



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Anforderungen an CBR-Werte und CBR-Verhältnis von Kies- gemischen und RC- Kiesgemischen**

**Exigences aux indices de portance Californien (CBR) et les  
rapports CBR pour graves et RC-graves**

**Requirements of CBR-values and CBR-ratios for unbound  
mixtures and recycled unbound mixtures**

**IMP Bautest AG  
Dr. Roger Rütli  
Dr. Christian Angst**

**Forschungsprojekt VSS 2011/508 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**Juli 2021**

**1707**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Anforderungen an CBR-Werte und CBR-Verhältnis von Kiesgemischen und RC- Kiesgemischen**

**Exigences aux indices de portance Californien (CBR) et les  
rapports CBR pour graves et RC-graves**

**Requirements of CBR-values and CBR-ratios for unbound  
mixtures and recycled unbound mixtures**

**IMP Bautest AG  
Dr. Roger Rütli  
Dr. Christian Angst**

**Forschungsprojekt VSS 2011/508 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

# Impressum

## **Forschungsstelle und Projektteam**

### **Projektleitung**

Dr. Roger Rütli

### **Mitglieder**

Dr. Christian Angst

## **Federführende Fachkommission**

Fachkommission 3: NFK 3.8 Ungebundene und stabilisierte Schichten

## **Begleitkommission**

### **Präsidentin**

Dr. Sara Montani

### **Mitglieder**

Markus Caprez

Björn Mühlan

Martin Preisig

Volker Wetzig

## **KO-Finanzierung des Forschungsprojekts**

Bundesamt für Strassen ASTRA

## **Antragsteller**

VSS Verband Schweizerischer Strassenfachleute

## **Bezugsquelle**

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>11</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>15</b>
<b>1</b>	<b>Ausgangslage</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>Vorgehen</b> .....	<b>23</b>
3.1	Projektleitung.....	23
3.2	Versuchsumfang im geplanten Forschungsprojekt.....	23
3.3	Versuchsumfang im durchgeführten Forschungsprojekt .....	24
<b>4</b>	<b>Stand der Forschung</b> .....	<b>27</b>
4.1	Tragfähigkeit basierend auf der California Bearing Ratio .....	27
4.2	Frostbeständigkeit .....	27
4.3	Ungebundene Recycling-Gemische .....	28
<b>5</b>	<b>Auswahlkriterien für die ungebundenen Gemische</b> .....	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Feldversuche</b> .....	<b>33</b>
6.1	Versuchsfelder .....	33
6.2	Einbau .....	34
6.3	Verdichtungskontrolle.....	34
6.4	Kontrolle der Tragfähigkeit .....	35
6.5	Verdichtung und Tragfähigkeit .....	37
6.6	Probenahme für die Laborversuche.....	37
<b>7</b>	<b>Laborversuche</b> .....	<b>39</b>
7.1	Charakterisierung der ungebundenen Gemische .....	39
7.1.1	Korngrößenverteilung .....	39
7.1.2	Klassifizierung der Bestandteile der RC-Gemische.....	39
7.1.3	Kornform – Plattigkeitskennzahl FI .....	40
7.1.4	Anteil gebrochener Körner .....	40
7.1.5	Widerstand gegen Zertrümmerung – Los Angeles-Versuch.....	41
7.1.6	Optimaler Wassergehalt und maximale Trockendichte .....	41
7.1.7	CBR-Versuche .....	42
7.1.8	Zusammenfassung der Charakterisierung der ungebundenen Gemische .....	43
7.2	CBR-Versuche .....	43
7.2.1	Vergleichsversuche zwischen den Laboren.....	43
7.2.2	Herstellung der ungebundenen Gemische mit unterschiedlichen Feinanteilen.....	44
7.2.3	Feinanteil tief .....	45
7.2.4	Feinanteil hoch.....	47
7.2.5	Proctor- und CBR-Versuche mit Feinanteil tief und Feinanteil hoch .....	50
<b>8</b>	<b>Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche</b> .....	<b>51</b>
<b>9</b>	<b>Diskussion der Resultate der CBR-Versuche</b> .....	<b>53</b>
9.1	Auswertung der Proctor-Versuche .....	53

9.2	Auswertung der CBR-Versuche.....	53
9.2.1	Statistik der absoluten Werte aus den CBR-Versuchen.....	53
9.2.2	Statistik der Verhältnisse CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1 .....	55
9.3	Einfluss des Feinanteils .....	55
9.3.1	Variation des Feinanteiles und absolute CBR-Werte .....	55
9.3.2	Variation des Feinanteiles und CBR-Verhältnisse.....	61
9.4	Einfluss des optimalen Wassergehaltes .....	66
9.4.1	Optimaler Wassergehalt und CBR-Werte.....	66
9.4.2	Optimaler Wassergehalt und CBR-Verhältnisse .....	67
9.5	Feinanteil und weitere Parameter .....	68
9.5.1	Feinanteil und optimaler Wassergehalt .....	68
9.5.2	Feinanteil und maximale Frosthebung.....	71
9.5.3	Feinanteil und Resthebung.....	71
9.5.4	Feinanteil und Quellmass .....	72
9.6	Optimaler Wassergehalt und weitere Parameter.....	73
9.6.1	Optimaler Wassergehalt und Frosthebung .....	73
9.6.2	Optimaler Wassergehalt und Resthebung.....	74
9.6.3	Optimaler Wassergehalt und Quellmass .....	75
9.6.4	Optimaler Wassergehalt und Anfangs- und Endwassergehalt der CBR-Versuche .....	75
9.6.5	Feinanteil und Anfangs- und Endwassergehalte der CBR-Versuche.....	76
9.6.6	Wassergehalt am Ende der CBR-Versuche (1, 2 und F) und absolute CBR-Werte .....	77
9.7	CBRF-Werte und Hebungsmessungen .....	77
9.7.1	CBRF und Frosthebung.....	77
9.7.2	CBRF und Resthebung.....	78
9.7.3	CBRF und Quellmass .....	79
9.7.4	Frosthebung und Resthebung .....	80
9.8	Diskussion der Auswertung der CBR-Versuchsreihen .....	81
<b>10</b>	<b>Konditionierung der Proben für die Proctor- und CBR-Versuche.....</b>	<b>85</b>
<b>11</b>	<b>Definition von absoluten Werten.....</b>	<b>89</b>
11.1	Absolute CBR-Werte.....	89
11.2	Erhöhung des CBR-Verhältnisses .....	91
<b>12</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>95</b>
<b>13</b>	<b>Weiterer Forschungsbedarf .....</b>	<b>99</b>
	<b>Anhänge.....</b>	<b>101</b>
	<b>Glossar.....</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>115</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>117</b>

## Zusammenfassung

Die Norm SN 670 119-NA, welche die Anforderungen für die Qualität der ungebundenen Gemische in der Schweiz festlegt, formuliert im Gegensatz zur Vorgänger-Norm SN 670 120d keine absoluten Anforderungen an CBR-Werte und CBR-Verhältnisse.

Die vorliegende Forschungsarbeit hatte zum Ziel zu prüfen, ob solche absoluten Anforderungen nicht wieder eingeführt werden müssen, da es in der Praxis Fälle gab, in welchen ungebundene Gemische zwar die CBR-Verhältnisse erfüllten, die absoluten CBR-Werte aber unter den absoluten Werten der Vorgänger-Norm lagen. Da die Qualität von ungebundenen Gemischen und die Lebensdauer von Foundationsschichten von grosser Bedeutung sind, da diese seltener ausgebaut werden als der bituminöse Strassenoberbau, ist die Klärung dieser Fragen von Bedeutung.

Von den 11 untersuchten ungebundenen Gemischen 0/45 im Forschungsprojekt waren 4 Gemische natürlichen Ursprungs, die restlichen 7 Gemische waren RC-Gemische (3 RC-Kiesgemische B, 2 RC-Kiesgemische A und 2 RC-Betongranulatgemische) aus der ganzen Schweiz.

Das Forschungsprojekt wurde in drei Schritten durchgeführt:

- Im ersten Schritt wurden die ausgewählten Gemische in Versuchsfeldern eingebaut, um deren Praxistauglichkeit bezüglich der Tragfähigkeit zu überprüfen.
- Im zweiten Schritt wurden die Gemische in den Versuchsfeldern beprobt und anschliessend deren Eignung mit den durch die SN 670 119-NA vorgegebenen Prüfungen im Labor untersucht.
- Im dritten Schritt wurden Proctor- und CBR-Versuche an den ungebundenen Gemischen durchgeführt, um die Frostbeständigkeit in Abhängigkeit des Feinanteils zu untersuchen. Die 11 Gemische wurden mit dem Feinanteil (< 0.063 mm) ab Werk geprüft sowie jeweils in einer zusätzlichen Versuchsserie mit einem tieferen („Feinanteil tief“, ca. – 2 M.-%) und einem höheren („Feinanteil hoch“, ca. + 2 M.-%) Feinanteil. Die beiden letzteren Versuchsserien wurden mit Gemischen durchgeführt, welche durch die Forschungsstelle im Labor hergestellt worden war.

Die Kontrolle der Tragfähigkeit der verschiedenen Gemische auf den Versuchsfeldern sowie auch die gemäss Norm vorgeschriebenen Laborversuche ergaben, dass die untersuchten Gemische die Normanforderungen mit wenigen Ausnahmen erfüllen. Einzig die RC-Kiesgemische A zeigten leichte Abweichungen zu den entsprechenden Normen. Diese Abweichungen können aber mit dem Zeitpunkt der ME-Messungen und der grundsätzlichen Schwierigkeit der Bestimmung der Klassifizierung der Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen erklärt werden. Die Anforderungen an den S-Wert-Bereich der SN 670 119-NA wurden von den Gemischen grossmehrheitlich erfüllt, die Abweichungen entsprechen den Erwartungen hinsichtlich der Probenahme aus einer eingebauten Foundationsschicht im Vergleich zur vom Produzenten deklarierten Korngrössenverteilungskurve.

Bei der Herstellung der Gemische mit dem «Feinanteil tief» und «Feinanteil hoch» sowie bei den Vergleichsversuchen zur Proctor- und CBR-Versuchsreihe mit dem Feinanteil ab Werk, welche aufgrund des Wechsels der Projektleitung notwendig geworden war, mussten mehrere Schwierigkeiten bewältigt werden:

- Aus den Gemischen mit Betongranulat konnte der rechnerisch ermittelte Feinanteil nicht gewonnen werden, weder durch Trocken- noch Nasssiebung. Erst nachdem mit einem Laborsiebdeck die Gemische durchgerüttelt wurden, konnte der benötigte Feinanteil gewonnen werden. Die anderen Gemische zeigen kein vergleichbares Verhalten. Ganz offensichtlich hat sich das erdfeuchte Betongranulat in den Probeeimern mit der Zeit rückverfestigt.
- Bei den Vergleichsmessungen stellte sich die Konditionierung der Gemische für

den Proctor- und die CBR-Versuche als Knacknuss heraus. Erst als die Konditionierungszeiten gleich gross waren, konnten vergleichbare Werte erzielt werden. Ganz offensichtlich beeinflusst die Konditionierungszeit, welche in den entsprechenden Normen nur rudimentär vorgegeben ist, die Prüfergebnisse (optimaler Wassergehalt, maximale Trockendichte, CBR-Werte). Im Sinne der Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen zwischen verschiedenen Laboren sollte diese Vorgaben in den entsprechenden Normen präzisiert werden.

Der Umstand, dass die ungebundenen Gemische die Anforderungen der SN 670 119-NA erfüllen, hat dazu beigetragen, dass die Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche grundsätzlich homogen ausfallen und die angestrebten Unterschiede zwischen den Gemischen sich nicht im erhofften Masse zeigten.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Gemische, wie sie ab Werk geliefert werden, die Anforderungen der SN 670 119-NA bezüglich der CBR-Verhältnisse erfüllen, und zwar ohne Ausnahme. Aber auch die Gemische mit den künstlich hergestellten Feinanteilen genügen diesen Anforderungen. Die Bandbreite der untersuchten Feinanteile der Gemische reicht von 0.9 bis 13.5 M.-%. Als fast ausserordentlich einzuschätzen ist, dass das Gemisch mit 13.5 M.-% die Anforderungen an die CBR-Verhältnisse erfüllt, allerdings handelt sich dabei um ein Gemisch aus Jurakalken und ist somit nicht repräsentativ für die Gemische mit hohem Feinanteil.

Bei der statistischen Auswertung der Gemische bezüglich der absoluten CBR-Werte (CBR1, CBR2 und CBRF) fällt auf, dass einzig die RC-Kiesgemische A einen relativ kleinen Wertebereich aufweisen, die anderen Gemische streuen deutlich breiter in ihren Werten (z.B. natürliche Kiesgemische: 155 – 180 Punkte). Aufgrund der Wertebereiche lässt sich von einem bestimmten CBR-Wert nicht auf ein bestimmtes Gemisch schliessen. Betrachtet man die Standardabweichungen der CBR-Werte, erkennt man, dass der Wertebereich der RC-Kiesgemische A deutlich unter jenem der RC-Kiesgemische B und der RC-Betongranulatgemische liegt. Die natürlichen Kiesgemische streuen über den ganzen Wertebereich. Diese Beobachtungen treffen gleichermassen für die CBR-Verhältnisse zu.

Im Weiteren ist es wenig erstaunlich, dass die Gemische aus natürlichem Kies oder mit einem hohen Anteil an natürlichem Kies ein vergleichbares Verhalten zeigen und in den Auswertungen in den gleichen Wertebereichen zu finden sind. Einzig das RC-Betongranulatgemisch zeigt ein anderes Verhalten und dadurch in den Auswertungen teilweise einen eigenen Wertebereich. Dies ist bedingt dadurch, dass der optimale Wassergehalt dieser Gemische um einiges höher liegt als bei den anderen Gemischen.

Die Gegenüberstellung der verschiedenen relevanten Parameter der Gemische wie optimaler Wassergehalt, Feinanteil, CBR-Werte, maximale Frosthebung oder Resthebung ergab kaum systematische Korrelationen. Auch konnten die verschiedenen Gemische aufgrund dieser Gegenüberstellungen nicht schlüssig gegeneinander abgegrenzt werden.

Die untersuchten Gemische stellen demnach robuste Systeme dar, welche beträchtliche Variationen des Feinanteils aufnehmen können und trotzdem befriedigende bis gute Eigenschaften aufweisen. Die Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass die besten absoluten Werte für ein Gemisch mit dem Feinanteil ab Werk erreicht werden. Die Gemische mit dem veränderten Feinanteil («Feinanteil tief», «Feinanteil hoch») zeigen in der Regel tiefere absolute CBR-Werte. Daraus lässt sich schliessen, dass der Anforderung an die Normsiegelinie eine grosse Bedeutung bei der Qualifikation von ungebundenen Gemischen zukommt.

Der Befund, dass die Variation des Feinanteils im vorliegenden Projekt keine tragende Rolle zu spielen scheint, sollte allerdings nicht zur Schlussfolgerung verleiten, dass der CBRF-Versuch nicht mehr notwendig sei:

- Die teilweise beträchtlichen Hebungswerte, welche sich beim CBRF-Versuch (und auch beim CBR2-Versuch) ergaben, konnten durch die Forschungsarbeit nicht erklärt werden. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass sich eben doch quellfähige Mineralien in den Gemischen befinden, welche schlussendlich zu

Frostschäden führen könnten. Der Ursache dieser Hebungen in ungebundenen Gemischen im CBR2 und CBRF-Versuch sollte daher in einem weiteren Projekt nachgegangen werden.

- In der nächsten Generation der EN 13285 wird, nach heutigem Stand der Dinge, eine Prüfung zur Beurteilung der Frostbeständigkeit von Gemischen in den Anforderungskatalog aufgenommen. Die CBRF-Prüfung der Schweiz scheint in Europa die Einzige zu sein, welche regelmässig zur Qualifikation von ungebundenen Gemischen eingesetzt wird. Darum sollte die Schweizer Erfahrungen unbedingt in den Normierungsprozess im CEN einfließen. Der bestehende Versuch muss dabei noch optimiert werden.

Die Auswertung der Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche lassen den Schluss zu, dass diese Prüfmethode unter den heutigen Umständen und Vorgaben wahrscheinlich die erhoffte Auflösung der Prüfergebnisse nicht liefern können. Man muss sich die Frage stellen, ob man in der (Labor-)Praxis vielleicht nicht zu viel in die Prüfergebnisse hineinliest und ob es sich bei diesen nicht eher um Grössenordnungen handelt. In einem Ringversuch zum Proctor-Versuch im VAB (Verein akkreditierter Prüflabore) hat man nach eingehender Analyse festgestellt, dass einige Einflussfaktoren nicht schlüssig erklärt werden können. Gewisse Einflussfaktoren könnten wohl durch einheitliche Prüfanweisungen beherrscht werden, andere wiederum müssten noch genauer analysiert werden.

In Bezug auf die Einführung von neuen absoluten CBR-Werten oder Veränderung von bestehenden Grenzwerten können folgende Einschätzungen vorgenommen werden:

- Aufgrund statistischer Betrachtungen der Wertebereiche der CBR-Werte und der CBR-Verhältnisse könnte die Einführung von absoluten Anforderungen an die untersuchten Gemische (natürliches Kiesgemisch, RC-Kiesgemisch A, RC-Kiesgemisch B und RC-Betongranulatgemisch) in Betracht gezogen werden. Ein absoluter Wert von 40 CBR-% als Minimum könnte dabei analog der alten Kiessandnorm SN 670 120d definiert werden. Die CBR-Verhältnisse könnten mit den gleichen statistischen Überlegungen auf 0.7 angehoben werden. Diese Möglichkeit sollte aber noch sorgfältig hinterfragt werden: Einerseits wurden im Forschungsprojekt nicht alle gemäss SN 670 119-NA möglichen Gemische untersucht und andererseits stellt sich die Frage, ob in Anbetracht der grossen Bedeutung der Normsiegelinie, mit der Einführung von absoluten Werten die Qualität der Gemische wirklich zwingend erhöht wird. Die untersuchten Gemische haben ihre Praxistauglichkeit und ihre Normkonformität bewiesen, ohne zusätzlichen Anforderungen.
- In Anbetracht der Resultate dieses Forschungsprojekts kann eine Erhöhung des zulässigen Feinanteils auf 5 M.-%, wie im Forschungsprojekt VSS 2011/505 gefordert, mit dem vorliegenden Datensatz unterstützt und argumentiert werden. Jedoch sollte dabei der Einfluss des Feinanteils und seiner Petrographie nicht ausser Acht gelassen werden. Es ist durch die Normenkommission zu prüfen, ob nicht ein kombiniertes Vorgehen, von Frostversuchen im Zusammenspiel mit petrographischen Abklärungen, zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit vorzusehen ist. Das Ziel muss sein, dass der potenziell schädliche Einfluss von quellfähigen Mineralien in ungebundenen Gemischen minimiert wird.



## Résumé

Contrairement à la norme précédente SN 670 120d, la norme SN 670 119-NA, qui définit les exigences de qualité des graves non traitées en Suisse, ne formule pas d'exigences absolues pour les valeurs et les rapports CBR.

L'objectif du présent travail de recherche était d'examiner si ces exigences absolues ne devaient pas être réintroduites, car dans la pratique, il y avait des cas où des graves non traitées respectaient les rapports CBR, mais où les valeurs CBR absolues étaient inférieures aux valeurs absolues de la norme précédente. Comme la qualité des graves non traitées et la durée de vie des couches de fondation sont d'une grande importance, étant donné que celles-ci sont débâties moins fréquemment que la superstructure bitumineuse, il est important de clarifier ces questions.

Parmi les 11 graves non traitées 0/45 étudiées dans le cadre du projet de recherche, 4 graves étaient d'origine naturelle, les 7 autres graves étaient des RC-graves (3 RC-graves B, 2 RC-graves A et 2 RC-graves de granulats béton) provenant de toute la Suisse.

Le projet de recherche s'est déroulé en trois étapes:

- Dans la première étape, les graves sélectionnées ont été bâties+ dans des plages d'essai afin de vérifier leur aptitude pratique en termes de portance.
- Dans une deuxième étape, les graves ont été échantillonnées dans les plages d'essai, puis leur qualification a été examinée en laboratoire à l'aide des essais spécifiés par la norme SN 670 119-NA.
- Lors de la troisième étape, des essais Proctor et CBR ont été effectués sur les graves non traitées afin d'étudier la résistance au gel en fonction de la teneur en fines. Les 11 gravés ont été testés avec la teneur en fines (< 0.063 mm) issue de la centrale ainsi que dans deux séries de tests supplémentaires avec une teneur en fines plus faible («Teneur en fines basse», env. – 2 % masse) et avec une teneur en fines plus élevée («Teneur en fines haute», env. + 2 % masse). Ces dernières séries de tests ont été réalisées avec des graves produits en laboratoire par le centre de recherche.

Le contrôle de la portance des différents graves sur les plages d'essai ainsi que les essais en laboratoire prescrits par la norme ont montré que les graves examinées remplissaient les exigences de la norme à quelques exceptions près. Seuls les RC-graves A ont montrées des déviations légères par rapport aux normes correspondantes. Cependant, ces écarts peuvent être expliqués par la date où les mesures de plaque  $M_E$  ont été effectuées et par la difficulté fondamentale de déterminer la classification des constituants des granulats recyclés. Les exigences relatives au fuseau granulométrique de la valeur S déclarée de la norme SN 670 119-NA ont été en grande partie remplies par les graves, les écarts correspondent aux attentes en matière de l'échantillonnage d'une couche de fondation bâtie par rapport à la courbe granulométrique déclarée par le producteur.

Plusieurs difficultés ont dû être surmontées lors de la production des graves à «Teneur en fines basse» et à «Teneur en fines haute», ainsi que lors des essais comparatifs aux séries d'essais Proctor et CBR, qui étaient devenus nécessaires en raison du changement de la direction du projet de recherche:

- La teneur en fins calculée n'a pas pu être obtenue à partir des graves avec des granulats de béton, ni par tamisage à sec ou à l'eau. La teneur en fines requise n'a pu être obtenue, seulement après que les graves étaient secouées sur une table de criblage. Les autres graves n'ont pas montré un comportement comparable. De toute évidence, le granulats de béton humide contenu dans des seaux d'échantillonnage s'est resolidifié au fil du temps.
- Lors des essais comparatifs, le conditionnement des mélanges pour les essais

Proctor et CBR s'est avéré être un véritable casse-tête. Des valeurs comparables n'ont pu être obtenues que lorsque les temps de conditionnement étaient égaux. Il est évident des résultats que le temps de conditionnement, qui 'est spécifié que de manière rudimentaire dans les normes correspondantes, influence les résultats des essais (teneur en eau optimale, masse volumique sèche maximale, valeurs CBR). Dans l'intérêt de la comparabilité des résultats d'essais entre laboratoires, ces spécifications devraient être précisées dans les normes pertinentes.

Le fait que les graves non traitées répondent aux exigences de la norme SN 670 119-NA a contribué à ce que les résultats des essais Proctor et CBR soient en principe homogènes et que les différences souhaitées entre les graves n'apparaissent pas dans la mesure espérée.

Les essais ont montré que les graves tels que fournis par la centrale répondent aux exigences de la norme SN 670 119-NA concernant les rapports CBR, sans exception. Cependant, les graves avec les teneurs en fines produites artificiellement répondent également à ces exigences. La gamme des teneurs en fines examinées des graves s'étend de 0.9 à 13.5 % masse. La grave avec 13.5 % masse répond aux exigences des ratios CBR, mais il s'agit d'un mélange de calcaires jurassiques et n'est donc pas représentatif des graves avec une teneur en fines élevée.

L'évaluation statistique des graves par rapport aux valeurs absolues du CBR (CBR1, CBR2 et CBRF) montre que seuls les RC-graves A présentent une fourchette de valeurs relativement faible, les autres graves présentant une fourchette de valeurs beaucoup plus large (par exemple, les graves naturelles: 155 - 180 points). En raison des plages de valeurs, il n'est pas possible de conclure d'une certaine valeur CBR à une certaine grave. Si l'on considère les écarts types des valeurs CBR, on constate que la gamme de valeurs des RC-graves A est nettement inférieure à celle des RC-graves B et des RC-graves à granulats béton. Les graves naturelles se répartissent sur toute la gamme de valeurs. Ces observations s'appliquent également aux ratios CBR.

En outre, il n'est pas surprenant que les graves naturelles ou avec une forte proportion de gravier naturel présentent un comportement comparable et se retrouvent dans les mêmes plages de valeurs dans les évaluations. Seul le RC-graves à granulats béton présente un comportement différent et possède donc en partie sa propre plage de valeurs dans les évaluations. Cela est dû au fait que la teneur en eau optimale de ces graves est considérablement plus élevée que celle des autres graves.

La comparaison des différents paramètres pertinents des graves, tels que la teneur en eau optimale, la teneur en fines, les valeurs CBR, le gonflement vertical maximal dû au gel ou le gonflement vertical résiduel, n'a guère montré de corrélations systématiques. De plus, les différents graves n'ont pas pu être distinguées de manière concluante les uns des autres sur la base de ces comparaisons.

Les graves étudiées représentent donc des systèmes robustes, qui peuvent accommoder de variations considérables de la teneur en fines tout en présentant des propriétés satisfaisantes ou bonnes. Toutefois, les recherches ont également montré que les meilleures valeurs absolues sont obtenues pour les graves avec la teneur en fines issue de la centrale. Les graves avec la teneur en fines modifiée ("teneur en fines basse", "teneur en fines haute") présentent généralement des valeurs absolues de CBR plus faibles. On peut en conclure que l'exigence de la courbe granulométrique de la norme est d'une grande importance dans la qualification des graves non traitées.

Toutefois, le fait que la variation de la teneur en fines ne semble pas jouer un rôle majeur dans le présent projet ne doit cependant pas conduire à la conclusion que l'essai CBRF n'est plus nécessaire:

- Les valeurs de gonflement vertical en partie considérables, qui ont résulté de l'essai CBRF (et aussi de l'essai CBR2), n'ont pas pu être expliquées par le projet de recherche. On ne peut donc pas exclure la présence de minéraux gonflants dans les graves, ce qui pourrait finalement entraîner des dommages dus au gel. La cause du gonflement vertical des graves non traitées dans les essais CBR2 et CBRF devrait donc être étudiée dans un futur projet.
- Dans la prochaine génération de la norme EN 13285, en l'état actuel des choses, un essai d'évaluation de la résistance au gel des graves sera inclus dans le catalogue des exigences. L'essai CBRF en Suisse semble être le seul en Europe à être régulièrement utilisé pour la qualification des graves non traitées. Il est donc essentiel que l'expérience suisse soit intégrée au processus de normalisation du CEN. L'essai existant doit pourtant être optimisé.

L'évaluation des résultats des essais Proctor et CBR permet de conclure que, dans les circonstances et les spécifications actuelles, ces méthodes d'essai ne pourront probablement pas fournir la résolution espérée des résultats d'essai. Il faut se demander si, dans la pratique (de laboratoire), on n'est pas enclins à lire dans résultats des essais ce que n'y est pas et si ceux-ci ne sont pas plutôt des ordres de grandeur. Lors d'un essai croisé de l'essai Proctor à l'ALA (Association des laboratoires accrédités), il a été constaté, après une analyse détaillée, que certains facteurs d'influence ne peuvent être expliqués de manière concluante. Certains de ces facteurs d'influence pourraient probablement être contrôlés par des instructions d'essai homogènes, tandis que d'autres devraient être analysés plus en détail.

En ce qui concerne l'introduction de nouvelles valeurs CBR absolues ou la modification des valeurs limites existantes, les appréciations suivantes peuvent être faites:

- Sur la base de considérations statistiques des plages de valeurs CBR et des rapports CBR, l'introduction d'exigences absolues pour les graves étudiées (graves naturelles, RC-graves A, RC-graves B et RC-graves à granulat béton) pourrait être envisagée. Une valeur absolue de 40 CBR-% comme minimum pourrait être définie de manière analogue à l'ancienne norme pour graves SN 670 120d. Les rapports CBR pourraient être portés à 0,7 avec les mêmes considérations statistiques. Toutefois, cette possibilité doit encore être examinée en détail: D'une part, tous les graves possibles selon la norme SN 670 119-NA n'ont pas été étudiés dans le cadre du projet de recherche, et d'autre part, la question se pose de savoir si, compte tenu de la grande importance de la courbe granulométrique de la norme, l'introduction de valeurs absolues augmente vraiment nécessairement la qualité des graves. Les graves étudiés ont prouvé leur aptitude pratique et leur conformité à la norme sans exigences supplémentaires.
- Au vu des résultats de ce projet de recherche, une augmentation de la teneur en fines autorisée à 5 % masse, comme demandé dans le projet de recherche VSS 2011/505, peut être soutenue et argumentée avec l'ensemble des données disponibles. Cependant, l'influence de la teneur en fines et de sa pétrographie ne doit pas être négligée. La commission de norme devrait examiner si une procédure combinée d'essais de résistance au gel en conjonction avec des investigations pétrographiques devrait être utilisée pour évaluer la sensibilité au gel. L'objectif doit être de minimiser l'influence potentiellement néfaste des minéraux gonflants dans les graves non traitées.



## Summary

In contrast to the predecessor standard SN 670 120d, the standard SN 670 119-NA, which specifies the requirements for the quality of unbound mixtures in Switzerland, does not formulate absolute requirements for CBR values and CBR ratios.

The aim of the present research project was to examine whether such absolute requirements need not be reintroduced, since in practice there were cases in which unbound mixtures met the CBR ratios but the absolute CBR values were below the absolute values of the predecessor standard. Since the quality of unbound mixtures and the life span of subbase layers are of great importance, as they are removed less frequently than the road superstructure, clarification of these issues is important.

Of the 11 unbound mixtures 0/45 investigated in the research project, 4 mixtures were of natural origin, and the remaining 7 mixtures were RC mixtures (3 RC gravel mixture B, 2 RC gravel mixtures A, and 2 RC concrete aggregate mixtures) from all over Switzerland.

The research project was conducted in three phases:

- In the first phase, the selected mixtures were built in test fields to verify their practicality in terms of the bearing capacity.
- In the second phase, the mixtures were sampled in the test fields and then their qualification was investigated in the laboratory using the tests specified by SN 670 119-NA.
- In the third phase, Proctor and CBR tests were performed on the unbound mixtures to investigate the frost resistance as a function of the fines content. The 11 mixtures were tested with the fines content ( $< 0.063$  mm) from the plant and in each case in an additional test series with a lower ("fines content low", approx. - 2 weight %) and a higher ("fines content high", approx. + 2 weight %) fines content. The latter two test series were carried out with mixtures that had been prepared in the laboratory by the research unit.

The control of the bearing capacity of the different mixtures on the test fields as well as the laboratory tests prescribed by the standard showed that the investigated mixtures fulfilled the standard requirements with few exceptions. Only the RC gravel mixture A showed slight deviations from the corresponding standards. However, these deviations can be explained by the timing of the plate-loading test  $M_E$  measurements and the fundamental difficulty of determining the classification of the constituents of recycled aggregates. The requirements for the S-value range of SN 670 119-NA were mostly met by the mixtures, and the deviations correspond to the expectations regarding sampling from a built foundation layer in comparison with the grading curve declared by the producer.

Several difficulties had to be overcome in the preparation of the mixtures with the "fines content low" and "fines content high" as well as in the comparative tests to the Proctor and CBR test series with the fines content from the plant, which had become necessary due to the change of the lead in the research project:

- The calculated fines content could not be obtained from the mixtures with concrete aggregates, neither by dry nor wet sieving. Only after the mixtures had been thoroughly shaken with a laboratory sieve deck was it possible to obtain the required fines content. The other mixtures did not show comparable behavior. Quite obviously, the earth-moist concrete aggregates in the sample buckets re-solidified with time.
- In the comparative tests, the conditioning of the mixtures for the Proctor and the CBR tests turned out to be quite a puzzle. Only when the conditioning times were equal could comparable values be obtained. Quite obviously, the conditioning time, which is only rudimentarily specified in the corresponding standards, influences the test results (optimum water content, maximum dry density, CBR

values). In the interest of comparability of test results between laboratories, these specifications should be precisely specified in the corresponding standards.

The fact that the unbound mixtures meet the requirements of SN 670 119-NA has contributed to the fact that the results of the Proctor and CBR tests are basically homogeneous and the desired differences between the mixtures did not show to the extent hoped for.

The tests have shown that the mixtures as supplied by the plant meet the requirements of SN 670 119-NA regarding CBR ratios, without exception. However, the mixtures with the artificially produced fines content also meet these requirements. The range of the examined fine fractions of the mixtures stretches from 0.9 to 13.5 weight %. It can be considered almost exceptional that the mixture with 13.5 weight % meets the requirements for CBR ratios. However, this is a mixture of Jurassic limestones and is therefore not representative of the mixtures with high fines content.

In the statistical evaluation of the mixtures with respect to the absolute CBR values (CBR1, CBR2 and CBRF), it is noticeable that only the RC gravel mixtures A show a relatively small range of values, the other mixtures scatter much more widely in their values (e.g. natural mixtures: 155 - 180 points). Due to the value ranges, it is not possible to conclude from a certain CBR value to a certain mixture. If the standard deviations of the CBR values are considered, it can be seen that the value range of the RC gravel mixtures A is clearly below that of the RC gravel mixtures B and the RC concrete aggregate mixtures. The natural mixtures scatter over the entire range of values. These observations apply equally to the CBR ratios.

Furthermore, it is not surprising that the natural mixtures or with a high proportion of natural gravel show a comparable behavior and are found in the same value ranges in the evaluations. Only the RC concrete aggregate mixture shows a different behavior and thus partly a separate value range in the evaluations. This is due to the fact that the optimum water content of these mixtures is considerably higher than that of the other mixtures.

The comparison of the various relevant parameters of the mixtures, such as optimum water content, fines content, CBR values, maximum frost heave or residual heave, showed hardly any systematic correlations. Also, the different mixtures could not be conclusively distinguished from each other on the basis of these comparisons.

Accordingly, the investigated mixtures represent robust systems that can accommodate considerable variations in fines content and still exhibit satisfactory to good properties. However, the investigations have also shown that the best absolute values are obtained for a mixture with the fines content from the plant. The mixtures with the modified fines content ("fines content low", "fines content high") generally show lower absolute CBR values. It can be concluded that the requirement for the standard grading curve is of great importance in the qualification of unbound mixtures.

The finding that the variation of the fines content does not seem to play a major role in the present project should not, however, lead to the conclusion that the CBRF test is no longer necessary:

- The partly considerable heave values, which resulted in the CBRF test (and also in the CBR2 test), could not be explained by the research work. It can therefore not be ruled out that swellable minerals are present in the mixtures, which could ultimately lead to frost damage. The cause of these heaves in unbound mixtures in the CBR2 and CBRF tests should therefore be investigated in a future project.
- In the next generation of EN 13285, as things stand today, a test for assessing the frost resistance of mixtures will be included in the catalog of requirements. Switzerland's CBRF test seems to be the only one in Europe that is regularly used for the qualification of unbound mixtures. Therefore, the Swiss experience should definitely be included in the standardization process in CEN. The existing test still needs to be optimized.

The evaluation of the results of the Proctor and CBR tests lead to the conclusion that these test methods probably cannot provide the desired resolution of the test results under today's circumstances and specifications. One must ask oneself whether in (laboratory) practice one is perhaps not reading too much into the test results and whether these are not rather orders of magnitude. In a round robin test on the Proctor test in the VAB (Association of Accredited Testing Laboratories), it was found after detailed analysis that some influencing factors cannot be explained conclusively. Certain influencing factors could probably be controlled by standardized test instructions, while others would have to be analyzed in more detail.

With regard to the introduction of new absolute CBR values or changes to existing limits, the following assessments can be made:

- Based on statistical considerations of the ranges of CBR values and CBR ratios, the introduction of absolute requirements for the investigated mixtures (natural mixtures, RC gravel mixture A, RC gravel mixture B, and RC concrete aggregate mixture) could be considered. An absolute value of 40 CBR-% as minimum could be defined analogous to the old unbound mixtures standard SN 670 120d. The CBR ratios could be raised to 0.7 with the same statistical considerations. However, this possibility should still be carefully questioned: On the one hand, not all possible mixtures according to SN 670 119-NA were investigated in the research project, and on the other hand, the question arises whether, in view of the great importance of the standard grading curve, the introduction of absolute values really necessarily increases the quality of the mixtures. The investigated mixtures have proven their practical suitability and their conformity to the standard, without additional requirements.
- In view of the results of this research project, an increase of the permissible fines content to 5 weight %, as demanded in the research project VSS 2011/505, can be supported and argued with the available data set. However, the influence of the fines content and its petrography should not be disregarded. The standardization committee should examine whether a combined procedure of frost tests in conjunction with petrographic investigations should be used to assess frost resistance. The aim must be to minimize the potentially harmful influence of swellable minerals in unbound mixtures.



# 1 Ausgangslage

Foundationsschichten bilden die erste Schicht des Strassenoberbaus. Bei einem Versagen, einer falschen Dimensionierung bezüglich Schichtdicke oder auch Frost können die darüberliegenden Schichten beschädigt werden und es drohen hohe Instandsetzungskosten. Dabei wird die Lebenserwartung einer Foundationsschicht bei 80 bis 120 Jahre angesetzt, d.h. der restliche bituminöse Oberbau wird in der Regel mehrmals aus- und eingebaut, die Foundationsschicht dagegen verbleibt mehr oder weniger im Strassenkörper.

Es besteht daher ein erhebliches Interesse, dass die für Foundationsschichten verwendeten Materialien bereits vor deren Einbau auf der Baustelle hinreichend auf ihre Eignung geprüft werden. Dazu sind nicht nur geeignete Prüfverfahren erforderlich, sondern die Prüfergebnisse müssen mit entsprechenden Anforderungen interpretiert und beurteilt werden können.

Die Anforderungen an Foundationsschichten wurden mit der Übernahme der CEN-Gesteins-körnungsnormen grundlegend geändert. Im Zug dieser Übernahme wurde die Schweizer Norm SN 670 120d «Kiessande für Foundationsschichten» [1] ausser Kraft gesetzt. Die neue Norm SN 670 119-NA [2] umfasst einerseits die EN 13242 «Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulische gebundene Baustoffe für Ingenieur- und Strassenbau» [3] sowie andererseits die EN 13285 «Ungebundene Gemische – Anforderungen» [4] und hat einige Konsequenzen für die Herstellung von ungebundenen Gemischen zur Folge:

- Der obere Grenzwert für den Feinanteil, d.h. die Fraktion  $< 0.063$  mm beträgt 12 Massen-% (Kategorie UF<sub>12</sub> der EN 13285), statt 5 Massen-% wie in der SN 670 120d.
- Die in der Schweiz durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) definierten Recycling-Gemische [5] sind gemäss der Norm SN 670 119-NA für den Einbau als Foundationsschichten zugelassen.
- Die absoluten Anforderungen an die Frostbeständigkeit, welche durch die sogenannten «CBR-Versuche» (CBR1, CBR2 und CBRF) geprüft werden, wurden fallengelassen (SN 670 120d: CBR2  $\geq 40$  CBR-%, CBRF  $\geq 80$  CBR-%).
- Die Beurteilung der Frostbeständigkeit basiert ausschliesslich auf den beiden Verhältnisquotienten CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1, welche beide  $\geq 0.5$  betragen müssen.
- Zusätzlich zu diesen Änderungen wurden diverse neue Parameter gemäss den Prüfmöglichkeiten der EN 13242 eingefügt, so z. B. Anteil gebrochene Körner, Los Angeles-Versuch.

Diese Änderungen haben zur Folge, dass in der Bewertung von Foundationsschichten Unklarheiten entstanden sind:

- Es ist beispielsweise unklar, ob sich die Anforderung an das CBR-Verhältnis von  $\geq 0.5$  auf die Erhöhung des oberen Grenzwertes des zulässigen Feinanteils von 5 auf  $\leq 12$  Masse-% (M.-%) übertragen lässt. Diese neue Klasse für den Feinanteil aus der EN 13285 hat eine neue Situation für die Beurteilung von CBR-Werten und CBR-Verhältnissen geschaffen.
- Die bisherigen Anforderungen an CBR-Werte aus der SN 670 120d beziehen sich auf natürliche Kiesgemische. Es ist unklar, wie CBR-Werte und CBR-Verhältnisse für ungebundene Recyclinggemische anzuwenden sind oder welche Anforderungen überhaupt sinnvoll sind.
- Das Fehlen von absoluten Anforderungen an CBR-Werte hat in der Praxis teilweise dazu geführt, dass auch Gemische mit gemäss SN 670 120d ungenügender Tragfähigkeit die Normanforderungen an die Frostbeständigkeit erfüllen, da das CBR-Verhältnis von  $\geq 0.5$  erfüllt ist.

Im Weiteren besteht die folgende Unklarheit bezüglich des Prüfverfahren für die Frostbeständigkeit von ungebundenen Gemischen gemäss der VSS-Norm 70 321 [6].

- Die Schweizer Prüfnorm für CBRF-Versuche verlangt, dass die Frost- und Resthebung beim Versuch im Labor gemessen werden und der Hebungskoeffizient (Resthebung/Frosthebung) ausgewiesen wird. Es gibt allerdings keine Anforderungen an diese Werte. Zudem gibt es keine Erfahrungen mit diesen Werten in Bezug auf ungebundene Gemische, weder für natürliche noch für Recyclinggemische.

## 2 Zielsetzung

Das vorliegende Forschungsprojekt möchte in Anbetracht der in der Ausgangslage dargestellten Sachverhalte Antworten auf folgende Punkte liefern:

- Überprüfung der Anforderung an die CBR-Verhältnisse CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1:
  - Ist die Anforderung an die CBR-Verhältnisse mit  $\geq 0.5$  grundsätzlich geeignet, um die Anforderung an die Frostbeständigkeit von ungebundenen Gemische zu beschreiben?
  - Ist die Anforderung für natürliche Gemische und Recyclinggemische gleichermaßen geeignet?
- Müssen Anforderungen an absolute CBR-Werte an die Gemische formuliert werden, so wie dies in der Vergangenheit der Fall war (d.h. in der SN 670 120d)?
- Gibt es eine Korrelation von Resultaten aus dem statischen Plattendruckversuch mit CBR-Werten aus den CBR-Versuchen?

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt sollen nach Prüfung durch die zuständige Normen- und Forschungskommission in die schweizerische Umsetzung der EN 13285 einfließen.



## 3 Vorgehen

### 3.1 Projektleitung

Das Projekt wurde mit der Verfügung des ASTRA vom 31. Mai 2013 bewilligt. Die Projektleitung oblag Gerhard Christen vom Labor Geotechnik und Oberbau des Tiefbauamtes des Kantons Zürich. Die Stellvertretung der Projektleitung wurde zunächst durch Dr. Roger Rütli von der IMP Bautest AG wahrgenommen, welcher diese Funktion im August 2016 aufgrund interner Umstrukturierungen an Binh Ngyuen übergab. Da das Labor Oberbau und Geotechnik am 1. September 2018 vom Kanton Zürich geschlossen wurde, vereinbarten die beiden Forschungsstellen, dass die IMP Bautest AG mit Dr. Roger Rütli als Projektleiter und der IMP Bautest AG als alleinige Forschungsstelle das Projekt zu Ende führt. Diese Übergabe wurde dann mit einer neuen Verfügung des ASTRA vom 4. März 2019 formalisiert. Diese neue Verfügung ersetzt die ursprüngliche Verfügung aus dem Jahre 2013.

Dieser Bericht fasst die Erkenntnisse der ganzen Forschungsarbeit zusammen und wird allein durch die IMP Bautest AG verantwortet.

