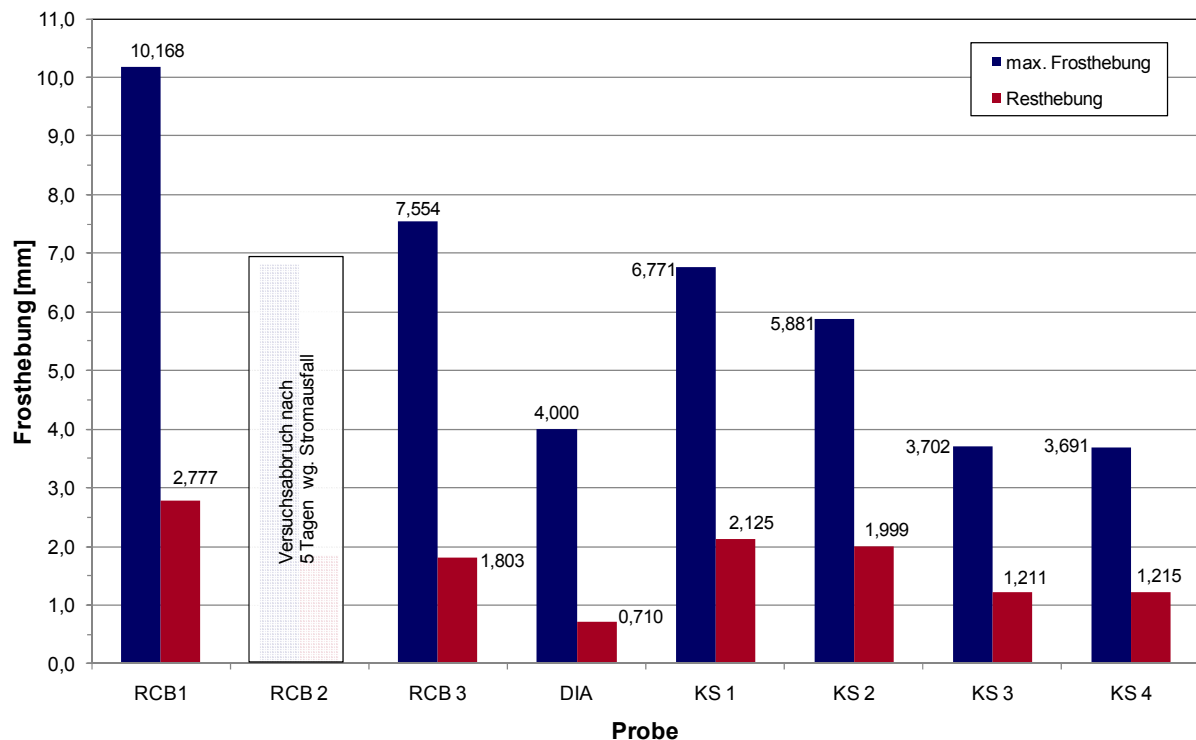
**Bild 23:** Frosthebungsdiagramm KS 2 (Probe 1)

Aus den Messgrößen werden die folgenden Kennwerte bestimmt:

- Maximale Frosthebung  $\Delta s_{FH,max} = s_{FH,E} - s_{FH,0}$
- Verbleibende Resthebung  $\Delta s_{FH,R} = s_{FH,A} - s_{FH,0}$
- Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit  $v_{FH} = (s_{FH,E} - s_{FH,7}) / 1$

mit:  $\Delta s_{FH,max}$  maximale Frosthebung [mm]  
 $s_{FH,E}$  Hebung am Ende der Befrostung [mm]  
 $s_{FH,0}$  Hebung vor Befrostung [mm]  
 $\Delta s_{FH,R}$  Verbleibende Resthebung [mm]  
 $s_{FH,A}$  Hebung nach dem Auftauen [mm]  
 $v_{FH}$  maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit [mm/d]  
 $s_{FH,7}$  Hebung vor dem letzten Befrostungstag [mm]

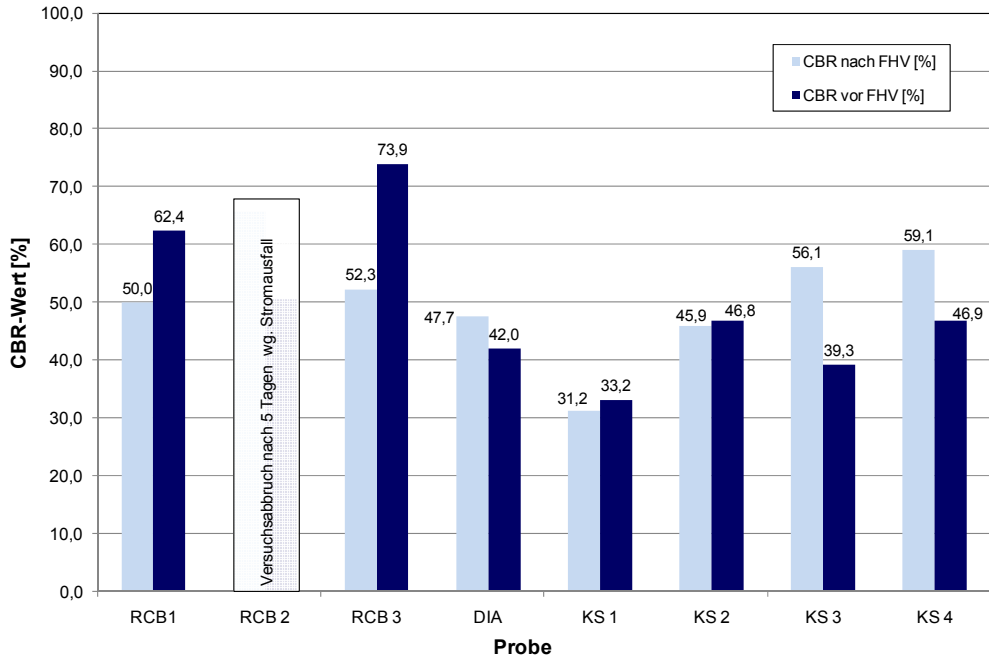
Bild 24 zeigt dazu die maximale Frosthebungen und die verbleibenden Resthebungen. Die Frosthebungsgeschwindigkeiten sind in Anhang zusammengestellt.



**Bild 24:** Maximale und verbleibende Frosthebungen der Ausgangsmaterialien

Zur Ermittlung des Tragfähigkeitsverlustes durch die Frosteinwirkung wird vor und unmittelbar nach Abschluss des FHV der CBR-Wert bestimmt (Bild 25). Die CBR-Prüfungen werden nach den Technischen Prüfvorschriften für Boden und Fels (TP BF-StB) durchgeführt [22].

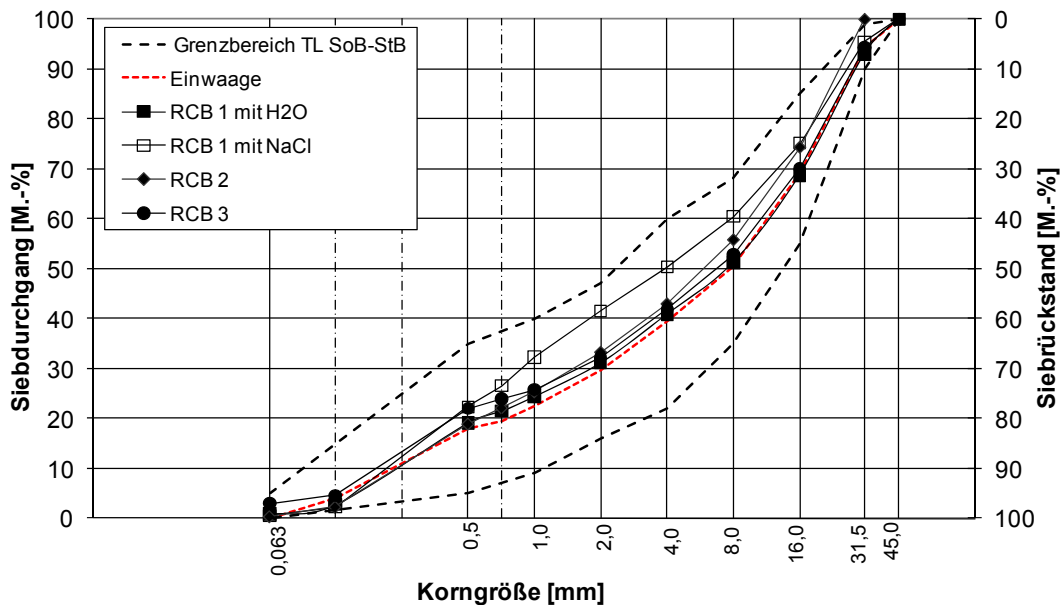




**Bild 25:** CBR-Werte vor und nach FHV der Ausgangsmaterialien

## 6.5 Frostwiderstand

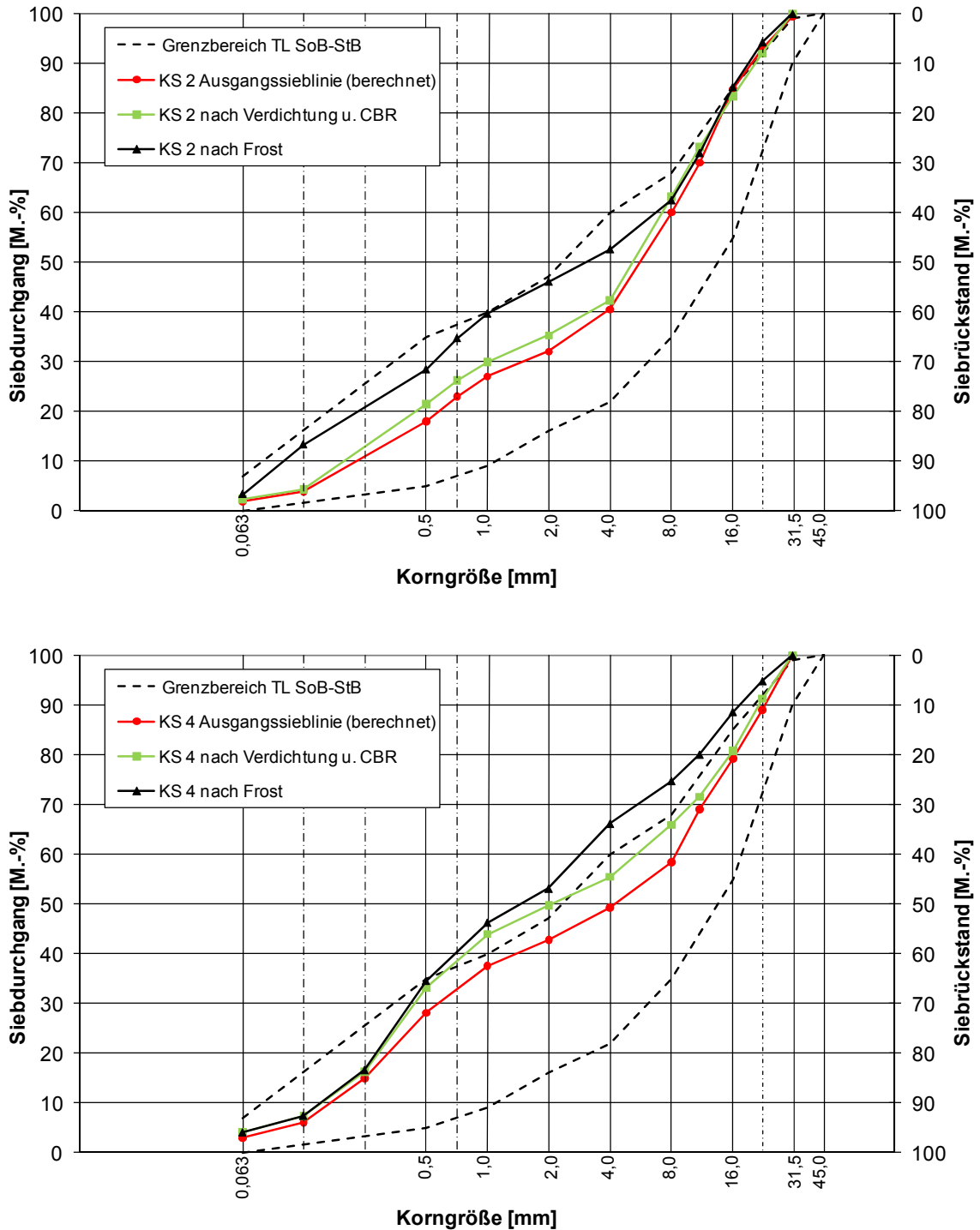
Neben den zuvor beschriebenen Frosthebungsversuchen wurden mit den drei RC-Baustoffgemischen auch die standardisierten FTW nach den TP Gestein-StB [23] durchgeführt. Entsprechend ihres vorgesehenen Anwendungsgebietes in der Schottertragschicht wurde eine definierte Sieblinie ohne Feinanteile für die Untersuchung definiert zusammengesetzt. Darüber hinaus wurde der RC-Baustoff RCB 1 einer Frost-Tausalz-Beanspruchung unterzogen. Die Korngrößenverteilungen vor und nach den FTW sind in Bild 26 dargestellt.



