

Dr.-Ing. Wolfgang Eden
Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg
Dipl.-Ing. Nina Nytus
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski



Eignungsnachweis von Tragschichten ohne Bindemittel mit erhöhten Anteilen an rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk - Erprobungsstrecke in praxi

Forschungsbericht Nr. 127, März 2019



Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV

Eignungsnachweis von Tragschichten ohne Bindemittel mit erhöhten Anteilen an rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk – Erprobungsstrecke in praxi

Berichtersteller:

Dr.-Ing. Wolfgang Eden

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover

Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg

Dipl.-Ing. Nina Nytus

Lehrstuhl für Verkehrswegebau der
Ruhr-Universität Bochum

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski

Bimolab gGmbH, Soest

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 18119-N der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Impressum

Forschungsbericht Nr. 127

„Eignungsnachweis von Tragschichten ohne Bindemittel mit erhöhten Anteilen an
rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk – Erprobungsstrecke in praxi“
Ausgabe März 2019

Herausgeber:
Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover
Entenfangweg 15
30419 Hannover

INHALTSVERZEICHNIS

1.	ZUSAMMENFASSUNG	5
2.	EINLEITUNG.....	6
3.	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM.....	9
3.1	Allgemeines	9
3.2	Arbeitspaket 1: Charakterisierung der Bandbreite des Kalksandstein-Mauerwerks.....	12
3.2.1	Sichtung und Beschaffung der sortenreinen und der gipshaltigen Ausgangsmaterialien	12
3.2.2	Chemisch-mineralogische und physikalische Charakterisierung des Kalksandstein-Mauerwerks	12
3.2.3	Straßenbautechnische Charakterisierung der drei aufbereiteten Kalksandstein- Abbruchmaterialien	12
3.2.4	Erprobung von Schnelltestmethoden zur Erkennung von Gipsputzen	13
3.2.5	Abrasionsversuche im Technikum zur Abtrennung von Gipsputzanteilen von Kalksandstein-Mauerwerk	14
3.3	Arbeitspaket 2: Eignungsuntersuchungen des ausgewählten (sortenreinen) KS-Materials für die Erprobungsstrecke	19
3.3.1	Herstellung von sortenreinem Kalksandsteinmaterial (0/32) für das AP3	19
3.3.2	Chemisch-mineralogische und physikalische Analyse an Stichproben.....	19
3.3.3	Straßenbautechnische Untersuchung des KS-Materials an Stichproben.....	19
3.4	Arbeitspaket 3: Auswahl der KS-ToB-Gemische, Bau und wissenschaftliche Begleitung der Erprobungsstrecke über zwei Winterperioden	20
3.4.1	Großtechnische Aufbereitung des Kalksandstein-Recycling-Materials	20
3.4.2	Straßenbautechnische Charakterisierung der hergestellten KS-ToB-Gemische	21
3.4.3	Herstellung der Erprobungsstrecke	23
3.4.4	Wetterdaten	26
3.4.5	Straßenbautechnische Untersuchungen während des Baus der Erprobungs- strecke	28
3.4.6	Straßenbautechnische Charakterisierung der hergestellten ToB- Gemische 0/32 mit 0, 20, 30 und 40 M.-% KS-Anteil	31
3.4.7	Straßenbautechnische Messungen auf den Versuchsfeldern der Erprobungsstrecke	32
4.	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	37
4.1	Arbeitspaket 1: Ausgangsstoffe und Abrasionsversuche	37
4.1.1	Charakterisierung der Bandbreite des Kalksandstein-Mauerwerks.....	37
4.1.2	Ergebnisse der Abrasionsversuche zur Gipsabtrennung	40
4.1.3	Bestimmung des Sulfatgehaltes des abgelösten Gipsputzes.....	42
4.1.4	Bestimmung des Sulfatgehaltes der Kalksandstein-Ausgangsmaterial von verschiedenen Recyclinghöfen	46

4.2	Arbeitspaket 2: Eignungsuntersuchungen des ausgewählten sortenreinen KS-Materials für die Erprobungsstrecke	47
4.2.1	Korngrößenverteilung	47
4.2.2	Kornform.....	48
4.2.3	Widerstand gegen Zertrümmerung	48
4.2.4	Stoffliche Zusammensetzung	48
4.2.5	Trockenrohdichte, Wasseraufnahme, Reindichte und Porosität	49
4.2.6	Wasserdurchlässigkeit	49
4.2.7	Frostwiderstand.....	50
4.2.8	Proctorversuche	52
4.2.9	Frosthebungs- und CBR-Versuche	53
4.2.10	Kornverfeinerungen.....	55
4.3	Arbeitspaket 3: Auswahl der KS-ToB-Gemische, Bau und wissenschaftliche Begleitung der Erprobungsstrecke über zwei Winterperioden	57
4.3.1	Straßenbautechnische Untersuchungen während des Baus der Erprobungs- strecke.....	57
4.3.2	Straßenbautechnische Charakterisierung der hergestellten ToB- Gemische 0/32 mit 0, 20, 30 und 40 M.-% KS-Anteil	60
4.3.3	Straßenbautechnische Messungen auf den Versuchsfeldern der Erprobungs- strecke.....	66
4.3.3.1	Ebenheitsmessungen.....	66
4.3.3.2	Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken	71
4.3.3.3	Ergebnisse der FWD-Messungen	74
4.4	Bewertung der Ergebnisse	85
4.4.1	Bewertung der Laborversuche	85
4.4.2	Bewertung der Feldversuche	86
4.4.2.1	Bewertung der Materialeigenschaften.....	86
4.4.2.2	Bewertung der Oberbaueigenschaften.....	87
4.5	Abschließende Bewertung der Ergebnisse	88
5.	BILDVERZEICHNIS.....	89
6.	TABELLENVERZEICHNIS	91
7.	LITERATUR.....	92

1. ZUSAMMENFASSUNG

Das Recycling von Baustoffen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Für ein umweltverträgliches Recycling von Mauerwerk und KS-Produktionsabfällen sind Fragen der Kreislaufführung von steigender Bedeutung. Seit Beginn der industriellen Kalksandsteinproduktion in 1894 wurden in Deutschland rd. 1,1 Mrd. Tonnen Kalksandsteine produziert, welches nach und nach dem Recycling zugeführt wird.

Kalksandstein ist ein autoklavgehärteter Baustoff, hergestellt aus quarzitischem Sand und Branntkalk (CaO). Kalksandsteine werden in den Festigkeitsklassen 12 bis 28 [N/mm²] und in unterschiedlichen Rohdichteklassen von 1,2 bis 2,2 [kg/dm³] für tragendes und nicht tragendes Mauerwerk hergestellt. Kalksandstein-Mauerwerk wird in der Regel mit Kalk-Zement- oder Gips-Putzen versehen und enthält anorganischen Mauermörtel.

RC-Baustoffe dürfen gemäß dem gültigen Regelwerk des Verkehrswegebau Bestandteile aus Kalksandstein enthalten. In der TL Gestein-StB wird als Anforderung an die Zusammensetzung eines RC-Baustoffes ein maximaler Kalksandsteinanteil, Putz und ähnlichen Stoffen von lediglich 5 M.-% zugelassen. Dieser geringe (ungewollte) Mengenanteil ist in der Praxis der Grund, warum eine gezielte Zugabe von Kalksandstein zu einem ToB-Baustoffgemisch noch nicht möglich war.

Mit dem ersten Teil dieses AiF-Forschungsvorhabens (AiF-Nr. 15517-N) konnte auf Laborebene aufgezeigt werden, dass eine weit höhere Zugabemenge von bis zu 40 M.-% rezykliertem Kalksandstein im RC-Baustoffgemisch möglich ist. Dabei ist eine Trennung von Kalksandstein und Gipsputz vor der Herstellung des Recycling-Baustoffgemisches zwingend notwendig.

Im Rahmen des nun abgeschlossenen Anschlussvorhaben (Teil 2: AiF-Nr. 18119-N) wurden die positiven Laborergebnisse in der Praxis erprobt und Versuche zur sicheren Erkennung und Abtrennung (Abrasionsversuche) von Gipsputz von Kalksandsteinen durchgeführt. Mit begleitenden Untersuchungen an einer Erprobungsstrecke in Hessisch Lichtenau wurde das Verhalten von RC-Baustoffgemischen mit erhöhter Kalksandsteinzugabe unter den Einflüssen von Wetter und Verkehr im Großmaßstab in situ untersucht.

Die Untersuchungen im Rahmen der Labor- und Feldversuche haben gezeigt, dass mit Kornmischungen aus Betongranulat und Kalksandsteingranulat Tragschichten ohne Bindemittel hergestellt werden können, die den Anforderungen an eine solche Tragschicht für den Verkehrswegebau genügen. Für die hierzu angelegte Erprobungsfläche wurden bewusst ungünstige Voraussetzungen gewählt (geringe Asphaltstärke, höhere Frosteinwirkung). Die Erprobungsfläche hat mittlerweile eine Nutzungsdauer von fast drei Jahren.

Die Ergebnisse dieses Vorhabens sollen künftig in das aktuelle Regelwerk (TL Gestein-StB) einfließen. Die wirtschaftliche Bedeutung des Vorhabens liegt darin, die Verwertungsraten von Mauerwerk aus Kalksandsteinen aus Rückbau- und Abbruchmaßnahmen deutlich zu steigern und auf einem hohen Qualitätsniveau im Stoffkreislauf zu halten. Die angestrebten Forschungsergebnisse kommen sowohl der Kalksandsteinindustrie (KMU) als auch der Recyclingindustrie (KMU) und der Straßenbauindustrie zugute und können direkt umgesetzt werden.

Die Untersuchungen mit einer Attritionstrommel zur Abtrennung des Gipsputzes vom Kalksandsteinmaterial waren erfolgreich. Die Schnelltests zur Detektion von Gipsputz haben sich ebenfalls als geeignet erwiesen.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

2. EINLEITUNG

In den vergangenen Jahren hat die praktische Umsetzung des Kalksandsteinrecyclings langsam aber stetig zugenommen. Eine flächendeckende Verwertung von Kalksandstein-Recycling-Baustoffen in der Praxis ist jedoch noch nicht gegeben. Als höherwertige Einsatzmöglichkeit im Straßenbau ist die Verwendung von Kalksandstein-Material für den Bereich Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) mit angestrebten stofflichen Anteilen von bis zu 40 M.-% denkbar. Für den Wandbaustoff Ziegel ist dieser Nachweis bereits gegeben und in das straßenbautechnische Regelwerk eingeflossen [Kras]. Ein analoger Nachweis für Kalksandsteinmaterial mit ähnlichen Produkteigenschaften ist im Labormaßstab mit dem Teil 1 dieses Projektes ebenfalls bereits gelungen [Ede1] und konnte nun anhand einer Praxiserprobung großtechnisch nachgewiesen werden.

Bei der Eignungsbewertung von Kalksandstein-Recycling-Material ist zu beachten, das Kalksandsteinmauerwerk zunehmend mit Gipsputz anfällt, der sich negativ auf die Dauerhaftigkeit von Baustoffen des Straßenoberbaus auswirkt. Im Rahmen dieses Projektes wurden deshalb neben dem Eignungstest von rezykliertem KS-Mauerwerk für ToB auch Möglichkeiten zur Erkennung und Abtrennung solcher Gipsputzanteile aufgezeigt. Der innovative Beitrag dieser Forschungsarbeit besteht deshalb darin, dass mit der Verwendung von RC-Baustoffen mit erhöhtem Anteil an Kalksandsteinen im Straßenoberbau deutlich höhere Mengen an Kalksandstein-Material hochwertig im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes wiederverwendet werden können.

Dieses Forschungsvorhaben wurde im Vorfeld mit dem Bundesvereinigung Recyclingbaustoffe e.V. (BRB) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) abgestimmt.

Kalksandsteine

Kalksandsteine werden aus Sand, Branntkalk und Wasser hergestellt. Als Gesteinskörnungen werden meistens Quarzsande oder auch gebrochenes Natursteinmaterial eingesetzt. Die Rohstoffe werden im erdfeuchten Zustand mechanisch verdichtet und anschließend in Autoklaven unter gespanntem Wasserdampf gehärtet. Im Wesentlichen finden während dieser Hydrothermalhärtung im Porenraum der Kalksandstein-Rohlinge Reaktionen zwischen dem Kalkhydrat und der gelösten Kieselsäure statt. Dabei bilden sich dauerhafte Calciumsilikathydrate (CSH-Phasen), die dem Gefüge der Kalksandsteine ihre Festigkeit verleihen. Die Dauer der Dampfhärtung beträgt in der Regel $t_h = 6$ bis 12 Stunden und findet bei Temperaturen um $T_h = 200$ °C und einem zugehörigen Wasserdampfdruck von bis zu $p_e = 16$ bar statt.

Mengensituation

Die deutsche Bauwirtschaft hat im Rahmen einer Selbstverpflichtung zwischen 1995 und 2016 den Nachweis erbracht, dass rund 90 Prozent der jährlich anfallenden mineralischen Bauabfälle wiederverwertet werden. Durchschnittlich sind in diesem Zeitraum jährlich rd. 80 Mio. t Bauschutt, Straßenaufbruch und Baustellenabfälle sowie rd. 140 Mio. t Bodenaushub angefallen. Dabei erfolgte die Verwertung der mineralischen Abfälle überwiegend im Rahmen der Verfüllung von Abgrabungen zum Zwecke der Rekultivierung und im Straßen-, Tief- und Landschaftsbau.

Mit dem Monitoring-Bericht von 2014 [MonB] erbrachte die Bauwirtschaft den Nachweis nahezu vollständig geschlossener Stoffkreisläufe für das Jahr 2014 und leistete damit einen wichtigen Beitrag zur Diskussion über Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz. Der Monitoring-Bericht basiert auf amtlichen Daten des Statistischen Bundesamtes und dokumentiert die Ergebnisse der Umweltstatistik für den Bereich der mineralischen Bauabfälle [StBu]. Die Zuordnung der statistisch ermittelten Mengen erfolgt über Abfallschlüsselnummern.

In 2016 wurden insgesamt rd. 566,5 Mio. t Gesteinskörnungen produziert. Neben den 72,2 Mio. t Recycling-Baustoffen (12,7 %) wurden rd. 247 Mio. t (43,6 %) Kiese und Sande, rd. 218 Mio. t (38,5 %) Natursteine und rd. 29,3 Mio. t (5,2 %) industrielle Nebenprodukte (z. B. Aschen und Schlacken) hergestellt. Damit deckten die Recycling-Baustoffe einen Anteil von rd. 13 Prozent des Bedarfs an Gesteinskörnungen. Die stolzen Wiederwendungsquoten des Monitoringberichtes dürfen jedoch nicht davon ablenken, dass im Bereich der hochwertigen Verwertung noch ein großer Spielraum zur Veränderung/Verbesserung herrscht. [MonB]. Gemäß veröffentlichter Fachserie 19, Reihe 1, Umwelt-Abfallentsorgung 2010 des Statistischen Bundesamtes [StBu] gab es für die mineralische Abfallentsorgung 2010 bereits über 2.000 Bauschuttzubereitungsanlagen in Deutschland (rd. 750 stationäre oder semistationäre und rd. 1.300 mobile Anlagen).

Da es für rückgebautes Kalksandsteinmauerwerk keine eigene Abfallschlüsselnummer gibt, liegen keine genauen Zahlen zu Abfall und Verwertung in diesem speziellen Bereich vor. Kalksandsteinmauerwerk wird daher überwiegend unter der Schlüsselnummer 17 01 07 "Gemische aus Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik" von den Aufbereitungsunternehmen angenommen. Für diese Schlüsselnummer wurde 2016 eine Anfallmenge von rd. 16 Mio. t ermittelt. Da es sich um Gemische handelt, können hieraus keine exakten Anfallmengen an Kalksandsteinmauerwerk abgeleitet werden. Geht man von dieser Neuproduktion aus und setzt man 50 % als anfallendes Rückbaumaterial aus Kalksandstein an, kommt man schätzungsweise auf eine jährliche Entfallmenge von rd. 4 Mio. t deutschlandweit, die mindestens für eine hochwertige Verwertung als ToB zur Verfügung stehen können.

Stand der Nutzung von Kalksandstein-Bruchmaterial

Derzeit werden KS-Produktionsabfälle und KS-Abbruchmaterial in stationären oder mobilen Recycling-Anlagen aufbereitet und vorwiegend als stoffliche Bestandteile von Verfüllmaterial im Erdbau sowie auch im geringem Maße für untergeordnete Flächen des land- und forstwirtschaftlichen Wegebbaus verwendet. Eine weitere Verwertungsmöglichkeit bietet nach Eden [Ede2, Ede3, Ede4, Ede5] die Zugabe von sortenreinem KS-Bruchmaterial von max. 10 M.-% bei der Produktion neuer Kalksandsteine, i.d.R. ohne die Qualität negativ zu beeinflussen. Diese hochwertige Verwendung wird heute jedoch lediglich von denjenigen KS-Herstellern praktiziert, die mit Hilfe von vollautomatischen Sägeanlagen konfektionierte KS-Bausätze (KS-Planelemente) anbieten. Hier fällt aufgrund der Verfahrenstechnik ein entsprechend großer sortenreiner Schnittabfall an. Dieser positiv zu wertende Ansatz der KS-Industrie kann jedoch nur einen geringen Teil der anfallenden Sekundär-Rohstoffe in den Stoffkreislauf einbeziehen.

Recycling von Kalksandstein-Material im Straßenbau

Bei der Aufbereitung von Kalksandstein-Abbruchmaterialien entstehen rezyklierte grobe und feine Gesteinskörnungen aus Kalksandstein mit anhaftenden Resten von Putz und Mörtel. Die Kornrohdichten der groben Körnungen liegen aufgrund deren Porosität in einer Bandbreite von 1,8 bis 1,9 kg/dm³. Die Kornrohdichten der feinen Körnungen hingegen liegen bei ca. 2,60 bis 2,65 kg/dm³. Die Wasseraufnahme der KS-RC-Materialien korreliert mit den Kornrohdichten und ergibt Werte bei groben Körnungen in der Größenordnung von ca. 15 M.-% und bei den feinen Körnungen von ca. 12 M.-%. Der Grund hierfür ist im Aufschluss des porigen Gefüges beim Brechen zu suchen. Die Wasseraufnahme von Kalksandsteinen liegt mit ca. 12 bis 15 M.-% in der gleichen Größenordnung wie bei Ziegelsteinen, so dass die Eignung von Kalksandstein-Recycling-Material für Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) in analoger Weise zu erwarten ist.

Das hinsichtlich der Wiederverwendungsmenge von mineralischen Recycling-Baustoffen bedeutsamste Einsatzgebiet für mineralische Recycling-Baustoffe im Verkehrswegebau sind Tragschichten ohne Bindemittel (ToB), welche in Frostschutz- und Schottertragschichten untergliedert werden. Für eine solche Verwendung müssen die rezyklierten Baustoffgemische dauerhaft ausreichend tragfähig, wasserdurchlässig und frostsicher sein.

RC-Baustoffe dürfen gemäß dem derzeit gültigen Regelwerk des Verkehrswegebbaus Bestandteile aus Kalksandstein enthalten, deren Eigenschaften je nach mineralischer Zusammensetzung variieren. Im Anhang B der TL Gestein-StB wird derzeit als Anforderung an die stoffliche Zusammensetzung eines RC-Baustoffes ein maximaler Anteil an Kalksandstein, Putzen und ähnlichen Stoffen von lediglich 5 M.-% (in Sinne von ungewollten Mengenanteilen) akzeptiert. Dieser geringe zugelassene Mengenanteil ist in der Praxis der Grund, warum eine gezielte Zugabe von Kalksandstein zu einem ToB-Baustoffgemisch bislang noch nicht möglich war.

In der Praxis fallen in den Aufbereitungsanlagen als Eingangsmaterial oftmals jedoch deutlich höhere Mengen an rückgebautem Kalksandstein-Mauerwerk an. Dem entsprechend enthalten auch die RC-Baustoffe unterschiedliche, zum Teil viel höhere Anteile an Kalksandstein, die die Grenzwerte der TL Gestein-StB überschreiten. Dieses Material kann nach derzeit geltenden Vorschriften im Oberbau von Verkehrswegen noch nicht eingesetzt werden und wird deshalb entgegen dem Sinn des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes fast ausschließlich für untergeordnete Verfüllmaßnahmen verwendet.

3. UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

3.1 Allgemeines

Im Rahmen der Voruntersuchungen an Kalksandsteinen unterschiedlicher Herkunft wurden drei aufbereitete Kalksandstein-Abbruchmaterialien (KS) und ein Beton-Recycling-Baustoff (RCB) untersucht. Bei den aufbereiteten KS-Abbruchmaterialien handelte es sich um einen reinen Kalksandstein (KS), ein Kalksandstein mit Mörtel (KSM) und eine Kalksandstein mit Mörtel und Putz (KSMP).

Für den Bau der Erprobungsstrecke wurden rd. 120 t sortenreines Kalksandsteinmaterial aus einem Kalksandsteinwerk beschafft und zur Baustelle nach Hessisch Lichtenau transportiert (Eigenmittel). Gemische für eine Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) mit 0, 20, 30 und 40 M.-% KS-Anteil und entsprechenden Anteilen an RC-Beton (100, 80, 70 und 60 M.-%) hergestellt, die anschließend untersucht wurden. Die Gemische werden nachfolgend entsprechend ihres KS-Anteils bezeichnet.

Das Untersuchungsprogramm wird nachfolgend erläutert:

Das aus einem Kalksandsteinwerk beschaffte sortenreine Kalksandsteinmaterial (Verschnitt und Ausschussware, siehe Bilder 1 und 2) wurde großtechnisch auf die Zielkorngroße 0/32 mm zerkleinert. Das gebrochene Material wurde in eine (Frostschutz- bzw.) Schottertragschicht eines Auslieferungsparkplatzes als ToB im direkten Vergleich zu einem Referenzmaterial, z.B. aus Naturstein oder RC-Beton in einem weiteren Abschnitt eingebaut. Aufgrund der in der Praxis vorherrschenden Gewichtung der Bauweisen des Straßenbaus wurde eine Bauweise mit einem Asphaltoberbau gewählt.



*Bild 1:
Sortenreines Kalksandsteinmaterial aus einem Kalksandsteinwerk – ohne anhaftende Reste anderer Baustoffe*



*Bild 2:
Sortenreines Kalksandsteinmaterial aus einem Kalksandsteinwerk – ohne anhaftende Reste anderer Baustoffe*

Untersuchungsablauf

Arbeitspaket 1

Charakterisierung der Bandbreite des Kalksandstein-Materials

Arbeitspaket 2

Eignungsuntersuchungen des ausgewählten (sortenreinen) KS-Materials für die Erprobungsstrecke

Arbeitspaket 3

Auswahl der KS-ToB-Gemische, Bau und wissenschaftliche Begleitung der Erprobungsstrecke
Über zwei Winterperioden

*Bild 3:
Schematischer Ablauf des Projektes*

3.2 Arbeitspaket 1: Charakterisierung der Bandbreite des Kalksandstein-Mauerwerks

3.2.1 Sichtung und Beschaffung der sortenreinen und der gipshaltigen Ausgangsmaterialien

Zur Abdeckung der in der Praxis vorkommenden Bandbreite der Kalksandstein-Recycling-Materialgemische wurden von drei unterschiedlichen Recycling-Aufbereitungsanlagen aus verschiedenen Regionen Deutschlands mehrere Proben entnommen und analysiert. Für die Schnellanalytik von Gips bzw. Sulfat wurden aus statistischen Gründen zwölf Praxisproben in die Untersuchung mit einbezogen.

Probenahme von 12 stückigen KS-Mauerwerksproben für die Forschungsstelle 1 für die Schnellanalytik/Gipsputzdetektion

Probenahme von 3 stückigen KS-Mauerwerksproben für die Forschungsstelle 1 für die chemisch-mineralogische Charakterisierung

3.2.2 Chemisch-mineralogische und physikalische Charakterisierung des Kalksandstein-Mauerwerks

Die chemisch-mineralogische und physikalische Charakterisierung der Abbruchmaterialien wurde vor der Aufbereitung an Bruchstücken bestimmt.

- Art und Form des Wandbausteins
- Putz- und Mörtelart und -dicken
- Steindruckfestigkeit nach DIN EN 772-1
- Rohdichte nach DIN EN 772-13
- Porosität (Quecksilberhochdruckporosimetrie)
- Maximale Wasseraufnahme nach DIN EN 772-11
- Mineralische Zusammensetzung zur Klassifizierung und
- Bestimmung der KS-Ausgangswandbausteine
- Chemisch-mineralogische Analyse (RFA, DTA)

3.2.3 Straßenbautechnische Charakterisierung der drei aufbereiteten Kalksandstein-Abbruchmaterialien

An den aufbereiteten RC-Baustoffen aus 100% Kalksandsteinmauerwerk in der Körnung 0/32 mm wurden die straßenbautechnischen Kennwerte ermittelt.

- Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1
- Kornform nach DIN EN 933-3
- Kornrohichte nach DIN EN 1097-6
- Stoffliche Zusammensetzung nach MRC
- Widerstand gegen Zertrümmerung nach DIN EN 1097-2
- Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6
- Wasserdurchlässigkeit (Standrohr-Infiltrrometer)
- Porosität (Standzylinder, volumetrisch)
- Festigkeit (CBR-Versuch, Kornverfeinerung) nach TP BF-StB
- Frostwiderstandsfähigkeit und -empfindlichkeit (Frosthebungsversuch)

3.2.4 Erprobung von Schnelltestmethoden zur Erkennung von Gipsputzen

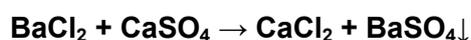
Zur Erkennung von Gipsputzanteilen wurden folgende drei Schnellverfahren vergleichend angewendet:

- a) Sulfatfällung mittels Bariumchlorid: Bei diesem nasschemischen Schnelltest wird die Probe mit einer Bariumchloridlösung versetzt. Ist Gips vorhanden, fällt Bariumsulfat aus und führt zu einer Trübung der Lösung [Lau1].
- b) Spektrofotometrie: Sulfat als Anion kann mittels Spektrofotometrie (UV-Vis, Küvettentest) detektiert werden [Lie1, Hac1]
- c) Indikatorstäbchen: Mit Hilfe von Indikatorstäbchen wird vergleichend zur groben Abschätzung an wässrigen Auszügen (Eluaten) der Feststoffproben der Sulfatgehalt halbquantitativ bestimmt. Der Nachweis beruht auf der Reaktion von Sulfat-Ionen mit einem roten Thorin-Bariumkomplex, welche gelbes Thorin freisetzen.

Der Schnellerkennung von Sulfat, z.B. aus Gips-Putz, bei der Aufbereitung von Bauschutt aus Mauerwerk kommt heute eine bedeutende Rolle zum Nachweis der Umweltverträglichkeit in Klassen (z.B. nach LAGA) zur Sicherstellung der Qualitätsmerkmale von RC-Baustoffen zu. Sulfate können z.B. in Gipsputz, Anhydritestrich und auch Zementbaustoffen enthalten sein. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde geprüft, ob sich Gipsbestandteile an Kalksandsteinmauerwerk mit verschiedenen Putz- und Mörtelanhaftungen, welches einer Aufbereitung zu Recycling-Baustoffen zugeführt werden soll, eindeutig per Schnellverfahren nachweisen lässt. Ein Verfahren, welches angewendet werden sollte, nutzt die aus der Chemie bekannte Sulfatbestimmung mit Bariumchlorid. Für die Prüfung wurden rd. 50 Proben und weitere Referenzmaterialien von verschiedenen RC-Anlagen in Deutschland untersucht.

zu a) Versuchsbeschreibung der Sulfatbestimmung mit Bariumchlorid

Die zu prüfenden Proben wurden auf eine Korngröße kleiner 8 mm mechanisch zerkleinert und in ein Becherglas mit destilliertem Wasser gegeben. Als Prüfmenge wurde eine Menge von 10 g gemäß „Schad- und Störstoffe im Bauschutt schnell erkennen und messen“ der Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. mit 100 ml destilliertem Wasser unter dreimaligem wiederholtem Rühren eluiert. Danach wurde das Eluat sedimentiert, bis sich eine klare überstehende Flüssigkeit gebildet hatte. Von dem klaren Eluat wurden ca. 25 ml dekantiert und in ein Reagenzglas gegeben. In das Reagenzglas mit dem Eluat wurden anschließend 3 Tropfen 10-prozentige Bariumchloridlösung (BaCl_2 -Lösung) mittel Pipette gegeben. Bei diesem nasschemischen Schnelltest wird die Probe somit mit einer Bariumchloridlösung versetzt. Ist Sulfat z.B. aus Gips vorhanden, fällt Bariumsulfat aus und führt zu einer Trübung der Lösung nach folgender Reaktionsgleichung:



Bei der Versuchsdurchführung wurde ein erkennbarer dichter weißer Niederschlag als Positiv-Nachweis (++) gewertet. Ergab sich ein geringer schlierenartiger Niederschlag, wurde die Positiv-Wertung mit (+) beurteilt. Kein erkennbarer Niederschlag ergab eine Negativ-Bewertung (-). Die Messreihe mit einem Wasser-/Feststoff-Verhältnis von 10:1 wurde analog auch mit einem Verhältnis von 5:1 durchgeführt. Es ergaben sich die in der Tabelle 9 aufgeführten Ergebnisse.

3.2.5 Abrasionsversuche im Technikum zur Abtrennung von Gipsputzanteilen von Kalksandstein-Mauerwerk

Die Kalkulation des Masseanteils an Gipsputzmörtel im Recyclinggranulat aus Kalksandstein-Mauerwerk erfolgte unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen:

- Minimum: 5 mm Gipsputz, einseitig, Steinbreite: 365 mm, Bild 4, Masseanteil: rd. 1 M.-%
- Mittelwert: 10 mm Gipsputz, beidseitig, Steinbreite: 175 mm, Bild 5, Masseanteil: rd. 7 M.-%
- Maximum: 15 mm Gipsputz, beidseitig, Steinbreite: 115 mm, Bild 6, Masseanteil: rd. 21 M.-%

Die entsprechenden theoretischen Wandaufbauten sind in den Bildern 4 bis 6 abgebildet:

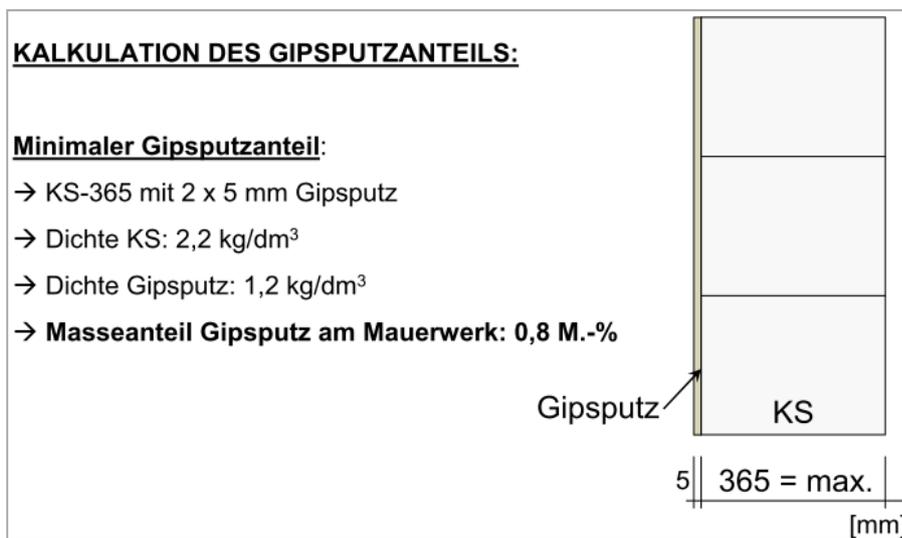


Bild 4:
Gipsputz, $d = 5$ mm, einseitig auf einer KS-Wand, Steinbreite: 365 mm

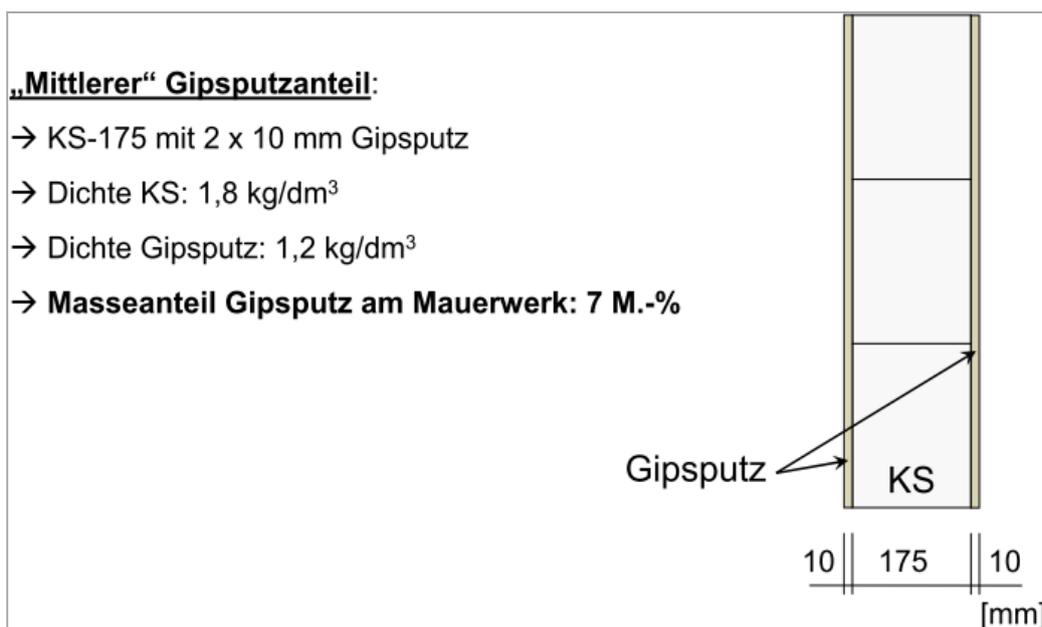


Bild 5:
Gipsputz, $d = 10$ mm, beidseitig auf einer KS-Wand, Steinbreite: 175 mm

Maximaler Gipsputzanteil = worst case:

→ KS-115 mit 2 x 15 mm Gipsputz

→ Dichte KS: 1,2 kg/dm³

→ Dichte Gipsputz: 1,2 kg/dm³

→ **Masseanteil Gipsputz am Mauerwerk: 21 M.-%**

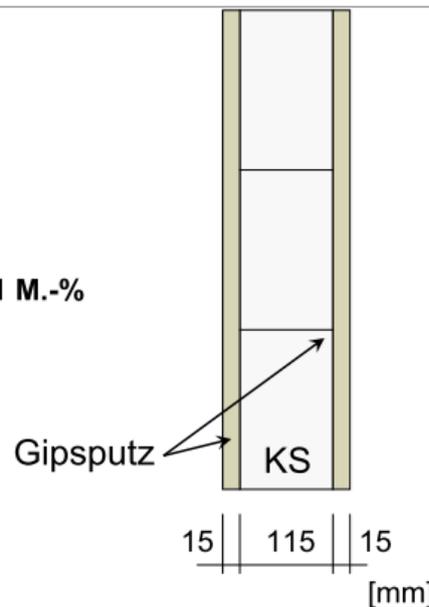


Bild 6:

Gipsputz, $d = 15$ mm, beidseitig auf einer KS-Wand, Steinbreite: 115 mm

Die Herstellung der Wandprüfkörper mit Gipsputz erfolgte in den Laborräumen der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. Dabei wurden für beide Putzschichtdicken (grün: 10 mm und rot: 5 mm) jeweils 100 Stück Kalksandsteine der Sorte KS-12-1,8-NF beschichtet und anschließend der Abrasionstrommel zugeführt, siehe Bild 7.

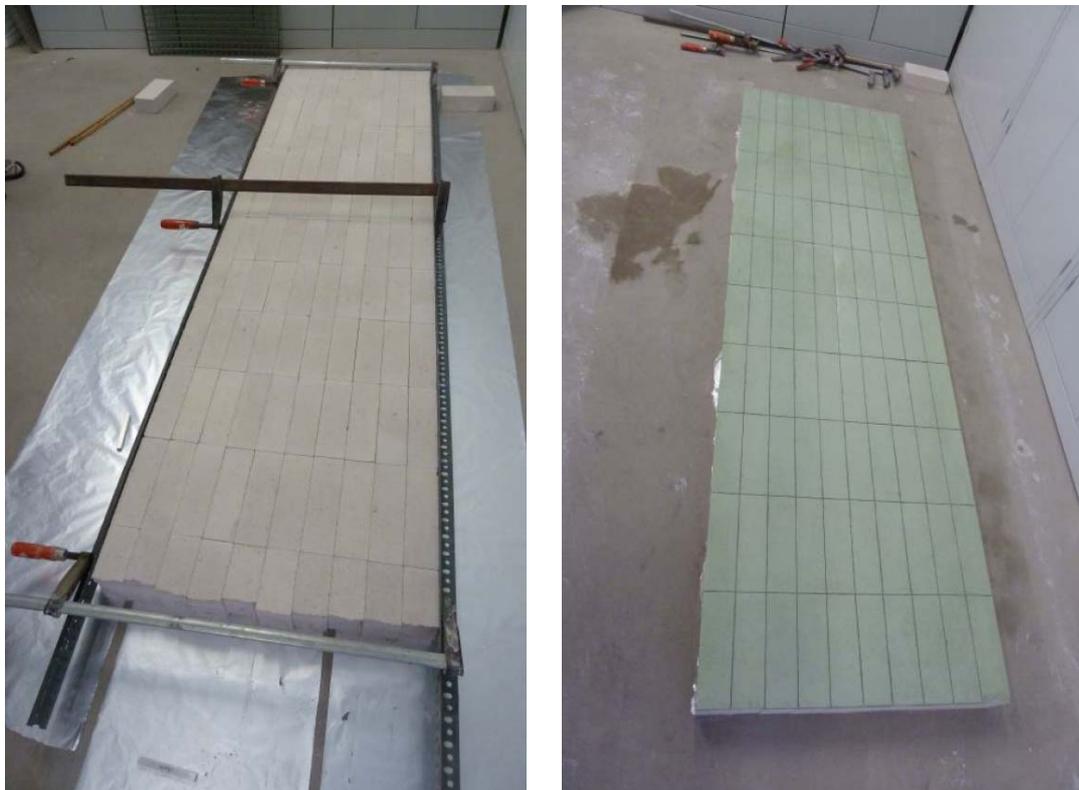


Bild 7:

Herstellung der Kalksandsteinprüfkörper mit Gipschicht, hier: $d = 10$ mm

Zur Durchführung der Abrasionsversuche wurden Mauerwerksprobestücke im Format KS-NF mit Gipsputz in 2 Stärken (5 mm und 10 mm beidseitig, 11,5 cm Mauersteindicke) angefertigt. Mit Hilfe einer Abrasionstrommel wurden unter Variation der mechanischen Beanspruchung (Umfangsgeschwindigkeit der Trommel, Dauer der Behandlung) Versuche zur Abtrennung von Gipsputz von den Kalksandsteinen durchgeführt. Das Ergebnis des Abtrennvorgangs wurde lichtmikroskopisch untersucht und zur Absicherung an Stichproben spektralfotometrisch (UV-Vis) bestätigt.