### 3.2 Versuchsumfang im geplanten Forschungsprojekt

Bei der Formulierung des Forschungsvorhabens wurde der Ansatz gewählt, dass je 4 Gemische aus den 3 verschiedenen geologischen Provenienzen der Schweiz, Mittelland, Jura und Alpen geprüft werden sollten (je 1 Gemisch rund, gebrochen, RC-Kiesgemisch A und RC-Kiesgemisch B). Da natürliche Kiesgemische im Jura von untergeordneter Bedeutung sind, wurde beschlossen diese wegzulassen (natürliche Gesteinskörnung rund). Es sollten also 11 ungebundene Gemische in Betracht gezogen werden:

- 2 natürliche Kiesgemische rund (Mittelland, Alpen)
- 3 natürliche Kiesgemische gebrochen (Jura, Mittelland, Alpen)
- 3 RC-Kiesgemische A mit 30 % Ausbausphal (Jura, Mittelland, Alpen)
- 3 RC-Kiesgemische B mit 30 % Betongranulat (Jura, Mittelland, Alpen)

Die 11 Gemische sollten zuerst in Versuchsfeldern am Standort des Labors des Tiefbauamtes des Kantons Zürich in Urdorf fachgerecht eingebaut und kontrolliert werden, um nach Abschluss der Laborversuche Korrelationen mit den Resultaten aus Plattendruckversuchen herzustellen. Auf den Versuchsfeldern in Urdorf sollte das Gemisch mit einem Feinanteil von 6 M.-% eingebaut werden. Der Umfang der Laborprüfungen stützte sich auf die Anforderungen der SN 670 119- NA ab:

- Korngrößenverteilung
- Widerstand gegen Zertrümmerung (Los Angeles-Versuch)
- Plattigkeitskennzahl
- Anteil gebrochener Körner
- Optimaler Wassergehalt und maximale Trockendichte
- Tragfähigkeit (CBR1-Versuch)
- Tragfähigkeit nach Wasserlagerung (CBR2-Versuch)
- Tragfähigkeit nach Frost-Tau-Zyklus (CBRF-Versuch)

An den 11 ungebundenen Gemischen sollte jeweils CBR-Versuchsreihen mit den unterschiedlichen Feinanteilen (6, 9 und 12 M.-%) und 3 verschiedenen Wassergehalten durchgeführt werden, sodass total 99 Versuchsreihen geplant waren.

### 3.3 Versuchsumfang im durchgeführten Forschungsprojekt

Nach Aufnahme des Forschungsprojektes und den ersten Abklärungen mit den potenziellen Lieferanten war klar, dass die Gemische nicht wie geplant beschafft werden konnten. Die Gründe dafür waren die folgenden:

- Für RC-Kiesgemische A und B, welche auf Jurakalken basierten, konnten keine Lieferanten gefunden werden, auch in den Alpentälern musste einiger Aufwand betrieben werden. Es konnte ein Lieferant gefunden werden, welcher ein RC-Kiesgemisch B herstellt und verkauft.
- Die Feinanteile der Gemische ab Werk variieren sehr stark und zeigen eine Spanne zwischen 2 und 9 M.-%.
- Die Herstellung der Gemische bei verschiedenen Feinanteilen für die geringen im Projekt benötigten Mengen (max. 1.5 – 2 Tonnen) ist für die Werke nicht interessant und für das Forschungsprojekt viel zu teuer. Daher musste ins Auge gefasst werden, die Gemische im Labor herzustellen.
- Aus Erfahrungen geht hervor, dass das Produktionsverfahren insbesondere beim RC-Kiesgemisch A von entscheidender Bedeutung betreffend dem Tragfähigkeitsnachweis im Labor mit den CBR-Versuchen ist. Die Herkunft hat demgegenüber vermutlich nur eine untergeordnete Bedeutung.

Daher wurden in Absprache mit der Begleitkommission die Auswahlkriterien für die ungebundenen Gemische wie folgt angepasst:

**Tab. 1** neue Auswahlkriterien für die ungebundenen Gemische (Sitzung Begleitkommission 24. Februar 2015)

Art des ungebundenen Gemisches	Neues Auswahlkriterium	Begründung
Natürliche Kiesgemische	Es werden weitestmöglich natürliche Kiesgemische aus bekannten Abbaustellen verwendet.	Referenz zu RC-Produkten und Bezug zur SN 670 120d (ungültige Norm)
RC-Kiesgemische B	Es werden Produkte aus Aushubkies, bzw. Recyclingkies und Betonzugabe gewählt.	Abbildung der gängigen Praxis
RC-Betongranulatgemische	Diese Gemische sind teilweise verbreitet im Einsatz	Abbildung der gängigen Praxis
RC-Kiesgemische A	Es wird ein Produkt aus Aushubkies, bzw. Recyclingkies und Asphaltzugabe gewählt sowie ein Produkt von Strassenaufbruch via Brecher.	Nicht die Provenienz soll abgebildet werden, sondern das Produktionsverfahren.

Für die weiteren Arbeiten wurden unter Berücksichtigung der neuen Erkenntnisse folgende Gemische für das Forschungsprojekt ausgewählt. Gegeben ist die Herkunft, respektive der Standort des Werkes, die Produzenten sind anonymisiert.

**Tab. 2** Liste der im Projekt berücksichtigten ungebundenen Gemische

Ungebundenes Gemisch	Bezeichnung Gemisch	Herkunft	Bemerkung
<i>Primär, rund Mittelland</i>	-	-	<i>nicht geprüft</i>
Primär, rund Alpen	KG-4	Cazis GR	
<i>Primär, rund Jura</i>	-	-	<i>nicht geprüft</i>
Primär, gebrochen Jura	KG-1	Vorberg BE	
Primär, gebrochen Mittelland	KG-2	Wilchingen ZH	
Primär, gebrochen Alpen	KG-3	Monthey VS	
RC-B, gebrochen, Alpen	RCB-1	Rubigen BE	
RC-B, rund Mittelland	RCB-2	Rümlang ZH	
RC-B, gebrochen Alpen	RCB-3	Mörel VS	
<i>RC-B, gebrochen Jura</i>	-	-	<i>nicht geprüft</i>
RC-Betongranulatgemisch	RCBGG-1	Littau-Emmen LU	
RC-Betongranulatgemisch	RCBGG-2	Regensdorf ZH	
RC-A, crushed asphalt	RCA-1	Oberglatt ZH	
RC-A, „all in“	RCA-2	Untersiggenthal AG	
<i>RC-A, Fräsutzugabe</i>	-	-	<i>nicht geprüft</i>

Der Umfang der Laborprüfungen wurde wie geplant beibehalten (siehe Kap. 3.1). Es war vorgesehen, die Laborverfahren beider Labore vorgängig zu präzisieren, um sicher zu stellen, dass die Abweichungen zwischen den Laboren minimal bleiben.



## 4 Stand der Forschung

### 4.1 Tragfähigkeit basierend auf der California Bearing Ratio

Das Konzept der California Bearing Ratio (Abkürzung CBR) wurde 1928 in Kalifornien eingeführt, um Böden und Foundationsschichten besser beurteilen zu können. Es existieren grundsätzlich zwei Arten von CBR-Bestimmungen:

- a) die Bestimmung von CBR-Werten im Feld mittels CBR-Penetrollogger;
- b) die Bestimmung von CBR-Werten im Labor am auf der Baustelle verwendeten ungebundenen Gemische (Performance-Prüfung).

In der Schweiz ist vor allem die zweite Methode üblich, obwohl auf Baustellen oder in der Projektierung immer wieder einmal mit dem CBR-Penetrollogger Messungen durchgeführt werden.

In der «Kiessand-Norm» SN 670 120d waren für die Tragfähigkeit von ungebundenen Gemischen Anforderungen an die CBR-Werte aus den drei Versuchen CBR1 (trocken, bei optimalem Wassergehalt), CBR2 (nach Wasserlagerung) und CBRF (nach Frostbeanspruchung) festgelegt. Diese Anforderungen lauteten wie folgt:

**Tab. 3** Anforderungen an CBR-Werte und CBR-Verhältnisse in der SN 670 120d (ungültige Norm)

Materialeigenschaften	Kiessand I	Kiessand II	Kiessand PSS
Feinanteil $\leq 0.063$ mm	$\leq 5$ M.-%	$\leq 12$ M.-%	$\leq 12$ M.-%
CBR2	$\geq 40$ % für rundes bzw. $\geq 80$ % für gebrochenes Material (Bei 3 bis 5 M.-% Feinanteil)	$\geq 40$ % für rundes bzw. $\geq 80$ % für gebrochenes Material	$\geq 40$ % für rundes bzw. $\geq 80$ % für gebrochenes Material
CBRF	$\geq 40$ % für rundes bzw. $\geq 80$ % für gebrochenes Material (Bei 3 bis 5 M.-% Feinanteil)	$\geq 40$ % für rundes bzw. $\geq 80$ % für gebrochenes Material	$\geq 40$ % für rundes bzw. $\geq 80$ % für gebrochenes Material
CBR2/CBR1 bzw. CBRF/CBR1	$\geq 0.5$ (Bei 3 bis 5 M.-% Feinanteil)	$\geq 0.5$	$\geq 0.5$

Von diesen Anforderungen wurden in der Norm SN 670 119-NA lediglich die Anforderung an die CBR-Verhältnisse CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1 behalten. Grund dafür dürfte, unter anderem, die Zulassung der RC-Gemische gemäss der BAFU-Richtlinie gewesen sein.

Die Diskussion, resp. die Forschung, welche CBR-Werte für welches Material zu gelten haben, besteht seit mehreren Jahrzehnten und ist immer wieder Gegenstand der Forschung rund um den Globus (z.B. Breytenbach et al. 2010 [7]). Zudem stellt sich die Frage, ob Anforderungen an den CBR-Wert in Bezug auf RC-Materialien überhaupt Sinn machen. Diese Frage ist auch in anderen Ländern Gegenstand der Forschung (z.B. Blume 2010 [8], Arm 1993 [9]).

Unter den Mitgliedern der Europäischen Normenvereinigung CEN ist die Schweiz das einzige Land, das bei der Prüfung der Tragfähigkeit von ungebundenen Gemischen im Labor so stark auf die CBR-Versuche und CBR-Werte abstützt.

### 4.2 Frostbeständigkeit

Die Frosthebung ist in vielen Ländern bedingt durch saisonal schwankende Temperaturbedingungen ein wichtiges Kriterium in der Projektierung und im Bau von Strassen. Um die Frosthebung zu verstehen und vorherzusagen, wurden in den letzten knapp 80 Jahren diverse Apparaturen hergestellt und eingesetzt (z.B. Zoller 1973 [10],

Sutherland and Gaskin 1973 [11]; Chamberlain 1981 [12]; Mageau and Sherman 1983 [13]; Ito et al. 1998 [14], Darrow et al. 2008 [15]).

Im europäischen Normierungsraum verlangt zum Beispiel die Schweiz den sogenannten CBRF-Versuch zum Nachweis der Frostbeständigkeit. Der CBRF-Versuch (oder ursprünglich CBR3) wurde an der ETH Lausanne in den 1980er und 1990er-Jahren entwickelt (Thorel & Dysli 1990 [16]). Seit der Einführung in das Schweizer Normenwesen in den 1990er-Jahren (als SN 670 321, heute VSS 70 321) hat er sich zum Standard für die Beurteilung der Frostbeständigkeit entwickelt. Dabei muss der CBRF-Versuch nur bei Feinanteilen  $\geq 3$  M.-% durchgeführt werden (SN 670 120d, SN 670 119-NA, siehe auch Tabelle 3).

Frankreich kennt ein ähnliches Verfahren (NF P 98-234-2:1996 [17]), welches sich an die Praxis in Nordamerika anlehnt, das eingesetzte Prüfgerät ist vom Konzept her vergleichbar, in den Details unterscheidet es sich vom in der Schweiz eingesetzten Gerät. In Frankreich wird zudem die Frostphase des Gemisches so lange fortgesetzt, bis die Hebung durch den Frost abgeklungen ist. Erst danach geht das Gemisch in die Auftauphase. In der Schweiz ist die Dauer dieser Phase auf 24 Stunden festgelegt.

Auch in Österreich wird die Frosthebung mittels einer Apparatur geprüft (ÖNORM B 4810 [18]). In Deutschland wird aktuell diskutiert und untersucht, ob man sich der österreichischen Prüfung anlehnen soll.

Gemeinsam ist allen Ländern und Systemen, dass die Ergebnisse unterschiedlich beurteilt werden oder dass, wie in der Schweiz, eine Prüfung verlangt wird, aber keine Anforderungen an die Resultate gestellt werden. Auch der Einfluss des Feinanteils auf die Frosthebung ist Bestandteil der Forschung (Tester und Gaskin 1996 [19]). Umstritten ist auch, ob und wie weit solche Frostbeständigkeitsversuche als Anforderung für Fundationsschichten in Betracht gezogen werden sollen.

Die CEN TC 227 hat von der Europäischen Kommission den Auftrag erhalten mittelfristig eine Frostempfindlichkeitsprüfung und eine Wasserdurchlässigkeitsprüfung in der EN 13285 einzuführen. Dieser Auftrag wird durch die Taskgruppe TG2 der CEN TC 227 WG4 durchgeführt, die Erarbeitung hat 2018 begonnen.

### 4.3 Ungebundene Recycling-Gemische

Die Forschung bezüglich ungebundener Recycling-Gemische steckt in der Schweiz noch in den Kinderschuhen. Einerseits sind diese Baustoffe noch immer relativ «neu», andererseits wird deren Einsatz durch die grosse Verfügbarkeit von natürlichen Kiesgemischen nicht gerade gefördert. Die in der BAFU-Richtlinie definierten Gemische sind tatsächlich erst seit 2006 zugelassen. Insgesamt sind 6 ungebundene Recycling-Gemische definiert:

**Tab. 4** Zugelassene ungebundene Recycling-Gemische in der Schweiz (BAFU-Richtlinie 2006)

Bestandteile	Bitumenhaltige Materialien [M.-%] <b>Ra</b>	Mauerziegel [M.-%] <b>Rb</b>	Beton [M.-%] <b>Rc</b>	Natürliche Gesteinskörnung [M.-%] <b>Ru</b>	Glas [M.-%] <b>Rg</b>	Fremdstoffe schwimmend [Vol.-%] <b>FL</b>	übrige Fremdstoffe [M.-%] <b>X</b>
RC-Asphaltgranulatgemisch	> 80 %	< 2 %		< 20 %	< 2 %	< 5 cm <sup>3</sup> / kg	< 0.3 %
RC-Betongranulatgemisch	< 4 %	< 2 %	> 30 %	< 70 %	< 2 %	< 5 cm <sup>3</sup> / kg	< 0.3 %
RC-Mischgranulatgemisch	< 4 %	> 95 %			< 2 %	< 5 cm <sup>3</sup> / kg	< 1 %
RC-Kiesgemisch P	< 4 %	< 1 %	< 4 %	> 95 %	< 2 %	< 5 cm <sup>3</sup> / kg	< 0.3 %
RC-Kiesgemisch A	< 30 %	< 1 %	< 4 %	> 70 %	< 2 %	< 5 cm <sup>3</sup> / kg	< 0.3 %
RC-Kiesgemisch B	< 4 %	< 1 %	< 30 %	> 70 %	< 2 %	< 5 cm <sup>3</sup> / kg	< 0.3 %

Diese verschiedenen Gemische sind jeweils als 0/16, 0/22 und 0/45er-Gemisch normiert. Einige der Gemische haben sich mittlerweile durchgesetzt, andere finden im Strassenbau kaum Anwendung. Grundsätzlich werden die 0/16 und 0/22er-Gemische selten als zertifizierte Gemische auf dem Markt verkauft. Bei anderen Gemischen z.B. dem RC-Mischgranulatgemisch können die für die Gebrauchstauglichkeit notwendigen Nachweise nicht erbracht werden, weil die dabei verwendeten Recyclingkomponenten (z.B. Backsteine oder Ziegel) die Tragfähigkeiten nicht erbringen.

Das vorliegende Forschungsprojekt ist erst das zweite Projekt im Bereich der ungebundenen RC-Gemische. Das erste Projekt VSS2010/401 [20] hat wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit einzelner RC-Gemische gebracht. Da RC-Gemische verschiedenste Korngrößenverteilungen und Zusammensetzungen haben, fällt die Performance dieser Baustoffe in Strassenbauwerken kritisch aus. RC-Gemische können teilweise nicht für Hochleistungsstrassen eingesetzt werden, da diese die Tragfähigkeit nicht erbringen, andererseits gibt es aber auch Fälle, in welchen RC-Gemische gleiche oder bessere Tragfähigkeitswerte aufweisen als Primärmaterial (z.B. Janssen 2005 [21]).



## 5 Auswahlkriterien für die ungebundenen Gemische

Die Auswahlkriterien für die ungebundenen Gemische waren relativ einfach. Um die Einflussfaktoren auf die CBR-Werte und CBR-Verhältnisse zu minimieren, wurde angestrebt, das Projekt mit normkonformen ungebundenen Gemischen durchzuführen. Das bedeutet, dass folgende Vorgaben eingehalten sein mussten:

- Korngrößenverteilung gemäss der SN 670 119-NA innerhalb des S-Wert-Bereiches für ein 0/45er-Gemisch, damit ist auch die Stetigkeit des Gemisches erfüllt
- Das Überkorn > 16 mm sollte rund 40 M.-% betragen
- Wenn möglich soll das Gemisches zertifiziert hergestellt werden und damit einer werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) unterliegen.

Bei der Auswahl der Gemische wurde festgestellt, dass bezüglich dem Feinanteil eine relativ grosse Spannbreite besteht (2 – 9 M.-%).

Bei den RC-Gemischen war klar, dass Betongranulat/Betonabbruch, resp. Strassenaufbruch/Asphaltgranulat mit Aushubkies gemischt das Ausgangsmaterial für die Versuche war. Es ist weiter klar, dass durch Verwendung von Beton- oder Asphaltgranulat weitere Einflussfaktoren im Gemisch zum Tragen kommen. Wie gross dieser Einfluss sein würde, konnte zu Beginn nicht abgeschätzt werden. Diese Einflussfaktoren spielen bei den RC-Betongranulatgemischen noch eine grössere Rolle, da die Spannbreite der verwendeten RC-Materialien noch grösseren Schwankungen unterliegen kann.

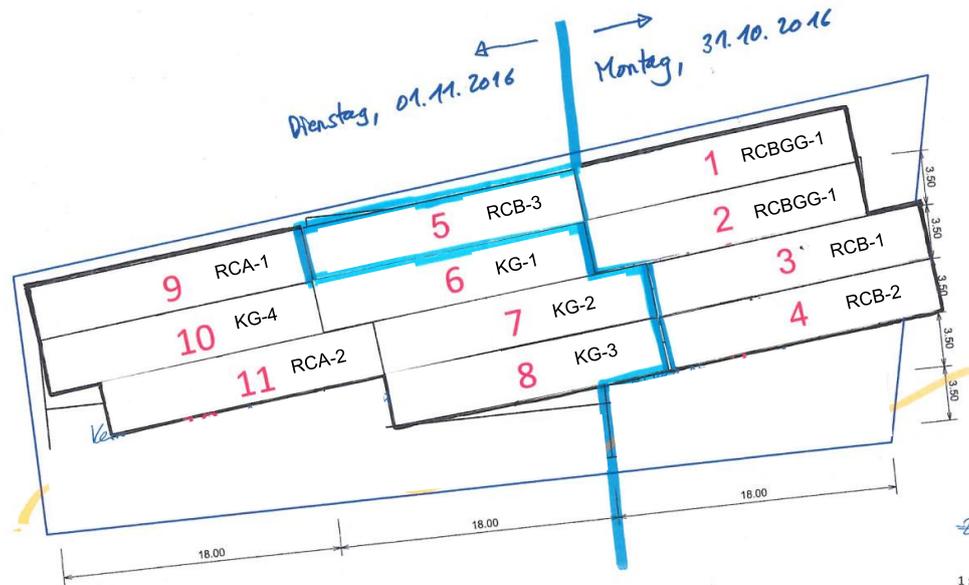
In einem ersten Schritt im Projekt wurden recherchiert, welche Produzenten Materialien für das Forschungsprojekt liefern könnten. In vielen Gesprächen mit Produzenten wurden dann die gewählten Gemische ausgewählt. Die Beschaffung der Materialien erfolgt dann auf den Termin des Einbaus der Versuchsfelder in Urdorf.



## 6 Feldversuche

### 6.1 Versuchsfelder

Der Einbau der Versuchsfelder wurde vom Tiefbauamt des Kantons Zürich vorbildlich geplant und durchgeführt. Die Eberhard Bau AG wurde mit dem Einbau der Versuchsfelder beauftragt. Der Einbau fand an den Tagen vom 31. Oktober und 1. November 2016 in Urdorf statt. Die ungebundene Gemische wurden wie folgt in den Versuchsfeldern angeordnet:



**Abb.1** Anordnung der Versuchsfelder in Urdorf

Die folgende Tabelle zeigt auf, welche ungebundene Gemische in welchem Versuchsfeld verbaut wurden:

**Tab. 5** Liste der Versuchsfelder

Versuchsfeld	Typ des ungebundenen Gemisches	Herkunft	Bezeichnung Gemisch
1	RC-Betongranulatgemisch 0/45	Littau-Emmen	RCBGG-1
2	RC-Betongranulatgemisch 0/45	Regensdorf	RCBGG-2
3	RC-Kiesgemisch B 0/45	Rubigen	RCB-1
4	RC-Kiesgemisch B 0/45	Rümlang	RCB-2
5	RC-Kiesgemisch B 0/45	Mörel	RCB-3
6	Kiesgemisch 0/45	Vorberg	KG-1
7	Kiesgemisch 0/45	Wilchingen	KG-2
8	Kiesgemisch 0/45	Monthey	KG-3
9	RC-Kiesgemisch A 0/45	Oberglatt	RCA-1
10	Kiesgemisch 0/45	Cazis	KG-4
11	RC-Kiesgemisch A 0/45	Untersiggenthal	RCA-2

## 6.2 Einbau

Die Versuchsfelder wurden in 2 Schichten à 25 cm unter gleichen Bedingungen über Kopf geschüttet und eingebaut. Die Verdichtung erfolgte anschliessend mit einer Kombiwalze.



**Abb.2** rechts: Ablad zweite Schicht – links: Planieren der zweiten Schicht



**Abb.3** links: Einbau der zweiten Schicht durch einen Trax – rechts: Verdichtung der zweiten Schicht durch eine Kombiwalze

## 6.3 Verdichtungskontrolle

Die Homogenität der Verdichtung wurde mittels flächendeckender Verdichtungskontrolle auf der Walze sowie mit Messungen mit der Isotopensonde geprüft.



**Abb.4** Überprüfung der Verdichtung mit der Isotopensonde

Der Raster für die Messungen mit der Isotopsonde umfasste je 6 Messungen alle 2 Meter (bei 2, 4, 6, 8, 10 und 12 m) in der Achse eines Versuchsfeldes und links und rechts davon auf der Oberfläche des ungebundenen Gemisches. In 15 cm Tiefe wurde dann nur die Profile linke und rechts der Achse gemessen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Mittelwerte der Parameter pro Versuchsfeld in 15 cm Tiefe aufgeführt:

**Tab. 6** Resultate der Verdichtungskontrolle der Versuchsfelder in Urdorf

Gemisch	Versuchsfeld	Sollwerte aus Leistungserklärung		Mittelwerte der Messungen			
		Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt [M.-%]	Feuchtdichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Verdichtungsgrad [%]
KG-1	6	4.7	2.320	4.7	2.328	2.224	95.7
KG-2	7	5.3	2.300	3.4	2.220	2.148	93.5
KG-3	8	4.0	2.330	3.4	2.201	2.164	92.8
KG-4	10	5.6	2.220	3.8	2.264	2.181	98.2
RCB-1	3	7.7	2.170	6.1	2.258	2.128	98.0
RCB-2	4	6.2	2.240	4.9	2.298	2.190	98.0
RCB-3	5	7.2	2.180	5.1	2.275	2.164	99.1
RCA-1	9	5.8	2.120	5.1	2.103	2.001	94.4
RCA-2	11	6.4	2.110	7.7	2.181	2.025	95.9
RCBGG-1	1	9.3	2.070	9.3	2.045	1.871	90.6
RCBGG-2	2	8.7	2.090	8.7	2.122	1.952	93.4

Die Resultate der Verdichtungskontrolle zeigen einen Bereich des Verdichtungsgrades zwischen 90.6 und 99.1 %. Einzig das Kiesgemisch KG-4 und die drei RC-Kiesgemische B erfüllen die Anforderung der VSS 40 585 [22] an den Verdichtungsgrad von  $\geq 97$  %. Da die gemessenen Wassergehalte ebenfalls stark streuen zwischen 3.4 und 9.3 M.-% und der Einbau mit den Verdichtungsmaschinen über die ganze Fläche gleich erfolgte, schwankt der Verdichtungsgrad zwischen den Feldern gleichermassen.

Im Weiteren fällt auf, dass die meisten Gemische nicht beim optimalen Wassergehalt gemäss Leistungserklärung eingebaut wurden. Die Abweichungen erklären sich durch die Aufbereitung in den Werken, welche für ungebundene Gemische in den meisten Fällen draussen auf dem Werksareal und nicht über Dosierung von Komponenten stattfindet.

## 6.4 Kontrolle der Tragfähigkeit

Einige Tage nach dem Einbau wurde die Tragfähigkeit der einzelnen Versuchsfelder mit dem statischen Plattendruckversuch ( $M_E$ -Versuch) gemäss VSS 70 317 [23] geprüft.

Pro Versuchsfeld wurden drei Plattendruckversuche durchgeführt. Die genaue Verteilung der Punkte kann der folgenden Abbildung entnommen werden.



**Abb.5** Messpunkte für die ME-Versuche

Die Plattendruckversuche wurden durch das Labor TBA bei sonnigem Wetter und Temperaturen von 11 – 12 °C am 3. November 2016 und teilweise sonnigem Wetter und Temperaturen von 3.5 - 9 °C am 4. November 2016 durchgeführt.

Die Zusammenstellung der Messresultate findet sich in der nachfolgenden Tabelle, die kompletten Daten im Anhang I.

**Tab. 7** Zusammenstellung der Mittelwerte der  $M_E$ -Versuche pro Gemisch und zusammengefasst pro Gemischart

Gemisch	Versuchsfeld	Mittelwert pro Gemisch			Mittelwert Gemischart		
		MW $M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E2}/M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E2}/M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
KG-1	6	104.3	259.4	2.5	118.1	240.3	2.0
KG-2	7	115.5	239.8	2.1			
KG-3	8	115.0	228.2	2.0			
KG-4	10	137.3	233.6	1.7			
RCB-1	3	107.4	204.6	1.9	110.9	187.8	1.7
RCB-2	4	124.3	201.2	1.6			
RCB-3	5	100.9	157.5	1.6			
RCA-1	9	102.7	202.2	2.0	90.7	195.4	2.2
RCA-2	11	78.6	188.6	2.4			
RCBGG-1	1	114.8	202.9	1.8	114.9	195.8	1.7
RCBGG-2	2	115.0	188.6	1.6			

Die Auswertung zeigt, dass die eingebauten Gemische ausser den RC-Kiesgemischen A eine der Norm VSS 40 585 entsprechende Tragfähigkeit von 100 MN/m<sup>2</sup>, gemessen an den Mittelwerten pro Versuchsfeld aufweisen. Bei den RC-Kiesgemischen A weist aber vor allem das Gemisch RCA-2 im Versuchsfeld 11 eine ungenügende Tragfähigkeit auf. Im Forschungsprojekt VSS2010/401 wurde gezeigt, dass die Umweltbedingungen (Saison, Temperatur, etc.) vor allem bei den RC-Kiesgemischen A zu beträchtlichen Schwankungen in der Tragfähigkeit führen können. Das ungenügende RC-Kiesgemisch A RCA-2 wurde am zweiten Tag bei weniger idealen Wetterbedingungen und Temperaturen geprüft.

Auffällig ist, dass vor allem beim ersten Messpunkt in einigen Versuchsfeldern ungenügende  $M_{E1}$ -Werte erzielt wurden, die weiteren Messpunkte dann aber in der Regel genügend hohe Werte aufweisen. Dies kann ein Hinweis auf die Streubreite der Messresultate oder auch der Verdichtung sein.

Die Auswertung zeigt, dass die Versuchsfelder mehrheitlich gut verdichtet wurden, da sich das Verdichtungsverhältnis nur in einzelnen Fällen über der Anforderung der VSS 40 585 von  $\leq 2.5$  befindet (siehe Anhang I). Die Tragfähigkeitsmessungen zeigen, dass die im Forschungsprojekt geprüften ungebundenen Gemische auch im Praxistest die erforderlichen Werte erbringen.

## 6.5 Verdichtung und Tragfähigkeit

Beim Vergleich der Mittelwerte der Ergebnisse der Verdichtungs- und Tragfähigkeitskontrollen können keine Korrelationen zwischen den Ergebnissen formuliert werden.

**Tab. 8** Vergleich der Mittelwerte aus Verdichtungs- und Tragfähigkeitskontrollen

Kontrolle Verdichtung und Tragfähigkeit		Mittelwert pro Gemisch			Mittelwert Gemischart			Mittelwert Verdichtungsgrad pro Gemisch [%]	Mittelwert Verdichtungsgrad pro Gemischart [%]
Gemisch	Versuchsfeld	MW $M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E2}/M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	MW $M_{E2}/M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		
KG-1	6	104.3	259.4	2.5	118.1	240.3	2.0	95.7	
KG-2	7	115.5	239.8	2.1				93.5	
KG-3	8	115.0	228.2	2.0				92.8	
KG-4	10	137.3	233.6	1.7				98.2	
RCB-1	3	107.4	204.6	1.9	110.9	187.8	1.7	98.0	
RCB-2	4	124.3	201.2	1.6				98.0	
RCB-3	5	100.9	157.5	1.6				99.1	
RCA-1	9	102.7	202.2	2.0	90.7	195.4	2.2	94.4	
RCA-2	11	78.6	188.6	2.4				95.9	
RCBGG-1	1	114.8	202.9	1.8	114.9	195.8	1.7	90.6	
RCBGG-2	2	115.0	188.6	1.6				93.4	

Dieser Befund gilt sowohl für die Gemische untereinander wie auch für die einzelnen Gemische der verschiedenen Produzenten.

Die Kontrollversuche haben gezeigt, dass die Gemische ihre Eignung als ungebundene Gemische im Versuchsfeld/Baustelle bewiesen haben. Aufgrund der Erkenntnisse des Forschungsprojektes VSS2011/401 kann nicht ausgeschlossen werden, dass die gleiche Versuchsanordnung in einer anderen Jahreszeit bei sehr wahrscheinlich höheren Temperaturen bessere Resultate geliefert hätte.

## 6.6 Probenahme für die Laborversuche

Mitte Dezember 2016 wurde durch die Mitarbeiter des TBA die Probenahme der Materialien für die Laborversuche durchgeführt. Die Materialien wurden aus den einzelnen Versuchsfeldern entnommen und zuerst in Mulden gesammelt und aufbewahrt. Nach der Homogenisierung der Materialien wurden mittels Probeteilungen die Materialien in Kessel abgefüllt.

Im Januar 2017 erhielt die IMP die verschiedenen ungebundenen Gemische für die Laborversuche. Die Laborversuche waren unter den beiden Forschungsstellen wie folgt aufgeteilt:

**Tab. 9** Aufteilung der Laborversuche für die Eignungsprüfungen

Prüfung	Norm	Tiefbauamt Kt. Zürich	IMP Baustest AG
Bestimmung der Korngrössenverteilung	SN EN 933-1 [24]		x
Kornform – Plattigkeitskennzahl FI	SN EN 933-3 [25]		x
Anteil gebrochener Körner	SN EN 933-5 [26]		x
Klassifizierung der Bestandteile	SN EN 933-11 [27]		x
Widerstand gegen Zertrümmerung (Los Angeles-Versuch)	SN EN 1097-2 [28]	x	
Optimaler Wassergehalt und maximale Trockendichte	SN EN 13286-2 [29]	x	
CBR-Versuche (CBR1, CBR2, CBRF)	SN EN 13286-47 [30] VSS 70 321	x	

Die beiden Forschungsstellen führten anschliessend die verschiedenen Prüfungen durch:

- IMP Baustest AG: Januar – Februar 2017
- TBA Kanton Zürich: Mai 2017 – April 2018

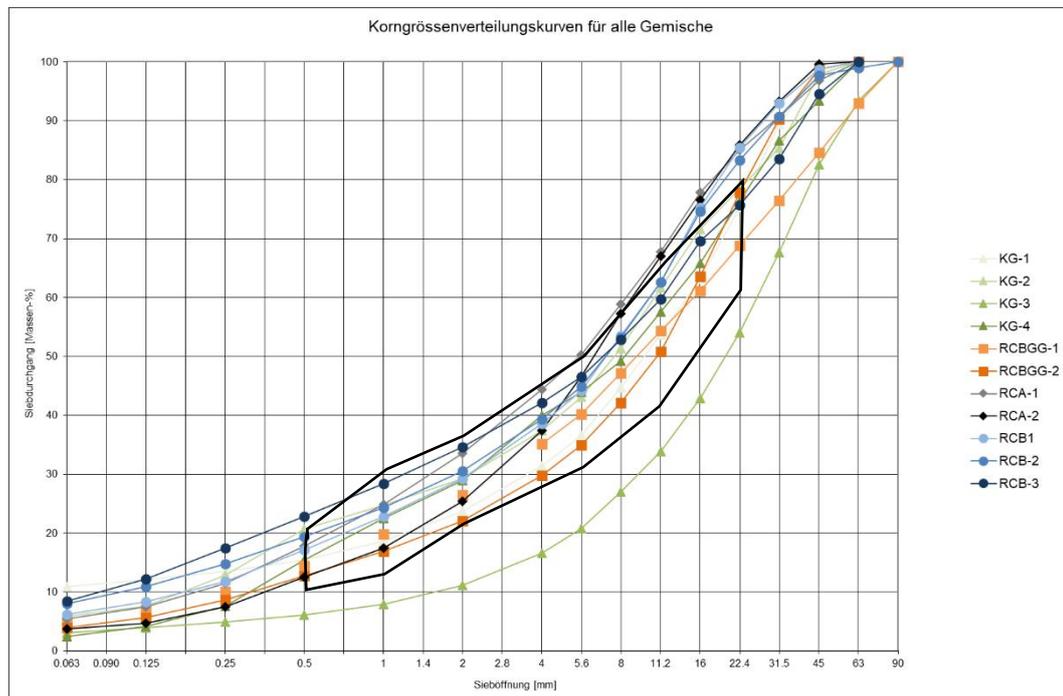
## 7 Laborversuche

### 7.1 Charakterisierung der ungebundenen Gemische

Die verschiedenen Gemische wurden im Labor mit den in der SN 670 119-NA geforderten Prüfungen einer Eignungsprüfung unterzogen. Die nachfolgenden Kapitel fassen jeweils die Resultate der einzelnen Prüfungen zusammen.

#### 7.1.1 Korngrössenverteilung

Alle Gemische wurden gemäss den Vorgaben der SN EN 933-1 geprüft. Die Kornverteilungskurven der Gemische sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



**Abb.6** Kornverteilungskurven aller Gemische. Die schwarze Umrandung stellt den S-Wert-Bereich der SN 670 119-NA dar.

Die Abbildung zeigt, dass die Gemische eine vergleichbare Korngrössenverteilung aufzeigen mit Ausnahme des Gemisches KG-3. Eine Wiederholung der Siebkurve dieses Gemisches 2020 ergab, dass sich auch dieses Gemisch im S-Wert-Bereich (schwarze Umrandung) befindet.

Die verschiedenen Kurven verlaufen grösstenteils im S-Wert-Bereich oder zumindest nahe am S-Wert-Bereich der SN 670 119-NA. Man darf bei der Beurteilung nicht vergessen, dass die Gemische aus einer eingebauten Schicht stammen und es somit nicht erstaunlich ist, wenn die Kurven nicht hundertprozentig den von den Produzenten deklarierten Kurven entsprechen. Die Probenahme und die anschliessenden Probeteilungen haben einen Einfluss auf den Verlauf der Korngrössenverteilungskurve.

#### 7.1.2 Klassifizierung der Bestandteile der RC-Gemische

Bei der Überprüfung der Zusammensetzung der Recycling-Gemische gemäss SN EN 933-11 fällt auf, dass die Zusammensetzung der RC-Kiesgemische A (Gemische RCA-1 und RCA-2) aus den Versuchsfeldern nicht den Anforderungen der SN 670 119-NA entspricht. Auch eine Wiederholung der Prüfung in der anderen Forschungsstelle ergab kein Gemisch,

das den Normanforderungen entspricht. In beiden Fällen war der Anteil an natürlicher Gesteinskörnung zu gering.

Die Prüfergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

**Tab. 10 Prüfergebnisse der Klassifizierung der Bestandteile der RC-Gemische gemäss SN EN 933-11; die roten Werte erfüllen die Anforderungen der SN 670 119 NA nicht.**

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Ra [%]	Grenzwert [%]	Rb [%]	Grenzwert [%]	Rc [%]	Grenzwert [%]	Ru [%]	Grenzwert [%]	Rg [%]	X [%]	FL [cm <sup>3</sup> ]	Anforderungen erfüllt?
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	0.1	≤ 4	0.0	≤ 2	88.9	≥ 30	11.0	≤ 70	0.0	0.0	0.0	ja
RCBGG-2	2	Regensdorf	0.0	≤ 4	0.0	≤ 2	72.2	≥ 30	27.8	≤ 70	0.0	0.0	0.0	ja
RCA-1	9	Oberglatt	34.4	≤ 30	0.3	≤ 1	13.5	≤ 4	51.8	≥ 70	0.0	0.0	0.0	nein
RCA-2	11	Untersiggenthal	24.1	≤ 30	0.0	≤ 1	11.7	≤ 4	64.2	≥ 70	0.0	0.0	0.0	nein
RCB-1	3	Rubigen	0.6	≤ 4	0.0	≤ 1	23.0	≤ 30	76.4	≥ 70	0.0	0.0	0.0	ja
RCB-2	4	Rümlang	0.0	≤ 4	0.0	≤ 1	7.2	≤ 30	92.8	≥ 70	0.0	0.0	0.0	ja
RCB-3	5	Mörel	0.5	≤ 4	0.0	≤ 1	14.5	≤ 30	85.0	≥ 70	0.0	0.0	0.0	ja

Es ist nicht erstaunlich, dass die Nichtkonformitäten (in der Tabelle rot markiert) von RC-Kiesgemischen A stammen. Diese Gemische gehören zu den Gemischen, deren Klassifizierung zu den schwierigsten zählt. Dieser Befund lässt darauf schliessen, dass der Einbau der Gemische und die nachfolgende Probenahme einen Einfluss auf das Resultat der Klassifizierung zu haben scheint. In den Unterlagen der Werke wurde ein der Norm entsprechendes Resultat der Klassifizierung nachgewiesen.

### 7.1.3 Kornform – Plattigkeitskennzahl FI

Die Prüfergebnisse der Bestimmung der Plattigkeitskennzahl gemäss SN EN 933-3 sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

**Tab. 11 Prüfergebnisse der Bestimmung der Plattigkeitskennzahl**

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Plattigkeitskennzahl FI				Gemisch	höchste Kategorie	Grenzwert
			Fraktion 4/8	Fraktion 8/16	Fraktion 16/32	Fraktion 32/max			
KG-1	6	Vorberg	17	13	9	6	8	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
KG-2	7	Wilchingen	14	13	15	9	12	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
KG-3	8	Monthey	30	30	25	21	24	Fl <sub>35</sub>	Fl <sub>35</sub>
KG-4	10	Cazis	16	20	25	23	24	Fl <sub>35</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCB-1	3	Rubigen	10	10	13	15	13	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCB-2	4	Rümlang	13	11	11	4	9	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCB-3	5	Mörel	14	20	17	20	18	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCA-1	9	Oberglatt	5	6	5	2	4	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCA-2	11	Untersiggenthal	9	8	9	5	8	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	9	7	8	5	7	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCBGG-2	2	Regensdorf	7	4	5	4	5	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>

Der Befund dieser Prüfung ist unauffällig. Alle Gemische erfüllen die Anforderung der SN 670 119-NA. Einzig die Kiesgemische aus den Alpen (KG-3 und KG-4) zeigen höhere FI-Kennwerte als die anderen Gemische. Das Gemisch KG-3 ist ein gebrochenes Gemisch, das Gemisch KG-4 ein rundes Gemisch. Im letzteren Fall erklärt dies den tiefen Wert mit Fl<sub>35</sub>, im ersteren Fall ist eher in Frage zu stellen, da gebrochene Gesteinskörnungen in der Regel durch tiefe FI-Werte charakterisiert sind.

### 7.1.4 Anteil gebrochener Körner

An die Resultate dieser Prüfung werden in der SN 670 119-NA keine Anforderungen gestellt. Diese Eigenschaften müssen geprüft und angegeben werden. Die Prüfergebnisse gemäss SN EN 933-5 finden sich in der nachstehenden Tabelle:

**Tab. 12** Resultate der Prüfung Anteil gebrochener Körner

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Anteil gebrochene Körner				Kategorie Gemisch
			Ctc [M-%]	Cc [M-%]	Ctr [M-%]	Cr [M-%]	
KG-1	6	Vorberg	77	100	0	0	C <sub>90/3</sub>
KG-2	7	Wilchingen	12	52	17	48	C <sub>50/30</sub>
KG-3	8	Monthey	86	100	0	0	C <sub>90/3</sub>
KG-4	10	Cazis	2	10	44	90	C <sub>NR/50</sub>
RCB-1	3	Rubigen	27	72	9	28	C <sub>50/10</sub>
RCB-2	4	Rümlang	26	67	14	23	C <sub>50/30</sub>
RCB-3	5	Mörel	71	95	1	5	C <sub>90/3</sub>
RCA-1	9	Oberglatt	27	46	34	54	C <sub>NR/50</sub>
RCA-2	11	Untersiggenthal	41	66	16	34	C <sub>50/30</sub>
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	79	90	4	10	C <sub>50/10</sub>
RCBGG-2	2	Regensdorf	57	72	16	32	C <sub>50/30</sub>

### 7.1.5 Widerstand gegen Zertrümmerung – Los Angeles-Versuch

Die Prüfergebnisse gemäss der SN EN 1097-2 der einzelnen Gemische sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt:

**Tab. 13** Resultate der Gemische im Los Angeles-Versuch

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Los Angeles-Versuch				Grenzwert
			Fraktion 4/8	Kategorie	Fraktion 11/16	Kategorie	
KG-1	6	Vorberg	26	LA <sub>30</sub>	27	LA <sub>30</sub>	LA <sub>40</sub>
KG-2	7	Wilchingen	23	LA <sub>25</sub>	20	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
KG-3	8	Monthey	20	LA <sub>20</sub>	18	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
KG-4	10	Cazis	26	LA <sub>30</sub>	14	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
RCB-1	3	Rubigen	24	LA <sub>25</sub>	21	LA <sub>25</sub>	LA <sub>40</sub>
RCB-2	4	Rümlang	23	LA <sub>25</sub>	21	LA <sub>25</sub>	LA <sub>40</sub>
RCB-3	5	Mörel	37	LA <sub>40</sub>	40	LA <sub>40</sub>	LA <sub>40</sub>
RCA-1	9	Oberglatt	19	LA <sub>20</sub>	18	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
RCA-2	11	Untersiggenthal	20	LA <sub>20</sub>	20	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	29	LA <sub>30</sub>	30	LA <sub>30</sub>	LA <sub>40</sub>
RC-BGG-2	2	Regensdorf	26	LA <sub>30</sub>	25	LA <sub>25</sub>	LA <sub>40</sub>

Beim Los Angeles-Versuch wird in der SN 670 119-NA für die beiden zu prüfenden Fraktionen 4/8 und 11/16 jeweils die Kategorie LA<sub>40</sub> gefordert. Alle Gemische erfüllen diese Anforderungen.

### 7.1.6 Optimaler Wassergehalt und maximale Trockendichte

Im ersten Teil der Laborversuche wurde ebenfalls der optimale Wassergehalt und die maximale Trockendichte gemäss SN EN 13286-2 bestimmt.

Das Labor des Tiefbauamtes des Kantons Zürich führte hierzu je eine Bestimmung mit 0.6 MJ/m<sup>3</sup> und 1.2 MJ/m<sup>3</sup> durch. Dabei ist die Verdichtungsenergie von 1.2 MJ/m<sup>3</sup> gemäss der SN 670 119-NA für den Versuch festgelegt. Das Labor TBA hat traditionell diese zwei Bestimmungen des optimalen Wassergehaltes und der maximalen Trockendichte durchgeführt. Der Grossteil der anderen Labore führt jeweils nur den Versuch mit der durch die Norm vorgegebenen Verdichtungsenergie durch.