**Bild 26:** Korngrößenverteilung vor und nach den Frostprüfungen an den RC-Baustoffen RCB 1, RCB 2 und RCB 3

## 6.6 Kornverfeinerung

Zur Ermittlung der Kornverfeinerung der Kalksandsteingemische infolge Frost- und Verdichtungsbeanspruchung wurden Siebungen an den Materialien KS 1 bis KS 4 vor und nach Abschluss aller Einwirkungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungen der Materialien KS 2 und KS 4 zeigt Bild 27. Bei den Materialien KS 1 und KS 3 fand nur geringfügige Verfeinerungen statt.



**Bild 27:** Kornverfeinerung der Materialien KS 2 (oben) und KS 4 (unten) nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost

## 6.7 Wasserwirtschaftliche Merkmale

Für die Bestimmung der wasserwirtschaftlichen Merkmale im Eluat wurde sowohl das Trogverfahren gemäß TP Gestein-StB [24] als auch das Säulenverfahren [25] angewendet. Die Feststoffuntersuchungen erfolgten nach DIN ISO 11465 [26]. An den Materialien KS 1, KS 2, KS 3 und KS 4 wurden die Parameter der LAGA Bauschutt [27] und dem Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung [28] analysiert. Die Anforderungen der TL Gestein-StB entsprechen der Einbauklasse Z 1.1 der LAGA Bauschutt. In Tabelle 12 sind die Ergebnisse des DEV-S4-Eluates und in Tabelle 13 die des Säuleneluates zusammengestellt. Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der Feststoffanalysen.

Kenngrößen		Anforderungen nach den TL Gestein-StB (RC-1)	Baustoffe				
			RCB 3	KS 1	KS 2	KS 3	KS 4
pH-Wert	µS/cm	7,5-12,5	11,3	9,7	9,8	9,5	9,7
Elektr. Leitfähigkeit	mg/L	1500	700	155	160	135	170
Chlorid	mg/L	20	2,84	1,80	2,15	1,68	3,44
Sulfat	mg/L	150	36,5	14,0	2,81	16,6	27,5
Phenolindex	µg/L	10	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Arsen	µg/L	10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Blei	µg/L	40	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cadmium	µg/L	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Chrom (ges.)	µg/L	30	11,4	< 10	< 10	< 10	< 10
Kupfer	µg/L	50	22,9	< 10	< 10	< 10	< 10
Nickel	µg/L	50	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Quecksilber	µg/L	0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zink	µg/L	100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100

**Tabelle 12:** Ergebnisse der Bestimmung der wasserwirtschaftlichen Merkmale mit dem DEV-S4-Verfahren

Kenngrößen		Anforderungen nach den TL Gestein-StB (RC-1)	Baustoffe				
			RCB 3	KS 1	KS 2	KS 3	KS 4
pH-Wert	µS/cm	7,5-12,5	11,5	10,0	10,0	9,4	9,5
Elektr. Leitfähigkeit	mg/L	1500	1140	370	380	420	530
Chlorid	mg/L	20	14,6	8,46	6,14	19,8	16,4
Sulfat	mg/L	150	138	86,1	20,6	126	103
Phenolindex	µg/L	10	< 5	< 5	< 5	< 5	6
Arsen	µg/L	10	< 10	< 10	< 10	11,3	< 10
Blei	µg/L	40	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cadmium	µg/L	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Chrom (ges.)	µg/L	30	62,4	17,3	< 10	38,2	28,6
Kupfer	µg/L	50	274	< 10	< 10	< 10	< 10
Nickel	µg/L	50	18,3	< 10	< 10	< 10	< 10
Quecksilber	µg/L	0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zink	µg/L	100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100

**Tabelle 13:** Ergebnisse der Bestimmung der wasserwirtschaftlichen Merkmale mit dem Säulenverfahren

Kenngrößen		Anforderungen nach den TL Gestein-StB (RC-1)	Baustoffe				
			RCB 3	KS 1	KS 2	KS 3	KS 4
EOX	mg/kg	3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Kohlenwasserstoffe	mg/kg	300	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
PAK (EPA)	mg/kg	5	3,93	0,37	< 0,33	< 0,33	0,51
PCB	mg/kg	0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02

**Tabelle 14:** Ergebnisse der Bestimmung der wasserwirtschaftlichen Merkmale mit Feststoffuntersuchungen

## 7. Eigenschaften der Ausgangsmaterialien

### 7.1 Zusammenfassende Bewertung

Die vier sortenreinen Kalksandsteinmaterialien, der Kalk- und der Zementmörtel sowie die drei RC-Baustoffe wurden sowohl separiert in Kornklassen als auch in zusammen gesetzten Kornmischungen untersucht. Aufgrund der geringen Probemenge konnten mit den beiden Mörteln nur orientierende Untersuchungen durchgeführt werden, die in Anlage A zusammengefasst sind.

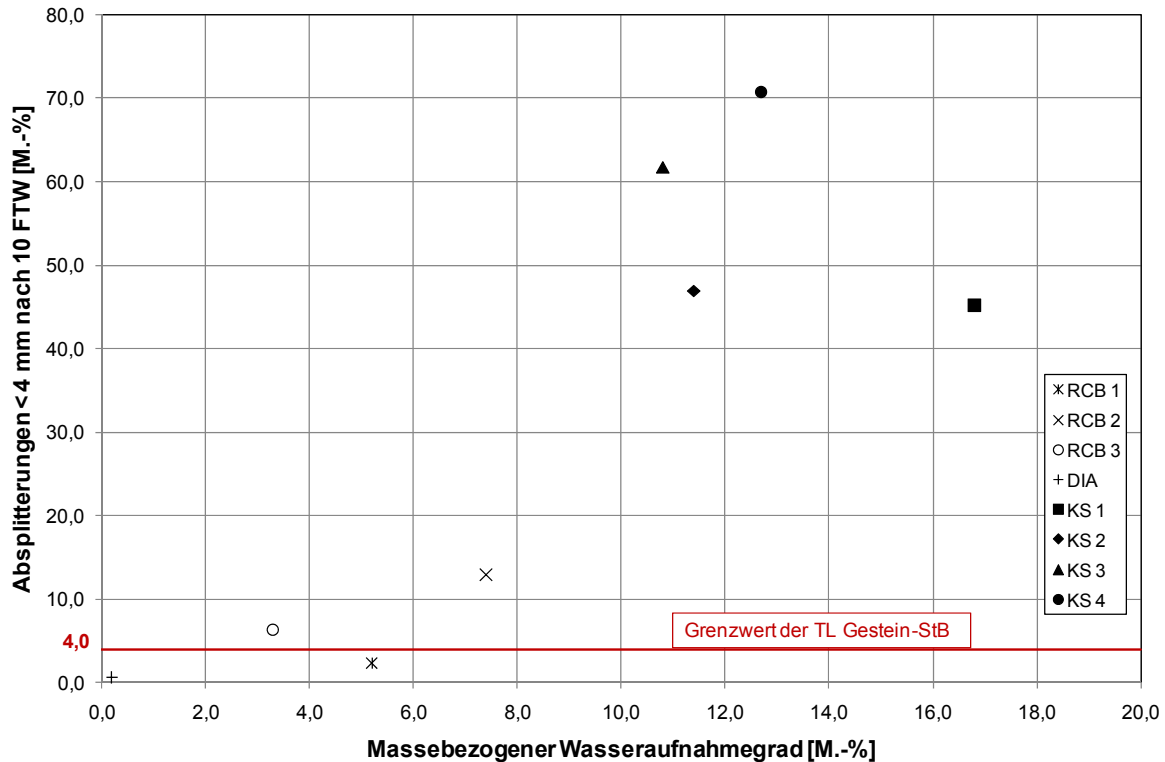
Mit der großtechnischen Aufbereitung erreichten alle Materialien eine günstige **Kornform** ( $SI < 10$ ). Die Anforderungen der TL Gestein-StB von  $SI < 50$  wurden deutlich unterschritten.

Der Anteil an frostempfindlichkeitsrelevantem **Korn  $< 0,063$  mm** betrug bei der Korngruppe 0/8 mm maximal 6 M.-%. Bei den anderen Korngruppen lag der Anteil dieser Korngruppe unter 1 M.-% und damit unterhalb der Anforderungen der TL Gestein-StB von 4 M.-%.

Die ermittelten **Trockenrohdichten** der KS-Materialien mittels Pyknometer-Verfahren sind aufgrund des hohen Wassersaugvermögens der Kalksandsteine tendenziell hoch. Daraus ergeben sich Ungenauigkeiten bei der Berechnung weiterer Kenndaten. Bei den Dichtermittlungen von Kalksandstein wurden in den Kornklassen  $> 4$  mm die Wasseraufnahmen der Materialien mit berücksichtigt.

Die KS-Materialien wiesen einen **Wasseraufnahmegrad** unter Atmosphärendruck zwischen 10 und 16 % auf, die RC-Baustoffe zwischen 3,3 und 6,1 M.-%. Unter Vakuumeinwirkung erhöht sich dieser auf bei den KS-Materialien auf 13 bis 17 M.-%. Die anschließende Druckeinwirkung verändert den Wasseraufnahmegrad nur geringfügig. Die daraus ermittelten Sättigungswerte liegen zwischen 0,71 und 0,86. Eine Abschätzung des Frostwiderstandes mit Hilfe des Sättigungswertes erweist sich hier als tendenziell zuverlässiger als die aus der Gesamtporosität, welche aus den Trockenrohdichten berechnet wurde. Aufgrund eines Wasseraufnahmegrades der KS-Materialien von über 5 M.-% unter Atmosphärendruck, muss gemäß den TL Gestein-StB die Frostbeständigkeit ohnehin nachgewiesen werden.

Nach Abschluss der **Frost-Tau-Wechsel (FTW)** an den wassergesättigten Proben zeigte sich, dass mit Ausnahme eines RC-Baustoffes (RCB 1) alle Materialien durch Frost stark beschädigt und verfeinert wurden. Die Ergebnisse überschreiten die Anforderungen der TL Gestein-StB von  $< 4$  M.-% deutlich (Bild 28).



**Bild 28:** Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und Absplitterungen nach 10 FTW

Auch wurden FTW an den drei RC-Baustoffen (RCB 1, RCB 2, RCB 3) mit der Körnung 0/32 mm durchgeführt. Im Gemisch zeigen sich im Gegensatz zu Untersuchungen an den Kornklassen nur geringfügige Verfeinerungen.

Des Weiteren wurde die Frostempfindlichkeit aller Materialien am Korngemisch mit Hilfe des **Frosthebungsversuches (FHV)** bestimmt. Bei dieser Untersuchung wird die im Fußbad stehende Probe über einen definierten Zeitraum ausschließlich von oben befroren und anschließend wieder getaut. In Österreich dient als Maßstab für die Frostsicherheit eines Materials eine Frosthebungsgeschwindigkeit von < 1mm/d und eine maximale Frosthebung von 15 mm [29]. Die ermittelten Ergebnisse aller Materialien liegen deutlich unterhalb dieser Grenzwerte. Die Frostempfindlichkeit von Kalksandstein, wie bei den FTW ermittelt, zeigt sich im praxisnäheren FHV nicht. In Deutschland gibt es jedoch bisher keinen Bewertungshintergrund für dieses Verfahren. Im Vergleich sind die maximalen Frosthebungen und die Resthebungen der recycelten Kalksandsteinmaterialien niedriger als die der fabrikneuen. Diese Unterschiede zeigen sich auch im CBR-Versuch, der ein Maß für die **Tragfähigkeit** der Korngemische ist und der vor sowie nach dem FHV durchgeführt wurde.