Für die Durchführung der Abrasionsversuche wurde eine spezielle Stahltrommel genutzt, die mit verschiedenen Einbauten ausgerüstet und mit unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten betrieben werden konnte. Die genutzte Polygon-Trommel besitzt 24 Seiten, bei einem Innendurchmesser von 1.000 mm und einer Innenbreite von 300 mm. Vorversuche ergaben, dass die Einbauten zweckmäßig für die Durchführung der Abrasionsversuche genutzt werden konnten. Ziel der zwei Varianten an Mitnehmern sollte die Verringerung der erzeugten Fallenergie zu Gunsten der erhöhten Reibungsenergie beinhalten, um die KS-Mauerwerkssteine bei der Abrasionsbehandlung möglichst nicht zu zerkleinern. Die verschiedenen Einbauten sind in Bild 8 dargestellt:

- Trommel mit 4 Mitnehmern mit 4 cm Breite (→ überwiegend Fallenergie)
- Trommel mit 8 Mitnehmern mit 2 cm Breite (→ Fallenergie und Reibungsenergie)

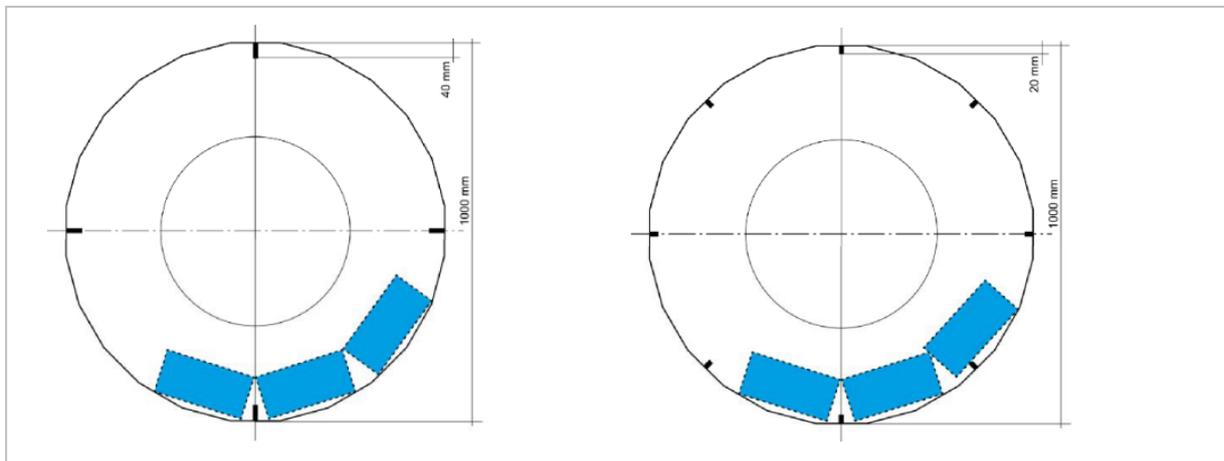


Bild 8:
Abrasionstrommel, links: 4 Mitnehmer, rechts: 8 Mitnehmer

Für jede Versuchsreihe wurden nacheinander neun Kalksandsteine (3 x 3 Stück) in die Trommel geben. Die Kalksandsteine im Normalformat wurden ohne (Referenz) mit 5 mm Gipsputz (zur besseren Erkennbarkeit rot eingefärbt) sowie 10 mm Gipsputz (grün eingefärbt) und bei zwei unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten geprüft. Der Versuchsbeginn erfolgte nach vollständiger Aushärtung und Trocknung der Kalksandsteine in einem Alter von ca. 6 Monaten. Es ergaben sich folgende Versuchsreihen für das Untersuchungsprogramm der Abrasionsversuche (Tabelle 1).

Versuchsreihe	Einbauten	Dicke des Gipsputzes (mm)	Umfangsgeschwindigkeit [m/s]
1	4 Mitnehmer Breite: 40 mm	ohne	0,35
2		10	
3		5	
4		ohne	0,25
5		10	
6		5	
7	8 Mitnehmer Breite: 20 mm	ohne	0,35
8		10	
9		5	
10		ohne	0,25
11		10	
12		5	

*Tabelle 1:
Untersuchungsprogramm zu den Abrasionsversuchen*

Die Bilder 9 bis 11 zeigen die für die Abrasionsversuche vorbereiteten Kalksandsteine.



*Bild 9:
Kalksandsteine KS-12-1,8-NF ohne Putz (Referenzserie)*



Bild 10:
Kalksandsteine KS-12-1,8-NF, beidseitig mit jeweils 10 mm Gipsputz (grün)



Bild 11:
Kalksandsteine KS-12-1,8-NF, beidseitig mit jeweils 5 mm Gipsputz (rot)

Die einzelnen Versuchsreihen wurden bis zu einer Dauer von 20 Minuten durchgeführt und alle 2,5 Minuten unterbrochen, um den fortschreitenden Abrasionserfolg beurteilen zu können. Die einzelnen Steine wurden dafür aus der Trommel entnommen, gewogen und fotografiert. Die Abrasionsbehandlung wurde beendet, wenn nahezu kein Gipsputz an den Kalksandsteinen mehr vorhanden war.

3.3 Arbeitspaket 2: Eignungsuntersuchungen des ausgewählten (sortenreinen) KS-Materials für die Erprobungsstrecke

3.3.1 Herstellung von sortenreinem Kalksandsteinmaterial (0/32) für das AP3

Auf einem Recyclinghof erfolgte die großtechnische Aufbereitung des KS-Mauerwerks-Ausgangsmaterials für die Erprobungsmaßnahme zu einer rezyklierten KS-Gesteinskörnung 0/32 mm (rd. 300 t).

3.3.2 Chemisch-mineralogische und physikalische Analyse an Stichproben

An den Stichproben der rezyklierten KS-Gesteinskörnung 0/32 wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Art und Form des Wandbausteins
- Putz- und Mörtelart und -dicken
- Steindruckfestigkeit nach DIN EN 772-1
- Rohdichte nach DIN EN 772-13
- Porosität (Quecksilberhochdruckporosimetrie)
- Maximale Wasseraufnahme nach DIN EN 772-11
- Mineralische Zusammensetzung zur Klassifizierung und
- Bestimmung der KS-Ausgangswandbausteine
- Chemisch-mineralogische Analyse (RFA, DTA)

3.3.3 Straßenbautechnische Untersuchung des KS-Materials an Stichproben

An den Stichproben der rezyklierten KS-Gesteinskörnung 0/32 wurden folgende straßenbautechnische Charakterisierung (Festigkeit und Frostbeständigkeit) durchgeführt:

- Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1
- Kornform nach DIN EN 933-3
- Kornrohichte nach DIN EN 1097-6
- Stoffliche Zusammensetzung nach MRC
- Widerstand gegen Zertrümmerung nach DIN EN 1097-2
- Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6
- Wasserdurchlässigkeit (Standrohr-Infiltrrometer)
- Porosität (Standzylinder, volumetrisch)
- Festigkeit (CBR-Versuch, Kornverfeinerung) nach TP BF-StB
- Frostwiderstandsfähigkeit und -empfindlichkeit (Frosthebungsversuch)

3.4 Arbeitspaket 3: Auswahl der KS-ToB-Gemische, Bau und wissenschaftliche Begleitung der Erprobungsstrecke über zwei Winterperioden

3.4.1 Großtechnische Aufbereitung des Kalksandstein-Recycling-Materials

Auf Basis der Laborergebnisse wurde für die praktische Erprobung ein RC-Baustoff mit verschieden hohen Anteilen an Kalksandsteinen aufbereitet. Für die Erprobungsstrecke wurden vier Abschnitte mit unterschiedlichen Mengenanteilen an sortenreinem KS-RC-Material gewählt, siehe Bild 12: Gestaffelter Aufbau der Erprobungsstrecke mit sukzessiver Steigerung des Anteils an KS-RC-Körnung:

- Probefeld 1: Referenzmaterial Beton/Naturstein (ohne KS-RC-Körnung 0/32)
- Probefeld 2: Austausch von Beton/Naturstein durch 20 M.-% an KS-RC-Körnung 0/32
- Probefeld 3: Austausch von Beton/Naturstein durch 30 M.-% an KS-RC-Körnung 0/32
- Probefeld 4: Austausch von Beton/Naturstein durch 40 M.-% an KS-RC-Körnung 0/32

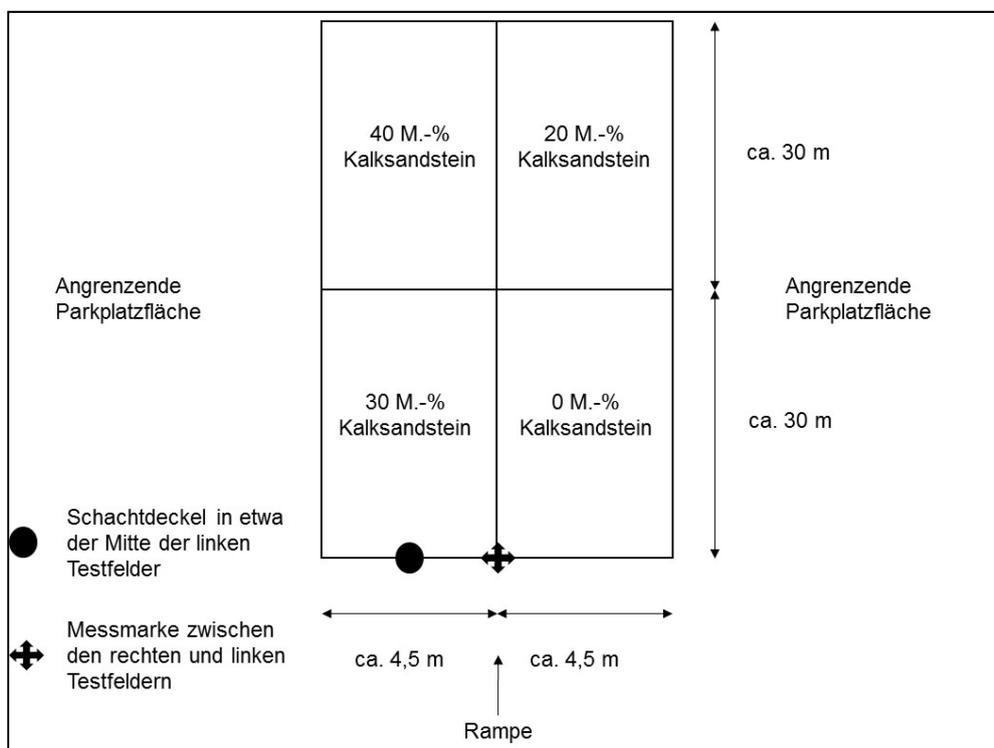


Bild 12:
Anordnung der Versuchsfelder

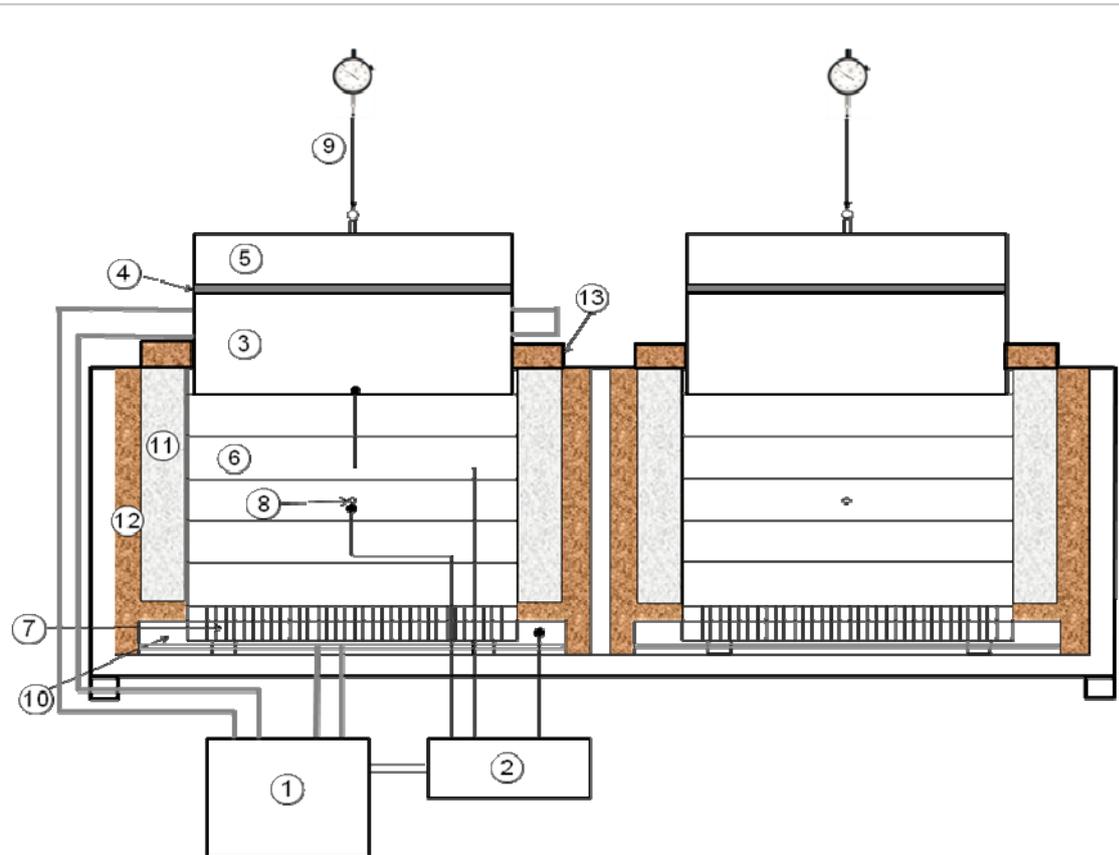
3.4.2 Straßenbautechnische Charakterisierung der hergestellten KS-ToB-Gemische

Zur straßenbautechnischen Charakterisierung der drei aufbereiteten KS-Abbruchmaterialien: reiner Kalksandstein (KS), Kalksandstein mit Mörtel (KSM), Kalksandstein mit Mörtel und Putz (KSMP) und dem Beton-Recycling-Baustoff (RCB) wurden die folgenden Untersuchungen nach den entsprechenden Regelwerken durchgeführt:

- Korngrößenverteilung gemäß [DIN EN 933-1]
- Kornform gemäß [DIN EN 933-4]
- Stoffliche Zusammensetzung gemäß [TP Gestein StB Teil 3.1.5]
- Widerstand gegen Zertrümmerung gemäß [DIN EN 1097-2]
- Dichte gemäß [DIN EN 1097-6 Anhang C.5]
- Wasseraufnahme gemäß [DIN EN 1097-6 Anhang C.5]
- Porosität gemäß [DIN EN 1936]
- Wasserdurchlässigkeit gemäß [DIN 18130-1]
- Frostwiderstandsfähigkeit gemäß [TP Gestein-StB Teil 6.3.2]
- Frostempfindlichkeit entsprechend der [Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil: Frosthebungsversuch (TP BF-StB, Teil: FHV), Entwurf 2009]
- Festigkeit (Kornverfeinerung nach CBR gemäß [TP BF-StB B 7.1, 2012] und dem Frosthebungsversuch nach [Wei1])

Beim Kalksandstein in den KSM- und KSMP-Gemischen handelt es sich augenscheinlich um ein anderes Material als bei dem sortenreinen Kalksandstein. Um den Einfluss der Frostempfindlichkeit von Mörtel und Putz ermitteln zu können, wurde der Kalksandstein aus diesen Gemischen separiert und ebenfalls in den Frosthebungsversuch eingebaut. Dieser wird im Folgenden aufgrund seiner ungewöhnlichen Farbe mit „KSgelb“ bezeichnet.

Der Frosthebungsversuch, wie er in diesem Projekt durchgeführt wurde, ist von [Wei1] auf Basis des österreichischen Verfahrens nach der [ÖNorm B 4810, 2013], welche die [RVS 11.06.21, 1999] ersetzt, weiter entwickelt worden. Bei diesem Versuch wird ein Baustoffgemisch in einen Teflonprüfzylinder mit einer Höhe von 12,5 cm und einem Innendurchmesser von 15 cm - mit Proctorenergie verdichtet - eingebaut. Die Probekörper stehen in einem Wasserbad mit einer Temperatur von $+ 1,5 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$ und die Befrostung erfolgt ausschließlich von der Oberseite. Nach einer 24-stündigen Vortemperierung bei $+ 1,5 \text{ °C}$ erfolgt die Befrostung so, dass die 0 °C -Isotherme in der Mitte des Prüfkörpers mit einem Temperaturgradienten von $0,38 \text{ K/Tag}$ innerhalb von vier Tagen erreicht wird. Während des Versuchs werden die Temperatur des Wasserbades, der Probe und der Probenoberseite sowie die Höhenänderung der Probe im Abstand von fünf Minuten aufgezeichnet. Die Prüfung erfolgt als Doppelbestimmung. Eine schematische Darstellung ist in Bild 13 zu sehen.



- 1 Kryostat für die Temperaturregelung des Kühlkopfes und für die indirekte Temperierung des Wasserbades auf + 1,5°C
- 2 Elektronische Regeleinheit mit Datenlogger
- 3 Kühkopf für die Befrostung des Prüfkörpers
- 4 Isolierplatte zwischen Kühkopf (3) und Edelstahlplatte (5)
- 5 Edelstahlplatte als Teil der Auflast
- 6 Prüfcylinder aus Teflon (Multiringzelle) Gelochte Grundplatte zum Prüfcylinder (6)
- 7 Temperaturfühler in Prüfkörpermitte
- 8 Elektronischer Wegaufnehmer
- 9 Wasserbad mit konstanter Temperatur von + 1,5 °C
- 10 Polystyrolring als Isolationsmaterial
- 11 isolierte Doppelwandung der Prüfkammer
- 12 Abdeckhaube mit passender Öffnung für die Belastungsmasse

Bild 13:
Schematische Darstellung des Prüfgerätes für den Frosthebungsversuch [Blu1]

In Österreich werden zur Bewertung der Frostsicherheit folgende Kennwerte verwendet [RVS 11.06.21, 1999]:

- Maximale Hebung: ≤ 15 mm
- Bleibende Hebung: < 2 mm
- Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag: ≤ 1 mm/d

In Deutschland sind zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Bewertungskriterien für den Frosthebungsversuch festgelegt. Im Rahmen des Forschungsprojektes FE 05.0181/2012/CRB mit dem Titel „Bewertungskriterien für den realitätsnahen Frosthebungsversuch“ wurden folgende Kriterien für RC-Baustoffgemische (Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation) vorgeschlagen [Radenberg, Flottmann 2018]:

- Integral der Frosteinwirkung: ≤ 43 mm/d (entspricht in etwa einer maximalen Frosthebung von 12 mm)
- Integral der Temperaturwirkung: ≤ 15 K · d

3.4.3 Herstellung der Erprobungsstrecke

In die Erprobungsstrecke für die Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) mit 0, 20, 30 und 40 M.-% KS-Anteilen wurde am 01.12.2016 und in der darauffolgenden Woche vom 06. bis 08.12.2016 die Asphalttragdeckschicht eingebaut. Die Strecke liegt auf einem ehemaligen Militärgelände (Blücher-Kaserne) in Hessisch Lichtenau und dient als Zufahrt zu einem Parkplatz eines Logistik-Unternehmens. Der Ort liegt ca. 400 m ü.N.N. und befindet sich gemäß RStO 12 in der Frosteinwirkungszone II. Die Größe der vier Versuchsfelder beträgt jeweils ca. 4,5 m x 30 m. In Bild 14 ist eine Skizze der Anordnung und in den Bildern 15 bis 18 sind Eindrücke zum Bau der Erprobungsstrecke zu sehen.

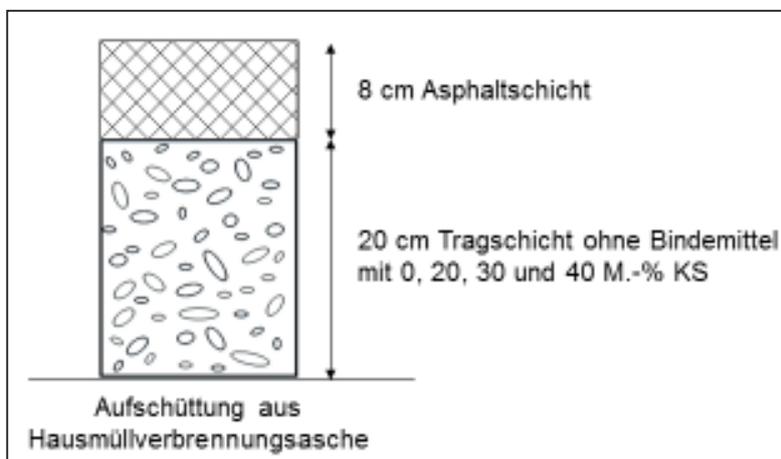


Bild 14:
Aufbau der Versuchsfelder



*Bild 15:
Kalksandsteinmaterial für die Tragschicht ohne Bindemittel 0/32 mm*



*Bild 16:
Einbau der Kalksandstein-Tragschicht 0/32 mm*



*Bild 17:
Einbau der Kalksandstein-Tragschicht 0/32 mm*



*Bild 18:
Ansicht der Versuchsfelder der Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) vor Einbau der Asphalttragdeckschicht*

3.4.4 Wetterdaten

Der Deutsche Wetterdienst betreibt im Umkreis von 30 km der Versuchsfelder drei Messstationen (Eschwege, Sontra und Schauenburg-Elgershausen), deren Daten vom 01.12.2016 bis 01.9.2018 zur Lufttemperatur im Tagesmittel und Tagesminimum ausgewertet wurden und in den Bildern 19 und 20 vergleichend dargestellt sind. Details zu den Messstationen sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Messstation	Messstationskoordinaten	Höhe über NN [m]
Eschwege	51° 12' N; 10° 0' O	156,0
Sontra	51° 3' N; 9° 55' O	265,0
Schauenburg-Elgershausen	51° 17' N; 9° 21' O	317,0

Tabelle 2:
Details der Messstationen des Deutschen Wetterdienstes im Umkreis der Versuchsfelder

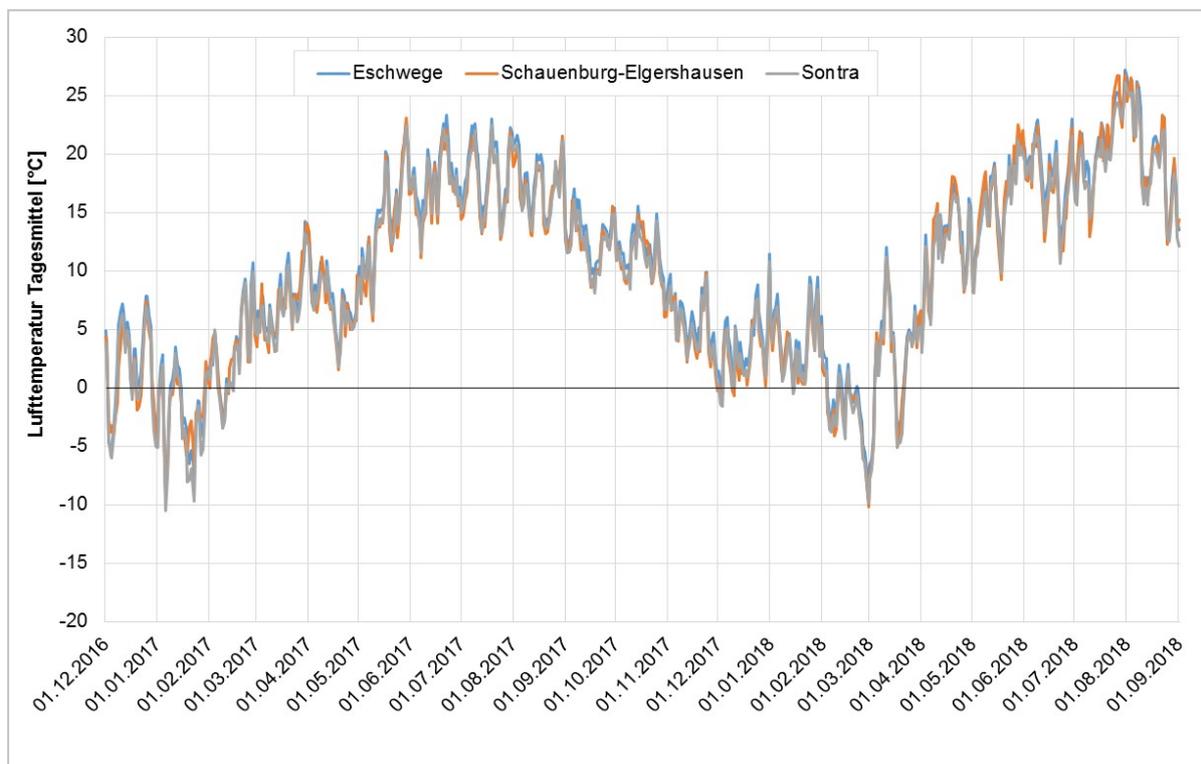


Bild 19:
Lufttemperatur Tagesmittel der Messstationen Eschwege, Sontra und Schauenburg-Elgershausen vom 1.12.2016 bis 1.9.2018 [DeWe]

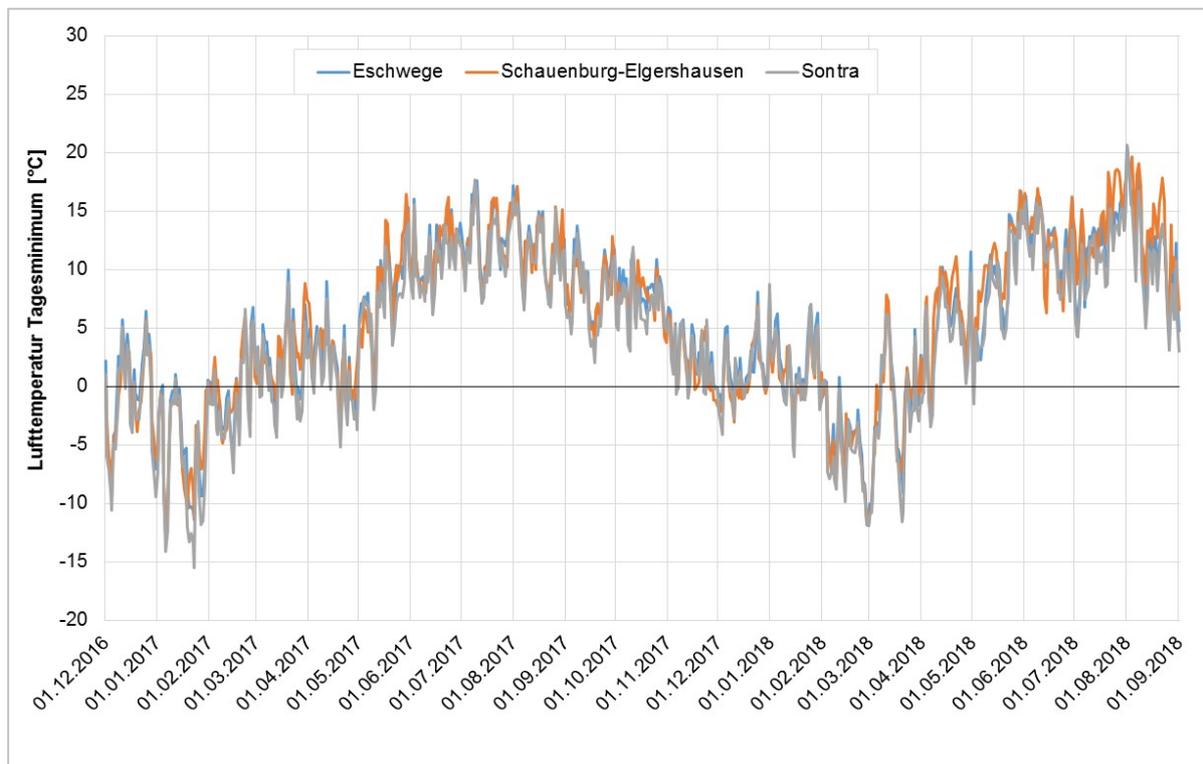


Bild 20:
 Lufttemperatur Tagesminima der Messstationen Eschwege, Sontra und Schauenburg-Elgershausen vom 1.12.2016 bis 1.9.2018 [DeWe]

3.4.5 Straßenbautechnische Untersuchungen während des Baus der Erprobungsstrecke

Vor dem Einbau der Asphalttragdeckschicht wurden auf den ToB die folgenden Eigenschaften der vier Versuchsfelder in situ bestimmt:

- Bestimmung der Dichte (Ballonverfahren und Flüssigkeitsersatz-Verfahren gemäß [DIN 18125-2])
- Wasserdurchlässigkeit gemäß [TP Gestein-StB 8.3.2]
- Ermittlung der Tragfähigkeiten mit dem statischen Plattendruckversuch gemäß [DIN 18134] und dem leichten Fallgewicht gemäß [TP BF-StB Teil B 8.3]

Mit dem Ballonverfahren gemäß DIN 18125-2 kann die Dichte des Bodens in Feldversuchen ermittelt werden. Eine Stahlringplatte mit einem Innendurchmesser von 200 mm wird dazu auf die Fläche plan aufgelegt und die Prüfgrube mindestens 50 mm tief ausgehoben. Vor dem Aushub wird das Ballongerät (Densitometer) auf die Stahlringplatte gestellt und auf der Oberfläche eine Nullablesung L0 durchgeführt. Dazu wird der Kolben soweit abgesenkt, dass der Ballon sich auf der Bodenoberfläche satt angelegt hat und der Flüssigkeitsspiegel im Standrohr zwischen die beiden Marken gestiegen ist. Am Nonius wird dann der Flüssigkeitsspiegel, die Nullablesung, abgelesen. Nach dem Aushub der Prüfgrube wird der Ballon erneut abgesenkt und die Lage des Kolbens abgelesen (L1), ohne dass der Nonius verschoben wurde. Das Volumen der Prüfgrube entspricht dem Flüssigkeitsvolumen, das der Kolben zwischen den beiden Ablesungen verdrängt hat. Die ausgehobene Probe wird im Labor bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend die trockene Masse der Probe ermittelt. Die Dichte berechnet sich dann als Quotienten aus Masse und Volumen. [DIN 18125-2]

Zudem wurde im Rahmen dieses Projektes das Flüssigkeitsersatz-Verfahren gemäß [DIN 18125-2] angewendet. Zur Volumenbestimmung wurde die für das Ballonverfahren ausgehobene Prüfgrube mit angerührter Bentonitschlämme aufgefüllt. Das Volumen der Prüfgrube wurde anschließend aus der Masse der verbrauchten Bentonitschlämme und deren Dichte ermittelt. Über die trockene Masse der ausgehobenen Probe kann dann, wie im Abschnitt zuvor beschrieben, die Dichte des Bodens berechnet werden.

Bei der Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit gemäß TP Gestein-StB 8.3.2 wird mit dem Standrohr-Infiltrometer (siehe Bild 21) die Zeit gemessen, „in der eine definierte Menge Wasser aus einem Zylinder (Standrohr) in die zu prüfende Schicht abfließt.“ [TP Gestein-StB 8.3.2] „Da eine vollständige Wassersättigung der zu prüfenden Schicht unter den in situ-Randbedingungen in aller Regel nicht erreicht wird, kann das Ergebnis eines Infiltrationsversuches nicht direkt mit der Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes gemäß DIN 18130-1 verglichen werden. In der Praxis wird mit einem Infiltrationsversuch eher ein geringeres Niveau gemessen.“ [TP Gestein-StB 8.3.2]

Da die Fließgeschwindigkeit des Wassers temperaturabhängig ist, wird der bei der gemessenen Wassertemperatur bestimmte Infiltrationsbeiwert auf eine Bezugstemperatur von 10 °C umgerechnet. Der Infiltrationsbeiwert $k_{i(10)}$ berechnet sich nach [TP Gestein-StB 8.3.2] wie folgt:

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

- $k_{i(10)}$ Infiltrationsbeiwert in m/s, umgerechnet auf die Wassertemperatur von 10 °C
 r_m Radius des Standrohres in m (= 0,03 m)
 r_0 Radius der Ausströmfläche in m (= 0,125 m)
 h_1, h_2 hydraulische Druckhöhe in m zum Zeitpunkt t_1, t_2 ($h_1 = 0,4$ m, $h_2 = 0,3$ m),
 (mittleres hydraulisches Gefälle: 1,75)
 Δt Zeitintervall $t_2 - t_1$ [s]
 α Temperaturkorrektur nach Poiseuille;

$$\alpha = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T_i + 0,00022 \cdot T_i^2}$$

 T_i Wassertemperatur beim Infiltrationsversuch in °C

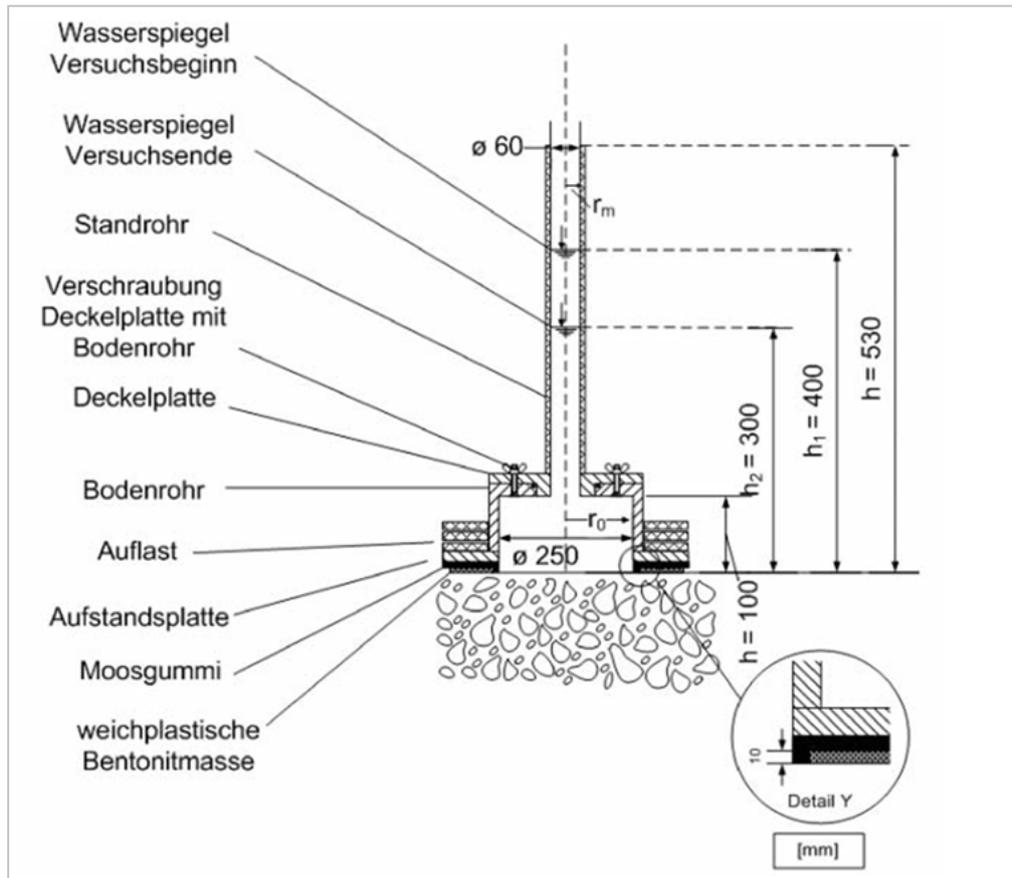


Bild 21:
 Schematische Darstellung des Modifizierten Standrohr-Infiltrometers [TP Gestein-StB 8.3.2]

Neben dem statischen Plattendruckversuch gemäß DIN 18134 wurde auch der dynamische Plattendruckversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz gemäß TP BF-StB Teil B 8.3 durchgeführt. Das Leichte Fallgewichtsgesetz eignet sich für grobkörnige und gemischtkörnige Böden bis zu einem Größtkorn von 63 mm und ist zur Ermittlung des dynamischen Verformungsmodul E_{vd} im Bereich von 15 MN/m² bis 70 MN/m² zulässig. Eine Prinzipskizze des Leichten Fallgewichtsgesetzes sowie das Messgerät der RUB sind in Bild 22 und 23 dargestellt. Der Boden wird über eine kreisförmige Lastplatte mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Dicke von 20 mm durch ein Fallgewicht (Masse = 10 kg) stoßartig mit der maximalen Kraft ($F_{max} = 7,07$ kN) belastet [TP BF-StB Teil B 8.3], siehe Bild 22.