In der nachstehenden Tabelle finden sich die Resultate der beiden Bestimmungen:

**Tab. 14** Resultate aus dem Proctor-Versuch

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Überkornanteil (> 16 mm) [M.-%]	Wassergehalt (> 16 mm) [M.-%]	Verdichtungsenergie [MJ/m <sup>3</sup> ]	opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Sättigungsgrad [%]	Verdichtungsenergie [MJ/m <sup>3</sup> ]	Wopt [%]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Sättigungsgrad [%]
KG-1	6	Vorberg	36.9	1.0	0.6	4.7	2.327	77.2	1.2	6.7	2.351	79.8
KG-2	7	Wilchingen	28.4	1.0	0.6	5.3	2.297	83.4	1.2	6.0	2.298	72.1
KG-3	8	Monthey	57.1	1.0	0.6	4.0	2.331	64.8	1.2	7.0	2.354	62.6
KG-4	10	Cazis	34.2	1.0	0.6	5.6	2.221	73.5	1.2	3.6	2.229	36.6
RCB-1	3	Rubigen	24.7	1.4	0.6	7.7	2.172	88.0	1.2	7.6	2.212	77.0
RCB-2	4	Rümlang	25.4	1.4	0.6	6.2	2.236	82.8	1.2	7.7	2.244	82.6
RCB-3	5	Mörel	30.4	1.2	0.6	7.2	2.183	83.6	1.2	8.2	2.222	77.6
RCA-1	9	Oberglatt	22.2	1.0	0.6	5.8	2.120	68.9	1.2	6.8	2.165	74.3
RCA-2	11	Untersiggenthal	23.5	1.0	0.6	6.4	2.111	69.2	1.2	7.9	2.147	74.5
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	38.9	1.8	0.6	9.3	2.065	88.9	1.2	14.0	2.114	84.9
RCBGG-2	2	Regensdorf	36.4	1.8	0.6	8.7	2.090	86.2	1.2	13.4	2.080	89.1

Ausser beim Gemisch RCBGG-2 ist der bestimmte optimale Wassergehalt bei der höheren Verdichtungsenergie von 1.2 MJ/m<sup>3</sup> tiefer und die Trockendichte dadurch höher als bei der tieferen Verdichtungsenergie von 0.6 MJ/m<sup>3</sup>. Dabei kann aber keine Korrelation festgestellt werden. Auch der Überkornanteil > 16 mm scheint dabei keinen signifikanten Einfluss zu haben.

### 7.1.7 CBR-Versuche

Mit den Werten aus den Proctor-Versuchen wurde anschliessend die erste Serie von CBR-Versuchen durchgeführt. Die SN EN 13286-47 und VSS 70 321 erlauben dabei, den Anfangswassergehalt um bis zu 0.5 M.-% zu variieren. Diese Möglichkeit wurde im Labor des Tiefbauamtes Zürich seit jeher benutzt, um die maximal möglichen CBR-Werte der Gemische zu erreichen (Auskunft G. Christen). Der Grossteil der anderen Labore verwendet in der Regel den optimalen Wassergehalt aus dem Proctor-Versuch als Anfangswassergehalt für die CBR-Versuche.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Resultate der CBR-Versuche an den Gemischen:

**Tab. 15** Resultate der ersten CBR-Versuchsserie ausgeführt durch das Labor TBA

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Überkornanteil (> 16 mm) [M.-%]	Wassergehalt (> 16 mm) [M.-%]	opt. Wassergehalt Proctor [%]	Wassergehalt Beginn CBR1	CBR1 [%]	Wassergehalt Beginn CBR2	CBR2 [%]	Wassergehalt Beginn CBRF	CBRF [%]	CBR2/CBR1	CBRF/CBR1
KG-1	6	Vorberg	36.9	1.0	6.7	6.3	120.8	5.8	103.5	5.7	124.7	0.9	1.0
KG-2	7	Wilchingen	28.4	1.0	6.0	6.2	179.5	5.8	210.3	6.0	174.7	1.2	1.0
KG-3	8	Monthey	57.1	1.0	7.0	6.0	80.0	7.3	76.4	6.7	60.7	1.0	0.8
KG-4	10	Cazis	34.2	1.0	3.6	3.6	109.4	3.8	68.2	4.0	53.9	0.6	0.5
RCB-1	3	Rubigen	24.7	1.4	7.6	7.8	192.5	8.3	232.4	8.1	169.5	1.2	0.9
RCB-2	4	Rümlang	25.4	1.4	7.7	7.4	111.1	7.7	146.7	7.9	106.9	1.3	1.0
RCB-3	5	Mörel	30.4	1.2	8.2	8.1	116.9	8.7	145.7	7.9	85.5	1.2	0.7
RCA-1	9	Oberglatt	22.2	1.0	6.8	6.9	63.1	6.8	74.8	7.0	55.0	1.2	0.9
RCA-2	11	Untersiggenthal	23.5	1.0	7.9	7.6	67.5	7.9	79.7	7.9	71.0	1.2	1.1
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	38.9	1.8	14.0	12.3	226.0	12.4	174.1	12.6	174.4	0.8	0.8
RCBGG-2	2	Regensdorf	36.4	1.8	13.4	12.7	83.8	12.7	110.2	12.5	105.8	1.3	1.3

Alle Gemische weisen ein CBR2/CBR1 oder CBRF/CBR1-Verhältnis auf, das grösser oder gleich 0.5 ist. Was auffällt ist, dass der Anfangswassergehalt für die CBR-Versuche in einigen Fällen vom durch den Proctor-Versuch bestimmten optimalen Wassergehalt abweicht. In anderen Fällen ist er identisch. Bei den Anfangswassergehalten beim CBRF-Versuch ist dies erklärbar, da während der Herstellung des Prüfkörpers gemäss Norm eine Probe entnommen werden muss, um diesen Wassergehalt zu bestimmen. Dieser Wassergehalt entspricht also dem tatsächlichen Wassergehalt. Der Wassergehalt bei den CBR1- und CBR2-Versuchen entspricht dagegen jeweils dem Wassergehalt der Konditionierung.

Im Weiteren fällt auf, dass das ehemalige Labor des Tiefbauamtes des Kantons Zürich in keinem Fall CBR-Werte kleiner als 55 CBR-% bestimmt hat. Diese Werte sind alle höher als der in der alten Kiessand-Norm geforderte Wert von minimal 40 CBR-%.

## 7.1.8 Zusammenfassung der Charakterisierung der ungebundenen Gemische

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die im Forschungsprojekt geprüften Gemische ausser in der Klassifizierung der Bestandteile der RC-Kiesgemische A den Anforderungen der SN 670 119-NA entsprechen.

Bedingt durch die Homogenität der geprüften ungebundenen Gemische besteht allerdings keine Möglichkeit, Aussagen über das Verhalten von Gemischen, welche der Norm nicht genügen, zu machen.

## 7.2 CBR-Versuche

### 7.2.1 Vergleichsversuche zwischen den Laboren

Der erste Schritt nach dem Wechsel der Projektleitung durch die IMP (Kapitel 3.1) bestand darin, die Ergebnisse des Labors TBA zu plausibilisieren, um die Homogenität der nachfolgenden Ergebnisse aus den CBR-Versuchen zu gewährleisten.

Für die Vergleichsmessungen wurde je ein ungebundenes Gemisch aus den vier verschiedenen Gemischarten ausgewählt. Dabei wurde mit den Standard-Arbeitsanweisungen der IMP zunächst der optimale Wassergehalt und die maximale Trockendichte bestimmt, gefolgt von den CBR-Versuchen (CBR1, CBR2 und CBRF) basierend auf dem vorher bestimmten optimalen Wassergehalt. Da die Forschungsstellen vorher kein aufeinander abgestimmtes Verfahren definiert hatten, wurde dabei davon ausgegangen, dass nach Normvorgaben geprüft wurde und zu prüfen ist.

Die Resultate der ersten Serie der Vergleichsmessungen waren ernüchternd. Bei den Tragfähigkeitswerten konnten durch IMP kaum Werte bestimmt werden, welche den Tragfähigkeitswerten des TBA entsprachen. Zwischen den CBR-Werten waren die Differenzen teilweise 80 Punkte oder mehr tiefer. Extremstes Beispiel ist Gemisch RCBGG-1, wo der Unterschied zwischen den Laboren 150 Punkte beträgt. Bei genauerer Betrachtung stellt man auch fest, dass die IMP durchwegs höher optimale Wassergehalte und tiefere maximale Trockendichten erreichte.

Die Prüfergebnisse der 1. Serie der Vergleichsmessungen finden sich in der nachstehenden Tabelle:

**Tab. 16** Prüfergebnisse der 1. Serie der Vergleichsmessungen zwischen den beiden Laboren

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Labor	opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Beginn CBR1 [M.-%]	CBR1 [%]	Wassergehalt Beginn CBR2 [M.-%]	CBR2 [%]	Wassergehalt Beginn CBRF [M.-%]	CBRF [%]
KG-2	7	Wilchingen	TBA	6.0	2.249	6.2	179.5	5.8	210.3	6.0	174.7
			IMP	6.8	2.214	6.8	92.5	6.8	95.3	6.7	76.3
RCB-2	4	Rümlang	TBA	7.7	2.184	7.4	111.1	7.7	146.7	7.9	106.9
			IMP	8.5	2.165	8.5	104.2	8.5	98.7	8.0	79.3
RCA-1	9	Oberglatt	TBA	6.8	2.121	6.9	63.1	6.8	74.8	7.0	55.0
			IMP	7.6	2.058	7.6	43.7	7.6	40.3	7.4	43.1
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	TBA	14.0	1.873	12.3	226.0	12.4	174.1	12.6	174.4
			IMP	14.4	1.820	14.4	76.0	14.4	104.8	13.9	105.3

In einem ersten Plausibilisierungsschritt wurden die Proctor-Versuche auf Seiten IMP nochmals überprüft und die Versuche mit weiteren Wassergehalten ergänzt. Das Ergebnis war, dass der optimale Wassergehalt durchaus nach oben oder nach unten korrigiert werden konnte. Dabei wurde aber nur eine Übereinstimmung mit den optimalen Wassergehalten des TBA gefunden. Bei den CBR-Werten konnten teilweise höhere Werte erzielt werden, aber eben nicht bei allen Prüfungen oder Gemischen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Resultate der 2. Serie der Vergleichsmessungen:

**Tab. 17** Prüfergebnisse der 2. Serie der Vergleichsmessungen zwischen den beiden Laboren

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Labor	opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Beginn CBR1 [M.-%]	CBR1 [%]	Wassergehalt Beginn CBR2 [M.-%]	CBR2 [%]	Wassergehalt Beginn CBRF [M.-%]	CBRF [%]
KG-2	7	Wilchingen	TBA	6.0	2.249	6.2	179.5	5.8	210.3	6.0	174.7
			IMP	6.8	2.214	6.8	92.5	6.8	95.3	6.7	76.3
			IMP2	7.0	2.226	7.0	50.6	7.00	117.9	6.7	91.8
RCB-2	4	Rümlang	TBA	7.7	2.184	7.4	111.1	7.7	146.7	7.9	106.9
			IMP	8.5	2.165	8.5	104.2	8.5	98.7	8.0	79.3
			IMP2	8.2	2.175	8.2	63.5	8.2	115.9	7.3	162.9
RCA-1	9	Oberglatt	TBA	6.8	2.121	6.9	63.1	6.8	74.8	7.0	55.0
			IMP	7.6	2.058	7.6	43.7	7.6	40.3	7.4	43.1
			IMP2	5.8	2.024	5.8	42.2	5.8	40.5	6.1	20.1
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	TBA	14.0	1.873	12.3	226.0	12.4	174.1	12.6	174.4
			IMP	14.4	1.820	14.4	76.0	14.4	104.8	13.9	105.3
			IMP2	12.6	1.806	12.6	113.7	12.6	154.5	11.6	84.8

Auffallend ist, dass obwohl sich die optimalen Wassergehalte teilweise um mehr als ein Massenprozent unterscheiden, dies auf der Ebene der CBR-Werte nicht unbedingt einen Einfluss zu haben scheint. Es stellt sich hier das erste Mal die Frage, wie sensibel der Proctor-Versuch tatsächlich ist.

Nach dieser 2. Serie von Vergleichsmessungen musste also unbedingt eruiert werden, warum die Resultate der beiden Labore so unterschiedliche Werte zeigen.

In der Diskussion stellte sich heraus, dass das TBA die RC-Gemische grundsätzlich zwischen 48 und 72 Stunden (in der Regel über das Wochenende) konditioniert. Das Labor IMP konditioniert die Proben hingegen gemäss Norm während 16 – 24 Stunden. Die Vermutung lag daher nahe, dass vor allem die Betongemische das Wasser während der längeren Konditionierungsdauer besser oder anders in ihre Struktur einbauen. Es ist naheliegend, dass RC-Betongemische mit unterschiedlichem Wassergehalt auch unterschiedliche CBR-Werte aufweisen.

Diese Hypothese wurde dann an einem Betongemisch getestet, indem die Konditionierungszeit auf 72 Stunden erhöht wurde. Bei der Auswertung des Proctor-Versuches wurde dann festgestellt, dass die maximale Trockendichte tatsächlich höher ist.

Aufgrund dieses Befundes wurde zusammen mit der Begleitkommission entschieden, dass die CBR-Versuche des TBA damit validiert sind und dass die IMP alle Beton-Gemische im Projekt 72 Stunden konditioniert, damit die Resultate vergleichbar sind.

## 7.2.2 Herstellung der ungebundenen Gemische mit unterschiedlichen Feinanteilen

Bei der Projektdefinition ging man davon aus, dass die Gemische mit den unterschiedlichen Feinanteile durch die Kieswerke und Steinbrüche hergestellt werden würden.

Nach Beginn des Projektes und den ersten Abklärungen war klar, dass diese Absicht nicht umgesetzt werden könnte, die im Projekt benötigten Mengen waren zu gering, resp. die Kosten für die Werke und die Forschungsstellen zu hoch. Daher wurde beschlossen, dass die Herstellung der Gemische durch die Forschungsstellen abgedeckt werden musste.

Nachdem die Vergleichsmessungen durchgeführt waren, wurde mit der Begleitkommission entschieden, dass ausgehend vom Feinanteil ab Werk jeweils ein Gemisch jedes Produzenten hergestellt werden soll, das 2 M.-% mehr Feinanteil (Feinanteil hoch) und 2 M.-% weniger Feinanteil (Feinanteil tief) aufweisen sollte.

In einem ersten Schritt wurden dann die Mengen ausgerechnet, welche den einzelnen Gemischen entzogen oder zugesetzt werden mussten, um diese Vorgaben zu erreichen.

In einem zweiten Schritt sollten dann die Gemische mit dem Feinanteil tief, in einem dritten Schritt die Gemische mit dem Feinanteil hoch im Labor hergestellt werden. Danach konnten die weiteren Proctor- und CBR-Versuchsreihen durchgeführt werden.

### 7.2.3 Feinanteil tief

Bei der Herstellung der Gemische mit dem tiefen Feinanteil wurde dann schnell festgestellt, dass die angestrebte Menge Feinanteil aus den ungebundenen Gemischen mit Betongranulat (RC-Betongranulatgemisch und RC-Kiesgemisch B) nicht erreicht werden konnte, da aus den Gemischen zu wenig Feinanteile abgesiebt werden konnten. Bei den restlichen Gemischen (natürliche Kiesgemische und RC-Kiesgemische A) zeigte sich dieses Phänomen nicht.

Zum Zeitpunkt der Herstellung der Gemische mit unterschiedlichem Feinanteil im Sommer 2020 befanden sich alle Materialien schon fast 3 Jahre in Probekesseln. Das Material war dabei erdfeucht. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Gemische mit Beton in dieser Zeit teilweise wieder rückverfestigt haben, anders kann man sich dieses Verhalten nicht erklären.

Aus Sicht der Forschungsstelle überlegte man sich, wie man diesem Problem begegnen könnte, da man aus 100 kg Gemisch den Feinanteil gewinnen wollte, um diesen zu verwerfen und einen geringeren Anteil an Feinanteil im Gemisch zu erreichen.

Auf der Siebmaschine (2 x 1 m) der IMP wurden nun Versuche gefahren, um mehr Feinanteil zu generieren. Dabei wurden vier Probeneimer auf das Siebdeck gelegt und deren Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Danach wurde die Siebmaschine in Gang gesetzt und das Material in den Probekesseln durchgeschüttelt. Schnell stellte man fest, dass auch die Deckel der Eimer fest mit Klebband verschlossen werden musste, damit die Bewegung der Gesteinskörnung weiter eingeschränkt und die Staubentwicklung verhindert werden konnte. Das nachstehende Foto gibt einen Eindruck dieses Arbeitsschrittes:



**Abb.7** Probekessel auf dem Siebdeck, um Feinanteil in Beton-Gemischen zu generieren

Nachdem die Proben jeweils rund 3 Stunden durchgeschüttelt worden waren, konnten in der nachfolgenden Siebung tatsächlich wieder mehr Feinanteil erzielt werden und die gewünschten Mengen konnten mehr oder weniger erreicht werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Feinanteile der einzelnen Gemische für die Proctor- und CBR-Versuche mit dem Feinanteil tief:

**Tab. 18** Feinanteile der einzelnen Gemische für die Versuche mit Feinanteil tief

Art des Gemisches	RCBGG-1	RCBGG-2	RCB-1	RCB-2	RCB-3	KG-1	KG-2	KG-3	RCA-1	KG-2	RCA-2
Versuchsfeld	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Produzent	Littau-Emmen	Regensdorf	Rubigen	Rümlang	Mörel	Vorberg	Wilchingen	Monthey	Oberglatt	Cazis	Untersiggenthal
<b>Faktor Feinanteil</b>											
Feinanteil (< 0.063 mm) geprüft im Gemisch 0/45	5.0	3.9	6.2	8.0	8.4	10.9	5.9	3.1	5.5	2.4	3.7
Durchgang 16 mm-Sieb im Gemisch 0/45	61.1	63.6	75.3	74.6	69.6	63.1	71.6	42.9	77.8	65.8	76.5
Überkomanteil > 16 mm im Gemisch 0/45	38.9	36.4	24.7	25.4	30.4	36.9	28.4	57.1	22.2	34.2	23.5
entspricht Feinanteil < 0.063 mm im fraktionierten Gemisch 0/16	8.2	6.1	8.2	10.7	12.1	17.3	8.2	7.2	7.1	3.6	4.8
Faktor Feinanteil vom Gemisch 0/45 zum Gemisch 0/16	1.64	1.57	1.33	1.34	1.44	1.58	1.40	2.33	1.29	1.52	1.31
<b>Ziel Feinanteil</b>											
Feinanteil geprüft im Gemisch 0/45	5.0	3.9	6.2	8.0	8.4	10.9	5.9	3.1	5.5	2.4	3.7
Ziel Feinanteil tief im Gemisch 0/45	3.0	1.9	4.2	6.0	6.4	8.9	3.9	1.1	3.5	0.4	1.7
Ziel Feinanteil tief im Gemisch 0/16	4.9	3.0	5.6	8.0	9.2	14.1	5.4	2.6	4.5	0.6	2.2
Ziel Feinanteil hoch im Gemisch 0/45	7.0	5.9	8.2	10.0	10.4	12.9	7.9	5.1	7.5	4.4	5.7
Ziel Feinanteil hoch im Gemisch 0/16	11.5	9.3	10.9	13.4	14.9	20.4	11.0	11.9	9.6	6.7	7.5
<b>Massen Feinanteil</b>											
Masse Gemisch 0/16 für die Herstellung [kg]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.7	124.1	123.7	112.5	124.9	100.8
Feinanteil im 0/16 ab Werk [kg]	8.2	6.1	8.2	10.7	12.1	17.4	10.2	8.9	8.0	4.6	4.9
Feinanteil im 0/16 tief [kg] - Zielwert	4.9	3.0	5.6	8.0	9.2	14.2	6.8	3.2	5.1	0.8	2.2
aus dem Gemisch zu entfernender Feinanteil [kg]	3.3	3.1	2.7	2.7	2.9	3.2	3.5	5.8	2.9	3.8	2.6
Total entfernter Feinanteil in Charge 100 kg [kg]	1.9	3.8	2.6	3.1	3.2	3.3	3.0	4.9	3.5	2.9	2.2
Differenz zu Zielwert [kg]	-1.4	0.6	-0.1	0.4	0.3	0.1	-0.4	-0.8	0.6	-0.9	-0.5
neue Probenmenge [kg]	98.1	96.2	91.2	96.9	96.8	97.4	121.0	118.8	90.0	122.0	98.6
Feinanteil in der neuen Masse [M.-%]	6.4	2.4	6.2	7.9	9.2	14.5	5.9	3.4	4.9	1.4	2.7
Differenz zu Zielwert [M.-%]	1.5	-0.5	0.6	-0.2	0.0	0.4	0.5	0.8	0.4	0.8	0.5
entspricht Feinanteil im Gemisch 0/45 [M.-%]	3.9	1.6	4.7	5.9	6.4	9.2	4.3	1.4	3.8	0.9	2.1
Differenz Zielwert zu Feinanteil effektiv	0.9	-0.3	0.5	-0.1	0.0	0.3	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4

#### 7.2.4 Feinanteil hoch

Bei der Herstellung der Gemische mit dem hohen Feinanteil stellte sich ein anderes Problem. Für die Gewinnung des zusätzlichen Feinanteil war geplant zuerst eine Menge Material nehmen und den Feinanteil trocken heraussieben. Dieses Vorgehen stellte sich zu aufwändig heraus. Die automatische Siebmaschine mit den 300 mm-Sieben erlaubte es nicht, grosse Mengen herzustellen.

Darum entschied man sich, den Feinanteil herauszuwaschen. Dies hatte allerdings den Nachteil, dass dabei sehr viel Wasser anfiel, welches in einem nächsten Schritt zu entfernen galt. Nach dem Waschen hat man für jedes Gemisch zwischen 6 und 8 Probekessel mit Feinanteil und Wasser. Während der folgenden Tage setzte sich der Feinanteil im Eimer ab. Als das Wasser klar war, schöpfte man das klare Wasser ab, bis man den grössten Teil des Wassers entfernt hatte. Die verbleibende Probe (Wasser und Feinanteil) trocknete man dann in den Trockenöfen, bis man nur noch den Feinanteil vorliegen hatte. Die nachfolgenden Bilder illustrieren dieses Vorgehen:



**Abb.8** links: Wasser mit Feinanteil unmittelbar nach dem Waschen – rechts: Eimer mit Wasser und abgesetztem Feinanteil, noch immer trüb



**Abb.9** links: Abschöpfen des Wassers, Feinanteil befindet sich am Boden des Eimers – rechts: das verbleibende Wasser wird mit dem Feinanteil auf einem Probeblech im Trockenofen getrocknet



**Abb.10** links: Verkleinern des getrockneten Anteils im Mörser – rechts: fertig gemahlener Feinanteil bereit für die Zumischung zum Gemisch.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Feinanteile der einzelnen Gemische für die Proctor- und CBR-Versuche mit dem Feinanteil hoch:

**Tab. 19** Feinanteile der einzelnen Gemische für die Versuche mit Feinanteil hoch

Art des Gemisches	RCBGG-1	RCBGG-2	RCB-1	RCB-2	RCB-3	KG-1	KG-2	KG-3	RCA-1	KG-2	RCA-2
Versuchsfeld	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Herkunft	Littau-Emmen	Regensdorf	Rubigen	Rümlang	Mörel	Vorberg	Wilchingen	Monthey	Oberglatt	Cazis	Untersiggenthal
<b>Faktor Feinanteil</b>											
Feinanteil (< 0.063 mm) geprüft im Gemisch 0/45	5.0	3.9	6.2	8.0	8.4	10.9	5.9	3.1	5.5	2.4	3.7
Durchgang 16 mm-Sieb im Gemisch 0/45	61.1	63.6	75.3	74.6	69.6	63.1	71.6	42.9	77.8	65.8	76.5
Überkomanteil > 16 mm im Gemisch 0/45	38.9	36.4	24.7	25.4	30.4	36.9	28.4	57.1	22.2	34.2	23.5
entspricht Feinanteil < 0.063 mm im fraktionierten Gemisch 0/16	8.2	6.1	8.2	10.7	12.1	17.3	8.2	7.2	7.1	3.6	4.8
Faktor Feinanteil vom Gemisch 0/45 zum Gemisch 0/16	1.6	1.6	1.3	1.3	1.4	1.6	1.4	2.3	1.3	1.5	1.3
<b>Ziel Feinanteil</b>											
Feinanteil geprüft im Gemisch 0/45	5.0	3.9	6.2	8.0	8.4	10.9	5.9	3.1	5.5	2.4	3.7
Ziel Feinanteil tief im Gemisch 0/45	3.0	1.9	4.2	6.0	6.4	8.9	3.9	1.1	3.5	0.4	1.7
Ziel Feinanteil tief im Gemisch 0/16	4.9	3.0	5.6	8.0	9.2	14.1	5.4	2.6	4.5	0.6	2.2
Ziel Feinanteil hoch im Gemisch 0/45	7.0	5.9	8.2	10.0	10.4	12.9	7.9	5.1	7.5	4.4	5.7
Ziel Feinanteil hoch im Gemisch 0/16	11.5	9.3	10.9	13.4	14.9	20.4	11.0	11.9	9.6	6.7	7.5
<b>Massen Feinanteil</b>											
Grundmasse 0/16 für die Zudosierung [kg]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Feinanteil im 0/16 ab Werk [kg]	8.2	6.1	8.2	10.7	12.1	17.3	8.2	7.2	7.1	3.6	4.8
Feinanteil im 0/16 hoch [kg] - Zielwert	11.5	9.3	10.9	13.4	14.9	20.4	11.0	11.9	9.6	6.7	7.5
zu gewinnender Feinanteil [kg] - Zielwert	3.3	3.1	2.7	2.7	2.9	3.2	2.8	4.7	2.6	3.0	2.6
Total Feinanteil aus Teilmasse gewonnen [kg]	3.1	2.4	2.3	2.9	2.8	3.5	2.9	4.3	2.3	2.8	2.5
Differenz zu Zielwert [kg]	-0.2	-0.7	-0.4	0.2	-0.1	0.3	0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
neue Probenmenge [kg]	103.1	102.4	102.3	102.9	102.8	103.5	102.9	104.3	102.3	102.8	102.5
Feinanteil total im 0/16 [kg]	11.3	8.6	10.5	13.6	14.9	20.7	11.2	11.5	9.4	6.5	7.4
Feinanteil in der neuen Masse [M.-%]	11.6	8.8	10.7	14.0	15.3	21.5	11.5	12.0	9.6	6.7	7.6
Differenz zu Zielwert [M.-%]	-0.2	0.5	0.1	-0.6	-0.3	-1.0	-0.5	-0.2	0.1	0.0	-0.1
entspricht Feinanteil im Gemisch 0/45 [M.-%]	7.1	5.6	8.1	10.5	10.6	13.5	8.2	5.2	7.5	4.4	5.8
Differenz Zielwert zu Feinanteil effektiv	0.1	-0.3	-0.1	0.5	0.2	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1

In der nachstehenden Tabelle sind die Feinanteile der verschiedenen Gemische für die Proctor- und CBR-Versuche nochmals zusammengefasst:

**Tab. 20** Zusammenstellung der Feinanteile der verschiedenen Gemische

Gemisch	Versuchsfeld	Produzent	Feinanteil tief	Feinanteil ab Werk	Feinanteil hoch		
KG-1	6	Vorberg	8.9	10.9	13.5		
KG-2	7	Wilchingen	4.3	5.9	8.2		
KG-3	8	Monthey	1.4	3.1	5.2	<b>Legende</b>	
KG-4	10	Cazis	0.9	2.4	4.4	0 - 3	niedrig
RCB-1	3	Rubigen	4.7	6.2	8.1	3 - 6	normal
RCB-2	4	Rümlang	5.9	8.3	10.5	6 - 9	hoch
RCB-3	5	Mörel	6.4	8.4	10.6	9 - 12	sehr hoch
RCA-1	9	Oberglatt	3.8	5.5	7.5	> 12	
RCA-2	11	Untersiggenthal	2.1	3.7	5.8		
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	3.9	5.0	7.1		
RCBGG-2	2	Regensdorf	1.6	3.9	5.6		

Nachdem die Gemische mit den tieferen und höheren Feinanteilen erstellt waren, konnten mit diesen Gemischen die entsprechenden Proctor- und CBR-Versuche (CBR1, CBR2, CBRF) gestartet werden.

### 7.2.5 Proctor- und CBR-Versuche mit Feinanteil tief und Feinanteil hoch

Die RC-Betongranulatgemische und die RC-Kiesgemische B wurden entsprechend den Erfahrungen aus den Vergleichsversuchen mit dem entsprechenden Anteil an Wasser angesetzt, 72 Stunden konditioniert und vor den Versuchen wieder aufgemischt und homogenisiert.

Die natürlichen Kiesgemische und die RC-Kiesgemische A wurden 24 Stunden konditioniert und vor den Versuchen wieder aufgemischt und homogenisiert.

Bei der Durchführung dieser Versuche wurden keine weiteren Schwierigkeiten festgestellt. Beim Proctor-Versuch wurde darauf geachtet, dass der Sättigungsgrad im Bereich 80 – 90 % lag, um sicherzustellen, dass der optimale Wassergehalt und die maximale Trockendichte korrekt bestimmt waren. Dies bedeutete, dass in einigen Fällen, die von der SN EN 13286-2 vorgeschriebenen 5 Versuche nicht genügten, um den optimalen Wassergehalt zu bestimmen (siehe auch Anhang III).

## 8 Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche

Nach Abschluss der Proctor- und CBR-Versuche stehen 33 Versuchsreihen für die Auswertung zur Verfügung. Jedes der 11 ungebundenen Gemische wurde mit dem Feinanteil ab Werk, einem tieferen Feinanteil (Feinanteil Werk - ca. 2 M.-%, Bezeichnung «Feinanteil tief») und einem höheren Feinanteil (Feinanteil Werk + ca. 2 M.-%, Bezeichnung «Feinanteil hoch») geprüft.

Die vollständigen Resultate der Proctor- und CBR-Versuche finden sich in den Tabellen im Anhang III. In der Tabelle der Prüfergebnisse des Proctorversuches finden sich alle Prüfergebnisse der einzelnen Versuche. In der Tabelle der Prüfergebnisse der CBR-Versuche finden sich neben CBR-Werten, den CBR-Verhältnissen, die Anfangs- und Endwassergehalte auch die Daten für die Frost- und Resthebung.

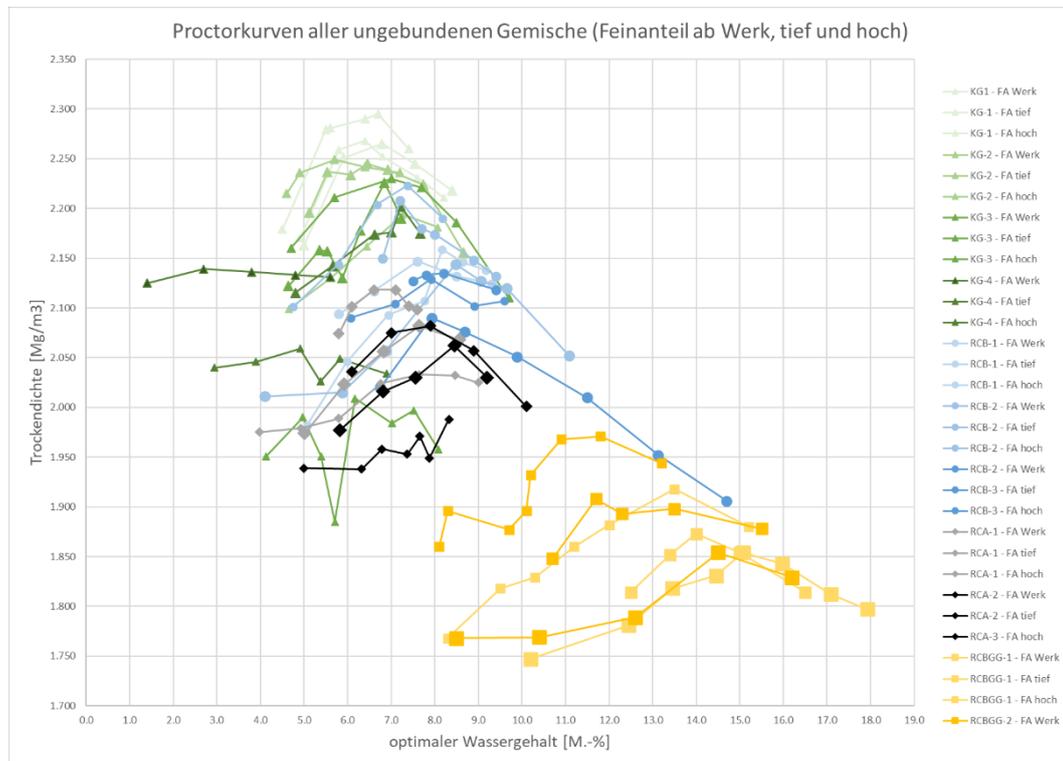
Die Diskussion der Resultate dieser Versuche erfolgt im Kapitel 9.



## 9 Diskussion der Resultate der CBR-Versuche

### 9.1 Auswertung der Proctor-Versuche

Die nachstehende Graphik zeigt die Proctor-Kurven der untersuchten Gemische. Die vollständigen Daten finden sich in der Tabelle im Anhang III.



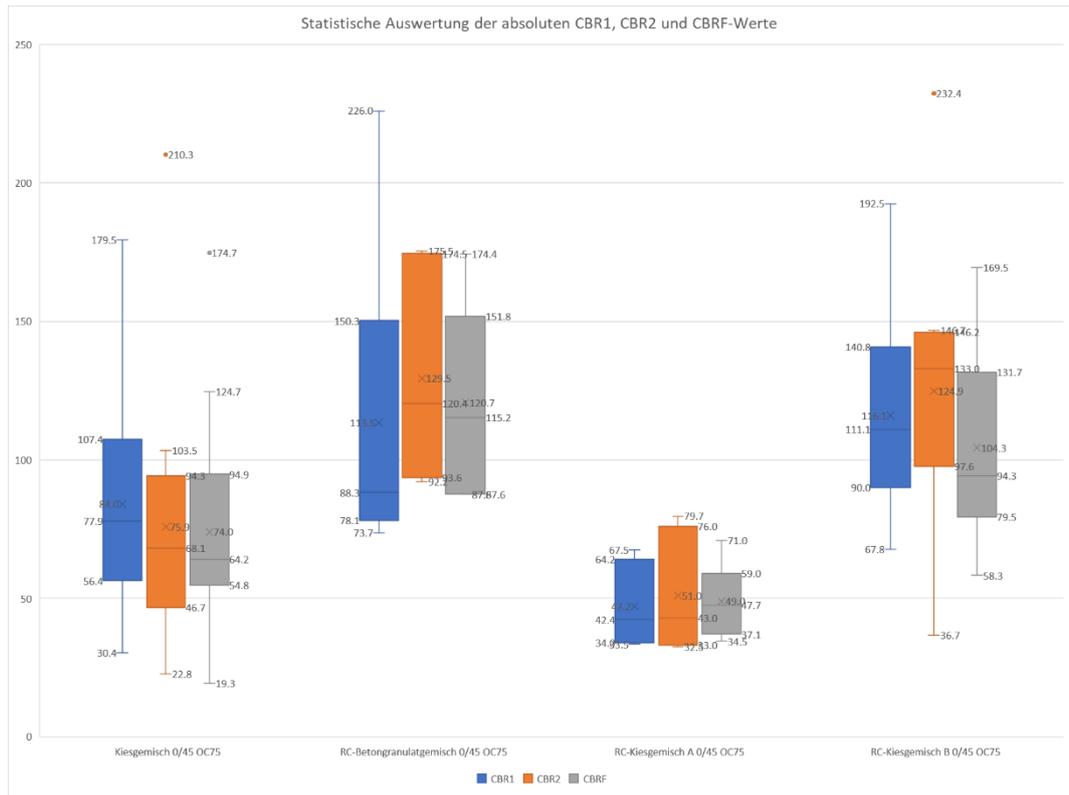
**Abb.11** Proctor-Kurven aller untersuchten Gemische (Verdichtungsenergie  $1.2 \text{ MJ/m}^3$ ). Die verschiedenen Gemischarten sind in gleichen Farbtönen dargestellt, je höher der Feinanteil einer Gemischart, umso grösser ist die Markierung.

Da die RC-Betongranulatgemische generell höhere optimale Wassergehalte zeigen als die anderen untersuchten Gemische, setzen sich diese optisch ein wenig auf dem Diagramm von den anderen Gemischen ab. Die Proctorkurven der Gemische mit natürlicher Gesteinskörnung (Kiesgemische, RC-A und RC-B) sind durchmischer und können nicht generell aufgrund des optimalen Wassergehaltes oder der Trockendichte differenziert werden, wobei die RC-Kiesgemische A tendenziell die tiefsten Trockendichte dieser drei Gemischarten zeigen.

### 9.2 Auswertung der CBR-Versuche

#### 9.2.1 Statistik der absoluten Werte aus den CBR-Versuchen

Die statistische Auswertung der absoluten CBR-Versuche (CBR1, CBR2 und CBRF) aus den 33 Versuchsreihen ergibt das folgende Bild:

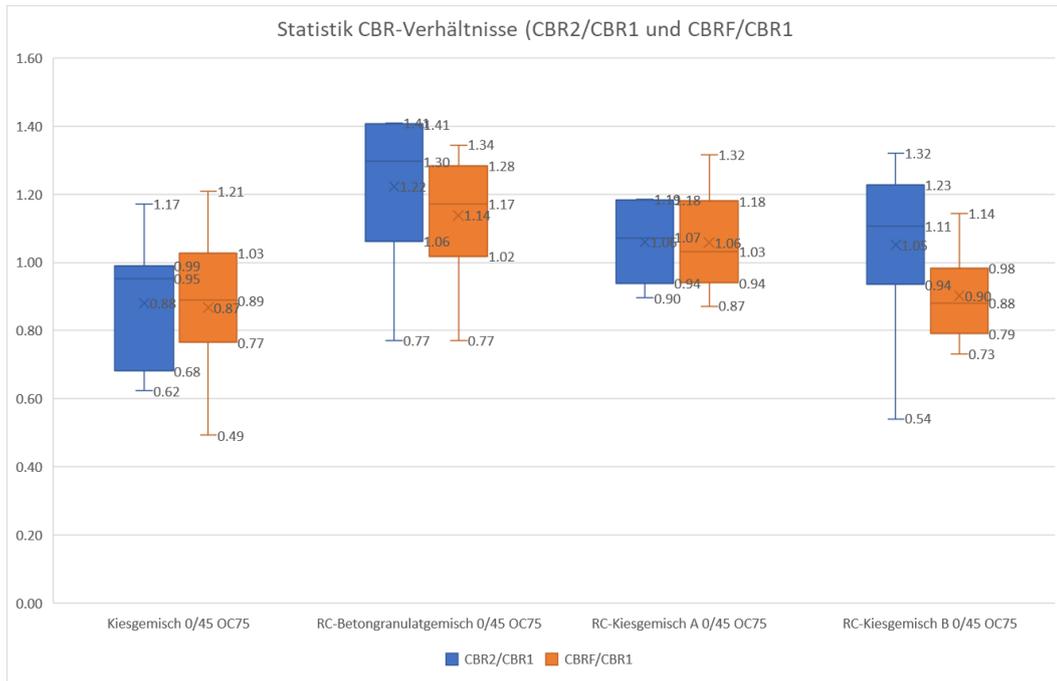


**Abb.12** statistische Auswertung der absoluten Werte aus den CBR1-, CBR2- und CBRF-Versuchen (Minimum, Maximum, Mittelwert (x), Median (horizontale Linie im farbigen Bereich) und Standardabweichung (farbiger Bereich)).

Es ist auffallend, dass ausser beim RC-Kiesgemisch A der Wertebereich der absoluten CBR-Werte (1,2 und F) der verschiedenen ungebundenen Gemische relativ gross ist (z.B. Kiesgemische: 155 bis 188 Punkte). Die Bereiche der Standardabweichung der RC-Betongranulatgemische und der RC-Kiesgemische B liegen dabei im gleichen Bereich, während der Bereich der Standardabweichung der RC-Kiesgemische A deutlich darunter liegt. Insgesamt überlappen sich die Wertebereiche der verschiedenen ungebundenen Gemische, keines der Gemische zeigt ein wirklich diskretes Verhalten.

## 9.2.2 Statistik der Verhältnisse CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1

Die statistische Auswertung der CBR-Verhältnisse ergibt folgendes Bild:



**Abb.13** statistische Auswertung der CBR-Verhältnisse CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1 (Minimum (Wert), Maximum (Wert), Mittelwert (Wert) und Standardabweichung (farbiger Bereich))

Bei den Verhältniszahlen CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1 ergibt sich logischerweise ein ähnliches Bild. Die verschiedenen Streubereiche überlappen sich, wiederum scheint einzig das RC-Kiesgemisch A am besten definiert zu sein.

Die Streubreite beim Verhältnis CBR2/CBR1 ist mit Werten zwischen 0.54 und 1.41 sehr gross. Die Streubreite des Verhältnisses CBRF/CBR1 ist mit Werten zwischen 0.49 und 1.34 praktisch gleich gross.

## 9.3 Einfluss des Feinanteils

Die Motivation für dieses Forschungsprojekt war unter anderem die Analyse des Feinanteils der verschiedenen Gemische auf die CBR-Werte.

### 9.3.1 Variation des Feinanteiles und absolute CBR-Werte

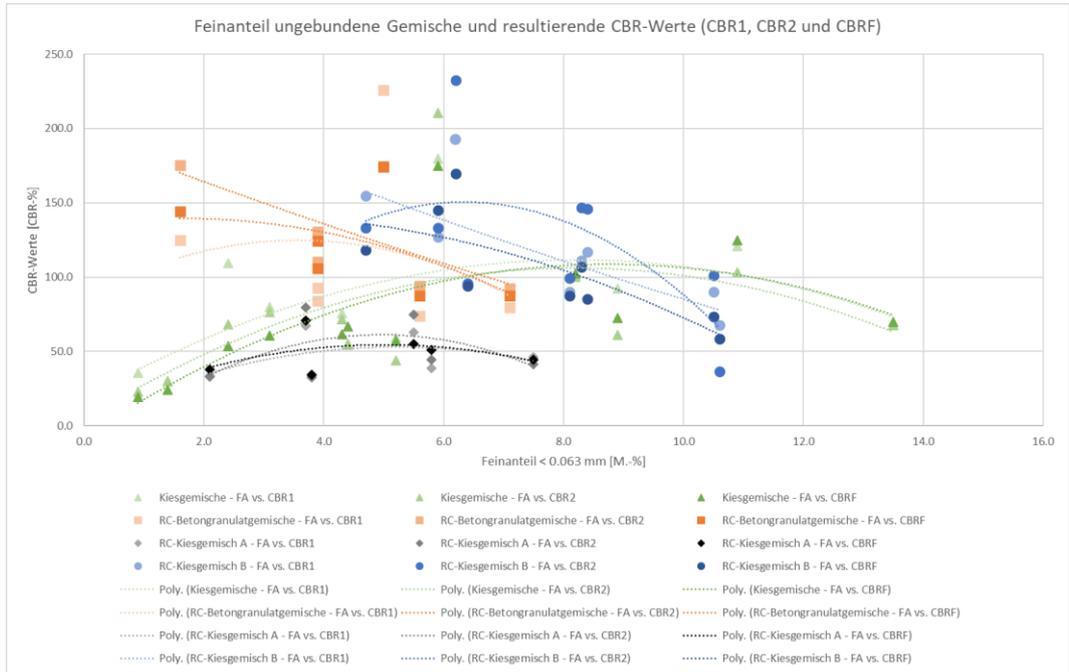
Für einen bestimmten Feinanteil in einem ungebundenen Gemisch geht man beim optimalen Wassergehalt von folgender Abstufung der CBR-Werte aus:

$$\text{Wert CBR1} > \text{Wert CBR2} > \text{Wert CBRF}$$

Das heisst, der CBR-Wert verschlechtert sich bei Wasserlagerung und noch einmal mehr im Fall von Frost. Mit einem höheren Feinanteil im ungebundenen Gemisch wird zudem erwartet, dass sich damit auch die verschiedenen CBR-Werte verschlechtern. Das ist der Grund für die Obergrenze, ab welcher die Frostbeständigkeit nachgewiesen werden muss (3 M.-% gemäss SN 670 119-NA).

In der nachfolgenden Graphik sind die CBR-Werte in Abhängigkeit des Feinanteils dargestellt. Die verschiedenen ungebundenen Gemische sind farblich unterschieden, dabei erhält das Wertepaar Feinanteil/CBR1 jeweils den hellsten Farbton, das Wertepaar

Feinanteil/CBRF den dunkelsten Farbton. Um die Trends der Wertepaare abzubilden, wurde eine polynomische Interpolation 2. Grades gewählt. Auch diese Kurven sind entsprechend farblich abgestuft.

