



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

Reduktion des Prüfaufwandes zur Kontrolle der Frostepfindlichkeit von Gesteinskörnungen für ungebundene Gemische

**Reduction of the effort involved to the inspection of the
frost sensitivity of aggregate for unbound mixtures**

**Optimisation de dépenses d'essai pour le contrôle de
gélivité des granulats pour mélanges non liés**

VersuchsStollen Hagerbach AG
Dipl.-Ing. Maximilian Wietek
Dipl.-Ing. Volker Wetzig
Ronny Meglin M.Sc.

**Forschungsauftrag VSS 2011/505 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Juni 2017

1611

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)



Reduktion des Prüfaufwandes zur Kontrolle der Frostempfindlichkeit von Gesteinskörnungen für ungebundene Gemische

**Reduction of the effort involved to the inspection of the
frost sensitivity of aggregate for unbound mixtures**

**Optimisation de dépenses d'essai pour le contrôle de
gélivité des granulats pour mélanges non liés**

VersuchsStollen Hagerbach AG
Dipl.-Ing. Maximilian Wietek
Dipl.-Ing. Volker Wetzig
Ronny Meglin M.Sc.

**Forschungsauftrag VSS 2011/505 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Volker Wetzig

Maximilian Wietek

Mitglieder

Ronny Meglin

Begleitkommission

Präsidentin

Sara Montani

Mitglieder

Hansruedi Eberhard

Björn Mühlen

Ernst Honegger

Markus Caprez

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Summary	9
	Résumé	11
1	Einleitung	13
2	Ziel und Vorgehensweise	15
3	Normung	17
3.1	Aktuelle Situation	17
3.2	Historie	18
4	Grundlagen	19
4.1	Korngrößenverteilung	19
4.2	Ungleichförmigkeit	19
4.3	Krümmungszahl	19
4.4	Durchlässigkeit	19
4.5	Frost	20
4.6	Frost im Boden	20
4.7	Frostkriterien	21
4.7.1	Frostkriterium nach Casagrande	21
4.7.2	Frostkriterium nach Schaible	22
4.7.3	Frostkriterium nach ZTV E-StB	22
5	Daten	23
5.1	Datenerhebung	23
5.2	Datenauswertung	24
5.2.1	Ungleichförmigkeitszahl	24
5.2.2	Krümmungszahl	24
5.2.3	Durchlässigkeit	24
5.3	Laborprüfungen	25
5.3.1	Siebanalysen	25
5.3.2	Schlammanalysen	25
5.3.3	Proctorversuch	25
5.3.4	Verfahren zur Bestimmung der CBR-Koeffizienten	26
5.3.5	Rundung	28
5.3.6	Messunsicherheit	28
6	Auswertung und Ergebnisse	31
6.1	Überblick	31
6.2	Vergleich Siebdurchgang 0.02 mm zu 0.063 mm	33
6.3	Vergleich CBR _F /CBR zu Siebdurchgang	33
6.4	Nicht frostsichere Proben	36
6.5	Korngrößen bei verschiedenen Durchgängen	40
6.6	Ungleichförmigkeit, Krümmungszahl und Durchlässigkeit	41
6.7	Optimaler Wassergehalt und Proctordichte	43
6.8	Schädliche Anteile	44
6.9	CBR-Verfahren	47
7	Fallbeispiel	49

7.1	Allgemeines	49
7.2	Untersuchungen und Ergebnisse	51
7.3	Schlussfolgerungen Fallbeispiel	52
7.3.1	Materialtechnologisch	52
7.3.2	Konstruktiv	53
7.4	Bedeutung für das vorliegende Forschungsprojekt	53
8	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	55
9	Ausblick	57
	Anhang.....	59
	Glossar.....	63
	Literaturverzeichnis.....	65
	Projektabschluss	67
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	71

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden Daten gesammelt, um die Bewertung der Frostempfindlichkeit gemäss SN 670-119 NA zu überprüfen und zu optimieren. Dazu wurden aus der gesamten Schweiz Datensätze von ungebundenen Gemischen gesammelt und ausgewertet, welche von Unternehmen zur Verfügung gestellt wurden. Anschliessend sind ausgewählte, für die Schweiz repräsentative, ungebundene Gemische auf deren Frostempfindlichkeit hin mittels ausgewählten Laborprüfungen überprüft und bewertet wurden. Dabei wurde zuerst der Durchgang bei 0.063 mm mittels einer Siebanalyse ermittelt und mit der Normanforderung der SN 670 119-NA von 3 M.-% verglichen. Sollte dieser Grenzwert überschritten sein, wurde die Frostempfindlichkeit mittels CBR-Verfahren geprüft und bewertet. Von ausgewählten Proben wurde zusätzlich anhand einer Schlämmanalyse das „alte“ Kriterium der Frostempfindlichkeit überprüft, welches einen maximalen Durchgang von 3 M.-% bei einer Korngrösse von 0.02 mm vorgibt.

Basierend auf der Auswertung der Datensammlung sowie der zusätzlichen durchgeführten Untersuchungen im Labor konnte nachgewiesen werden, dass der Grenzwert der Feinanteile von 3 M.-% ohne messbare Einbussen der Bewertungssicherheit der Frostempfindlichkeit auf 5 M.-% angehoben werden kann. Durch die bestehenden Grenzen der Korngrössenverteilung gemäss SN 670 119-NA weisen die in der Schweiz produzierten und verkauften ungebundenen Gemische eine durchwegs hohe Qualität und ausreichende Frostsicherheit auf. Ein Anteil von 99 % der untersuchten ungebundenen Gemische erfüllte das Frostkriterium trotz teilweise erheblich höherer Feinanteile. Nur vier Proben haben mit einem Feinanteil von weniger als 5 % die Prüfung der Frostempfindlichkeit nicht bestanden, wobei jedoch die Gründe für das Nicht-Bestehen nicht abschliessend genannt werden können. Weiterhin zeigte sich, dass die Resultate der CBR-Versuche keine eindeutige Korrelation zum Durchgang bei verschiedenen Korngrössen hat, was eine erhöhte Toleranz bei der Bewertung von Korngrössenverteilungen rechtfertigt. Zusätzlich wurde die Annahme bestätigt, dass ein Durchgang von 3 M.-% bei 0.02 mm einem Durchgang von 5 M.-% bei 0.063 mm entspricht.

Aufgrund der im Projekt gemachten Beobachtungen wird vermutet, dass das CBR-Verfahren, und insbesondere die Lagerung beim Versuch für den CBR_F - Wert, nicht den realen Frost-Bedingungen entspricht, was zu einer zweifelhaften Bewertung der Frostbeständigkeit führt. So zeigen diverse Versuche an ungebundenen Gemischen, dass die Hebung während eines Frostzyklus nicht abgeschlossen wird und die Setzung nach dem Frostzyklus teilweise grösser ist als die Hebung während des Gefrierens. Ein optimiertes CBR Prüfverfahren, das die physikalische Realität des frostbedingten Hebens und Senkens besser widerspiegelt, sollte aussagekräftigere Bewertungen der Frostbeständigkeit erlauben.

Es wird angenommen, dass schädliche Bestandteile (z.B. Glimmer) einen massgeblichen Anteil auf die Frostbeständigkeit eines Gemisches haben können. Daher wird empfohlen, eine petrographische Untersuchung des Vorkommens gemäss SN EN 670 115 durchzuführen, wenn der Feinanteil bei 0.063 mm zwischen 3 M.-% und 5 M.-% liegt. Bei einem erhöhten Anteil Schichtsilikate (in Anlehnung an die österreichische Normung) wird empfohlen, zusätzlich zu den petrographischen Untersuchungen eine CBR-Prüfung durchzuführen. Liegt der Feinanteil bei 0.063 mm über 5 M.-%, sind CBR-Prüfungen auf jeden Fall durchzuführen. Auf die Petrographie kann dann verzichtet werden.

Summary

As part of this research, data was collected in order to check and optimise the evaluation of frost sensitivity in accordance with SN 670-119 NA. This involved collecting and evaluating data records relating to unbound mixtures, provided by contractors, from across Switzerland. Subsequently, selected unbound mixtures that were representative of Switzerland were tested and evaluated with respect to their frost sensitivity, using selected laboratory tests. Firstly, the fines content in the case of 0.063 mm was determined using a sieving analysis and compared with the standard requirement of 3 M.-%, as specified by SN 670 119-NA. If this limit was exceeded, frost sensitivity was tested and evaluated by means of the CBR process. A hydrometer analysis was also performed on selected samples in order to test the “old” criterion for frost sensitivity, which specifies a maximum passage of 3 M.-% for a particle size of 0.02 mm.