Grundsätzlich weist ein verdichtetes Korngemisch mit zunehmender Lagerungsdichte eine höhere Tragfähigkeit auf. Bei grobkörnigen Gemischen beeinflusst die Korngröße jedoch den CBR-Wert [30]. Ein Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und CBR-Wert ist hier nicht eindeutig erkennbar. Tendenziell nehmen die Tragfähigkeiten der Korngemische nach dem FHV mit Ausnahme die der recycelten Kalksandsteinmaterialien ab. Da es sich bei diesen beiden Materialien KS 3 und KS 4 um Mauerwerksbruch mit anhaftenden Mörtelresten handelt, könnte möglicherweise eine geringfügige Selbsterhärtung eingetreten sein.

Zur Untersuchung der Festigkeit wurde der **Widerstand gegen Zertrümmerung** an den Ausgangsmaterialien mit Hilfe des Schlagzertrümmerungsversuchs und des Los-Angeles-Verfahren bestimmt. Die für die Kalksandsteinmaterialien ermittelten Schlagzertrümmerungswerte (40,3 bis 50,7) bzw. die Los-Angeles-Koeffizienten (57 bis 80) lagen erwartungsgemäß im Bereich einer geringen Festigkeit. Tendenziell wiesen die fabrikneuen KS 1 und KS 2 etwas höhere Festigkeiten auf als die recycelten KS 3 und KS 4. Nur zwei der drei RC-Baustoffe (RCB 1, RCB 3) erreichten die nach den TL Gestein-StB geforderte Festigkeit von SZ<sub>32</sub> bzw. LA<sub>40</sub>.

Die **Verdichtbarkeit** der Korngemische wurde mit dem Proctorversuch untersucht. Die optimalen Wassergehalte waren sehr hoch und lagen zwischen 15 und 19 M.-%. Die Ermittlung der Proctordichte und des optimalen Wassergehaltes bei grobkörnigen Materialien, die u.a. ein geringes Wasserhaltevermögen aufweisen, stellt sich als insgesamt schwierig dar. Es ist davon auszugehen, dass ein großer Teil des Wassers auch hier nicht für die Verdichtung zur Verfügung stand und aufgrund des hohen Wasseraufnahmevermögens vom Material aufgenommen wurde. Darüber hinaus bildet sich bei den recycelten Materialien im Gegensatz zu nicht recycelten häufig kein ausgeprägtes Maximum aus [31, 32, 33]. Nichts desto trotz ist der Proctorversuch mangels Alternativen auch international das anerkannteste Verfahren zur Bestimmung der Verdichtbarkeit von Baustoffgemischen ohne Bindemittel im Labor und wurde hier zur Bestimmung der optimalen Lagerungsdichte verwendet.

Die **Wasserdurchlässigkeiten** aller geprüften Materialien liegen überwiegend im Bereich von 10<sup>-6</sup>. Lediglich RCB 2 weist einen etwas höheren k<sub>10</sub>-Wert von 2,4 x 10<sup>-5</sup> auf. Alle Korngemische können nach DIN 18130-1 [34] als wasserdurchlässig eingestuft werden, wobei KS 1 mit 1,3 x 10<sup>-6</sup> nah am schwach durchlässigen Bereich liegt.

Um die **Kornverfeinerung** der KS 1 bis KS 4 festzustellen, wurden vor Einwirkung der Verdichtungsenergie und nach Abschluss der CBR-Versuche im Anschluss an den FHV die Korngrößenverteilungen ermittelt. Die deutlichsten Verfeinerungen von max. 11 M.-% zeigen sich bei KS 2 im Bereich 0,063 mm bis 8 mm sowie bei KS 4 zwischen 0,25 mm und 31,5 mm. Bei beiden Materialien löst hauptsächlich die Frosteinwirkung im FHV die Verfeinerung aus. Der Soll-Sieblinienbereich der TL SoB-StB wird dabei nur von KS 4 überschritten. Eine Zunahme des frostrelevanten Feinkornanteils < 0,063 mm war nicht zu verzeichnen.

Die Untersuchungen der **umweltrelevanten Merkmale** durch Eluat- und Feststoffanalysen wiesen mit Ausnahme einer Grenzwertüberschreitung im Kupfergehalt von KS 3 keine Auffälligkeiten bei den 100% Gemischen aus Kalksandstein auf. Die Anforderungsklasse RC-1 nach den TL Gestein-StB wurde eingehalten. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht ist die Wiederverwendung der gebrochenen Kalksandsteine unproblematisch.

## 7.2 Auswahl eines Recycling-Baustoffes

Für die nächsten Untersuchungsstufen sollte aus den drei RC-Baustoffen ein Material als Referenz für die Herstellung der Baustoffgemische ausgewählt werden. Insgesamt betrachtet sind die Eigenschaften der drei RC-Baustoffe zufriedenstellend. Maßgebend für die Auswahl sind die Festigkeit und der Frostwiderstand des Materials. Der RC-Baustoff RCB 3 weist eine im Vergleich zu den anderen beiden hier untersuchten RC-Baustoffen eine höhere Festigkeit und auch einen höheren Frostwiderstand auf. Aufgrund dieser tendenziell günstigeren Eigenschaften wurden mit RCB 3 die weiteren Baustoffgemische hergestellt.

## 8. Ergebnisse der Untersuchungsstufe C

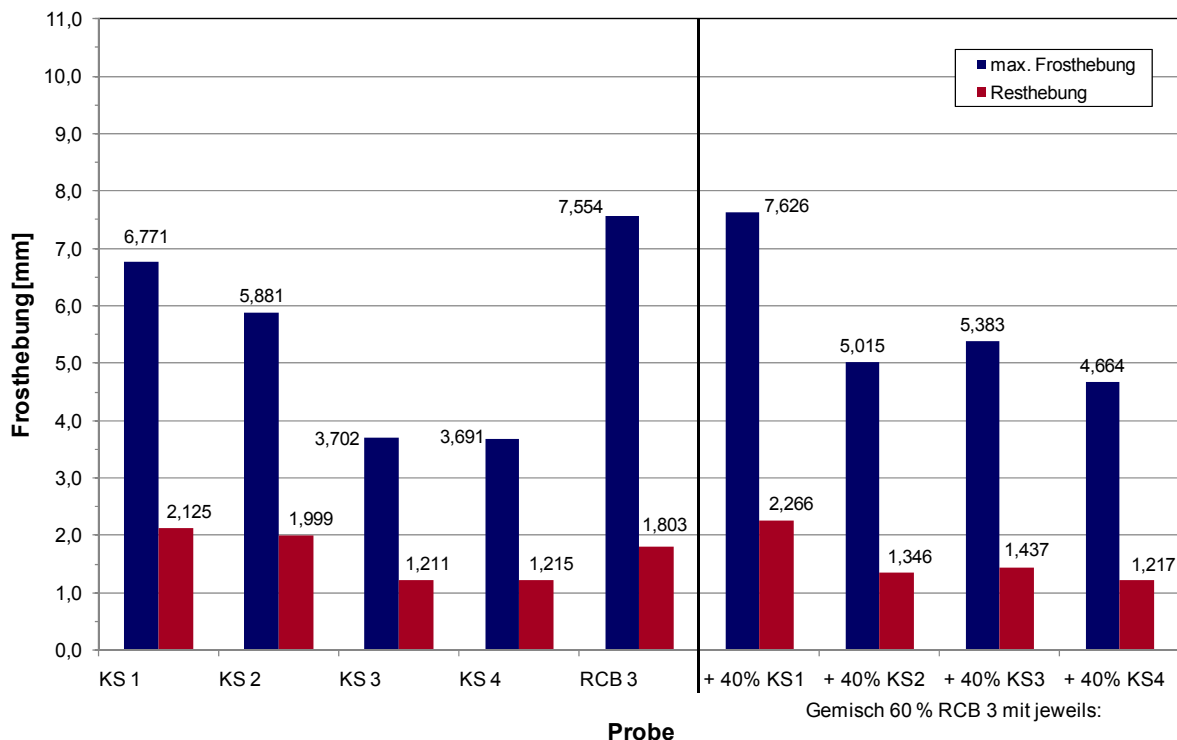
### 8.1 Herstellung der Baustoffgemische

Für diese Untersuchungsstufe C wurden Baustoffgemische aus RCB 3 und jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4 mit einem Größtkorn von 22 mm und stets annähernd gleicher Kornverteilung hergestellt. Die resultierenden Kornverteilungen entsprachen einer mittleren Kornverteilung für Schottertragschichten nach den TL SoB-StB. An diesen Baustoffgemischen wurde die Frostempfindlichkeit mittels FHV, die resultierende Kornverfeinerung sowie die Veränderung der Tragfähigkeit der Gemische nach Frosteinwirkung untersucht. Mit Hilfe dieser Ergebnisse war eins der vier KS-Materialien für die weitergehenden Untersuchungen auszuwählen.

### 8.2 Frosthebungs- und CBR-Versuche der Baustoffgemische 60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4

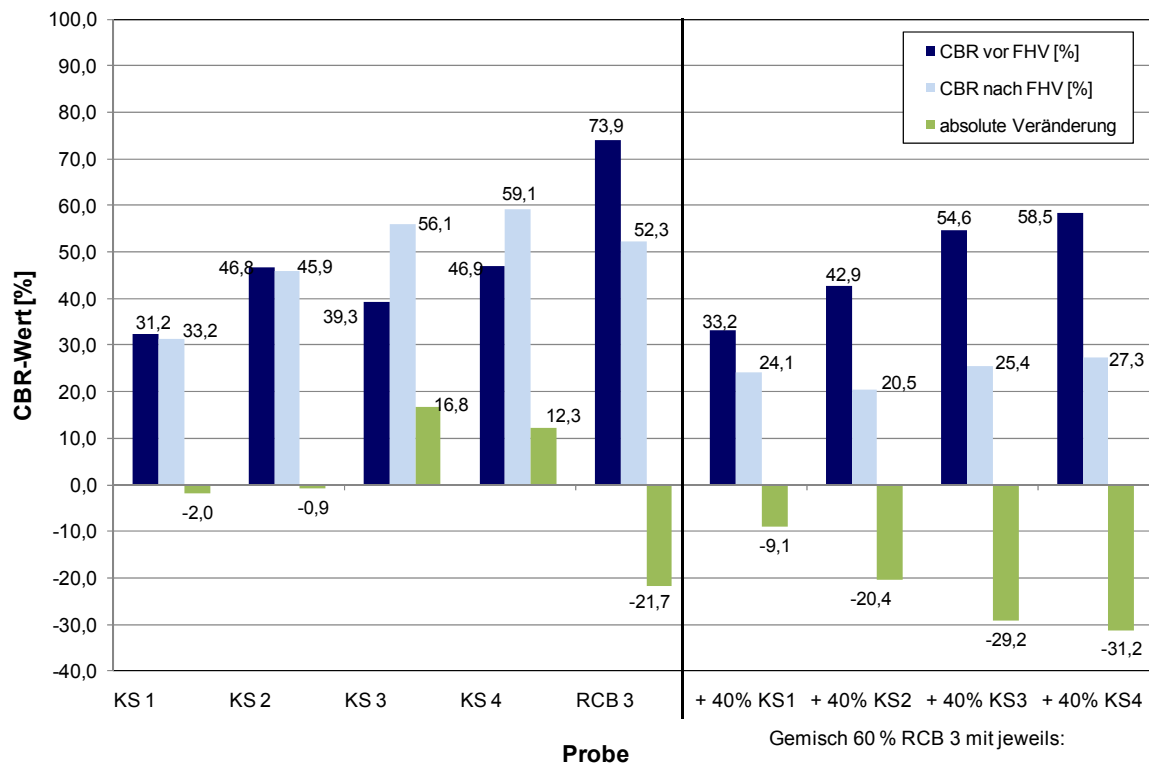
Alle Baustoffgemische wurden entsprechend der Kapitel 5.2 und 5.4 für die Frosthebungs- und CBR-Versuche vorbereitet und untersucht.

Die Ergebnisse der Proctorversuche zeigt Anhang. Bild 29 zeigt die Ergebnisse der FHV und Bild 30 die der zugehörigen CBR-Versuche an den Baustoffgemischen 60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4 im Vergleich zu den 100 % Gemischen der Ausgangsmaterialien.