Der dynamische Verformungsmodul E_{vd} berechnet sich nach [TP BF-StB Teil B 8.3] wie folgt:

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{max}}{s_{max}}$$

- s_{max} Mittelwert der Setzungen s_4 , s_5 und s_6 aus drei Messstößen nach drei Vorbelastungsstößen
 r Radius der Lastplatte
 σ_{max} Normalspannung unter der Lastplatte (0,1 MN/m²)

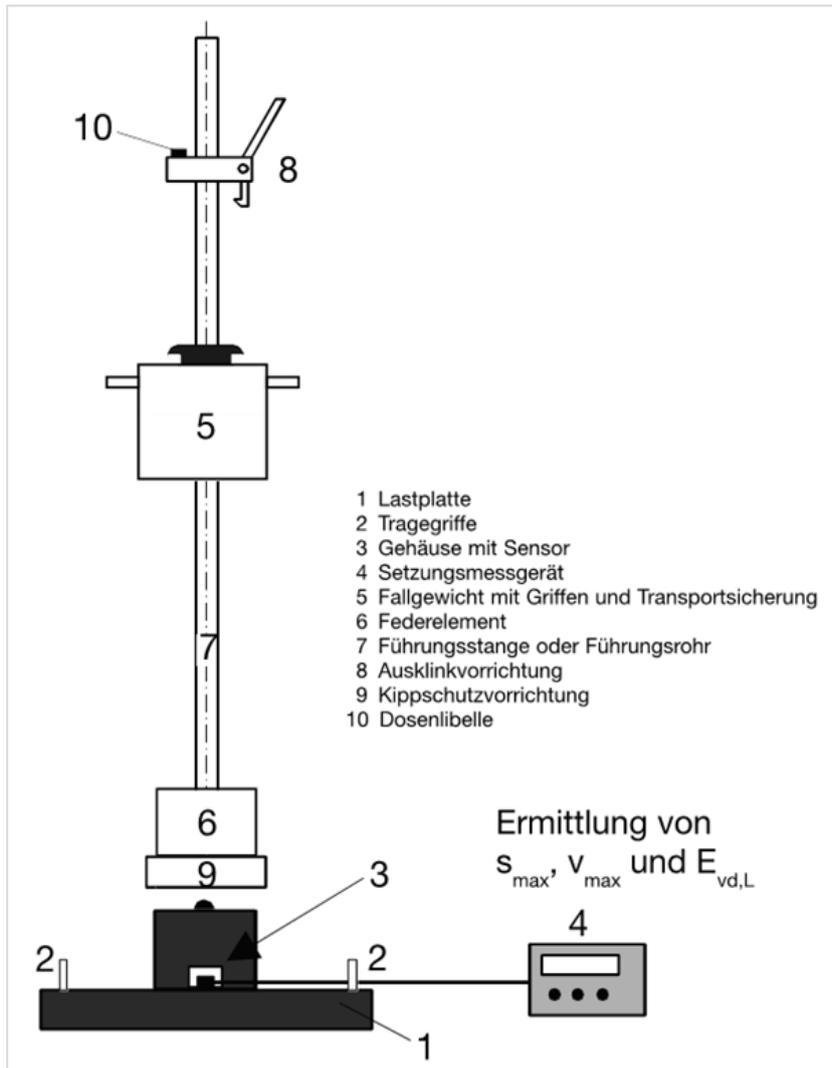


Bild 22:
 Prinzipskizze des leichten Fallgewichtsgeräts [TP BF-StB Teil B 8.3]



Bild 23:
Leichte Fallgewichtsgerät der RUB

3.4.6 Straßenbautechnische Charakterisierung der hergestellten ToB- Gemische 0/32 mit 0, 20, 30 und 40 M.-% KS-Anteil

Während des Einbaus der ToB-Gemische wurden ausreichende Probenmengen entnommen, um im Labor die folgenden Kennwerte zu ermitteln:

- Korngrößenverteilung gemäß [DIN EN 933-1]
- Kornform gemäß [DIN EN 933-4]
- Stoffliche Zusammensetzung gemäß [TP Gestein StB Teil 3.1.5]
- Widerstand gegen Zertrümmerung gemäß [DIN EN 1097-2]
- Dichte gemäß [DIN EN 1097-6 Anhang C.5]
- Wasseraufnahme gemäß [DIN EN 1097-6 Anhang C.5]
- Porosität gemäß [DIN EN 1936]
- Wasserdurchlässigkeit gemäß [TP Gestein-StB 8.3.1]
- Frostwiderstandsfähigkeit gemäß [DIN EN 1367-1]
- Frostempfindlichkeit entsprechend der [Arbeitsanweisung der Bundesanstalt für Straßenwesen zum Frosthebungsversuch im Rahmen des Ringversuchs]
- Festigkeit (Kornverfeinerung)

3.4.7 Straßenbautechnische Messungen auf den Versuchsfeldern der Erprobungsstrecke

Über einen Zeitraum von zwei Jahren wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Ebenheitsmessungen in Längs- und Querrichtung
- Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken gemäß dem Arbeitspapier Tragfähigkeit für Verkehrsflächenbefestigungen Teil B1 und Teil C1
- Ermittlung der Tragfähigkeit für Verkehrsflächenbefestigungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer (FWD) gemäß dem Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1

Tabelle 3 gibt eine Übersicht, zu welchem Zeitpunkt die jeweiligen Messungen durchgeführt wurden. Aufgrund des späten Einbaus der Versuchsfelder im Dezember 2016 konnten die Messungen direkt nach der Fertigstellung der Versuchsfelder nicht durchgeführt werden, da die Temperaturen zu niedrig waren und Bodenfrost vorlag. Die Messergebnisse hätten aufgrund des lang anhaltenden Bodenfrostes zu einer Überbewertung der Tragfähigkeit zu Beginn geführt. Dafür wurde ersatzweise ein Messtermin in der Auftauphase im April 2018 nach einer lang anhaltenden Frostperiode im Winter 2017/2018 angesetzt.

Die Ebenheit in Quer- und Längsrichtung der Versuchsfelder konnte nicht entsprechend der TP Eben Berührenden Messungen mit einer 4-m-Richtlatte oder dem Planografen gemessen werden, da im Versuchsfeld mit 20 M.-% KS aufgrund eines ungünstigen Gefälles selbst bei sehr guten Witterungsbedingungen immer große Pfützen auf der Asphaltoberfläche vorhanden waren. Am 07.06.2017 konnten die Messungen aufgrund von starken Niederschlag generell nicht durchgeführt werden. An den anderen Messtagen wurde die Ebenheit in Längsrichtung in der Mitte der Messfelder und die Ebenheit in Querrichtung ausgehend von einer Messmarke und dem Schachtdeckel am Anfang der Messfelder (siehe Tabelle 3) in einem Abstand von 6,5 m, 14,0 m, 36,0 m und 53,0 m ermittelt. Die Messungen wurden mit Hilfe einer Richtlatte und einem Nivelliergerät alle 20 cm durchgeführt.

Datum	Messverfahren
07.06.2017	Benkelman-Balken und FWD
07.12.2017	Ebenheitsmessungen sowie Benkelman-Balken
11.01.2018	FWD-Messungen
20.04.2018	Ebenheitsmessungen, Benkelman-Balken sowie FWD
17.08.2018	Ebenheitsmessungen, Benkelman-Balken sowie FWD

*Tabelle 3:
Übersicht über die Messtermine und die durchgeführten Messungen*

Zur Analyse des Einflusses von Frost auf die Tragfähigkeiten der vier ToB-Gemische wurden zum einen Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken nach dem Arbeitspapier Tragfähigkeit für Verkehrsflächenbefestigungen Teil B1 und Teil C1 und zum anderen von der Firma ZETCON Ingenieure FWD-Messungen nach dem Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1 auf der Oberfläche der Asphalttragdeckschicht durchgeführt.

Zusätzlich wurden an den Messpunkten der FWD- und Benkelman-Balken-Messungen am 20.4.2018 Bohrkerne (\varnothing 50 mm) aus der Asphalttragdeckschicht entnommen, um die tatsächlich vorhandenen Schichtdicken zu ermitteln.

Für die Messungen mit dem Benkelman-Balken wird ein zweiachsiger Lkw mit Zwillingsbereifung benötigt. Die Radlast an beiden Zwillingsreifen der Hinterachse soll im Regelfall je 5 t betragen, was einer Standard-Achslast von 10 t entspricht. Der Lkw dient als Belastungsfahrzeug. Über den Tastarm des Benkelman-Balkens (siehe Bilder 24 und 25) werden die Vertikalbewegungen des Messpunktes, welcher sich zwischen den Zwillingsreifen des Lkw befindet, auf die Messuhr am gegenüberliegenden Ende des Tastarmes übertragen. [AP Trag Teil B 1, 2014]. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Länge der Versuchsfelder von 30 m wurden die Einsenkungsmessungen alle 5 m in der Mitte der Versuchsfelder durchgeführt.

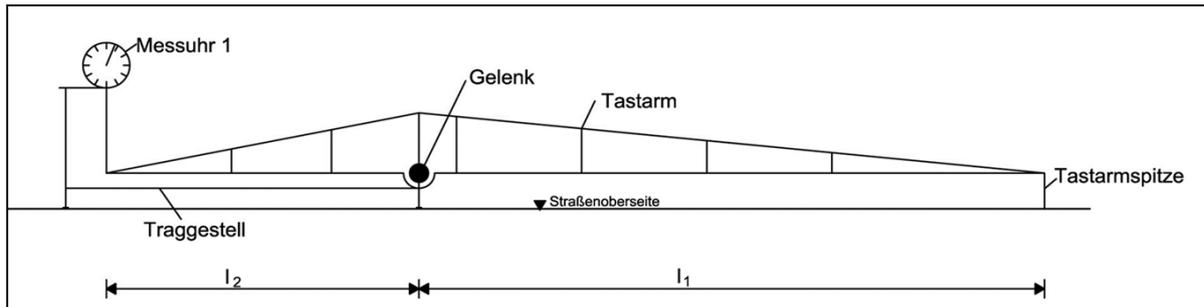


Bild 24:
Skizze Standard-Benkelman-Balken [AP Trag Teil B 1, 2014]



Bild 25:
Benkelman-Balken-Messung auf den Versuchsfeldern

Die gemessenen Einsenkungen werden wie folgt auf die Regel-Radlast von 5 t umgerechnet [AP Trag Teil B 1, 2014]:

$$w_{i, BB} = w_i \cdot \frac{5,00}{G_{rad}}$$

mit:

- $w_{i, BB}$ auf die Regel-Radlast von 5 t (50 kN) bezogene Einsenkungswerte [mm]
- w_i gemessene Einsenkungsgrenzwerte, bei denen die Radlast von der Regel-Radlast abwich [mm]
- G_{Rad} Radlast des zur Messung verwendeten Zwillingrades des Belastungsfahrzeuges [t]

Anschließend erfolgt die temperaturbezogene Umrechnung der Einsenkungsmesswerte entsprechend [AP Trag Teil C 1] auf eine Oberflächentemperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Umrechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$w_{0, BB, 20} = w_{0, BB} + (20 - T) \cdot 0,01$$

mit:

- $w_{0, BB, 20}$ Einsenkung [mm] an der Tastspitze des Tastarms (Messpunkt 0), zentral zwischen den Rädern des Zwillingradsatzes infolge einer Regel-Radsatzlast von $m = 5 \text{ t}$, bezogen auf eine Bezugsobertemperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $w_{0, BB}$ Einsenkung [mm] an der Tastspitze des Tastarms (Messpunkt 0), zentral zwischen den Rädern des Zwillingradsatzes infolge einer Regel-Radsatzlast von $M = 5 \text{ t}$, gemessen bei einer charakteristischen Obertemperatur T
- T Charakteristische Obertemperatur $T \text{ [}^\circ\text{C]}$ bei der Einsenkungsmessung

Die maßgebende Einsenkung ist der Mittelwert $\bar{w}_{0, BB, 20}$ der gemessenen Einsenkungen zuzüglich der Standardabweichung s . [AP Trag Teil C 1, 2014]

Die in Tabelle 4 angegebenen belastungs- bzw. bauklassenabhängigen Einsenkungsgrenzwerte gelten für einen Aufbau nach den RStO 01 bzw. RStO 12, Tafel 1, Zeile 1. Für die Bauklasse VI ist nach den RStO 01 ein Aufbau von $d = 10 \text{ cm}$ Asphalttragdeckschicht auf Frostschuttschicht vorgesehen, dieser Aufbau ist am ehesten mit dem Aufbau der Versuchsfelder zu vergleichen, sodass dieser Einsenkungsgrenzwert für die spätere Bewertung der gemessenen Einsenkungen herangezogen wird.

	Belastungsklasse					
	Bk3,2	Bk1,8	Bk1,0	Bk0,3		
Einsenkungsgrenzwert [mm]	0,41	0,44	0,48	0,57		
	Bauklasse					
	I	II	III	IV	V	VI
Einsenkungsgrenzwert [mm]	0,33	0,36	0,41	0,48	0,57	0,72

Tabelle 4: Mögliche belastungs- bzw. bauklassenabhängige Einsenkungsgrenzwerte für die Bauweise „Asphaltaufbau auf Tragschichten ohne Bindemittel“ aus [AP Trag Teil C 1, 2014 bzw. 2005] nach [Ley1]

Gemäß Definition gilt: „Das FWD ist ein dynamisches Messgerät, mit dem ein Kraftstoß mittels einer Fallmasse auf die Verkehrsfläche aufgebracht wird. Die sich dabei einstellende kurzzeitige vertikale Verformung der Verkehrsfläche wird im Lastzentrum sowie in verschiedenen Abständen von diesem mit Geofonen gemessen.“ [Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1, 2008]

Eine Prinzipskizze des Messverfahrens ist in Bild 26 dargestellt und in Bild 27 ist das FWD-Messgerät der Firma ZETCON Ingenieure auf einem der Versuchsfelder zu sehen. Die Messungen erfolgten analog zu den Messungen mit dem Benkelman-Balken alle 5 m jeweils in der Mitte der Versuchsfelder. Die Geofone wurden entsprechend den Empfehlungen des Arbeitspapiers Tragfähigkeit Teil B 2.1, wie in Tabelle 5 aufgeführt, angeordnet. „An jedem Messpunkt wurden drei Lastschläge eingeleitet. Die Größe der Belastung entspricht einer Radlast eines Lastkraftwagens in Höhe von 50 kN bzw. 0,707 N/mm² (~ 5 t bei Lastradius = 150 mm)“ [Zet1] .

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
0	200	300	450	600	900	1.200	1.500	1.800

Tabelle 5:
Anordnung der Geofone für FWD-Messungen auf Asphalt (Angaben in [mm])

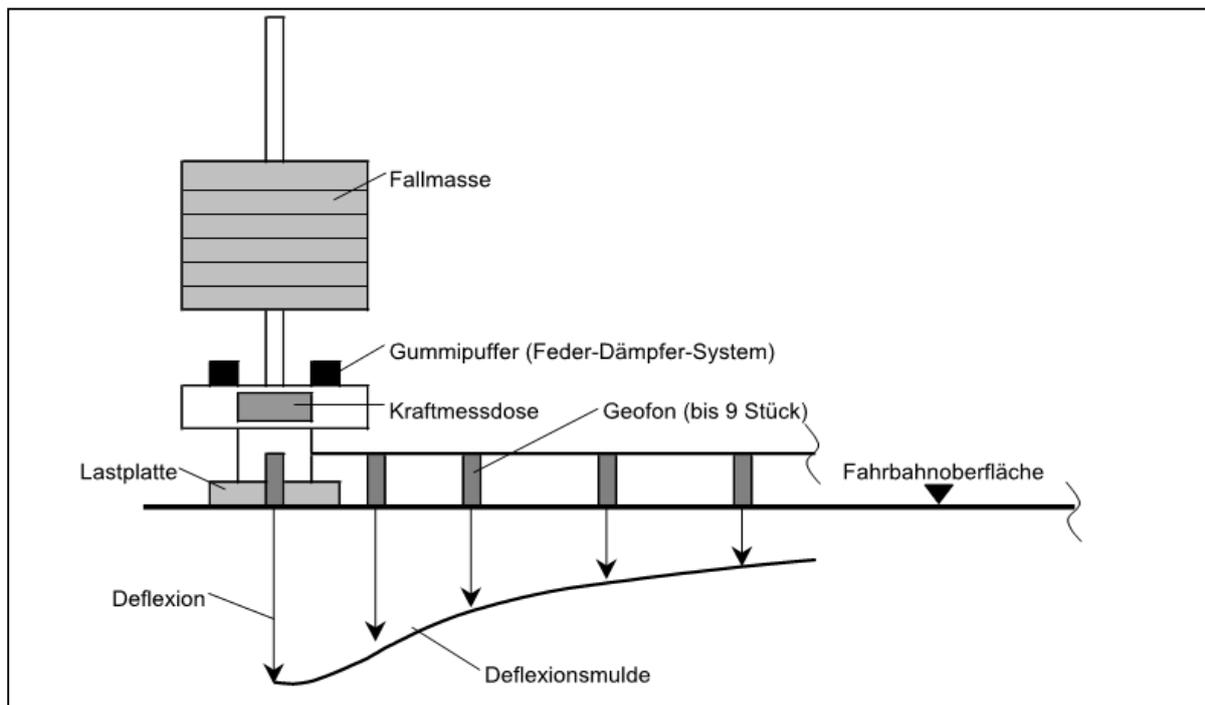


Bild 26:
Prinzipskizze des FWD-Messverfahrens [Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1, 2008]



*Bild 27:
Messgerät der Firma ZETCON Ingenieure auf einem Versuchsfeld*

4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Arbeitspaket 1: Ausgangsstoffe und Abrasionsversuche

4.1.1 Charakterisierung der Bandbreite des Kalksandstein-Mauerwerks

Charakterisierung der Kalksandsteine

Die Tabellen 6 und 7 geben die physikalischen Kennwerte sowie die chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials von den verschiedenen Recyclinghöfen bzw. des Kalksandsteinmaterials aus dem Kalksandsteinwerk für die Erprobungsstrecke wieder. Die Bilder 28 bis 31 zeigen vergleichend die Steindruckfestigkeiten und Steinrohdichten.

Format	Anhaftender Putz- bzw. Mauermörtel	Steindruckfestigkeitsklasse	Steinroh-dichte-klasse	Freikalkgehalt DTA	Hg-füllbare Porosität	Porenanteil < 0,05 µm	Porenanteil < 5 µm	Wasser-auf-nahme
		N/mm ²	kg/dm ³	M.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	M.-%
KS-XL-PE	nein	20	2,0	0,0	0,11	42,6	62,2	11,8
KS-3DF bis -10DF	gering	12	1,8	0,0	0,13	39,7	74,2	12,7
KS-3DF bis -10DF	ja	12	1,8	0,1	0,18	44,0	63,8	14,0
KS-3DF	ja	20	2,0	0,0	0,18	32,4	66,9	13,7
RFA	Anhaftender Putz- bzw. Mauermörtel	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Mischprobe	gering	96,3	1,4	0,2	0,1	1,7	0,2	0,1

Tabelle 6:
Kalksandstein-Ausgangsmaterial von den verschiedenen Recyclinghöfen

Format	Anhaftender Putz- bzw. Mauermörtel	Steindruckfestigkeitsklasse	Steinroh-dichte-klasse	Freikalkgehalt DTA	Hg-füllbare Porosität	Porenanteil < 0,05 µm	Porenanteil < 5 µm	Wasser-auf-nahme
		N/mm ²	kg/dm ³	M.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	M.-%
KS-3DF bis XL-PE	nein	12 bis 20	1,8 bis 2,0	0,0 bis 0,1	0,13 bis 0,17	33,5 bis 44,7	62,3 bis 70,1	12,9 bis 17,6
RFA	Anhaftender Putz- bzw. Mauermörtel	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
KS-3DF bis XL-PE	nein	95,1	0,7	0,5	1,8	1,4	0,2	0,3

Tabelle 7:
Sortenreines Kalksandstein-Ausgangsmaterial aus dem Kalksandsteinwerk

Steindruckfestigkeiten und Steinrohdichten der Kalksandsteine

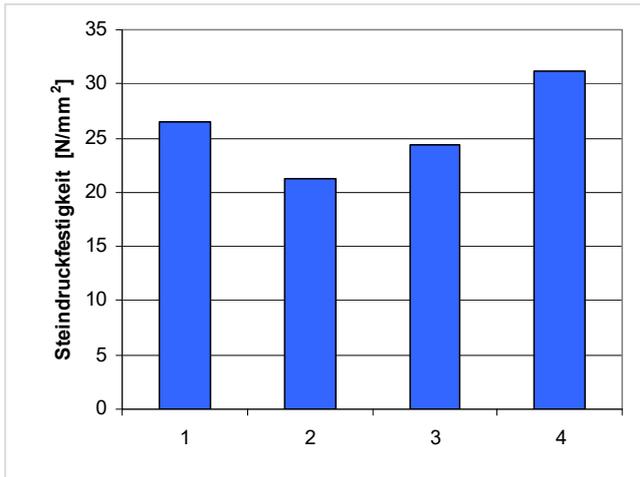


Bild 28:
Steindruckfestigkeiten der Steinproben von den Recyclinghöfen (ausgesägte Würfel der Kantenlänge 50 x 50 mm)

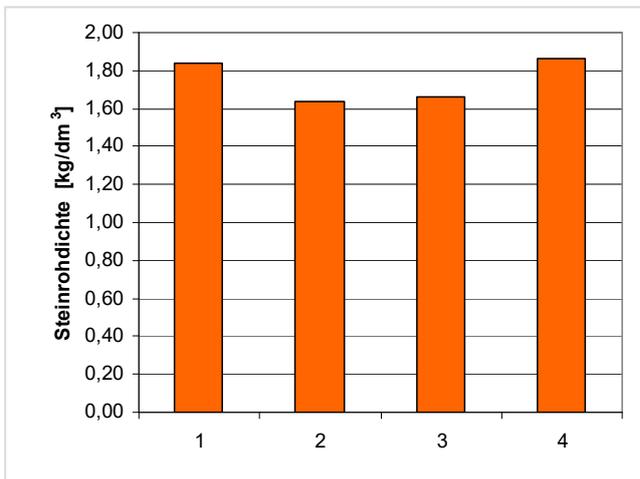


Bild 29:
Steinrohdichten der Steinproben von den Recyclinghöfen (ausgesägte Würfel der Kantenlänge 50 x 50 mm)

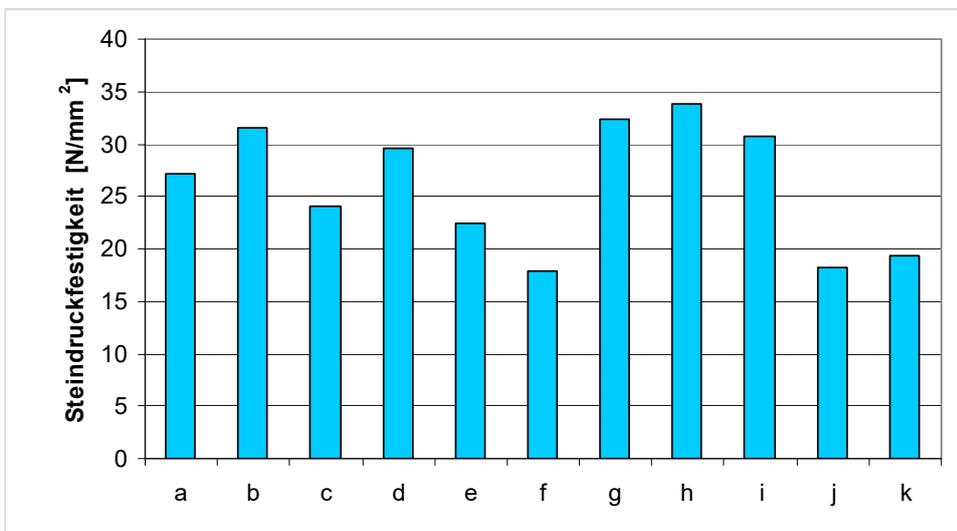


Bild 30:
Steindruckfestigkeiten der Steinproben aus dem Kalksandsteinwerk für die Erprobungsstrecke

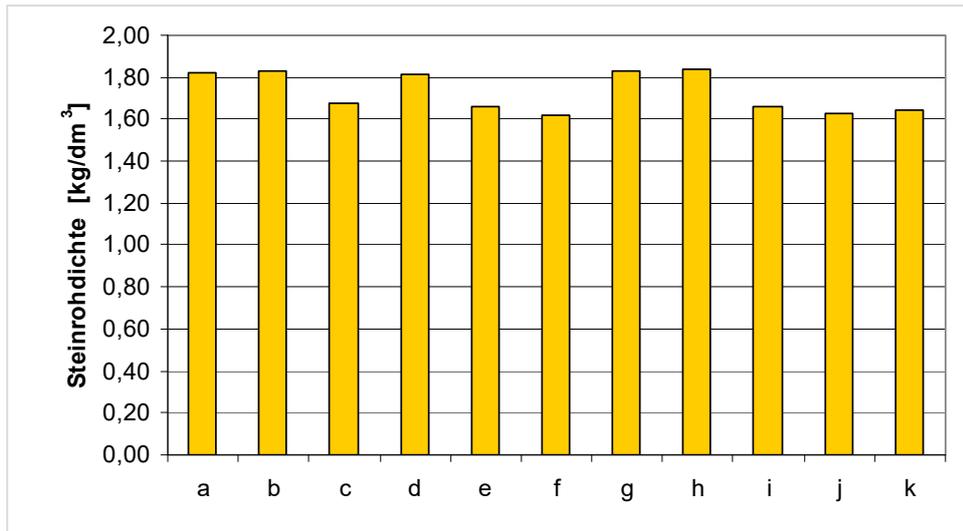


Bild 31:
Steinrohndichten der Steinproben aus dem Kalksandsteinwerk für die Erprobungsstrecke

4.1.2 Ergebnisse der Abrasionsversuche zur Gipsabtrennung

Bei der Durchführung der Versuchsreihen zur Abrasion von Gipsputz ergaben sich folgende Verläufe der Graphen, siehe Bilder 32 bis 35. Die blaue Kurve stellt für die unterschiedlichen Verfahrensbedingungen jeweils den Abrasionsverlust der geprüften Kalksandsteine ohne Gipsputz dar (Versuch 1). Die rote Kurve zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihen mit 5 mm Gipsputz (Versuch 3) und die grüne Kurve die mit 10 mm Gipsputz (Versuch 2).

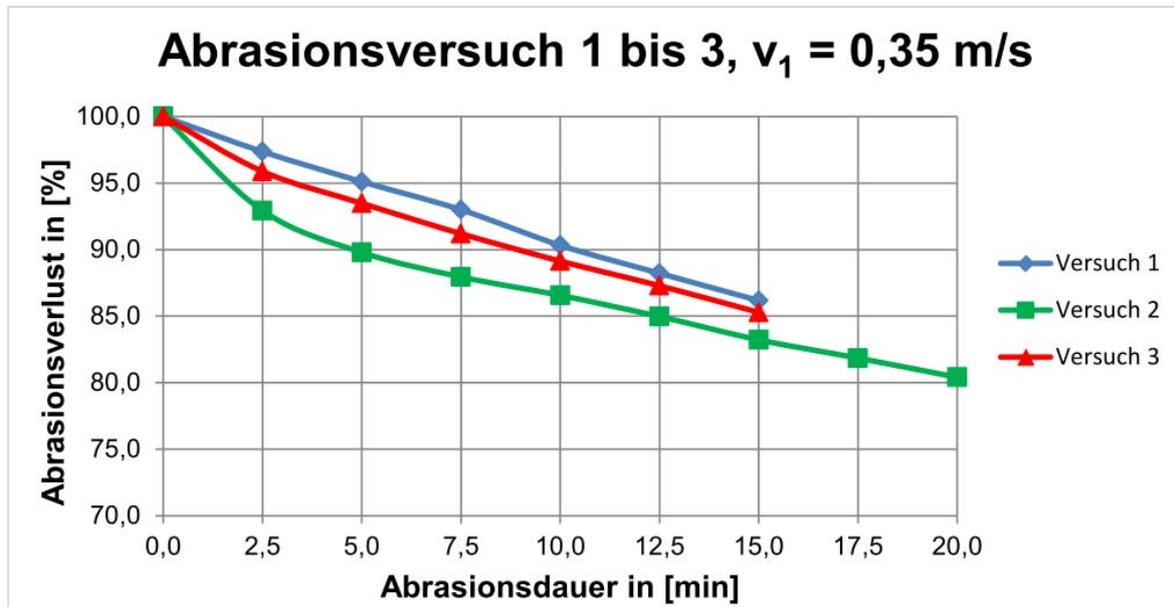


Bild 32:
Ergebnisse der Abrasionsversuche zu den Versuchen 1 bis 3 (4 Mitnehmer)

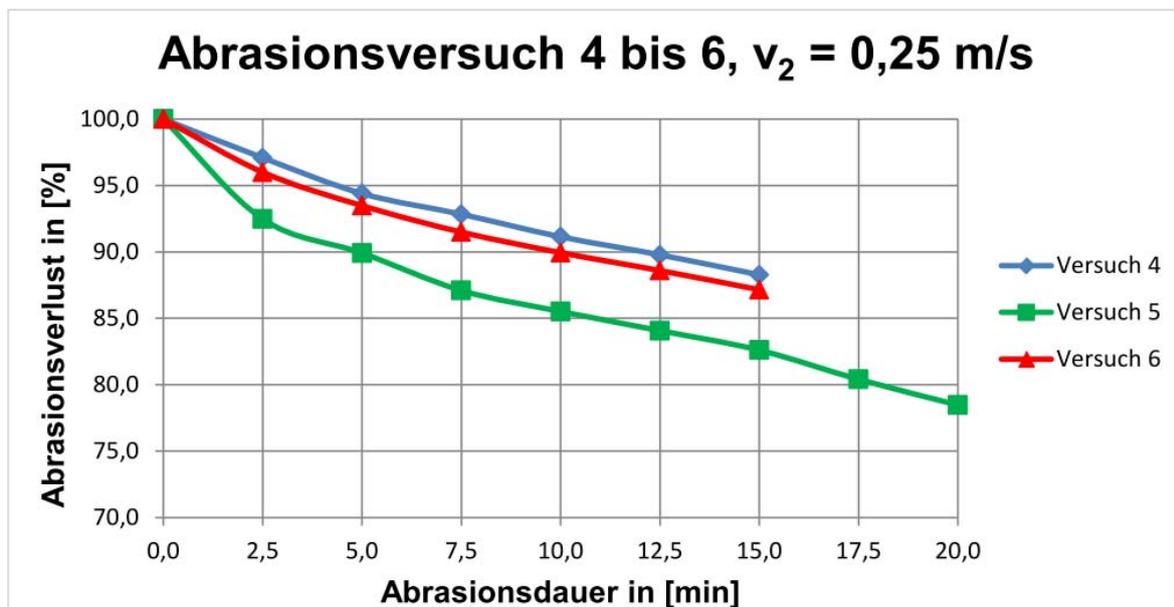


Bild 33:
Ergebnisse der Abrasionsversuche zu den Versuchen 4 bis 6 (4 Mitnehmer)

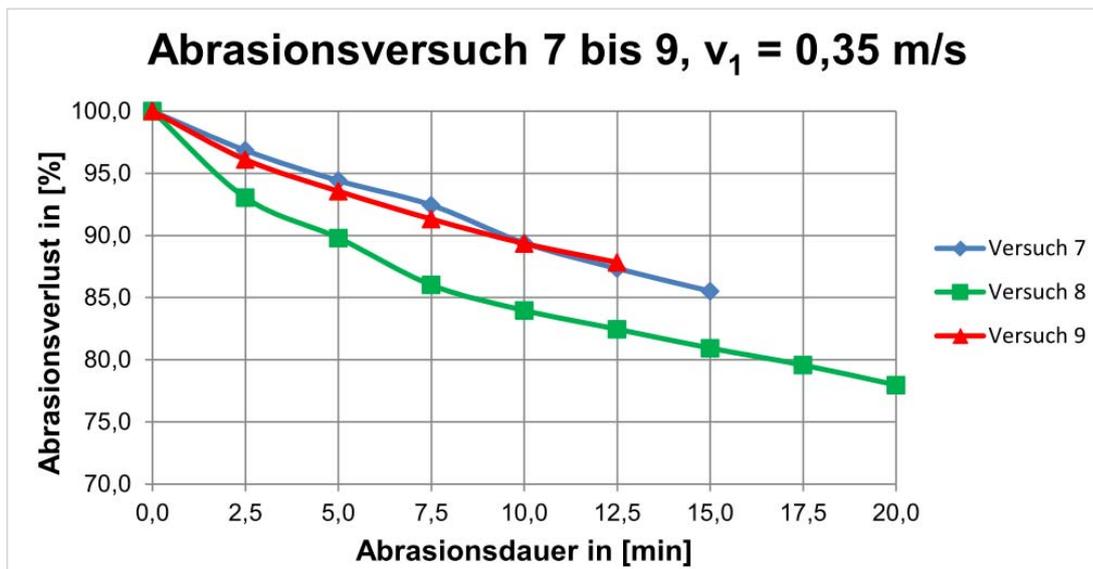


Bild 34:
Ergebnisse der Abrasionsversuche zu den Versuchen 7 bis 9 (8 Mitnehmer)

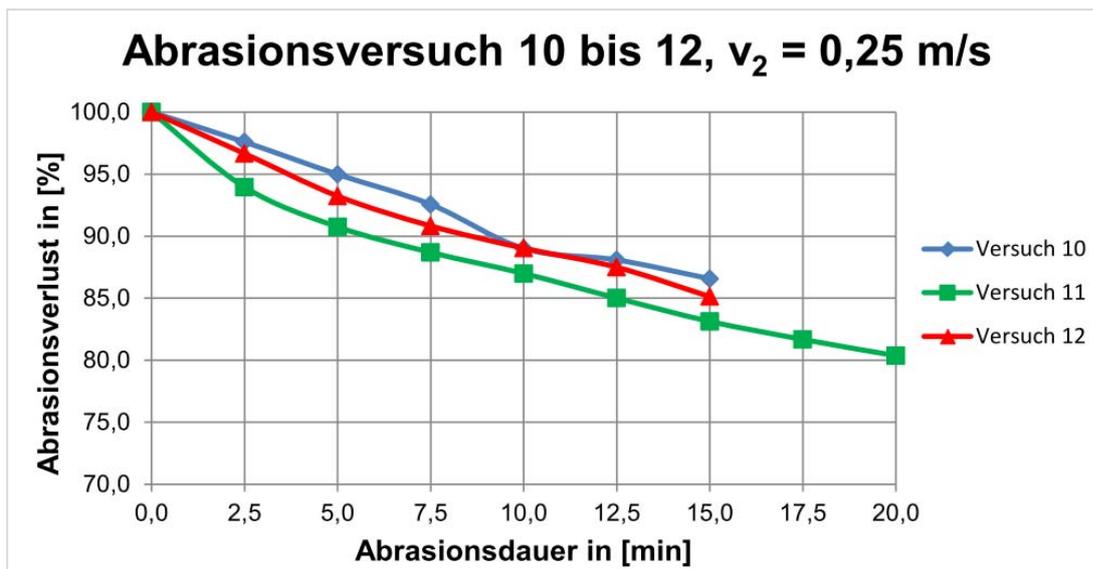


Bild 35:
Ergebnisse der Abrasionsversuche zu den Versuchen 10 bis 12 (8 Mitnehmer)

Mit den Technikumsversuchen konnte nachgewiesen werden, dass Gipsputz von Kalksandsteinen in einer Abrasionstrommel mit einer Umfangsgeschwindigkeit zwischen 0,25 und 0,35 m/s und einer Gipsputzdicke von 5 bis 10 mm in einer Zeit von maximal 20 Minuten nahezu vollständig entfernt werden konnte. Bei einer Gipsputzdicke von 5 mm stellte sich dieses gewünschte Ergebnis bereits nach einer Abrasionsbehandlung von maximal 15 Minuten ein. Der Abrasionsverlust betrug bei einer Gipsputzdicke von 5 mm ca. 15 M.-% und bei einer Gipsputzdicke von 10 mm bei etwa 20 M.-%. Die veränderten Verfahrensbedingungen mit Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit der Trommel (0,35 statt 0,25 m/s) sowie einer verdoppelten Anzahl und Tiefe der Einbauten (8 statt 4 Mitnehmer mit $t = 20$ statt 40 mm) ergab bei den durchgeführten Untersuchungsreihen kein eindeutig besseres Ergebnis.

4.1.3 Bestimmung des Sulfatgehaltes des abgelösten Gipsputzes

Zwecks Homogenisierung wurde das Material einen Tag über Kopf geschüttelt, um eine Homogenisierung zu gewährleisten. Des Weiteren wurde von dem homogenisierten Material eine Teilprobe entnommen, welche auf eine Korngröße $d < 63 \mu\text{m}$ aufgemahlen wurde, um diese mittels Röntgenographie phasenanalytisch zu untersuchen. Ferner wurde von der Probe KUR auch noch eine DSC/TGA-Analyse durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung war ein Nachweis / Bestimmung des Gehaltes der Calciumsulfat-Phasen.

Das Ergebnis der röntgenographischen Analyse ist in Bild 36 wiedergegeben. Das TGA/DSC-Diagramm entnehme man Bild 37. Bei Betrachtung der röntgenographischen Ergebnisse erkennt man sofort, dass das untersuchte Material der Probe „K“ Calciumsulfat-Dihydrat (Gips; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) enthält. Im TGA/DSC-Diagramm (Bild 37) erkennt man, dass das Material einen Wasserverlust im Temperaturbereich von ca. 100 bis 200 °C hat, woraus ebenfalls eindeutig geschlossen werden kann, dass es sich hierbei um eine Entwässerung des Gipses zu Calciumsulfat-Halbhydrat handelt. Aus den röntgenographischen und thermoanalytischen Untersuchungen lässt sich auch abschätzen, dass das Material ca. 25 Gew.-% Gips enthält.

Im nächsten Schritt wurde das nachweislich gipshaltige Material für 72 h bei 200 °C thermisch beaufschlagt, mit dem Ziel, den Gips in ein abbindefähiges Calciumsulfat-Halbhydrat zu überführen (Gleichung 1).



Von diesem thermisch behandelten Material ist ebenfalls eine Teilprobe entnommen worden, die röntgenographisch analysiert worden ist. In Bild 38 ist das Röntgendiffraktogramm wiedergegeben, auf dem man erkennt, dass die Phase Calciumsulfat-Dihydrat (Gips) nicht mehr existent ist, dafür sich die Phase Calciumsulfat-Halbhydrat gebildet hat. In Bild 39 sind beide Diffraktogramme gegenübergestellt, so dass man erkennt, dass sich nach der thermischen Beaufschlagung aus dem Calciumsulfat-Dihydrat Calciumsulfat-Halbhydrat gebildet hat.

Sollte aus diesen Ergebnissen die Überlegung folgen, dieses Material später in einem industriellen Prozess thermisch zu beaufschlagen, sollten die optimierte Temperatur und die optimierte Beaufschlagungsdauer experimentell genauer bestimmt werden. Im vorliegenden Fall ist bewusst 200 °C gewählt worden, um den Zersetzungsprozess von Gips zu Halbhydrat definitiv vollständig durchzuführen.

Aus dem thermisch beaufschlagten Material wurden Probekörper (Würfel mit der Kantenlänge 5 cm) hergestellt, um die Druckfestigkeit nach 7 Tagen zu bestimmen. Zu diesem Zweck ist das beaufschlagte Material in einer verarbeitungsfähigen Konsistenz hergestellt worden und entsprechend den Vorschriften für Mörtel in die Formen appliziert worden. Die verarbeitbare Konsistenz konnte dadurch erzielt werden, dass ein Feststoff/Wasser-Verhältnis von 0,36 bis 0,37 gewählt wurde. Es wurden zwei Ansätze zur Herstellung von Probekörpern gefahren; Bezeichnung V1 und V2 (siehe Anlage 2). Der Ansatz V1 hatte ein Feststoff/Wasser-Verhältnis von 0,37 und der V2-Ansatz von 0,36. Die Probekörper wurden hergestellt und normgerecht bis zur Prüfung am 7. Tag im Normklima bei 20 °C und 65% r. F. gelagert. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen entnehme man Tabelle 8. Im Mittel haben die Probekörper eine Druckfestigkeit von 1,3 N/mm². Auffällig war, dass das Material bereits nach einer Stunde eine nicht verarbeitbare Frühfestigkeit (Ansteifen) hatte.

Die nachfolgenden vier Bilder 36 bis 39 sowie die Tabelle 8 geben die Ergebnisse aus der mineralogischen Analyse der Gipsputzes wieder.