Based on the evaluation of the data collected and the additional investigations in the laboratory, it was proven that the fine particle proportion limit of 3 M.-% can be raised to 5 M.-% without any measurable reduction in the certainty of the frost sensitivity evaluation. The unbound mixtures produced and sold in Switzerland exhibit a consistently high level of quality and sufficient frost resistance with the existing limits on particle size distribution in accordance with SN 670 119-NA. A proportion of 99% of the investigated unbound mixtures met the frost criterion, despite a considerably higher proportion of fine particles in some cases. Only four samples did not pass the frost sensitivity test with a proportion of fine particles of less than 5%. However, it is not possible to give any conclusive reasons for this failure. Furthermore, the results of the CBR tests do not demonstrate a clear correlation with the underflow experienced in the case of different particle sizes, which justifies an increased tolerance when evaluating particle size distributions. In addition, it was possible to confirm the assumption that a passage of 3 M.-% in the case of 0.02 mm corresponds to a passage of 5 M.-% in the case of 0.063 mm.

Due to the observations made during the project, it is presumed that the CBR process – and, in particular, the storage conditions for the CBR_F value test – do not correspond to real frost conditions, which casts some doubt on frost resistance evaluations. For example, various tests on unbound mixtures show that elevation is not completed during a frost cycle and that settlement after the frost cycle is in some cases greater than elevation during freezing. An optimized CBR testing process, which better reflects the physical reality of frost-related elevation and sinking, should result in more meaningful evaluations of frost resistance.

It is assumed that harmful components (e.g. mica) can have a considerable impact on the frost resistance of a mixture. A petrographic investigation of occurrences, in accordance with SN EN 670 115, is therefore recommended where the proportion of fine particles is between 3 M.-% and 5 M.-% in the case of 0.063 mm. If there is a high proportion of phyllosilicates (based on Austrian standards), a CBR test is also recommended in addition to the petrographic investigations. CBR tests must be performed if the proportion of fine particles is above 5 M.-% in the case of 0.063 mm. In this instance, there is no need for petrography.

Résumé

Des données ont été collectées dans le cadre de ce travail de recherche afin de vérifier et d'optimiser l'évaluation de la résistance au gel selon la norme SN 670-119 NA. Pour ce faire, des ensembles de données concernant des graves non traitées, fournis par différentes entreprises dans toute la Suisse, ont été collectés et évalués. Des graves non traitées représentatives de la Suisse ont été ensuite sélectionnées. Leur résistance au gel a été contrôlée et évaluée par le biais d'examens spécifiques en laboratoire. Dans ce cadre, le passant à 0,063 mm a tout d'abord été évalué par granulométrie et comparé à l'exigence de la norme SN 670 119-NA de 3 % massique. En cas de dépassement de cette valeur seuil, la résistance au gel a alors été vérifiée et évaluée à l'aide d'essais CBR. Sur certains échantillons sélectionnés, l'« ancien » critère de résistance au gel, prescrivant un passant maximal de 3 % massique pour une diamètre de grain de 0,02 mm, a également été vérifié par tamisage humide.

Sur la base de l'évaluation des données collectées ainsi que d'essais supplémentaires réalisés en laboratoire, il a pu être démontré que la valeur seuil des fines de 3 % massique pouvait être élevée à 5 % massique sans influence notable sur la fiabilité de l'évaluation de la résistance au gel. Du fait des seuils existants en matière de répartition des tailles de grain selon la norme SN 670 119-NA, les graves non traitées fabriquées et produites en Suisse présentent dans l'ensemble une qualité élevée et une résistance au gel satisfaisante. La proportion de graves non traitées analysées qui ont rempli le critère de résistance au gel malgré une teneur parfois beaucoup plus élevée en fines était de 99 %. Seuls quatre échantillons présentant une teneur en fines inférieure à 5 % ont donné des résultats non satisfaisants aux essais de résistance au gel. Cependant, les raisons de cet échec n'ont pas pu être déterminées. On a également pu observer qu'il n'y a pas de corrélation significative entre le résultat des essais CBR et le débit pour différentes tailles de grain, ce qui justifie une tolérance plus élevée lors de l'évaluation de la répartition des tailles de grain. De plus, l'hypothèse qu'un passant de 3 % massique à 0,02 mm correspond à un passant de 5 % massique à 0,063 mm s'est vue confirmée.

Les observations faites dans le cadre du projet laissent à penser que l'essai CBR, et plus spécialement le stockage lors de l'essai pour la valeur CBR_F , ne correspond pas aux conditions de gel réelles, ce qui implique une évaluation peu fiable de la résistance au gel. Ainsi, différents essais réalisés sur des graves non traitées montrent que le gonflement n'est pas terminé au cours d'un cycle de gel et que le tassement suivant le cycle de gel est parfois plus important que le gonflement pendant le gel. Un essai CBR optimisé, reproduisant mieux la réalité physique du gonflement et du tassement causés par le gel, devrait permettre une évaluation plus fiable de la résistance au gel.

On suppose que des éléments nocifs (p. ex. paillettes) peuvent avoir une influence importante sur la résistance au gel d'une grave. Il est donc recommandé de réaliser une analyse pétrographique conforme à la norme SN EN 670 115 lorsque la teneur en fines à 0,063 mm se situe entre 3 et 5 % massique. En présence d'une teneur élevée en silicates lamellaires (en référence à la norme autrichienne), il est conseillé de réaliser un essai CBR en plus des analyses pétrographiques. Si la teneur en fines à 0,063 mm dépasse 5 % massique, les essais CBR doivent être réalisés dans tous les cas. L'analyse pétrographique est alors superflue.

1 Einleitung

Die Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Gesteinskörnungen basiert ursprünglich auf dem Feinanteil bei 0.02 mm. Die Einteilung von Gesteinskörnungen in die Frostempfindlichkeitsklassen gründet auf den Theorien von Casagrande und Terzaghi. Bis zu einem Feinanteil von 3 M.-% bei der Korngrösse 0.02 mm (bei einer Maximalkorngrösse von 63 mm) werden Gesteinskörnungen als „nicht frostempfindlich“ beurteilt. Die wissenschaftlichen Grundlagen für die Ermittlung und Einteilung in die Frostempfindlichkeitsklassen in den Schweizer Kiessand-Normen bzw. in den aktuellen Normen über Gesteinskörnungen sind dieselben. Allerdings wurde im Laufe der letzten Revisionen der "Kies-Sand-Norm" des VSS die Korngrösse für die Beurteilung des Feinanteils von 0.02 mm auf 0.063 mm angepasst. Dies ist aus Gründen der einfacheren Messungen in den Laborprüfungen geschehen (Sieben statt Schlämmen). Obwohl mit der Verschiebung der Beurteilungskorngrösse von 0.02 mm auf 0.063 mm auch Anpassungen am Grenzwert gemacht werden sollten, wurde der absolute Grenzwert von 3 M.-% für 0.063 mm unverändert übernommen. Ein Feinanteil von 3 M.-% bei 0.02 mm entspricht erfahrungsgemäss ungefähr einem Feinanteil von 5 M.-% bei 0.063 mm. In einigen Regionen der Schweiz wird ein Wert von 5 M.-% bei 0.063 mm toleriert.

Mit dem Forschungsprojekt soll geklärt werden, ob eine Korrelation der Feinanteile von natürlichen Gesteinskörnungen bei der Korngrösse 0.02 mm mit denjenigen bei 0.063 mm hergestellt werden kann. Die gewonnenen Resultate stellen eine wertvolle Grundlage für die Revision der Gesteinskörnungsnorm dar und fördern den wirtschaftlicheren Einsatz von ungebundenen Gemischen („Kiessanden“).

Damit soll der wirtschaftliche Einsatz ungebundener Gemische in der Schweiz gesichert, gefördert und die volkswirtschaftlichen Kosten so gering wie möglich gehalten werden. Dazu müssen Prüfaufwände und –kosten optimiert werden. Dadurch können auch kleinere Gesteinskörnungsvorkommen, die vielfach auch in Form von Baugrubenaushüben anfallen, mit einem vertretbaren Prüfungsaufwand in den Baustoffkreislauf eingeführt werden. Anderenfalls werden solche Mengen als Aushub deponiert bzw. ohne normkonformen Prüfnachweis verbaut.