**Bild 29:** Maximale und verbleibende Frosthebungen an den verschiedenen Baustoffgemischen (60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4) und deren 100 % Gemische der Ausgangsmaterialien

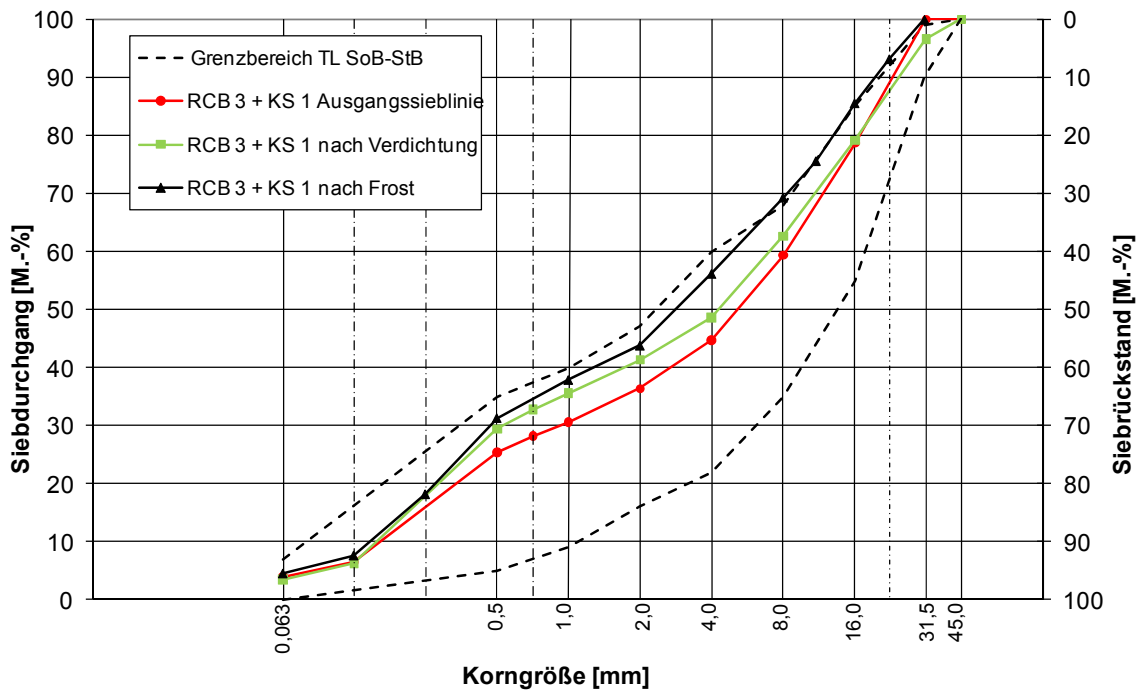




**Bild 30:** CBR-Werte vor und nach FHV der verschiedenen Baustoffgemischen (60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4) und deren 100 % Gemische der Ausgangsmaterialien

### 8.3 Kornverfeinerung der Baustoffgemische 60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4

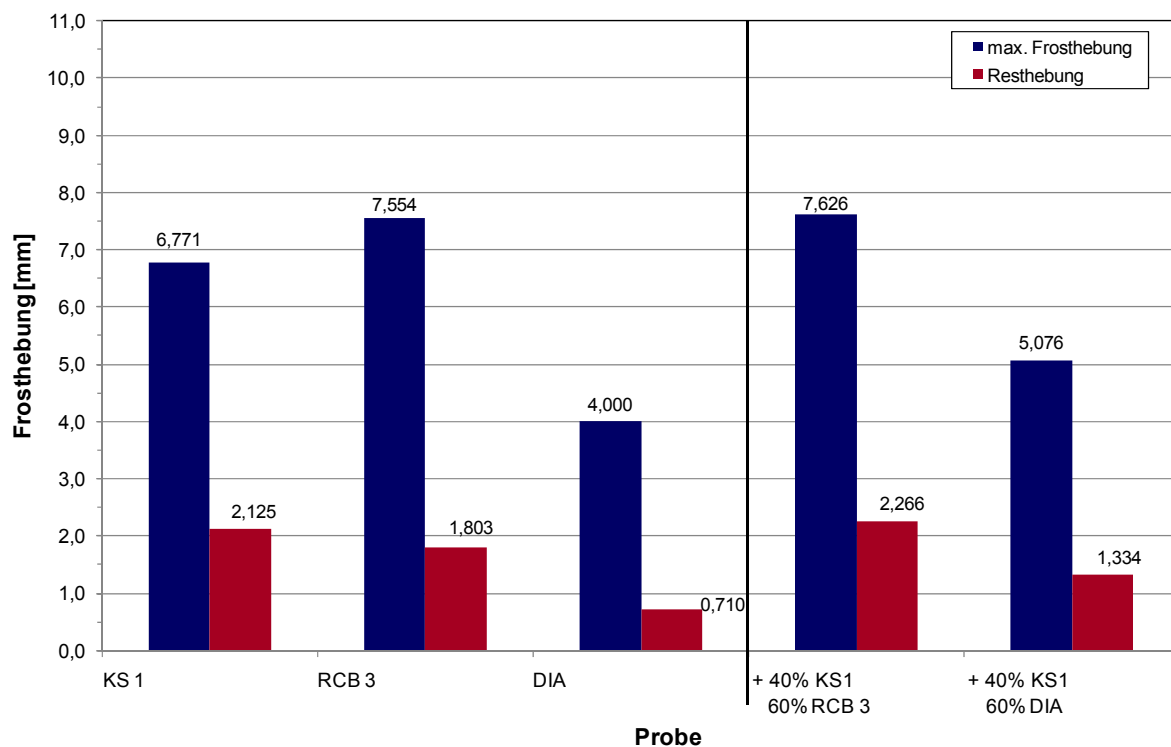
Wie in Kapitel 5.6 beschrieben, erfolgten zur Bestimmung der Kornverfeinerung Siebanalysen an den Proben der Baustoffgemische vor und nach den Einwirkungen aus Verdichtungsenergie, Frost- und Festigkeitsbeanspruchung. Die Ergebnisse der Siebanalysen am Baustoffgemisch 60 % RCB 3 + 40 % KS 1 zeigt Bild 31, da bei diesem Gemisch die deutlichsten Verfeinerungen aufgetreten sind.



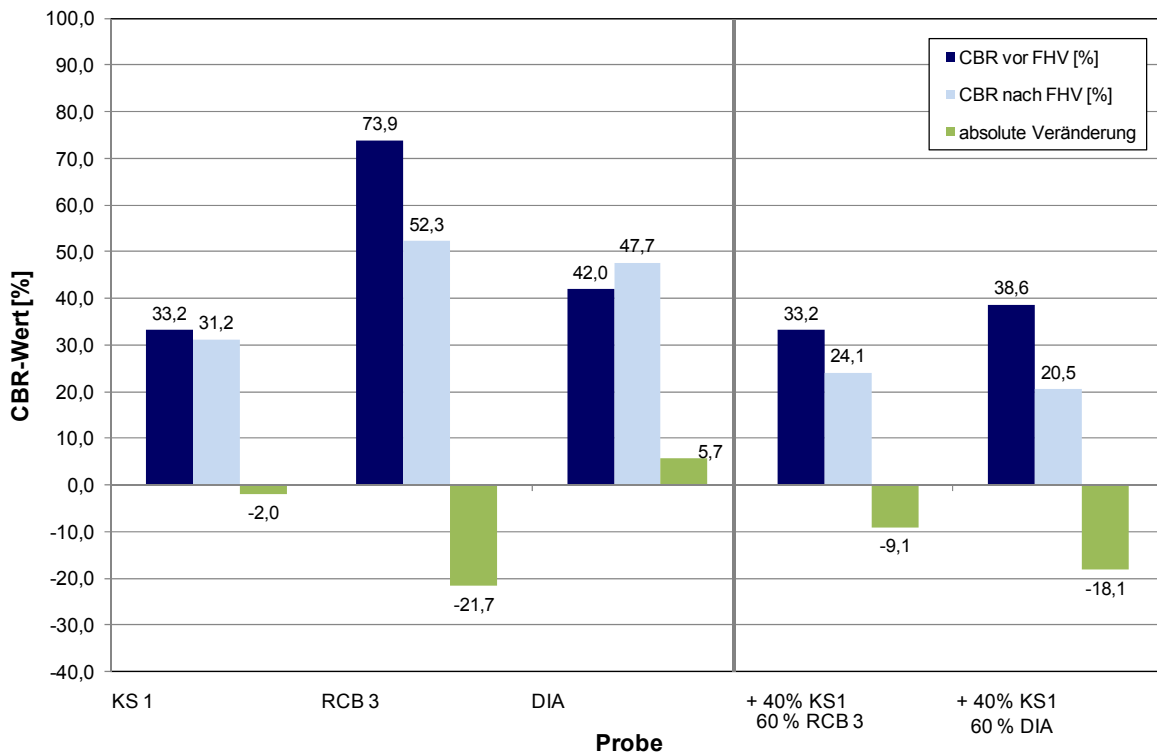
**Bild 31:** Kornverfeinerung des Baustoffgemisches 60 % RCB 3 + 40 % KS 1

#### 8.4 Frosthebungs- und CBR-Versuche sowie Kornverfeinerung des Baustoffgemisches 60 % Diabas + 40 % KS 1

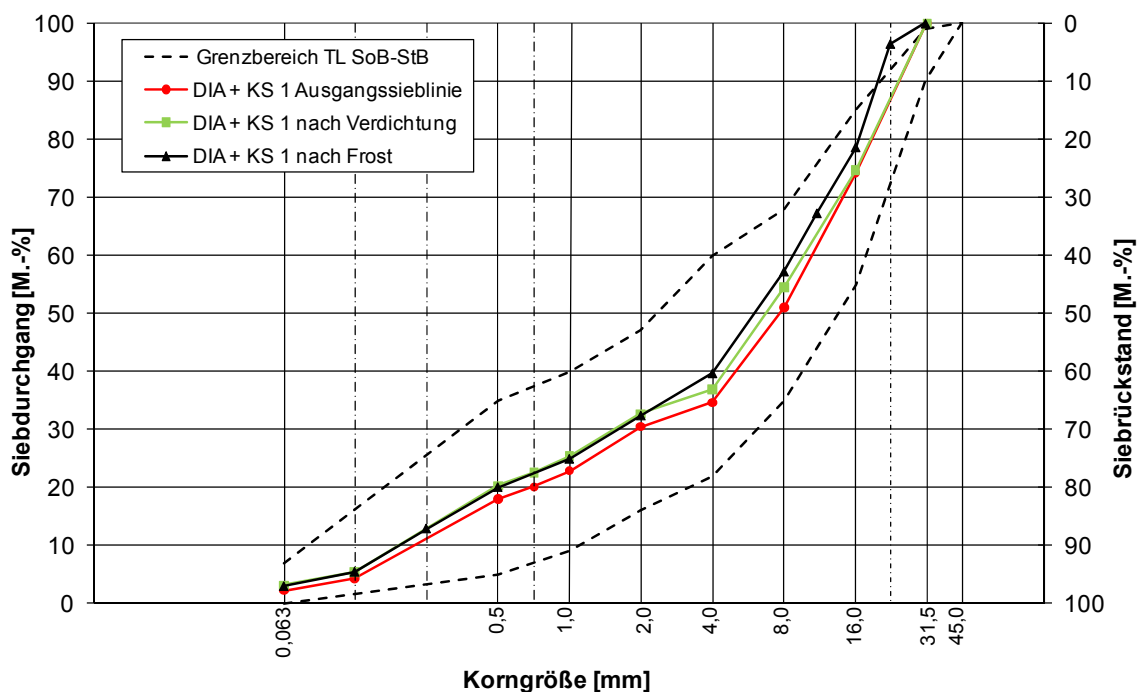
Die Gemische für die Frosthebungs- und CBR-Versuche wurden wie zuvor beschrieben hergestellt, wobei die Zusammensetzung der Sieblinie einer mittleren Kornverteilung für Schottertragschichten nach den TL SoB-StB entsprach. Die Mischungen wurden mit optimaler Lagerungsdichte und optimalem Wassergehalt in die entsprechenden Versuchszylinder eingebaut. Die Ergebnisse des Proctorversuchs sind Anlage A zu entnehmen. Die Bilder 32 und 33 zeigen die Prüfungsergebnisse der Baustoffgemische 60 % Diabas + 40 % KS 1 im Vergleich zum Gemisch 60 % RCB 3 + 40 % KS 1 sowie den 100 % Gemischen der Ausgangsmaterialien. In Bild 34 ist die Kornverfeinerung im Baustoffgemisch durch Verdichtungsenergie, Frostbeanspruchung und CBR-Versuch dargestellt.