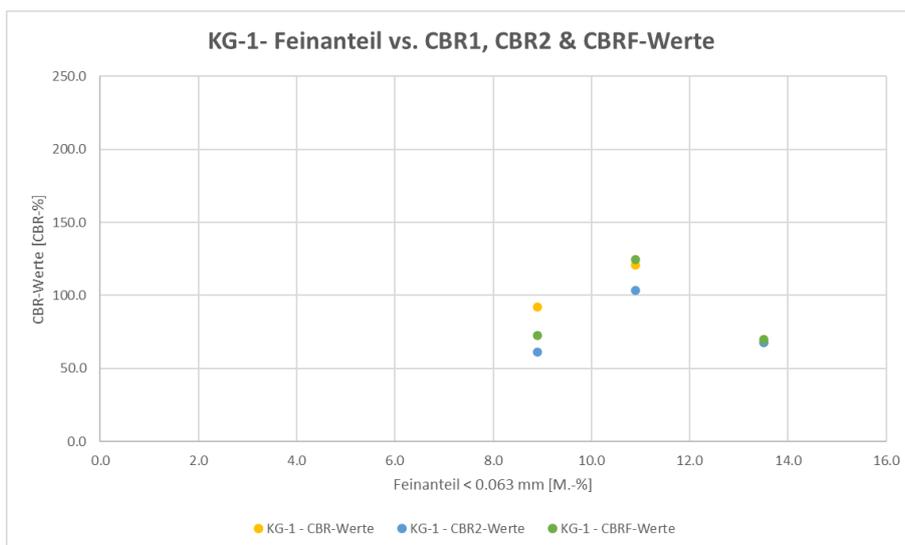


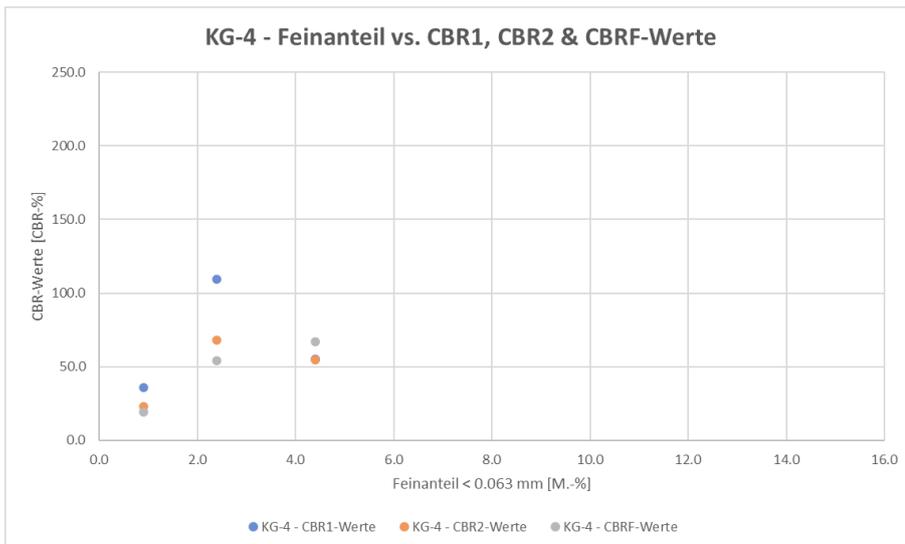
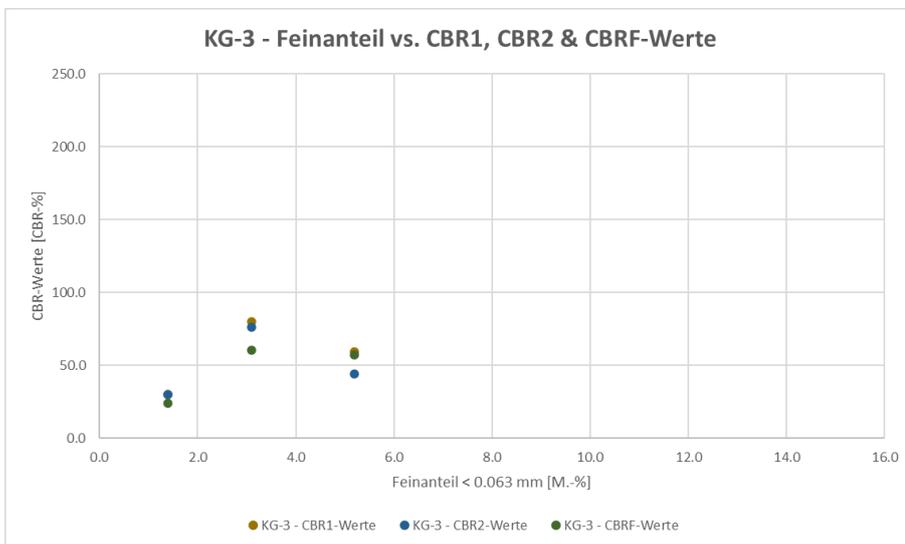
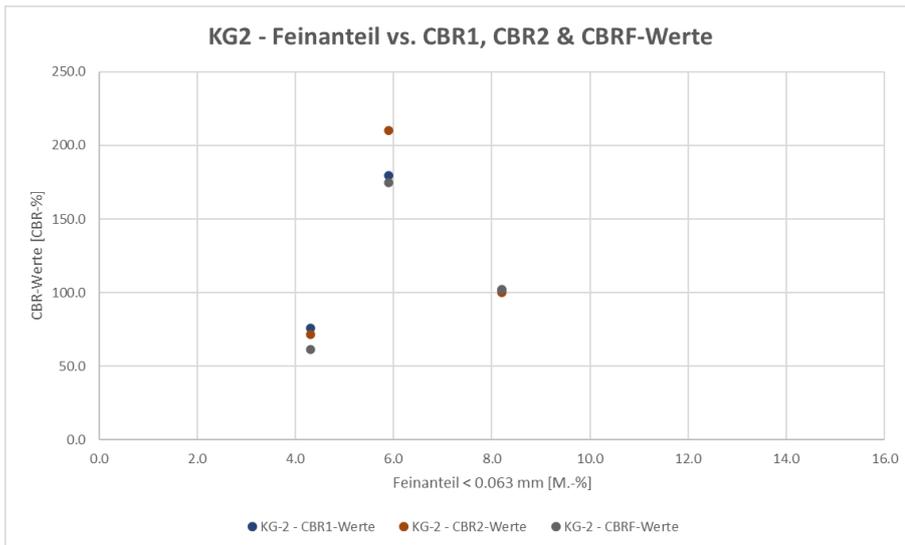
**Abb.14:** CBR-Werte in Abhängigkeit des Feinanteils im geprüften Gemisch.

Die Trendlinien zeigen nun, dass in der Regel die CBR2-Werte jeweils höher sind als die CBR1-Werte und beide höher als die CBRF-Werte sind. Diese Systematik ist aber für die RC-Betongranulatgemische und die RC-Kiesgemische B wiederum nur teilweise gültig.

Die Zusammenhänge bei den einzelnen Gemischen können aus den Einzeldiagrammen (siehe nachstehende Abbildungen) besser entnommen werden.

Bei den natürlichen Kiesgemischen stellen sich die Resultate wie folgt dar:



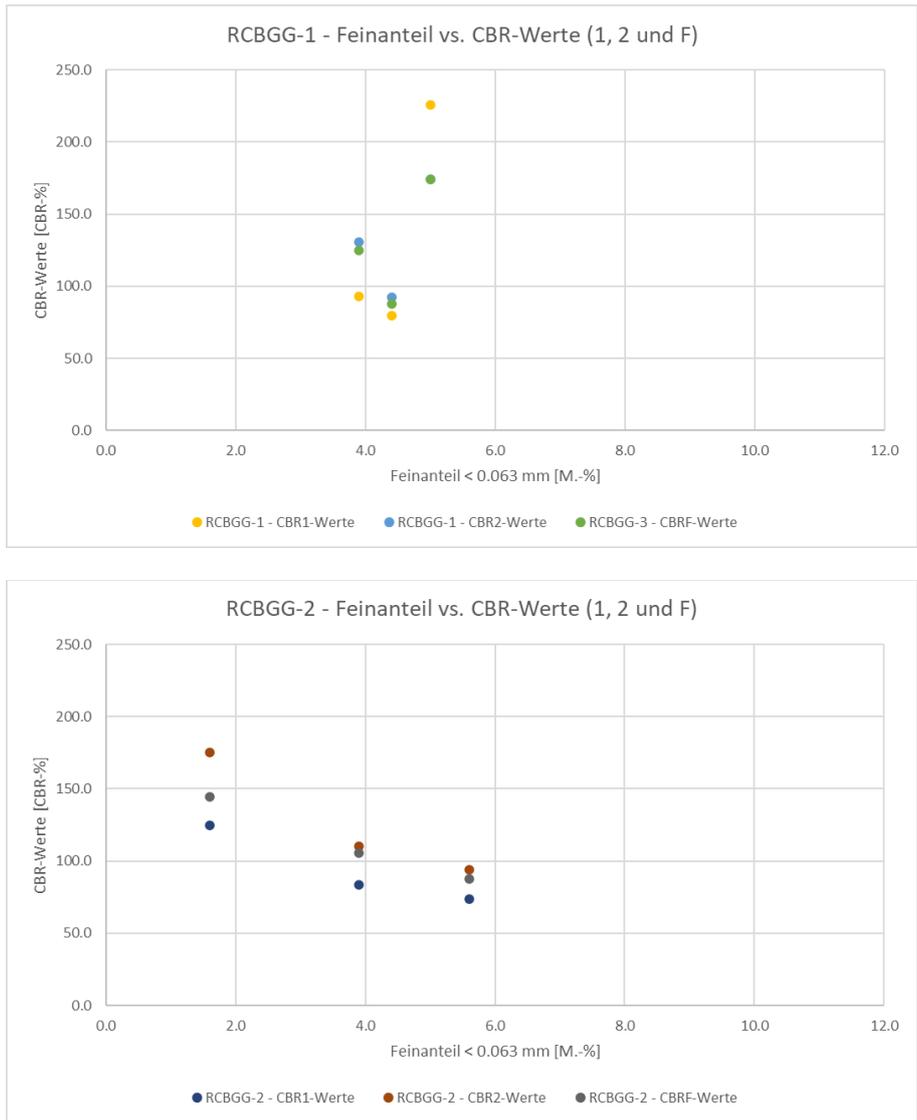


**Abb. 15** Entwicklung der CBR1-, CBR2- und CBRF-Werte in Bezug auf den Feinanteil bei Kiesgemischen

Mit den Feinanteilen ab Werk, werden in der Regel auch die höchsten CBR-Werte (1, 2 und F) erzielt. Tiefere Feinanteile senken die entsprechenden CBR-Werte (1, 2 und F) relativ zu den Feinanteilen ab Werk. Die Gemische mit dem Feinanteil hoch zeigen auch tiefere CBR-Werte als die Gemische mit den Feinanteilen ab Werk.

Was auffällt ist, dass die CBR-Werte der einzelnen Gemische nicht immer der Theorie gehorchen. Es gibt Gemische, bei denen bei einem bestimmten Feinanteil z.B. der CBRF-Werte am höchsten ist.

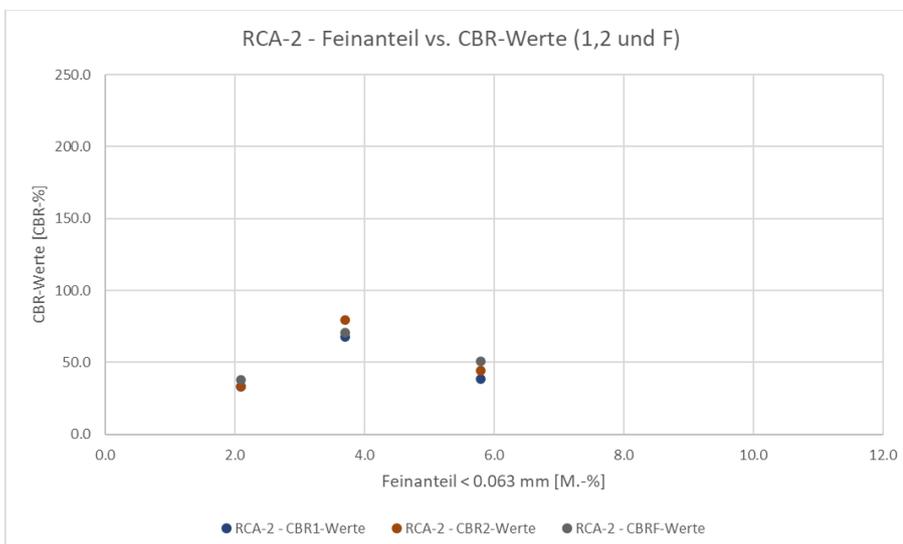
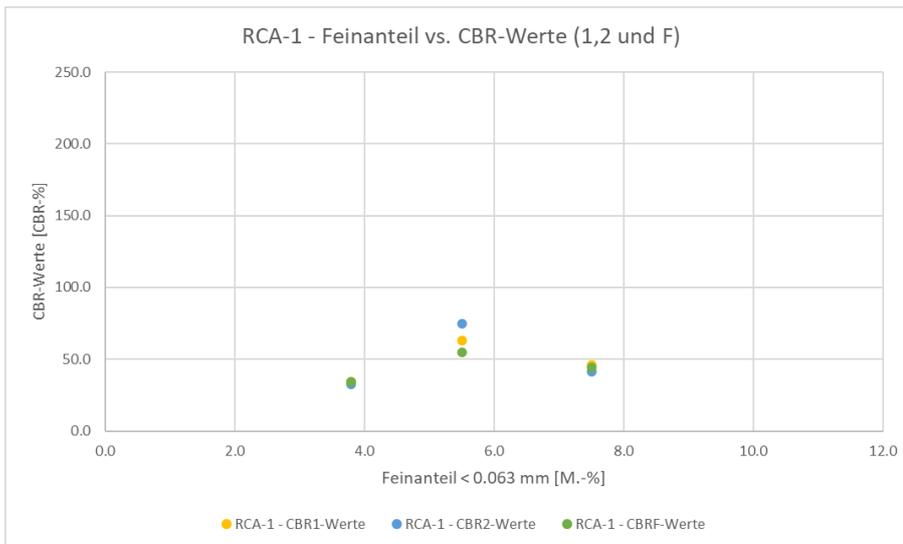
Die entsprechenden Betrachtungen und Resultate bei den RC-Betongranulatgemischen zeigen keine eindeutige Korrelation:



**Abb.16** Entwicklung der CBR1-, CBR2- und CBRF-Werte in Bezug auf den Feinanteil bei RC-Betongranulatgemischen

Beim Gemisch RCBGG-2 sind die CBR2-Werte bei jedem Feinanteil am höchsten, die tiefsten CBR-Werte werden im CBR1-Versuch verzeichnet. Beim Gemisch RCBGG-1 hingegen folgt das Gemisch mit dem Feinanteil hoch dieser Systematik nicht.

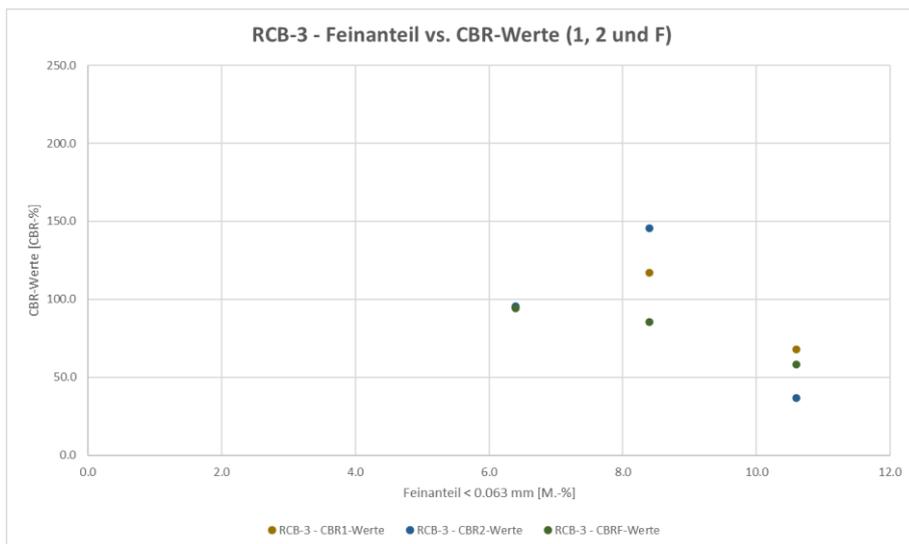
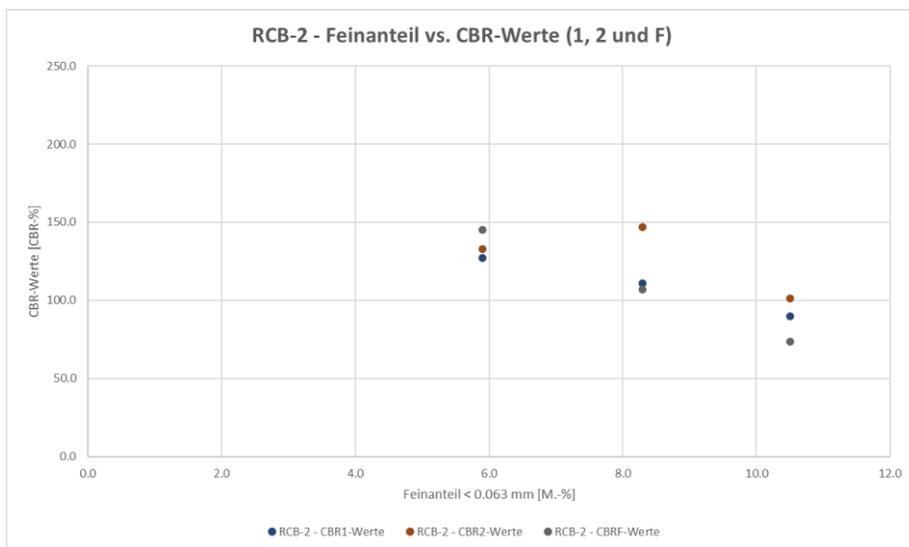
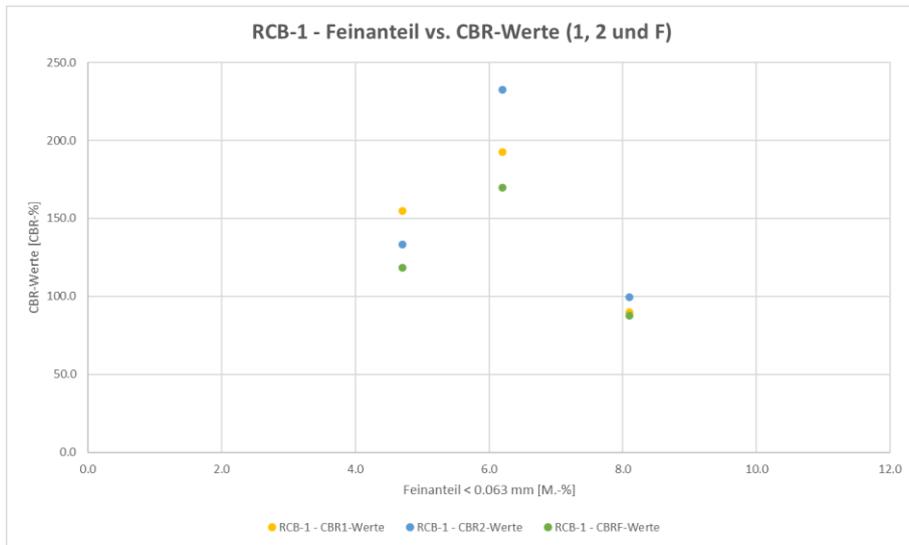
Die RC-Kiesgemische A zeigen ein weiteres Verhalten:



**Abb.17** Entwicklung der CBR1-, CBR2- und CBRF-Werte in Bezug auf den Feinanteil bei RC-Kiesgemischen A

Das Gemisch RCA-1 zeigt nur beim Feinanteil ab Werk diskrete CBR-Werte, wobei der CBR2-Werte am höchsten ist, gefolgt vom CBR1-Wert und mit dem CBRF-Wert als tiefstem Wert. Beim Gemisch RCA-2 lässt sich wiederum keine Systematik ableiten.

Die Auswertung der RC-Kiesgemische B ergibt folgendes Bild:



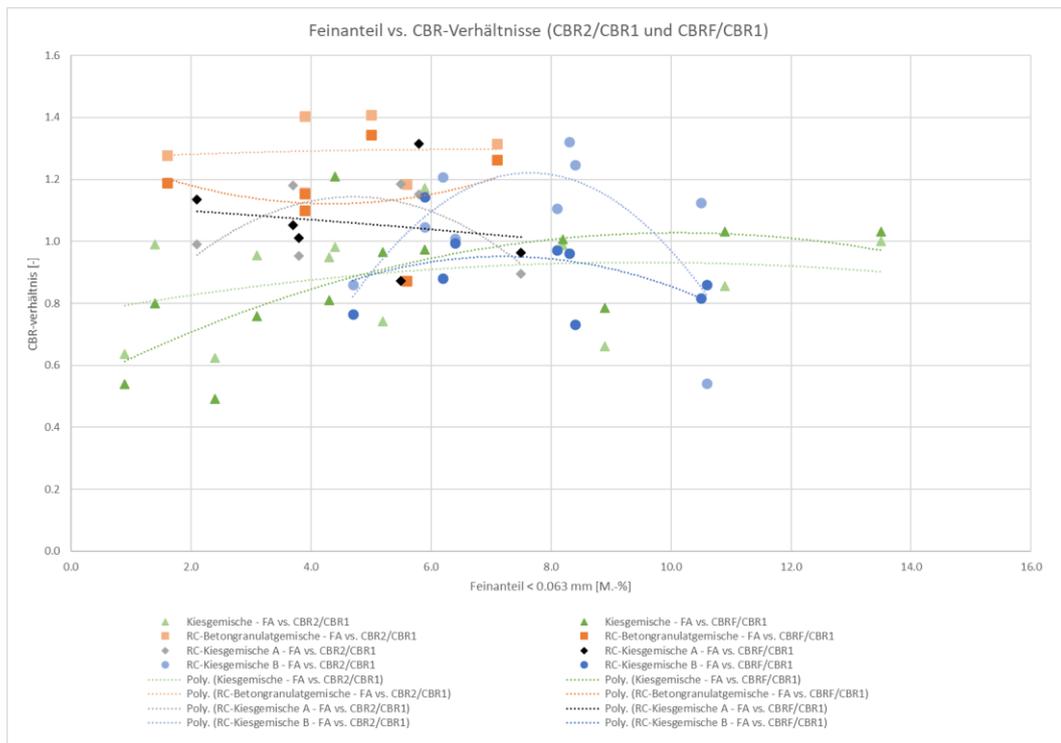
**Abb.18** Entwicklung der CBR1-, CBR2- und CBRF-Werte in Bezug auf den Feinanteil bei RC-Kiesgemischen B

Die RC-Kiesgemische B zeigen für den Feinanteil ab Werk und dem Feinanteil hoch ein Verhalten bezüglich der CBR-Werte wie natürliche Kiesgemische. Die Gemische mit Feinanteil tief hingegen zeigen keine entsprechende Korrelation.

Die Variation des Feinanteils in den untersuchten Gemischen ergibt keine eindeutigen Korrelationen zwischen Feinanteil und resultierenden CBR-Werte (1, 2 oder F). In der Tendenz lässt sich allerdings sagen, dass die CBR2-Werte in der Regel höher ausfallen, als die anderen beiden CBR-Werte. Zudem sind in der Tendenz die CBR1-Werte höher zu erwarten als die CBRF-Werte.

### 9.3.2 Variation des Feinanteiles und CBR-Verhältnisse

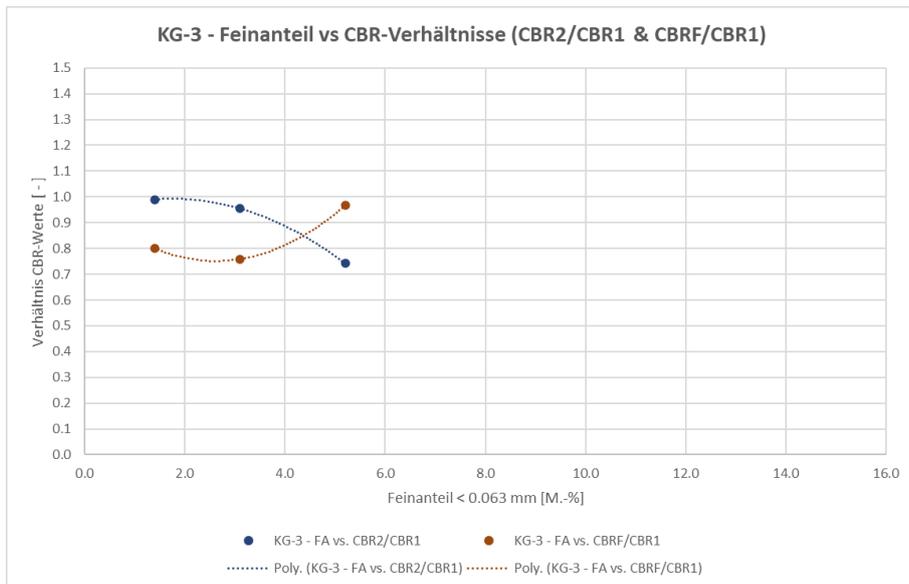
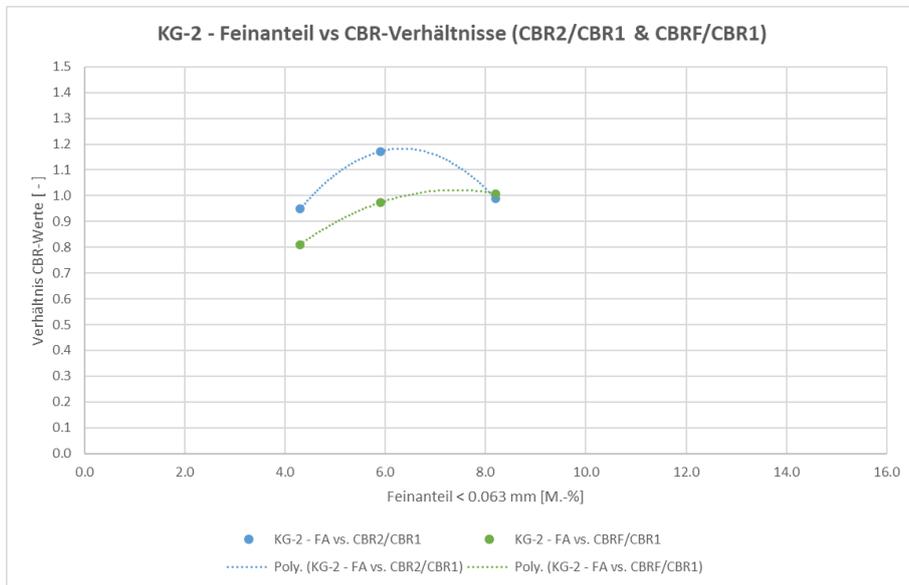
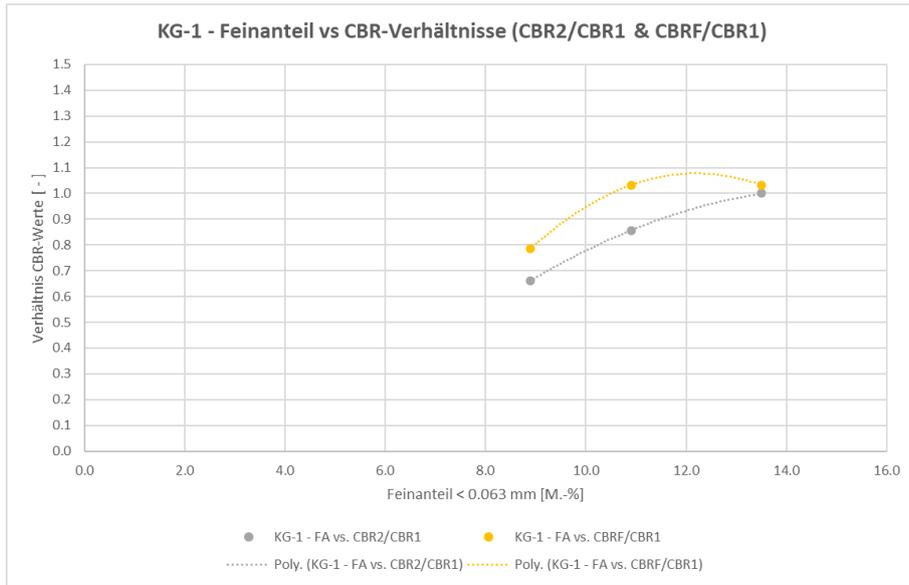
Die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Feinanteile mit den entsprechenden CBR-Verhältnissen ergibt folgendes Bild:

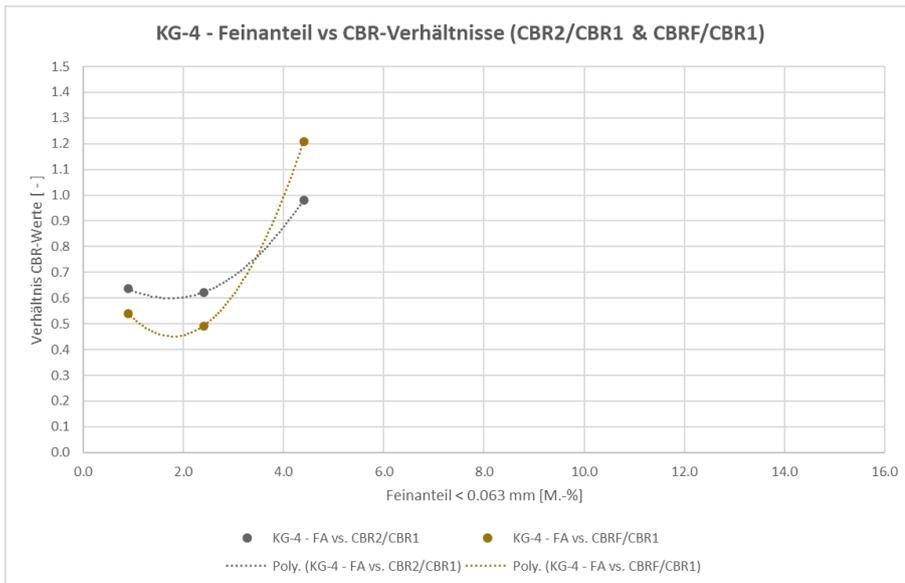


**Abb. 19** Darstellung der unterschiedlichen Feinanteile aller ungebundenen Gemische mit den resultierenden CBR-Verhältnissen ( $CBR2/CBR1$  und  $CBRF/CBR1$ )

Die fehlenden oder schlecht definierten Korrelationen zwischen Feinanteilen und entsprechenden absoluten CBR-Werte spiegelt sich auch in der Darstellung der CBR-Verhältnisse wider. Dabei zeigen beide CBR-Verhältnisse bei den RC-Betongranulatgemischen und den RC-Kiesgemischen A ein ungleiches Verhalten.

Gemäss des eingangs erwähnten Zusammenhanges müsste das Verhältnis  $CBR2/CBR1$  grösser sein als das Verhältnis von  $CBRF/CBR1$ .

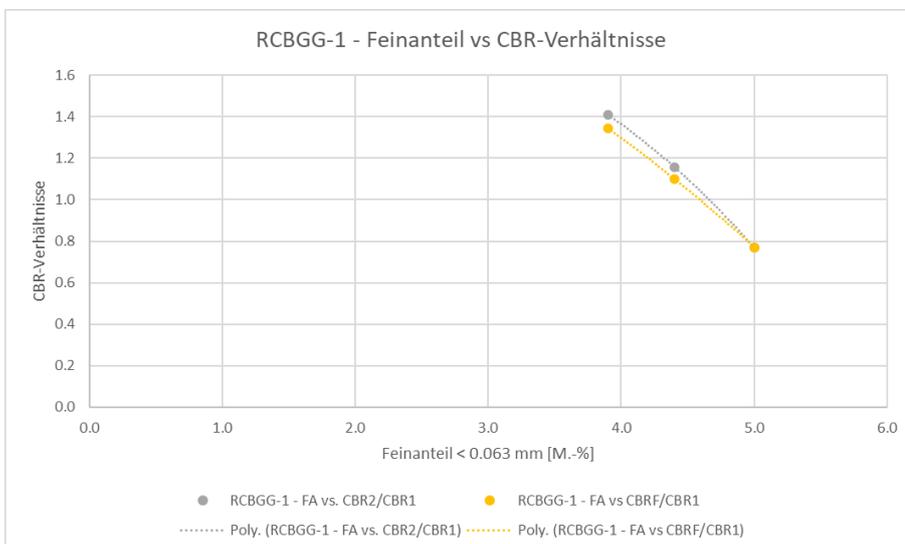


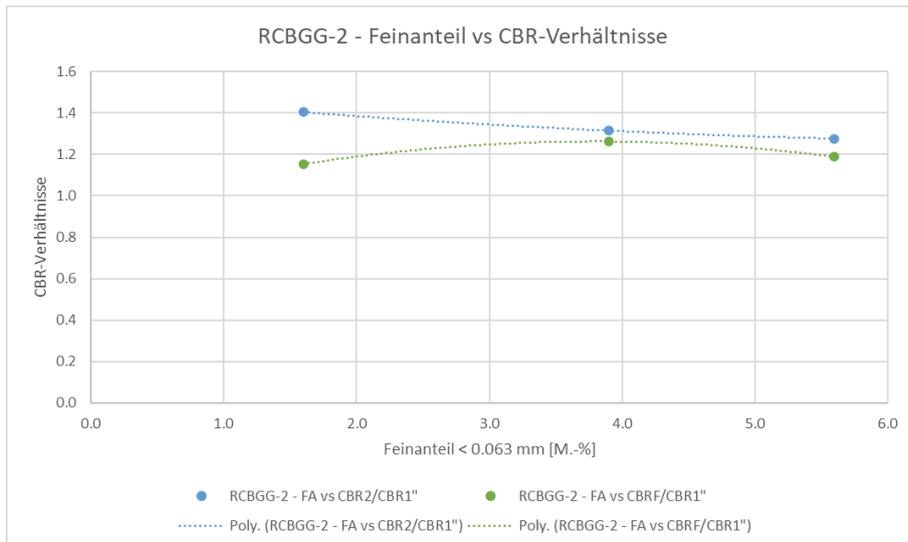


**Abb.20** Darstellung der unterschiedlichen Feinanteile aller Kiesgemische mit den resultierenden CBR-Verhältnissen

Diese Gesetzmässigkeit trifft nur auf Gemisch KG-2 zu. Das Gemisch KG-3 zeigt beim Feinanteil hoch ein anderes Verhalten. Die Gemische KG-1 und KG-4 zeigen hingegen ein entgegengesetztes Verhalten.

Die RC-Betongranulatgemische hingegen zeigen das zu erwartende Verhalten der beiden CBR-Verhältnisse:

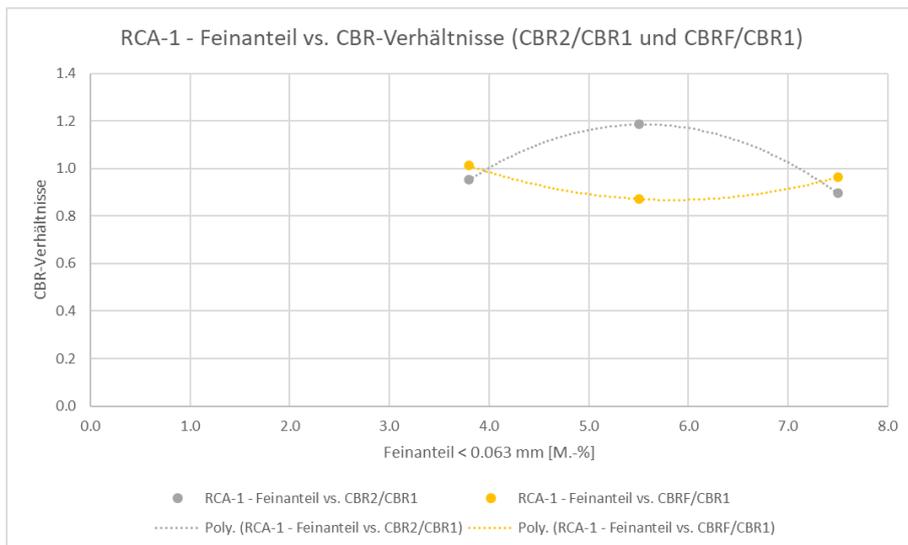


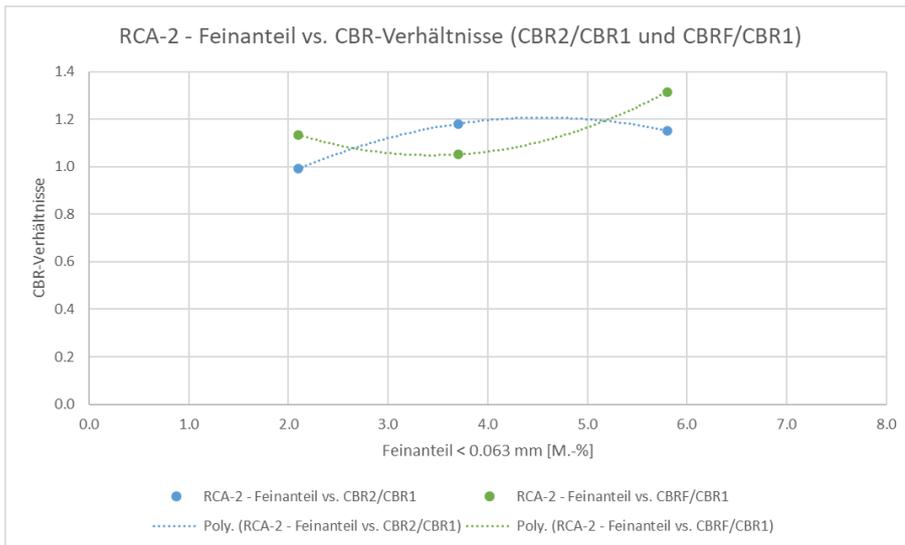


**Abb.21** Darstellung der unterschiedlichen Feinanteile der RC-Betongranulatgemische mit den resultierenden CBR-Verhältnissen

Das Gemisch RCBGG-1 zeigt die zu erwartende Beziehung zwischen den Feinanteilen, das Gemisch RCBGG-2 hingegen zeigt diese Systematik nicht.

Die RC-Kiesgemische A zeigen wiederum andere Beziehungen:

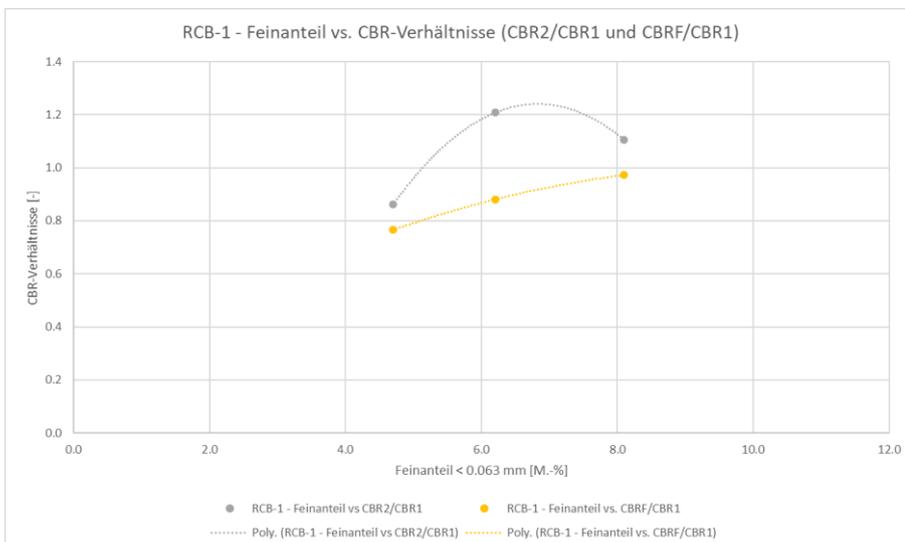


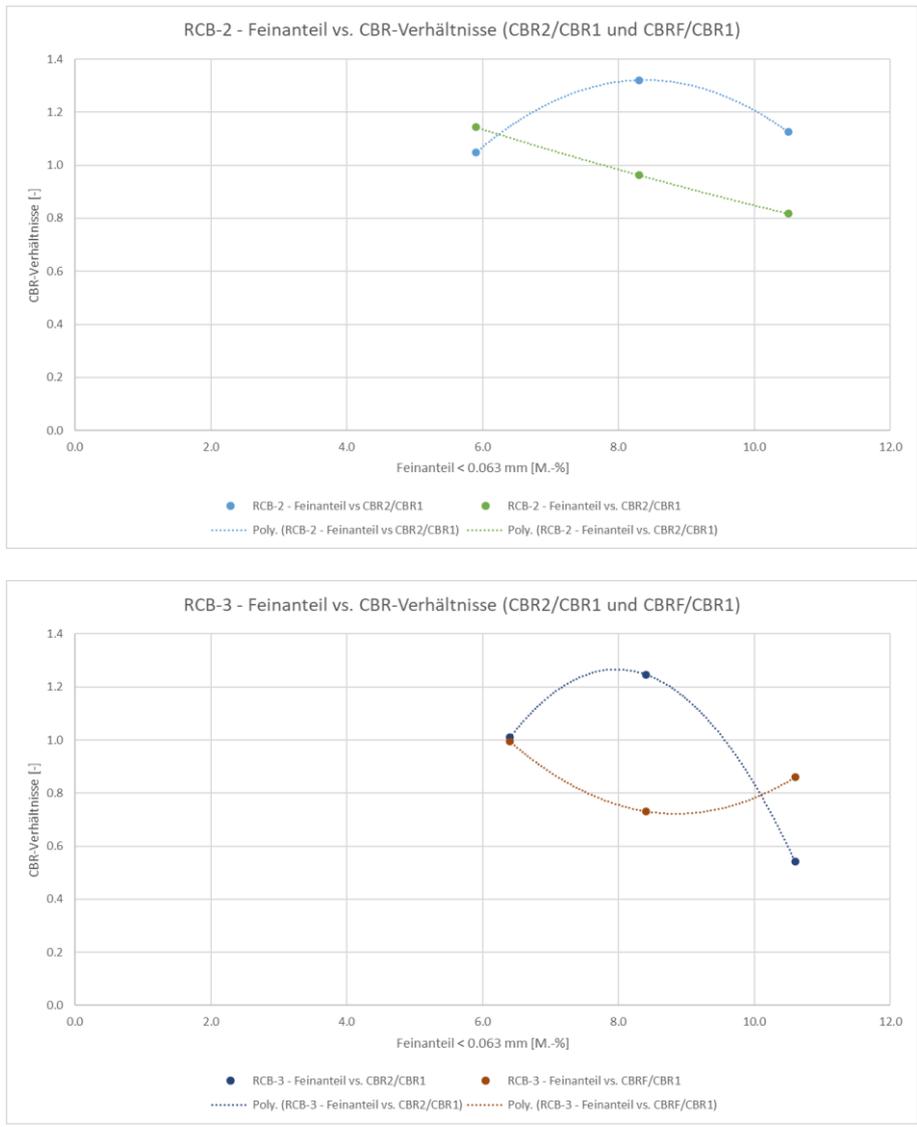


**Abb.22** Darstellung der unterschiedlichen Feinanteile der RC-Kiesgemische A mit den resultierenden CBR-Verhältnissen

Während die CBR2/CTR1-Verhältnisse einigermaßen plausibel erscheinen, zeigen die CBRF/CTR1-Verhältnisse ein gegenläufiges Bild, hier sind die Verhältnisse der im Labor künstlich hergestellten Gemische höher als dasjenige mit dem Feinanteil ab Werk.

Die RC-Kiesgemische B zeigen für die CBR2/CTR1-Verhältnisse die erwartete Gesetzmässigkeit. Bei den CBRF/CTR1-Verhältnissen lassen sich keine Korrelationen zwischen den verschiedenen Gemischen formulieren.