2 Ziel und Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden Daten gesammelt, um die Bewertung der Frostempfindlichkeit gemäss SN 670-119 NA [1] zu überprüfen und zu optimieren. Dazu wurden aus der gesamten Schweiz Datensätze von ungebundenen Gemischen gesammelt und ausgewertet (siehe Kap. 5), welche von Produzenten zur Verfügung gestellt wurden. Anschliessend sind ausgewählte, für die Schweiz repräsentative, ungebundene Gemische auf deren Frostempfindlichkeit hin mittels ausgewählten Laborprüfungen (siehe Kap. 5.3) überprüft und bewertet worden. Im nachfolgenden Flussdiagramm (Abbildung 1) wird die Vorgehensweise für die Datenerhebung und Prüfung veranschaulicht. Dabei wird zuerst der Durchgang bei 0.063 mm mittels einer Siebanalyse (vgl. Kap. 5.3.1) ermittelt und mit der Normanforderung der SN 670 119-NA von 3 M.-% verglichen. Ist dieser Grenzwert überschritten, wird die Frostempfindlichkeit mittels CBR-Verfahren (vgl. Kap. 5.3.4) bestimmt. Von ausgewählten Proben wird zusätzlich anhand einer Schlämmanalyse (vgl. Kap. 5.3.2) das „alte“ Kriterium der Frostempfindlichkeit überprüft, welches einen maximalen Durchgang von 3 M.-% bei einer Korngrösse von 0.02 mm vorgibt.

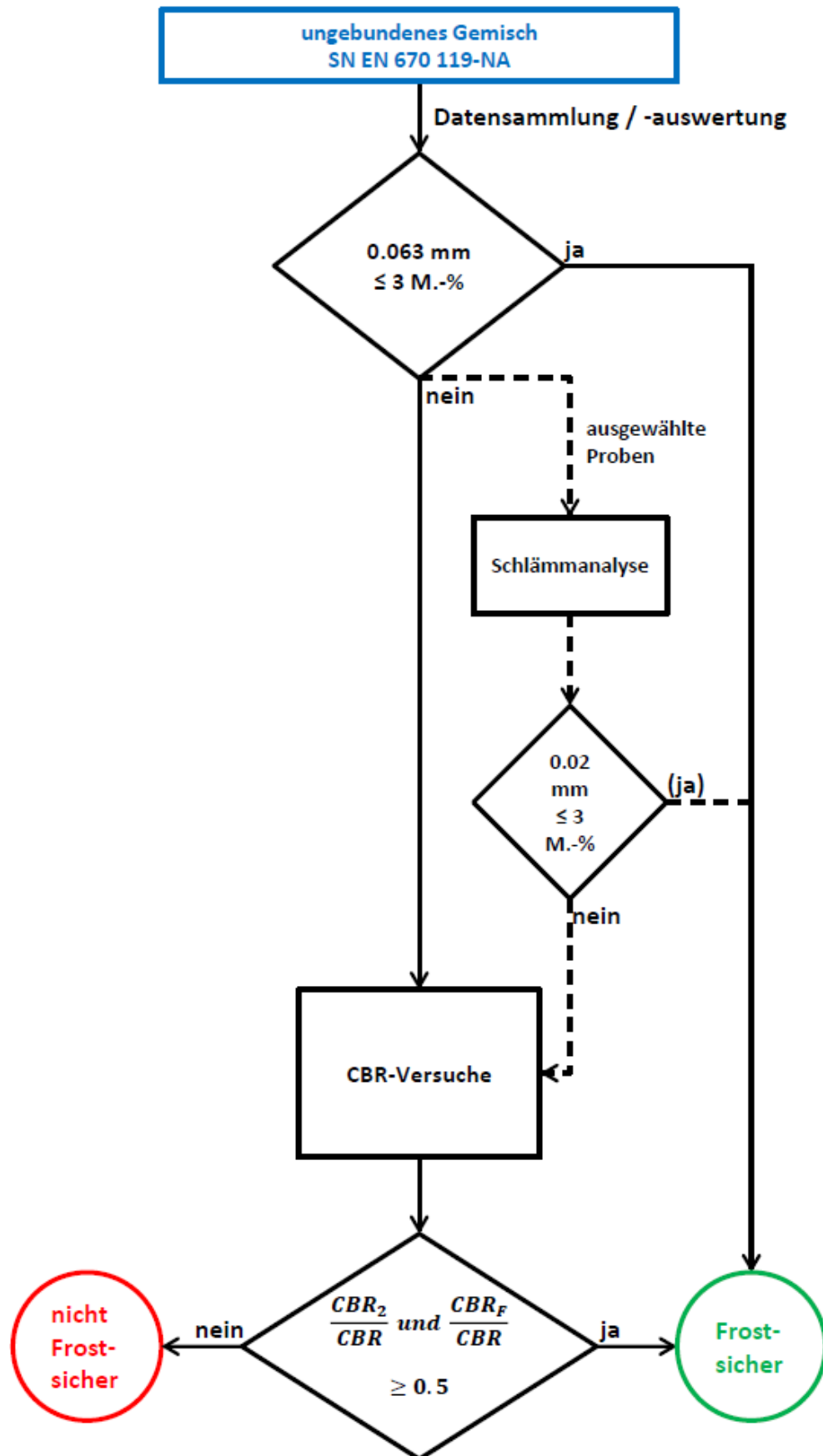


Abbildung 1: Ablauf der Untersuchungen

3 Normung

3.1 Aktuelle Situation

Als Grundlage diese Forschungsarbeit gilt die SN 670 119-NA:2011 [1], in welcher die Anforderungen an Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für den Ingenieur- und Strassenbau festgelegt sind (vgl. Abbildung 2).

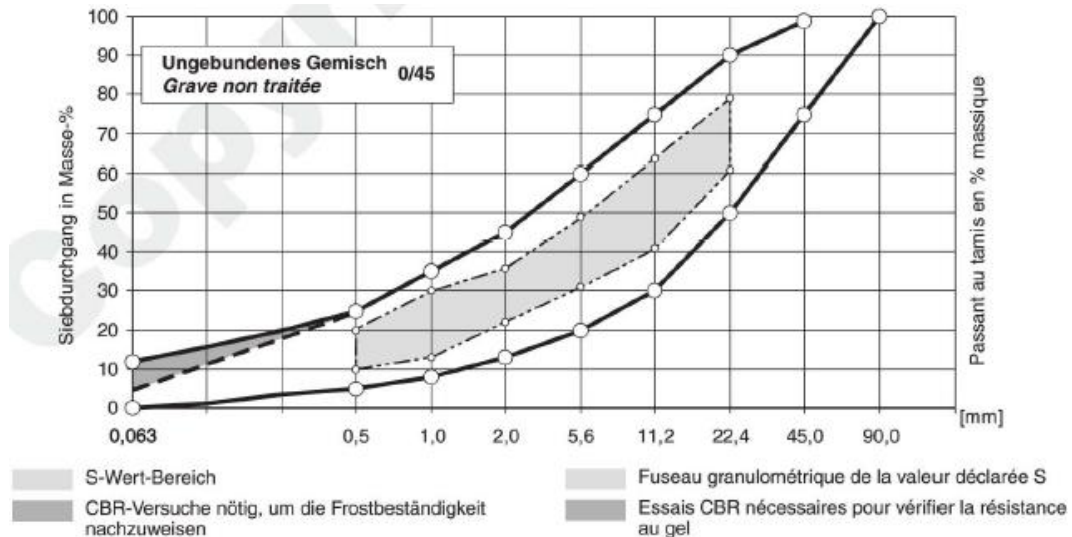


Abbildung 2: Grenzwertbereiche für ungebundene Gemische 0/45 mm [1]

In Kapitel L, Nr. 26, der oben genannten Norm wird die Frostbeständigkeit über den Grenzwert des Feinanteils mit 3 M.-% bestimmt und auf die SN EN 13285 referenziert, in denen die Anforderungen auf europäischer Ebene für ungebundene Gemische beschrieben sind. In dieser Norm werden jedoch keine Anforderungen bzw. Grenzwerte bezüglich der Frostempfindlichkeit festgelegt. Es wird einzig darauf aufmerksam gemacht, dass unter bestimmten Umständen die Frostempfindlichkeit, die Durchlässigkeit und die Auslaugung berücksichtigt werden müssen. Weiterhin wird in der EN 13285:2010 angemerkt, dass noch keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen, um Prüfverfahren und Anforderungsgrenzen festzulegen. In der Schweiz hingegen ist eine langjährige Erfahrung diesbezüglich vorhanden, sodass in der SN 670 119-NA die Prüfung der Frostempfindlichkeit mittels CBR-Verfahren gemäss SN 670 321 [2] und SN 670 330-47 [3] und entsprechende Anforderungen (siehe Abbildung 3) definiert wurden.