**Bild 32:** Maximale und verbleibende Frosthebungen an der Baustoffgemische 60 % RCB 3 + 40 % KS 1, 60 % Diabas + 40 % KS 1 sowie die 100 % Gemische der Ausgangsmaterialien



**Bild 33:** CBR-Werte vor und nach FHV der Baustoffgemische 60 % RCB 3 + 40 % KS 1, 60 % Diabas + 40 % KS 1 sowie die 100 % Gemische der Ausgangsmaterialien



**Bild 34:** Kornverfeinerung des Baustoffgemisches 60 % DIA + 40 % KS 1

## 8.5 Eigenschaften der Baustoffgemische 60 % RCB 3 + jeweils 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4

Die vier Kalksandsteinmaterialien wurden zu jeweils 40 % mit RCB 3 zu einem Baustoffgemisch zusammengesetzt. Erwartungsgemäß ließen sich diese Baustoffgemische aufgrund eines ausgewogeneren Wasserhaltevermögens und der weitgestufteren Sieblinie im Proctorversuch besser verdichten als die sortenreinen Kalksandsteinmaterialien. Der optimale Wassergehalt lag zwischen 11 und 12 M.-% und damit immer noch relativ hoch, bedingt durch die Wasseraufnahmefähigkeit des Kalksandsteins.

Der FHV dient als Maß für die **Frostempfindlichkeit**. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximalen Frosthebungen aller Proben deutlich unterhalb von 10 mm liegen. In der Gruppe der Baustoffgemische weist das Gemisch aus RCB 3 + KS 1, sowohl im Maximum als auch nach dem Auftauen, die ausgeprägtesten Hebungen auf. Diese sind in etwa so hoch wie die Hebungen des Ausgangsmaterials RCB 3, welches in seiner Gruppe die höchsten Hebungen verzeichnet. Insgesamt betrachtet sind die Hebungen der Baustoffgemische nur unwesentlich höher als die ihrer Ausgangsmaterialien. Es scheint, dass tendenziell der Materialanteil mit dem höheren Hebungspotential im Baustoffgemisch, die maximalen Hebungen des Baustoffgemisches beeinflusst.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen des FHV an den sortenreinen Materialien zeigen sich im Baustoffgemisch mit 60 % RCB 3 + 40 % KS keine Unterschiede mehr zwischen dem recycelten (KS 3, KS 4) und dem fabrikneuen (KS 1, KS 2) Kalksandsteinmaterial.

Die **Tragfähigkeit** der Baustoffgemische wurde mit Hilfe des CBR-Versuchs bestimmt. In der Gruppe der Baustoffgemische korrespondieren die CBR-Werte vor und nach FHV mit den Lagerungsdichten, mit Ausnahme des Gemisches RCB 3 + KS 4 vor FHV. Auch unterschieden sich in dieser Gruppe die CBR-Werte vor FHV nur geringfügig zu denen der Ausgangsmaterialien KS 1 bis KS 4, insbesondere die des Baustoffgemische 60 % RCB 3 + 40 % KS 1. Tendenziell weisen nur die Baustoffgemische aus 60 % RCB 3 + 40 % KS 3 oder KS 4 hohe CBR-Werte vor dem FHV (> 50 %) auf. Durch den FHV nimmt die Tragfähigkeit aller Baustoffgemische, im Gegensatz zur Tragfähigkeitsveränderung der Ausgangsmaterialien KS 1 bis KS 4, deutlich ab. Alle CBR-Werte nach FHV liegen zwischen 20 % und 30 %, wobei insbesondere die Baustoffgemische aus 60 % RCB 3 + 40 % KS 3 oder KS 4 einen Tragfähigkeitsverlust von rd. 30 % aufweisen. Diese Reduzierung könnte möglicherweise auf den in diesen beiden recycelten KS-Materialien enthaltenen Anteil an Mörtel und Putz zurück zu führen sein. Da mit dieser Reduzierung keine ermittelbare Kornverfeinerung einhergeht, ist einerseits die Mörtelmatrix noch intakt, andererseits scheint das Korngerüst durch die Frostbeanspruchung instabil geworden zu sein.

Nach Floss [35] liegen die geprüften Baustoffgemische im Bereich einer mittleren bis guten unteren Tragschicht und sind gering bis mittel frostempfindlich. Aufgrund des vergleichsweise hohen Tragfähigkeitsverlustes sind die Baustoffgemische 60 % RCB 3 + 40 % KS 3 oder KS 4 als sehr frostempfindlich einzustufen.

Eine ermittelbare **Kornverfeinerung** tritt nur bei den Baustoffgemischen RCB 3 + KS 1 oder KS 2 auf und resultiert aus der Frosteinwirkung des FHV. Die Beanspruchungen aus Verdichtungs- und Festigkeitsprüfung zeigen nur geringfügige Auswirkungen. Die maximale Verfeinerung findet bei beiden Baustoffgemischen in der Korngruppe 4/8 mm statt und beträgt maximal 12 M.-% (RCB 3 + KS 1) bzw. 8 M.-% (RCB 3 + KS 2). Beim letztgenannten Gemisch erhöhte sich zudem der frostempfindliche Feinkornanteil von 3 M.-% auf 6 M.-%.

Zusammenfassend stellt es sich heraus, dass eine Zugabe von 40 % gebrochenem Kalksandstein zu einem RC-Baustoff eine geringfügige Erhöhung der Frostempfindlichkeit des Baustoffgemisches erzeugt, jedoch mit einem deutlichen Verlust an Tragfähigkeit einhergeht. Um den Einfluss des Anteils Mörtel und Putz zu konkretisieren, wurden für die weitergehenden Untersuchungen KS 1 verwendet, das ausschließlich Kalksandstein-Schnittabfälle enthält.

### **8.6 Eigenschaften des Baustoffgemisches 60 % RCB 3 + 40 % DIA**

Um den Einfluss des Kalksandsteinmaterials auf die Qualität der Baustoffgemische zu untersuchen, wurde in einer Versuchsreihe RCB 3 durch Diabas (DIA) ersetzt und Baustoffgemische mit 60 % Diabas + 40 % KS 1 hergestellt. Die resultierende Sieblinie entsprach ungefähr der mittleren Kornverteilung für Schottertragschichten nach den TL SoB-StB.

Im FHV zeigte sich erwartungsgemäß, dass das Baustoffgemisch DIA + KS 1 tendenziell weniger frostempfindlich ist als das vergleichbare aus RCB 3 + KS 1. Auch weist DIA + KS 1 höhere maximale Frosthebungen auf als das Ausgangsmaterial Diabas, was wiederum auf die etwas höhere **Frostempfindlichkeit** des Kalksandsteinmaterials zurückzuführen ist.

Die CBR-Werte als Maß für die **Tragfähigkeit** sind nach dem FHV rd. 20% niedriger als vorher. Wie auch beim Baustoffgemisch RCB 3 + KS 1 nimmt die Tragfähigkeit nach dem FHV ab. Ein Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und CBR-Wert war hier nicht eindeutig erkennbar. Eine Kornverfeinerung fand nur in geringem Maße statt.

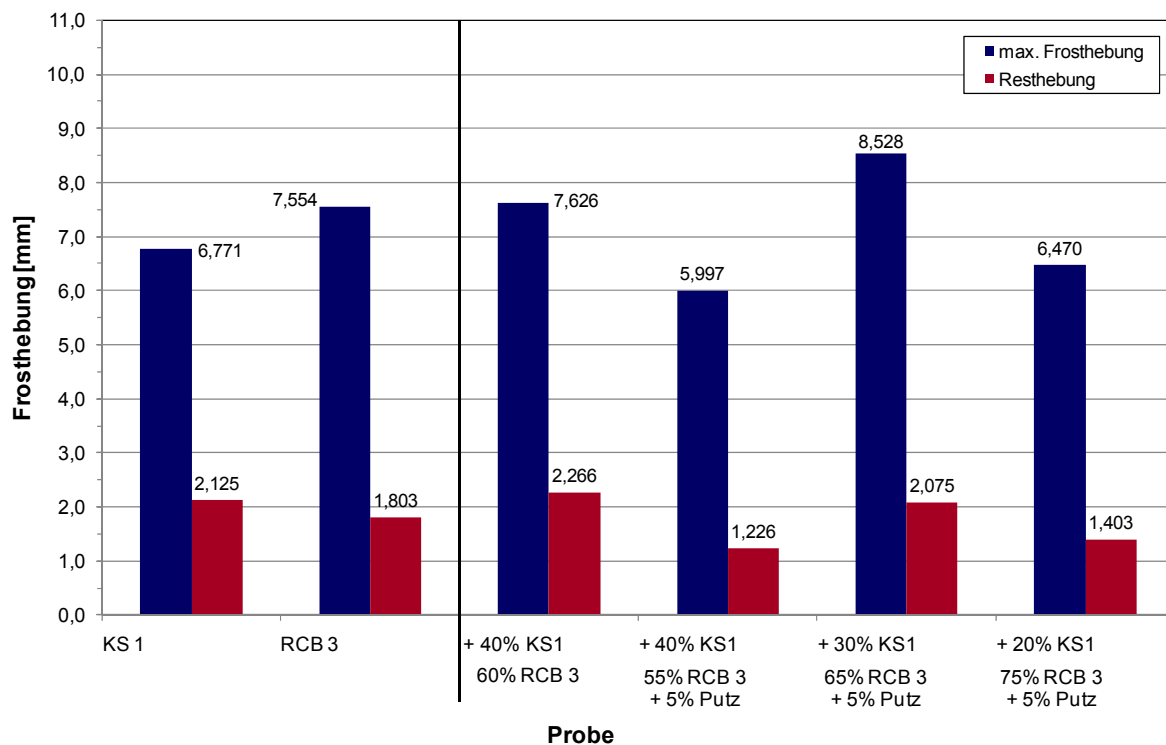
## 9. Ergebnisse der Untersuchungsstufe D

### 9.1 Herstellung der Baustoffgemische

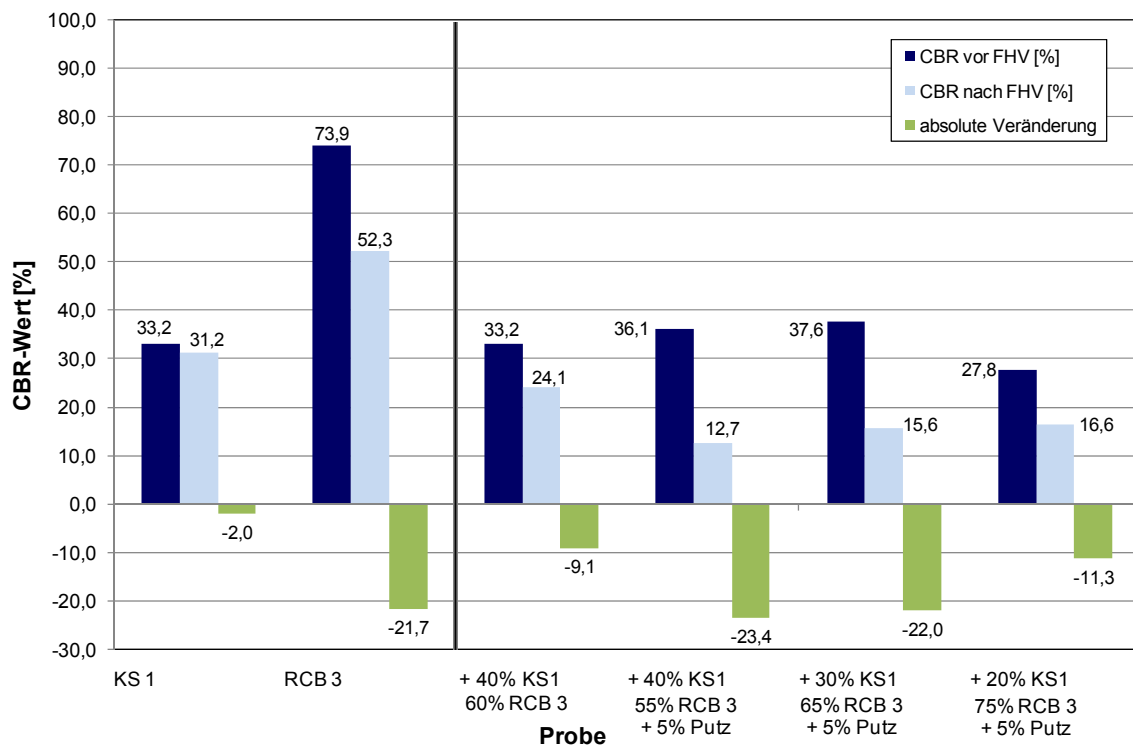
In der Praxis haften an rückgebautem Kalksandstein-Mauerwerk z.T. Mörtelreste an. Dem soll mit Hilfe einer definierten Putzzugabe zu den Baustoffgemischen Rechnung getragen werden. Für die Untersuchungsstufe D wurden Baustoffgemische aus RCB 3 + 5 M.-% Putz (P) + jeweils 20 M.-%, 30 M.-% oder 40 M.-% KS 1 hergestellt und untersucht. Die resultierende stets annähernd gleiche Kornverteilung entsprach wiederum einer mittleren Kornverteilung für Schottertragschichten nach den TL SoB-StB.