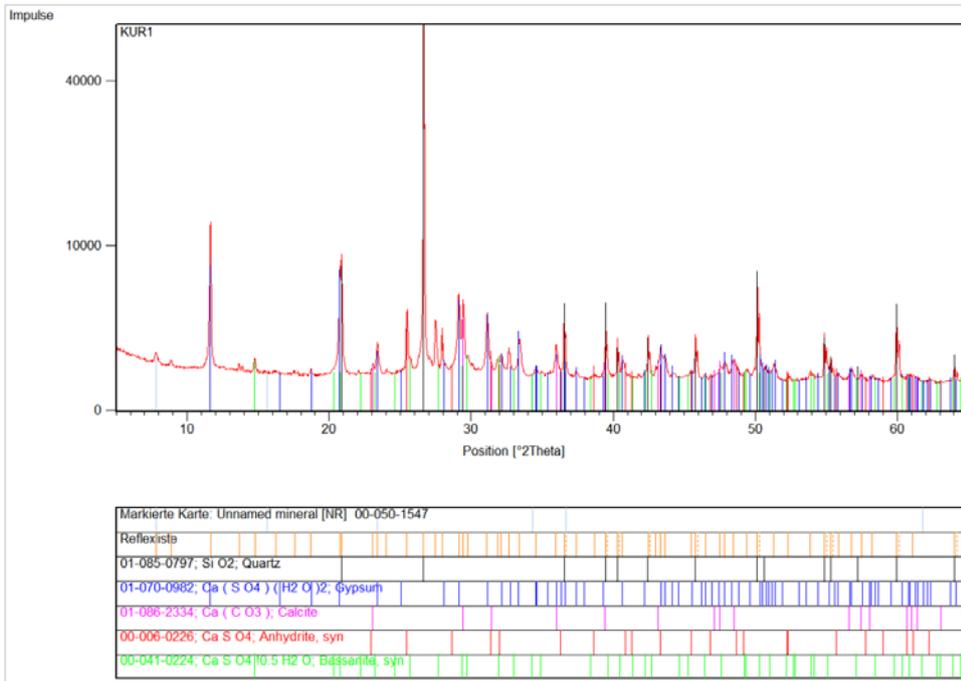


Bild 36: Röntgendiffraktogramm der homogenisierten Probe „K“; deutlich ist die Phase Gips im Diffraktogramm mit Hauptpeak im Winkelbereich von ca. 11,5°2θ zu erkennen (Gips = blaue Linien)

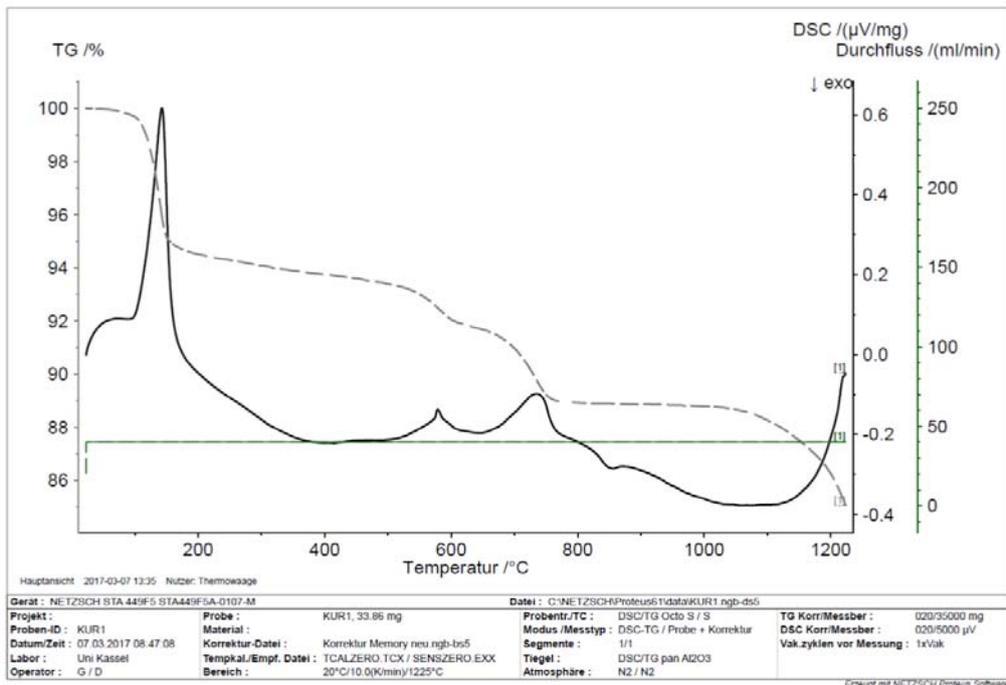


Bild 37: Thermoanalytische Aufnahme der homogenisierten Probe „K“

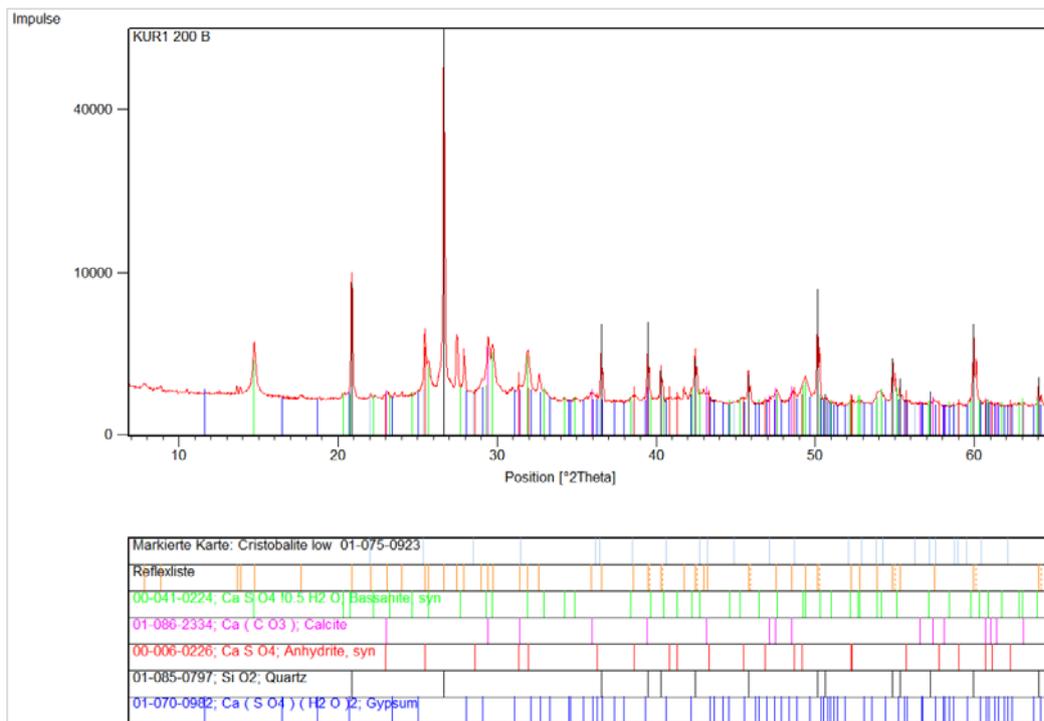


Bild 38:
Röntgendiffraktogramm der homogenisierten Probe „K“ nach 72 h Beaufschlagung mit einer Temperatur von 200° C. Der Gipsanteil hat sich in Calciumsulfat-Dihydrat (hellgrüne Linien) umgesetzt

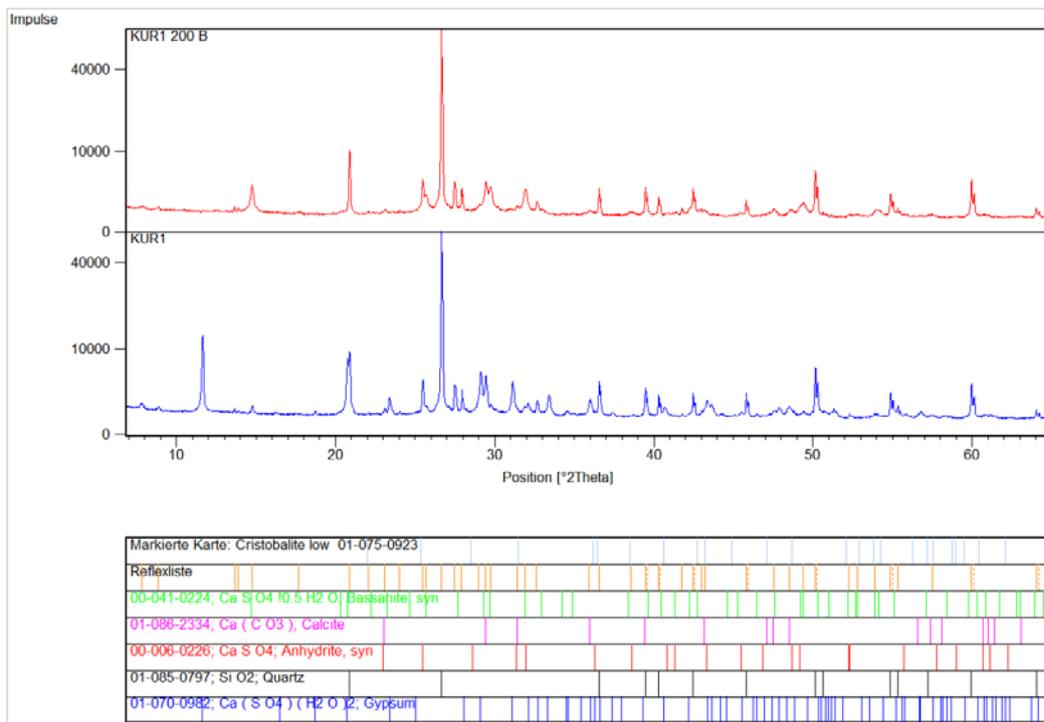


Bild 39:
Vergleiche Darstellung der Röntgendiffraktogramme aus Bild 36 (blau, unten) und Bild 38 (rot, oben)

Bezeichnung	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Masse g	Rohdichte kg/m ³	Fläche mm ²	F _{max} kN	Festigkeit f _c , dry N/mm ²
V1_7d_1	50,53	50,19	49,71	181,3	1438	2536	3,420	1,35
V1_7d_2	44,54	50,45	49,65	165,9	1487	2247	2,862	1,27
V2_7d_3	50,71	50,24	49,78	182,0	1435	2548	3,242	1,27

Mittelwerte

xxxx phys. 2017 n = 3	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Masse g	Rohdichte kg/m ³	Fläche mm ²	F _{max} kN	Festigkeit f _c , dry N/mm ²
\bar{x}	48,59	50,29	49,71	176,4	1453	2444	3,174	1,30

Tabelle 8:
Physikalische Kennwerte der Gipsproben

4.1.4 Bestimmung des Sulfatgehaltes der Kalksandstein-Ausgangsmaterial von verschiedenen Recyclinghöfen

Die nachfolgende Tabelle 9 gibt ein Bild über die Höhe der Sulfat-Befruchtung von Kalksandsteinen aus dem Abbruch von Kalksandstein-Mauerwerk in praxi.

Probe	pH-Wert	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfatgehalt			Sulfatfällung	
			Spektralfotometer CADAS 100	Indikatorstäbchen	Test-Kit SF-1	Bariumchlorid W/F=1/5	Bariumchlorid W/F=1/10
	[-]	[μ S/cm]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	./.	./.
1-KAS-Stein	9,3	173	< 40	< 200	< 50	negativ	gering positiv
1-KAS-Mörtel	10,4	602	245	< 400	> 200	negativ	negativ
1-KAS-Gemisch (praxisnah)	9,3	234	52	< 200	60	./.	./.
2-KAS-Stein	9,1	125	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
2-KAS-Mörtel	11,3	800	150	< 200	150	negativ	negativ
2-KAS-Gemisch (praxisnah)	8,9	201	< 40	< 200	< 50	./.	./.
3-DUL-Stein	8,9	225	42	< 200	< 50	negativ	negativ
3-DUL-Mörtel	10,3	294	76	< 200	70	gering positiv	negativ
3-DUL-Gemisch (praxisnah)	9,0	163	< 40	< 200	< 50	./.	./.
4-ESS-Stein	9,8	250	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
4-ESS-Mörtel	11,8	1.620	96	< 200	80	negativ	negativ
4-ESS-Gemisch (praxisnah)	10,2	335	< 40	< 200	50	./.	./.
5-REC-Stein	10,4	319	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
5-REC-Mörtel	10,7	754	350	< 400	> 200	positiv	gering positiv
5-REC-Gemisch (praxisnah)	10,9	490	47	< 200	55	./.	./.
6-REC-Stein	9,1	130	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
6-REC-Mörtel	11,2	774	179	< 200	200	gering positiv	gering positiv
6-REC-Putz	10,3	329	96	< 200	100	positiv	gering positiv
6-REC-Gemisch (praxisnah)	10,1	267	48	< 200	55	./.	./.
7-DRE-Stein-1	10,2	228	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
7-DRE-Stein-2	10,0	252	< 40	< 200	< 50	./.	./.
8-DRE-Stein-1	10,5	309	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
8-DRE-Stein-2	10,7	507	94	< 200	90	./.	./.
9-SOE-Stein	9,8	167	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
9-SOE-Mörtel	11,8	1.517	84	< 200	84	negativ	negativ
9-SOE-Gemisch (praxisnah)	9,7	215	< 40	< 200	< 50	./.	./.
10-SOE-Stein	9,3	109	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
10-SOE-Mörtel	12,3	3.990	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
10-SOE-Gemisch (praxisnah)	10,0	223	< 40	< 200	< 50	./.	./.
11-CEL-Stein	9,1	150	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
11-CEL-Mörtel	9,5	252	69	< 200	80	negativ	negativ
11-CEL-Gemisch (praxisnah)	8,6	1.630	1.109	< 800	> 200	./.	./.
12-KS-rein	10,0	219	< 40	< 200	< 50	negativ	negativ
12-KS-Gemisch (praxisnah)	10,4	275	< 40	< 200	< 50	./.	./.
12-mit wenig Putz-Mörtel-rot	9,4	121	< 40	< 200	< 50	gering positiv	negativ
12-mit wenig Putz-Mörtel-grün	11,9	1.836	142	< 200	150	gering positiv	negativ
12-mit viel Putz-Mörtel-rot-gewaschen	10,2	223	< 40	< 200	< 50	gering positiv	negativ
12-mit viel Putz-Mörtel-grün-gewaschen	11,9	1.618	131	< 200	125	negativ	negativ
12-mit viel Putz-Mörtel	10,7	2.460	1.833	> 800	> 200	positiv	positiv
12-KS+M-Gemisch (praxisnah)	9,9	630	303	< 400	> 200	./.	./.
12-KS+M+P-Gemisch (praxisnah)	10,6	2.330	1.705	< 1200	> 200	./.	./.
13-SEE-Stein-1 Kalksandsteiwerk	./.	./.	./.	./.	./.	negativ	negativ
13-SEE-Stein-2 Kalksandsteiwerk	./.	./.	./.	./.	./.	negativ	negativ
13-SEE-Stein-3 Kalksandsteiwerk	./.	./.	./.	./.	./.	negativ	negativ
14-SEE-Stein-1 Kalksandsteiwerk	./.	./.	./.	./.	./.	negativ	negativ
14-SEE-Stein-2 Kalksandsteiwerk	./.	./.	./.	./.	./.	negativ	negativ
14-SEE-Stein-3 Kalksandsteiwerk	./.	./.	./.	./.	./.	negativ	negativ
15-Gipsputz rot-5mm	./.	./.	./.	./.	./.	positiv	positiv
15-Gipsputz grün-10mm	./.	./.	./.	./.	./.	positiv	positiv
15-Gipsputz-Referenz	./.	./.	./.	./.	./.	positiv	positiv

Tabelle 9: Sulfatgehalt der Kalksandstein-Ausgangsmaterials von verschiedenen Recyclinghöfen

4.2 Arbeitspaket 2: Eignungsuntersuchungen des ausgewählten sortenreinen KS-Materials für die Erprobungsstrecke

4.2.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der Baustoffgemische nach DIN EN 933-1 sind in Bild 40 vergleichend dargestellt. Die Korngrößenverteilung des RCB entspricht den Anforderungen der [TL SoB-StB] an ein Baustoffgemisch für eine Frostschutzschicht 0/32 (FSS), wohingegen bei den KS-Gemischen die Anteile der groben Gesteinskörnungen zu gering sind.

Da die KS-Gemische jedoch nicht zu 100 M.-% in einer FSS verwendet werden, können über die entsprechenden Zugabeanteile des RCB die Anforderungen an die TL SoB-StB erfüllt werden.

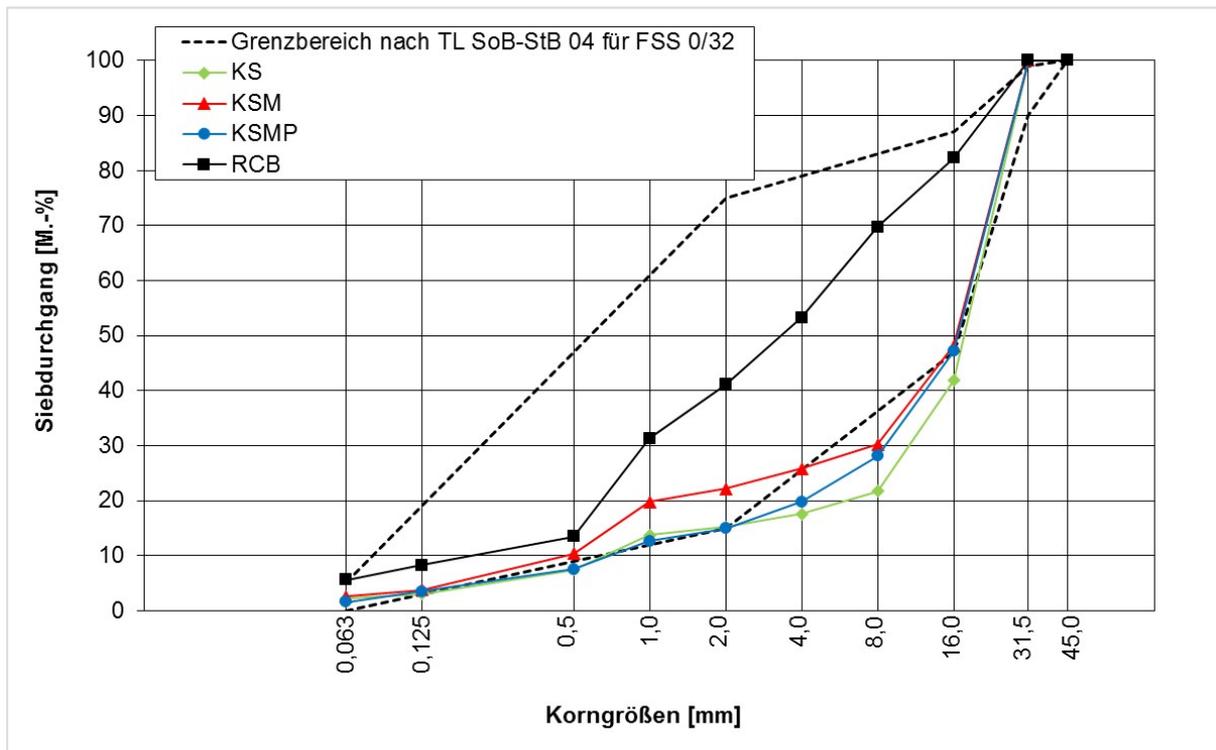


Bild 40:
Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe

4.2.2 Kornform

Die Ergebnisse der Kornformkennzahl SI gemäß [DIN EN 933-4] der Baustoffgemische sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Dabei wurde das Baustoffgemisch 4/32 mm in die Kornklassen 4/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm unterteilt und die jeweilige Kornformkennzahl ermittelt.

Probe	SI [-]		
	4/8 mm	8/16 mm	16/32 mm
KS	45	50	28
KSgelb	21	30	13
KSM	36	35	28
KSMP	20	31	15
RCB	5	7	7

Tabelle 10:
Kornformkennzahl SI der verschiedenen Ausgangsstoffe

4.2.3 Widerstand gegen Zertrümmerung

Die Festigkeiten der Kalksandstein-Ausgangsstoffe und des RC-Baustoffes wurden mittels Schlagzertrümmerungsversuch gemäß [DIN EN 1097-2] bestimmt siehe Tabelle 11.

Kennwert	Einheit	KS	KSM	KSMP	RCB
SZ _{8/12} -Wert	[%]	51,1	43,3	46,8	18,1

Tabelle 11:
Schlagzertrümmerungswerte der verschiedenen Materialien

4.2.4 Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der Kalksandstein-Ausgangsstoffe mit Mörtel und Mörtel/Putz wurden für die Kornklassen 4/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm getrennt durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 aufgeführt. Beim Putz handelte es sich um einen Kalk-Zement-Putz.

Stoffgruppe		KSM			KSMP		
		4/8 mm	8/16 mm	16/32 mm	4/8 mm	8/16 mm	16/32 mm
Kalksandstein	[M.-%]	93,3	88,0	88,9	85,9	84,3	94,4
Mörtel + Putz		6,7	12,0	11,1	14,1	15,7	5,6

Tabelle 12:
Stoffliche Zusammensetzung

4.2.5 Trockenrohddichte, Wasseraufnahme, Reindichte und Porosität

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse zur Trockenrohddichte und Wasseraufnahme nach [DIN EN 1097-6 Anhang C.5] sowie zur Reindichte und Gesamtporosität nach [DIN EN 1936] aufgeführt. Die Gesamtporosität wird wie folgt berechnet:

$$\rho = \left(1 - \left(\frac{\rho_R}{\rho_0} \right) \right) \cdot 100$$

mit:

- ρ Gesamtporosität [Vol.-%]
- ρ_0 Dichte [g/cm³]
- ρ_R Trockenrohddichte [g/cm³]

Der volumenbezogene Wasseraufnahmegrad wird wie folgt berechnet:

$$W_V = W_m \cdot \left(\frac{\rho_R}{\rho_w} \right) \cdot 100$$

mit:

- W_V Volumenbezogener Wasseraufnahmegrad [Vol.-%]
- W_m Massebezogener Wasseraufnahmegrad [M.-%]
- ρ_R Trockenrohddichte [g/cm³]
- ρ_w Dichte des Wassers [g/cm³]

Kennwert	Einheit	KS	KSM	KSMP	KSgelb	RCB
Trockenrohddichte	[g/cm ³]	1,84	1,82	1,78	1,85	2,56
Massebezogener Wasseraufnahmegrad unter Atmosphärendruck	[%]	13,6	16,9	15,2	12,4	2,8
Volumenbezogener Wasseraufnahmegrad nach Atmosphärenbeanspruchung	[Vol.-%]	25,1	30,9	27,1	23,0	7,2
Reindichte	[g/cm ³]	2,615	2,693	2,628	-	2,592
Gesamtporosität	[Vol.-%]	29,6	32,3	32,4	-	1,4

Tabelle 13:
Ergebnisse der Trockenrohddichte, Wasseraufnahmegrad, Reindichte und Gesamtporosität

4.2.6 Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k_{10} der verschiedenen Ausgangsstoffe bei Proctorverdichtung nach [DIN 18130-1] sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Kennwert	Einheit	KS	KSM	KSMP	RCB
k_{10}	[m/s]	$8,2 \times 10^{-6}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$6,7 \times 10^{-6}$

Tabelle 14:
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{10}

4.2.7 Frostwiderstand

Der Frostwiderstand der drei Kalksandsteingemische wurde mit den standardisierten Frost-Tau-Wechsel (FTW) gemäß [TP Gestein-StB Teil 6.3.2] ermittelt. Dazu wurde eine Korngrößenverteilung definiert zusammengesetzt. Die Korngrößenverteilung vor und nach den FTW sind in Bild 41 bis 43 zu entnehmen. Weiterhin wurde der Beton-Recycling-Baustoff einer Frost-Tausalz-Beanspruchung unterzogen, siehe Bild 44.

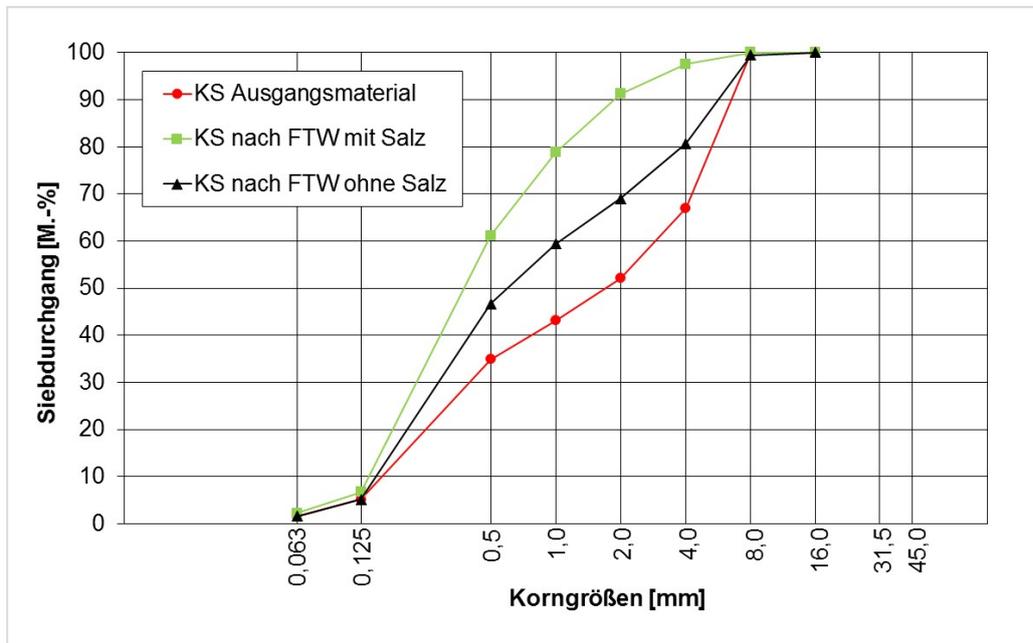


Bild 41:
Korngrößenverteilung sortenreiner Kalksandstein vor und nach FTW

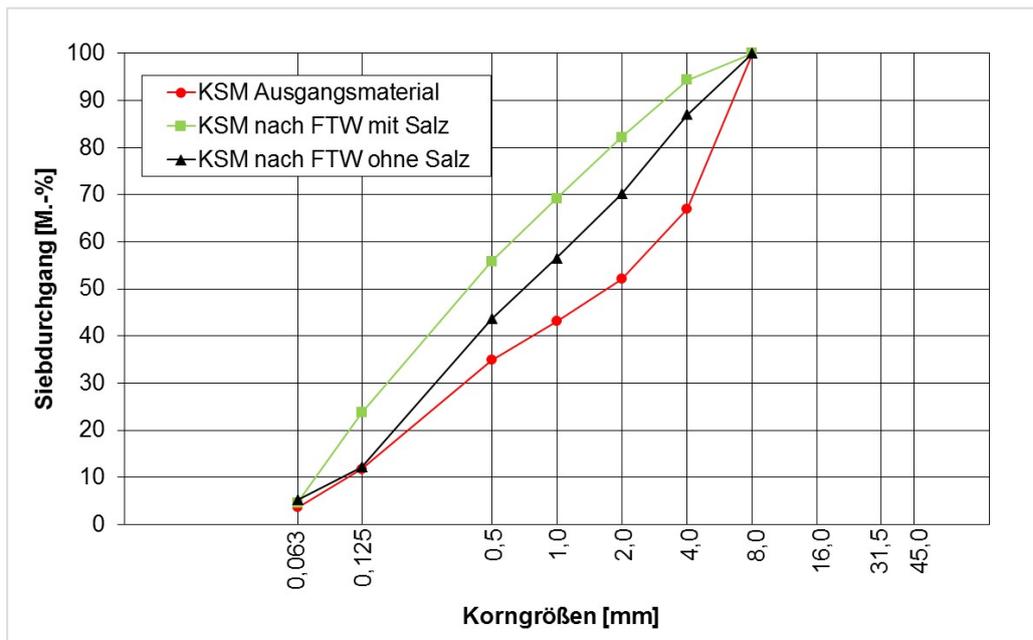


Bild 42:
Korngrößenverteilung KSM vor und nach FTW

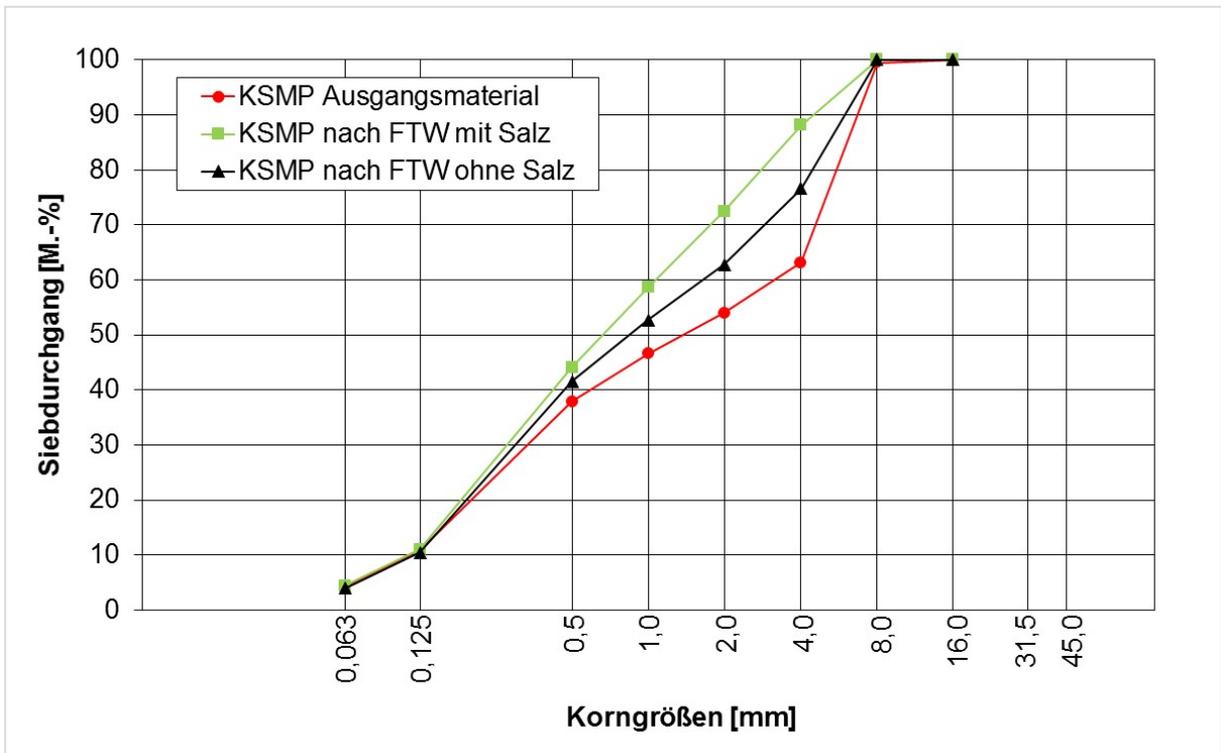


Bild 43:
Korngrößenverteilung KSMP vor und nach FTW

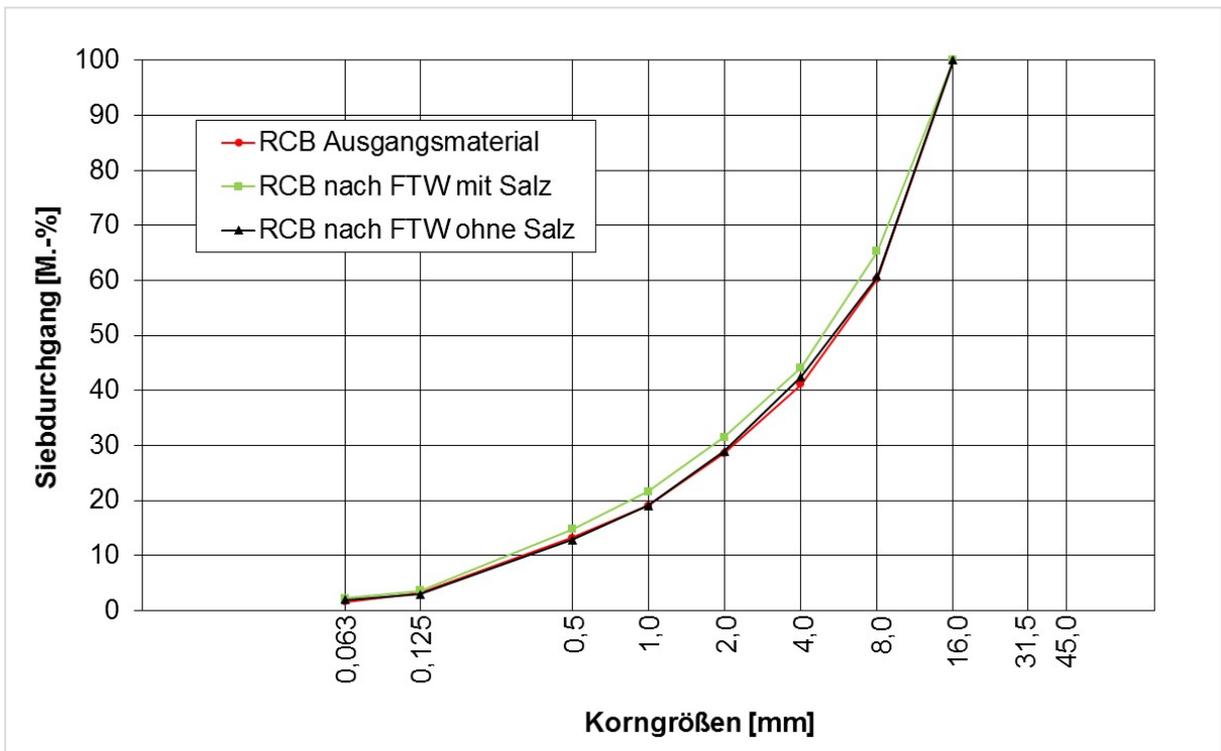


Bild 44:
Korngrößenverteilung RCB vor und nach FTW

Beim RCB hat im Gegensatz zu den KS-Gemischen nahezu keine Kornverfeinerung stattgefunden, die Veränderungen liegen innerhalb der Prüfstreuung.

4.2.8 Proctorversuche

Die Bestimmung der optimalen Lagerungsdichte erfolgte mit Hilfe des Proctorversuches gemäß [DIN EN 13286-2] an den Korngemischen 0/32 mm mit einfacher Verdichtungsarbeit. Die Trockendichten in Abhängigkeit vom Wassergehalt sind in Bild 45 dargestellt. Der optimale Wassergehalt des RCB liegt bei ca. 9 % mit einer korrespondierenden Trockendichte von ca. 1,975 g/cm³. Die Kurvenverläufe der anderen Baustoffgemische zur Bestimmung des optimalen Wassergehaltes und der korrespondierenden Trockendichte konnten nicht ausgewertet werden.

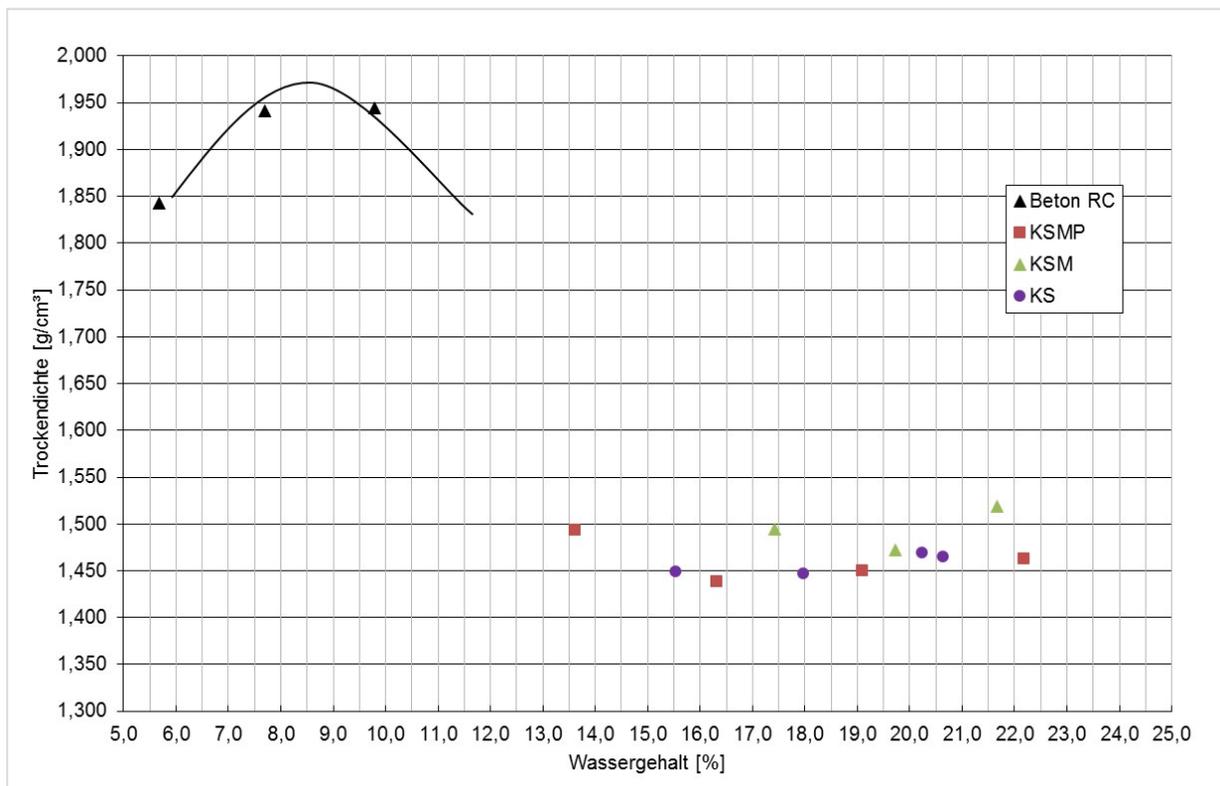


Bild 45:
Ergebnisse der Proctorversuche des RCB und der Kalksandsteingemische

4.2.9 Frosthebungs- und CBR-Versuche

In Bild 46 sind die maximale und die verbleibende Frosthebung der verschiedenen Materialien vergleichend dargestellt. Die Ergebnisse zum Integral der Frosteinwirkung und der Temperaturwirkung sind in 46 zu sehen. Der reine Kalksandstein weist im Frosthebungsversuch eine geringere Frostempfindlichkeit als der RCB auf. Die Frostempfindlichkeit des gelben Kalksandsteins ist vergleichbar mit dem Gemisch aus dem gelben Kalksandstein und Mörtel. Durch den Zementputz verbessert sich die Frostempfindlichkeit des Gemisches – die maximale Frosthebung sowie der Wert der bleibenden Hebung verringern sich.

Das von [Rad1] vorgeschlagene Kriterium zur Frostempfindlichkeit (Integral der Frosteinwirkung ≤ 43 mm/d) wird von allen Kalksandsteingemischen eingehalten, der RCB überschreitet dieses Kriterium mit 44,5 geringfügig. Das Kriterium, dass das Integral der Temperaturwirkung ≤ 15 K · d sein soll, wird von dem sortenreinen KS und dem Gemisch KSM nicht erfüllt, der KSgelb überschreitet das Kriterium lediglich geringfügig.