Frostbeständigkeit <i>Résistance au gel</i>	SN 670 321 [12] SN 670 330-47 SN EN 13286-47 [14]	$\frac{CBR_2}{CBR}$ und / et $\frac{CBR_F}{CBR} \geq 0,5$	Wenn Feinanteil > 3 Masse-% Si teneur en fines > 3% massique
--	---	---	---

Abbildung 3: Auszug SN 670 119-NA Tab.3 [1]; Eigenschaften und Anforderungen für ungebundene Gemische

3.2 Historie

Der in der SN 670 119-NA festgelegte Grenzwert von 3 M.-% bei einer Korngrösse von 0.063 mm basiert auf den Anforderungen aus der durch die SN 670 119-NA ersetzten Norm SN 670 120d [4], welche für den Kiessand I den Grenzwert des Feinanteils auf 3 M.-% festlegt (siehe Abbildung 4). Für den Kiessand II, welcher bezüglich des Korngrössenverteilungsbereiches grössere Toleranzen aufweist, wurden bezüglich des Feinanteils keine Grenzwerte für die Frostbeständigkeit festgelegt. Es wurden lediglich erhöhte Qualitätsanforderungen definiert, welche durch weitere Prüfungen (z.B. Wasserdurchlässigkeit) nachgewiesen werden mussten. Das CBR-Verfahren muss, unabhängig vom Feinanteil, für alle Kiessande II durchgeführt werden.

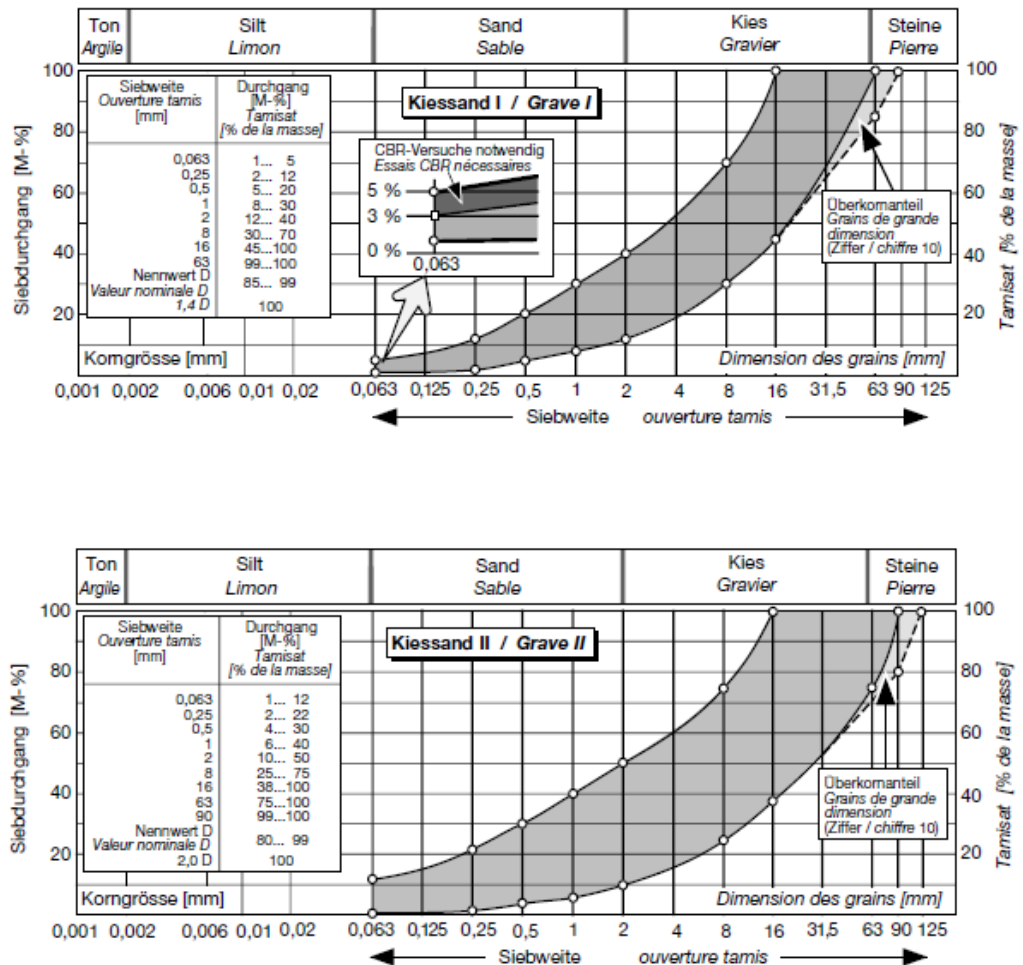


Abbildung 4: Korngrössenverteilungsbereich Kiessand I (oben) / Kiessand II (unten) [4]

Die Norm SN 670 120d wiederum ersetzte im Jahr 1999 die alte SN 670 120b von 1980. Dabei wurde die Korngrösse zur Beurteilung der Frostepfindlichkeit von 0.02 auf 0.063 mm geändert. Der Anteil der Korngrösse 0.063 mm kann mit einer einfachen Siebanalyse ermittelt werden, während für die Bestimmung des Anteils bei 0.02 mm zusätzlich eine Schlämmanalyse durchgeführt werden muss. Jedoch wurde der Grenzwert des Feinanteils bei der Revision der Norm nicht angepasst. Der Grenzwert betrug weiterhin 3 M.-%, was jedoch zu einer ungleich strengerer Anforderung führt. Warum der Grenzwert des Anteils nicht entsprechend erhöht wurde, kann heute nicht nachvollzogen werden.

4 Grundlagen

Dieses Kapitel soll in Kürze einen Überblick über jene Eigenschaften ungebundener Gemische vermitteln, die einen wesentlichen Einfluss auf die Frostepfindlichkeit ausüben. Es sind primär physikalische, respektive geometrische Kenngrößen, von denen die Auswirkung des Frostes im eingebauten Zustand eines Bodens abhängt.

4.1 Korngrößenverteilung

Im Grundbau-Taschenbuch von Karl Josef Witt [11] wird die Korngrößenverteilung folgendermassen definiert: *„Die Korngrößenverteilung gibt die Massenanteile der in einer Bodenart vorhandenen Korngrössengruppen an. Sie ist ein Schlüssel für viele Verhaltensweisen des Bodens. Für grob- und gemischtkörnige Böden dient sie als Klassifizierungsmerkmal.“*

Die Korngrößenverteilung sagt also etwas über die Masseverteilung der einzelnen Kornfraktionen in einem Gemisch aus. Diese wiederum hat einen sehr wesentlichen Einfluss auf die Menge und Grösse der frei bleibenden Hohlräume in einem Gemisch, in denen sich Wasser sammeln und im Falle von Frost eine sprengende Wirkung entfalten kann.

4.2 Ungleichförmigkeit

Die Ungleichförmigkeit ist ein Mass für die Verteilung der Massen der Siebdurchgänge einer Probe auf die einzelnen Kornfraktionen. Die Ungleichförmigkeitszahl C_U ist das Verhältnis der Durchmesser d_{60} und d_{10} , also jener beider Durchmesser respektive Maschenweiten, bei denen 60 bzw. 10 Massenprozent der Gesteinsprobe durch das Sieb fallen. Böden mit $C_U < 5$ sind „gleichförmig“, mit $5 < C_U < 15$ „ungleichförmig“ und mit $C_U > 15$ „sehr ungleichförmig“.