### 9.2 Frosthebungs- und CBR-Versuche der Baustoffgemische RCB 3 + P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1

Alle Baustoffgemische wurden mit Hilfe der Proctordichte und des optimalen Wassergehalts in die Probekörperformen für die CBR-Versuche und die FHV eingebaut. Alle Untersuchungen wurden entsprechend Kapitel 5.2 und 5.4 durchgeführt und ausgewertet. Die Proctorkurven sind in Anlage A zusammengestellt. Bild 35 zeigt die Ergebnisse der FHV und Bild 36 die der zugehörigen CBR-Versuche an den Baustoffgemischen RCB 3 + P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1 im Vergleich zu den 100 % Gemischen der Ausgangsmaterialien.



**Bild 35:** Maximale und verbleibende Frosthebungen an den verschiedenen Baustoffgemischen aus RCB 3 + P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1 im Vergleich zu deren 100 % Gemischen der Ausgangsmaterialien

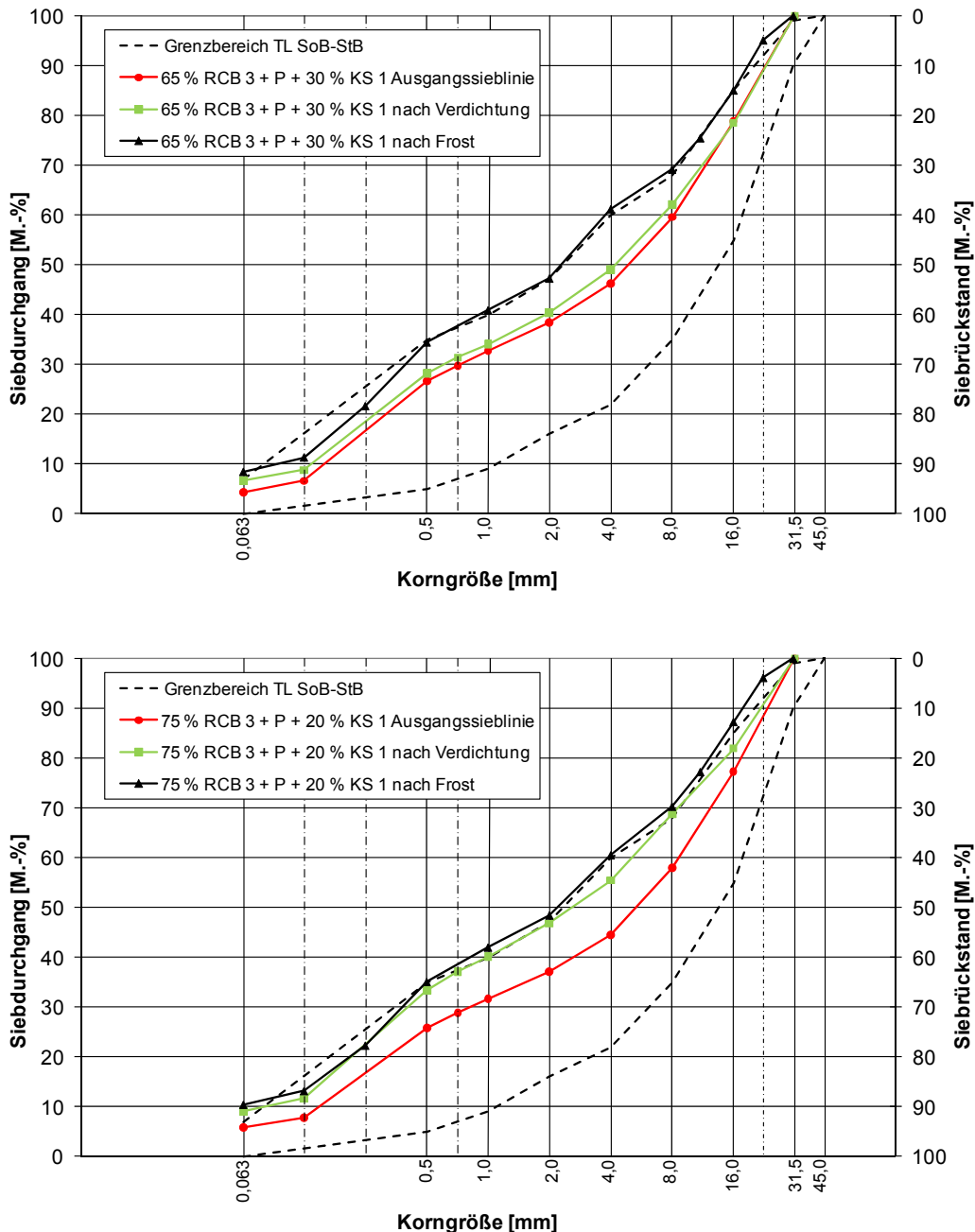


**Bild 36:** CBR-Werte vor und nach FHV des Baustoffgemische aus RCB 3+ P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1 sowie deren 100 % Gemischen der Ausgangsmaterialien



### 9.3 Kornverfeinerung der Baustoffgemische RCB 3 + P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1

Wie in Kapitel 5.6 beschrieben erfolgten zur Bestimmung der Kornverfeinerung Siebanalysen an den Proben der Baustoffgemische vor und nach den Einwirkungen aus Verdichtungsenergie, Frost- und Festigkeitsbeanspruchung. Die Ergebnisse der Siebanalysen des Baustoffgemisches 65 % RCB 3 + 5 % P + 30 % KS 1 zeigt Bild 26 oben sowie Bild 37 unten das die Analysen des Gemisches 75 % RCB 3 + 5 % P + 20 % KS 1. Eine Kornverfeinerung ist im Baustoffgemisch 55 % RCB 3 + 5 % P + 40 % KS 1 nur unwesentlich vorhanden. Die zugehörigen Siebanalysen sind im Anhang aufgeführt.



**Bild 37:** Kornverfeinerung der Baustoffgemische  
65 % RCB 3 + 5 % P + 30 % KS 1 (oben) und  
75 % RCB 3 + 5 % P + 20 % KS 1 (unten)

#### 9.4 Einfluss Eigenschaften der Baustoffgemische RCB 3 + P + jeweils 20 %, 30 % oder 40 % KS 1

Die im Proctorversuch von den genannten Baustoffgemischen erreichten **Lagerungsdichten** liegen im Vergleich zu den Baustoffgemischen ohne Putzzugabe niedriger, die erreichten optimalen Wassergehalte (12 bis 14 M.-%) tendenziell höher. Erwartungsgemäß nehmen die Baustoffgemische mit Putz, aufgrund ihres hohen Wasseraugvermögens, mehr Wasser auf und dementsprechend steht weniger Wasser für die Verdichtung zur Verfügung.

Der **Frostwiderstand** dieser Baustoffgemische, geprüft im FHV, wird durch die Putzzugabe geringfügig beeinflusst. Die maximalen Frosthebungen liegen in einem Bereich zwischen 5 mm und von 10 mm. Im Baustoffgemisch mit 65 % RCB 3+ P + 30% KS 1, das hier die tendenziell höchsten Frosthebungen aufweist, ist auch der größte Anteil an frostempfindlichen Korn < 0,063 mm enthalten.

Die **Tragfähigkeit** der Baustoffgemische scheint durch die Putzzugabe beeinflusst zu werden. Die CBR-Werte sinken nach dem FHV um rd. 20 % gegenüber ihren Ausgangswerten ab, mit Ausnahme des Baustoffgemisches 75 % RCB 3 + P + 20 % KS 1, bei dem die CBR-Werte aufgrund ihres niedrigeren Ausgangswertes nur um rd. 10 % reduziert werden.

Im Vergleich zum Baustoffgemisch 60% RCB 3 + 40 % KS 1 ohne Putzzugabe zeigt sich eine relative Reduzierung der CBR-Werte nach FHV von rd. 10 %. Es scheint, dass durch den Putz das Korngerüst des Baustoffgemisches, unabhängig vom Anteil an Kalksandstein, deutlich geschwächt wird. Dieses zeigt sich auch in der ermittelten **Kornverfeinerung**, die über nahezu alle Kornklassen stattfindet. Sie liegt zwischen rd. 4 M.-% beim Kornanteil < 0,063 mm und maximal 10 M.-% im Bereich der Kornklasse 4/8 mm. Der Grenzsieblinienbereich wird nach den Beanspruchungen überschritten.

Nach Floss [35] liegen die geprüften Baustoffgemische im Bereich eines guten Untergrundes bzw. einer mittleren unteren Tragschicht und sind aufgrund der hohen Tragfähigkeitsabnahme als sehr frostempfindlich einzustufen.

## 10 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

### 10.1 Straßenbautechnische Untersuchungen

#### Ruhr-Universität Bochum

Im Rahmen der straßenbautechnischen Charakterisierung der sortenreinen Materialien und der Baustoffgemische wurden verschiedenste Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse zur Kennzeichnung der unterschiedlichen Materialien und gestützt durch die Erkenntnisse bei den Untersuchungen an den Baustoffgemischen können die folgenden Aussagen getroffen werden.

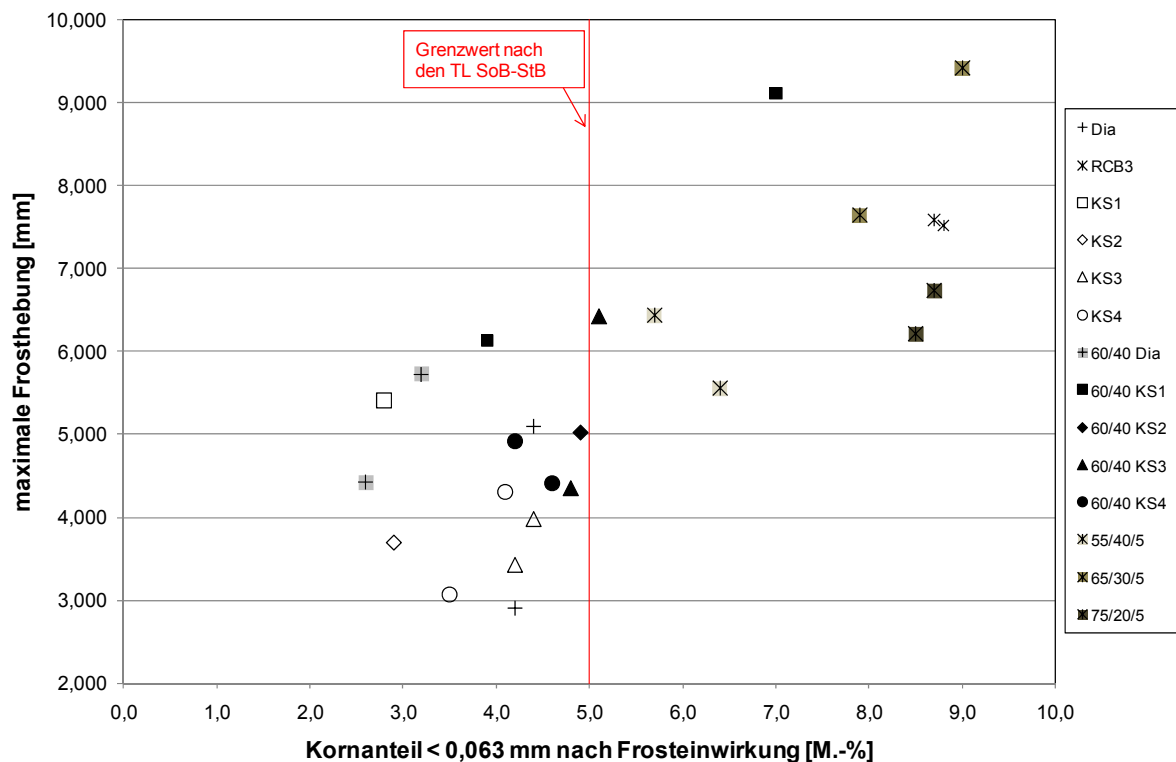
Eine Zuordnung des gebrochenen Kalksandstein-Mauerwerks nach seiner äußeren Beschaffenheit ist eindeutig möglich. Jedoch stellt sich eine Separation der Mörtel- und/oder Putzanteile als schwierig dar. Dies kann zu einer fehlerhaften Einschätzung bei der Prüfung der stofflichen Zusammensetzung führen. Schon ein vergleichsweise geringer Anteil an Innenputz von 5 M.-% im Baustoffgemisch beeinflusst dessen Qualität merklich. Eine Bestimmung des Putzanteils könnte im Labor mit Hilfe chemischer Untersuchungsmethoden (z.B. Eluat) vorgenommen werden.