**Abb.23** Darstellung der unterschiedlichen Feinanteile der RC-Kiesgemische B mit den resultierenden CBR-Verhältnissen

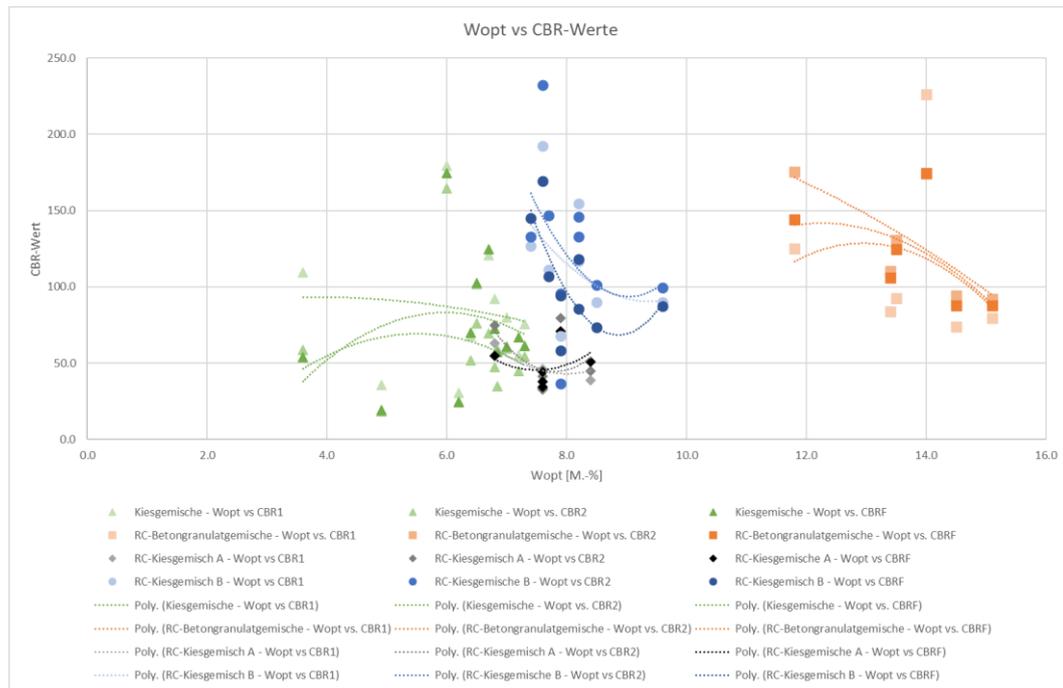
Wenn man die obenstehenden Resultate anschaut und vergleicht, fällt auf, dass die Gesetzmässigkeiten für die Proben mit dem Feinanteil ab Werk ein höheres CBR2/CCR1-Verhältnis als das CBRF/CCR1-Verhältnis zeigt. Die Resultate der Proben mit den veränderten Feinanteilen (hoch und tief) hingegen lassen sich nicht allgemein verbindlich formulieren.

## 9.4 Einfluss des optimalen Wassergehaltes

### 9.4.1 Optimaler Wassergehalt und CBR-Werte

Schon in der Phase der ersten Laborversuche fiel auf, dass die ungebundenen Gemische Unterschiede in Bezug auf den optimalen Wassergehalt zeigen. Die optimalen Wassergehalte der RC-Betongranulatgemische fallen durchwegs höher aus als die optimalen Wassergehalte der drei anderen Gemischarten. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da der grössere Anteil in den RC-Kiesgemischen A und B durch natürliche Gesteinskörnung gebildet wird. Das natürliche Kiesgemisch bildet da das Endglied bei 100 % natürlicher Gesteinskörnung.

Darum erstaunt es nicht, dass in dieser Auswertung das RC-Betongranulatgemisch heraussticht und sich einen eigenen Cluster auf dem Diagramm bildet:



**Abb.24** Darstellung der CBR-Werte als Funktion des optimalen Wassergehaltes

Die Trendlinien der polynomischen Interpolation 2. Grades zeigen interessanterweise vergleichbare Trends für die natürlichen Kiesgemische und die RC-Betongranulatgemische.

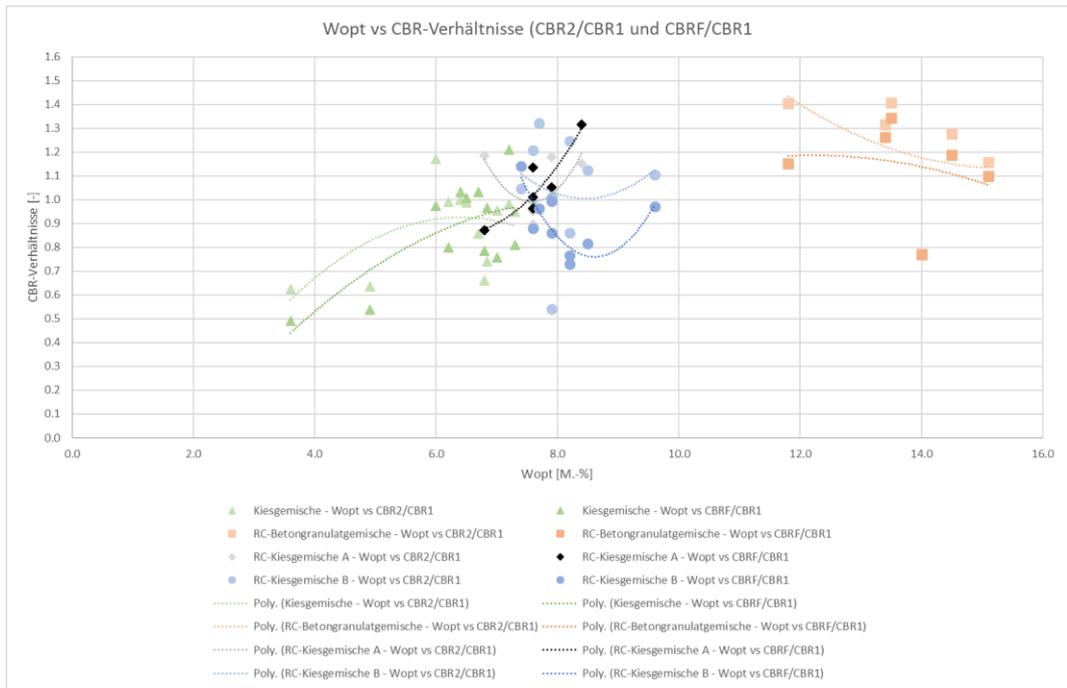
Genauer betrachtet resultieren aber bei natürlichen Kiesgemischen tiefere optimale Wassergehalte auch tiefere resultierende CBR-Werte (1, 2 oder F). Bei den RC-Betongranulatgemischen hingegen zeigen tiefere optimale Wassergehalt tendenziell eher höhere CBR-Werte, wogegen die höheren optimalen Wassergehalte in der Regel tiefe CBR-Werte zur Folge haben.

Die RC-Kiesgemische A und B zeigen ihrerseits ein vergleichbares Verhalten. Die Trendlinien der polynomischen Interpolation 2. Grades zeigen, dass bei tieferen optimalen Wassergehalten die höchsten CBR-Werte resultieren. Bei höheren optimalen Wassergehalten sind die resultierenden CBR-Werte tiefer als bei den tiefsten optimalen Wassergehalten. Auffallend ist die sehr grosse Streuung der resultierenden CBR-Werte bei mittleren optimalen Wassergehalten. Es fällt im Weiteren auf, dass für diese beiden Gruppen von Gemischen die optimalen Wassergehalte relativ nahe zusammen liegen (6.5 – 8.5 M.-% und 7.5 – 9.5 M.-%), wogegen die optimalen Wassergehalte für die natürlichen Kiesgemische und die RC-Betongranulatgemische über einen grösseren Bereich streuen (3 – 7 M.-% und 12 – 15 M.-%)

#### 9.4.2 Optimaler Wassergehalt und CBR-Verhältnisse

Das gleiche Bild ergibt sich, wenn man den optimalen Wassergehalt den resultierenden CBR-Verhältnissen CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1 gegenüberstellt. Auch hier bilden die RC-Betongranulatgemische bedingt durch den generell höheren optimalen Wassergehalt eine eigene Gruppe.

Die graphische Auswertung stellt sich wie folgt dar:



**Abb.25** Darstellung der CBR-Verhältnisse als Funktion des optimalen Wassergehaltes

Ausser beim RC-Kiesgemisch A ist allen Gemischen gleich, dass das CBR2/CCR1-Verhältnis erwartungsgemäss grösser ist als dasjenige von CBRF/CCR1. Beim RC-Kiesgemisch A resultieren bei den mittleren optimalen Wassergehalten relativ hohe CBR-Werte, sodass die Trendlinien sich kreuzen.

Wiederum zeigt sich, dass die Streubreite der CBR-Werte bei mittleren optimalen Wassergehalten relativ gross ist, was in einer konvexen Trendlinie resultiert.

Auch die Analyse der Resultate bezüglich des optimalen Wassergehaltes ergibt keine für alle geprüften Gemische schlüssiges Verhalten.

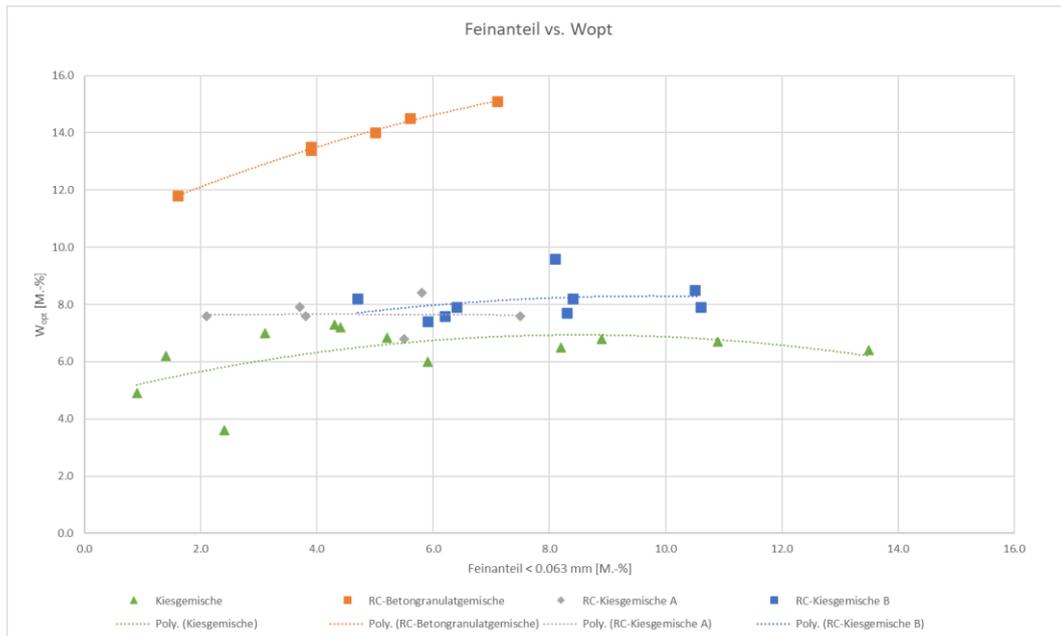
## 9.5 Feinanteil und weitere Parameter

### 9.5.1 Feinanteil und optimaler Wassergehalt

Grundsätzlich erwartet man bei steigendem Feinanteil höhere optimale Wassergehalt im Proctor-Versuch, da tendenziell die Bindung im Material zunimmt und dadurch mehr Wasser aufgenommen werden kann. Allgemein geht man davon aus, dass mehr Feinanteil vor allem mehr Ton und Silt bedeutet, darum auch ein bindigeres Verhalten.

Wenn man die Auswertung von optimalem Wassergehalt als Funktion des Feinanteils betrachtet, fällt auf, dass auch hier wiederum die beiden RC-Betongranulatgemische mit ihren hohen optimalen Wassergehalten eine eigene Gruppe bilden. Es fällt aber auch auf, dass bei den restlichen Gemischen sich die Streubreite des optimalen Wassergehaltes in engen Grenzen hält, nämlich zwischen 1 – 2 M.-%.

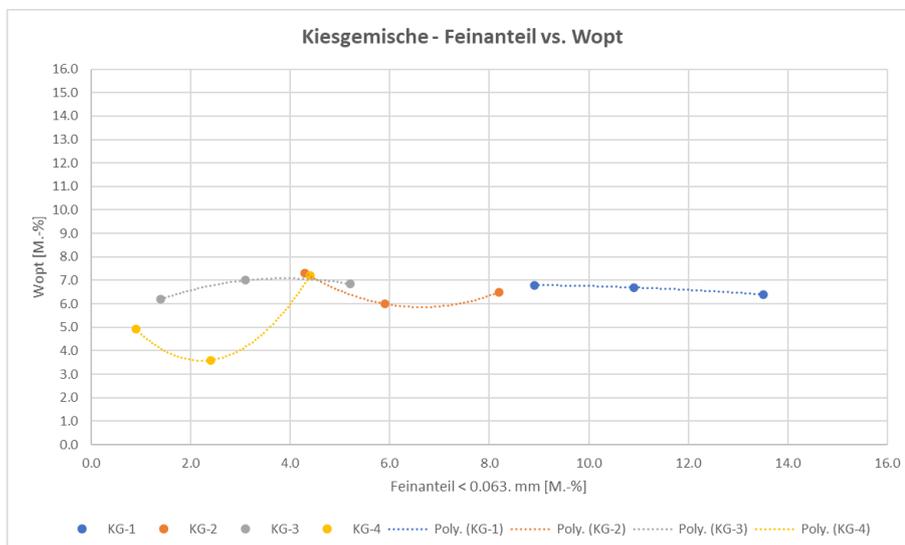
Die Auswertung stellt sich graphisch wie folgt dar:

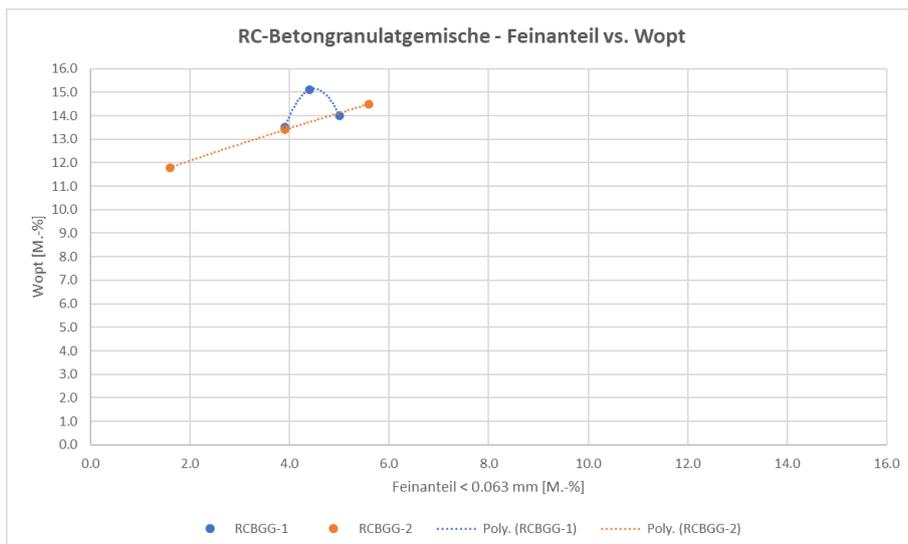
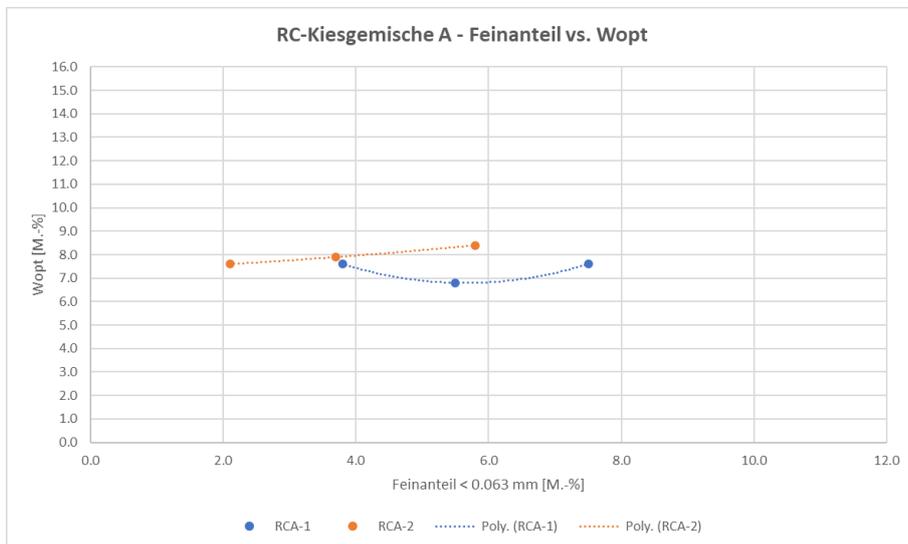
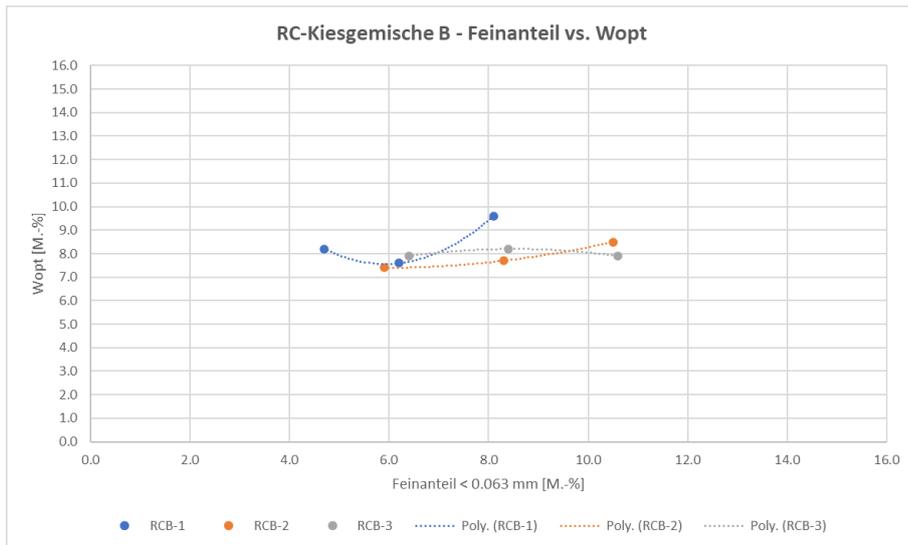


**Abb.26** Darstellung der optimalen Wassergehalte als Funktion des Feinanteils

Wenn man diese Darstellung nun auf die einzelnen Gemische herunterbricht, fällt auf, dass der eingangs formulierte Zusammenhang meist nur von einem Gemisch in den verschiedenen Gruppen eingehalten wird. Wieder muss man feststellen, dass die künstlich hergestellten Gemische die Gesetzmässigkeit unterlaufen.

Die einzelnen Gemischarten stellen sich wie folgt dar:





**Abb.27** Darstellung der optimalen Wassergehalte als Funktion des Feinanteils für die einzelnen Gemische.

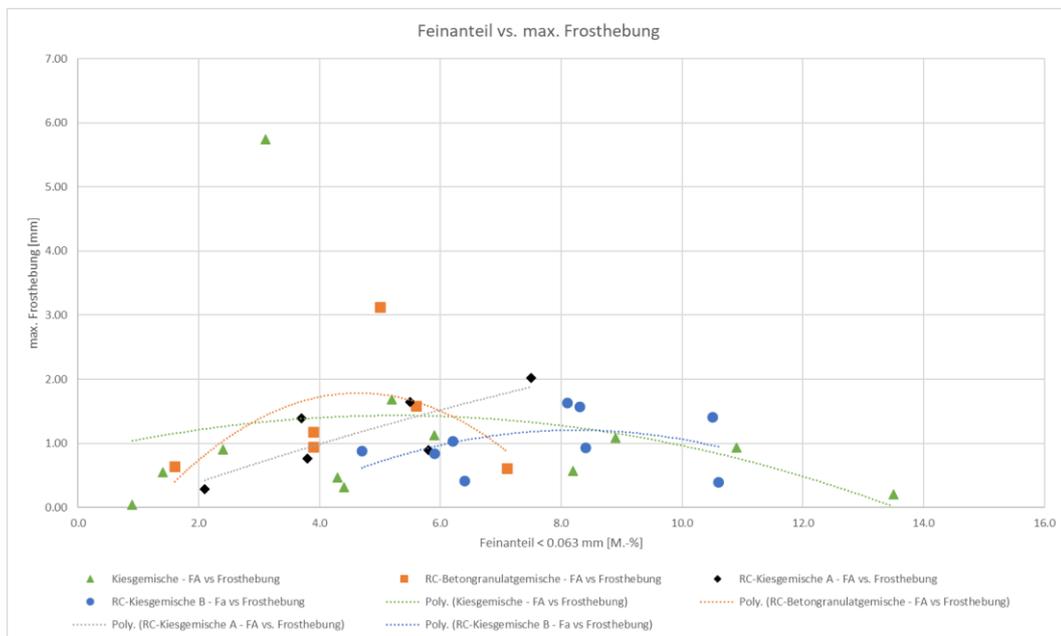
Bei der Auswertung der Resultate des optimalen Wassergehaltes in Funktion des Feinanteils fällt wiederum auf, dass die traditionell formulierten Gesetzmässigkeiten sich hier nicht als eindeutig herausstellen.

## 9.5.2 Feinanteil und maximale Frosthebung

Betrachten wir nun den Einfluss der Variation des Feinanteils auf die Frosthebung. Die Frosthebung im CBRF-Versuch gemäss VSS 70 321 ist die maximale Frosthebung, welche im Versuch während des Frostzyklus erreicht wird. Im Regelfall wird dieser Wert am Ende des Frostzyklus (24 – 48 Stunden im Versuch) erreicht. Dieser Wert ist gemäss der Norm aufzuzeichnen und auf dem Prüfbericht auszuweisen. Es werden allerdings keine Anforderungen an diesen Wert gestellt.

Wie schon beim optimalen Wassergehalt geht man davon aus, dass je höher der Feinanteil ist, umso höher die maximale Frosthebung sein müsste.

Überraschenderweise scheint dies bei den untersuchten Gemischen aber nicht der Fall zu sein, wie die nachstehende Abbildung zeigt:



**Abb.28** Darstellung der maximalen Frosthebung als Funktion des Feinanteils für die einzelnen Gemischarten

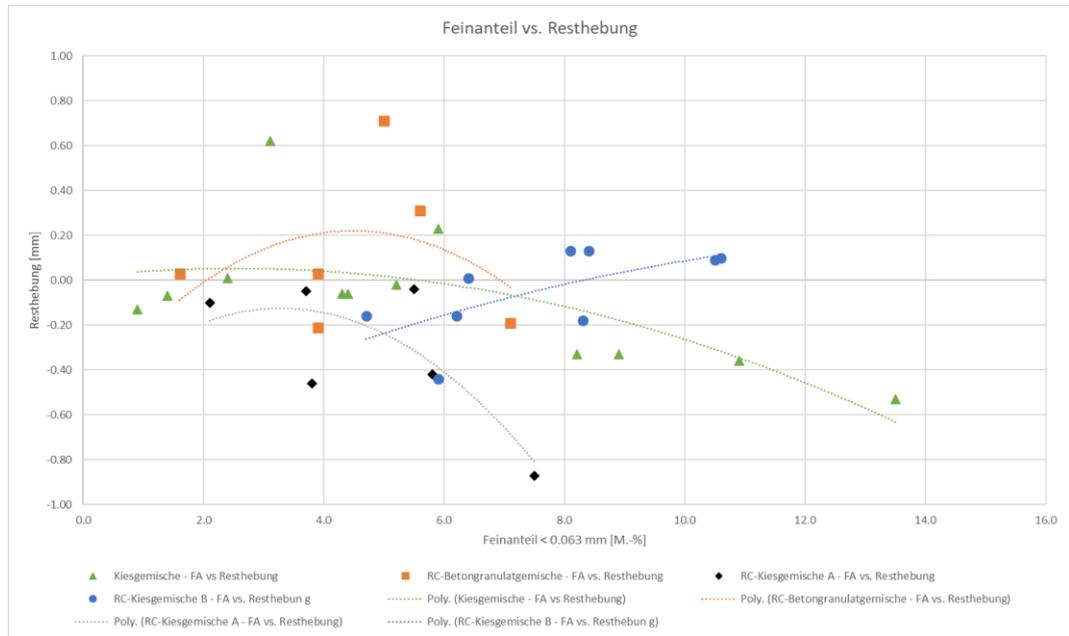
Die Trendlinien der polynomischen Interpolation 2. Grades zeigt dies für alle Gemische ausser den RC-Kiesgemische A, welche eher das erwartete, lineare Verhalten zeigen. Bei den Gemischen mit hohem Anteil an natürlicher Gesteinskörnung stellt man für höhere Feinanteil eine kleinere maximale Frosthebung als für mittlere Feinanteile fest. Auch unter Auslassung der beiden Gemische mit sehr hoher Frosthebung (knapp 6 und 3 mm), ändert sich diese Bild nicht. Der Maximalwert der Frosthebung wurde beim natürlichen Kiesgemisch KG-3 festgestellt, der zweithöchste Wert gehört zum RC-Betongranulatgemisch RCBGG-1.

## 9.5.3 Feinanteil und Resthebung

Die Resthebung im CBRF-Versuch gemäss VSS-Norm 70 321 ist jene Hebung, welche nach dem 24-stündigen Auftauen (48 – 72 Stunden im Versuch) verzeichnet wird. Dieser Wert ist gemäss der Norm aufzuzeichnen und auf dem Prüfbericht auszuweisen. Es werden allerdings keine Anforderungen an diesen Wert gestellt.

Auch hier würde man erwarten, dass die Resthebung bei Gemischen mit hohem Feinanteil tendenziell höher ausfallen müsste. Es wird des Öfteren beobachtet, dass diese Resthebung sogar ins Negative tendiert.

Die graphische Darstellung dieser Versuchsdaten sieht wie folgt aus:



**Abb.29** Darstellung der Resthebung als Funktion des Feinanteils für die einzelnen Gemischarten

Bei der Analyse der Daten fällt auf, dass die RC-Kiesgemische A im Projekt durchwegs negative Werte bei der Resthebung verzeichnen. Die anderen drei Gemische zeigen sowohl positive wie negative Resthebungen.

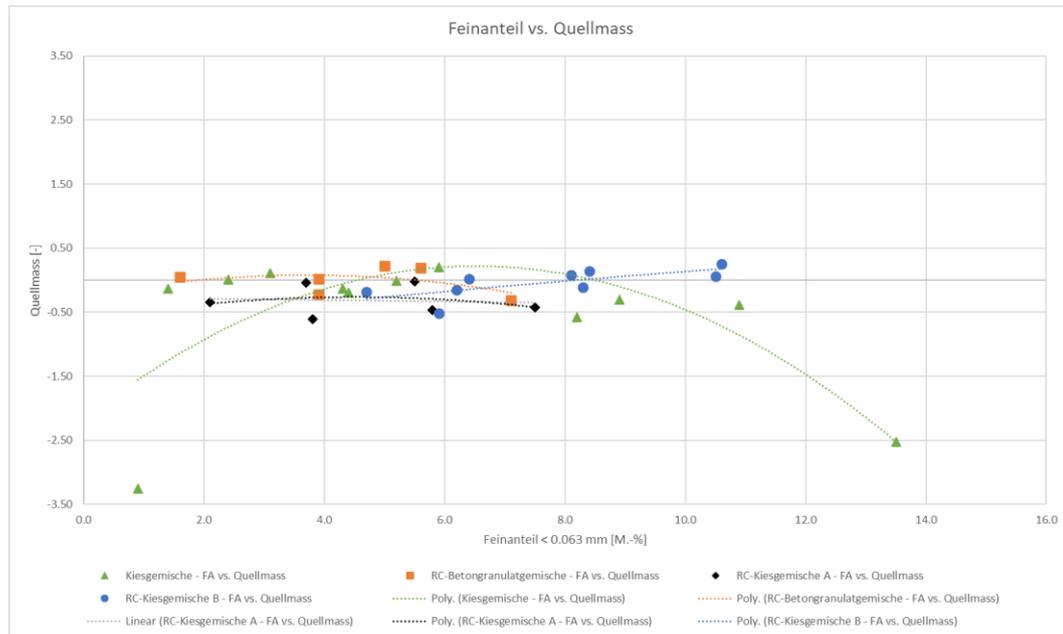
Die RC-Kiesgemische B zeigen in der Tendenz das zu erwartende Verhalten. Die RC-Kiesgemische A zeigen einen anderen Trend, wobei diese dem Ausreisser mit dem höchsten Feinanteil zuzuweisen ist. Je höher der Feinanteil, umso mehr «fällt das Gemisch in sich zusammen».

Bei den RC-Betongranulatgemischen und den natürlichen Kiesgemischen ist kein eindeutiger Trend feststellbar.

Bei den Proben mit den Extremwerten bei der Frosthebung werden diese Hebungen zu einem grossen Teil wieder abgebaut. Beim Gemisch KG-3 bestehen am Schluss noch knapp 0.6 mm Hebung (knapp 10 %), beim Gemisch RCBGG-1 noch knapp 0.7 mm (knapp 25 %).

### 9.5.4 Feinanteil und Quellmass

Das Quellmass ist das Verhältnis von Frosthebung zu Resthebung. Die Darstellung dieses Kennwertes zeigt wiederum keine eindeutigen Korrelationen:



**Abb.30** Darstellung der Resthebung als Funktion des Feinanteils für die einzelnen Gemischarten

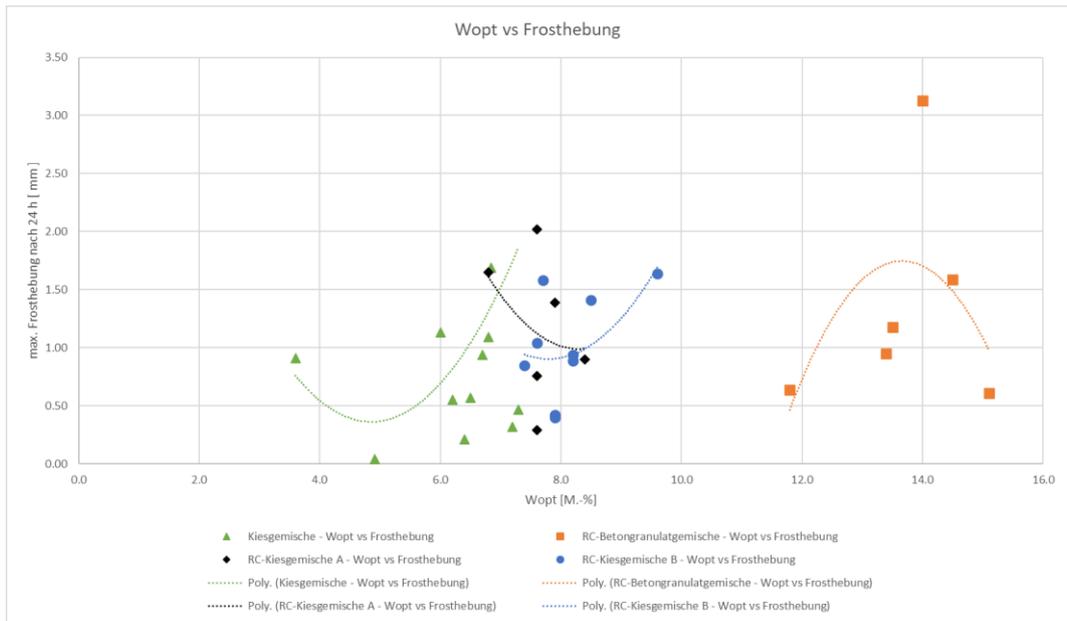
Bei den Extremwerten bei den natürlichen Kiesgemischen handelt es sich um künstlich für das Projekt hergestellte ungebundene Gemische. Wenn man diese Werte ausser Betracht zieht, gleich sich die Trendlinie der natürlichen Gemische denjenigen der anderen Gemische an.

Die Streubreite dieses Parameters bewegt sich in engen Grenzen, sodass er aufgrund der vorliegenden Resultate als Anforderungswert nicht in Betracht gezogen werden sollte. Absolute Werte für die Frost- oder Resthebung wären hier wohl eher in Betracht zu ziehen.

## 9.6 Optimaler Wassergehalt und weitere Parameter

### 9.6.1 Optimaler Wassergehalt und Frosthebung

Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass die Frosthebung beim optimalen Wassergehalt eines Gemisches minimal ausfallen sollte, ausser das Gemisch enthält quellfähiges Material wie Tonmineralien im Feinanteil oder der optimale Wassergehalt ist hoch und das Wasser ist für die Hebung verfügbar.

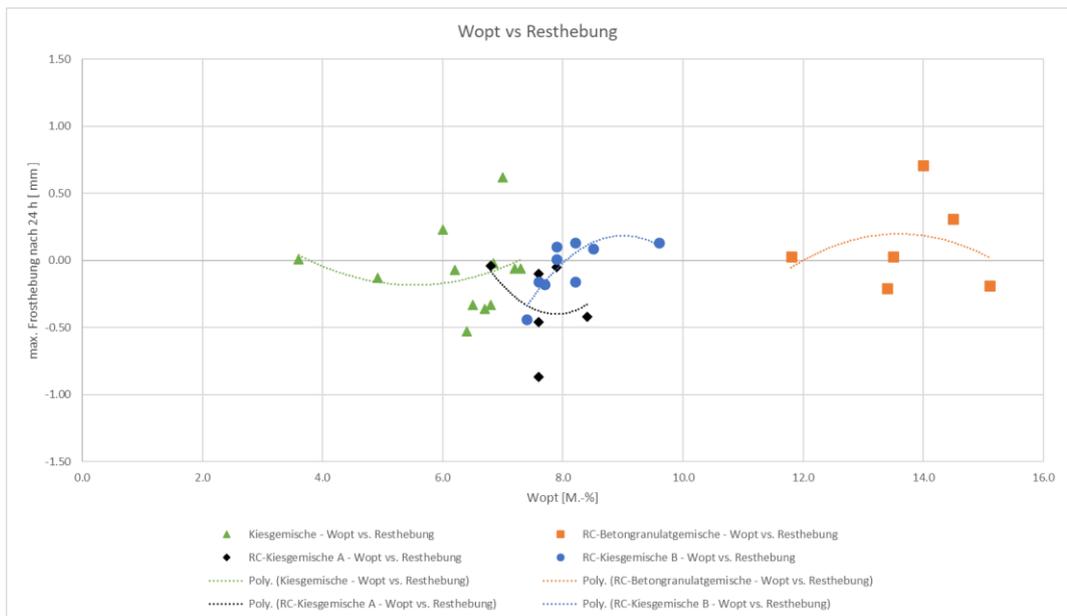


**Abb.31** Darstellung der Frosthebung in Funktion des optimalen Wassergehaltes

Bei RC-Kiesgemischen A bewegen sich die optimalen Wassergehalte in einem engen Band, die Frosthebung streut über den ganzen Bereich. Der Wertebereich der optimalen Wassergehalte der RC-Kiesgemische B ist grösser als bei den RC-Kiesgemische A, die Frosthebung streut über den ganzen Bereich der Resultate. Dieselbe Feststellung kann auch für die RC-Betongranulatgemische gemacht werden. Bei den Kiesgemischen resultiert der grösste Bereich für die optimalen Wassergehalte, die Frosthebung zeigt allerdings den kleinsten Wertebereich auf (0.0 – 1.1). Systematische Korrelationen können nicht festgestellt werden.

### 9.6.2 Optimaler Wassergehalt und Resthebung

Die nächste Betrachtung ist die Gegenüberstellung des optimalen Wassergehaltes und der Resthebung. Die Auswertung der Daten ergibt folgendes Bild:

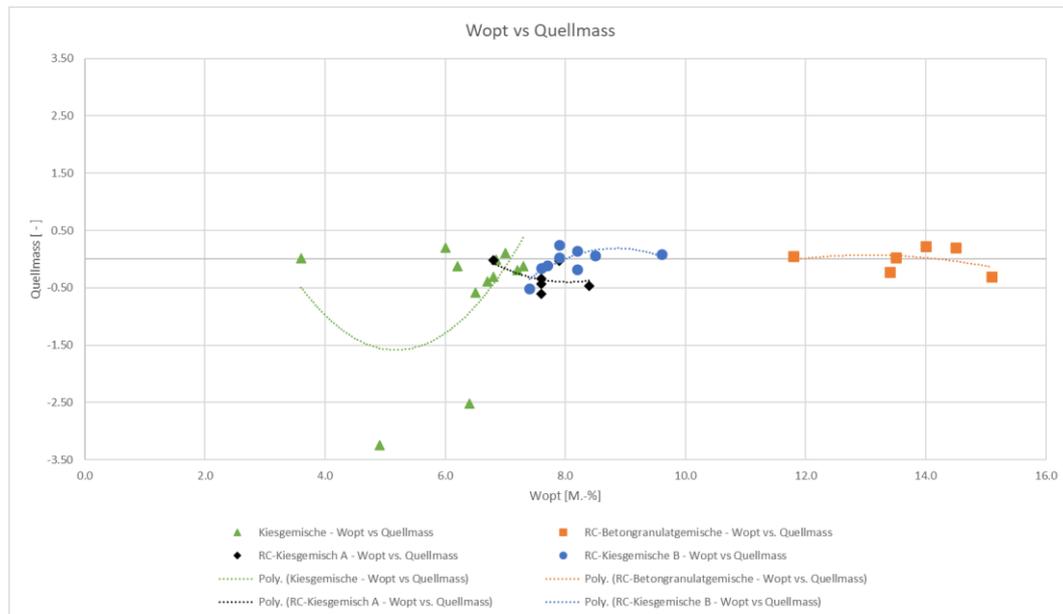


**Abb.32** Darstellung der Resthebung in Funktion des optimalen Wassergehaltes

Die RC-Betongranulatgemische bilden eine Punktwolke aufgrund der höheren optimalen Wassergehalte. Es fällt auf, dass bis auf das RC-Kiesgemisch A alle Gemische positive und negative Resthebungen aufweisen. Systematische Korrelationen sind nicht erkennbar.

### 9.6.3 Optimaler Wassergehalt und Quellmass

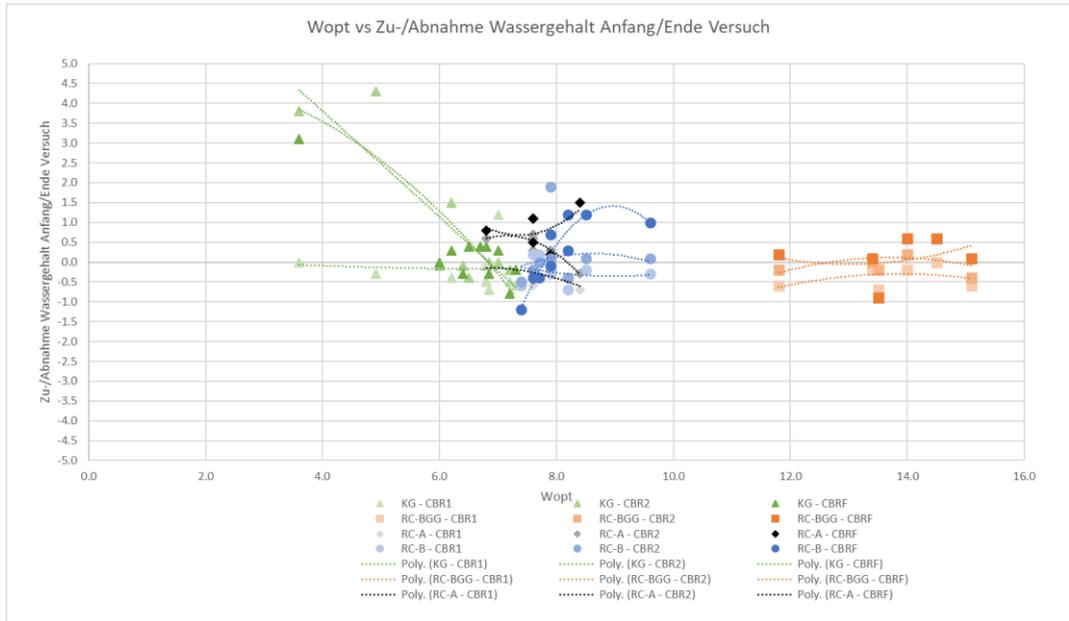
Wie ist der Einfluss des optimalen Wassergehaltes auf den kombinierten Parameter Quellmass (Resthebung über Frosthebung)? Die beiden vorhergehenden Parameter zeigen für sich alleine betrachtet keine Korrelationen. Es wäre also erstaunlich, wenn die Betrachtung in Bezug auf das Quellmass ein anderes Bild ergeben würde. Dies ist nicht der Fall, wie das nachstehende Diagramm zeigt.



**Abb.33** Darstellung der Quellmasses in Funktion des optimalen Wassergehaltes

### 9.6.4 Optimaler Wassergehalt und Anfangs- und Endwassergehalt der CBR-Versuche

Beeinflusst der optimale Wassergehalt den Anfangs- und/oder den Endwassergehalt eines CBR-Versuches? Zur Beantwortung dieser Frage wurde der optimale Wassergehalt der Differenz des Anfangs- und Endwassergehaltes gegenübergestellt.

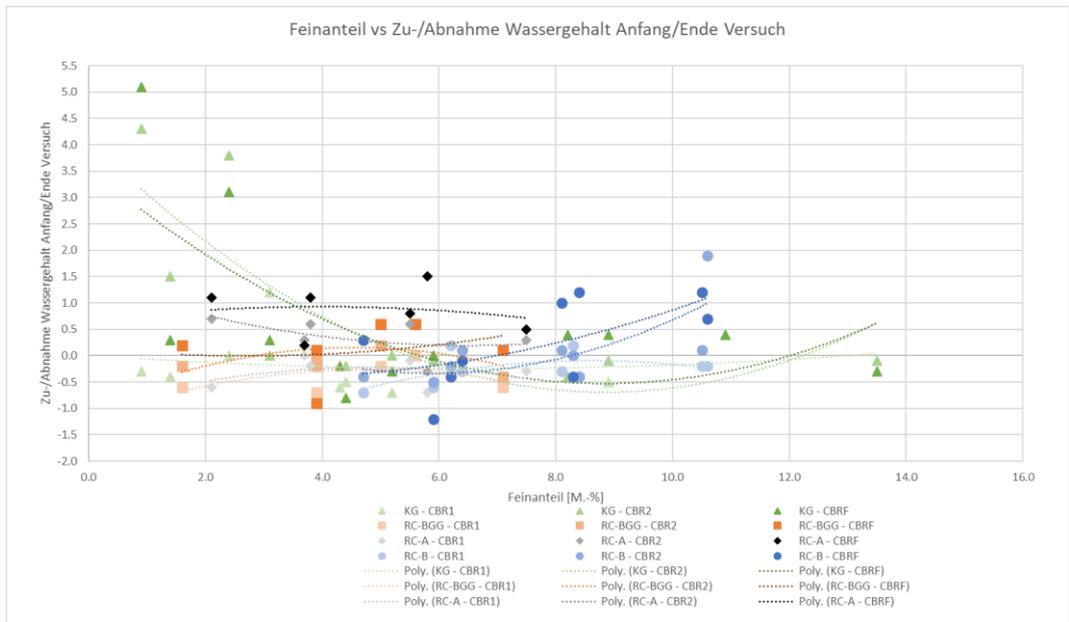


**Abb.34** Darstellung der Zu- oder Abnahme des Wassergehaltes während der CBR-Versuche (CBR1, CBR2 und CBRF)

Auch die Auswertung dieser Daten ergibt keine systematischen Korrelationen.

### 9.6.5 Feinanteil und Anfangs- und Endwassergehalte der CBR-Versuche

In die gleiche Richtung geht die Frage, ob der Feinanteil einen Einfluss auf die Anfangs- und Endwassergehalte der CBR-Versuche hat. Dazu wurde der Feinanteil der Gemische mit der Differenz zwischen Anfangs- und Endwassergehalt gegenübergestellt.

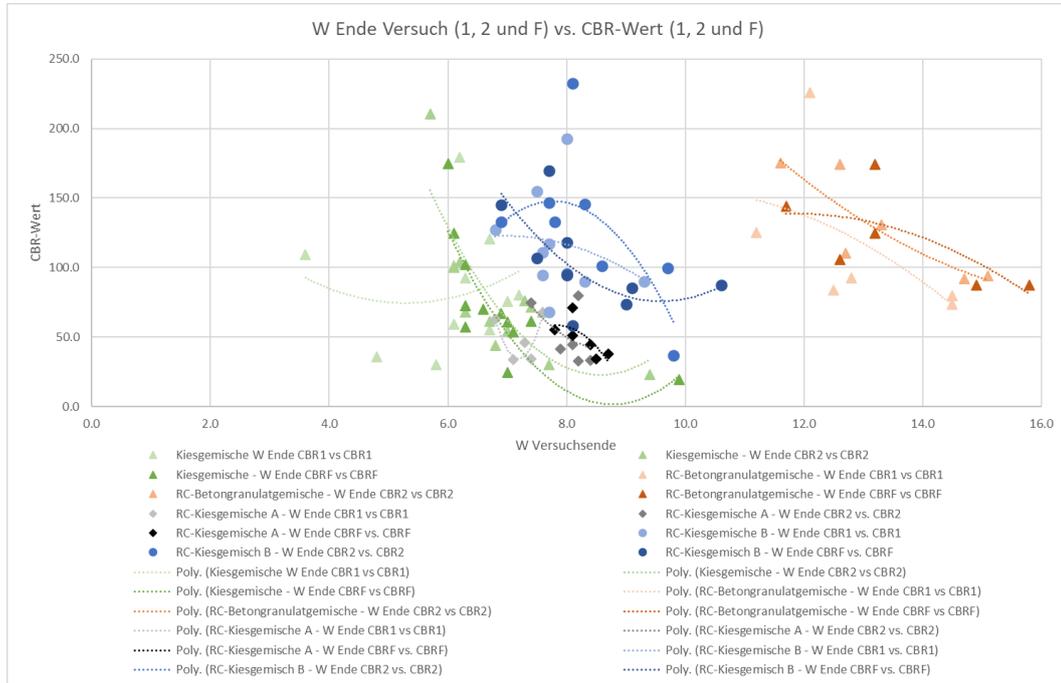


**Abb.35** Darstellung der Zu- oder Abnahme des Wassergehaltes in den verschiedenen CBR-Versuchen (CBR1, CBR2 und CBRF) in Abhängigkeit des Feinanteils

Auch diese Auswertung lässt nicht auf eine konkrete Korrelation schließen. Die Differenz der Anfangs- und Endwassergehalte scheint nicht mit dem Feinanteil zu korrelieren.