4.3 Krümmungszahl

Die Krümmungszahl C_c ist ein weiterer Kennwert, der zur Beschreibung der Sieblinie herangezogen werden kann. So gibt die Zahl Auskunft über die Häufigkeitsverteilung der Korngrößen und ermöglicht eine Aussage über die Verdichtungsfähigkeit, die Wasseraufnahme, die Frostepfindlichkeit und die Kapillarität.

4.4 Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit eines ungebundenen Gemisches spielt eine massgebliche Rolle bezüglich der Frostepfindlichkeit, da diese vom Hohlraumvolumen und der Porengeometrie des Bodens abhängt und somit eine Kenngrösse für die Wasserhaltung des Bodens darstellt. Eine geringe Durchlässigkeit bedeutet einerseits ein geringes Hohlraumvolumen, jedoch auch ein ebenso geringes Ausbreitungsvolumen für eventuelle Eisbildung. In Abbildung 5 sind typische Werte der Durchlässigkeit von Bodenarten aufgelistet.

Bodenart	k [m/s]	
	Grenzbereiche	überwiegend
Steingeröll	10^{-1} bis 5	
Grobkies	10^{-2} bis 1	
Mittelkies		$3,5 \cdot 10^{-2}$
Feinkies	10^{-4} bis 10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$ bis $3 \cdot 10^{-2}$
Grobsand	10^{-5} bis 10^{-2}	10^{-4} bis 10^{-3}
Mittelsand	10^{-6} bis 10^{-3}	10^{-4}
Feinsand	10^{-6} bis 10^{-3}	10^{-5} bis 10^{-4}
Sand, lehmig, schluffig	10^{-7} bis 10^{-4}	10^{-6}
Schluff	10^{-9} bis 10^{-5}	10^{-9} bis 10^{-7}
Löss	10^{-10} bis 10^{-5}	ungestört: 10^{-5} ; gestört: 10^{-10} bis 10^{-7}
Lehm	10^{-10} bis 10^{-6}	10^{-9} bis 10^{-8}
Ton	10^{-12} bis 10^{-8}	schluffig: 10^{-9} bis 10^{-8} ; mager: 10^{-10} bis 10^{-9} ; fett: 10^{-12} bis 10^{-10}

Abbildung 5: typische Werte für Durchlässigkeit [12]

4.5 Frost

Als Frost wird das Absinken der Temperatur unter die Nullgradgrenze bezeichnet. Aufgrund der physikalischen Phänomene von Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit wird also eine bestimmte Zeit benötigt, um eine Temperaturdifferenz zwischen zwei Medien auszugleichen. Die Temperaturverteilung im Boden ist somit keine Konstante, sondern eine Funktion des Ortes, der Zeit, der Wärmeleitfähigkeit sowie anderer physikalischer Eigenschaften, die den Austausch thermischer Energie beeinflussen.

4.6 Frost im Boden

Frost im Boden kann als homogener und nicht homogener Bodenrost auftreten. Homogener, d.h. gleichmässiger und ungeschichteter Bodenrost ist bei Böden mit geringer Kapillarwirkung (Kiesen und Sanden) zu finden. Da die Frosthebungen jedoch minimal sind, ist diese Art des Bodenrostes für den Strassenbau nicht massgeblich und kann daher vernachlässigt werden.

Im Strassenbau ist der nicht homogene Bodenrost bei geschichteten, teils bindigen, Böden mit erhöhter Kapillarwirkung von grosser Bedeutung. Bei dieser Art des Bodenrostes können sich in Schichten bzw. Hohlräumen Eisbänder bzw. Eislinsen bilden (siehe Abbildung 6). Ursache für dieses Phänomen ist unter anderem, dass Wasser aufgrund der Kapillarwirkung von einem Wasservorrat (Grundwasser oder Sickerwasser) angesaugt werden kann und der Wassergehalt an den Stellen der Eisbildung stark erhöht wird. Die stetige Eisbildung an diesen Stellen führt letztendlich zu teils erheblichen Frosthebungen und in der Tauperiode zu entsprechenden Tragfähigkeitsverlusten. Gemäss [13] wird diese Frostempfindlichkeit unter anderem durch folgende komplexe Randbedingungen beeinflusst:

- Kornzusammensetzung & Kornform
- Mineralbestand der Feinkornfraktion und Gehalt an Tonmineralien
- Wasserbeweglichkeit (Durchlässigkeit)
- Porenwasserdruck an der Eis-Wasser-Grenze
- Verdichtungsgrad.

Zur einfacheren Beschreibung und Einschätzung dieser Frostempfindlichkeit wurden diverse Frostkriterien entwickelt, von welchen exemplarisch im nachfolgenden Kapitel die üblichsten erläutert werden.

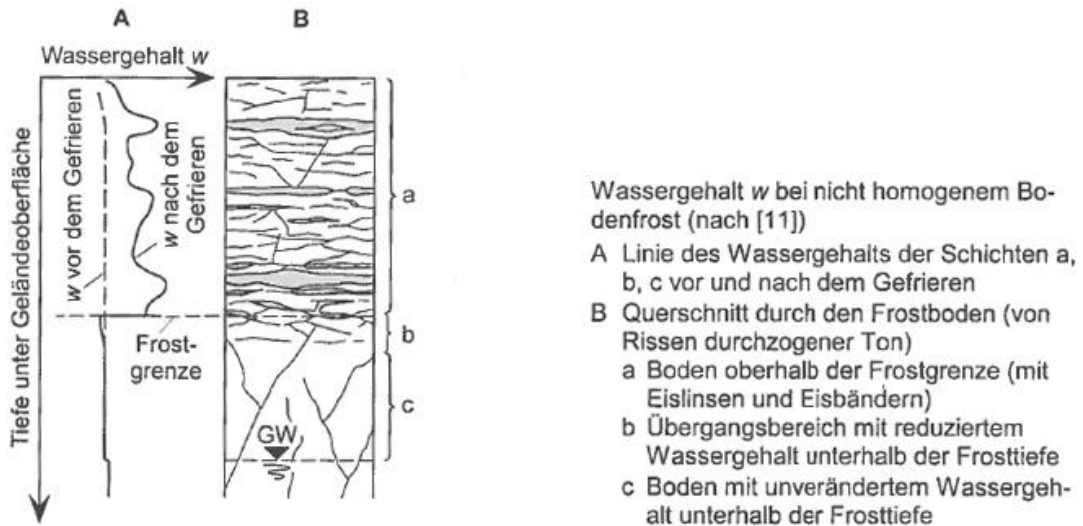


Abbildung 6: Eislinsen und -bänder bei nicht homogenem Bodenfrost [14]

4.7 Frostkriterien

In der Literatur wurden bereits unzählige Frostkriterien veröffentlicht. Daher sollen in diesem Abschnitt drei der üblichsten Frostkriterien kurz aufgelistet werden.

4.7.1 Frostkriterium nach Casagrande

Das bekannteste Frostkriterium, welches auch die wissenschaftliche Grundlage für die Bewertung der SN 670 120b darstellt, ist dasjenige nach Casagrande. Dabei wird die Frostepfindlichkeit je nach Durchgang bei 0,02 mm und Ungleichförmigkeit (siehe Kap. 4.2 und 5.2.1) wie folgt festgelegt:

Als frostepfindlich sind demnach folgende Böden zu bewerten:

- Durchgang bei 0,02 mm > 3 M.% und Ungleichförmigkeitskennzahl $U > 15$
- Durchgang bei 0,02 mm > 10 M.% und Ungleichförmigkeitskennzahl $U < 5$

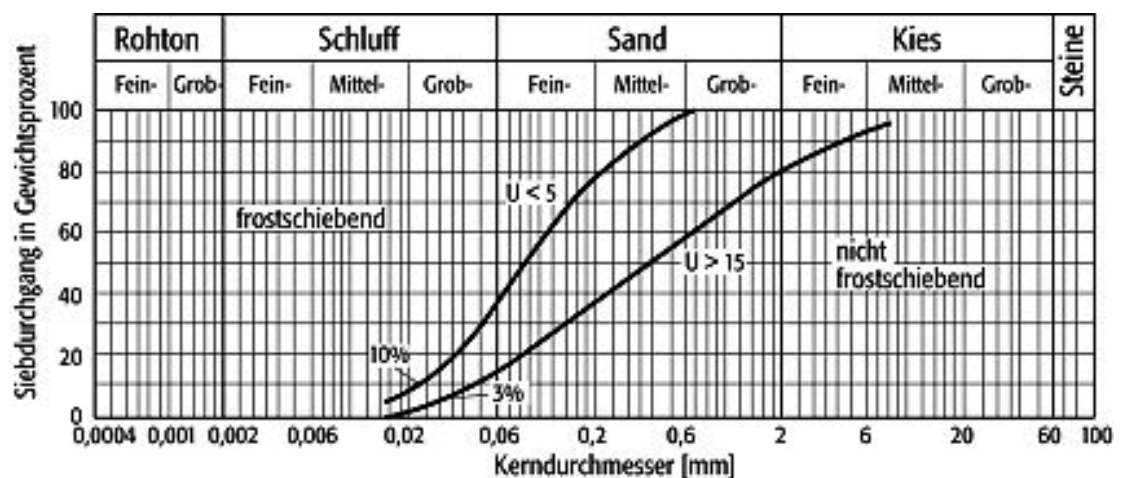


Abbildung 7: Frostkriterium nach Casagrande [15]