Zur Ermittlung des Tragfähigkeitsverlustes durch die Frosteinwirkung wird vor und nach dem Frosthebungsversuch der CBR-Wert gemäß [TP BF-StB B 7.1, 2012] ermittelt, die Ergebnisse sind in Bild 48 zu sehen.

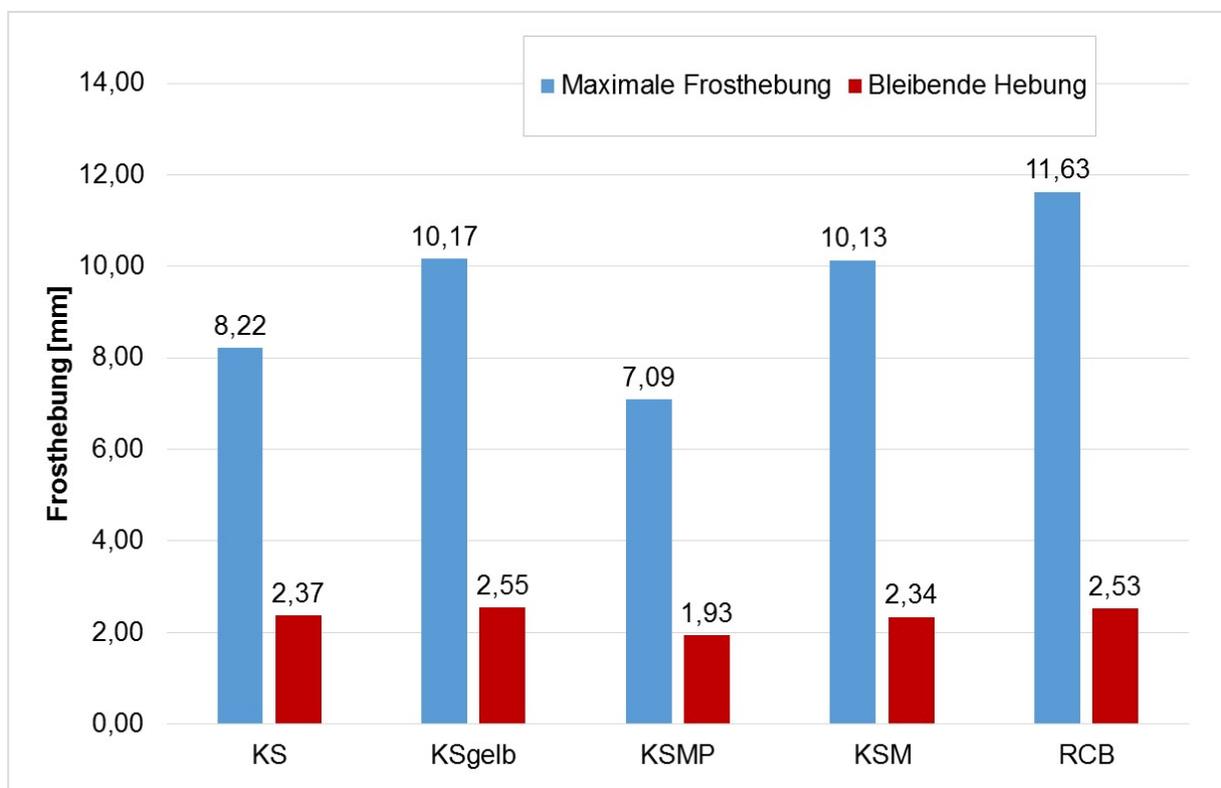


Bild 46:
Ergebnisse der Frosthebungsversuche – maximale Frosthebung und bleibende Hebung

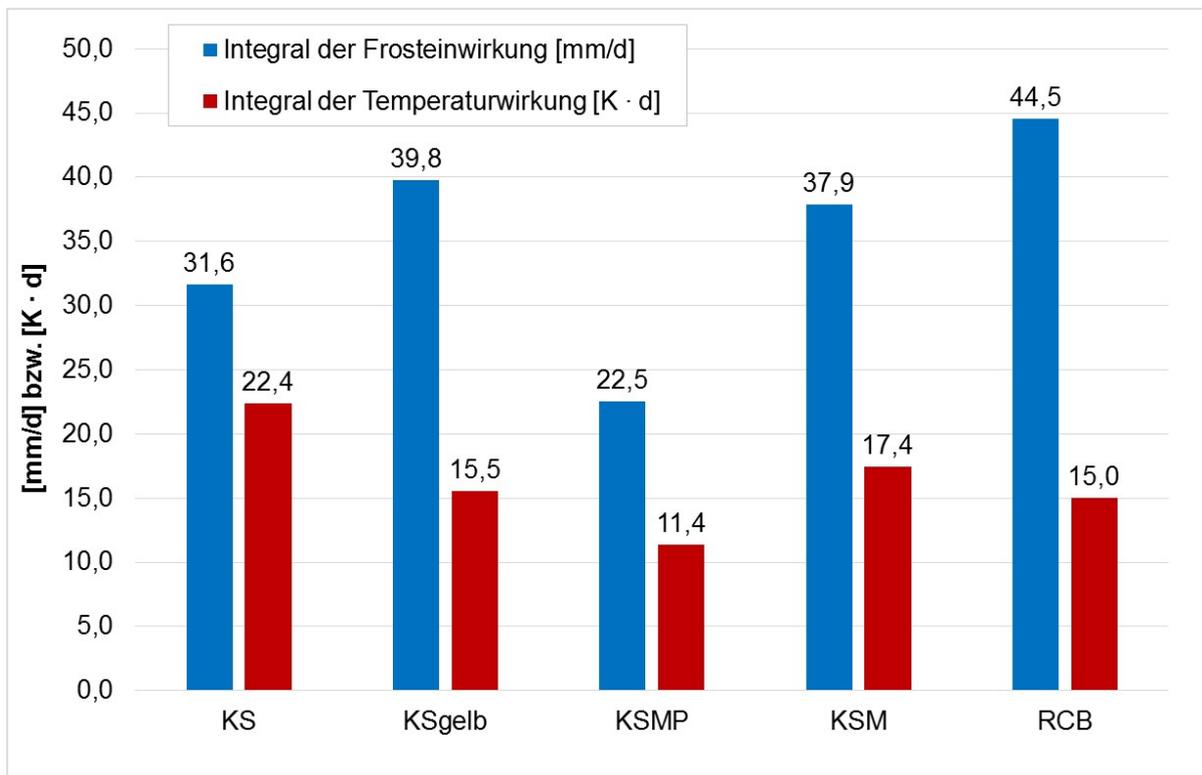


Bild 47:
Ergebnisse der Frosthebungsversuche – Integral der Frosteinwirkung und Integral der Temperaturwirkung

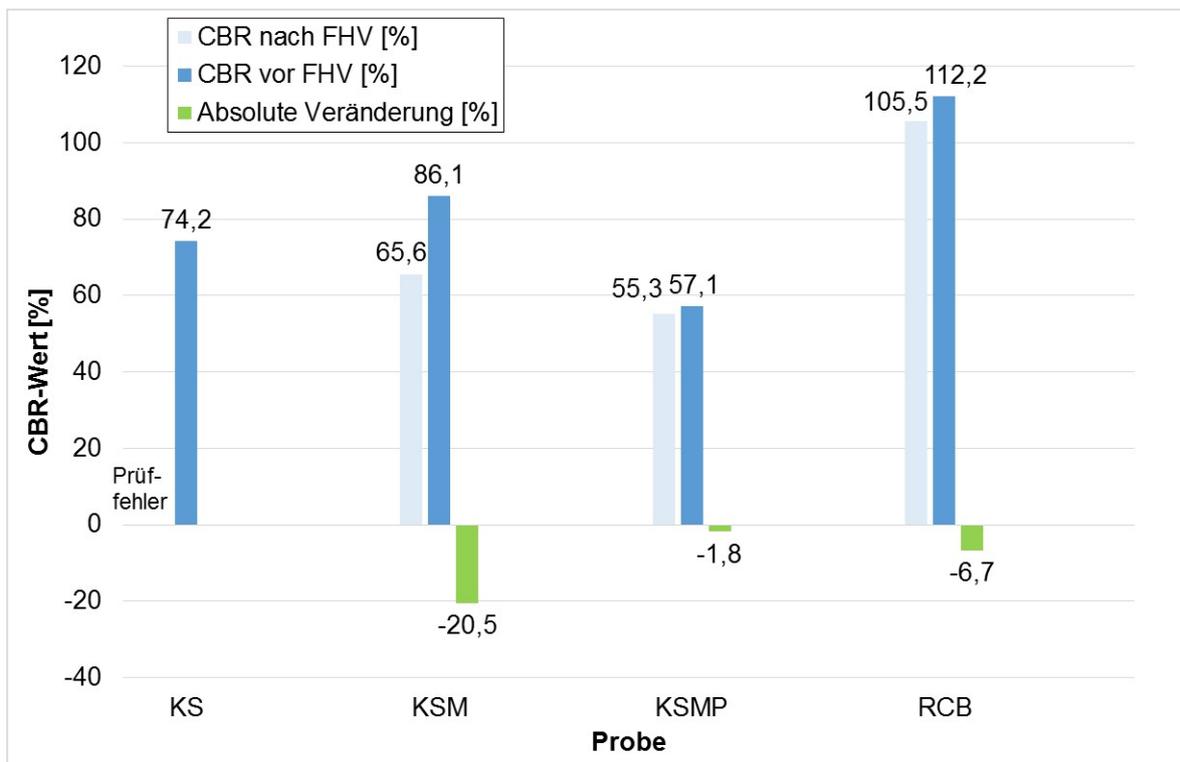


Bild 48:
CBR-Werte vor und nach Frosthebungsversuch

4.2.10 Kornverfeinerungen

Zur Ermittlung der Kornverfeinerungen der Kalksandsteingemische infolge Frost- und Verdichtungsbeanspruchung wurden die Korngrößenverteilungen an den Materialien vor und nach Abschluss aller Einwirkungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 49 bis 51 dargestellt.

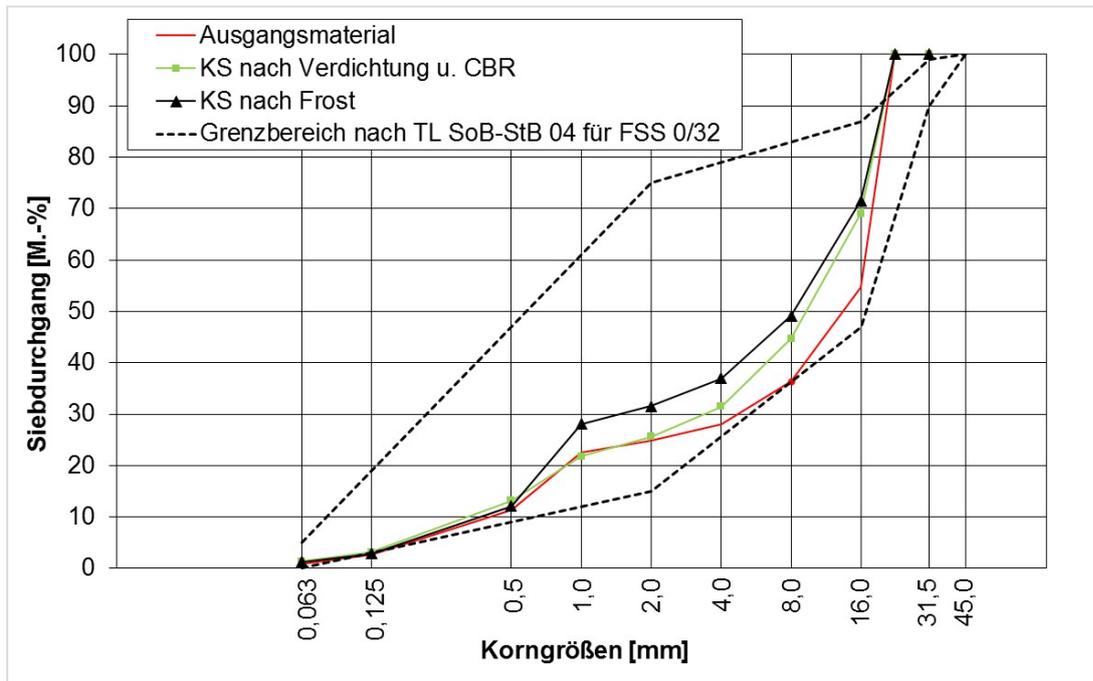


Bild 49: Kornverfeinerung des sortenreinen Kalksandsteins KS nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost

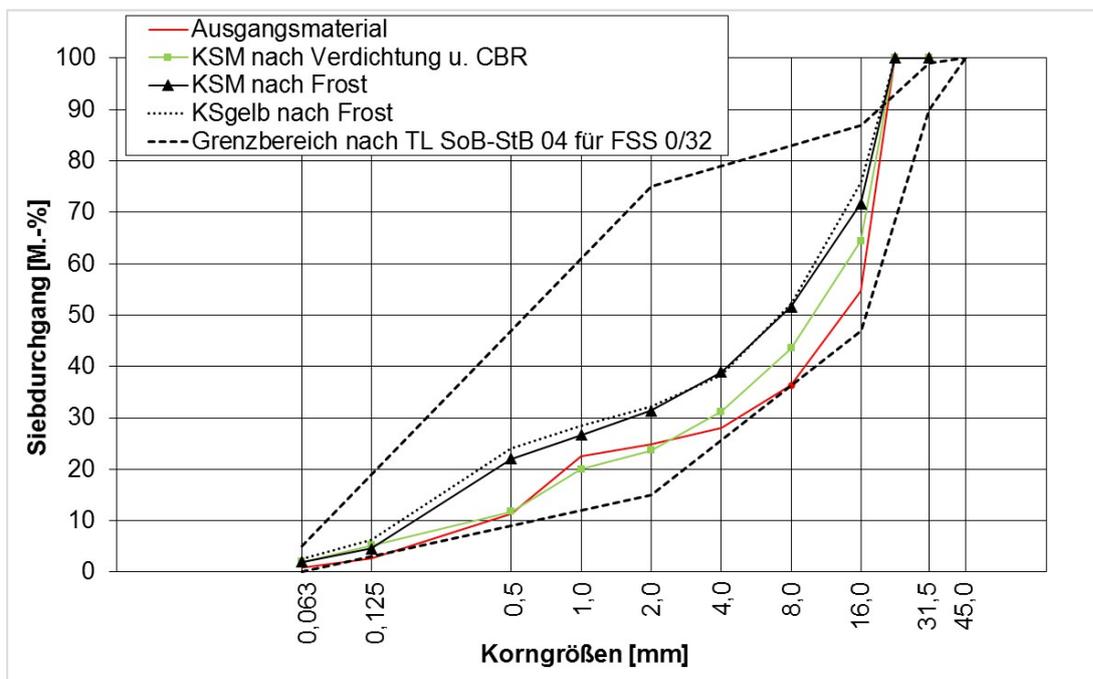


Bild 50: Kornverfeinerung des Materials KSM und KSGelb nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost

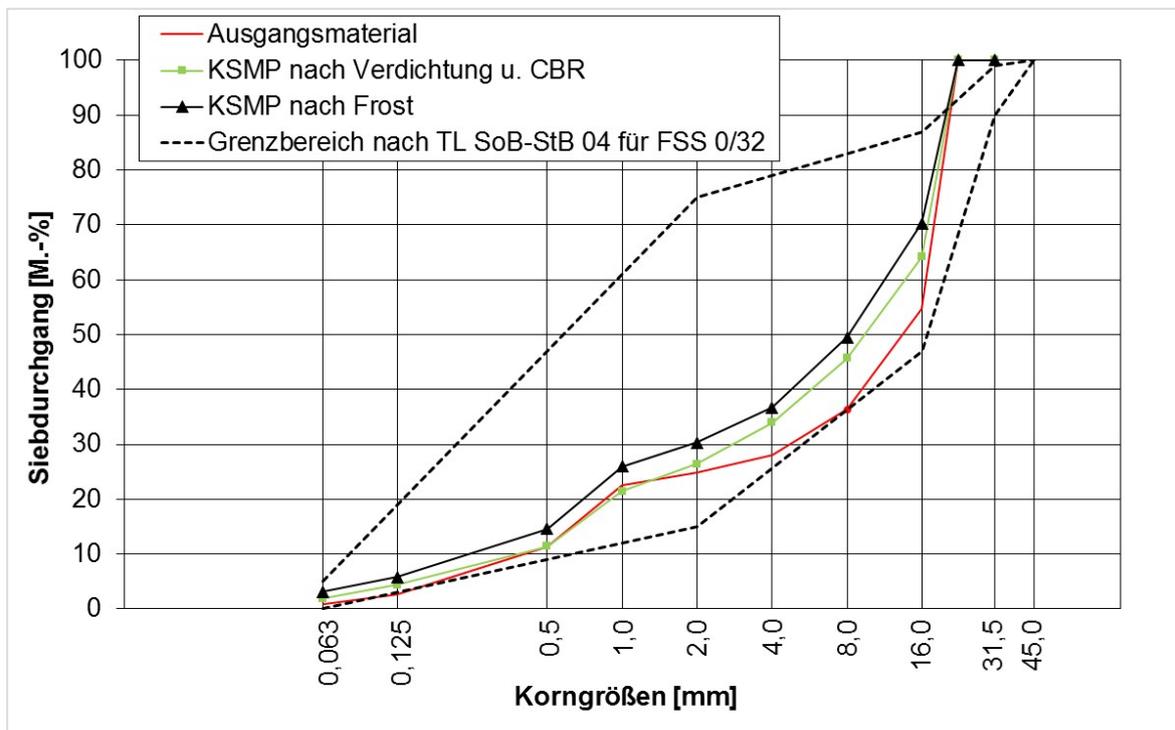


Bild 51:
Kornverfeinerung des Materials KSMP nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost

Die Korngrößenverteilung vor und nach Frost- und Verdichtungsbeanspruchung des RCB sind in Bild 52 dargestellt.

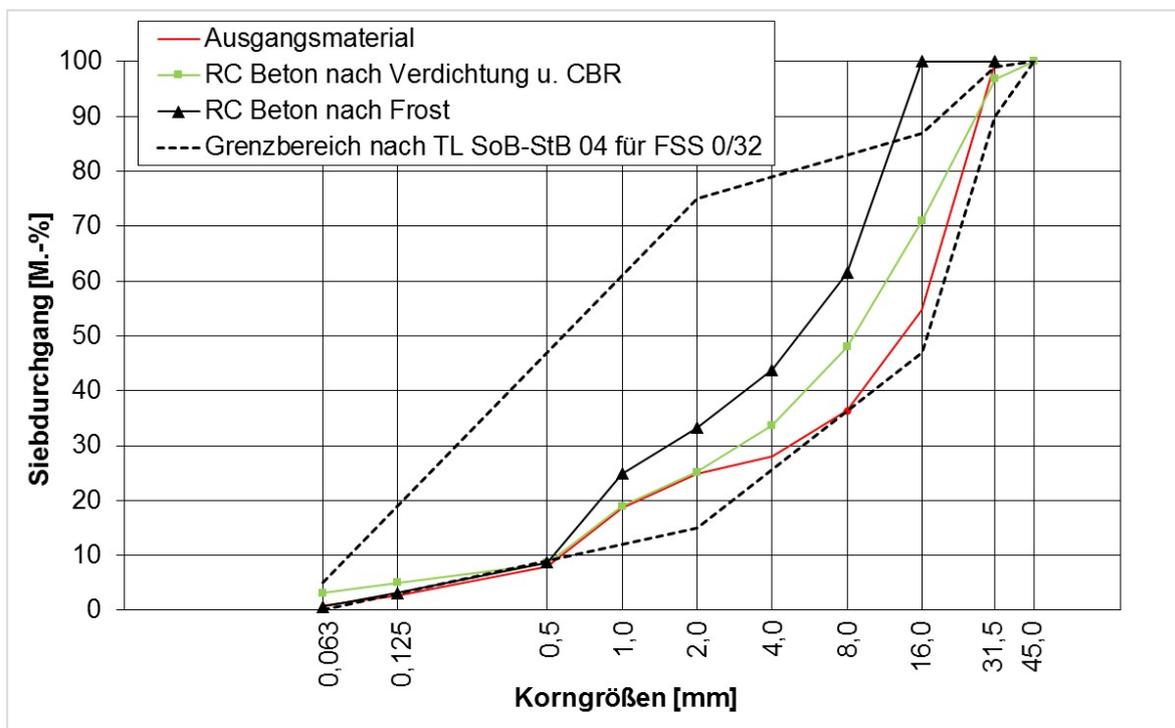


Bild 52:
Kornverfeinerung RCB nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost

4.3 Arbeitspaket 3: Auswahl der KS-ToB-Gemische, Bau und wissenschaftliche Begleitung der Erprobungsstrecke über zwei Winterperioden

4.3.1 Straßenbautechnische Untersuchungen während des Baus der Erprobungsstrecke

Mit dem statischen Plattendruckversuch nach [DIN 18134] wurden vor dem Einbau der Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) die Tragfähigkeiten der Unterlage (Aufschüttung aus Hausmüllverbrennungsasche (HMVA)) ermittelt. Auf den ToB wurde neben dem statischen auch der dynamische Plattendruckversuch mit dem kleinen Fallgewicht gemäß [TP BF StB Teil B 8.3] durchgeführt. Alle Ergebnisse sind in Tabelle 15 aufgeführt. In jedem Versuchsfeld wurden zwei Messungen durchgeführt. Die HMVA fungiert in diesem Aufbau ebenso wie die ToB als Frostschuttschicht (FSS) und somit muss nach den [RStO 12] auf der FSS ein Verformungsmodul von mindestens 100 MN/m² erreicht werden, da die Parkplatzfläche der Bk0,3 zugeordnet wird. Dieser Anforderungswert wird auf der HMVA und auf den ToB in allen Fällen unterschritten. Weiterhin wird der Verhältniswert von Ev2 zu Ev1 von 2,2 bei den ToB und zum Teil auch bei der HMVA deutlich überschritten. Somit ist von einer unzureichenden Verdichtung der Versuchsfelder auszugehen, die gegebenenfalls zu Nachverdichtungen in Folge der Belastungen im Laufe der Liegezeit führen kann.

Variante	Messpunkt	HMVA			ToB			
		Ev1	Ev2	Ev2/Ev1	Ev1	Ev2	Ev2/Ev1	Ev _d
[MN/m ²]								
0 M.-% KS (RCB)	1	35,2	95,8	2,7	19,5	74,1	3,8	20,8
	2	39,2	85,3	2,2	24,3	86,2	3,5	20,0
20 M.-% KS	3	35,3	87,4	2,5	29,6	90,9	3,1	17,4
	4	22,1	79,4	3,6	20,7	79,9	3,9	17,4
40 M.-% KS	5	24,4	92,9	3,8	20,1	81,9	4,1	19,3
	6	44,2	92,0	2,1	20,2	71,6	3,5	15,5
30 M.-% KS	7	23,8	94,2	4,0	19,0	79,8	4,2	23,6
	8	34,4	83,7	2,4	21,8	69,1	3,2	18,6

Tabelle 15:
Verformungsmodule auf der HMVA und den Tragschichten ohne Bindemittel (ToB)

An den acht Messpunkten wurden auch die Wasserdurchlässigkeitsversuche nach [TP Gestein-StB 8.3.2] durchgeführt und mit dem Ballonverfahren gemäß [TP BF StB Teil B 4.2] die Dichte ermittelt. Zusätzlich zum Ballonverfahren wurde die Dichte auch mit einem Flüssigkeitsersatzverfahren ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Die hohen Infiltrationsbeiwerte stehen in Verbindung zu den geringen EV2-Werten der ToB, die Versuchsfelder wurden vergleichsweise gering verdichtet. Im Labor wurden deutlich geringere Infiltrationsbeiwerte an den Gemischen ermittelt.

Von den Materialproben, die zur Bestimmung der Trockenmasse im Labor und Berechnung der Trockendichte ausgebaut wurden, wurden im Labor die Korngrößenverteilung und die stoffliche Zusammensetzung ermittelt. Die Probenbezeichnung dieser Ausbauproben erfolgte entsprechend des jeweiligen Messpunktes.

Die Korngrößenverteilungen der Proben sind in Bild 53 dargestellt. Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung einer FSS 0/32 nach [ZTV SoB-StB 04/07] werden von allen Gemischen mit geringfügigen Abweichungen eingehalten.

Variante	Messpunkt/ Probe	$k_{i(10)}$ [m/s]	Wassergehalt [%]	Trockendichte [g/cm ³]	
				Ballonverfahren	Flüssigkeits- ersatzverfahren
0 M.-% KS (RCB)	1	$3,3 \times 10^{-4}$	8	2,178	1,989
	2	$4,9 \times 10^{-4}$	8	1,887	1,819
20 M.-% KS	3	$6,6 \times 10^{-4}$	8	1,965	1,842
	4	$1,2 \times 10^{-3}$	9	1,852	1,786
40 M.-% KS	5	$9,1 \times 10^{-4}$	10	1,898	1,759
	6	$3,9 \times 10^{-4}$	9	1,918	1,725
30 M.-% KS	7	$4,2 \times 10^{-4}$	9	1,917	1,854
	8	$5,0 \times 10^{-4}$	9	1,895	1,827

Tabelle 16:
Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$, Wassergehalt und Trockendichten der ToB-Gemische

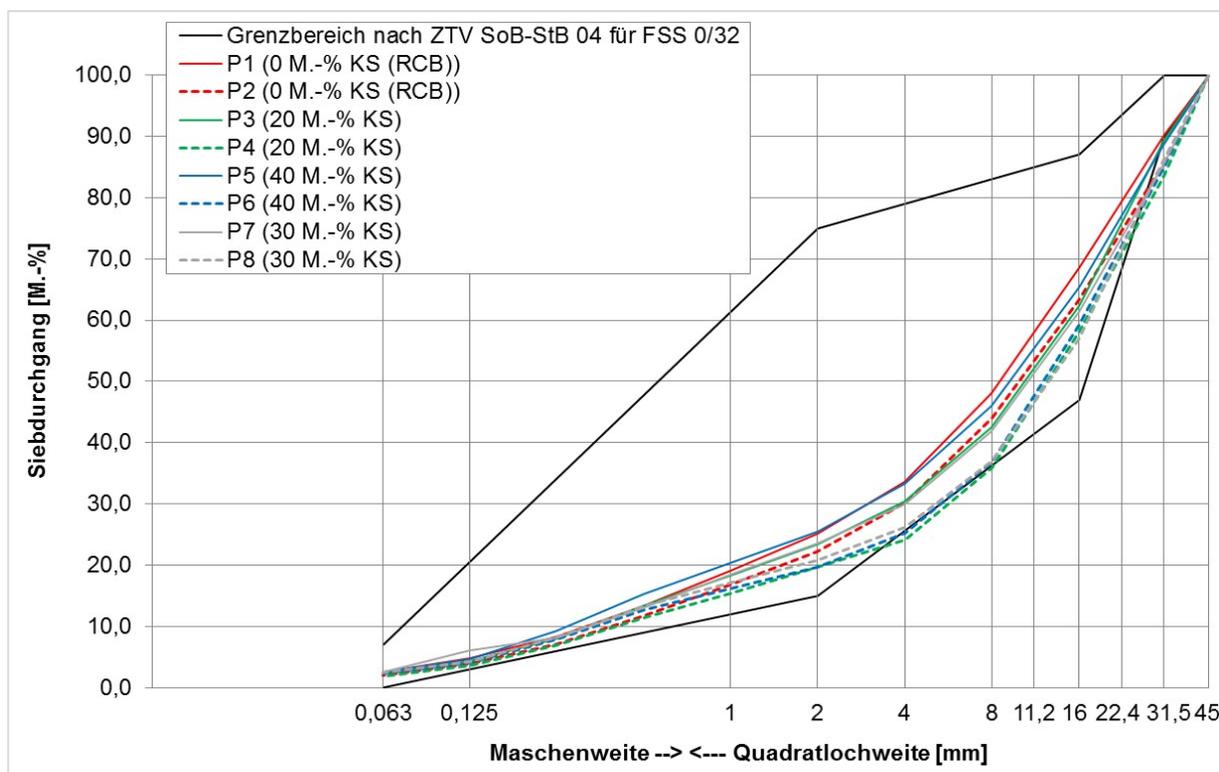


Bild 53:
Korngrößenverteilung der Ausbauproben

Die stofflichen Zusammensetzungen sind in Tabelle 17 zu entnehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Proben P1, P2, P4, P5 die gewünschte Zusammensetzung nicht in allen Fällen erreicht wurde. Bei den Proben P3, P6, P7 und P8 sind die KS-Anteile jeweils zu gering.

Probe	0 M.-% KS (RCB)		20 M.-% KS		40 M.-% KS		30 M.-% KS	
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Stoffgruppe	[M.-%]							
RC-Beton	100	100	88	78	62	71	87	80
Kalksandstein	0	0	12	22	38	29	13	20

*Tabelle 17:
Stoffliche Zusammensetzung der Ausbauproben*

4.3.2 Straßenbautechnische Charakterisierung der hergestellten ToB- Gemische 0/32 mit 0, 20, 30 und 40 M.-% KS-Anteil

Zusätzlich zu den Ausbauproben wurden während des Einbaus Proben der Gemische mit 0, 20, 30 und 40 M.-% KS-Anteil entnommen. Die Korngrößenverteilungen dieser Proben decken sich mit denen der jeweiligen Ausbauproben, sodass diese Gemische ohne weitere Aufbereitung für die Proctor- und Frosthebungsversuche verwendet werden konnten. Die Kornformkennzahlen SI gemäß [DIN EN 933-4] der jeweiligen Variante in den Kornklassen 4/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm sind in Tabelle 18 und die Schlagzertrümmerungswerte gemäß [DIN EN 1097-2] in Tabelle 19 zusammengefasst. Tabelle 20 zeigt die stoffliche Zusammensetzung der Proben

Probe	SI [-]		
	4/8 mm	8/16 mm	16/32 mm
0 M.-% KS (RCB)	12,2	6,8	5,8
20 M.-% KS	15,0	14,1	10,3
30 M.-% KS	20,6	12,7	8,5
40 M.-% KS	17,6	10,7	8,1

Tabelle 18:
Kornformkennzahl SI der verschiedenen KS-Gemische

Kennwert	Einheit	0 M.-% KS (RCB)	20 M.-% KS	30 M.-% KS	40 M.-% KS
SZ _{8/12} -Wert	[M.-%]	20,2	28,3	28,0	31,2

Tabelle 19:
Schlagzertrümmerungswerte der verschiedenen KS-Gemische

Die stoffliche Zusammensetzung dieser Proben ist in der nachfolgenden Tabelle 20 aufgeführt.

Stoffgruppe		KS	0 M.-% KS (RCB)	20 M.-% KS	30 M.-% KS	40 M.-% KS
Beton	[M.-%]	1,2	96,6	72,8	62,8	53,7
Kalksandstein		87,4	-	21,3	30,9	38,9
Naturstein		0,8	2,3	1,3	1,7	1,5
Klinker/Ziegel		1,1	1,1	0,7	1,1	0,9
Putzmörtel		7,7	-	2,3	2,2	2,9
Industrielle		1,8	-	1,6	1,3	2,1

Tabelle 20:
Stoffliche Zusammensetzung der Baustoffgemische

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse zur Trockenrohddichte und Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 Anhang C.5 sowie zur Reindichte und Gesamtporosität nach DIN EN 1936 zusammengefasst.

Kennwert	Einheit	KS	0 M.-% KS (RCB)	20 M.-% KS	30 M.-% KS	40 M.-% KS
Trockenrohddichte	[g/cm ³]	1,85	2,53	2,56	2,45	2,36
Massebezogener Wasser- Aufnahmegrad unter Atmosphärendruck	[%]	11,8	2,6	1,8	2,7	4,1
Volumenbezogener Wasser- aufnahmegrad nach Atmosphärenbeanspruchung	[Vol.-%]	21,9	7,3	4,6	6,6	9,6
Reindichte	[g/cm ³]	2,623	2,586	2,601	2,626	2,613
Gesamtporosität	[Vol.-%]	29,4	3,1	2,9	6,7	9,9

Tabelle 21:
Ergebnisse der Trockenrohddichte, Wasseraufnahmegrad, Reindichte und Gesamtporosität

Die Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$ gemäß TP Gestein-StB 8.3.1 sind in Tabelle 22 aufgeführt.

Kennwert	Einheit	0 M.-% KS (RCB)	20 M.-% KS	30 M.-% KS	40 M.-% KS
$k_{i(10)}$	[m/s]	$2,7 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$< 5 \times 10^{-7}$

Tabelle 22:
Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$

Der Widerstand der Baustoffgemische gegen Frost-Tau-Wechsel (FTW) wurde gemäß DIN EN 1367-1 bestimmt. Dabei wurden die Kornklassen 8/16 und 16/32 geprüft, siehe Tabelle 23. Bei den sortenreinen Baustoffen KS und RCB war die Probenmenge nicht mehr ausreichend für alle Varianten der FTW-Versuche.

Probe	Absplitterungen nach 10 FTW [M.-%]			
	in H ₂ O		mit 1 %iger NaCl-Lösung	
	8/16	16/32	8/16	16/32
0 M.-% KS (RCB)	-	-	11,0	9,0
20 M.-% KS	17,5	22,3	27,0	35,4
30 M.-% KS	13,8	23,0	21,6	24,0
40 M.-% KS	19,5	41,8	-	27,3
KS	-	93,6	-	98,4

Tabelle 23:
Ergebnisse zum Widerstand der Gemische gegen Frost-Tau-Wechsel

Die Ergebnisse der Proctorversuche sind in Bild 54 dargestellt und die optimalen Wassergehalte mit den korrespondierenden Trockendichten in Tabelle 24 zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Frosthebungsversuche sind in Bild 53 und 54 dargestellt. Mit zunehmendem KS-Anteil verringern sich die maximale Frosthebung und die bleibende Hebung. Somit werden die Ergebnisse aus dem vorangegangenen AiF-Projekt „Eignung von rezyklierten Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel“ (AiF-Nummer 15517-N) bestätigt [Ede1]. Das von [Rad1] vorgeschlagene Kriterium zur Frostempfindlichkeit (Integral der Frosteinwirkung $\leq 43 \text{ mm/d}$) wird von allen Baustoffgemischen eingehalten. Wie bei der maximalen Frosthebung nimmt das Integral mit abnehmendem KS-Anteil zu. Das Kriterium, dass das Integral der Temperaturwirkung $\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$ sein soll, wird von den Baustoffgemischen nicht erfüllt, die Werte liegen jedoch alle auf einem vergleichbaren Niveau. Den höchsten Wert von $21,8 \text{ K} \cdot \text{d}$ weist das Gemisch mit 20 M.-% KS auf.