Der Widerstand gegen Zertrümmerung der Kalksandsteinmaterialien, geprüft an einer definierten Kornklasse, ist gering. Die in den TL Gestein-StB geforderten Schlagzertrümmerungswerte bzw. Los-Angeles-Koeffizienten werden deutlich überschritten. Unterschiede zwischen fabrikneuen und recycelten Kalksandsteinmaterialien sind nicht zu erkennen, wobei das hochfeste Material KS 1 tendenziell einen höheren Widerstand gegen Zertrümmerung aufweist. In den Untersuchung zur Kornverfeinerung am sortenreinen Korngemisch spiegeln sich die geringen Festigkeiten nicht wieder. Jedoch treten diese im Baustoffgemisch mit dem wesentlich festeren RC-Baustoff RCB 3 in den Vordergrund. Allen Baustoffgemischen gemein ist, dass im Bereich des Grobkorns sowohl durch Verdichtungsenergie als auch durch Frosteinwirkung eine Kornverfeinerung eintritt.

Zur Abschätzung der Frostempfindlichkeit von Kalksandstein bestätigt sich der Wasseraufnahmegrad unter Atmosphärendruck als Beurteilungskriterium. Der Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und Absplitterungen nach Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen (FTW) zeigt erwartungsgemäß, dass nahezu alle Materialien mit einem Wasseraufnahmegrad  $> 5$  M.-% hohe Absplitterungen nach FTW aufweisen (Bild 17). Tendenzuell sind dabei die Absplitterungen recycelter Kalksandsteinmaterialien größer als die der fabrikneuen. Insgesamt erwies sich jedoch der hier mit dem FTW an wassergesättigten Einzelkörnungen geprüfte Frostwiderstand bei allen Kalksandsteinmaterialien (KS 1 bis KS 4) als sehr gering. Im Grobkornbereich fand ein deutlicher Kornzerfall statt.

Für die weitere Bewertung der Frostbeständigkeit der Materialien wurde über die Prüfungen an den Einzelkörnungen hinaus Frosthebungsversuche (FHV) durchgeführt. Bei diesen praxisbezogenen Untersuchungen am verdichteten Korngemisch steht die Unterseite des Prüfkörpers im Wasserbad und die Befrostung findet ausschließlich von oben statt. Für dieses Prüfverfahren gibt es bisher keinen Bewertungshintergrund, so dass hier nur eine relative Bewertung möglich ist. Aufgrund bisheriger Erfahrungen mit verschiedensten Materialien lässt sich ableiten, dass Frostschäden im Straßenkörper nur dann aufgetreten sind, wenn die Materialien im FHV eine ausgeprägte Hebung aufweisen [28], was bei allen hier geprüften Baustoffgemischen nicht der Fall war.

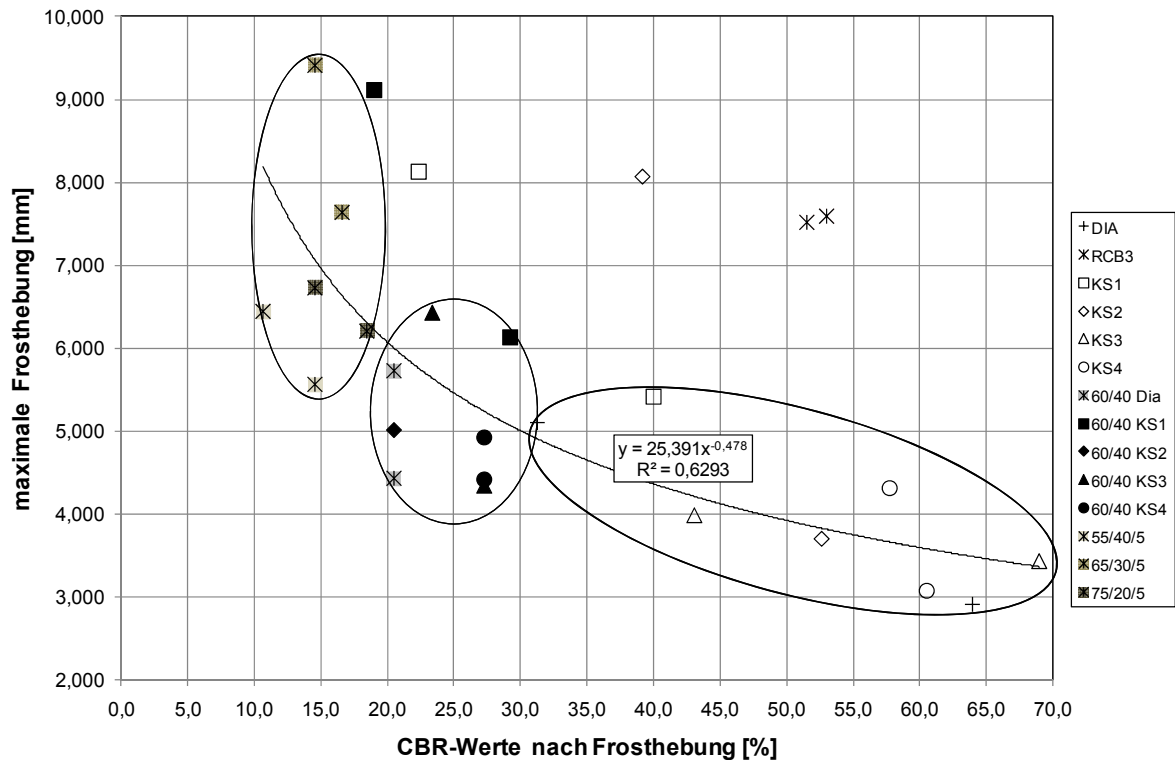
Werden die Ergebnisse der FHV betrachtet, treten durch die Zugabe von Kalksandsteinmaterialien in verschiedenen Mengen und Qualitäten zu einem RC-Baustoff keine deutlichen Veränderungen auf. Trotz deutlicher Streuungen der Ergebnisse, die zum einen dem Material und zum anderen der Prüfung selbst geschuldet sind, zeigt sich jedoch erwartungsgemäß, dass die maximale Frosthebung der Gemische mit steigendem Feinkornanteil auch tendenziell ansteigt (Bild 38). Dies zeigt sich besonders in den Baustoffgemischen mit definierter Putzzugabe, bei denen eine deutliche Kornverfeinerung aufgrund der eingebrachten Verdichtung eingetreten ist.



**Bild 38:** Zusammenhang zwischen maximaler Frosthebung und Kornanteil <math>< 0,063\text{ mm}</math>

Nach Abschluss der FHV wird mit Hilfe des CBR-Versuchs die Veränderung der Tragfähigkeit der Baustoffgemische durch diese Beanspruchung ermittelt.

In Bild 39 ist der Zusammenhang zwischen den CBR-Werten nach Frostbeanspruchung und den Frosthebungen der Gemische dargestellt. Es zeigt sich trotz der Streuungen der Ergebnisse, dass mit steigender maximaler Frosthebung eine Reduzierung der CBR-Werte einhergeht. Diese Abhängigkeit ist mit den verbleibenden Hebungen nicht festzustellen. Die verbleibenden Hebungen liegen für alle Baustoffgemische zwischen 1 mm und 2 mm.



**Bild 39:** Zusammenhang zwischen maximaler Frosthebung und CBR-Werten nach Frosteinwirkung

Tendenziell lassen sich bei diesen Ergebnissen drei Gruppen zusammenfassen.

Die Gruppe der sortenreinen Materialien (DIA, RCB 3, KS 1, KS 2, KS 3, KS 4) weist die niedrigsten Frosthebungen auf. Der vorhandene Porenraum scheint hier für die Frostaushdehnung des Wassers ausreichend zu sein. Auch wird das Traggerüst nur geringfügig durch Kornverfeinerung verändert. Das Tragfähigkeitsverhalten der sortenreinen Gemische ändert sich durch Frosteinwirkung nur unwesentlich.

In der Gruppe der Baustoffgemische aus 60 % RCB 3 + 40 % KS 1, KS 2, KS 3 oder KS 4 bzw. 60 % DIA + 40 % KS 1 ändert sich die maximale Frosthebung geringfügig. Dennoch scheint sich die geringe Festigkeit des Kalksandstein-Materials auf die Tragfähigkeit des gesamten Korngerüsts auszuwirken. Unterschiede zwischen den Baustoffgemischen aus RCB 3 + fabrikneuem (KS 1, KS 2) oder recyceltem (KS 3, KS 4) Kalksandstein zeigen sich im Gegensatz zu den Ergebnissen der FHV bei den sortenreinen Materialien nicht mehr. Die niedrigen CBR-Werte nach dem FHV (20 % bis 27 %) dieser Baustoffgemische stehen in Zusammenhang mit der Auflockerung des Korngerüsts durch die Frosteinwirkung. Der höchste Tragfähigkeitsverlust in dieser Gruppe tritt bei den Gemischen aus RCB 3 + recycelte Kalksandsteinen (KS 3, KS 4) ein, was auf den, in diesen Gemischen vorhandenen Anteil an Mörtel- und Putz, zurückzuführen sein könnte. Da keine deutliche Kornverfeinerung nach dem FHV ermittelt werden konnte, scheinen die Einzelkörner noch intakt zu sein, das Korngerüst jedoch in seiner Tragfähigkeit beeinträchtigt.

Die Gruppe der Baustoffgemische RCB 3 + 5 % Innenputz + 20 %, 30 % oder 40 % KS 1 zeigt tendenziell höhere maximale Frosthebungen und insgesamt die niedrigsten Tragfähigkeiten nach den FHV. Die hohe Frostempfindlichkeit des Innenputzes, und damit einhergehend die im Vergleich zu den vorhergehenden Baustoffgemischen ermittelbare Kornverfeinerung, scheint, größtenteils unabhängig von den anderen Anteilen im Baustoffgemisch, das Gesamtfrost- und Gesamttragverhalten zu dominieren.

Abschließend kann aufgrund der Untersuchungsergebnisse festgestellt werden, dass eine erhöhte Frostgefährdung allein durch die Zugabe von 40 % Kalksandstein zu einem RC-Baustoffgemisch im Frosthebungsversuch nicht nachgewiesen werden konnte. Jedoch reduziert sich die Tragfähigkeit des Gemisches nach Frosteinwirkung. Ein Unterschied zwischen fabrikneuen und recycelten Kalksandsteinen konnte dabei nicht festgestellt werden.

Von größerer Bedeutung für die Qualität des Baustoffgemisches scheint dagegen das Vorhandensein von Putz. Schon geringe Anteile an Putz können sich negativ auf das Gebrauchsverhalten des Baustoffgemisches auswirken. Nur die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Baustoffgemische aus RC-Baustoff, Kalksandstein ohne definierte Putzzugabe eignen sich nach Floss aufgrund ihrer Frostempfindlichkeit und ihres Tragverhaltens für den Einsatz in einer mittleren bis guten unteren Tragschicht ohne Bindemittel. Die Ausgangsqualität des Kalksandsteins beeinflusst scheinbar die Ergebnisse nur geringfügig, was jedoch, insbesondere vor dem Hintergrund der natürlichen Anteile von Putz und/oder Mörtel an anfallendem Mauerwerksbruch detaillierter zu analysieren wäre. Darüber hinaus stellt sich aufgrund der größeren Streuungen in den Prüfergebnissen die primär aus dem Baustoffgemisch selbst, aber auch aus den Prüfbedingungen resultieren, die Frage, wie sich das Gebrauchsverhalten solcher Baustoffgemische unter den Einflüssen von Wetter und Verkehr verändert. Dies müsste zwingend mit Hilfe einer Erprobungsstrecke analysiert werden.