4.7.2 Frostkriterium nach Schaible

In Abbildung 8 ist das Frostkriterium nach Schaible verdeutlicht. Dabei werden Böden als frostsicher bewertet, welche bei 0.02 mm einen Anteil von < 10 M.-% besitzen und bei 0.1 mm einen Anteil von < 20 M.-%. Böden, welche bei den vorgenannten Korngrößen höhere Masseanteile besitzen, werden als frostepfindlich bzw. frostgefährlich bezeichnet.

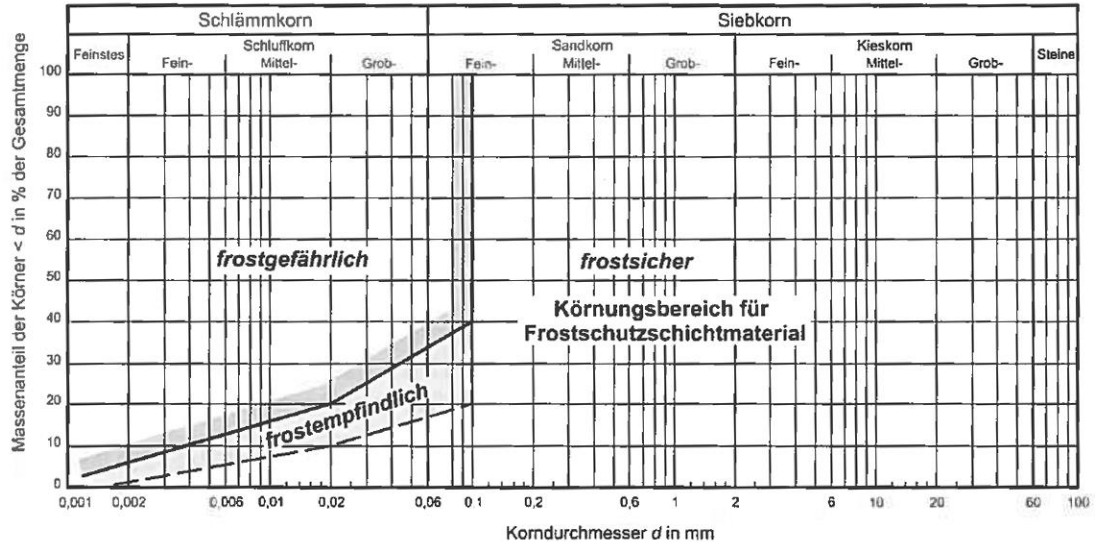


Abbildung 8: Frostkriterium nach Schaible [14]

4.7.3 Frostkriterium nach ZTV E-StB

In den zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Strassenbau (ZTV E-StB) [10] werden die Bodenarten nach DIN 18196 anhand des Durchgangs bei 0.063 mm und der Ungleichförmigkeitskennzahl in die Frostepfindlichkeitsklassen F1 (nicht frostepfindlich), F2 (gering bis mittel frostepfindlich) und F3 (sehr frostepfindlich) eingeordnet (siehe Abbildung 9).

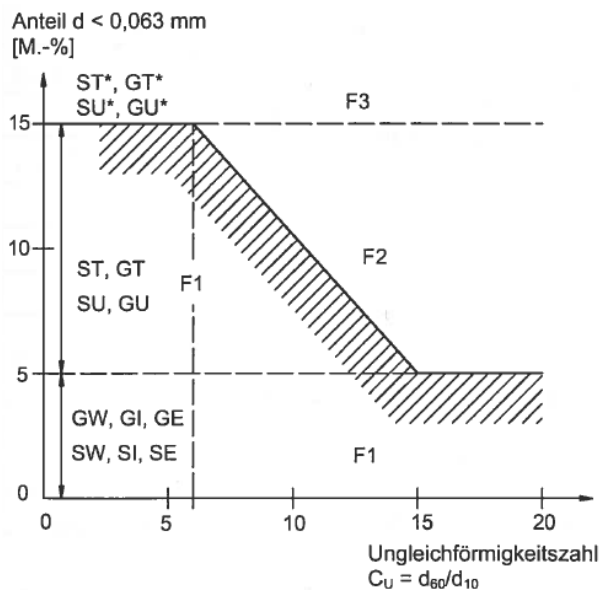


Abbildung 9: Abhängigkeit Frostepfindlichkeit zu Ungleichförmigkeit [16]

5.2 Datenauswertung

Aus den gesammelten Datensätzen wurden die folgenden Kennwerte entweder durch Prüfergebnisse, durch Berechnungen oder Näherungsformeln ermittelt, welche anschliessend kurz erläutert werden:

- Durchgang in M.-% bei den Korngrössen 0.02, 0.063 und 2 mm
- Korndurchmesser in mm bei einem Durchgang von 10, 30, 50 und 60 %
- Ungleichförmigkeitszahl C_u
- Krümmungszahl C_c
- Durchlässigkeit (nach Beyer) k in m/s
- optimaler Wassergehalt [%] und Dichte [kg/m³] bei Proctor-Verdichtung (Proctor-Versuch)
- CBR-Werte (CBR, CBR₂ und CBR_F) sowie die daraus ermittelten Verhältnisse

Nachfolgend werden die aus Prüfzeugnissen abgelesenen bzw. berechneten Kennwerte kurz erläutert. Der *Durchgang* und die *Korndurchmesser* wurden aus den Siebanalysen der jeweiligen Prüfzertifikate herausgelesen (vgl. Kap. 5.3.1). Die CBR-Werte und jeweiligen Verhältnisse wurden aus externen Prüfprotokollen entnommen oder selber geprüft und nach der in Kapitel 5.3.4 beschriebenen Formel berechnet.

5.2.1 Ungleichförmigkeitszahl

Die Ungleichförmigkeitszahl C_u wird anhand nachfolgender Formel berechnet,

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

wobei d_{10} bzw. d_{60} dem Korndurchmesser entspricht, welcher bei einem Durchgang von 10 bzw. 60 % vorliegt.

5.2.2 Krümmungszahl

Die Krümmungszahl wird wie folgt berechnet:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} * d_{10}}$$

Dabei entspricht d_{10} , d_{30} und d_{60} den Korndurchmessern, welche bei den Durchgängen von 10, 30 und 60 % auftreten.

5.2.3 Durchlässigkeit

Die *Durchlässigkeit* k wurde anhand der folgenden Näherungsformel nach Beyer (1964) abgeschätzt:

$$k = c(C_u) * d_{10}^2$$

Der Faktor $c(C_u)$ wird dabei vereinfacht mit 0.005 angenommen und d_{10} entspricht dem Korndurchmesser bei einem Durchgang von 10 %.. Die Näherung wurde für Proben mit einer Ungleichförmigkeitszahl von 1 – 20 entwickelt.

5.3 Laborprüfungen

5.3.1 Siebanalysen

Die Prüfung gemäss SN EN 933-1 [5] besteht im Aufteilen und Trennen von Material mit Hilfe einer Serie von Sieben in unterschiedliche Kornklassen mit abnehmenden Korngrössen. Die Öffnungsweiten und die Anzahl der Siebe sind entsprechend der Art der Probe und der geforderten Genauigkeit auszuwählen. Die Masse des Rückstandes der Körner auf den verschiedenen Sieben ist auf die Ausgangsmasse der Messprobe zu beziehen. Die kumulativ erhaltenen Anteile, die jedes Sieb passieren, werden numerisch und graphisch als so genannte Kornverteilungskurve dargestellt, wobei jede Kurve den Durchgang in Massenprozenten in Funktion der Sieböffnung aufzeigt.