Probe	Optimaler Wassergehalt [%]	Trockendichte [g/cm^3]
0 M.-% KS (RCB)	10,0	1,930
20 M.-% KS	9,9	1,859
30 M.-% KS	10,0	1,876
40 M.-% KS	9,6	1,797

Tabelle 24:
Ergebnisse der Proctorversuche - Optimaler Wassergehalt und Trockendichte der Baustoffgemische

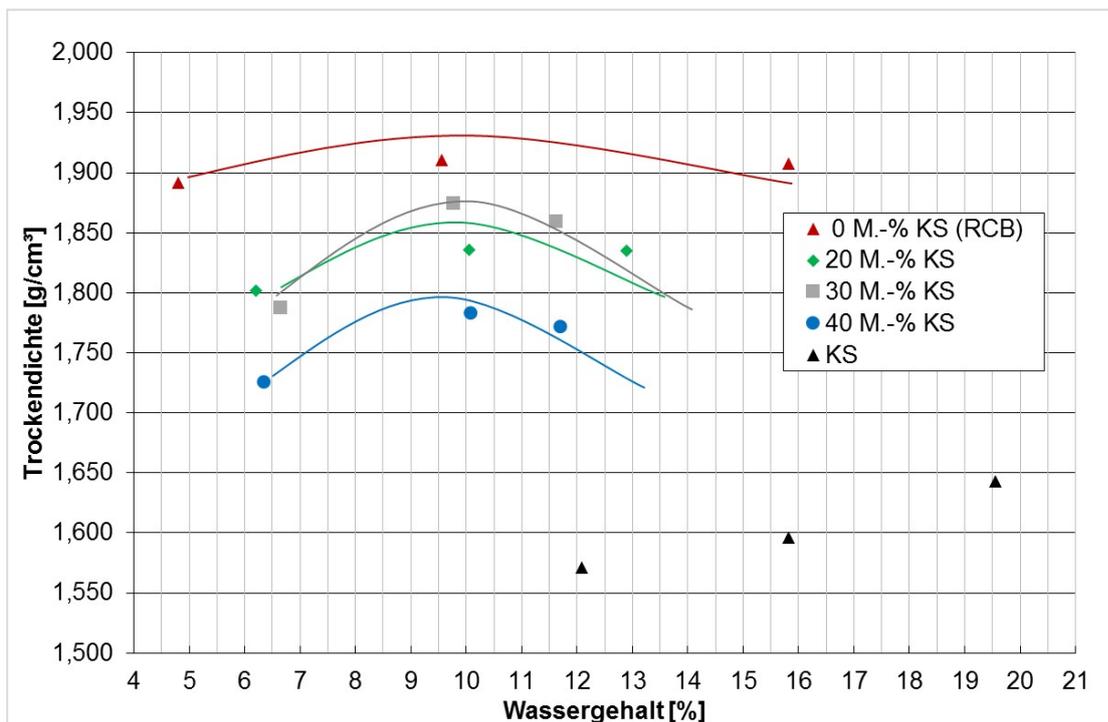


Bild 54:
Ergebnisse der Proctorversuche der ToB-Gemische

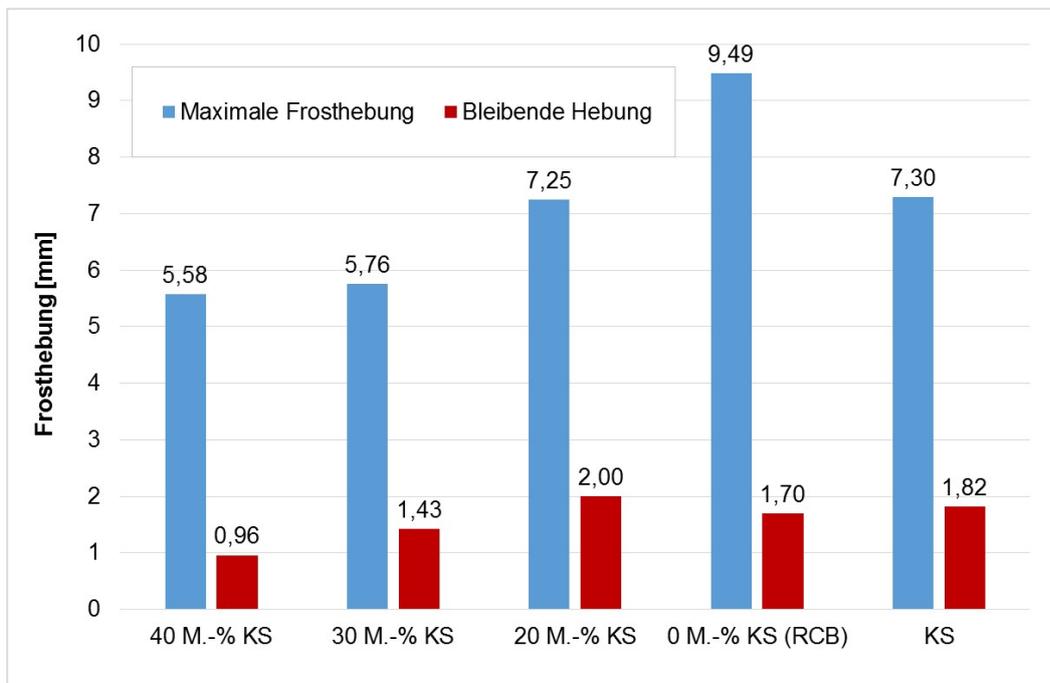


Bild 55:
Ergebnisse der Frosthebungsversuche – maximale Frosthebung und bleibende Hebung – der ToB-Gemische

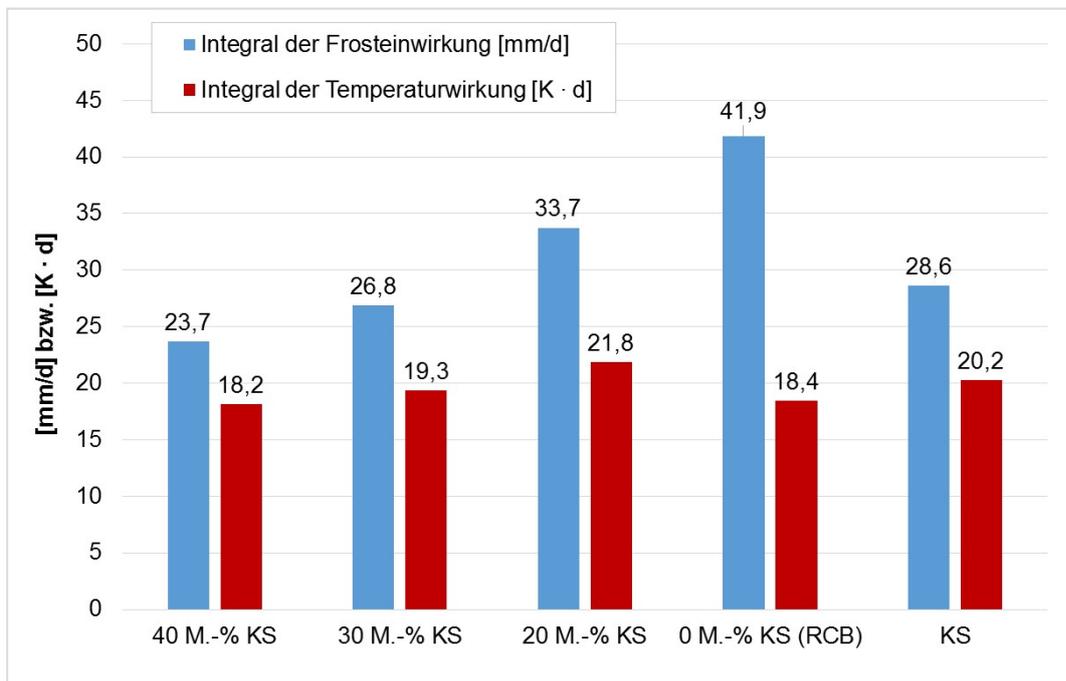


Bild 56:
Ergebnisse der Frosthebungsversuche – Integral der Frosteinwirkung und Integral der Temperaturwirkung – der ToB-Gemische

Zur Ermittlung der Kornverfeinerungen der Baustoffgemische infolge des Frosthebungsversuches und der Verdichtungsbeanspruchung wurden die Korngrößenverteilungen an den Materialien vor und nach Abschluss aller Einwirkungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 57 bis 60 dargestellt.

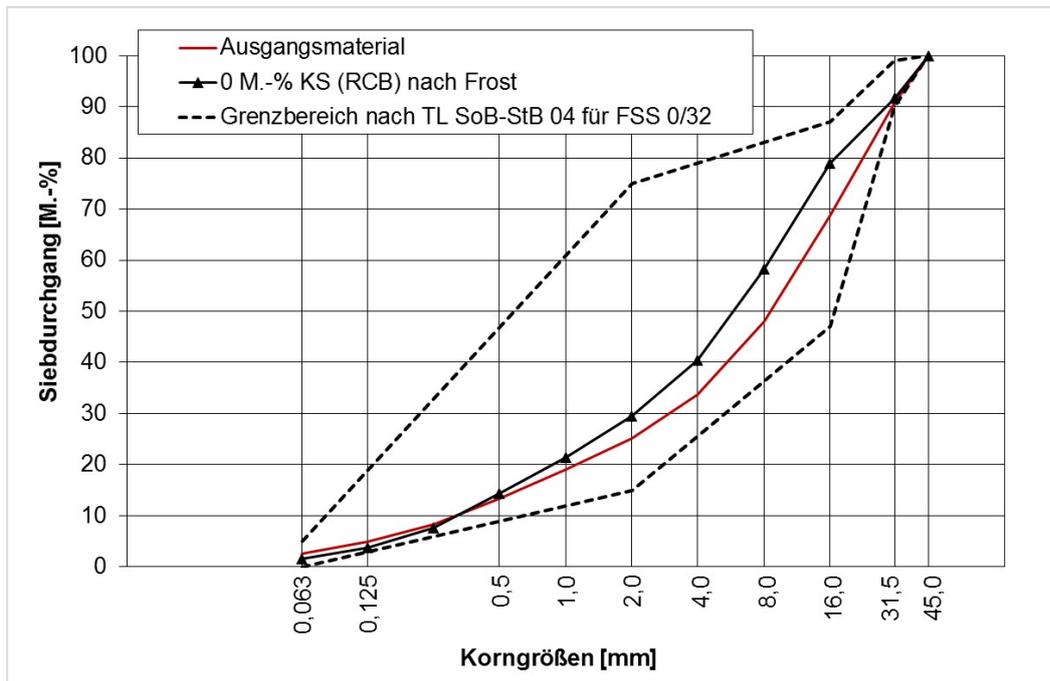


Bild 57:
Kornverfeinerung des Baustoffgemisches mit 0 M.-% KS (RCB) nach den Einwirkungen aus Verdichtung und Frost

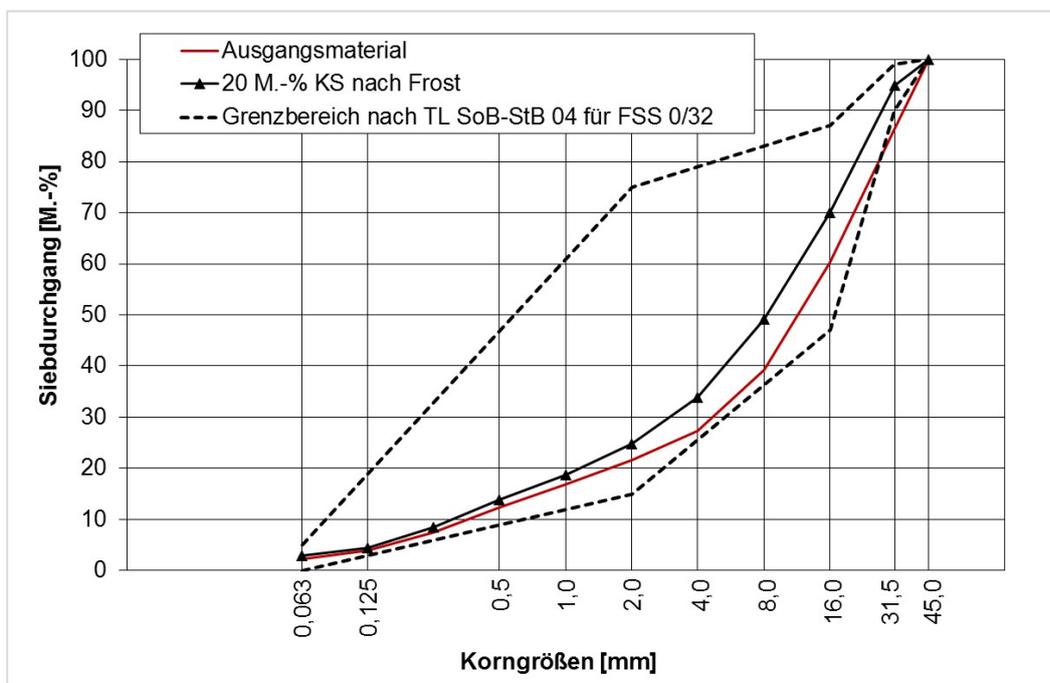


Bild 58:
Kornverfeinerung des Baustoffgemisches mit 20 M.-% KS nach den Einwirkungen aus Verdichtung und Frost

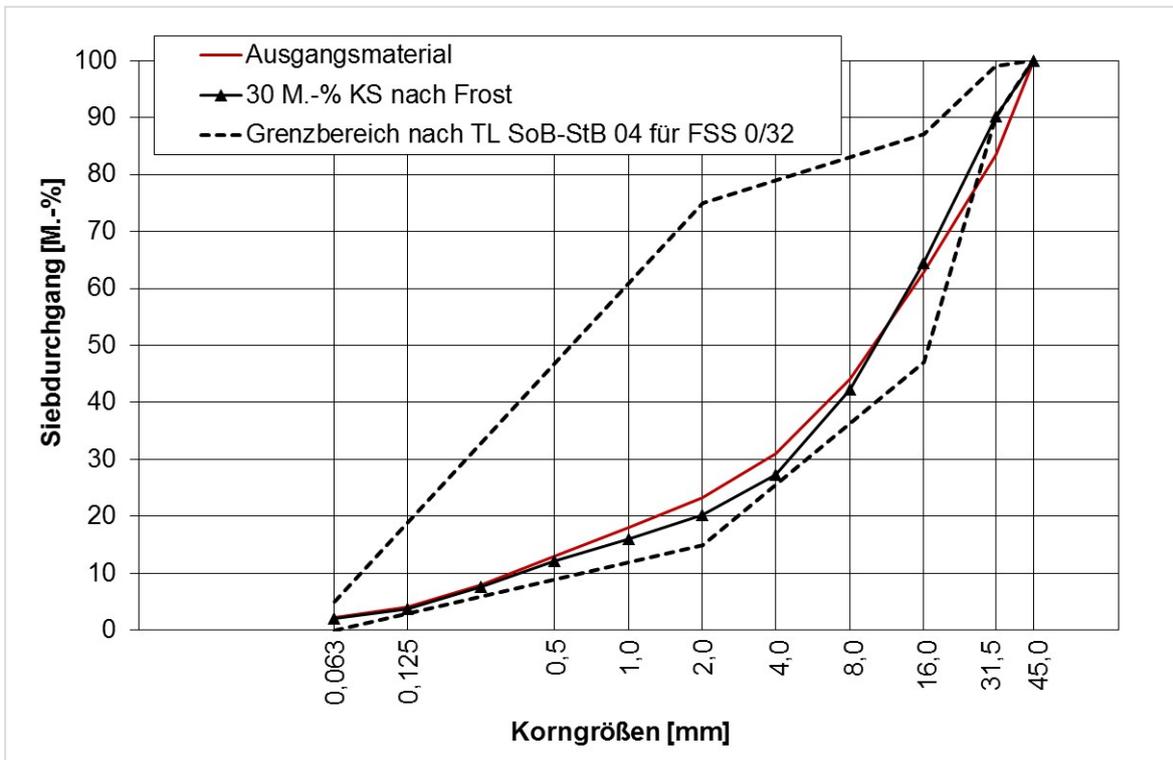


Bild 59:
Kornverfeinerung des Baustoffgemisches mit 30 M.-% KS nach den Einwirkungen aus Verdichtung und Frost

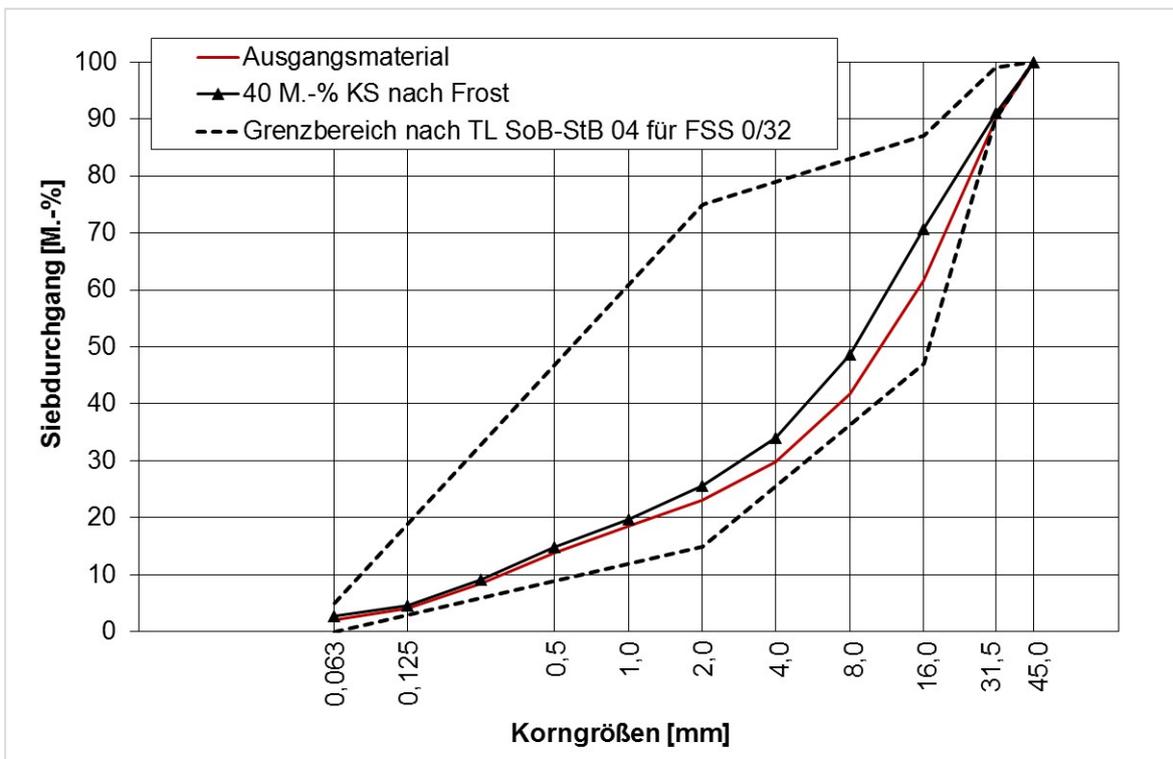


Bild 60:
Kornverfeinerung des Baustoffgemisches mit 40 M.-% KS nach den Einwirkungen aus Verdichtung und Frost

4.3.3 Straßenbautechnische Messungen auf den Versuchsfeldern der Erprobungsstrecke

4.3.3.1 Ebenheitsmessungen

Die Ebenheitsmessungen zeigen unter Berücksichtigung der Genauigkeit des Verfahrens keine signifikanten Veränderungen im Laufe der Liegezeit. Exemplarisch sind in den Bildern 61 bis 63 die Ergebnisse der Messungen nach ca. 20 Monaten Liegezeit der Versuchsfelder dargestellt. Die Abweichungen betragen in Querrichtung maximal ± 5 mm bei Vernachlässigung der höheren Delta-Werte im Bereich der Asphaltnaht und in Längsrichtung bei Vernachlässigung des Anfangsbereiches maximal ± 3 mm. Zu den anderen Messzeitpunkten wurden maximale Delta-Werte in Querrichtung ebenfalls von ± 5 mm und in Längsrichtung von i.d.R. ± 5 mm ermittelt. Jedoch wurden am 07.12.2017 bei den Ebenheitsmessungen in Längsrichtung in den rechten Messfeldern bei Station 42,4 m und am 20.4.2018 bei Station 43,8 m Delta-Werte von -14 mm und -10 mm gemessen.

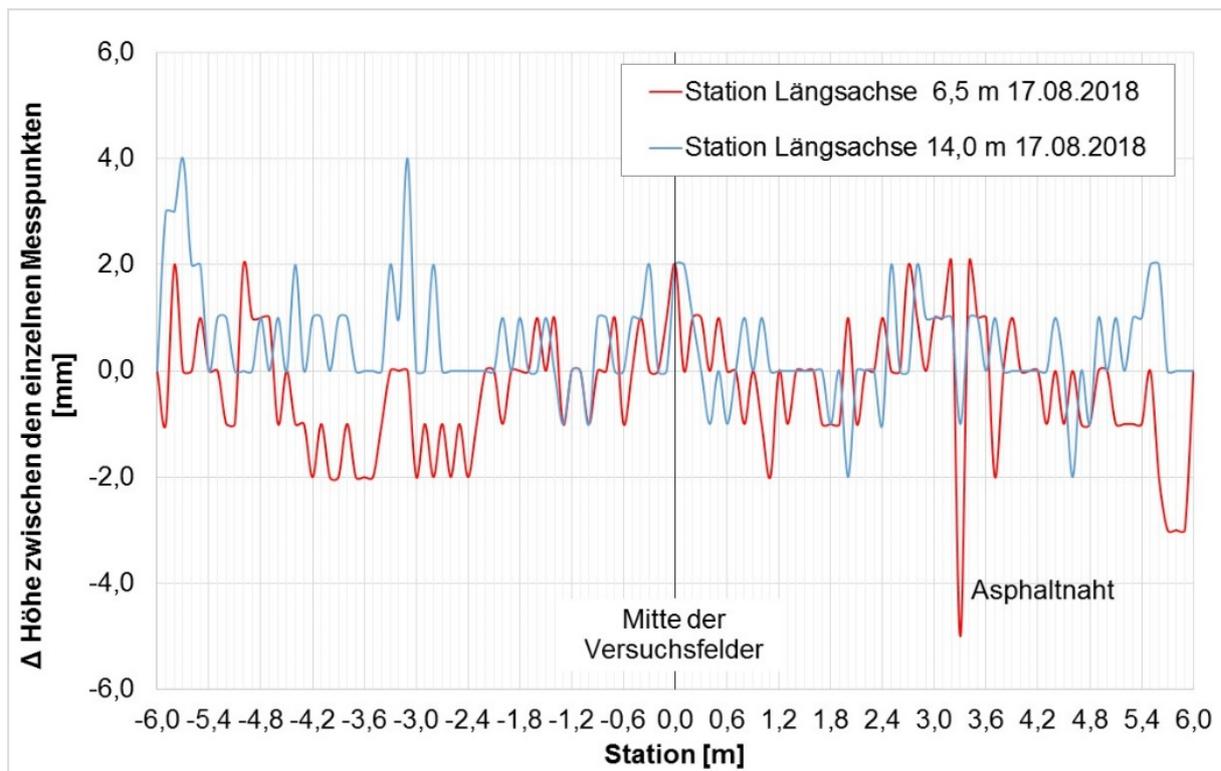


Bild 61:
Ergebnisse der Ebenheitsmessungen in Querrichtung bei 6,5 m und 14,0 m in Längsrichtung am 17.08.2018

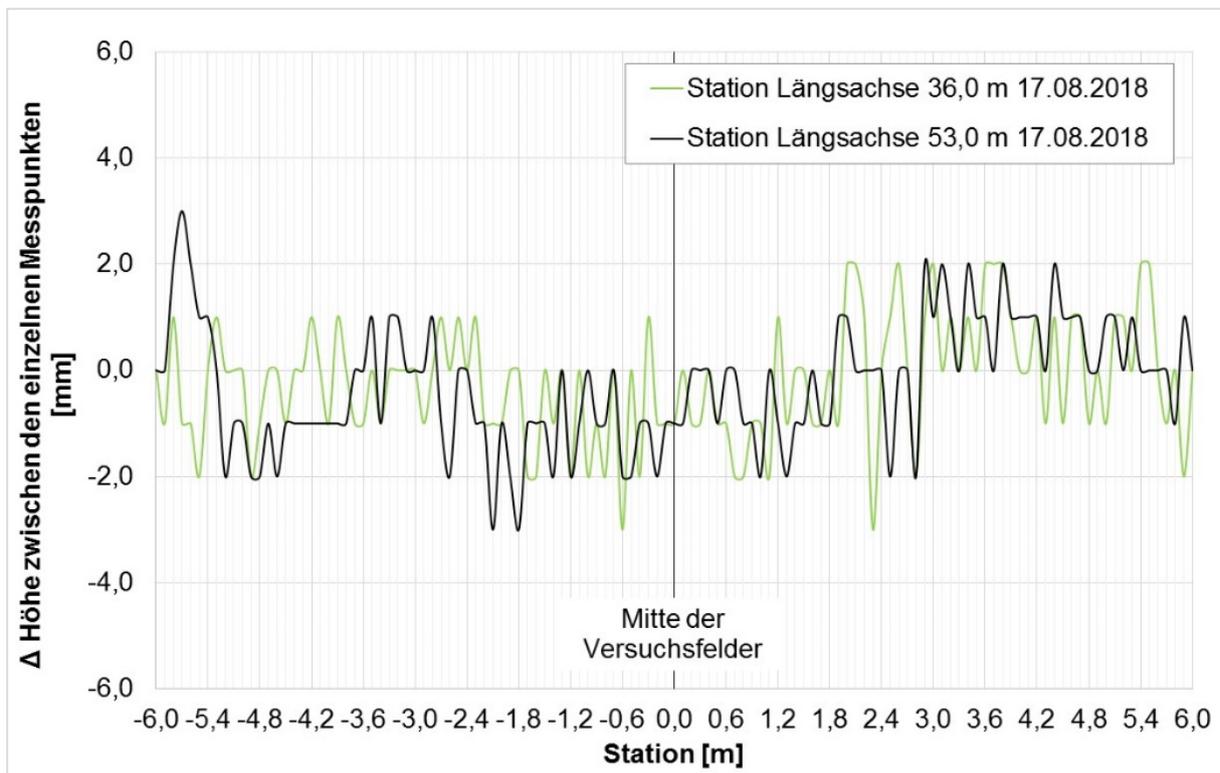


Bild 62:
Ergebnisse der Ebenheitsmessungen in Querrichtung bei 36,0 m und 53,0 m in Längsrichtung am 17.08.2018

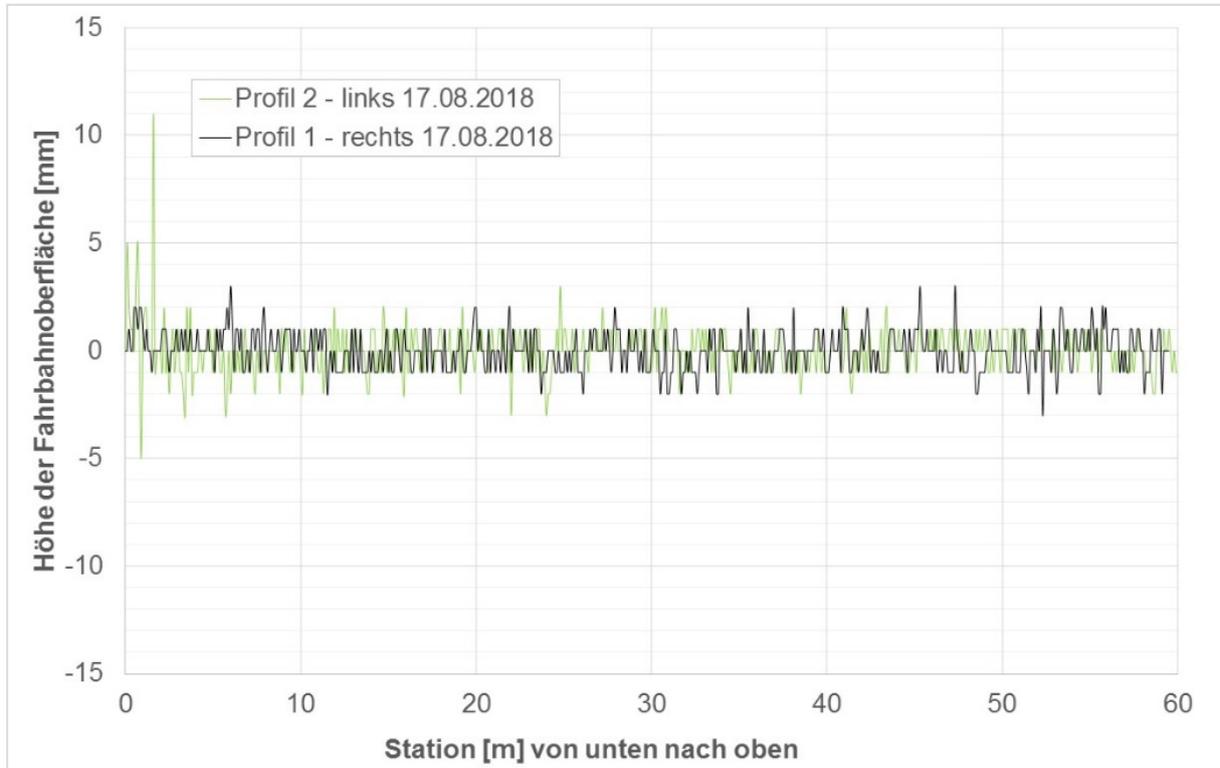


Bild 63:
Ergebnisse der Ebenheitsmessungen in Längsrichtung 17.08.2018

Die Querprofile, welche am 07.12.2017, 20.04.2018 und 17.08.2018 ermittelt wurden, sind in den Bildern 64 bis 67 zu sehen. Die Längsprofile sind in den Bildern 68 und 69 dargestellt. Über den betrachteten Zeitraum sind keine Auffälligkeiten zu erkennen.

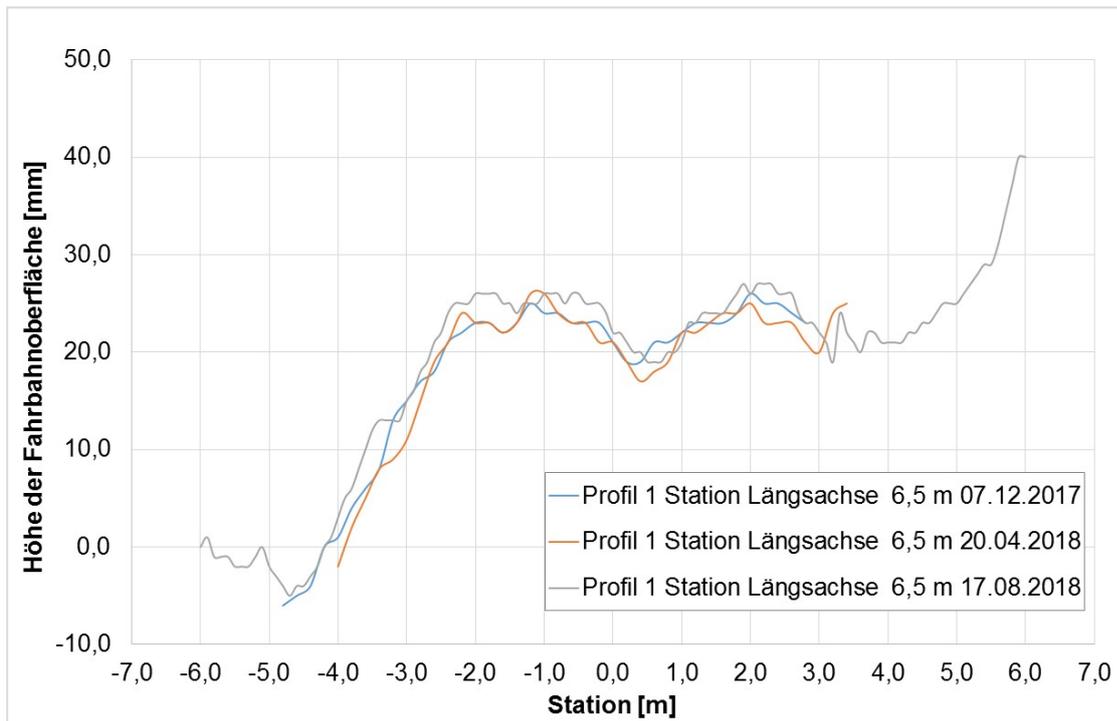


Bild 64:
Querprofile bei 6,5 m in Längsrichtung

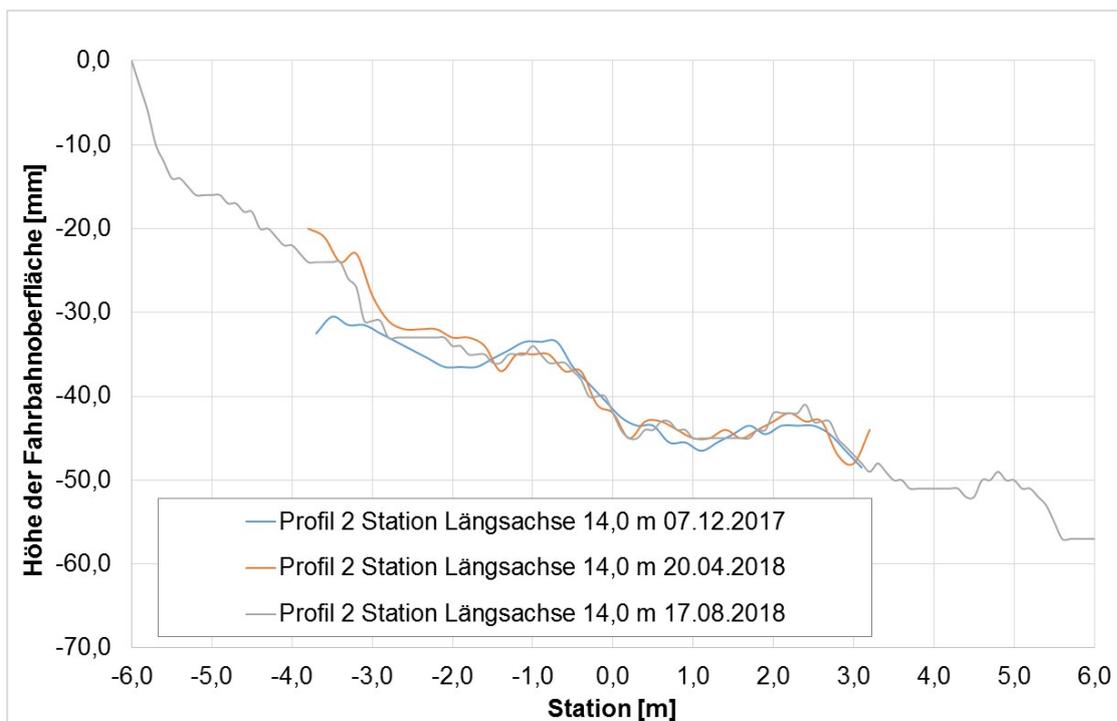


Bild 65:
Querprofile bei 14,0 m in Längsrichtung

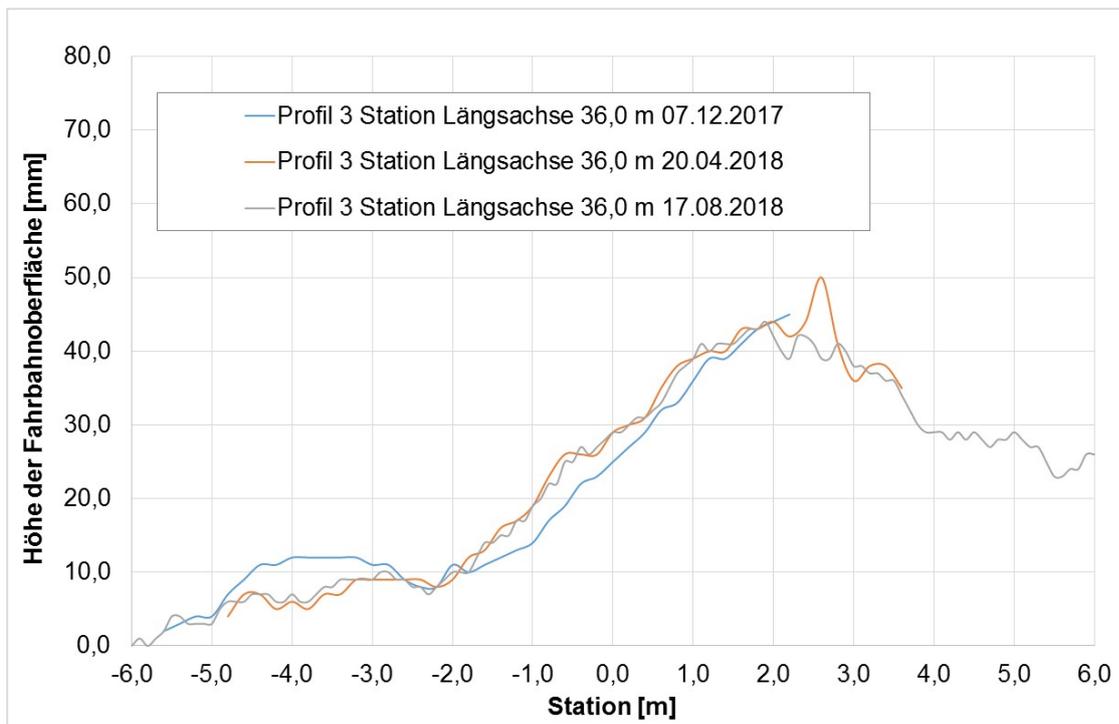


Bild 66:
Querprofile bei 36,0 m in Längsrichtung

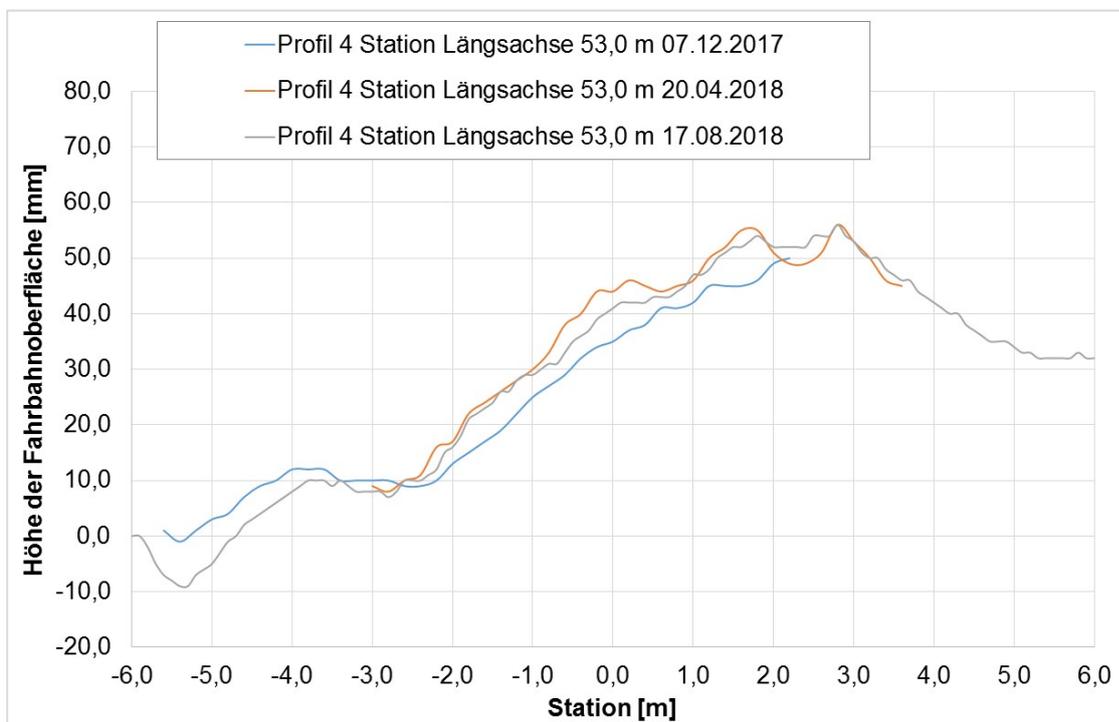


Bild 67:
Querprofile bei 53,0 m in Längsrichtung

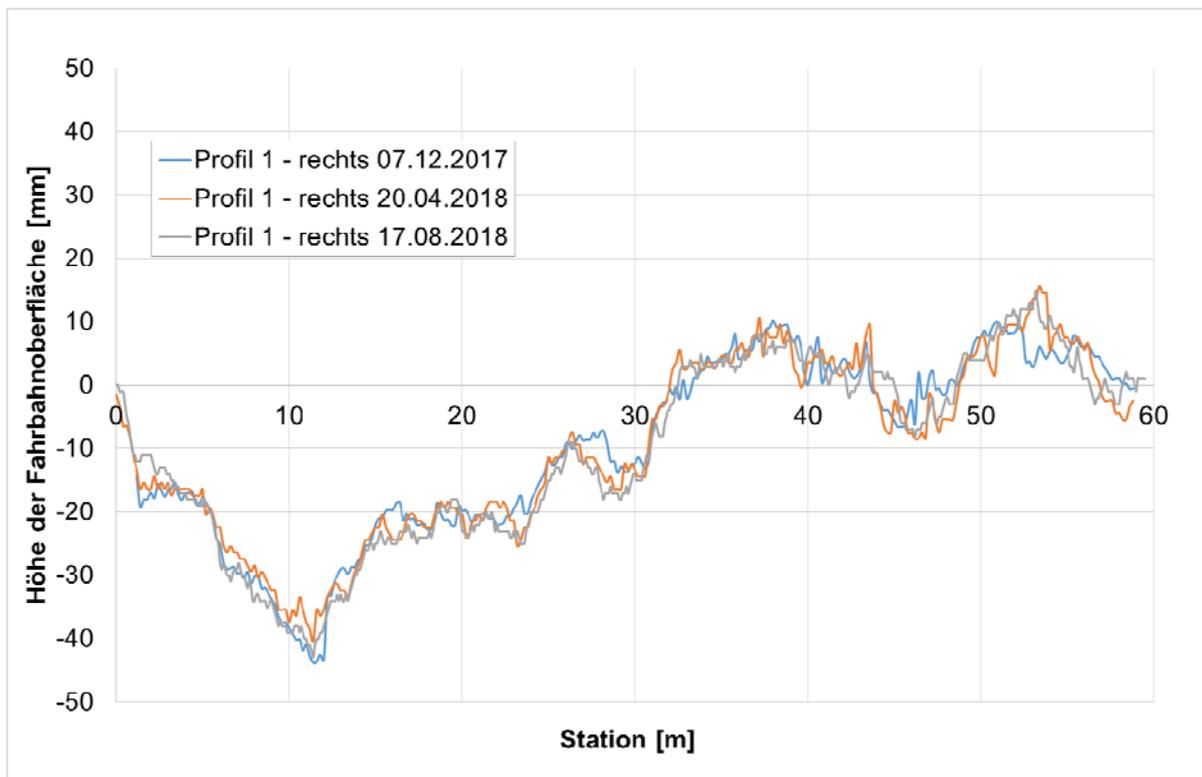


Bild 68:
Längsprofil in der Mitte der rechten Versuchsfelder

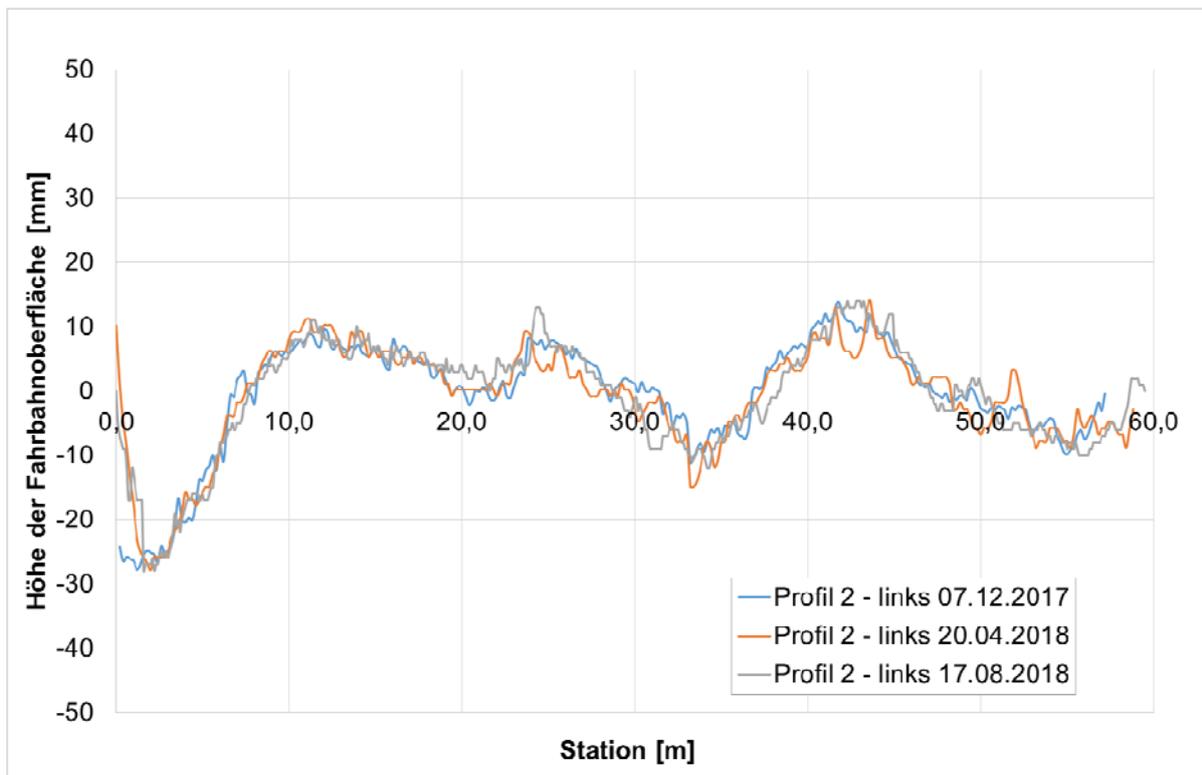


Bild 69:
Längsprofil in der Mitte der linken Versuchsfelder

4.3.3.2 Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken

Die Ergebnisse der Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken sind in Tabelle 25 zusammengefasst und in den Bildern 70 und 71 grafisch dargestellt. Bei den straßenbautechnischen Messungen am 20.04.2018 wurden zur besseren Bewertung aller Tragfähigkeitsmessungen die Dicke der Asphalt-schicht an den Punkten, an denen die Messungen durchgeführt wurden, durch die Entnahme von Bohrkernen ermittelt. Diese sind ebenfalls in Tabelle 25 aufgeführt.