### 9.6.6 Wassergehalt am Ende der CBR-Versuche (1, 2 und F) und absolute CBR-Werte

Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Höhe des Wassergehaltes am Ende eines CBR-Versuches (CBR1, CBR2 und CBRF) und den absoluten CBRF-Werten?



**Abb.36** Darstellung der Höhe des absoluten CBR-Wertes in Abhängigkeit des Wassergehaltes am Ende des CBR1-, CBR2- und CBRF-Versuches

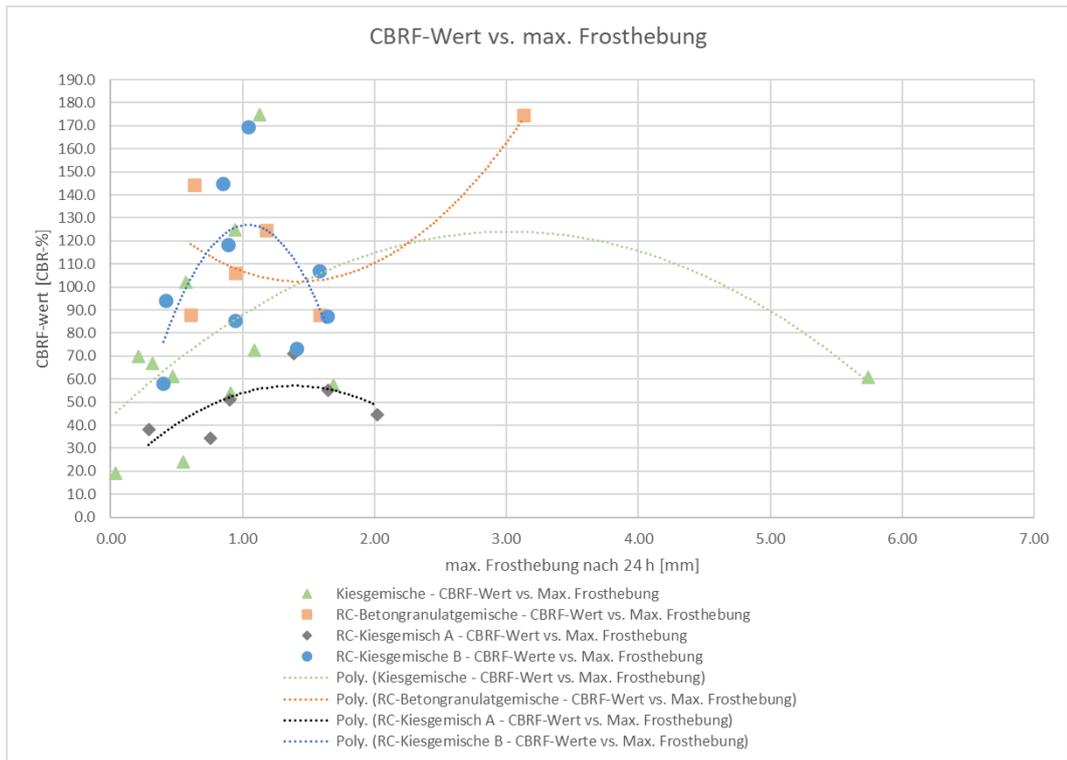
Man kann in dieser Auswertung eine leichte Tendenz feststellen, dass höhere Endwassergehalte der CBR-Versuche in tieferen absoluten CBR-Werten resultieren. Die Tendenz ist aber nicht eindeutig, weil die tiefen Wassergehalte aller Gemische dieses Verhalten nicht abbilden.

## 9.7 CBRF-Werte und Hebungsmessungen

Wie schon erwähnt, müssen die Hebungen während der CBR2- und CBRF-Versuche registriert und aufgenommen werden. Die Werte dieser Bewegungen in der Probe, werden aber in der Schweiz, im Gegensatz zum Beispiel zur Praxis in Frankreich, nicht weiterverwendet. Es gibt auch keine Anforderungen, die gemäss SN 670 119-NA erfüllt werden müssten.

### 9.7.1 CBRF und Frosthebung

Betrachten wir als Erstes den Einfluss der Frosthebung auf den absoluten CBRF-Wert. Die nachstehende Graphik zeigt die Auswertung dieser Daten:

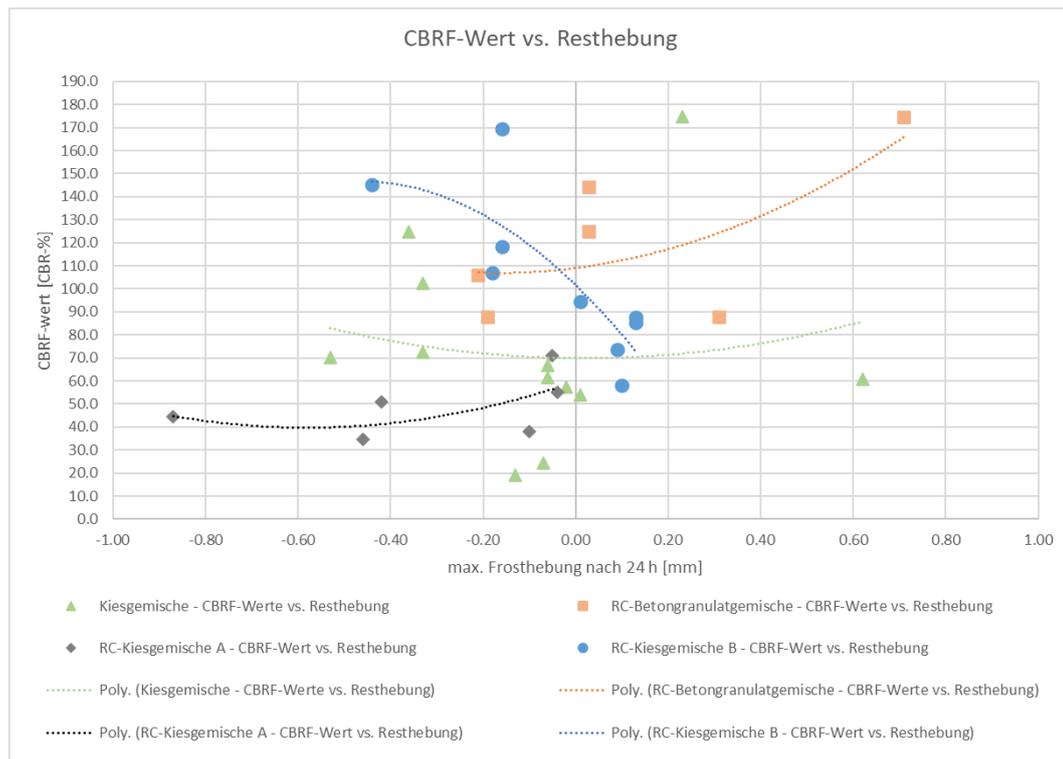


**Abb.37** Darstellung des CBRF-Wertes in Abhängigkeit der maximalen Frosthebung nach 24 Stunden

Tiefe CBRF-Werte scheinen in der Regel mit tiefen Werten für die maximale Frosthebung nach 48 Stunden assoziiert zu sein, wobei diese Feststellung für die RC-Betongranulatgemische nicht zutrifft. Die beiden geprüften Gemische zeigen grundsätzlich schon hohe CBRF-Werte. Der hohe Wert für die Frosthebung des natürlichen Kiesgemisches KG-3 ist nicht mit einem speziell hohen oder tiefen CBR-Wert assoziiert. Der andere hohe Wert in der maximalen Frosthebung (RCBGG-1) zeigt trotz der hohen Frosthebung einen hohen CBRF-Wert. Die restlichen Werte befinden sich im gleichen Wertebereich, nicht einmal die RC-Betongranulatgemische zeichnen sich durch spezielle Wertebereiche aus.

### 9.7.2 CBRF und Resthebung

Gibt es eine Korrelation zwischen dem CBRF-Wert und der Resthebung am Ende der Auftauphase?

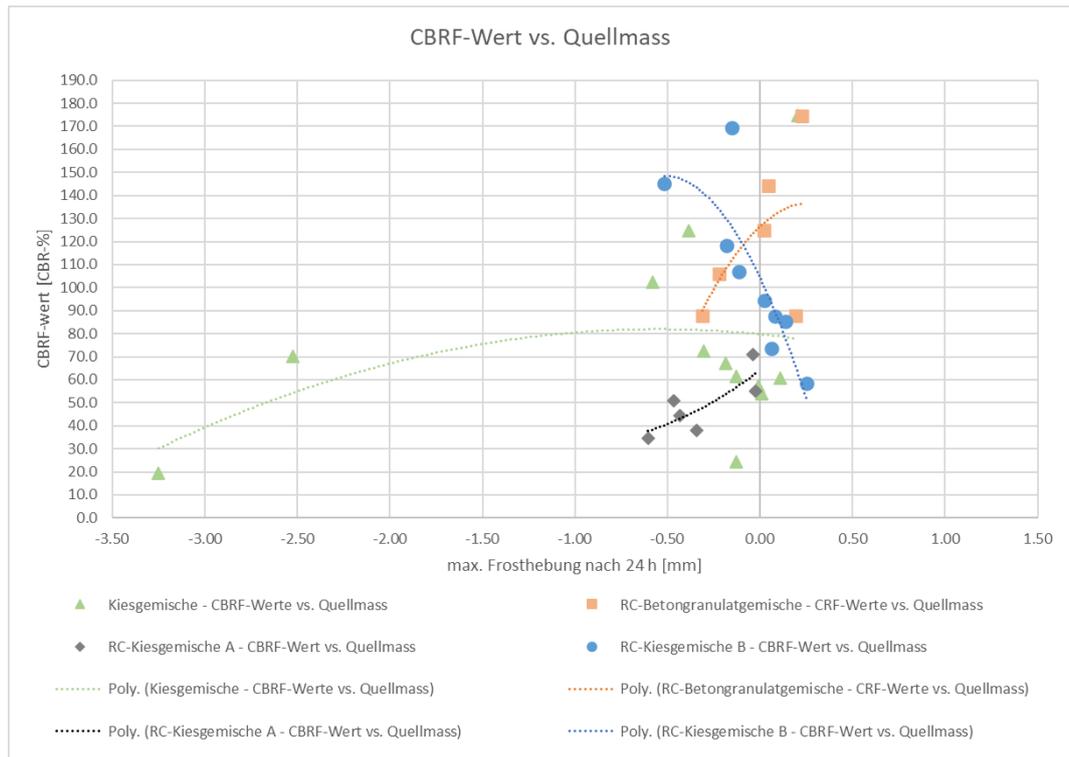


**Abb.38** Darstellung des CBRF-Wertes in Abhängigkeit der Resthebung nach 72 Stunden

Bei dieser Darstellung sieht man gut, dass etwa 60 % der CBF-Proben am Ende des Versuches, negative Werte für die Hebung aufweisen. Der grösste Teil der Heberaten bewegt sich allerdings um Null herum, das heisst die Frosthebung wird beim Auftauen rückgängig gemacht.

### 9.7.3 CBRF und Quellmass

In dieser Betrachtung darf die Gegenüberstellung des CBRF-Wertes zum Parameter des Quellmasses (Resthebung über Frosthebung) nicht fehlen, da dieser Wert durch die Labore ebenfalls ausgewiesen werden muss.

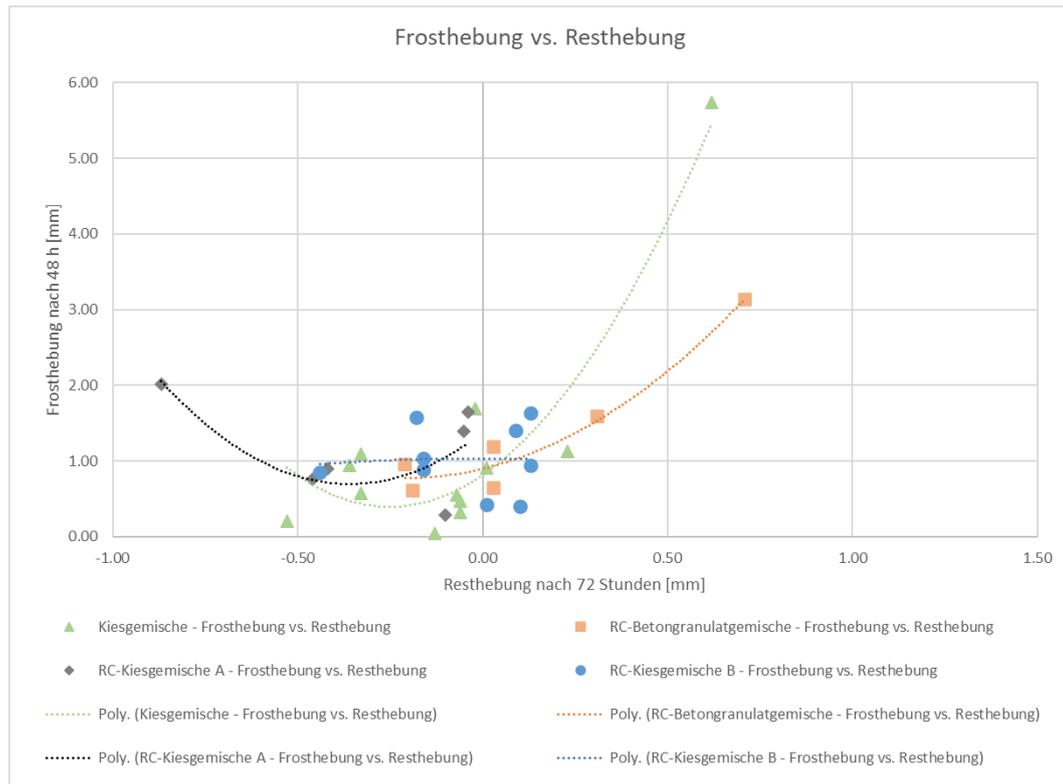


**Abb.39** Darstellung des CBRF-Wertes in Abhängigkeit des Quellmasses (Resthebung über Frosthebung)

Ausgenommen von den beiden Extremwerten (-2.52 und -3.25) welche zu zwei verschiedenen künstlich hergestellten Kiesgemischen gehören, befinden sich alle CBRF-Werte in einem relativ schmalen Bereich. Die einzelnen Gemische grenzen sich gegeneinander nicht eindeutig ab.

#### 9.7.4 Frosthebung und Resthebung

Gibt es einen Zusammenhang zwischen den Werten der Frosthebung nach 48 Stunden im CBRF-Versuch und der Resthebung nach 72 Stunden?



**Abb.40** Darstellung Hebungswerte in mm nach der Frostphase (nach 48 h) und der Auftauphase (nach 72 h)

Wenn man die drei bereits bekannten Extremwerte nicht berücksichtigt, bilden auch in dieser Darstellung die Werte ein Cluster und die einzelnen Gemische lassen sich nicht wirklich voneinander differenzieren.

## 9.8 Diskussion der Auswertung der CBR-Versuchsreihen

Um die Fragestellung des Forschungsprojektes zu beantworten, ob aufgrund der Untersuchungsergebnisse absolute Anforderungen an die CBR-Werte von ungebundenen Gemischen definiert werden können, wurden mögliche Zusammenhänge zwischen den Resultaten und den Versuchsparametern auf Korrelationen überprüft.

Mit dem Datensatz von 33 vollständigen Proctor- und CBR-Versuchen steht im vorliegenden Forschungsprojekt eine gute Datenbasis dafür zur Verfügung. Das Resultat dieser Überprüfungen hingegen fällt bezüglich der Fragestellung ernüchternd aus.

Die statistische Auswertung wird dadurch erschwert, dass nur jeweils zwei RC-Betongranulatgemische und RC-Kiesgemische A im Projekt untersucht wurden. Statistische Korrelationen mit zwei Gemischen sind grundsätzlich nicht aussagekräftig.

Bei den **absoluten CBR-Werten** der CBR1, CBR2 und CBRF-Versuche fällt auf, dass einzig die RC-Kiesgemische A einen relativ kleinen Wertebereich aufweisen (36 – 47 Punkte), die anderen Gemische streuen deutlich breiter in ihren Werten (z.B. Kiesgemische: 155 – 188 Punkte). Aufgrund der Wertebereiche lässt sich von einem CBR-Wert (CBR1, CBR2 und CBRF) ausgehend nicht auf ein bestimmtes Gemisch schließen. Die Bereiche der Standardabweichungen der verschiedenen Gemische zeigen hingegen eine erste Auffälligkeit. Die Bereiche der Standardabweichung der RC-Betongranulatgemische und der RC-Kiesgemisch B liegen im gleichen Bereich, derjenige der RC-Kiesgemische A deutlich darunter (Abb. 11).

Auch bei den **CBR-Verhältnissen** ( $CBR_2/CBR_1$  und  $CBRF/CBR_1$ ) überlappen sich die Wertebereiche der einzelnen Gemische. Hingegen fällt auf, dass z.B. die Mittelwerte der CBR-Verhältnisse sich allesamt zwischen rund 0.9 und 1.2 befinden. Auch die Bereiche der Standardabweichungen befinden sich relativ nahe beieinander. Aber auch hier kann man ausgehend von den absoluten CBR-Verhältnissen oder auch vom Mittelwert des CBR-Verhältnisses nicht auf ein bestimmtes ungebundenes Gemisch schliessen.

Das Forschungsprojekt wollte im Weiteren untersuchen, welchen Einfluss der Feinanteil, resp. die **Variation des Feinanteils auf die absoluten CBR-Werte** und das CBR-Verhältnis hat. Wenn man nun die Resultate anschaut, welche sich aus der Variation des Feinanteils (Bandbreite der untersuchten Gemische zwischen 0.9 und 13.5 M.-%) ergeben, fällt auf, dass die höchsten CBR-Werte ( $CBR_1$ ,  $CBR_2$  und  $CBRF$ ) in der Regel mit dem im Werk produzierten Feinanteil erzielt werden. Die Gemische, welche im Labor künstlich für das Projekt hergestellt wurden, also einen tieferen oder höheren Feinanteil (Feinanteil tief, Feinanteil hoch) als das Gemisch ab Werk aufweisen, zeigen in der Regel tiefere CBR-Werte ( $CBR_1$ ,  $CBR_2$  und  $CBRF$ ). Im Weiteren scheinen die absoluten  $CBR_2$ -Werte höher zu sein, als die  $CBR_1$ -Werte und diese beiden Werte sind in der Regel höher als der  $CBRF$ -Wert. Diese Systematik lässt sich allerdings bei den RC-Gemischen mit Betonanteil nicht immer nachvollziehen.

Der Einfluss der **Variation des Feinanteils auf die CBR-Verhältnisse** zeigt auch keine schlüssigen Korrelationen analog der Betrachtung mit den absoluten CBR-Werten. Da die  $CBR_2$ -Werte in der Regel am höchsten und die  $CBRF$ -Werte am niedrigsten ausfallen, müssten die CBR-Verhältnisse sich auch entsprechend verhalten. Diese Gesetzmässigkeit wird bei den natürlichen Kiesgemischen beobachtet, teilweise auch bei den RC-Betongranulatgemischen und den RC-Kiesgemischen B. Für die RC-Kiesgemische A trifft der formulierte Zusammenhang nicht zu. Im Weiteren zeigt sich dieser Zusammenhang in der Regel nur bei den im Werk produzierten Kiesgemischen. Die im Labor künstlich hergestellten Gemische zeigen diesen Zusammenhang nicht.

Der Einfluss des **optimalen Wassergehaltes auf die absoluten CBR-Werte** zeigt eine weitere Auffälligkeit: Die RC-Betongranulatgemische weisen einen höheren optimalen Wassergehalt als die anderen Gemische auf. Dadurch ergibt sich bei den Auswertungen mit dem optimalen Wassergehalt jeweils eine diskrete Punktwolke für diese Gemische, welche sich von den Werten der anderen Gemische absetzt. Bei den Kiesgemischen resultieren tiefere optimale Wassergehalte in der Regel in tieferen absoluten CBR-Werten. Die restlichen Gemische zeigen diesbezüglich keine klaren Korrelationen. Mittlere und hohe optimale Wassergehalte zeigen in der Regel grössere Wertebereiche für alle Gemische. Die Wertebereiche für den optimalen Wassergehalt der RC-Kiesgemische A und B zeigen dabei allerdings die am besten definierten Wertebereiche der Gemische. Analog präsentiert sich der **Einfluss des optimalen Wassergehaltes auf die CBR-Verhältnisse**.

Die im Labor künstlich hergestellten Gemische unterlaufen die Gesetzmässigkeit der im Werk produzierten Gemische, dass in der Regel höhere Feinanteile auch höhere optimale Wassergehalte bedingen.

In der Schweiz muss gemäss Norm beim  $CBR_2$ -Versuch die maximale Hebung und beim  $CBRF$ -Versuch die maximale Frosthebung und die Resthebung nach 72 Stunden erhoben werden. An diese Parameter werden keine Anforderungen gestellt. Es ist daher interessant, diese Zusammenhänge genauer zu betrachten.

Der **Einfluss des Feinanteils auf die maximale Frosthebung** bei Gemischen mit hohem Anteil an natürlicher Gesteinskörnung (Kiesgemische, RC-Kiesgemisch A und RC-Kiesgemisch B) zeigt für höhere Feinanteile eine kleinere maximale Frosthebung als für mittlere Feinanteile.

Der **Einfluss des Feinanteils auf die Resthebung** zeigt ein interessantes Phänomen. Der Grossteil der Gemische zeigt einen negativen Wert für die Resthebung. Dies bedeutet, dass beim Auftauen eine Setzung des Gemisches gemessen wird, die grösser ist als der Hebungswert der maximalen Frosthebung dieser Gemische. Die RC-Kiesgemische A

zeigen nur negative Werte für die Resthebung, bei den anderen Gemischen gibt es positive wie negative Werte, wobei die negativen Werte überwiegen. Was dieses Verhalten verursacht, konnte mit den vorliegenden Untersuchungen nicht eruiert werden.

Der **Einfluss des Feinanteils auf das Quellmass** (Resthebung/maximale Frosthebung) resultiert für alle Gemische in einem engen Wertebereich, wobei auch hier der Grossteil der Gemische negative Werte zeigt. Die Trendlinien sind für alle Gemische praktisch horizontal. Bei den Kiesgemischen verfälschen zwei Ausreisser diesen horizontalen Trend.

Der **Einfluss des optimalen Wassergehalts auf die Hebungparameter (maximale Frosthebung, Resthebung und Quellmass)** zeigt lediglich, dass die resultierenden Werte für die RC-Betongranulatgemische aufgrund der höheren Werte für den optimalen Wassergehalt eine diskrete Wertegruppe bilden. Die anderen Gemische bilden auf den Diagrammen einen gemeinsamen Wertecenter und zeigen nur, dass die optimalen Wassergehalte je nach Gemisch ein wenig unterschiedlich sind.

Auch die Betrachtung der **Anfangs- und Endwassergehalte bei den CBR-Versuchen** (1, 2 und F) in Beziehung zum **optimalen Wassergehalt** und des **Feinanteils** lassen keinerlei Korrelationen erkennen.

Die **maximale Frosthebung auf die resultierenden CBRF-Werte** scheint ausser für die RC-Betongranulatgemische linear zu verlaufen, das heisst tiefere Werte der maximalen Frosthebung gehen einher mit tieferen CBRF-Werten. Jedoch bilden die Werte der einzelnen Gemische eine Punktwolke, in welcher die einzelnen Gemische aufgrund der Werte nicht unterschieden werden können. Diese Punktwolken findet man auch beim Vergleich der **resultierenden CBRF-Werte in Bezug auf die Werte der Resthebung oder das Quellmass**. Diese Punktwolke ergibt sich auch im Diagramm der **Frosthebung in Abhängigkeit der Resthebung**.

Die Auswertung der verschiedenen Parameter gegeneinander fällt wie anfangs erwähnt, ernüchternd aus. Der Umstand, dass im vorliegenden Forschungsprojekt nur Gemische untersucht werden, welche die Anforderungen der SN 670 119-NA vollständig erfüllen dürfte dazu beitragen, dass die Gemische nicht einfach voneinander unterschieden werden können.

Das bedeutet auch, dass die RC-Gemische zwar punktuell unterschiedliche Charakteristika in Bezug zu den natürlichen Kiesgemischen aufweisen, wie z.B. den optimalen Wassergehalt. In der Summe, z.B. in Bezug auf die CBR-Werte verhalten sich die RC-Gemische in diesem Forschungsprojekt grundsätzlich vergleichbar. Daraus kann wiederum der Schluss gezogen werden, dass es nicht notwendig ist, für die einzelnen Arten von Gemischen separate Anforderungsbereiche zu definieren.

Bei den Proctor- und CBR-Versuchen handelt es sich um in der Schweiz bewährte Prüfverfahren mit einem entsprechenden langjährigen Erfahrungshintergrund. Die Untersuchungen in diesem Forschungsprojekt lassen nun den Schluss zu, dass diese Prüfmethode unter den heutigen Umständen und Vorgaben wahrscheinlich die erhoffte Auflösung der Prüfergebnisse nicht liefern können. Man muss sich die Frage stellen, ob man in der (Labor-)Praxis vielleicht nicht zu viel in die Prüfergebnisse hineinliest und ob es sich bei diesen nicht eher um Grössenordnungen handelt. In einem Ringversuch zum Proctor-Versuch im VAB (Verein akkreditierter Prüflabore) hat man nach eingehender Analyse festgestellt, dass es einige Einflussfaktoren, z.B. für die Bestimmung der maximalen Trockendichte gibt (mündliche Mitteilung) gibt, welche nicht schlüssig erklärt werden können. Gewisse Einflussfaktoren könnten wohl durch einheitliche Prüfanweisungen beherrscht werden, andere wiederum müssten noch genauer analysiert werden. Hinzukommt, dass es in der Baustellenpraxis naturgemäss schwierig genug ist, mit den in der Schweiz verbreiteten Aufbereitungsmethoden von ungebundenen Gemischen, beim Einbau einen optimalen Wassergehalt entsprechend demjenigen im Labor bestimmten Gehalt zu gewährleisten.



# 10 Konditionierung der Proben für die Proctor- und CBR-Versuche

Bei den Vergleichsmessungen zwischen den beiden Forschungsstellen, welche nach dem Wechsel der Projektleitung gemacht wurden, hat sich eine Fragestellung ergeben, die es verdient, genauer diskutiert zu werden.

Dadurch, dass in der Vorbereitung des Projektes noch kein gemeinsames Vorgehen bezüglich der Proctor- und CBR-Versuche festgelegt worden war, ergab sich bei den Vergleichsmessungen die Situation, dass die Gemische ab Werk mit unterschiedlichen Konditionierungszeiten geprüft wurden. Die IMP hat die Gemische gemäss ihren Arbeitsanweisungen konditioniert, d.h. zwischen 16 bis 24 Stunden. Im TBA wurden hingegen die RC-Gemische bis zu drei Tage (z.B. über das Wochenende) konditioniert.

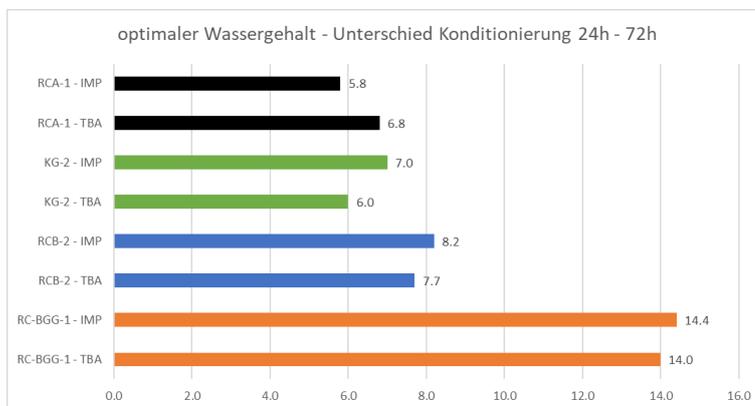
Gemäss der SN VSS 70 321 soll das Material «während einer den Materialeigenschaften angepassten Zeitdauer» konditioniert werden. Im Weiteren weist die Norm daraufhin, dass «Gemische mit rezyklierten Gesteinskörnungen sowie mit erheblichem Feinanteil erfahrungsgemäss mehr Zeit für die Konditionierung erfordern als natürliche, grobkörnige Gemische, Vorgaben für die Zeitdauer werden aber keine gemacht. Die SN EN 13286-2 erwähnt in den Anmerkungen zur Vorbereitung von Proben für den Proctor-Versuch lediglich, dass das Wasser gründlich und ausreichend mit der Mischung vermenget werden soll, um Schwankungen der Prüfergebnisse zu vermeiden.

Die Vergleichsdaten für die typischen Parameter von Proctor- und CBR-Versuche (CBR1, CBR2 und CBRF) finden sich in der nachfolgenden Tabelle:

**Tab. 21** Typische Versuchsparameter und -resultate der Vergleichsmessungen von Proctor- und CBR-Versuchen zwischen den Forschungsstellen.

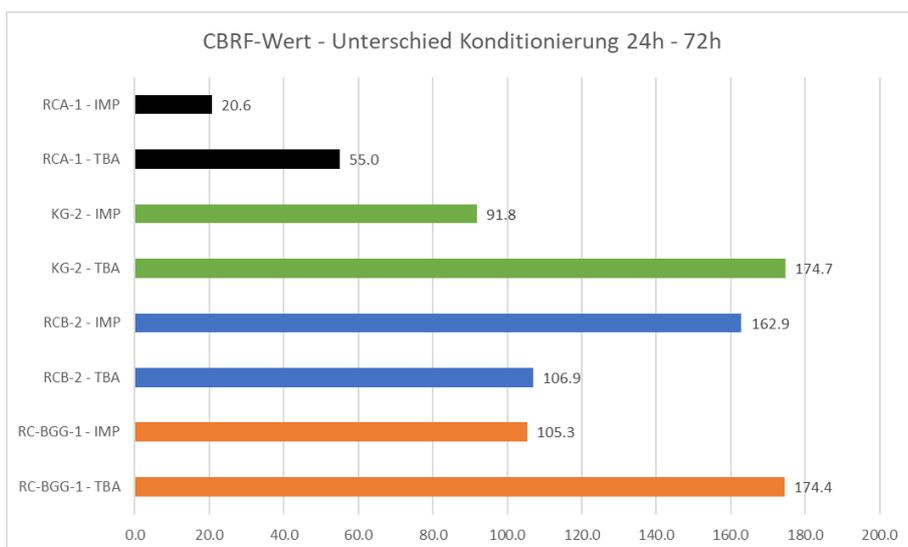
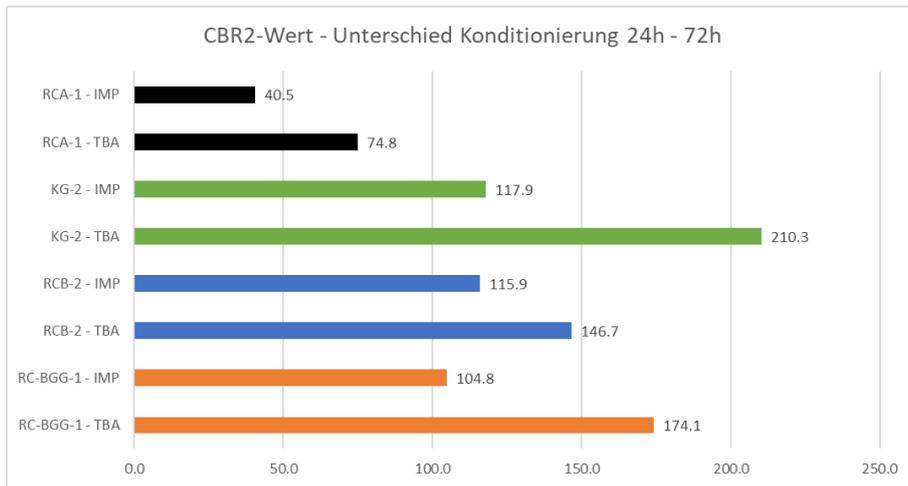
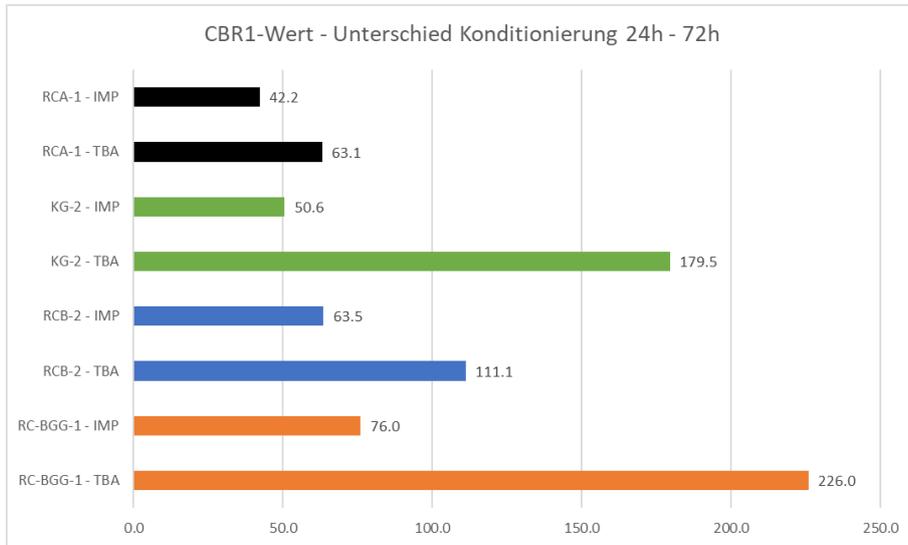
Gemisch	Herkunft	Versuchsfeld	Feinanteil < 16 mm [M.-%]	Konditionierung [h]	opt. Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Sättigungsgrad	Konditionierung [h]	CBR1 [%]	CBR2 [%]	Hebung 96 h	CBRF [%]	max. Frosthebung 24 h	Resthebung 48 h	Quellmass	CBR2/CBR1	CBRF/CBR1
RC-BGG-1 - TBA	Littau-Emmen	1	5.0	72h	14.0	1.873	91.0	72 h	226.0	174.1	0.01	174.4	3.13	0.71	0.23	0.8	0.8
RC-BGG-1 - IMP	Littau-Emmen	1	5.0	24h	14.4	1.820	85.2	24 h	76.0	104.8	0.00	105.3	1.20	0.22	0.18	1.4	1.4
RCB-2 - TBA	Rümlang	4	8.3	72h	7.7	2.184	89.5	72h	111.1	146.7	-0.11	106.9	1.58	-0.18	-0.12	1.3	1.0
RCB-2 - IMP	Rümlang	4	8.3	24h	8.2	2.175	92.8	24h	63.5	115.9	0.00	162.9	0.98	-0.96	-0.98	1.8	2.6
KG-2 - TBA	Wilchingen	7	5.9	24h	6.0	2.249	82.2	24h	179.5	210.3	-0.16	174.7	1.13	0.23	0.21	1.2	1.0
KG-2 - IMP	Wilchingen	7	5.9	24h	7.0	2.226	90.5	24h	50.6	117.9	-0.17	91.8	0.72	-0.56	-0.29	2.3	1.8
RCA-1 - TBA	Obergatt	9	5.5	72h	6.8	2.121	81.0	24h	63.1	74.8	-0.05	55.0	1.65	-0.04	-0.02	1.2	0.9
RCA-1 - IMP	Obergatt	9	5.5	24h	5.8	2.024	54.0	24h	42.2	40.5	0.00	20.6	0.39	-0.24	-0.62	1.0	0.5

Beim optimalen Wassergehalt fällt der Unterschied in der Konditionierung nicht gross ins Gewicht. Die Werte befinden sich durchaus im Fehlerbereich der Methode:



**Abb.41** graphische Darstellung der Vergleichsmessungen zwischen den Forschungsstellen zum optimalen Wassergehalt. Konditionierung TBA: 72 Stunden für RC-Gemische, 24 Stunden für natürliche Gemische. Konditionierung IMP: 24 Stunden für alle Gemische.

Bei der Analyse der verschiedenen absoluten CBR-Werte werden nun Unterschiede auffällig, wie die nachstehenden Graphiken zeigen:

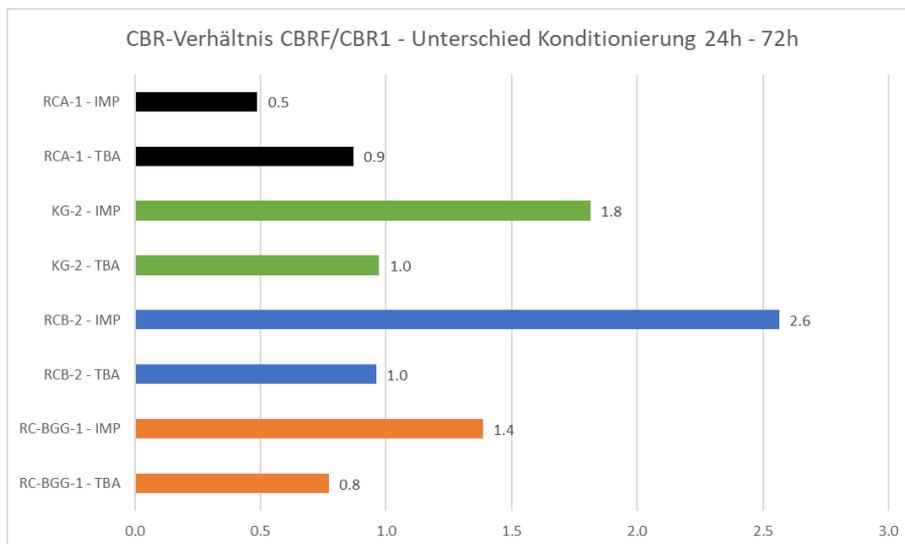
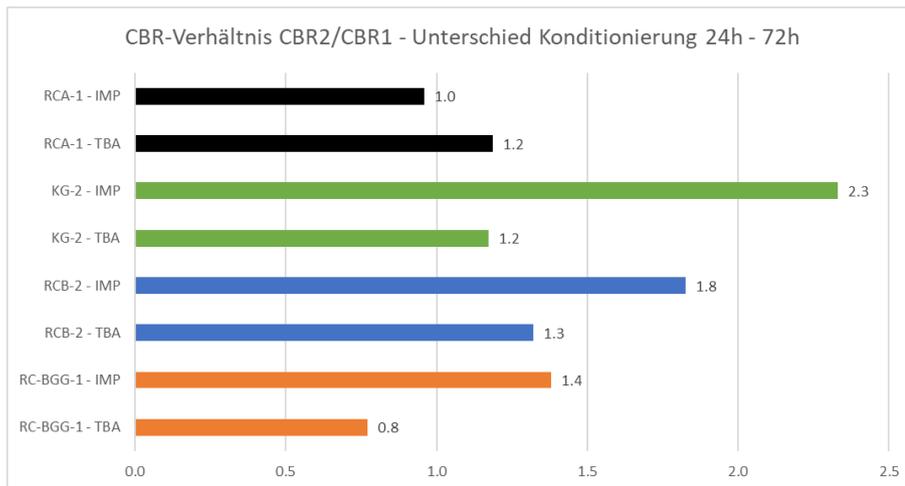


**Abb.42** graphische Darstellung der Vergleichsmessungen zwischen den Forschungsstellen der absoluten CBR-Werte. Konditionierung TBA: 72 Stunden für RC-

*Gemische, 24 Stunden für natürliche Gemische. Konditionierung IMP: 24 Stunden für alle Gemische.*

Die längere Konditionierungszeit resultiert bei den RC-Kiesgemischen in höheren absoluten CBR-Werten. Obwohl das natürliche Kiesgemisch in der gleichen Grössenordnung konditioniert wurde, zeigen sich grosse Unterschiede in den absoluten CBR-Werten.

Die CBR-Verhältnisse sind nicht ganz so eindeutig zu interpretieren, da das Verhältnis von der Höhe der absoluten CBR-Werte bestimmt wird. Wenn die Unterschiede zwischen Werten gross sind, gestalten sich die Verhältnisse entsprechend.



**Abb.43** graphische Darstellung der Vergleichsmessungen zwischen den Forschungsstellen der CBR-Verhältnisse (CBR2/ CBR1 und CBRF/ CBR1). Konditionierung TBA: 72 Stunden für RC-Gemische, 24 Stunden für natürliche Gemische. Konditionierung IMP: 24 Stunden für alle Gemische.

Es ist auffallend bei der Betrachtung der Resultate, dass die Verhältnisse der Resultate der IMP stärker streuen.

Aufgrund dieser Resultate drängt es sich auf, dass in den entsprechenden Normenwerken die Konditionierungszeit festgeschrieben wird, damit die Versuchsergebnisse zwischen Prüflaboren verglichen werden können. Die Unterschiede zwischen den beiden Laboren im Forschungsprojekt sind signifikant, als dass man sie ignorieren sollte. In einigen Kantonen müssen die Gemische durch die Behörden freigegeben werden. Wenn die

Labore die Prüfungen unterschiedlich angehen, können Produzenten je nach Ort Nachteile entstehen, was nicht im Sinn der Norm sein kann.

Im Weiteren stellt sich die Frage, wie hoch die Konditionierungszeit sein soll. Dabei sollte der Zweck der Prüfmethode geklärt werden. Soll eine Prüfmethode wie der CBR1-Versuch tatsächlich den höchstmöglichen Wert ausweisen oder soll die Prüfmethode einen standardisierten, vergleichbaren Wert produzieren? Diese Frage ist umso wichtiger, als z.B. der CBR1-Wert auf der Baustelle keine direkte Entsprechung findet. Dann muss auch bedacht werden, dass eine längere Konditionierungszeit die Prüfung in der Regel verteuert und vor allem verlängert. In diesem Sinne sollten die Vorgaben in den Prüfverfahren präzisiert werden.