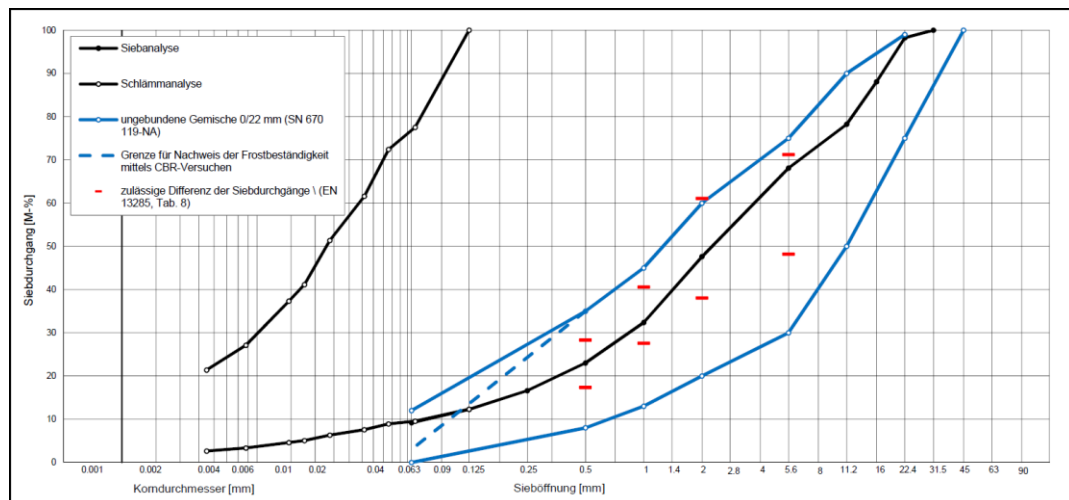


Abbildung 11: Beispiel einer Siebanalyse inkl. Schlämmanalyse und Grenzen gemäss SN 670 119-NA

5.3.2 Schlämmanalysen

Mit der Schlämmanalyse wird die Korngrössenverteilung von Material (Mehlkorn) durch Sedimentation in einer Suspension bestimmt, dessen Körner kleiner 0,125 mm sind. In bestimmten Zeitabständen wird die Dichte der Suspension durch Ablesen der Eintauchtiefe des Aräometers zu definierten Zeiten ermittelt. Der maximale Korndurchmesser der Körner, die sich noch in Suspension befinden, kann aus der Dichte der Suspension nach dem Gesetz von Stokes berechnet werden, wobei die Körner als kugelförmig angenommen werden.

5.3.3 Proctorversuch

Mit dem Proctorversuch gemäss SN 670 330-2 (EN 13286-2) wird der Verdichtungsprozess im Labor mit definierter Verdichtungsenergie durchgeführt. Der Verdichtungsversuch ermöglicht die Bestimmung des optimalen Wassergehaltes und der maximalen Dichte. Diese Werte bilden die Grundlage für die Festsetzung der bei der Bauausführung zu erreichende Verdichtung. Die Verdichtungsenergie für den Standard-Proctorversuch in Verbindung mit den CBR-Versuchen beträgt 1,2 MJ/m³ (5 Schichten mit je 28 Schlägen).

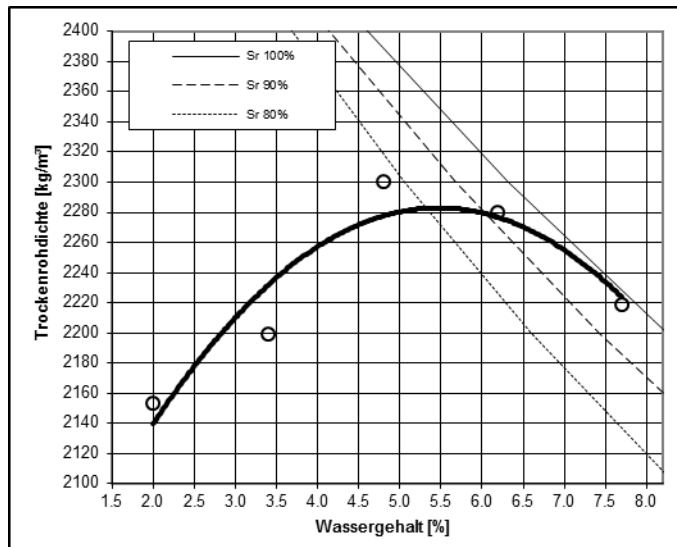


Abbildung 12: Beispiel einer Verdichtungskurve

5.3.4 Verfahren zur Bestimmung der CBR-Koeffizienten

Der CBR-Wert (California-Bearing-Ratio) beschreibt einen Kennwert für die Tragfähigkeit eines Gemisches, welcher durch einen Stempel-Eindringversuch ermittelt wird, bei dem ein zylindrischer Stempel mit genormter Querschnittsfläche mit einer bestimmten Eindringgeschwindigkeit in einen Prüfkörper, der sich in einer Form befindet, eingedrückt wird. Der Wert wird als Verhältnis bei einer bestimmten Eindringtiefe gemessenen Kraft zu einer Bezugskraft in Prozent (%) berechnet. Dieser Versuch wird nach Verdichtung mit einfacher Proctor-Verdichtungsarbeit (5 Schichten à 28 Schläge / Proctorhammer B) unmittelbar (CBR-Wert) gemäss SN 670 330-47 oder nach einer bestimmten Nachbehandlung durchgeführt. Dabei kann die Nachbehandlung durch eine 96 h Wasserlagerung (CBR2-Wert) gemäss SN 670 330-47 oder einen definierten Frost-Auftauzyklus (CBR_F-Wert, siehe Abbildung 13) gemäss SN 670 321a erfolgen. Dieser Zyklus beinhaltet gemäss Norm einen „vollständigen Frost-Auftau-Zyklus mit wirklichkeitsnahen Temperaturgradienten“. Weiterhin wird bei diesem Versuch eine reale Einbausituation simuliert, indem nur der obere Probenteil gefroren wird (-7.5 °C), während im unteren Teil der Probe eine Grundwassersituation mit einem Wasserspiegel von 25 mm über Boden und einer Temperatur beim Frostzyklus von +1.5 °C eingestellt wird.

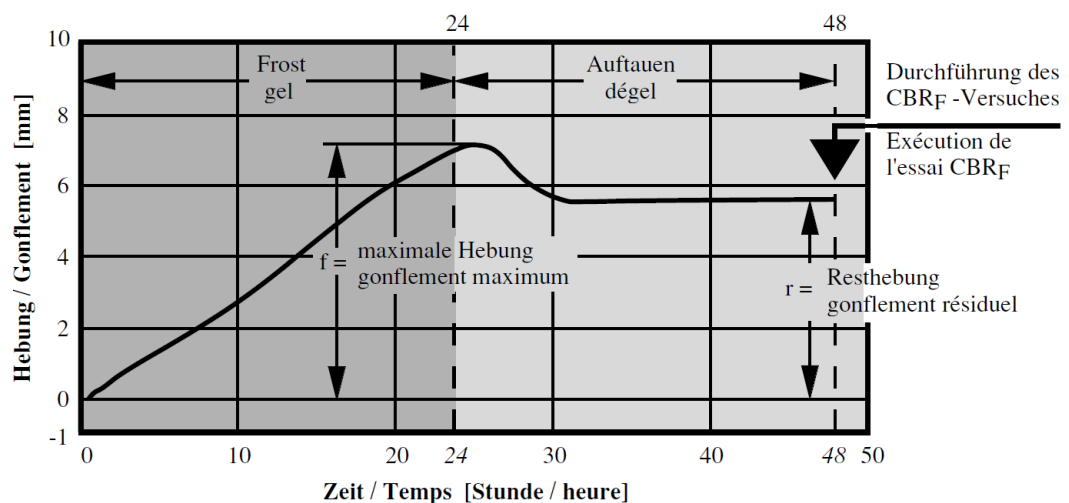


Abbildung 13: CBR_F-Frostzyklus SN 670 321a [2]

Die Frostempfindlichkeit des Gemisches wird anschliessend anhand der Verhältnisse der einzelnen, bei den Stempel-Eindringversuchen ermittelten CBR-Werten gemäss SN 670 119-NA und nachfolgender Formel bewertet.