Den Stationen 0 m, 30 m und 60 m wurden keine Varianten zugeordnet, da in diesen Bereichen Vermischungen mit den Baustoffgemischen anderer Zusammensetzung vorliegen können.

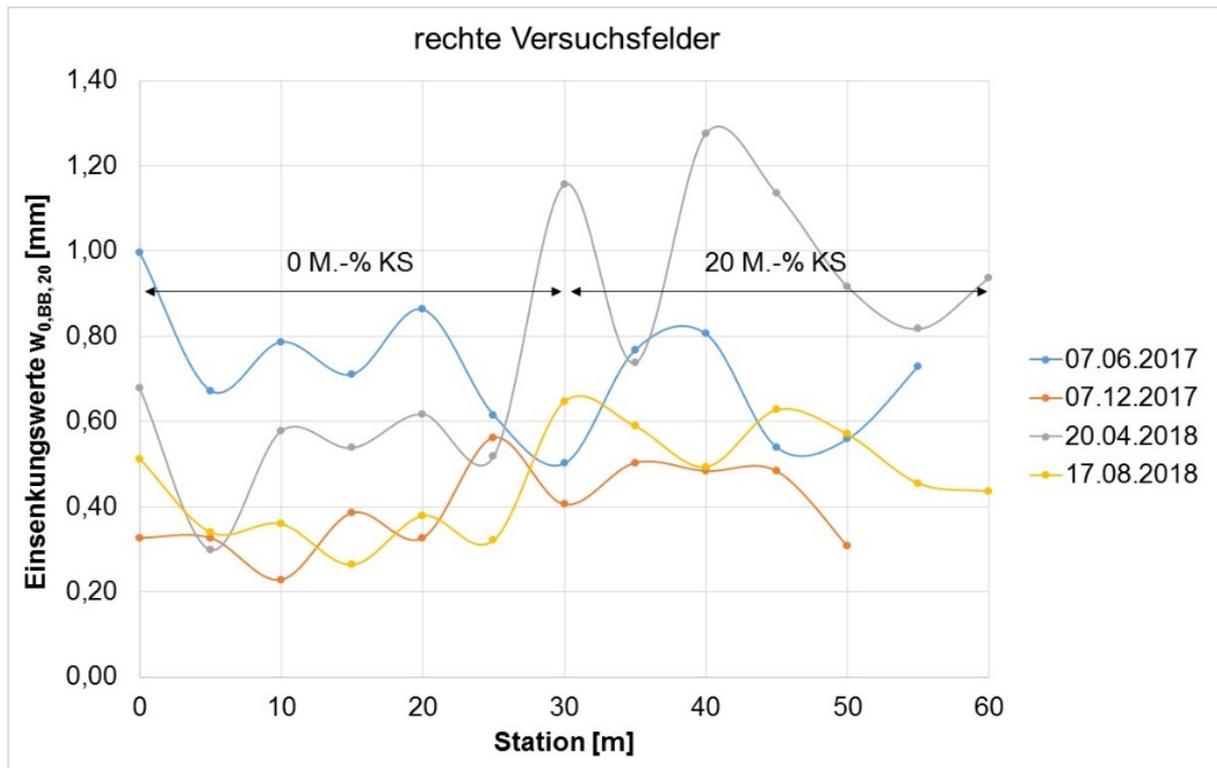


Bild 70: Ergebnisse der Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken auf den rechten Versuchsfeldern

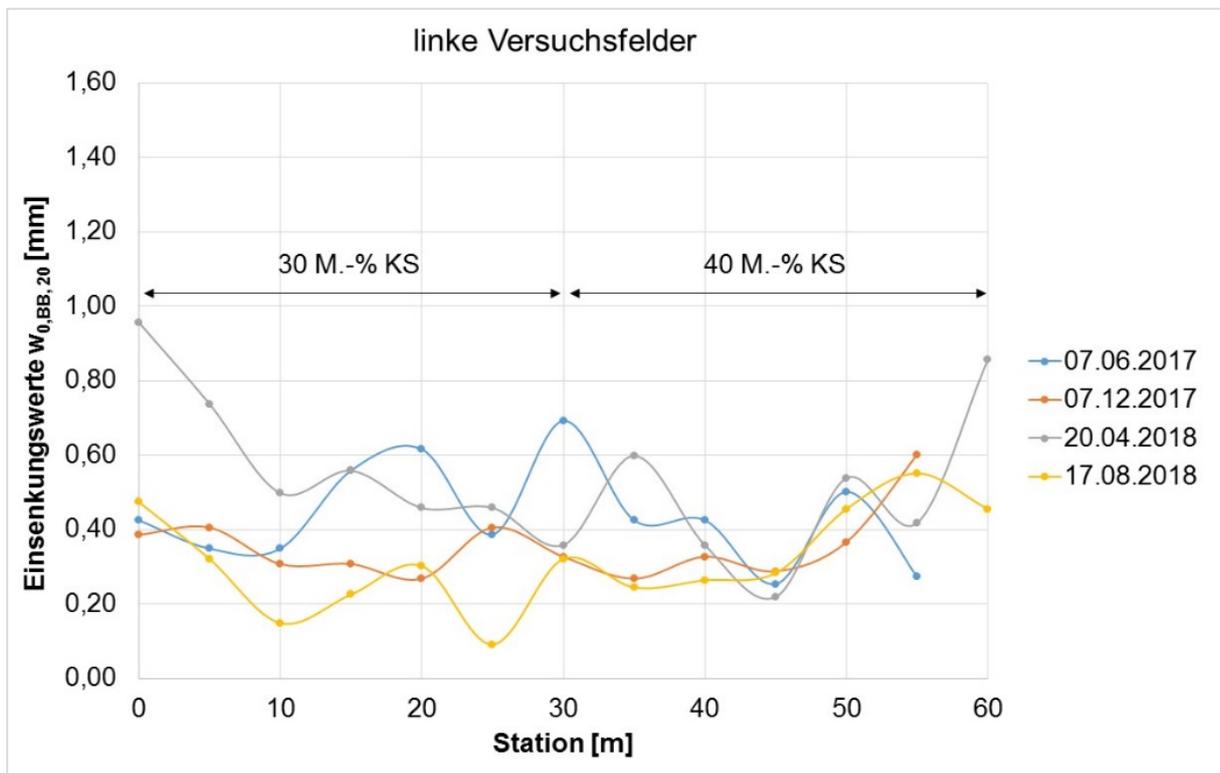


Bild 71:
Ergebnisse der Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken auf den linken Versuchsfeldern

Versuchsfeld	Messdatum		07.06.2017 (T = 17,5 °C)				07.12.2017 (T = 3 °C)				20.04.2018 (T = 40 °C)				17.08.2018 (T = 30 °C)			
	Station [m]	Dicke der Asphalt-schicht [cm]	$w_{0, BB, 20}$	$\bar{w}_{0, BB, 20}$	s	$w_{0, BB, 20 + s}$	$w_{0, BB, 20}$	$\bar{w}_{0, BB, 20}$	s	$w_{0, BB, 20 + s}$	$w_{0, BB, 20}$	$\bar{w}_{0, BB, 20}$	s	$w_{0, BB, 20 + s}$	$w_{0, BB, 20}$	$\bar{w}_{0, BB, 20}$	s	$w_{0, BB, 20 + s}$
0 M.-% KS	0	8,0	1,00				0,33				0,68				0,51			
	5	10,0	0,67				0,33				0,30				0,34			
	10	7,5	0,79				0,23				0,58				0,36			
	15	7,5	0,71	0,73	0,09	0,82	0,39	0,37	0,11	0,48	0,54	0,51	0,11	0,62	0,26	0,33	0,04	0,37
	20	8,0	0,86				0,33				0,62				0,38			
	25	7,5	0,62				0,56				0,52				0,32			
20 M.-% KS	30	7,5	0,50				0,41				1,16				0,65			
	35	8,0	0,77				0,50				0,74				0,59			
	40	8,0	0,81				0,48				1,28				0,49			
	45	8,0	0,54	0,68	0,11	0,79	0,48	0,44	0,08	0,52	1,14	0,98	0,20	1,18	0,63	0,55	0,06	0,61
	50	9,5	0,56				0,31				0,92				0,57			
	55	8,5	0,73								0,82				0,46			
30 M.-% KS	60	9,0									0,94				0,44			
	0	9,5	0,43				0,39				0,96				0,47			
	5	8,0	0,35				0,41				0,74				0,32			
	10	10,0	0,35				0,31				0,50				0,15			
	15	10,0	0,56	0,45	0,11	0,56	0,31	0,34	0,06	0,39	0,56	0,54	0,10	0,65	0,23	0,22	0,09	0,31
	20	10,5	0,62				0,27				0,46				0,30			
40 M.-% KS	25	11,5	0,39				0,41				0,46				0,09			
	30	13,0	0,69				0,33				0,36				0,32			
	35	11,5	0,43				0,27				0,60				0,24			
	40	10,5	0,43				0,33				0,36				0,26			
	45	11,5	0,25	0,38	0,10	0,47	0,29	0,37	0,12	0,49	0,22	0,43	0,13	0,56	0,28	0,36	0,12	0,48
	50	11,5	0,50				0,37				0,54				0,46			
Standardabweichung gesamt [mm]	55	11,5	0,27				0,60				0,42				0,55			
	60	8,0									0,86				0,46			
Einsenkungsgrenzwert gesamt $w_{0, BB, 20} + s$ [mm]			0,19				0,09				0,27				0,14			
Einsenkungsgrenzwert gesamt $w_{0, BB, 20} + s$ [mm]			0,77				0,47				0,93				0,53			

Tabelle 25:
Ergebnisse der Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken und die zugehörige Dicke der Asphalt-schicht

4.3.3.3 Ergebnisse der FWD-Messungen

Die nachfolgenden Angaben zu den Falling-Weight-Deflectometer-Versuchen sind dem Bericht der Firma [Zet1] entnommen.

Messrandbedingungen

Die Start- und Endpunkte der Messlinien sind in Bild 72 festgelegt.

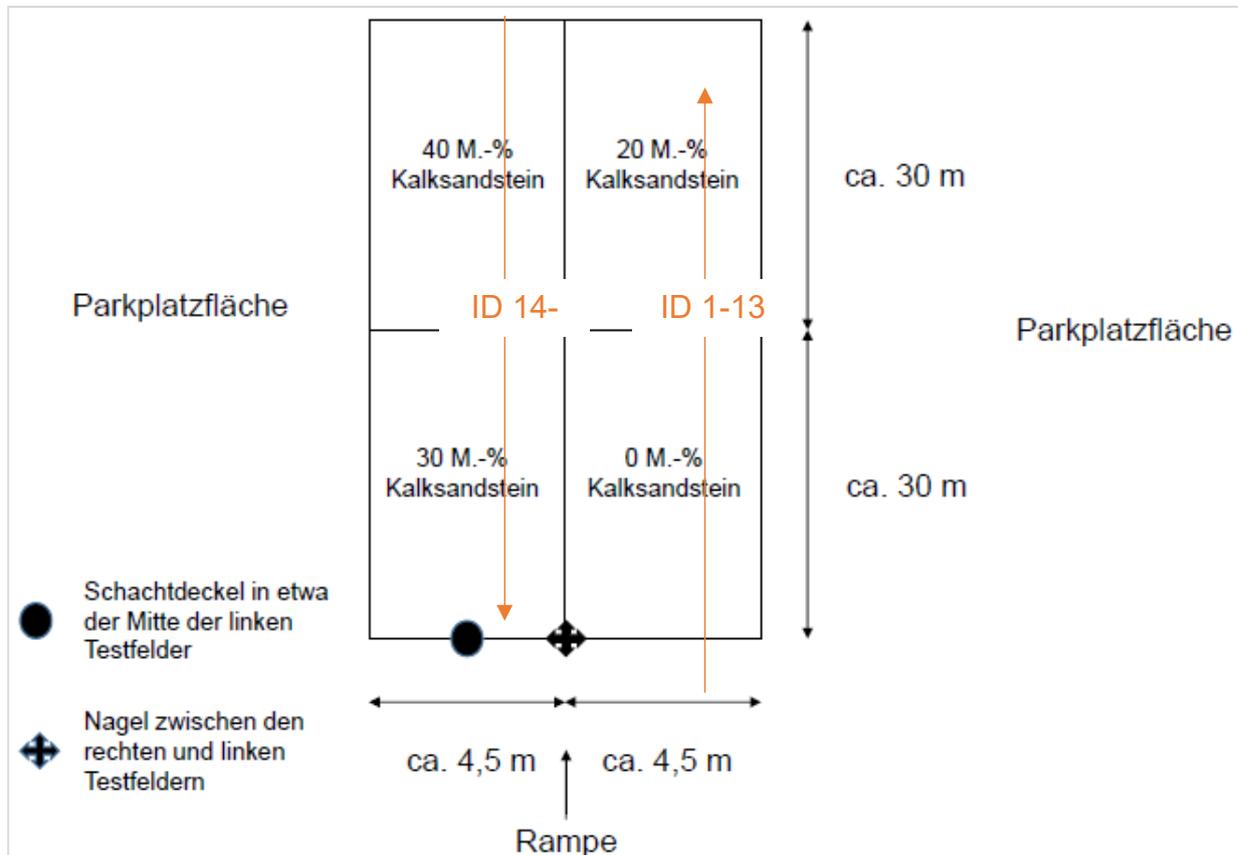


Bild 72:
Start- und Endpunkte der Messlinien [Zet1]

Durch den Einfluss der Temperatur auf den E-Modul des Asphalttes besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen gemessenen Deflexionen und der Asphaltkörpertemperatur. Gemäß [Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1] ist ein Temperaturbereich des Asphaltkörpers von 5 °C bis 30 °C für Tragfähigkeitsmessungen zulässig. In der Arbeit von [Jan1] wurde ein Temperaturkorrekturverfahren für FWD Messungen erarbeitet, welches (abweichend vom [Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1]) Messungen im Bereich von 5 °C bis 35 °C zulässt.

Während der FWD-Messungen wurde die Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe und die Lufttemperatur gemessen. Die Messung der Temperatur des Asphaltkörpers in 5 cm Tiefe, die für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und den Bezug der Messergebnisse auf Standardbedingungen von maßgeblicher Bedeutung ist, wurde während der Tragfähigkeitsmessungen an drei Positionen durchgeführt und fortlaufend dokumentiert.

Durch den Einfluss der Temperatur auf die Standfestigkeit des Asphaltes, besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen gemessenen Deflexionen im Lastzentrum bis 600 mm vom Lastzentrum entfernt und der Asphaltkörpertemperatur. Darüber hinaus wurde mit den Temperaturmessungen belegt, dass der Temperaturbereich (5 °C bis 30 °C), in dem Tragfähigkeitsmessungen gemäß dem [Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1] erfolgen sollten, nicht unter- bzw. überschritten wurde. In Tabelle 26 sind die dokumentierten klimatischen Bedingungen während der FWD-Messungen aufgeführt.

Messtag / Beschreibung	Temperatur [°C]
07.06.2017 Lufttemperatur während der FWD-Messungen Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe während der FWD-Messungen Oberflächentemperatur in 0 cm Tiefe während der FWD-Messungen Beschreibung: sonnig/ bewölkt, trocken, Starkregen vor Messung, stehendes Wasser auf der Fläche bis ca. 2 cm Tiefe *	9,8 – 11,8 16,8 – 17,9 17,5 – 19,2
11.01.2018 Lufttemperatur während der FWD-Messungen Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe während der FWD-Messungen Oberflächentemperatur in 0 cm Tiefe während der FWD-Messungen Beschreibung: bewölkt, trocken, stehendes Wasser auf der Fläche bis ca. 2 cm Tiefe * Hinweis: Gemäß Wettermeldungen lag in den Nächten vor dem Messdatum regelmäßig Bodenfrost vor.	5,1 – 6,4 5,2 – 5,5 7,7 – 9,7
20.04.2018 Lufttemperatur während der FWD-Messungen Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe während der FWD-Messungen Oberflächentemperatur in 0 cm Tiefe während der FWD-Messungen Beschreibung: sonnig, kein Schatten	26,9 – 30,3 40,0 – 40,8 ** 37,8 – 49,5 **
17.08.2018 Lufttemperatur während der FWD-Messungen Asphaltkörpertemperatur in 5 cm Tiefe während der FWD-Messungen Oberflächentemperatur in 0 cm Tiefe während der FWD-Messungen Beschreibung: sonnig, kein Schatten	21,0 – 24,0 26,0 – 26,9 30,7 – 35,0 **

* Die Oberfläche der Abstellfläche weist kein planmäßiges Gefälle auf, hierdurch kam es zu einer deutlich sichtbaren Pfützenbildung. Es ist nicht auszuschließen, dass die Lasteinleitung beeinflusst wurde.

** Hinweis: Die gemessenen Temperaturen überschreiten den zulässigen Temperaturbereich gemäß [Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1]. Als Folge sind erhöhte Einsenkungen zu erwarten.

Tabelle 26:
Klimatische Bedingungen während der FWD-Messungen [Zet1]

Grundlagen für die Bewertung der Messergebnisse

Aus Sensitivitätsuntersuchungen mit einem Mehrschichtenprogramm konnte nachgewiesen werden, dass die Deflexion unter dem letzten Geophon (1.800 mm vom Lastzentrum entfernt) Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit des Untergrundes zulässt.

Als Grenzwerte gelten folgende Deflexionen:

- Der Untergrund weist eine Mindesttragfähigkeit auf, wenn die Deflexionen unter dem letzten Geophon (1.800 mm vom Lastzentrum entfernt) zwischen $70 \mu\text{m}$ und $90 \mu\text{m}$ liegen.
- Der Untergrund ist nicht ausreichend tragfähig, wenn die Einsenkung unter dem letzten Geophon (1.800 mm vom Lastzentrum entfernt) $> 90 \mu\text{m}$ beträgt.
- Der Untergrund ist ausreichend tragfähig, wenn die Einsenkung unter dem letzten Geophon (1.800 mm vom Lastzentrum entfernt) $< 70 \mu\text{m}$ beträgt.

Messergebnisse

Die Bilder 73 bis 80 zeigen die ausgewerteten Ergebnisse der FWD-Messungen an den vier unterschiedlichen Zeitpunkten.

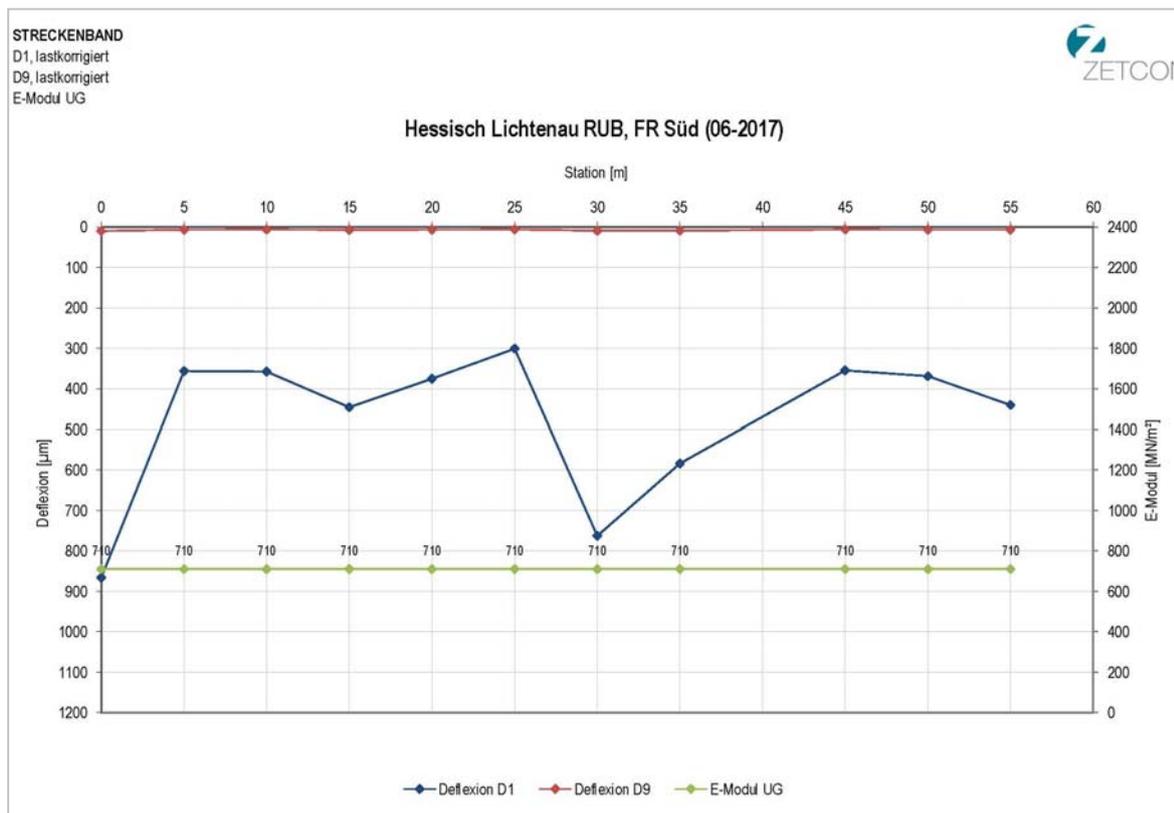


Bild 73:
Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 6/2017, Abschnitte mit 0 und 20 M.-% KS

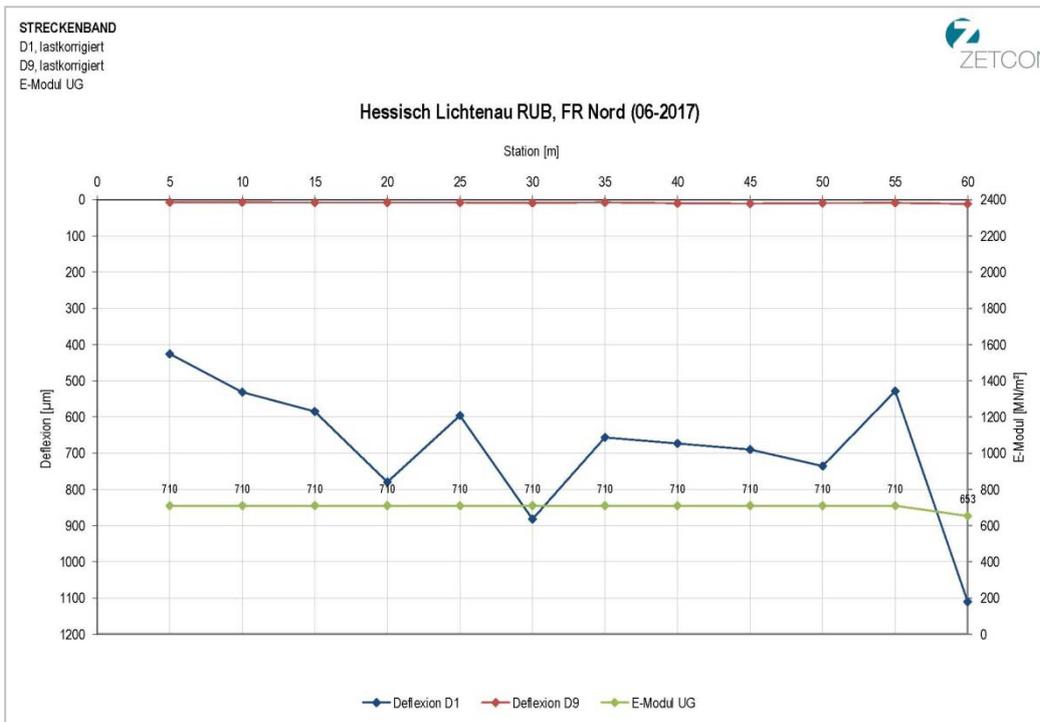


Bild 74:
Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 6/2017, Abschnitte mit 40 und 30 M.-% KS

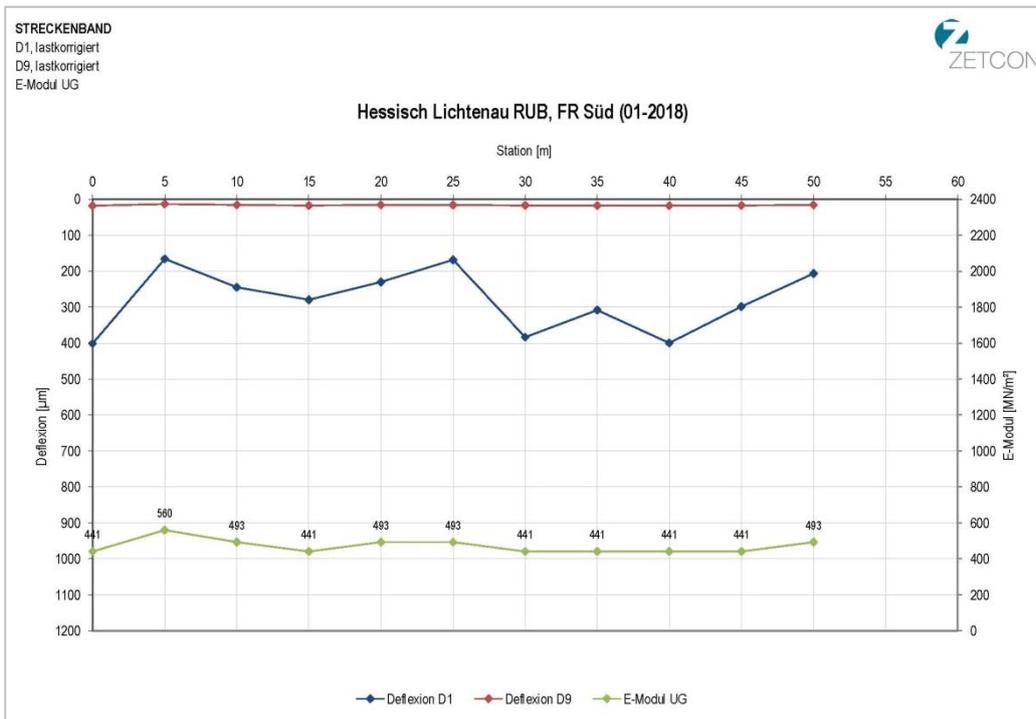


Bild 75:
Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 1/2018, Abschnitte mit 0 und 20 M.-% KS

STRECKENBAND
D1, lastkorrigiert
D9, lastkorrigiert
E-Modul UG



Hessisch Lichtenau RUB, FR Nord (01-2018)

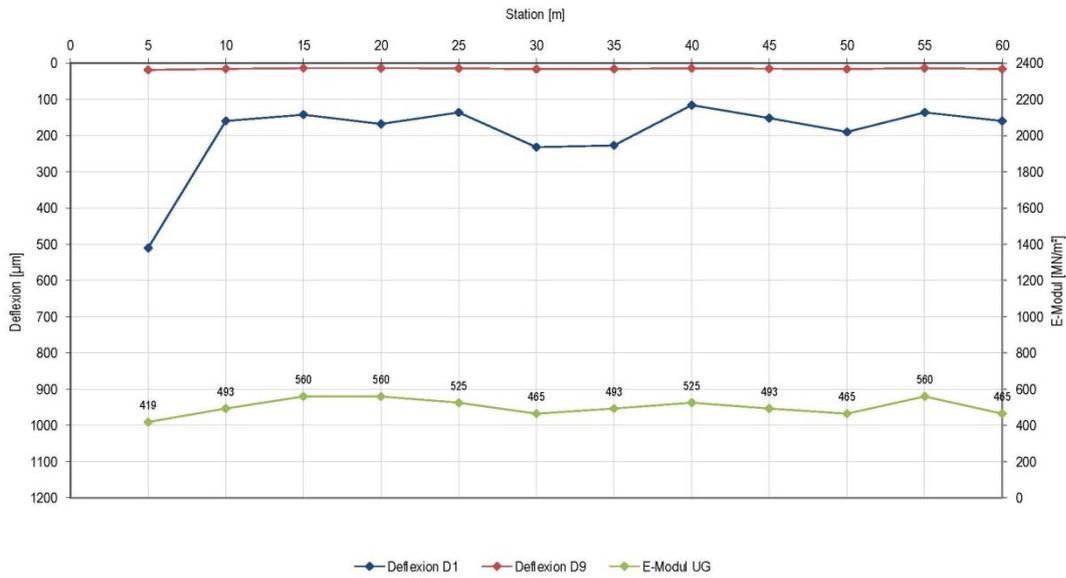


Bild 76:
Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 1/2018, Abschnitte mit 40 und 30 M.-% KS

STRECKENBAND
D1, lastkorrigiert
D9, lastkorrigiert
E-Modul UG



Hessisch Lichtenau RUB, FR Süd (04-2018)

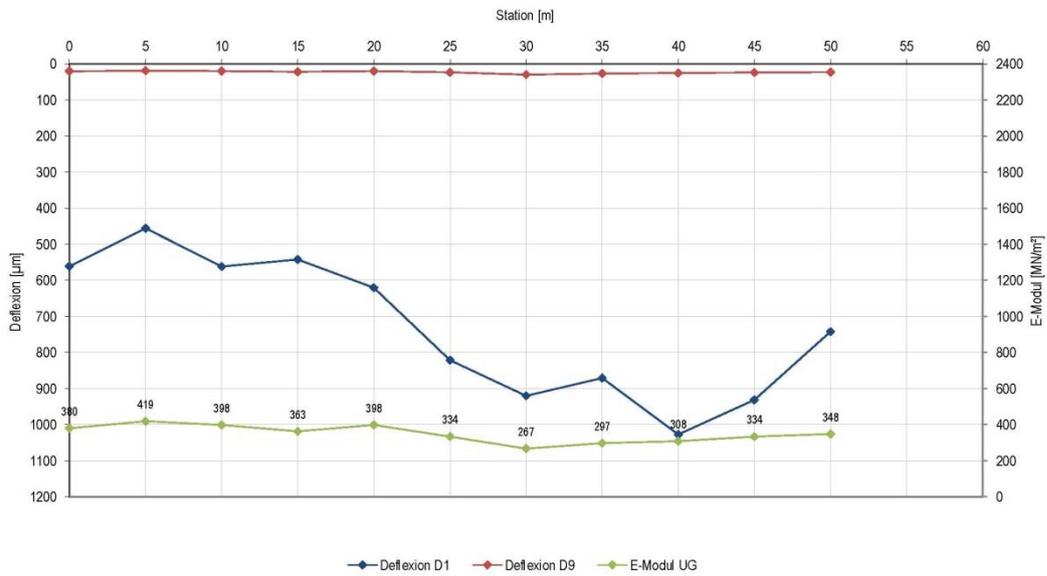


Bild 77:
Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 4/2018, Abschnitte mit 0 und 20 M.-% KS

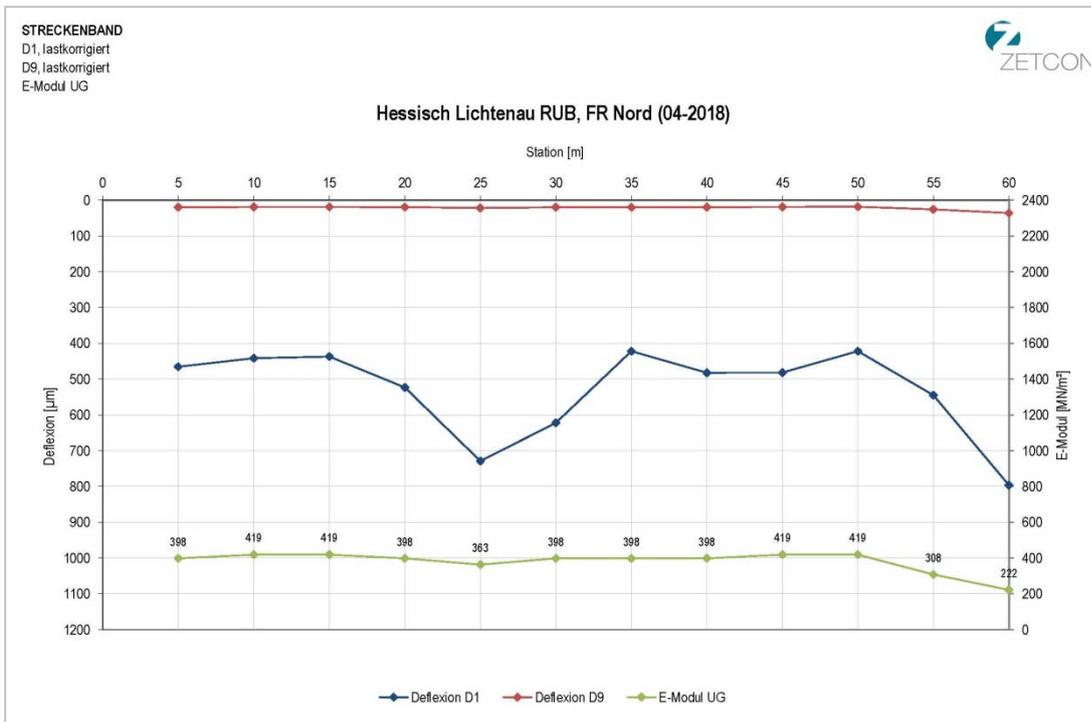


Bild 78:
Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 4/2018, Abschnitte mit 40 und 30 M.-% KS

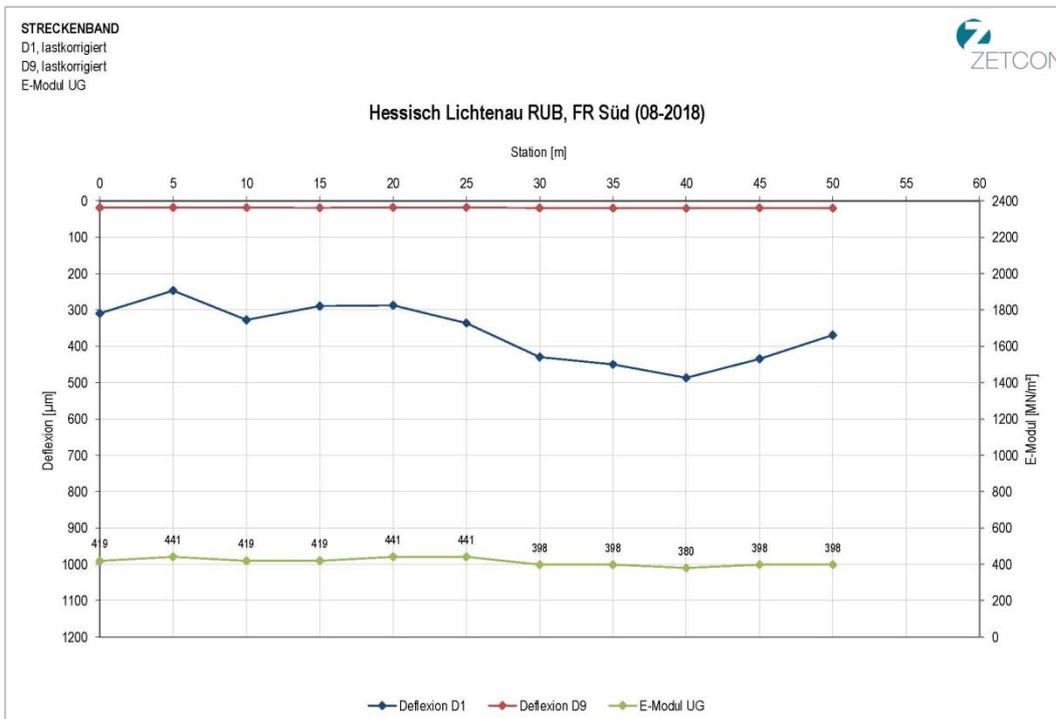


Bild 79:
Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 8/2018, Abschnitte mit 0 und 20 M.-% KS

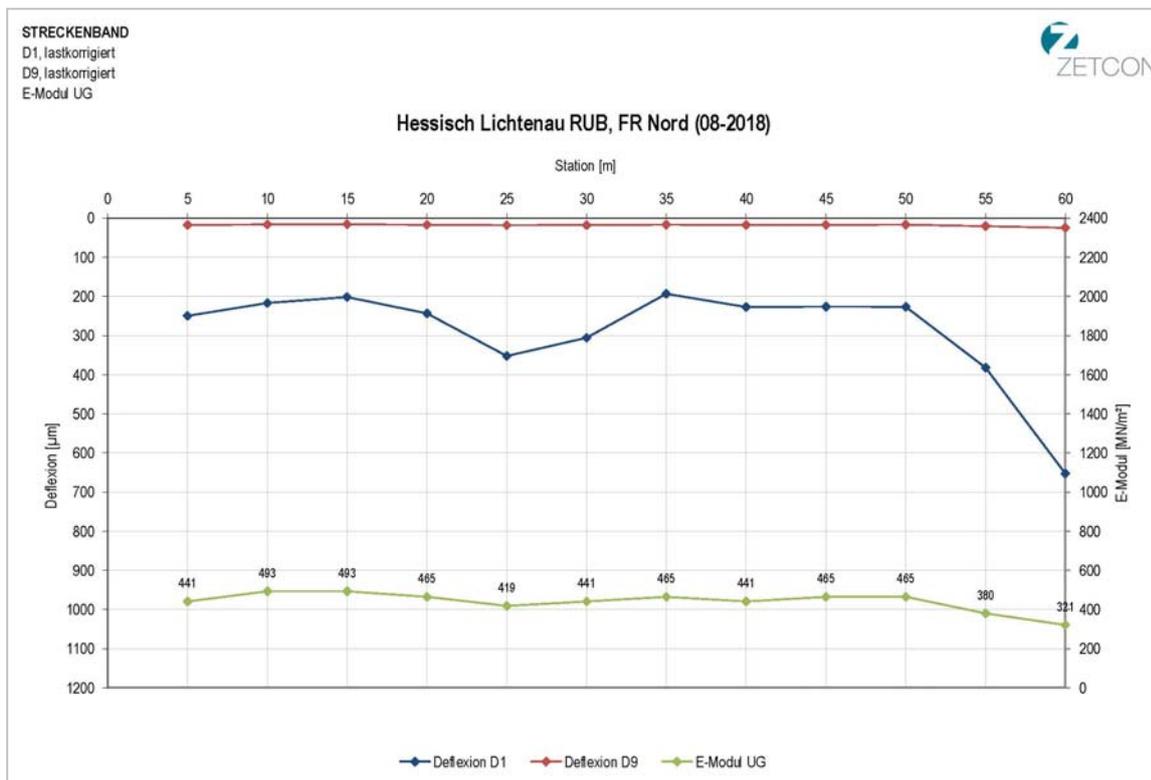


Bild 80:
Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 8/2018, Abschnitte mit 40 und 30 % KS

Die teilweise unterschiedlichen Einsenkungen im Lastzentrum (D1) sind im Wesentlichen durch die schwankenden Schichtdicken des Asphalt zu erklären. Die ungebundenen Tragschichten und die hierfür errechneten E-Module zeigen dagegen einen recht gleichmäßigen Verlauf innerhalb der Messfelder und auch im Vergleich der unterschiedlichen Messfelder.