Grundsätzlich haben die Ergebnisse dieser Arbeit gezeigt, dass die Beurteilung von Baustoffgemischen mit RC-Material am abgestuften Korngemisch und nicht an einzelnen Kornklassen, wie durch die TL Gestein-StB gefordert, erfolgen sollte. Mögliche Beurteilungskriterien wären die maximale Frosthebung sowie der CBR-Wert nach Frosteinwirkung. Da der CBR-Versuch am Grobkorngemisch jedoch großen Streuungen unterliegt, müsste langfristig eine andere Bewertungsmöglichkeit für die Tragfähigkeit von Grobkorngemischen im Labor gefunden werden.

## 10.2 Mikroskopische Analyse

### Amtlichen Materialprüfungsanstalt der Freien und Hansestadt Bremen

#### **Kalksandsteine:** (Bezeichnung: Sorten KS 1 bis KS 4)

Die verschiedenen KS-Sorten zeigten ein weitgehend gleichmäßiges und für Kalksandstein typisches mikroskopisches Erscheinungsbild. Die festigkeitsbildenden Erhärtungsreaktionen waren an den bekannten Gefügemerkmalen ablesbar: Anlösungen der Mineralkörner, Risse in den Körnern, teilweise Saumporen, Ausbildung einer Bindemittelmatrix, typische BM-Morphologien etc.

In den Stückproben sind keine längeren Risse vorhanden. Unterschiedlich stark ausgeprägt treten herstellungsbedingte Risse in den Quarzkörnern sowie kurze Risse in der BM-Matrix auf. Die Gefüge der nicht gebrochenen Ausgangsmaterialien sind grundsätzlich als homogen und schadensfrei zu bewerten.

Der Einfluss des Brechvorgangs ließ sich an der feinen Fraktion (0/8) nur ungenügend bewerten. An der gröberen Körnung konnte an allen Serien die Bildung einzelner längerer Risse in den Körnern nachgewiesen werden. In der BM-Matrix sowie im Kontaktbereich Matrix / Mineralkorn waren kaum Veränderungen erkennbar.

Es ist davon auszugehen, dass der Brechvorgang die Ursache der vorhandenen Risse in den gebrochenen KS-Materialien darstellt.

#### **Beton:** (Bezeichnung: RCB 1; RCB 2 und RCB 3)

Im Gegensatz zum Kalksandstein zeigen die Betone ein sehr uneinheitliches Erscheinungsbild. An der Probe RCB 1 lag eine deutliche Schädigung des Gefüges vor. Die Schäden waren an der Stückprobe deutlicher erkennbar als an den Körnern der Fraktion 0/8 bzw. 8/32, an denen das Brechen vermutlich zu einer Trennung an diesen Schwachstellen geführt hat. Diese Probe wurde verworfen.

Die RC-Betone (RCB 2 und RCB 3), die nur als Körnung 8/32 mm zur Untersuchung zur Verfügung standen, zeigen keine Hinweise auf Treibmineralbildung. Die Unterschiede zwischen diesen Betonen bestehen im Zementanteil und in der Verwendung von Steinkohlenflugasche als Füllstoff (RCB 3).

Charakteristisch für beide Materialien, die auf unterschiedlichen Anlagen gebrochen wurden, ist die Existenz eines gleichmäßigen Rissystems in der Zementsteinmatrix sowie das Vorhandensein von so genannten Saumporen, d. h. von Spalten im Kontaktbereich Mineralkorn / Zementstein.

Aufgrund der geringen Rissweiten (meist 1-5  $\mu\text{m}$ ) waren die Mikrorisse im Lichtmikroskop meist nicht erkennbar, konnten aber durch die Dünnschliff-Untersuchung im REM nachgewiesen werden. Die Ursache dieser Risse kann nicht mit letzter Sicherheit angegeben werden, weil für die Untersuchungen keine Stückproben als Vergleich zur Verfügung standen. Die herstellungsbedingte Existenz eines Craquelierissystems in der Zementsteinmatrix eines Betons ist nicht grundsätzlich auszuschließen, so dass eine Unterscheidung „herstellungsbedingt“  $\leftrightarrow$  „sekundär“ schwierig ist.

Dennoch deuten sowohl der Verlauf der Risse - häufig als direkte Verbindung zwischen zwei Mineralkörnern - und die zum Teil deutlichen Saumporen als auch größere Rissweiten im Randbereich der Körner drauf hin, dass das Brechen des Betons als wahrscheinliche Ursache der Risse anzusehen ist.

Durch die vorhandenen Risse ist ein sekundäres Kapillarsystem entstanden, dass die Frostbeständigkeit der Körner negativ beeinflusst.

**Mörtel / Putze:** (Bezeichnungen: Sorte 6 hart und weich, Putz B)

Es konnten Kalk-Zement-Mörtel und Gipsmörtel identifiziert werden. Die höhere Festigkeit des Mörtels „Sorte 6h“ gegenüber „Sorte 6w“ ist v.a. durch den wesentlich höheren Zementgehalt in „6h“ begründet.

Der Putz B erwies sich als Gipsputz mit mineralischen Zuschlägen (Sand) sowie einem Leichtzuschlag (Perlite). Ein weiterer Gipsputz, im Unterschied zu „Putz B“ allerdings ohne jegliche Zuschläge, konnte als Bestandteil des Baustoffgemisches CBR-FH identifiziert werden.

**Baustoffgemische:** ( Bezeichnung: CBR-0 und CBR-FH)

Für die vergleichende Untersuchung des Ausgangsmaterials (CBR-0) mit dem frostbeanspruchten Material (CBR-FH) wurden größere Körner in den Dünnschliffen untersucht, also die Körner, die den Frostversuch „überstanden“ hatten.

Bemerkenswert war, dass die Probe CBR-FH einen Gipsputz enthielt, der trotz Frostbeanspruchung keinerlei Risse aufwies.

Beide Proben enthielten Kalksandstein und Beton.

An den Kalksandsteinen waren mit und ohne Frost keinerlei Auffälligkeiten bzw. Unterschiede nachweisbar (homogen und abgesehen von einigen kurzen Mikrorissen nahezu rissfrei).

Die Betonkörner beider Proben weisen die oben an RCB 2 und RCB 3 beschriebenen Mikrorisse auf. Eine signifikante Zunahme oder Verbreiterung der Risse war nicht nachweisbar.



## 11 Literatur

- [1] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB), Ausgabe 2004/Fassung 2007, FGSV-Verlag, Köln
- [2] Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB), Ausgabe 2004/Fassung 2007, FGSV-Verlag, Köln
- [3] Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG vom 27.09.1994 BGBl. 1, S. 22705 ff, 1994
- [4] DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren, Ausgabe 2006, Beuth-Verlag, Berlin
- [5] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) - Teil 3.1.5 Stoffliche Kennzeichnung von RC-Baustoffen, Ausgabe 2008, FGSV-Verlag, Köln
- [6] DIN EN 933-4: Prüfverfahren für geometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl, Ausgabe 2008, Beuth-Verlag, Berlin
- [7] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Ausgabe 2005, Beuth-Verlag, Berlin
- [8] DIN EN 1097-7: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller, Ausgabe 2008, Beuth-Verlag, Berlin
- [9] DIN 52009: Prüfverfahren für Gesteinskörnungen – Bestimmung der Wasseraufnahme unter Druck, Ausgabe 2006, Beuth-Verlag, Berlin
- [10] DIN EN 1936: Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, Ausgabe 2007, Beuth-Verlag, Berlin
- [11] DIN EN 1367-1: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterung von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel, Ausgabe 2007, Beuth-Verlag, Berlin
- [12] DIN EN 1367-6: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterung von Gesteinskörnungen – Teil 6: Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel in Gegenwart von Salz, Ausgabe 2008, Beuth-Verlag, Berlin
- [13] DIN EN 1097-1: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zerkümmern, Ausgabe 2006, Beuth-Verlag, Berlin
- [14] DIN EN 13286-2: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt - Proctorversuch, Ausgabe 2004, Beuth-Verlag, Berlin
- [15] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, Prüfungen, Steinmaterial RVS 11.06.27 Durchlässigkeit im Labor, Ausgabe September 2000, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr (FSV), Wien
- [16] Radenberg, M., Kollar, J.: Entwicklung eines Laborverfahrens zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Baustoffgemischen für Tragschichten ohne Bindemittel, FE 06.084/2006/FGB, Projektabschluss Ende 2009 (bisher nicht veröffentlicht), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

- [17] Lottmann, A.; Haltenroth, G.; Richter, F.: Bemessungsgrundlagen für den frostsicheren Oberbau von Verkehrsflächen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 879, Januar 2004, BMVBW, Bonn
- [18] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, Prüfungen, Steinmaterial RVS 11.06.21 Frosthebungsversuche, Ausgabe August 1999, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr (FSV), Wien
- [19] Weingart, W.; Wieland, M.: Weiterentwicklung des Frosthebungsversuchs, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 927, November 2005, BMVBW, Bonn
- [20] Arbeitsanweisung zum Frosthebungsversuch im Rahmen des Ringversuchs (unveröffentlicht), Bundesanstalt für Straßenwesen, AP 05 321/S2, Dezember 2006, Bergisch Gladbach
- [21] Wieland, M.: Weiterentwicklung des Frosthebungsversuches, Vortrag im Rahmen des Forschungsprojektes [19], 2004
- [22] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB), Teil B 7.1: CBR-Versuch, Ausgabe 1988, FGSV-Verlag, Köln
- [23] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) - Teil 6.3.2 Widerstand von Baustoffgemischen gegen Frost-Tau-Wechsel, Ausgabe 2008, FGSV-Verlag, Köln
- [24] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB) - Teil 7.1.2 Trogverfahren, Ausgabe 2008, FGSV-Verlag, Köln
- [25] DIN 19528: Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen, Ausgabe 2009, Beuth-Verlag, Berlin
- [26] DIN ISO 11465: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockensubstanz und des Wassergehaltes auf Grundlage der Masse, Ausgabe 1996, Beuth-Verlag, Berlin
- [27] Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, Mitteilung 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen – Technische Regeln (LAGA), Teil II und Teil III, 5. erweiterte Auflage 2003
- [28] Arbeitsentwurf der Verordnung zur Regelung des Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und Änderung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, Stand: 13.11.2007, BMU, Berlin
- [29] ÖNorm 4811: Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau, Beurteilung der Frostsicherheit, Ausgabe 2001, Wien
- [30] Wehner, B.; Siedek, P.; Schulze, K.-H.: Handbuch des Straßenbaus, Band 2 Baustoffe, Bauweisen, Baudurchführung, Springer-Verlag, 1977
- [31] Radenberg, M.; Kollar, J.: Entwicklung eines Laborverfahrens zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Baustoffgemischen für Tragschichten ohne Bindemittel, FE 06.084/2006/FGB, Bundesanstalt für Straßenwesen, August 2009
- [32] Krass, K.; Kollar, J.: Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen FE 06.073/2000/FGB, 2003
- [33] Eden, W.; Kurkowski, H.; Schießl, P.; Friedl, L.; Krass, K.; Mesters, K.: Eignung von Kalksandstein-Recycling-Material für die Baustoffindustrie, Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. AiF-Nr 12785-N, 2003

- [34] DIN 18130-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit, Teil 1: Laborversuche, Ausgabe 1998, Beuth-Verlag, Berlin
- [35] Floss, R.: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau, 2. Auflage, Kirschbaum Verlag, 1997
- [36] Diabaswerk Halbeswig GmbH & Co.KG Halbeswig, 59909 Bestwig

**Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV**  
**des Bundesverbandes Kalksandsteinindustrie eV**  
**Entenfangweg 15**  
**30419 Hannover**  
**Telefon: 05 11 / 279 54-0**  
**Telefax: 05 11 / 279 54-54**  
**E-Mail: [wolfgang.eden@kalksandstein.de](mailto:wolfgang.eden@kalksandstein.de)**

Mitglied der  
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen  
„Otto von Guericke“ e.V.  
- AiF - , Köln