# 11 Definition von absoluten Werten

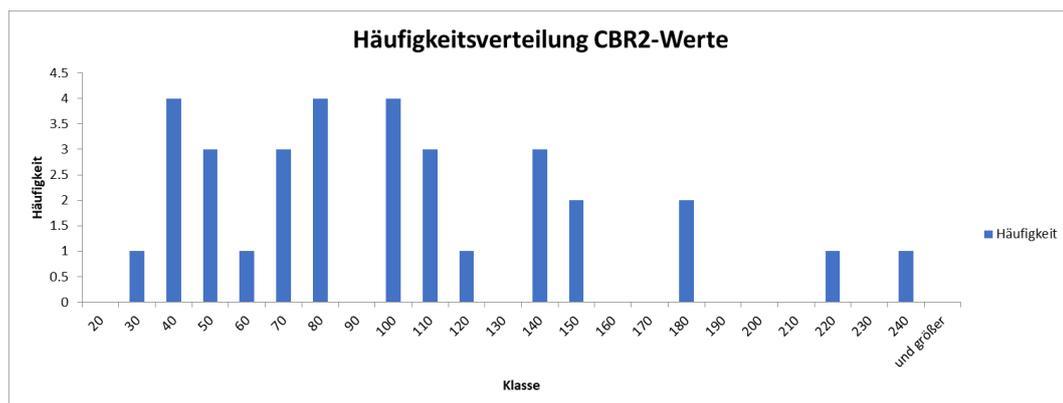
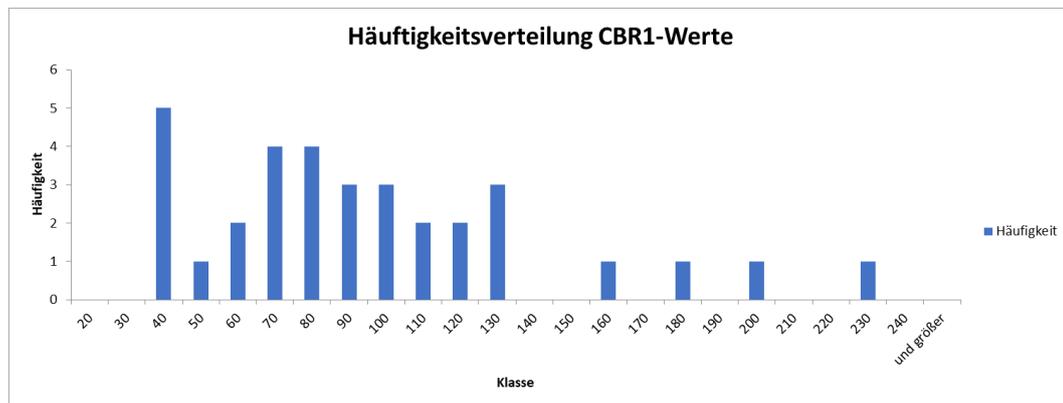
## 11.1 Absolute CBR-Werte

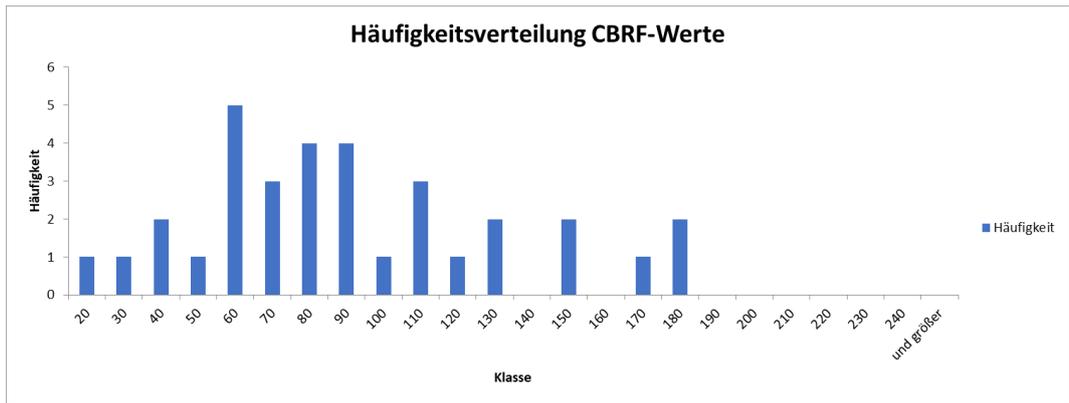
Eine zentrale Fragestellung des vorliegenden Forschungsprojektes ist, ob aufgrund der Untersuchungsergebnisse wieder absolute CBR-Werte wie in der alten Kiessandnorm SN 670 120d eingeführt werden sollen, um die Qualität von ungebundenen Gemischen zu sichern. Und falls diese Frage mit ja beantwortet werden würde, welche Werte wären für die verschiedenen untersuchten Gemische zu definieren?

Die Auswertung der CBR-Versuche auf die verschiedenen Parameter (Kapitel 9) hat gezeigt, dass es im Forschungsprojekt nicht gelungen ist, einzelne Arten von Gemischen aufgrund der Resultate zu differenzieren.

Wenn man nun die Gemische als eine «homogene» Gruppe betrachtet, kann man versuchen mit statistischen Methoden Wertebereiche zu definieren.

Im Histogramm der verschiedenen absoluten CBR-Werte (1, 2 und F) stellt sich die Verteilung der Werte in 10er-Klassen wie folgt dar:

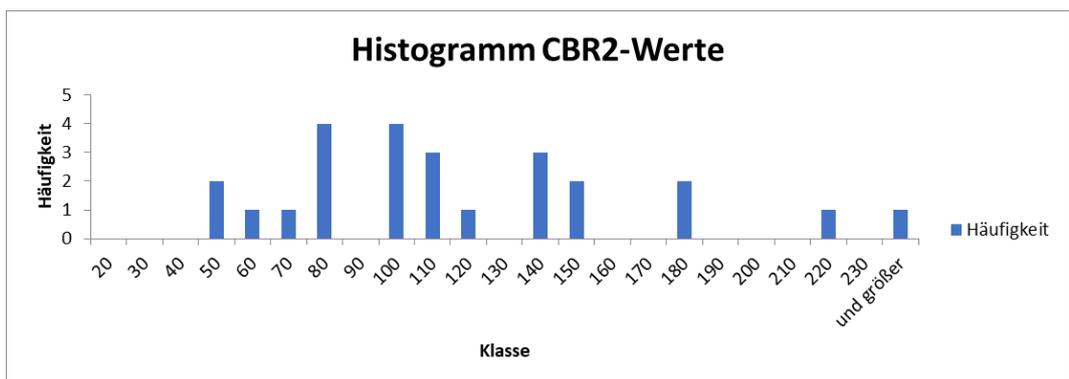
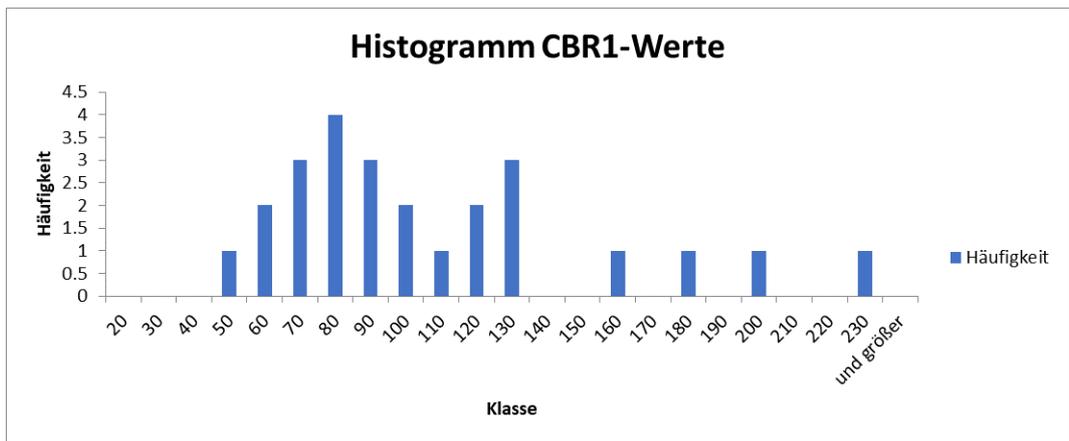


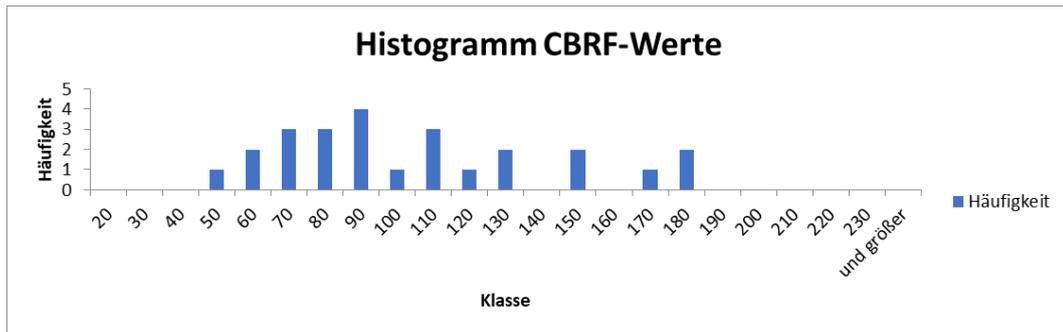


**Abb.44** Histogramme der absoluten Werte aus den CBR-Versuchen (1, 2 und F).

Wenn man die Gemische, welche sich in den untersten Klassen der Resultate genauer anschaut, stellt man fest, dass es sich dabei um für das Projekt künstlich hergestellte Mischungen handelt, welche also nicht in den Werken hergestellt wurden.

Wenn man nun also diese künstlichen Gemische der unteren Klassen aus der statistischen Analyse ausschliesst, sieht die Verteilung der verschiedenen CBR-Werte wie folgt aus:



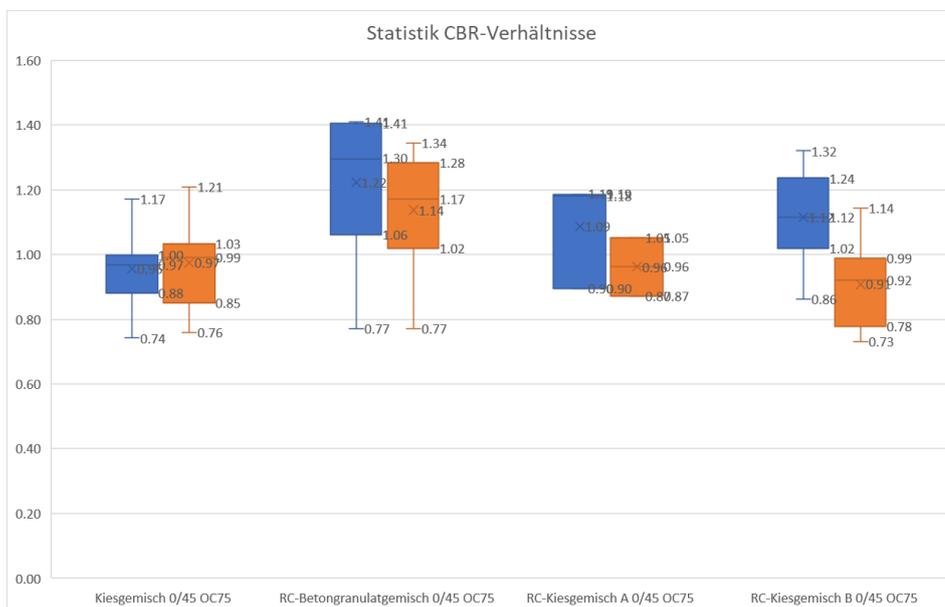


**Abb.45** Histogramm der absoluten CBR-Werte nach Ausschluss der tiefsten Werte (d.h. Ausschluss der künstlich hergestellten Mischungen in den untersten Klassen).

Das Ergebnis dieser Bereinigung fällt für alle CBR-Werte so aus, dass sich nun Wertebereiche ergeben, welche CBR-Werte > 50 CBR-% zeigen. Mit diesen Betrachtungen liesse sich ein Minimalwert von 40 CBR-% durchaus argumentieren. Umso mehr als sich die Mischungen mit den Feinanteilen ab Werk in der Praxis bewährt haben. Was aufgrund der Untersuchungsergebnisse nicht beurteilt werden kann, ist ob mit der Definition einer Untergrenze eben nicht allenfalls in der Praxis bewährte Gemische ausgeschlossen werden und es ist auch nicht klar, ob eine Erhöhung des CBR-Verhältnisses zwingend notwendig ist und die Qualität der Gemische wirklich verbessert.

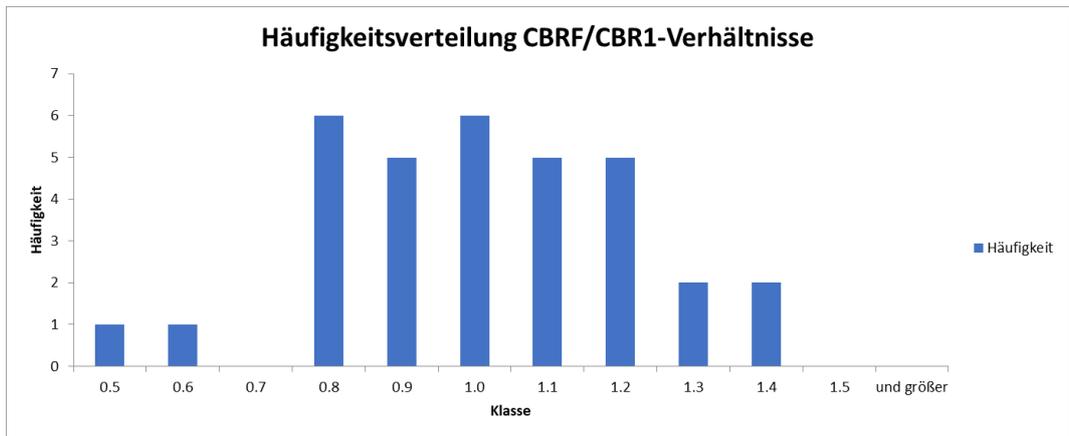
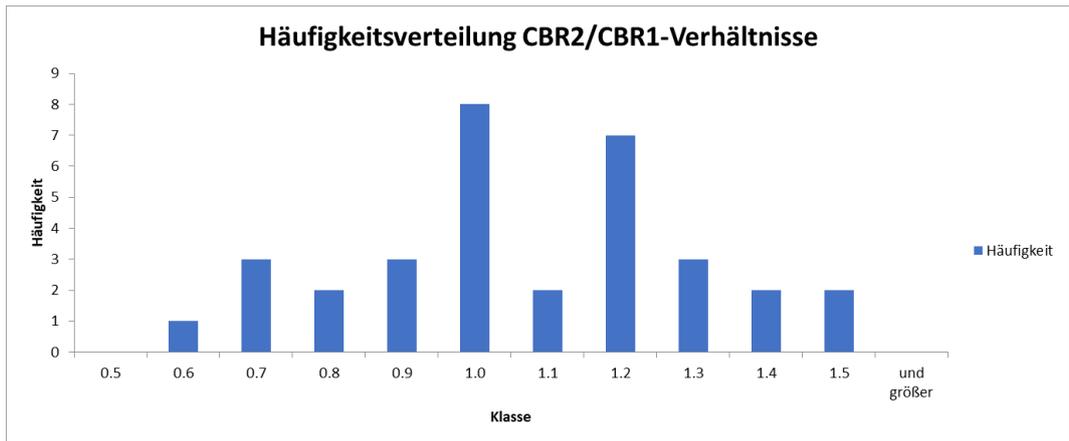
## 11.2 Erhöhung des CBR-Verhältnisses

Die Analyse der CBR-Verhältnisse unter Weglassung der künstlich hergestellten Gemische zeigt, dass die CBR-Verhältnisse grundsätzlich höher ausfallen:



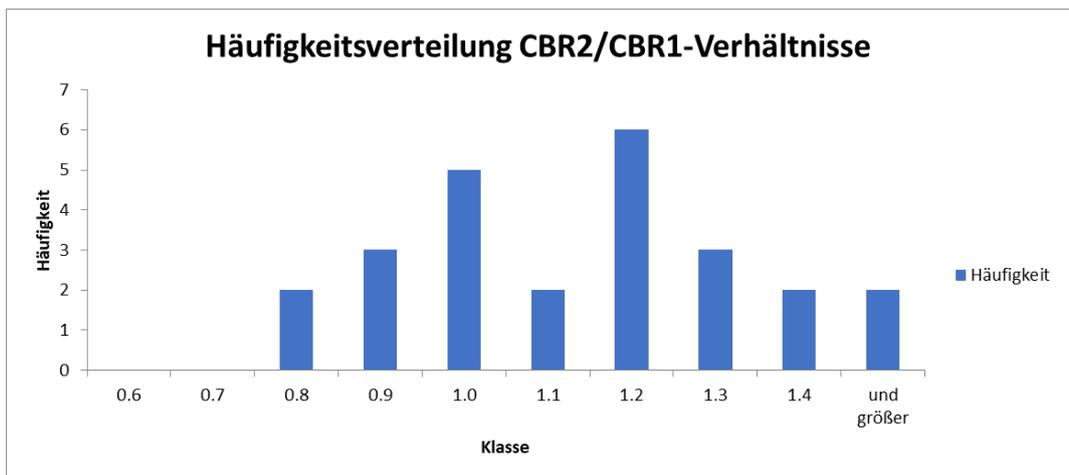
**Abb.46** statistische Auswertung der Gemische ab Werk, d.h. ohne im Labor künstlich hergestellte Mischungen.

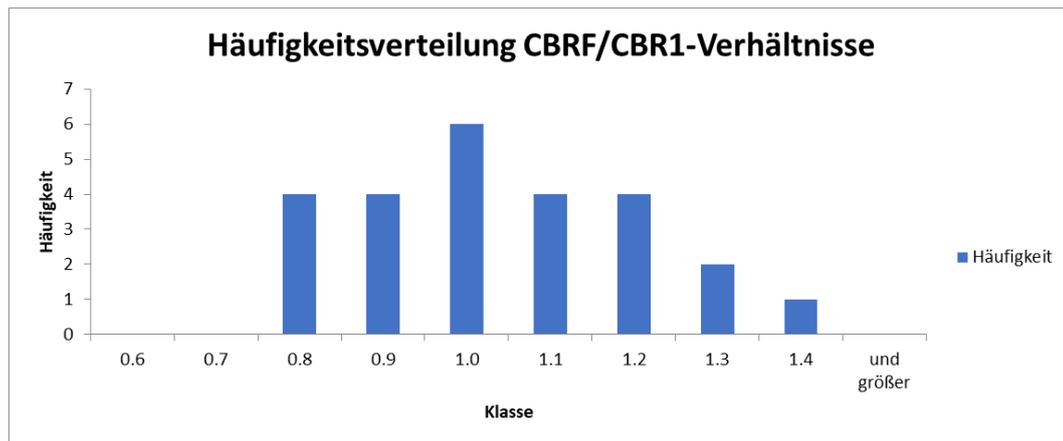
Wenn man statistischen Betrachtungen im vorhergehenden Kapitel analog auf die Verhältnisse der CBR-Werte (CBR2/CBR1 und CBRF/CBR1) anwendet, sehen die unkorrigierten Histogramme wie folgt aus:



**Abb.47** Häufigkeitsverteilung der CBR-Verhältnisse CBR2/CCR1 und CBRF/CCR1.

Ohne die Werte der im Labor künstlich hergestellten Gemische sieht die Häufigkeitsverteilung wie folgt aus:





**Abb.48** Häufigkeitsverteilung der Gemische ab Werk, d.h. ohne im Labor künstlich hergestellte Mischungen.

Mit diesen Daten könnte eine Erhöhung der CBR-Verhältnisse auf einen Wert von z.B. 0.7 durchaus argumentiert werden. Auch hier gilt, dass sich die Gemische mit Feinanteil ab Werk in der Praxis grundsätzlich bewährt haben. Auch hier kann aufgrund der Untersuchungsergebnisse nicht beurteilt werden, ob und wie viele in der Praxis bewährte Gemische durch die Erhöhung der Anforderung ausgeschlossen werden würden. In Anbetracht der Untersuchungsergebnisse ist aber auch nicht klar, ob eine Erhöhung des CBR-Verhältnisses zwingend notwendig ist und die Qualität der Gemische wirklich verbessert.



## 12 Schlussfolgerungen

Das vorliegende Forschungsprojekt hat aus unserer Sicht einige wesentliche Erkenntnisse zutage gefördert, welche nachfolgend zusammengefasst werden.

- Auswahl und Anzahl der ungebundenen Gemische im Forschungsprojekt**  
 Die untersuchten Gemische, so wie sie von den Produzenten geliefert wurden, entsprechen bis auf die Zusammensetzung der RC-Kiesgemische A den Anforderungen der SN 670 119-NA. Die Gründe für die Tatsache, dass die Zusammensetzung der RC-Kiesgemische A nicht vollständig den Anforderungen entsprechen, ist einerseits in der Probenahme ab den Versuchsfeldern zu suchen, andererseits ist allgemein bekannt, dass die Prüfung der Zusammensetzung, vor allem der Entscheid, ob ein Korn dem Asphaltanteil oder dem Kiesanteil zuzurechnen ist, mit Problemen behaftet ist. Der Umstand, dass alle Gemische die Anforderungen der SN 670 119-NA erfüllen, hat dazu beigetragen, dass die Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche im Allgemeinen homogen ausfielen und die angestrebten Unterschiede zwischen den Gemischen nicht im erhofften Masse aufgezeigt werden konnten.

Bei den RC-Gemischen wurden nur jeweils 2 bis 3 Gemische untersucht. Mit dieser geringen Anzahl an Gemischen ist es grundsätzlich schwierig, gesicherte Erkenntnisse abzuleiten. Dieser Umstand sollte in einem nächsten Forschungsprojekt berücksichtigt werden. Im Weiteren wäre es sinnvoll dabei auch Gemische zu prüfen, welche den Normanforderungen nicht genügen, damit Unterschiede klarer zutage treten können.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Gemische, wie sie ab Werk geliefert werden, die Anforderungen der SN 670 119-NA erfüllen, und zwar ohne Ausnahme. Dieser Befund wird dadurch bestätigt, dass sich diese Gemische ab Werk in der Praxis bewährt haben.

- Erkenntnisse aus den Versuchsfeldern**  
 Der Einbau der verschiedenen Gemische und die Einbau- und Tragfähigkeitskontrolle haben ergeben, dass die Gemische auch in der Praxis die gewünschten Eigenschaften bereitstellen. Einzig ein RC-Kiesgemisch A hat die Anforderungen an den Plattendruckversuch von 100 MN/m<sup>2</sup> nicht erfüllt. Wie aber das Forschungsprojekt VSS2010/401 gezeigt hat, reagiert dieses ungebundene Gemisch sehr sensibel auf die Umweltbedingungen (Temperatur Luft und Boden) während der Prüfung. Es ist wahrscheinlich, dass auch diese Gemische die Anforderungen bei vorteilhafteren Bedingungen erfüllt.

Der Vergleich zwischen den Resultaten des Verdichtungsgrades und der Tragfähigkeit hat aufgrund der relativ grossen Streubreite der Werte keinen systematischen Zusammenhang ergeben.

- Einfluss des Feinanteils auf die Eigenschaften von ungebundenen Gemischen**  
 Die Variation des Feinanteils der Gemische hat gezeigt, dass auch diese Gemische die Anforderungen der SN 670 119-NA auch erfüllen, wenn auch zuweilen knapp. Als fast ausserordentlich einzuschätzen ist, dass die Gemische mit hohem bis sehr hohem Feinanteil (bis 13.5 M.-%) die Prüfungen ebenfalls bestanden haben. Bei diesem Gemisch handelt es sich allerdings um ein Gemisch aus Jurakalken und ist damit nicht unbedingt repräsentativ für Gemische mit hohem Feinanteil.
- Die Notwendigkeit des CBRF-Versuches ist weiterhin gegeben**  
 Der Befund, dass die Variation des Feinanteils im vorliegenden Projekt keine tragende Rolle zu spielen scheint, soll allerdings nicht zur Schlussfolgerung

verleiten, dass der CBRF-Versuch nicht mehr notwendig sei. Dies aus den folgenden Gründen:

- Für die teilweise beträchtlichen Hebungswerte, welche sich beim CBRF-Versuch (und auch beim CBR2-Versuch) ergaben, können durch die vorliegende Arbeit nicht erklärt werden. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass sich eben doch quellfähige Mineralien in den Gemischen befinden, welche zu Frostschäden führen könnten. Der Ursache dieser Hebungen in ungebundenen Gemischen im CBRF-Versuch sollte daher in einem weiteren Projekt mit handelsüblichen Gemischen nachgegangen werden.
- Im Weiteren gilt es zu beachten, dass in der nächsten Generation der EN 13285 nach heutigem Stand der Dinge, eine Frostprüfung für die Qualifikation von ungebundenen Gemischen verlangt werden wird. Dies sollte ein Grund mehr sein, die bestehenden CBR-Versuche zu optimieren und vereinheitlichen, wie dies im Forschungsprojekt VSS 2011/505 [31] bereits gefordert wurde. Es gibt in den Mitgliedsländern des CEN zwar verschiedene Frostprüfungen, doch ist das Verfahren der Schweiz das Einzige, das regelmässig zur Qualifikation von ungebundenen Gemischen eingesetzt werden. Dieses Know-how sollte unseres Erachtens unbedingt in den Normierungsprozess im CEN einfließen.

- **Erhöhung des zulässigen Feinanteils für ungebundene Gemische?**

Die untersuchten ungebundenen Gemische stellen sehr robuste Systeme dar, welche auch eine Variation des Feinanteils aufnehmen können und trotzdem befriedigende bis gute Eigenschaften aufweisen. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass die Gemische mit dem Feinanteil ab Werk für das jeweilige Gemisch die besten Prüfergebnisse liefern. Die Gemische mit dem veränderten Feinanteil (Feinanteil tief und Feinanteil hoch) zeigen in der Regel tiefere CBR-Werte, erfüllen jedoch die Anforderungen. Dies bedeutet, dass der Anforderung der Korngrößenverteilungskurve in der Norm eine grosse Bedeutung bei der Qualifikation von ungebundenen Gemischen zukommt.

In Anbetracht der Resultate dieses Forschungsprojekt kann eine Erhöhung des zulässigen Feinanteils auf 5 M.-% wie im Forschungsprojekt VSS 2011/505 gefordert mit dem vorliegenden Datensatz unterstützt und in diesem Sinne argumentiert werden. Jedoch sollte dabei der Einfluss des Feinanteils und seiner Petrographie nicht ausser Acht gelassen werden. Es ist durch die Normenkommission zu prüfen, ob nicht ein kombiniertes Vorgehen, wie im Forschungsprojekt VSS 2011/505 vorgeschlagen, von Frostversuchen im Zusammenspiel mit petrographischen Abklärungen zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit vorzusehen ist. Die Klärung einer solchen Fragestellung wäre ebenfalls in einer weiteren Forschungsarbeit zu klären. Das Ziel muss sein, dass der potenziell schädliche Einfluss von quellfähigen Mineralien in ungebundenen Gemischen minimiert wird.

- **Einführung von absoluten Anforderungen an CBR-Werte und -Verhältnisse?**

Es ist im Weiteren wenig erstaunlich, dass die Gemische aus natürlichem Kies oder mit einem hohen Anteil an natürlichem Kies in etwas das gleiche Verhalten zeigen und in den Auswertungen in den gleichen Wertebereichen zu finden sind. Einzig das RC-Betongranulatgemisch zeigt ein anderes Verhalten und dadurch in den Auswertungen teilweise einen eigenen Wertebereich. Dies ist bedingt dadurch, dass der optimale Wassergehalt dieser Gemische um einiges höher ist als bei den anderen Gemischen.

Die absoluten CBR-Werte der verschiedenen Gemische zeigen einerseits teilweise beträchtliche Streuungen in den Wertebereichen. Auf der anderen Seite hat die Gegenüberstellung der wichtigsten Parameter nicht wirklich handfeste

Korrelationen ergeben. Die untersuchten Gemische waren sehr gleichmässig in ihren Eigenschaften. Es muss an dieser Stelle also die Frage gestellt werden, ob der Proctor-Versuch wie auch die CBR-Versuche genügend sensibel sind, um die entsprechenden Aussagen zu treffen können. Dieser Frage müsste, auch aufgrund der Erfahrungen des VAB (mündliche Mitteilung), müsste in weiteren Forschungsarbeiten nachgegangen werden. Auch müssten die Normen gemäss den vorliegenden Resultaten die Prüfanweisungen genauer definieren, damit die Prüfergebnisse zwischen Resultaten vergleichbar sind. Die Analyse der absoluten Werte und Verhältnisse hat ergeben, dass die tiefsten Werte von Gemischen jeweils ausnahmslos von im Labor künstlich hergestellten Gemischen stammen. Aufgrund von statistischen Betrachtungen könnte daher aufgrund der vorliegenden Resultate die Einführung von absoluten Anforderungen an die untersuchten Arten von ungebundenen Gemischen in Betracht gezogen werden. Aufgrund der statistischen Betrachtungen könnte ein absoluter Wert von 40 CBR-% als Minimum analog der alten Kiessandnorm SN 670 120d definiert werden. Die CBR-Verhältnisse könnten mit den gleichen Begründungen und Betrachtungen auf 0.7 angehoben werden. Da jedoch die Palette von ungebundenen Gemischen grösser ist, als die Gemischarten, welche in diesem Projekt untersucht wurden, müsste diese Einführung sehr sorgfältig abgewogen werden. Es ist nicht klar, ob eine allfällige Einführung von absoluten Werten die Qualität der ungebundenen Gemische zwingend erhöht, in Anbetracht der Anforderung an die Korngrössenverteilungskurve, welche sehr zentral für die Qualität zu sein scheint.

- **Konditionierungsfristen der Proben für Proctor- und CBR-Versuche**  
Bei den ersten Vergleichsversuchen zwischen Laboren haben sich Unterschiede in den absoluten CBR-Werten ergeben, welche sich auf die unterschiedlichen Konditionierungsfristen zurückführen lassen. Auch hier sollten die Normen konkrete Vorschriften machen, um die Prüfergebnisse vergleichbar zu halten. Aus praktischen Gründen (Kosten und Zeit) sollte von zu langen Konditionierungsfristen abgesehen werden.



## 13 Weiterer Forschungsbedarf

Das vorliegende Forschungsprojekt hat einige Fragen aufgeworfen, welche es unseres Erachtens verdienen, genauer untersucht zu werden.

Dabei sollten die folgenden grundsätzlichen Überlegungen in Erwägung gezogen werden:

- **Auswahl und Anzahl von ungebundenen Gemischen**  
Um statistische Überlegungen anzustellen, sollte vermieden werden, dass die Anzahl der Gemische zu gering ist. Je nach Fragestellung sollte jeweils geprüft werden, ob die Verwendung von nichtkonformen Gemischen unter Umständen gesicherte Aussagen erst ermöglicht. Im Weiteren sollte jeweils geprüft werden, ob nicht alle nach Norm möglichen Gemische untersucht werden sollen, um die Gesamtheit der Gemische beurteilen zu können.

Konkreter Forschungsbedarf hat sich in den folgenden Themen ergeben:

- **Proctor-Versuch SN EN 13286-2**  
In einem Ringversuch zum Proctorversuch hat man im VAB festgestellt, dass es einige noch ungeklärte Einflussfaktoren auf das Prüfergebnis (optimaler Wassergehalt und maximale Trockendichte, mündliche Mitteilung) gibt. So wurde beispielsweise festgestellt, dass die Ergebnisse der Labore für die maximale Trockendichte in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Solche mit hohen (realistischen) Werten und solche mit niedrigeren Werten. Die Analyse der Gerätschaften und des Einbaus des Materials in den Proctortopf hat ergeben, dass diese Einflussfaktoren und die entsprechenden Massnahmen noch nicht fertig bestimmt sind. Das Forschungsprojekt VSS2015/313 [32] hat diese Feststellung auch bestätigt. Damit die Ergebnisse aus dem Proctor-Versuch von verschiedenen Laboren verglichen werden können, müssen die Einflussfaktoren genauer untersucht werden und verbindliche Vorgaben für das Prüfverfahren festgelegt werden.

Der Einfluss von verschiedenen Konditionierungszeiten auf die Resultate des Proctor-Versuches müssten genauer abgeklärt werden. Die vorliegenden Resultate zeigen, dass diese Zeit einen Einfluss auf das Prüfergebnis hat. Die Konditionierungszeit muss durch die entsprechende Norm vorgegeben werden, damit die Resultate untereinander vergleichbar bleiben.

- **CBR-Versuche SN EN 13286-47 und VSS 70 321**  
Die Ergebnisse aus dem vorliegenden Forschungsprojekt lassen den Schluss zu, dass die Einflussfaktoren aus dem Proctor-Versuch und damit grundsätzlich auch den Einbau des Materials für die CBR-Versuche einen Einfluss auf den resultierenden CBR-Wert haben. Diese Schlussfolgerung wird indirekt durch das Forschungsprojekt VSS2015/313 (allerdings an hydraulisch gebundenen Gemischen) bestätigt. Um Schwankungen der CBR-Werte abzuklären, müssten mehrere Prüfkörper (analog den Prüfungen für hydraulisch gebundene Gemische) hergestellt und geprüft werden. Ein solches Vorgehen würde wohl auch erlauben, die Grenzen des Prüfverfahrens besser zu bestimmen.

Auch bei den CBR-Versuchen müsste der Einfluss von verschiedenen Konditionierungszeiten auf die resultierenden CBR-Werte genauer abgeklärt werden. Diese Zeit hat gemäss den vorliegenden Resultaten einen Einfluss auf das Prüfergebnis. Damit die Resultate untereinander verglichen werden können, muss die Konditionierungszeit durch die Normen vorgegeben werden.

Die Bedeutung der Hebung der Prüfkörper durch die Wasserlagerung und/oder die Frostbeanspruchung konnten mit der vorliegenden Arbeit nicht geklärt werden. Ob diese, in einzelnen Fällen sehr hohen Hebungswerte, durch das Material (Ton, Silt)

oder auch durch das Prüfverfahren (CBRF-Prüfgerät) bedingt sind, müssten in einem entsprechenden Forschungsvorhaben untersucht werden. Hierbei müsste auch die untersucht werden, ob es eine Kombination von verschiedenen Parametern, z.B. Hebungsraten und CBR-Werte oder Hebungsraten und petrographische Untersuchungen braucht, um die Frostbeständigkeit beurteilen zu können oder ob beispielsweise die CBR-Werte die Beurteilung bereits abdecken, resp. ermöglichen.

# Anhänge

<b>I</b>	<b>Daten der Einbau- und Tragfähigkeitskontrolle auf den Versuchsfeldern .....</b>	<b>103</b>
<b>II</b>	<b>Daten der Laborversuche.....</b>	<b>105</b>
<b>III</b>	<b>Daten der Proctor- und CBR-Versuche.....</b>	<b>111</b>
III.1	Daten Proctorversuche .....	111
III.2	Daten CBR-Versuche (CBR1, CBR2 und CBRF) .....	112



# I Daten der Einbau- und Tragfähigkeitskontrolle auf den Versuchsfeldern

**Tab. 1** Resultate der Verdichtungskontrolle mit der Isotopensonde

Verdichtungskontrolle Isotopensonde			Sollwerte		Mittelwerte der Messungen			
Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Wassergehalt [M.-%]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt [M.-%]	Feuchtdichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Verdichtungsgrad [%]
KG-1	6	Vorberg	4.7	2.320	4.7	2.328	2.224	95.7
KG-2	7	Wilchingen	5.3	2.300	3.4	2.220	2.148	93.5
KG-3	8	Monthey	4.0	2.330	3.4	2.201	2.164	92.8
KG-4	10	Cazis	5.6	2.220	3.8	2.264	2.181	98.2
RCB-1	3	Rubigen	7.7	2.170	6.1	2.258	2.128	98.0
RCB-2	4	Rümlang	6.2	2.240	4.9	2.298	2.190	98.0
RCB-3	5	Mörel	7.2	2.180	5.1	2.275	2.164	99.1
RCA-1	9	Oberglatt	5.8	2.120	5.1	2.103	2.001	94.4
RCA-2	11	Untersiggenthal	6.4	2.110	7.7	2.181	2.025	95.9
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	9.3	2.070	9.3	2.045	1.871	90.6
RCBGG-2	2	Regensdorf	8.7	2.090	8.7	2.122	1.952	93.4

**Tab. 2** Resultate der Plattendruckversuche ( $M_E$ -Versuch)

$M_E$ -Versuche (VSS 70 317)			Messpunkt 1			Messpunkt 2			Messpunkt 3			Mittelwert pro Gemisch			Mittelwert Gemischtart		
Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	$M_{E1}$	$M_{E2}$	$M_{E2}/M_{E1}$	$M_{E1}$	$M_{E2}$	$M_{E2}/M_{E1}$	$M_{E1}$	$M_{E2}$	$M_{E2}/M_{E1}$	MW $M_{E1}$	MW $M_{E2}$	MW $M_{E2}/M_{E1}$	MW $M_{E1}$	MW $M_{E2}$	MW $M_{E2}/M_{E1}$
KG-1	6	Vorberg	92.0	204.7	2.2	104.2	228.8	2.2	116.8	344.8	3.0	104.3	259.4	2.5	118.1	240.3	2.0
KG-2	7	Wilchingen	105.7	229.6	2.2	123.1	240.0	1.9	117.8	249.8	2.1	115.5	239.8	2.1			
KG-3	8	Monthey	109.7	212.0	1.9	103.7	219.4	2.1	131.7	253.1	1.9	115.0	228.2	2.0			
KG-4	10	Cazis	135.0	202.5	1.5	132.4	215.4	1.6	144.6	282.9	2.0	137.3	233.6	1.7			
RCB-1	3	Rubigen	107.3	208.1	1.9	114.0	201.3	1.8	100.9	204.5	2.0	107.4	204.6	1.9	110.9	187.8	1.7
RCB-2	4	Rümlang	129.5	206.2	1.6	114.0	185.8	1.6	129.5	211.5	1.6	124.3	201.2	1.6			
RCB-3	5	Mörel	86.7	145.2	1.7	98.6	148.8	1.5	117.3	178.4	1.5	100.9	157.5	1.6			
RCA-1	9	Oberglatt	99.6	221.2	2.2	103.1	195.8	1.9	105.5	189.6	1.8	102.7	202.2	2.0	90.7	195.4	2.2
RCA-2	11	Untersiggenthal	79.7	191.8	2.4	82.2	202.4	2.5	73.8	171.7	2.3	78.6	188.6	2.4			
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	118.2	184.5	1.6	114.4	214.5	1.9	111.9	209.8	1.9	114.8	202.9	1.8	114.9	195.8	1.7
RCBGG-2	2	Regensdorf	97.9	167.6	1.7	117.7	192.0	1.6	129.3	206.2	1.6	115.0	188.6	1.6			

## II Daten der Laborversuche

**Tab. 3** Resultate der Bestimmung der Korngrößenverteilung aller Gemische, geordnet nach Sieböffnung

**Korngrößenverteilung SN EN 933-1**

Bezeichnung Gemisch	KG-1	KG-2	KG-3	KG-3 W	KG-4	RCB1	RCB-2	RCB-3	RCA-1	RCA-2	RCBGG-1	RCBGG-2	Mittel
Herkunft	Vorberg	Wilchingen	Monthey	Monthey	Cazis	Rubigen	Rümlang	Mörel	Oberglatt	Untersiggenthal	Littau-Emmen	Regensdorf	alle Gemische
Sieböffnung [mm]	Durchgang [M.-%]												
90			100.0				100.0				100.0		100.0
63	100.0	100.0	93.4	100.0	100.0	100.0	99.0	100.0	100.0	100.0	93.0	100.0	98.7
45	98.6	97.9	82.6	88.2	93.4	98.8	97.7	94.6	96.8	99.6	84.6	98.7	94.8
31.5	89.4	85.3	67.7	75.3	86.6	93.0	90.7	83.5	90.7	93.3	76.4	90.3	86.1
22.4	75.3	78.5	54.0	64.4	76.3	85.5	83.3	75.7	85.0	85.9	68.8	77.8	76.9
16	63.1	71.6	42.9	55.5	65.8	75.3	74.6	69.6	77.8	76.5	61.1	63.6	67.4
11.2	53.7	61.6	33.9	45.9	57.6	62.6	62.6	59.7	67.8	67.0	54.4	50.8	57.4
8	44.7	51.3	27.0	38.1	49.2	53.5	53.2	52.9	58.9	57.2	47.2	42.1	48.8
5.6	36.6	43.1	20.8	30.6	44.0	44.2	44.9	46.5	50.3	46.6	40.2	34.9	41.1
4	31.4	37.4	16.6	24.4	40.0	38.6	39.3	42.1	44.4	37.4	35.2	29.8	35.7
2	23.7	29.3	11.1	16.4	28.9	29.3	30.5	34.6	33.5	25.4	26.5	22.1	26.8
1	18.6	24.8	7.9	11.3	22.5	22.8	24.3	28.4	24.9	17.5	19.8	16.9	20.8
0.5	15.4	20.7	6.1	8.5	15.4	17.1	19.4	22.8	17.8	12.5	14.5	12.7	15.9
0.25	13.5	12.8	4.9	6.7	7.6	11.8	14.8	17.5	11.5	7.5	10.1	8.7	11.0
0.125	12.1	7.6	3.9	5.3	4.2	8.3	10.9	12.2	7.5	4.7	7.0	5.7	7.6
0.063	10.9	5.9	3.1	4.2	2.4	6.2	8.0	8.4	5.5	3.7	5.0	3.9	5.7

W = Wiederholung

**Tab. 4** Resultate der Bestimmung der Korngrößenverteilung aller Gemische, geordnet nach Gemisch

Korngrößenverteilung SN EN 933-1			Sieböffnung [mm]															
Bezeichnung Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	90	63	45	31.5	22.4	16	11.2	8	5.6	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
KG-1	6	Vorberg		100.0	98.6	89.4	75.3	63.1	53.7	44.7	36.6	31.4	23.7	18.6	15.4	13.5	12.1	10.9
KG-2	7	Wilchingen		100.0	97.9	85.3	78.5	71.6	61.6	51.3	43.1	37.4	29.3	24.8	20.7	12.8	7.6	5.9
KG-3	8	Monthey	100.0	93.4	82.6	67.7	54.0	42.9	33.9	27.0	20.8	16.6	11.1	7.9	6.1	4.9	3.9	3.1
KG-3 W	8	Monthey		100.0	88.2	75.3	64.4	55.5	45.9	38.1	30.6	24.4	16.4	11.3	8.5	6.7	5.3	4.2
KG-4	10	Cazis		100.0	93.4	86.6	76.3	65.8	57.6	49.2	44.0	40.0	28.9	22.5	15.4	7.6	4.2	2.4
RCB1	3	Rubigen		100.0	98.8	93.0	85.5	75.3	62.6	53.5	44.2	38.6	29.3	22.8	17.1	11.8	8.3	6.2
RCB-2	4	Rümlang	100.0	99.0	97.7	90.7	83.3	74.6	62.6	53.2	44.9	39.3	30.5	24.3	19.4	14.8	10.9	8.0
RCB-3	5	Mörel		100.0	94.6	83.5	75.7	69.6	59.7	52.9	46.5	42.1	34.6	28.4	22.8	17.5	12.2	8.4
RCA-1	9	Oberglatt		100.0	96.8	90.7	85.0	77.8	67.8	58.9	50.3	44.4	33.5	24.9	17.8	11.5	7.5	5.5
RCA-2	11	Untersiggenthal		100.0	99.6	93.3	85.9	76.5	67.0	57.2	46.6	37.4	25.4	17.5	12.5	7.5	4.7	3.7
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	100.0	93.0	84.6	76.4	68.8	61.1	54.4	47.2	40.2	35.2	26.5	19.8	14.5	10.1	7.0	5.0
RCBGG-2	2	Regensdorf		100.0	98.7	90.3	77.8	63.6	50.8	42.1	34.9	29.8	22.1	16.9	12.7	8.7	5.7	3.9
<b>Mittelwert</b>		<b>alle Gemische</b>	100.0	98.7	94.8	86.1	76.9	67.4	57.4	48.8	41.1	35.7	26.8	20.8	15.9	11.0	7.6	5.7

W = Wiederholung

**Tab. 5** Resultate der Bestimmung der Plattigkeitskennzahl

Plattigkeitskennzahl (SN EN 933-3)			Plattigkeitskennzahl FI						
Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Fraktion 4/8	Fraktion 8/16	Fraktion 16/32	Fraktion 32/max	Gemisch	höchste Kategorie	Grenzwert
KG-1	6	Vorberg	17	13	9	6	8	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
KG-2	7	Wilchingen	14	13	15	9	12	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
KG-3	8	Monthey	30	30	25	21	24	Fl <sub>35</sub>	Fl <sub>35</sub>
KG-4	10	Cazis	16	20	25	23	24	Fl <sub>35</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCB-1	3	Rubigen	10	10	13	15	13	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCB-2	4	Rümlang	13	11	11	4	9	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCB-3	5	Mörel	14	20	17	20	18	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCA-1	9	Oberglatt	5	6	5	2	4	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCA-2	11	Untersiggenthal	9	8	9	5	8	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	9	7	8	5	7	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>
RCBGG-2	2	Regensdorf	7	4	5	4	5	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>35</sub>

**Tab. 6** Resultate der Bestimmung des Anteils gebrochener Körner

Anteil gebrochene Körner (SN EN 933-5)			Anteil gebrochene Körner				Kategorie Gemisch
Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	vollständig gebrochen C <sub>tc</sub> [M-%]	vollständig und teilweise gebrochen C <sub>c</sub> [M-%]	vollständig gerundet C <sub>tr</sub> [M-%]	vollständig und teilweise gerundet C <sub>r</sub> [M-%]	
KG-1	6	Vorberg	77	100	0	0	C <sub>90/3</sub>
KG-2	7	Wilchingen	12	52	17	48	C <sub>50/30</sub>
KG-3	8	Monthey	86	100	0	0	C <sub>90/3</sub>
KG-4	10	Cazis	2	10	44	90	C <sub>NR/50</sub>
RCB-1	3	Rubigen	27	72	9	28	C <sub>50/10</sub>
RCB-2	4	Rümlang	26	67	14	23	C <sub>50/30</sub>
RCB-3	5	Mörel	71	95	1	5	C <sub>90/3</sub>
RCA-1	9	Oberglatt	27	46	34	54	C <sub>NR/50</sub>
RCA-2	11	Untersiggenthal	41	66	16	34	C <sub>50/30</sub>
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	79	90	4	10	C <sub>50/10</sub>
RCBGG-2	2	Regensdorf	57	72	16	32	C <sub>50/30</sub>