Nicht erklärbar sind dagegen die hohen E-Module der Tragschichten ohne Bindemittel (E-Modul UG) am ersten Messtermin im Juni 2017.

In den Tabellen 27 bis 30 sind ergänzend zu den grafischen Verläufen die errechneten Tragfähigkeiten und die Beurteilung der Tragfähigkeiten aufgeführt. Unter Berücksichtigung der Dicke der Asphalttschicht sind die errechneten Tragfähigkeiten der Tragschichten ohne Bindemittel und mit unterschiedlichen Kalksandsteinanteilen als erwartungsgemäß für einen derartigen Straßenoberbau anzusehen.

Eine negative Beeinflussung der Tragfähigkeiten durch den Anteil an Kalksandstein ist hier nicht erkennbar.

Messung 06-2016			Modell BC (6.500 MN/m ²)		
Station			Untergrund		Gesamtsystem
ID	[m]	[m] *	Tragfähigkeit	MN/m ²	Ist-Belastungsklasse
1	0	0	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
2	5	5	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
3	10	10	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
4	15	15	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
5	20	20	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
6	26	25	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
7	31	30	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
8	36	35	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
9	-	40	-	-	-
10	46	45	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
11	51	50	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
12	56	55	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
13	-	60	-	-	-
14	-	0	-	-	-
15	52	5	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
16	58	10	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
17	63	15	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
18	68	20	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
19	73	25	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
20	78	30	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
21	83	35	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
22	88	40	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
23	94	45	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
24	99	50	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
25	104	55	ausreichend tragfähig	710	< Bk0,3
26	109	60	ausreichend tragfähig	653	< Bk0,3

* Vorgabe laufende Meter nach Benkelman-Balken

Tabelle 27:
Berechnete Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Asphalt-E-Moduls von 6.500 MN/m², Messungen von 6/2017

Messung 01-2018			Modell BC (6.500 MN/m ²)		
Station			Untergrund		Gesamtsystem
ID	[m]	[m] *	Tragfähigkeit	MN/m ²	Ist-Belastungsklasse
1	0	0	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
2	5	5	ausreichend tragfähig	560	Bk0,3
3	10	10	ausreichend tragfähig	493	< Bk0,3
4	15	15	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
5	21	20	ausreichend tragfähig	493	< Bk0,3
6	26	25	ausreichend tragfähig	493	Bk0,3
7	31	30	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
8	36	35	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
9	41	40	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
10	46	45	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
11	51	50	ausreichend tragfähig	493	< Bk0,3
12	-	55	-	-	-
13	-	60	-	-	-
14	-	0	-	-	-
15	51	5	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
16	56	10	ausreichend tragfähig	493	Bk1,0
17	61	15	ausreichend tragfähig	560	Bk1,8
18	66	20	ausreichend tragfähig	560	Bk0,3
19	71	25	ausreichend tragfähig	525	Bk3,2
20	76	30	ausreichend tragfähig	465	< Bk0,3
21	81	35	ausreichend tragfähig	493	< Bk0,3
22	87	40	ausreichend tragfähig	525	Bk10
23	92	45	ausreichend tragfähig	493	Bk1,0
24	97	50	ausreichend tragfähig	465	Bk0,3
25	102	55	ausreichend tragfähig	560	Bk1,8
26	107	60	ausreichend tragfähig	465	Bk1,0

* Vorgabe laufende Meter nach Benkelman-Balken

Tabelle 28:
Berechnete Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Asphalt-E-Moduls von 6.500 MN/m², Messungen von 1/2018

Messung 04-2018			Modell BC (6.500 MN/m ²)		
Station			Untergrund		Gesamtsystem
ID	[m]	[m] *	Tragfähigkeit	MN/m ²	Ist-Belastungsklasse
1	0	0	ausreichend tragfähig	380	< Bk0,3
2	5	5	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
3	10	10	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
4	15	15	ausreichend tragfähig	363	< Bk0,3
5	20	20	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
6	25	25	ausreichend tragfähig	334	< Bk0,3
7	30	30	ausreichend tragfähig	267	< Bk0,3
8	35	35	ausreichend tragfähig	297	< Bk0,3
9	40	40	ausreichend tragfähig	308	< Bk0,3
10	45	45	ausreichend tragfähig	334	< Bk0,3
11	50	50	ausreichend tragfähig	348	< Bk0,3
12	55	55	ausreichend tragfähig	334	< Bk0,3
13	-	60	-	-	-
14	0	0	ausreichend tragfähig	297	< Bk0,3
15	5	5	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
16	10	10	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
17	15	15	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
18	21	20	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
19	26	25	ausreichend tragfähig	363	< Bk0,3
20	31	30	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
21	36	35	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
22	41	40	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
23	46	45	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
24	51	50	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
25	56	55	ausreichend tragfähig	308	< Bk0,3
26	61	60	ausreichend tragfähig	222	< Bk0,3

* Vorgabe laufende Meter nach Benkelman-Balken

Tabelle 29:
Berechnete Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Asphalt-E-Moduls von 6.500 MN/m², Messungen von 4/2018

Messung 08-2018			Modell BC (6.500 MN/m ²)		
Station			Untergrund		Gesamtsystem
ID	[m]	[m] *	Tragfähigkeit	MN/m ²	Ist-Belastungsklasse
1	0	0	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
2	5	5	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
3	10	10	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
4	15	15	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
5	20	20	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
6	25	25	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
7	30	30	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
8	36	35	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
9	41	40	ausreichend tragfähig	380	< Bk0,3
10	46	45	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
11	51	50	ausreichend tragfähig	398	< Bk0,3
12	56	55	ausreichend tragfähig	380	< Bk0,3
13	-	60	-	-	-
14	0	0	ausreichend tragfähig	380	< Bk0,3
15	5	5	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
16	10	10	ausreichend tragfähig	493	< Bk0,3
17	16	15	ausreichend tragfähig	493	< Bk0,3
18	21	20	ausreichend tragfähig	465	< Bk0,3
19	26	25	ausreichend tragfähig	419	< Bk0,3
20	31	30	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
21	36	35	ausreichend tragfähig	465	Bk0,3
22	41	40	ausreichend tragfähig	441	< Bk0,3
23	46	45	ausreichend tragfähig	465	< Bk0,3
24	51	50	ausreichend tragfähig	465	< Bk0,3
25	56	55	ausreichend tragfähig	380	< Bk0,3
26	62	60	ausreichend tragfähig	321	< Bk0,3

* Vorgabe laufende Meter nach Benkelman-Balken

Tabelle 30:
Berechnete Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Asphalt-E-Moduls von 6.500 MN/m², Messungen von 8/2018

4.4 Bewertung der Ergebnisse

4.4.1 Bewertung der Laborversuche

Zur Beurteilung der Ausgangsstoffe für die abschließenden Gemischuntersuchungen wurden vier Kalksandsteinproben (KS, KSgelb KSM und KSMP) und ein Recycling-Baustoff aus Betongranulat (RCB Prallbrecheraufbereitung) untersucht. Während der RCB eine gleichmäßig gestufte Korngrößenverteilung mit einem Größtkorn von 32 mm aufweist, bestanden die Kalksandstein-Gesteinskörnungen überwiegend aus einem groben Korngemisch 8 bis 32 mm, was auf die Aufbereitung mit einem Backenbrecher zurückzuführen ist. Die Kornformen der Kalksandsteinfraktionen waren in allen geprüften Korngruppen etwas schlechter als die des RCB. Ebenso waren die Kornfestigkeiten (SZ8/12-Wert, siehe Tabelle 10) der Kalksandsteine erwartungsgemäß höher als die des RCB. Ebenso war es nicht verwunderlich, dass die Gesamtporositäten der Kalksandstein-Gesteinskörnungen deutlich über denen des RCB lagen.

Die Kornfestigkeiten, besonders aber die hohen Porositäten führten dazu, dass die Kalksandsteinfraktionen prüfungsbedingt eine vergleichsweise hohe Frostempfindlichkeit bei voller Wassersättigung (nach TP Gestein-StB Teil 6.3.2) aufweisen. Da in der Praxis in den vorgesehenen Anwendungsbereichen (Tragschicht ohne Bindemittel im Straßenoberbau) eine vollständige Wassersättigung nicht zu erwarten ist, sollten zur Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit hier eher die Frosthebungsversuche herangezogen werden.

Die Laboruntersuchungen zur Ermittlung des wassergehaltabhängigen Verdichtungsverhaltens (Proctorversuch) haben ergeben, dass mit den Kalksandsteingemischen kein optimaler Wassergehalt ermittelt werden konnte. Auch hier können die hohen Porositäten als Ursache angesehen werden, sodass diese Materialien als wasserunempfindlich für den Einbau eingestuft werden können.

Für eine möglichst realitätsnahe Beurteilung der Frostempfindlichkeit wurden Frosthebungsversuche durchgeführt, bei denen die Kalksandsteingemische geringere Frosthebungen im Vergleich zum RCB aufwiesen. Auch hier ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Einfluss der Porosität ursächlich.

Zur Abschätzung der Tragfähigkeit der Gemische wurden CBR-Versuche durchgeführt. Alle untersuchten Gemische zeigten ein Tragverhalten einer „guten bis ausgezeichneten oberen Tragschicht“.

Das Gemisch KSM hatte allerdings einen ungewöhnlich hohen Verlust an Tragfähigkeit nach Frostbeanspruchung.

Die Veränderung der Korngrößenverteilung infolge Verdichtung, CBR-Prüfung und Frostbeanspruchung lag bei allen Gemischen auf einem vergleichbaren Niveau.

4.4.2 Bewertung der Feldversuche

4.4.2.1 Bewertung der Materialeigenschaften

Die vier Versuchsgemische wurden alle auf einer vergleichbaren Unterlage (HMV-Asche) eingebaut. Die Messung der Tragfähigkeit (statischer und dynamischer Lastplattendruckversuch) ergab ungewöhnlich niedrige Werte, die auf einem Niveau mit der Unterlage (HMV-Asche) lagen. Die vergleichsweise hohen Verhältniswerte (E_{V2}/E_{V1}) lassen eine noch nicht hinreichende Verdichtung vermuten. Diese Vermutung wurde die hohen Infiltrationsbeiwerte ($3,3 \times 10^{-4}$ bis $1,2 \times 10^{-3}$) erklären. Die Bestimmung der Dichte einer eingebauten grobkörnigen ungebundenen Schicht ist erfahrungsgemäß schwierig, sodass hier die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren nicht verwundern. Die festgestellten Dichten (zumindest die mit dem Ballonverfahren) deuten allerdings nicht einen **unzureichenden** Verdichtungszustand hin.

Die an Ausbauproben untersuchte Korngrößenverteilung zeigt eine sehr hohe Vergleichbarkeit der Granulometrie der eingebauten Gesteinskörnungsgemische.

Die stofflichen Zusammensetzungen erreichten nicht genau das vorgegebene Ziel der Abstufung 0 %, 20 %, 30 % und 40 %. Die Varianten 20 % und 30 % liegen im Mittel auf einem Niveau in Höhe von ca. 20 M.-% Kalksandstein. Dies wurde allerdings nur an der Ausbauproben (für die Dichtebestimmung) festgestellt, während die Gemischproben (Tabelle 17) eine gute Übereinstimmung mit den Soll-Vorgaben zeigen.

Die Kornformkennzahlen der Gemische mit Kalksandstein sind, wie in den Labor-Voruntersuchungen etwas höher im Vergleich zum RCB, wobei der Unterschied in den Praxisgemischen nicht mehr so gravierend ist.

Ebenso ist der Festigkeitsunterschied der Praxisgemische signifikant geringer, was aber sicherlich auch durch den Gemisch-Charakter (KS nur anteilig vorhanden) beeinflusst ist.

Die weiteren Untersuchungen an den Ausbauproben zeigen zum Teil einen erwarteten, aber zum Teil auch einen unerwarteten Ergebnisverlauf. So liegen die Infiltrationsbeiwerte der mit Proctorenergie verdichteten Proben deutlich niedriger als die Praxisergebnisse. Der Unterschied beträgt fast zwei Zehnerpotenzen. Die Absplitterungen infolge einer gesättigten Frost-Tau-Beanspruchung sind dagegen wieder auf einem erwarteten Niveau und zeigen den erwarteten Unterschied zwischen Betongranulat und KS-Granulat.

Während mit reinen KS-Granulatgemischen kein aussagefähiger Proctorversuch möglich war, ist dies mit allen Gemischen aus RCB+KS hinreichend gelungen. Die optimalen Wassergehalte liegen dabei auf einem vergleichbaren Niveau, die Trockendichten dagegen zeigen den durch die Komponenten verursachten Dichteunterschied.

Die Frosthebungsversuche belegen erneut den positiven Einfluss der porösen Kalksandsteinanteile auf das praxisnahe Frosthebungsverhalten. Ein außergewöhnlicher Einfluss auf die Granulometrie (Korngrößenverteilung vor und nach Frost) ist hier ebenfalls nicht erkennbar.

4.4.2.2 Bewertung der Oberbaueigenschaften

Nachdem die Erprobungsgemische als Tragschicht ohne Bindemittel eingebaut waren, wurde eine Asphalttschicht mit einer Soll-Dicke von 8 cm eingebaut. Mit dieser geringen Asphalttsdicke sollte der Umstand berücksichtigt werden, dass auf der Erprobungsfläche überwiegen nur Fahrzeuge mit geringerem Gesamtgewicht (überwiegend Pkw) fahren. Somit sollten an der Oberfläche der Erprobungsgemische auch höhere Flächenpressungen auftreten. In den beiden rechten Erprobungsfeldern (0 und 20 %) wurde diese Vorgabe recht genau eingehalten. In den beiden linken Feldern (30 und 40 %) liegt die Schichtdicke größtenteils bei 10 cm und mehr, was aber immer noch als geringe Schichtdicke für einen Asphaltoberbau anzusehen ist.

Die Ebenheitsmessungen mit der 4-m-Richtlatte ergaben ein für die Bauweise (einschichtiger Asphalt) gutes Ergebnis (Bilder 61 bis 63). Allerdings zeigte sich auf Teilbereichen der Asphalttsfläche eine nicht unerhebliche Pfützenbildung, sodass zusätzlich ein Nivellement durchgeführt wurde (Bilder 68 und 69). Hieran ist erkennbar, dass eine profilgerechte Lage zur hinreichenden Entwässerung der Fläche nicht überall gegeben ist. Dabei scheinen die Bereiche mit einer etwas dickeren Asphalttschicht nicht ursächlich hierfür zu sein. Es ist vielmehr zu vermuten, dass die Oberfläche Tragschicht ohne Bindemittel keine entwässerungsgünstige Lage aufweist.

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit des Gesamtsystems wurden Messungen mit dem Benkelman-Balken (Bilder 70 und 71) sowie Messungen mit dem FWD (Bilder 73 bis 80) zu drei bzw. vier Zeitpunkten durchgeführt (Benkelman-Messungen nur zu drei Zeitpunkten).

Grundsätzlich liegen in allen Feldern größere Schwankungen innerhalb des Feldes und zwischen den Messzeitpunkten vor. Mit Ausnahme der Messung in Feld 20 % am 20. April 2018 wurden aber mit dem Benkelman-Balken keine großen Unterschiede bei den mittleren Messwerten zwischen den Erprobungsfeldern festgestellt. Das Niveau der Einsenkungen ist zwar recht hoch, was aber der geringen Schichtdicke des Asphaltaufbaus geschuldet ist.

Aus den FWD-Messungen, der Kenntnis der Schichtdicken an diesen Stellen und einer Temperaturkorrektur kann eine Aussage zur Tragfähigkeit der Erprobungsgemische abgeleitet werden. Diese Auswertung ist den Tabellen 27 bis 30 zu entnehmen. Die höchsten Tragfähigkeiten (Schichtmodul ca. 700 MN/m²) wurden im Sommer 2017 (6/2017) gemessen. Zu diesem Zeitpunkt hatten die Erprobungsfelder eine Nutzungsdauer von ca. 6 Monaten. Im Januar und im April 2018 wurden deutlich geringere Werte ermittelt (max: 560 MN/m², min: 222 MN/m²). Dieses Niveau hat sich auch bei der letzten Messung im August 2018 nicht mehr wesentlich verändert.

Grundsätzlich sind alle gemessenen Tragfähigkeiten der ungebundenen Schichten (Kalksandstein-Gemische) als ausreichend tragfähig einzustufen.

4.5 Abschließende Bewertung der Ergebnisse

Die Untersuchungen im Rahmen der Labor- und Feldversuche haben gezeigt, dass mit Kornmischen aus Betongranulat und Kalksandsteingranulat Tragschichten ohne Bindemittel hergestellt werden können, die den Anforderungen an eine solche Tragschicht für den Verkehrswegebau genügen.

Für die hierzu angelegte Erprobungsfläche wurden bewusst ungünstige Voraussetzungen gewählt (geringe Asphaltstärke, höhere Frosteinwirkung). Die Erprobungsfläche hat mittlerweile eine Nutzungsdauer von 2 Jahren.

Die aus diesen Untersuchungsergebnissen möglichen Änderungen im Technischen Regelwerk (Erhöhung des zulässigen Anteils an Kalksandstein in RC-Baustoffen) sollten nun in den entsprechenden Gremien diskutiert werden.

5. BILDVERZEICHNIS

Bild 1:	Sortenreines Kalksandsteinmaterial aus einem Kalksandsteinwerk – ohne anhaftende Reste anderer Baustoffe	9
Bild 2:	Sortenreines Kalksandsteinmaterial aus einem Kalksandsteinwerk – ohne anhaftende Reste anderer Baustoffe	10
Bild 3:	Schematischer Ablauf des Projektes	11
Bild 4:	Gipsputz, d = 5 mm, einseitig auf einer KS-Wand, Steinbreite: 365 mm	14
Bild 5:	Gipsputz, d = 10 mm, beidseitig auf einer KS-Wand, Steinbreite: 175 mm	14
Bild 6:	Gipsputz, d = 15 mm, beidseitig auf einer KS-Wand, Steinbreite: 115 mm	15
Bild 7:	Herstellung der Kalksandsteinprüfkörper mit Gipsschicht, hier: d = 10 mm	15
Bild 8:	Abrasionstrommel, links: 4 Mitnehmer, rechts: 8 Mitnehmer	16
Bild 9:	Kalksandsteine KS-12-1,8-NF ohne Putz (Referenzserie)	17
Bild 10:	Kalksandsteine KS-12-1,8-NF, beidseitig mit jeweils 10 mm Gipsputz (grün)	18
Bild 11:	Kalksandsteine KS-12-1,8-NF, beidseitig mit jeweils 5 mm Gipsputz (rot)	18
Bild 12:	Anordnung der Versuchsfelder	20
Bild 13:	Schematische Darstellung des Prüfgerätes für den Frosthebungsversuch [Blu1]	22
Bild 14:	Aufbau der Versuchsfelder	23
Bild 15:	Kalksandsteinmaterial für die Tragschicht ohne Bindemittel 0/32 mm	24
Bild 16:	Einbau der Kalksandstein-Tragschicht 0/32 mm	24
Bild 17:	Einbau der Kalksandstein-Tragschicht 0/32 mm	25
Bild 18:	Ansicht der Versuchsfelder der Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) vor Einbau der Asphalttragdeckschicht	25
Bild 19:	Lufttemperatur Tagesmittel der Messstationen Eschwege, Sontra und Schauenburg-Elgershausen	26
Bild 20:	Lufttemperatur Tagesminima der Messstationen Eschwege, Sontra und Schauenburg-Elgershausen	27
Bild 21:	Schematische Darstellung des Modifizierten Standrohr-Infiltrometers [TP Gestein-StB 8.3.2]	29
Bild 22:	Prinzipskizze des leichten Fallgewichtsgeräts [TP BF-StB Teil B 8.3]	30
Bild 23:	Leichte Fallgewichtsgerät der RUB	31
Bild 24:	Skizze Standard-Benkelman-Balken [AP Trag Teil B 1, 2014]	33
Bild 25:	Benkelman-Balken-Messung auf den Versuchsfeldern	33
Bild 26:	Prinzipskizze des FWD-Messverfahrens [Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1, 2008]	35
Bild 27:	Messgerät der Firma ZETCON Ingenieure auf einem Versuchsfeld	36
Bild 28:	Steindruckfestigkeiten der Steinproben von den Recyclinghöfen (ausgesägte Würfel der Kantenlänge 50 x 50 mm)	38
Bild 29:	Steinrohdichten der Steinproben von den Recyclinghöfen (ausgesägte Würfel der Kantenlänge 50 x 50 mm)	38
Bild 30:	Steindruckfestigkeiten der Steinproben aus dem Kalksandsteinwerk für die Erprobungsstrecke	38
Bild 31:	Steinrohdichten der Steinproben aus dem Kalksandsteinwerk für die Erprobungsstrecke	39
Bild 32:	Ergebnisse der Abrasionsversuche zu den Versuchen 1 bis 3 (4 Mitnehmer)	40
Bild 33:	Ergebnisse der Abrasionsversuche zu den Versuchen 4 bis 6 (4 Mitnehmer)	40
Bild 34:	Ergebnisse der Abrasionsversuche zu den Versuchen 7 bis 9 (8 Mitnehmer)	41
Bild 35:	Ergebnisse der Abrasionsversuche zu den Versuchen 10 bis 12 (8 Mitnehmer)	41
Bild 36:	Röntgendiffraktogramm der homogenisierten Probe „K“	43
Bild 37:	Thermoanalytische Aufnahme der homogenisierten Probe „K“	43
Bild 38:	Röntgendiffraktogramm der homogenisierten Probe „K“ nach 72 h Beaufschlagung mit einer Temperatur von 200° C.	44
Bild 39:	Vergleiche Darstellung der Röntgendiffraktogramme aus Bild 32 und Bild 33	44
Bild 40:	Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe	47
Bild 41:	Korngrößenverteilung sortenreiner Kalksandstein vor und nach FTW	50
Bild 42:	Korngrößenverteilung KSM vor und nach FTW	50
Bild 43:	Korngrößenverteilung KSMP vor und nach FTW	51
Bild 44:	Korngrößenverteilung RCB vor und nach FTW	51
Bild 45:	Ergebnisse der Proctorversuche des RCB und der Kalksandsteingemische	52
Bild 46:	Ergebnisse der Frosthebungsversuche – maximale Frosthebung und bleibende Hebung	53
Bild 47:	Ergebnisse der Frosthebungsversuche – Integral der Frosteinwirkung und Integral der Temperaturwirkung	54
Bild 48:	CBR-Werte vor und nach Frosthebungsversuch	54
Bild 49:	Kornverfeinerung des sortenreinen Kalksandsteins KS nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost	55

Bild 50:	Kornverfeinerung des Materials KSM und KSgelb nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost	55
Bild 51:	Kornverfeinerung des Materials KSMP nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost	56
Bild 52:	Kornverfeinerung RCB nach den Einwirkungen aus Verdichtung, CBR-Versuch und Frost.....	56
Bild 53:	Korngrößenverteilung der Ausbauproben	58
Bild 54:	Ergebnisse der Proctorversuche der ToB-Gemische	62
Bild 55:	Ergebnisse der Frosthebungsversuche – maximale Frosthebung und bleibende Hebung der ToB-Gemische	63
Bild 56:	Ergebnisse der Frosthebungsversuche – Integral der Frosteinwirkung und Integral der Temperaturwirkung der ToB-Gemische ...	63
Bild 57:	Kornverfeinerung des Baustoffgemisches mit 0 M.-% KS (RCB) nach den Einwirkungen aus Verdichtung und Frost	64
Bild 58:	Kornverfeinerung des Baustoffgemisches mit 20 M.-% KS nach den Einwirkungen aus Verdichtung und Frost	64
Bild 59:	Kornverfeinerung des Baustoffgemisches mit 30 M.-% KS nach den Einwirkungen aus Verdichtung und Frost	65
Bild 60:	Kornverfeinerung des Baustoffgemisches mit 40 M.-% KS nach den Einwirkungen aus Verdichtung und Frost	65
Bild 61:	Ergebnisse der Ebenheitsmessungen in Querrichtung bei 6,5 m und 14,0 m in Längsrichtung am 17.08.2018.....	66
Bild 62:	Ergebnisse der Ebenheitsmessungen in Querrichtung bei 36,0 m und 53,0 m in Längsrichtung am 17.08.2018	67
Bild 63:	Ergebnisse der Ebenheitsmessungen in Längsrichtung 17.08.2018	67
Bild 64:	Querprofile bei 6,5 m in Längsrichtung.....	68
Bild 65:	Querprofile bei 14,0 m in Längsrichtung	68
Bild 66:	Querprofile bei 36,0 m in Längsrichtung	69
Bild 67:	Querprofile bei 53,0 m in Längsrichtung	69
Bild 68:	Längsprofil in der Mitte der rechten Versuchsfelder	70
Bild 69:	Längsprofil in der Mitte der linken Versuchsfelder	70
Bild 70:	Ergebnisse der Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken auf den rechten Versuchsfeldern	71
Bild 71:	Ergebnisse der Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken auf den linken Versuchsfeldern	72
Bild 72:	Start- und Endpunkte der Messlinien [Zet1]	74
Bild 73:	Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 6/2017, Abschnitte mit 0 und 20 M.-% KS	76
Bild 74:	Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 6/2017, Abschnitte mit 40 und 30 M.-% KS	77
Bild 75:	Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 1/2018, Abschnitte mit 0 und 20 M.-% KS	77
Bild 76:	Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 1/2018, Abschnitte mit 40 und 30 M.-% KS	78
Bild 77:	Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 4/2018, Abschnitte mit 0 und 20 M.-% KS	78
Bild 78:	Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 4/2018, Abschnitte mit 40 und 30 M.-% KS	79
Bild 79:	Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 8/2018, Abschnitte mit 0 und 20 M.-% KS	79
Bild 80:	Einsenkungen (D1 und D9) sowie berechnete E-Module der Unterlage, 8/2018, Abschnitte mit 40 und 30 % KS	80

6. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Untersuchungsprogramm zu den Abrasionsversuchen	17
Tabelle 2:	Details der Messstationen des Deutschen Wetterdienstes im Umkreis der Versuchsfelder	26
Tabelle 3:	Übersicht über die Messtermine und die durchgeführten Messungen	32
Tabelle 4:	Mögliche belastungs- bzw. bauklassenabhängige Einsenkungsgrenzwerte	34
Tabelle 5:	Anordnung der Geofone für FWD-Messungen auf Asphalt (Angaben in [mm])	35
Tabelle 6:	Kalksandstein-Ausgangsmaterial von den verschiedenen Recyclinghöfen	37
Tabelle 7:	Sortenreines Kalksandstein-Ausgangsmaterial aus dem Kalksandsteinwerk	37
Tabelle 8:	Physikalische Kennwerte der Gipsproben	45
Tabelle 9:	Sulfatgehalt der Kalksandstein-Ausgangsmaterials von verschiedenen Recyclinghöfen	46
Tabelle 10:	Kornformkennzahl SI der verschiedenen Ausgangsstoffe	48
Tabelle 11:	Schlagzertrümmerungswerte der verschiedenen Materialien	48
Tabelle 12:	Stoffliche Zusammensetzung	48
Tabelle 13:	Ergebnisse der Trockenrohddichte, Wasseraufnahmegrad, Reindichte und Gesamtporosität	49
Tabelle 14:	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{10}	49
Tabelle 15:	Verformungsmodul auf der HMVA und den Tragschichten ohne Bindemitteln (ToB)	57
Tabelle 16:	Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$, Wassergehalt und Trockendichten der ToB-Gemische	58
Tabelle 17:	Stoffliche Zusammensetzung der Ausbauproben	59
Tabelle 18:	Kornformkennzahl SI der verschiedenen KS-Gemische	60
Tabelle 19:	Schlagzertrümmerungswerte der verschiedenen KS-Gemische	60
Tabelle 20:	Stoffliche Zusammensetzung der Baustoffgemische	60
Tabelle 21:	Ergebnisse der Trockenrohddichte, Wasseraufnahmegrad, Reindichte und Gesamtporosität	61
Tabelle 22:	Infiltrationsbeiwerte $k_{i(10)}$	61
Tabelle 23:	Ergebnisse zum Widerstand der Gemische gegen Frost-Tau-Wechsel	61
Tabelle 24:	Ergebnisse der Proctorversuche - Optimaler Wassergehalt und Trockendichte der Baustoffgemische	62
Tabelle 25:	Ergebnisse der Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken und die zugehörige Dicke der Asphaltsschicht	73
Tabelle 26:	Klimatische Bedingungen während der FWD-Messungen [Zet1]	75
Tabelle 27:	Berechnete Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Asphalt-E-Moduls von 6.500 MN/m ² , Messungen von 6/2017 ..	81
Tabelle 28:	Berechnete Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Asphalt-E-Moduls von 6.500 MN/m ² , Messungen von 1/2018 ..	82
Tabelle 29:	Berechnete Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Asphalt-E-Moduls von 6.500 MN/m ² , Messungen von 4/2018 ..	83
Tabelle 30:	Berechnete Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Asphalt-E-Moduls von 6.500 MN/m ² , Messungen von 8/2018 ..	84

7. LITERATUR

- [BLU1] Blume, U: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S63, 2010, Bergisch Gladbach
- [DEWE] Deutscher Wetterdienst: Wetterdaten und -statistiken express, Internetpräsenz: www.dwd.de/WESTE, abgerufen am 4.9.2018
- [EDE1] EDEN, W.; KOHLER, G.; KOLLAR, J.; KURKOWSKI, H.; RADENBERG, M.; SCHLÜTTER, F.; SLIWA, N.: Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel, Forschungsbericht Nr. 111, FV Kalk-Sand e.V., Hannover 2010
- [EDE2] EDEN, W.: Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess; Forschungsbericht Nr. 80 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 1994
- [EDE3] EDEN, W.: Herstellung von Kalksandsteinen aus Bruchmaterial von Kalksandsteinmauerwerk mit anhaftenden Resten von Dämmstoffen sowie weiterer Baustoffreste, Forschungsbericht Nr. 86 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 1997
- [EDE4] EDEN, W., FRIEDL, L.; KRASS, K.; KURKOWSKI, H.; MESTERS, K.; SCHIEßL, P.: Eignung von Kalksandstein-Bruchmaterial zum Recycling in der Baustoffindustrie, Forschungsbericht Nr. 97 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 2003
- [EDE5] EDEN, W.: Recycling von Kalksandsteinen, Veröffentlichung in „Steinbruch und Sandgrube“, Juli 1997
- [HAC1] Firmenschriften, Küvettentest, LCK 353, Düsseldorf, Hach-Lange GmbH, 2010
- [KRA1] KRASS, K.; KOLLAR, J.: Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel, Ruhr-Universität Bochum, Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Heft Nr. 884, 2004
- [JAN1] Jansen, D. Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen, Universität Duisburg-Essen Institut für Straßenbau und Verkehrs- wesen, 2009
- [LEY1] Leykauf, G.: Verstärkung von Asphaltstraßen – Bemessung durch Einsenkungsmessungen. Straßen- und Tiefbau 45, 1991, S. 6 – 14
- [LAU1] LAU, J.-J.; Büsselmann, C.: Schadstoffe in Bauschutt und Böden schnell erkennen und messen, Bildungszentrum für die Entsorgungs- und Wasserwirtschaft, Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen, Bremen, 1998
- [LIE1] LIEKMEIER, W.: UV/Vis-Spektrometrie, Haus der Technik, Essen, 2007
- [MONB] Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014, Bundesverband Baustoffe Steine und Erden e.V. (bbs), BDE, BRB, RAL, Die Deutsche Bauchemie, ZDB
- [RAD1] Radenberg, M.; Flottmann, N.: Bewertungskriterien für den realitätsnahen Frosthebungsversuch. Entwurf Schlussbericht zum FE 05.0181/2012/CRB, 2018, unveröffentlicht
- [STBU] STATISTISCHES BUNDESAMT WIESBADEN: Umwelt, Abfallentsorgung 2010, Fachserie 19, Reihe 1, 12.Juli 2012
- [WEI1] Weingart, W.; Wieland, M.: Weiterentwicklung des Frosthebungsversuchs, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 927, 2005, Bonn
- [ZET1] ZETCON Ingenieure GmbH, Bericht Nr. 2016/22-2-4346.018 vom 23.9.2018 (unveröffentlicht)

Normen, Richtlinien

- Änderungsentwurf vom 29.09.2010, Anhang B, Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB, Ausgabe 2004, Fassung 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln
- Arbeitspapier – Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen Teil B 1, Benkelman-Balken: Gerätebeschreibung, Messdurchführung (AP Trag Teil B 1), Ausgabe 2005, FGSV-Verlag, Köln
- Arbeitspapier – Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen Teil C 1, Benkelman-Balken: Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen (AP Trag Teil C 1), Ausgabe 2005, FGSV-Verlag, Köln
- Arbeitspapier – Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen Teil C 1, Benkelman-Balken: Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen (AP Trag Teil C 1), Ausgabe 2014, FGSV-Verlag, Köln
- Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil B 2.1, Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen, Ausgabe 2008, FGSV-Verlag, Köln
- DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren, Ausgabe 2012, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 933-4: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl, Ausgabe 2015, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 1097-2: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zerkümmern, Ausgabe 2010, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Ausgabe 2013, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 1367-1: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel, Ausgabe 2007, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 1936: Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, Rohdichte, der offenen Porosität und Gesamtporosität, Ausgabe 2006, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13286-2: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehalt – Proctorversuch, Ausgabe 2013, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13286-47: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes, Ausgabe 2012, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 18125-2: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche, Ausgabe 2011, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 18130-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche–, Ausgabe 1998, Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 18134: Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch, Ausgabe 2012, Beuth-Verlag, Berlin
- ÖNorm B 4810: Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau – Beurteilung der Frostsicherheit, Ausgabe 2013, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus (RStO), Ausgabe 2001, FGSV-Verlag, Köln

- Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus (RStO), Ausgabe 2012, FGSV-Verlag, Köln
- RVS 11.06.21: Grundlagen, Prüfverfahren Steinmaterial, Punkt 1, Frosthebungsversuche, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße & Verkehr (FSV), Ausgabe 2013, 1999, Wien
- Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB StB), Ausgabe 2004/Fassung 2007, FGSV-Verlag, Köln
- Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB), Ausgabe 2004, Fassung 2007, FGSV-Verlag, Köln
- Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil: Frosthebungsversuch (TP BF-StB, Teil: FHV), Entwurf 2009
- Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührende Messungen (TP Eben – Berührende Messungen), Ausgabe 2007, FGSV-Verlag, Köln
- Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 7.1: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), Ausgabe 2012, FGSV-Verlag, Köln
- Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgesetz, Ausgabe 2003, FGSV-Verlag, Köln
- Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 3.1.5: Stoffliche Kennzeichnung von groben rezyklierten Gesteinskörnungen, Ausgabe 2012, FGSV-Verlag, Köln
- Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 6.3.2: Widerstand von Baustoffgemischen gegen Frost-Tau-Wechsel, Ausgabe 2008, FGSV-Verlag, Köln
- Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 8.3.1: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer - Laborverfahren, Ausgabe 2012, FGSV-Verlag, Köln
- Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil 8.3.2: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer – in situ-Verfahren, Ausgabe 2012, FGSV-Verlag, Köln
- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB), Ausgabe 2004/Fassung 2007, FGSV-Verlag, Köln