**Tab. 7** Resultate der Bestimmung der Bestandteile rezyklierter Gesteinskörnung

## Bestandteile rezyklierter Gesteinskörnung (SN EN 933-11)

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Ra [%]	Grenzwert [%]	Rb [%]	Grenzwert [%]	Rc [%]	Grenzwert [%]	Ru [%]	Grenzwert [%]	Rg [%]	X [%]	FL [cm <sup>3</sup> ]	Anforderungen erfüllt?
RCB-1	3	Rubigen	0.6	≤ 4	0.0	≤ 1	23.0	≤ 30	76.4	≥ 70	0.0	0.0	0.0	ja
RCB-2	4	Rümlang	0.0	≤ 4	0.0	≤ 1	7.2	≤ 30	92.8	≥ 70	0.0	0.0	0.0	ja
RCB-3	5	Mörel	0.5	≤ 4	0.0	≤ 1	14.5	≤ 30	85.0	≥ 70	0.0	0.0	0.0	ja
RCA-1	9	Oberglatt	34.4	≤ 30	0.3	≤ 1	13.5	≤ 4	51.8	≥ 70	0.0	0.0	0.0	nein
RCA-2	11	Untersiggenthal	24.1	≤ 30	0.0	≤ 1	11.7	≤ 4	64.2	≥ 70	0.0	0.0	0.0	nein
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	0.1	≤ 4	0.0	≤ 2	88.9	≥ 30	11.0	≤ 70	0.0	0.0	0.0	ja
RCBGG-2	2	Regensdorf	0.0	≤ 4	0.0	≤ 2	72.2	≥ 30	27.8	≤ 70	0.0	0.0	0.0	ja

**Tab. 8** Resultate des Los-Angeles-Versuches**Widerstand gegen Zertrümmerung - Los Angeles-Versuch (SN EN 1097-2)**

<b>Gemisch</b>	<b>Versuchs- feld</b>	<b>Herkunft</b>	<b>Fraktion 4/8</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Fraktion 11/16</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Grenz- wert</b>
KG-1	6	Vorberg	26	LA <sub>30</sub>	27	LA <sub>30</sub>	LA <sub>40</sub>
KG-2	7	Wilchingen	23	LA <sub>25</sub>	20	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
KG-3	8	Monthey	20	LA <sub>20</sub>	18	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
KG-4	10	Cazis	26	LA <sub>30</sub>	14	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
RCB-1	3	Rubigen	24	LA <sub>25</sub>	21	LA <sub>25</sub>	LA <sub>40</sub>
RCB-2	4	Rümlang	23	LA <sub>25</sub>	21	LA <sub>25</sub>	LA <sub>40</sub>
RCB-3	5	Mörel	37	LA <sub>40</sub>	40	LA <sub>40</sub>	LA <sub>40</sub>
RCA-1	9	Oberglatt	19	LA <sub>20</sub>	18	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
RCA-2	11	Untersiggenthal	20	LA <sub>20</sub>	20	LA <sub>20</sub>	LA <sub>40</sub>
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	29	LA <sub>30</sub>	30	LA <sub>30</sub>	LA <sub>40</sub>
RC-BGG-2	2	Regensdorf	26	LA <sub>30</sub>	25	LA <sub>25</sub>	LA <sub>40</sub>

### III Daten der Proctor- und CBR-Versuche

#### III.1 Daten Proctorversuche

**Tab. 9** Resultate der Bestimmung des optimalen Wassergehaltes und der maximalen Trockendichte

Optimaler Wassergehalt und maximale Trockendichte - Proctorversuch (SN EN 13286-2)

Gemisch	Versuchsfeld	Herkunft	Versuchstyp	Dichte Feinsubstanz [Mg/m <sup>3</sup> ]	Überkorn > 16 mm [M-%]	Wassergehalt Überkorn [M-%]	Feinanteil [M-%]	Verdichtungsenergie [kNm]	Konditionierungszeit [min]	Wassergehalt Proctorversuch 1 [M-%]	Feuchtdichte Proctorversuch 1 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte Proctorversuch 1 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Proctorversuch 2 [M-%]	Feuchtdichte Proctorversuch 2 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte Proctorversuch 2 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Proctorversuch 3 [M-%]	Feuchtdichte Proctorversuch 3 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte Proctorversuch 3 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Proctorversuch 4 [M-%]	Feuchtdichte Proctorversuch 4 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte Proctorversuch 4 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Proctorversuch 5 [M-%]	Feuchtdichte Proctorversuch 5 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte Proctorversuch 5 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Proctorversuch 6 [M-%]	Feuchtdichte Proctorversuch 6 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte Proctorversuch 6 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Proctorversuch 7 [M-%]	Feuchtdichte Proctorversuch 7 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte Proctorversuch 7 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt Proctorversuch 8 [M-%]	Feuchtdichte Proctorversuch 8 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte Proctorversuch 8 [Mg/m <sup>3</sup> ]	optimaler Wassergehalt [M-%]	maximale Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt korrigiert optimaler [Mg/m <sup>3</sup> ]	maximale Trockendichte korrigiert [Mg/m <sup>3</sup> ]	Saugungsgrad S <sub>r</sub> [%]				
KG-1	6	Vorberg	FA tief	2.720	34.9	1.0	8.9	1.2	24h	5.0	2.271	2.163	5.9	2.384	2.251	6.8	2.418	2.265	7.5	2.415	2.245	8.4	2.405	2.218	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.8	2.265	4.8	2.329	91.9				
KG-1	6	Vorberg	FA Werk	2.720	36.9	1.0	10.9	1.2	24h	4.5	2.277	2.179	5.5	2.406	2.279	5.6	2.408	2.281	6.4	2.436	2.290	6.7	2.449	2.295	7.4	2.427	2.260	-	-	-	-	-	-	-	6.7	2.295	4.6	2.351	98.4			
KG-1	6	Vorberg	FA hoch	2.720	39.5	1.0	13.5	1.2	24h	4.9	2.280	2.170	5.8	2.334	2.259	6.8	2.329	2.252	7.6	2.317	2.231	8.2	2.304	2.211	6.4	2.339	2.268	-	-	-	-	-	-	-	6.4	2.268	4.2	2.339	86.7			
KG-2	7	Willingen	FA tief	2.690	27.2	1.0	4.3	1.2	24h	4.7	2.196	2.099	5.6	2.250	2.130	6.4	2.301	2.162	7.3	2.353	2.194	8.1	2.357	2.181	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.3	2.194	5.6	2.256	86.4		
KG-2	7	Willingen	FA Werk	2.690	28.4	1.0	5.9	1.2	24h	4.6	2.316	2.215	4.9	2.345	2.236	5.7	2.376	2.249	6.4	2.385	2.242	7.2	2.396	2.236	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.0	2.249	4.6	2.298	82.2		
KG-2	7	Willingen	FA hoch	2.690	30.7	1.0	8.2	1.2	24h	5.1	2.308	2.196	5.5	2.361	2.237	6.1	2.370	2.234	6.5	2.390	2.245	6.9	2.394	2.239	7.7	2.396	2.224	-	-	-	8.7	2.346	2.156	-	-	-	6.5	2.246	4.8	2.299	87.6	
KG-3	8	Monthey	FA tief	2.720	55.4	1.0	1.4	1.2	24h	4.1	2.032	1.951	5.0	2.099	1.990	5.4	2.056	1.951	5.7	1.993	1.885	6.2	2.133	2.009	7.0	2.123	1.984	7.5	2.148	1.997	8.1	2.116	1.958	6.2	2.010	3.2	2.253	47.4				
KG-3	8	Monthey	FA Werk	2.720	57.1	1.0	3.1	1.2	24h	4.7	2.261	2.160	5.7	2.336	2.211	7.0	2.386	2.230	7.7	2.392	2.221	8.5	2.371	2.186	9.7	2.315	2.110	-	-	-	-	-	-	-	7.0	2.230	3.6	2.354	86.7			
KG-3	8	Monthey	FA hoch	2.720	59.2	1.0	5.2	1.2	24h	4.6	2.221	2.122	5.4	2.273	2.158	5.5	2.272	2.157	5.9	2.255	2.130	6.3	2.315	2.178	6.8	2.379	2.226	7.2	2.348	2.190	-	-	-	-	-	6.8	2.226	3.4	2.358	84.0		
KG-4	10	Cazis	FA tief	2.670	32.7	1.0	0.9	1.2	24h	2.9	2.100	2.040	3.9	2.126	2.046	4.9	2.161	2.059	5.4	2.135	2.026	5.8	2.169	2.049	6.9	2.175	2.034	-	-	-	-	-	-	-	4.9	2.059	3.6	2.177	44.2			
KG-4	10	Cazis	FA Werk	2.670	34.2	1.0	2.4	1.2	24h	1.4	2.155	2.125	2.7	2.196	2.139	3.8	2.217	2.136	4.8	2.235	2.133	5.6	2.250	2.131	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.6	2.138	2.7	2.229	38.6		
KG-4	10	Cazis	FA hoch	2.670	36.2	1.0	4.4	1.2	24h	4.8	2.216	2.115	5.7	2.263	2.142	6.6	2.318	2.174	7.0	2.329	2.176	7.2	2.361	2.202	7.7	2.341	2.175	-	-	-	-	-	-	-	-	7.2	2.202	5.0	2.275	90.6		
RCB-1	3	Rubigen	FA tief	2.680	23.2	1.4	4.7	1.2	72h	5.1	2.083	1.982	6.0	2.168	2.046	6.9	2.239	2.093	7.8	2.270	2.107	8.2	2.336	2.159	8.6	2.332	2.146	9.2	2.334	2.138	-	-	-	-	-	8.2	2.160	6.5	2.222	90.8		
RCB-1	3	Rubigen	FA Werk	2.680	24.7	1.4	6.2	1.2	72h	5.8	2.215	2.094	6.6	2.256	2.117	7.6	2.310	2.147	8.5	2.313	2.132	9.3	2.321	2.124	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.6	2.147	6.1	2.212	82.0		
RCB-1	3	Rubigen	FA hoch	2.680	26.6	1.4	8.1	1.2	72h	4.0	2.035	1.957	6.0	2.062	1.945	7.8	2.162	2.005	9.6	2.286	2.086	11.3	2.254	2.024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.6	2.086	7.4	2.173	90.1	
RCB-2	4	Rümlang	FA tief	2.690	23.0	1.4	5.9	1.2	72h	4.7	2.201	2.101	5.8	2.288	2.144	6.7	2.351	2.204	7.4	2.387	2.223	8.2	2.389	2.190	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.4	2.226	6.0	2.268	94.4	
RCB-2	4	Rümlang	FA Werk	2.690	25.4	1.4	8.3	1.2	72h	6.8	2.296	2.150	7.2	2.367	2.208	7.7	2.348	2.180	8.0	2.348	2.174	8.9	2.339	2.148	9.4	2.331	2.132	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.7	2.184	6.1	2.244	89.5	
RCB-2	4	Rümlang	FA hoch	2.690	27.6	1.4	10.5	1.2	72h	4.1	2.094	2.011	5.9	2.133	2.015	6.9	2.199	2.057	8.5	2.326	2.144	9.1	2.320	2.127	9.6	2.324	2.120	11.1	2.279	2.052	-	-	-	-	-	-	8.5	2.145	6.5	2.220	89.5	
RCB-3	5	Mörel	FA tief	2.689	28.4	1.2	6.4	1.2	72h	6.1	2.216	2.090	7.1	2.253	2.104	7.9	2.297	2.129	8.9	2.290	2.102	9.6	2.310	2.107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.9	2.130	6.0	2.212	80.9	
RCB-3	5	Mörel	FA Werk	2.689	30.4	1.2	8.4	1.2	72h	7.5	2.287	2.127	7.8	2.300	2.133	8.2	2.311	2.135	9.4	2.318	2.118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.2	2.135	6.1	2.222	84.9	
RCB-3	5	Mörel	FA hoch	2.689	32.6	1.2	10.6	1.2	72h	6.7	2.156	2.020	7.9	2.256	2.090	8.7	2.256	2.076	9.9	2.254	2.051	11.5	2.241	2.010	13.1	2.208	1.952	14.7	2.186	1.906	-	-	-	-	-	-	7.9	2.090	5.7	2.198	74.3	
RCA-1	9	Oberglatt	FA tief	2.580	20.5	1.0	3.8	1.2	24h	4.0	2.053	1.975	4.9	2.076	1.979	5.8	2.105	1.989	6.8	2.161	2.024	7.6	2.188	2.033	8.5	2.204	2.032	9.0	2.207	2.025	-	-	-	-	-	-	7.6	2.033	6.3	2.093	73.2	
RCA-1	9	Oberglatt	FA Werk	2.580	22.2	1.0	5.5	1.2	24h	5.8	2.194	2.074	6.1	2.228	2.118	7.1	2.268	2.118	7.4	2.258	2.118	7.4	2.258	2.102	7.6	2.258	2.098	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.8	2.121	5.5	2.165	81.0	
RCA-1	9	Oberglatt	FA hoch	2.580	24.2	1.0	7.5	1.2	24h	5.0	2.073	1.974	5.9	2.143	2.023	6.8	2.196	2.056	7.6	2.241	2.082	8.6	2.246	2.088	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.6	2.082	6.0	2.141	82.4	
RCA-2	11	Untersiggenthal	FA tief	2.619	21.9	1.0	2.1	1.2	24h	5.0	2.036	1.939	6.3	2.060	1.938	6.8	2.091	1.958	7.4	2.097	1.953	7.7	2.121	1.971	7.9	2.102	1.949	8.3	2.153	1.988	-	-	-	-	-	-	7.6	1.971	6.2	2.056	60.9	
RCA-2	11	Untersiggenthal	FA Werk	2.619	23.5	1.0	3.7	1.2	24h	6.1	2.160	2.036	7.0	2.219	2.075	7.9	2.246	2.082	8.9	2.241	2.057	10.1	2.203	2.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.9	2.082	6.3	2.147	79.9
RCA-2	11	Untersiggenthal	FA hoch	2.619	25.6	1.0	5.8	1.2	24h	5.8	2.092	1.977	6.8	2.153	2.030	7.6	2.183	2.030	8.4	2.236	2.062	9.2	2.216	2.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.4	2.062	6.5	2.138	81.9
RCBG-1	1	Littau-Emmen	FA tief	2.630	38.8	1.8	3.9	1.2	72h	8.3	1.915	1.768	9.5	1.991	1.818	10.3	2.018	1.829	11.2	2.069	1.860	12.0	2.107	1.882	13.5	2.177	1.918	15.2	2.166	1.880	-	-	-	-	-	-	13.5	1.918	8.8	2.098	95.6	
RCBG-1	1	Littau-Emmen	FA Werk	2.630	38.9	1.8	5.0	1.2	72h	12.5	2.041	1.814	13.4	2.100	1.852	14.0	2.135	1.873	15.0	2.132	1.854	16.5	2.114	1.814	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.0	1.873	9.3	2.065	91.0
RCBG-1	1	Littau-Emmen	FA hoch	2.630	41.0	1.8	7.1	1.2	72h	10.2	1.925	1.747	12.4	2.002	1.781	13.5	2.063	1.818	14.5	2.096	1.831	15.1	2.133	1.854	16.0	2.138	1.843	17.1	2.122	1.812	17.9	2.120	1.797	15.1	1.854	9.6	2.065	94.7				
RCBG-2	2	Regensdorf	FA tief	2.648	34.1	1.8	1.6	1.2	72h	8.1	2.012	1.860	8.3	2.054	1.896	9.7	2.060	1.877	10.1	2.087	1.896	10.2	2.129	1.932	10.9	2.183	1.968	11.8	2.205	1.971	13.2	2.199	1.944	11.8	1.972	8.2	2.122	91.3				
RCBG-2	2	Regensdorf	FA Werk	2.648	36.4	1.8	3.9	1.2	72h	10.7	2.045	1.848	11.7	2.132	1.908	12.3	2.126	1.893	13.5	2.154	1.898	15.5	2.169	1.878	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.4	1.907	9.2	2.080	91.4	
RCBG-2	2	Regensdorf	FA hoch	2.648	38.1	1.8	5.6	1.2	72h	8.5	2.003	1.768	10.4	2.003	1.769	12.6	2.016	1.789	14.5	2.056	1.854	16.2	2.040	1.829	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.5	1.854	9.7	2.056	89.7	

### III.2 Daten CBR-Versuche (CBR1, CBR2 und CBRF)

**Tab. 10** Resultate der CBR-Versuche (CBR1, CBR2 und CBRF)

CBR-Versuche CBR1, CBR2 und CBRF (SN EN 13286-47 und VSS 70 321)

Gemisch	Versuchs-feld	Herkunft	Versuchsart	Dichte Festsubstanz [Mg/m³]	Überkorn > 16 mm [M-%]	Wassergehalt Überkorn [M-%]	Feinanteil [M-%]	Verdichtungsenergie [MJ/m³]	Konditionierungszeit optimaler Wassergehalt [M-%]	maximale Trockendichte [Mg/m³]	Wassergehalt Anfang CBR1-Versuch [M-%]	Wassergehalt Ende CBR1-Versuch [M-%]	Differenz Anfangs- und Endwassergehalt CBR1-Versuch [M-%]	CBR1-Versuch Eindringtiefe 2,5 mm	CBR1-Versuch Eindringtiefe 5 mm	Wassergehalt Anfang CBR2-Versuch [M-%]	Wassergehalt Ende CBR2-Versuch [M-%]	Differenz Anfangs- und Endwassergehalt CBR2-Versuch [M-%]	CBR2-Versuch Eindringtiefe 2,5 mm	CBR2-Versuch Eindringtiefe 5 mm	maximale Hebung [mm]	Hebung nach 96 Stunden [mm]	Schwellmass [t]	Wassergehalt Anfang CBRF-Versuch [M-%]	Wassergehalt Ende CBRF-Versuch [M-%]	Differenz Anfangs- und Endwassergehalt CBRF-Versuch [M-%]	CBRF-Versuch Eindringtiefe 2,5 mm	CBRF-Versuch Eindringtiefe 5 mm	ausgeflossenes Wasser [ml]	absorbiertes Wasser [ml]	maximale Frosthebung nach 24 Stunden [mm]	Resthebung nach 48 Stunden [mm]	Quelldmass [t]	Quotient CBR2 / CBR1 [t]	Quotient CBRF / CBR1 [t]	
KG-1	6	Vorberg	FA tief	2.720	34,9	1,0	8,9	1,2	24h	6,8	2,265	6,8	6,3	-0,5	69,9	92,3	6,8	6,7	-0,1	47,2	61,1	-	0,00	-	5,9	6,3	0,4	57,3	72,5	32	6	1,09	-0,33	-0,30	0,66	0,79
KG-1	6	Vorberg	FA Werk	2.720	36,9	1,0	10,9	1,2	24h	6,7	2,295	6,3	6,7	0,4	95,5	120,8	5,8	6,2	0,4	69,4	103,5	-0,34	-0,27	5,7	6,1	0,4	92,8	124,7	-	-	0,94	-0,36	-0,38	0,86	1,03	
KG-1	6	Vorberg	FA hoch	2.720	39,5	1,0	13,5	1,2	24h	6,4	2,268	6,4	6,3	-0,1	51,4	67,9	6,4	6,3	-0,1	51,9	67,9	-	-0,22	6,9	6,6	-0,3	53,5	70,1	32	4	0,21	-0,53	-2,52	1,00	1,03	
KG-2	7	Wilchingen	FA tief	2.690	27,2	1,0	4,3	1,2	24h	7,3	2,194	7,6	7,0	-0,6	59,8	75,7	7,6	7,4	-0,2	54,4	71,8	-	-0,53	7,6	7,4	-0,2	51,8	61,4	38	14	0,47	-0,06	-0,13	0,95	0,81	
KG-2	7	Wilchingen	FA Werk	2.690	28,4	1,0	5,9	1,2	24h	6,0	2,249	6,2	6,2	0,0	140,0	179,5	5,8	5,7	-0,1	164,7	210,3	-0,16	-0,16	-0,13	6,0	6,0	0,0	146,5	174,7	-	-	1,13	0,23	0,20	1,17	0,97
KG-2	7	Wilchingen	FA hoch	2.690	30,7	1,0	8,2	1,2	24h	6,5	2,248	6,5	6,1	-0,4	77,8	101,5	6,5	6,1	-0,4	76	100,3	-	-0,29	5,9	6,3	0,4	77,6	102,3	21	8	0,57	-0,33	-0,58	0,99	1,01	
KG-3	8	Monthey	FA tief	2.720	55,4	1,0	1,4	1,2	24h	6,2	2,010	6,2	5,8	-0,4	23,0	30,4	6,2	7,7	1,5	24,8	30,1	-	0,00	6,7	7,0	0,3	18,4	24,3	19	88	0,55	-0,07	-0,13	0,99	0,80	
KG-3	8	Monthey	FA Werk	2.720	57,1	1,0	3,1	1,2	24h	7,0	2,230	6,0	7,2	1,2	68,1	80,0	7,3	7,3	0,0	59,5	76,4	-0,03	-0,03	-0,02	6,7	7,0	0,3	50,2	60,7	-	-	5,74	0,62	0,11	0,96	0,76
KG-3	8	Monthey	FA hoch	2.720	59,2	1,0	5,2	1,2	24h	6,8	2,228	6,8	6,1	-0,7	49,1	59,4	6,8	6,8	0,0	34,9	44,1	-	0,00	6,6	6,3	-0,3	49,3	57,4	20	6	1,69	-0,02	-0,01	0,74	0,97	
KG-4	10	Cazis	FA tief	2.670	32,7	1,0	0,9	1,2	24h	4,9	2,059	5,1	4,8	0,0	28,1	35,8	5,1	9,4	4,3	18,5	22,8	-	0,00	4,8	9,9	5,1	17,1	19,3	28	6	0,04	-0,13	-3,25	0,64	0,54	
KG-4	10	Cazis	FA Werk	2.670	34,2	1,0	2,4	1,2	24h	3,6	2,138	3,6	3,6	0,0	96,0	109,4	3,8	7,6	3,8	58,6	68,2	-0,26	-0,26	-0,20	4,0	7,1	3,1	47,0	53,9	-	-	0,91	0,01	0,01	0,62	0,49
KG-4	10	Cazis	FA hoch	2.670	36,2	1,0	4,4	1,2	24h	7,2	2,202	7,2	6,7	-0,5	47,8	55,4	7,2	7,0	-0,2	45	54,4	-	0,00	7,7	6,9	-0,8	59,6	67,0	16	20	0,32	-0,06	-0,19	0,98	1,21	
RCB-1	3	Rubigen	FA tief	2.680	23,2	1,4	4,7	1,2	72h	8,2	2,160	8,2	7,5	-0,7	117,2	154,6	8,2	7,8	-0,4	100,9	133,1	-	-0,02	7,7	8,0	0,3	89,8	118,3	18	20	0,89	-0,16	-0,18	0,86	0,77	
RCB-1	3	Rubigen	FA Werk	2.680	24,7	1,4	6,2	1,2	72h	7,6	2,147	7,8	8,0	0,2	148,2	192,5	8,3	8,1	-0,2	178,6	232,4	-0,04	-0,04	-0,03	8,1	7,7	-0,4	130,8	169,5	-	-	1,04	-0,16	-0,15	1,21	0,88
RCB-1	3	Rubigen	FA hoch	2.680	26,6	1,4	8,1	1,2	72h	9,6	2,086	9,6	9,3	-0,3	73,5	90,0	9,6	9,7	0,1	77,5	99,5	-	0,00	9,6	10,6	1,0	73,4	87,5	85	68	1,64	0,13	0,08	1,11	0,97	
RCB-2	4	Rümlang	FA tief	2.690	23,0	1,4	5,9	1,2	72h	7,4	2,226	7,4	6,8	-0,6	96,2	127,0	7,4	6,9	-0,5	100,8	133	-	-0,18	8,1	6,9	-1,2	110,1	145,1	22	0	0,85	-0,44	-0,52	1,05	1,14	
RCB-2	4	Rümlang	FA Werk	2.690	25,4	1,4	8,3	1,2	72h	7,7	2,184	7,4	7,6	0,2	73,3	111,1	7,7	7,7	0,0	112,2	146,7	-0,11	-0,11	-0,09	7,9	7,5	-0,4	81,3	106,9	-	-	1,58	-0,18	-0,11	1,32	0,96
RCB-2	4	Rümlang	FA hoch	2.690	27,6	1,4	10,5	1,2	72h	8,5	2,145	8,5	8,3	-0,2	68,5	90,0	8,5	8,6	0,1	77,8	101,2	-	0,00	7,8	9,0	1,2	58,6	73,5	21	6	1,41	0,09	0,06	1,12	0,82	
RCB-3	5	Mörel	FA tief	2.689	28,4	1,2	6,4	1,2	72h	7,9	2,130	7,9	7,6	-0,3	73,1	94,8	7,9	8,0	0,1	73,7	95,7	-	-0,01	8,1	8,0	-0,1	76,3	94,3	19	23	0,42	0,01	0,02	1,01	0,99	
RCB-3	5	Mörel	FA Werk	2.689	30,4	1,2	8,4	1,2	72h	8,2	2,135	8,1	7,7	-0,4	93,2	116,9	8,7	8,3	-0,4	114,4	145,7	-0,06	-0,06	-0,04	7,9	9,1	1,2	68,8	85,5	-	-	0,94	0,13	0,14	1,25	0,73
RCB-3	5	Mörel	FA hoch	2.689	32,6	1,2	10,6	1,2	72h	7,9	2,090	7,9	7,7	-0,2	61,3	67,8	7,9	9,8	1,9	32	36,7	-	-0,01	7,4	8,1	0,7	52,2	58,3	26	14	0,40	0,10	0,25	0,54	0,86	
RCA-1	9	Oberglatt	FA tief	2.580	20,5	1,0	3,8	1,2	24h	7,6	2,033	7,6	7,4	-0,2	28,2	34,1	7,6	8,2	0,6	26,9	32,5	-	-0,01	7,4	8,5	1,1	29,6	34,5	27	70	0,76	-0,46	-0,61	0,95	1,01	
RCA-1	9	Oberglatt	FA Werk	2.580	22,2	1,0	5,5	1,2	24h	6,8	2,121	6,9	6,8	-0,1	49,8	63,1	6,8	7,4	0,6	60,8	74,8	-0,05	-0,05	-0,04	7,0	7,8	0,8	46,6	55,0	-	-	1,65	-0,04	-0,02	1,19	0,87
RCA-1	9	Oberglatt	FA hoch	2.580	24,2	1,0	7,5	1,2	24h	7,6	2,082	7,6	7,3	-0,3	39,9	46,1	7,6	7,9	0,3	32,8	41,3	-	-0,01	7,9	8,4	0,5	35,7	44,4	20	90	2,02	-0,87	-0,43	0,90	0,96	
RCA-2	11	Untersiggenthal	FA tief	2.619	21,9	1,0	2,1	1,2	24h	7,6	1,971	7,7	7,1	-0,6	27,0	33,5	7,7	8,4	0,7	26,5	33,2	-	-0,02	7,6	8,7	1,1	34,9	38,0	16	72	0,29	-0,10	-0,34	0,99	1,13	
RCA-2	11	Untersiggenthal	FA Werk	2.619	23,5	1,0	3,7	1,2	24h	7,9	2,082	7,6	7,6	0,0	51,5	67,5	7,9	8,2	0,3	62,1	79,7	-2,10	-1,65	7,9	8,1	0,2	56,5	71,0	-	-	1,39	-0,05	-0,04	1,18	1,05	
RCA-2	11	Untersiggenthal	FA hoch	2.619	25,6	1,0	5,8	1,2	24h	8,4	2,062	8,4	7,7	-0,7	29,3	38,7	8,4	8,1	-0,3	35,5	44,6	-	-0,05	6,6	8,1	1,5	39,5	50,9	39	4	0,90	-0,42	-0,47	1,15	1,32	
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	FA tief	2.630	36,8	1,8	3,9	1,2	72h	13,5	1,918	13,5	12,8	-0,7	72,1	92,7	13,5	13,3	-0,2	99,1	130,6	-	0,00	14,1	13,2	-0,9	96,7	124,6	19	5	1,18	0,03	0,03	1,41	1,34	
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	FA Werk	2.630	38,9	1,8	5,0	1,2	72h	14,0	1,873	12,3	12,1	-0,2	181,8	226,0	12,4	12,6	0,2	133,3	174,1	0,01	0,01	0,00	12,6	13,2	0,6	141,4	174,4	-	-	3,13	0,71	0,23	0,77	0,77
RCBGG-1	1	Littau-Emmen	FA hoch	2.630	41,0	1,8	7,1	1,2	72h	15,1	1,854	15,1	14,5	-0,6	60,3	79,6	15,1	14,7	-0,4	70,1	92,2	-	-0,05	14,8	14,9	0,1	68,9	87,6	33	26	0,61	-0,19	-0,31	1,16	1,10	
RCBGG-2	2	Regensdorf	FA tief	2.648	34,1	1,8	1,6	1,2	72h	11,8	1,972	11,8	11,2	-0,6	94,7	125,0	11,8	11,6	-0,2	133	175,5	-	0,00	11,5	11,7	0,2	112,4	144,2	23	16	0,64	0,03	0,05	1,40	1,15	
RCBGG-2	2	Regensdorf	FA Werk	2.648	36,4	1,8	3,9	1,2	72h	13,4	1,907	12,7	12,5	-0,2	58,9	83,8	12,7	12,7	0,0	83	110,2	-0,14	-0,14	-0,11	12,5	12,6	0,1	83,3	105,8	-	-	0,95	-0,21	-0,22	1,32	1,26
RCBGG-2	2	Regensdorf	FA hoch	2.648	38,1	1,8	5,6	1,2	72h	14,5	1,854	14,5	14,5	0,0	56,0	73,7	14,5	15,1	0,6	73	94,1	-	-0,01	15,2	15,8	0,6	68,5	87,6	16	42	1,59	0,31	0,19	1,28	1,19	

## Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CBR	California Bearing Ratio
CBR1	CBR-Versuch trocken, bei optimalem Wassergehalt gemäss SN EN 13286-47
CBR2	CBR-Versuch nach Wasserlagerung gemäss SN EN 13286-47
CBRF	CBR-Versuch nach Frostbeanspruchung gemäss VSS 70 321
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
CEN TC 227	CEN Technical Committee Road Construction
CEN TC 227 WG4	CEN Working Group Hydraulic bound and unbound mixtures (including byproducts and waste materials)
CEN TC 227 WG4 TG2	CEN Task Group EN 13285
IMP	IMP Bautest AG
M.-%	Massenprozent
RC	Recycling
SN	Schweizer Norm (SN)
S-Wert-Bereich	Vom Lieferanten angegebene S-Werte der typischen Siebdurchgänge
TBA	Labor Oberbau + Geotechnik des Tiefbauamtes des Kantons Zürich
VAB/ALA	Verein akkreditierter Prüflabore (VAB)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
WPK	Werkseigene Produktionskontrolle



## Literaturverzeichnis

- 
- [1] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2000), „**Kiessande für Fundationsschichten - Qualitätsanforderungen**“, SN 670 120d (ungültig)
- 
- [2] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2011), „**Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulische gebundene Gemische für Ingenieur- und Strassenbau, Ungebundene Gemisch - Anforderungen**“, SN 670 119-NA
- 
- [3] Europäische Komitee für Normung CEN (2007) „**Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Baustoffe für Ingenieur- und Strassenbau**“, EN 13242:2002+A1:2007
- 
- [4] Europäische Normenvereinigung CEN (2018) „**Ungebundene Gemische - Anforderungen**“, EN 13285
- 
- [5] Bundesamt für Umwelt (Hrsg.) 2006, **Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle**, Umwelt-Vollzug Nr. 0631
- 
- [6] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019), „**Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische; Frosthebungsversuch**“, VSS 70 321
- 
- [7] Breytenbach, I.J., Paige-Green, P., Van Rooy, J.L. (2010): „**The relationship between index testing and California Bearing Ratio values for natural road construction materials in South Africa**“, Journal of the south african institution of civil engineering, Vol 52, No 2, October 2010, Pages 65–69
- 
- [8] Blume, U. (2010), „**Bericht zum Arbeitsprogrammprojekt 05.321 der Bundesanstalt für Straßenwesen: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsverhalten an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten**“
- 
- [9] Arm, M. (1993), „**Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials – experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag**“, Doctoral Thesis 2003, Stockholm
- 
- [10] Zoller, H.J. (1973), „**Frost heave and the rapid frost heave test**“, Public Roads, 37/6, 211-220
- 
- [11] Sutherland, H.B. and Gaskin, P.N. (1973), „**A comparison of the T.R.R.L. and C.R.R.E.L tests for the frost susceptibility of soils**“, Canadian Geotechnical Journal, 10, 553-557
- 
- [12] Chamberlain, E.J. (1981), „**Frost susceptibility of soil**“, CRREL Monograph 81-2, Hanover, N.H
- 
- [13] Mageau, D.W. & Sherman, M.B. (1983), „**Frost cell design and operation**“. Proceedings Permafrost: 4th Int. Conf., National Academy Press, Washington, D.C., 767-772
- 
- [14] Ito, Y., Vinson, T.S., Nixon, J.Fj., and Stewart, D. (1998), „**An improved step freezing test to determine segregation potential**“. Proceedings Permafrost: 7th Int. Conf., Int. Permafrost Association, Université Laval, Québec City, Québec, 509-516.
- 
- [15] Darrow, M., Huang, S.L., Shur, Y. and Akagawa, S. (2008), „**Improvements in frost heave laboratory testing of fine-grained soils**“, Journal of Cold Regions Engineering, Vol. 22, Issue 3.
- 
- [16] Bundesamt für Strassen (1990), „**Normalisation d'un nouvel essai de détermination de la sensibilité au gel**“, Forschungsauftrag VSS9/89
- 
- [17] Association française de normalisation AFNOR (1996) „**Essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de D inférieur ou égal 20 mm**“, NF P 98-234-2
- 
- [18] Austrian Standards ÖNORM (2013), „**Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Frostsicherheit von Gemischen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau**“, B 4810
- 
- [19] Tester, R.E. and Gaskin, P.N. (1996), „**Effect of fines content on frost heave**“, Canadian Geotechnical Journal, 33, 678 – 680
- 
- [20] Bundesamt für Strassen ASTRA (2013), „**Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen**“, FB 1436, Forschungsauftrag VSS2010/401
- 
- [21] Janssen, G.M.T. (2005), „**Recycling in the construction industry: Pro and Contra**“, 7th World Congress on Recovery, Recycling and Re-integration, Peking, China
- 
- [22] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2020), „**Verdichtung und Tragfähigkeit; Anforderungen**“, VSS 40 585
- 
- [23] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019), „**Böden; Plattendruckversuch EV und ME**“, VSS 70 321
- 
- [24] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), „**Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren**“, SN EN 933-1
- 
- [25] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), „**Bestimmung der Kornform - Plattigkeitskennzahl**“, SN EN 933-3
-

- 
- [26] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2005), „**Bestimmung des Anteils an gebrochenen Körnern in groben Gesteinskörnungen**“, SN EN 933-5
- 
- [27] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2011), „**Einteilung der Bestandteile in grober rezyklierter Gesteinskörnung**“, SN EN 933-11
- 
- [28] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2011), „**Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung**“, SN EN 1097-2
- 
- [29] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2015), „**Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes - Proctorversuch**“, SN EN 13286-2
- 
- [30] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2018), „**Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes**“, SN EN 13286-47
- 
- [31] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**Reduktion des Prüfaufwandes zur Kontrolle der Frostepfindlichkeit von Gesteinskörnungen für ungebundene Gemische**“, FB 1611, Forschungsauftrag VSS2011/505
- 
- [32] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von hydraulisch gebundenen Gemischen – Grundlagen für die Festlegung nationaler Anforderungen**“, FB 1665, Forschungsauftrag VSS2015/313
-

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 04.06.2021

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2011/508  
 Projekttitel: Anforderungen an CBR-Werte und CBR-Verhältnis von Kiesgemischen und RC-Kiesgemischen  
 Enddatum: 11.08.2021

#### Texte

##### Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Das Ziel der Forschungsarbeit war zu prüfen, ob absolute Anforderungen an CBR-Werte und CBR-Verhältnisse in der SN 670 119-NA nicht wieder eingeführt werden sollen, wie dies in der Vorgängernorm der Fall war. Dies weil es in der Vergangenheit Fälle gab, in welchen ungebundene Gemische die CBR-Verhältnisse erfüllten, die absoluten CBR-Werte jedoch unter den absoluten Werten der Vorgänger-Norm lagen.

Es wurden 11 ungebundenen Gemische 0/45 untersucht: 4 Kiesgemische, 3 RC-Kiesgemische B, 2 RC-Kiesgemische A und 2 RC-Betongranulatgemische aus der ganzen Schweiz. Die Gemische wurden in Versuchsfeldern eingebaut, um deren Praxistauglichkeit bezüglich der Tragfähigkeit zu überprüfen. Anschliessend wurde deren Eignung gemäss SN 670 119-NA im Labor untersucht. Im dritten Teil wurden Proctor- und CBR-Versuche an den Gemischen durchgeführt, um die Frostbeständigkeit in Abhängigkeit des Feinanteils zu untersuchen. Die 11 Gemische wurden mit dem Feinanteil (< 0.063 mm) ab Werk geprüft sowie mit je einem um ca. 2 M.-% tieferen und höheren Feinanteil. Die untersuchten Feinanteile der Gemische reichte von 0.9 bis 13.5 M.-%.

Die Kontrolle auf den Versuchsfeldern sowie auch Laborversuche ergaben, dass die Gemische die Normanforderungen mit wenigen Ausnahmen erfüllen. Weil die Gemische die Anforderungen der SN 670 119-NA erfüllen, fielen die Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche homogen aus und die angestrebten Unterschiede zwischen den Gemischen zeigten sich nicht im erhofften Masse.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass alle Gemische, die Anforderungen der SN 670 119-NA bezüglich der CBR-Verhältnisse erfüllen. Bei der statistischen Auswertung der Gemische bezüglich der absoluten CBR-Werte fällt auf, dass einzig die RC-Kiesgemische A einen relativ kleinen Wertebereich aufweisen, die anderen Gemische streuen deutlich breiter in ihren. Diese Beobachtungen treffen gleichermaßen für die CBR-Verhältnisse zu. Die Gegenüberstellung der verschiedenen relevanten Parameter der Gemische wie optimaler Wassergehalt, Feinanteil, CBR-Werte, maximale Frosthebung oder Resthebung ergab kaum systematische Korrelationen.

Die untersuchten Gemische stellen demnach robuste Systeme dar, welche beträchtliche Variationen des Feinanteils aufnehmen können und trotzdem befriedigende bis gute Eigenschaften aufweisen. Die besten absoluten Werte für ein Gemisch wurden mit dem Feinanteil ab Werk erreicht. Die Gemische mit dem veränderten Feinanteil zeigen in der Regel tiefere absolute CBR-Werte. Dabei kommt der Anforderung an die Normschieblinie eine grosse Bedeutung bei der Qualifikation der Gemische zu.

Die teilweise beträchtlichen Hebungswerte, welche beim CBRF-Versuch und auch beim CBR2-Versuch festgestellt wurden, konnten durch die Forschungsarbeit nicht erklärt werden. Die Untersuchungsergebnisse sollten daher nicht zur Schlussfolgerung verleiten, dass der CBRF-Versuch keine Daseinsberechtigung mehr hat, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich doch quellfähige Mineralien in den Gemischen befinden, welche zu Frostschäden führen können. Die Auswertung der Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche lassen den Schluss zu, dass diese Prüfmethoden unter den heutigen Umständen und Vorgaben wahrscheinlich die erhoffte Auflösung der Prüfergebnisse nicht liefern können. Man muss sich die Frage stellen, ob man in der (Labor-)Praxis vielleicht nicht zu viel in die Prüfergebnisse hineinliest und ob es sich bei diesen nicht eher um Grössenordnungen handelt.

Aufgrund statistischer Betrachtungen der Wertebereiche der CBR-Werte und der CBR-Verhältnisse könnte die Wiedereinführung von absoluten Anforderungen in Betracht gezogen werden. Diese Möglichkeit muss aber sorgfältig hinterfragt werden, da: nicht alle gemäss Norm möglichen Gemische untersucht wurden. Andererseits stellt sich die Frage, ob in Anbetracht der grossen Bedeutung der Normschieblinie, mit der Einführung von absoluten Werten die Qualität der Gemische wirklich zwingend erhöht wird. Eine Erhöhung des zulässigen Feinanteils auf 5 M.-%, wie im Forschungsprojekt VSS 2011/505 gefordert, mit dem vorliegenden Datensatz unterstützt und argumentiert werden. Jedoch sollte dabei der Einfluss des Feinanteils und seiner Petrographie nicht ausser Acht gelassen werden.

**Zielerreichung:**

Die im Forschungsprojekt gesteckten Ziele konnten erreicht werden.  
Die Überprüfung der CBR-Verhältnisse hat ergeben, dass diese grundsätzlich geeignet sind und allenfalls sogar erhöht werden können.  
Anforderungen an einen absoluten CBR-Wert können aufgrund der Resultate argumentiert werden. Es muss aber sorgfältig abgewogen werden, da der Normschieblinie eine grosse Bedeutung zukommt und die Einführung eines absoluten Wertes die Qualität der ungebundenen Gemische nicht zwingend erhöht.  
Eine Korrelation der Prüfergebnisse aus dem statischen Plattendruckversuch und den Resultaten aus den CBR-Versuchen konnte nicht gefunden werden. Die Streubreiten der Versuchsergebnisse sind dafür wohl zu gross.

**Folgerungen und Empfehlungen:**

Es besteht weiterhin ein Forschungsbedarf im Bereich der Frostbeständigkeit von ungebundenen Gemischen:

- Die Einflussfaktoren im Proctor-Versuch müssen untersucht werden, damit die Vorgehensweise für die Labore präzisiert werden kann, um die Prüfergebnisse vergleichbar zu machen.
- Der Einfluss der Konditionierungszeiten auf den Proctor- und die CBR-Versuche müssen untersucht werden, der Einfluss auf das Prüfergebnis scheint wesentlich zu sein.
- Die Schwankungen der Resultate der CBR-Versuche müssen untersucht werden, damit diese beurteilt werden und die Grenzen des Versuchs aufgezeigt werden können.
- Die Bedeutung der Hebungen im CBR2- und im CBRF-Versuch konnten nicht geklärt werden, damit ist der Einfluss auf die Frostbeständigkeit weiterhin nicht geklärt.

**Publikationen:**

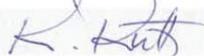
**Der Projektleiter/die Projektleiterin:**

Name: Rütli

Vorname: Roger

Amt, Firma, Institut: IMP Bautech AG, Oberbuchsitzen

**Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:**





Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

1. Die Beobachtungen und Ergebnisse wurden nachvollziehbar ausgearbeitet, anlässlich der Sitzungen der Begleitkommission regelmässig dargestellt und diskutiert und im Schlussbericht festgehalten.
2. Die Ergebnisse der Proctor- und CBR-Versuche lassen den Schluss zu, dass diese Prüfmethoden unter den heutigen Umständen und Vorgaben die erhoffte Auflösung der Prüfergebnisse nicht liefern können. Es stellt sich die Frage, nach der Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Baustellenpraxis.
3. Zeitlicher Verlauf: Das Projekt konnte mit leichten Verzögerungen infolge Wechsel der Projektleitung zeitnah durchgeführt werden.

##### Umsetzung:

Die im Rahmen des Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse zu den Anforderungen an CBR-Werte und CBR-Verhältnis von Kiesgemischen und RC-Kiesgemischen werden dem VSS und ASTRA zugänglich gemacht.

Eine breitere Veröffentlichung über Informationsveranstaltungen (z.B. ETH-Veranstaltungen, Bau und Wissen, etc.) ist nicht vorgesehen.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Die Forschung zeigt auf, dass im Bereich des CBR und CBRF-Versuches vieles von den Randbedingungen wie Probenaufbereitung, Lagerung und Einbau abhängt. Diese Einflüsse dürften relativ gross sein und erschweren direkte Rückschlüsse für die Frostanfälligkeit des Materials.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Eine Erhöhung des zulässigen Feinanteils auf 5 M.-%, wie im Forschungsprojekt VSS 2011/505 gefordert, kann mit dem vorliegenden Datensatz unterstützt und argumentiert werden. Es ist zu prüfen, ob ein kombiniertes Vorgehen von Frostversuchen und petrographischen Abklärungen zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit vorzuziehen ist mit dem Ziel den potenziell schädlichen Einfluss von quellfähigen Mineralien in ungebundenen Gemischen zu minimieren.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Montani

Vorname: Sara

Amt, Firma, Institut: Emch + Berger AG, Bern

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

  
Digital signiert von  
Sara.Montani@emchberger.ch  
Datum: 2021.08.11 15:44:20  
+02'00'