$$\frac{CBR_2}{CBR} \text{ und } \frac{CBR_F}{CBR} \geq 0.5$$



Abbildung 14: Stempleindringversuch (zur Verdeutlichung ohne Auflast)

5.3.5 Rundung

Es ist zu beachten, dass die in der SN 670 119-NA aufgeführten Grenzwerte für die hier relevanten Grössen unterschiedlich definiert sind. Die Rundungsvorgaben sind ein Indiz für die Aussagegenauigkeit der entsprechenden Methoden. So ist der Grenzwert bei 0.063 mm auf 3 M.-% ohne Nachkommastelle definiert. Dies ermöglicht in der Praxis eine gewisse Toleranz bei der Bewertung von Ergebnissen, da mathematisch z.B. 3.4 M.-% ebenfalls noch gerundet 3 M.-% entsprechen. Gleiches gilt für das Verhältnis der CBR-Koeffizienten, welches auf 0.5 festgelegt ist. Ein CBR_F/CBR -Wert von 0.47 würde mathematisch als 0.5 gelten und somit die Bewertung des Materials als frostsicher bedeuten. Im vorliegenden Forschungsbericht wurde so vorgegangen, dass diese Werte auf eine (Durchgang) bzw. zwei (CBR-Werte) Nachkommastellen ausgewertet wurden. Dies führt dazu, dass beim oben genannten Beispiel eine Probe mit einem CBR_F/CBR -Wert von 0.47 und eine Probe mit einem Durchgang von 3.4 M.-% bei 0.063 mm als nicht frostsicher eingestuft wird.

5.3.6 Messunsicherheit

Die aufgeführten Prüfergebnisse sind durch die Anwendung der hier beschriebenen Verfahren festgestellte Merkmalswerte. Das Prüfergebnis ist immer mit einer Streuung um den unbekannten, wahren Wert verbunden. Diese Streuung setzt sich aus der Material- und Prüfstreuung (Prüfgeräte, Personal, Umgebungsbedingungen) zusammen. Die Messunsicherheit ist gemäss der SAS (Leitfaden zur Validierung von Prüfmethoden [...], 326.dw, 2013-02, Rev. 01) [17] wie folgt beschrieben:

„Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden könnte. Die Messunsicherheit ist die Summe bzw. Kombination bestimmter Unsicherheitsfaktoren oder -quellen, d.h. Einflussgrössen“

Bei den hier beschriebenen Verfahren sind hauptsächlich folgende Einflussgrössen zu nennen, welche das Messergebnis massgeblich beeinflussen:

- Probenahme (Homogenität, Repräsentativität)
- Vorbereitung der Probe (Einengung, Zugabe Wasser, Trocknung, ...)
- Durchführung der Prüfung

Es ist jedoch zu beachten, dass diverse Faktoren, wie. z.B. die Probenahme, nicht quantifizierbar sind und in die Berechnung der Messunsicherheit nicht eingehen. In die Berechnung der Messunsicherheit können nur bekannte Faktoren, z.B. Ablesegenauigkeiten der Prüfgeräte, einbezogen werden.

Für die Siebanalyse (Siebe 0.063 – 4 mm) wird in der SN EN 933-1 [5] folgende Beziehung der Messunsicherheiten angegeben:

$$\text{Wiederholbarkeit } r = 0.042 \sqrt{X (100 - X)}$$

$$\text{Vergleichbarkeit } R = 0.086 \sqrt{X (100 - X)}$$

Wobei X dem Durchgang der jeweiligen Korngössen in Prozent entspricht. Wenn man als Beispiel für X = 5.0 M.-% annimmt, ergibt sich die Wiederholbarkeit r zu 0.91 % und die Vergleichbarkeit R zu 1.87 %.

Für den Proctorversuch und die Bestimmung der CBR-Werte sind keine Werte für die Messunsicherheiten in den jeweiligen Normen angegeben. Durch eigene Vergleichs- und Ringversuche können jedoch folgende Messunsicherheiten angegeben werden:

- Proctorversuch: ca. 2.2 % (bzw. 4.4 % erweiterte Messunsicherheit 95 % Quantil)
- CBR-Versuch: ca. 1.2 % (bzw. 2.4 % erweiterte Messunsicherheit 95 % Quantil)

Somit sind die hier aufgelisteten Ergebnisse grundsätzlich auch unter dem Aspekt der Messunsicherheit zu bewerten und einzuordnen. Aufgrund der Menge der Daten wurde jedoch in dieser Arbeit auf eine detaillierte Betrachtung der Messunsicherheit verzichtet.

6 Auswertung und Ergebnisse

6.1 Überblick

Von den insgesamt 107 gemäss Kapitel 2 untersuchten Datensätzen erfüllen 99 Stk. (92.5 %) das Beurteilungskriterium der Frostepfindlichkeit (CBR-Prüfung) gemäss SN 670 119-NA. Nur 8 (7.5 %) der Proben erfüllen dieses Kriterium nicht. Es ist zu beachten, dass in der Auswertung das Kriterium (CBR_F/CBR) für die Bewertung herangezogen wird, da dies im Allgemeinen am strengsten und somit massgebend ist. Bei einer detaillierteren Auszählung der Ergebnisse (siehe Tabelle 1) wird erkenntlich, dass 43 Proben (40.2 %), welche das Kriterium erfüllen, einen Durchgang von > 5 M.-% bei der Korngrösse 0.063 mm haben. 98 Proben (91.6 %) haben einen Durchgang von > 3 M.-% bei 0.063 mm, was wiederum 99 % aller als frostsicher bewerteten Proben entspricht. Von den 8 Proben, welche das Kriterium nicht erfüllen, haben jeweils 4 Proben einen Durchgang von grösser bzw. kleiner als 5 M.-% bei 0.063 mm. Jedoch haben alle diese Proben bei 0.063 mm einen Durchgang von > 3 M.-%. Eine Auflistung der einzelnen Datensätze ist im Anhang zu finden. In Abbildung 15 sind alle Proben bezüglich der Durchgänge bei 0.02, 0.063 und 2 mm sowie dem CBR_F/CBR -Koeffizienten abgebildet. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse detaillierter veranschaulicht und allfällige Korrelationen untersucht. Im Anhang sind alle einzelnen Datensätze ersichtlich.

Tabelle 1: Auszählung der Ergebnisse

			Anzahl [-]	Anteil [%]
Datensätze			107	100.0
Frostkriterium erfüllt ($CBR_F/CBR \geq 0.5$)			99	92.5
Frostkriterium nicht erfüllt ($CBR_F/CBR < 0.5$)			8	7.5

aktuelles Kriterium ≤ 3 M.-% bei 0.063 mm SN EN 670119-NA	Anteil bei 0.063 mm	> 3.0 %	106	99.1
		≤ 3.0 %	1	0.9
	Frostkriterium erfüllt ($CBR_F/CBR \geq 0.5$)	> 3.0 %	98	91.6
		≤ 3.0 %	1	0.9
	Frostkriterium nicht erfüllt ($CBR_F/CBR < 0.5$)	> 3.0 %	8	7.5
		≤ 3.0 %	0	0.0

altes Kriterium ≤ 3 M.-% bei 0.02 mm SN 670 120b	Anteil bei 0.02 mm	> 3.0 %	10	9.3
		≤ 3.0 %	17	15.9
	Frostkriterium erfüllt ($CBR_F/CBR \geq 0.5$)	> 3.0 %	9	8.4
		≤ 3.0 %	14	13.1
	Frostkriterium nicht erfüllt ($CBR_F/CBR < 0.5$)	> 3.0 %	1	0.9
		≤ 3.0 %	3	2.8

Vorschlag: Kriterium ≤ 5 M.-% bei 0.063 mm	Anteil bei 0.063 mm	> 5.0 %	47	43.9
		≤ 5.0 %	60	56.1
	Frostkriterium erfüllt ($CBR_F/CBR \geq 0.5$)	> 5.0 %	43	40.2
		≤ 5.0 %	56	52.3
	Frostkriterium nicht erfüllt ($CBR_F/CBR < 0.5$)	> 5.0 %	4	3.7
		≤ 5.0 %	4	3.7

Bemerkung: 27 von 107 Proben mit Schlämmanalyse				
---	--	--	--	--

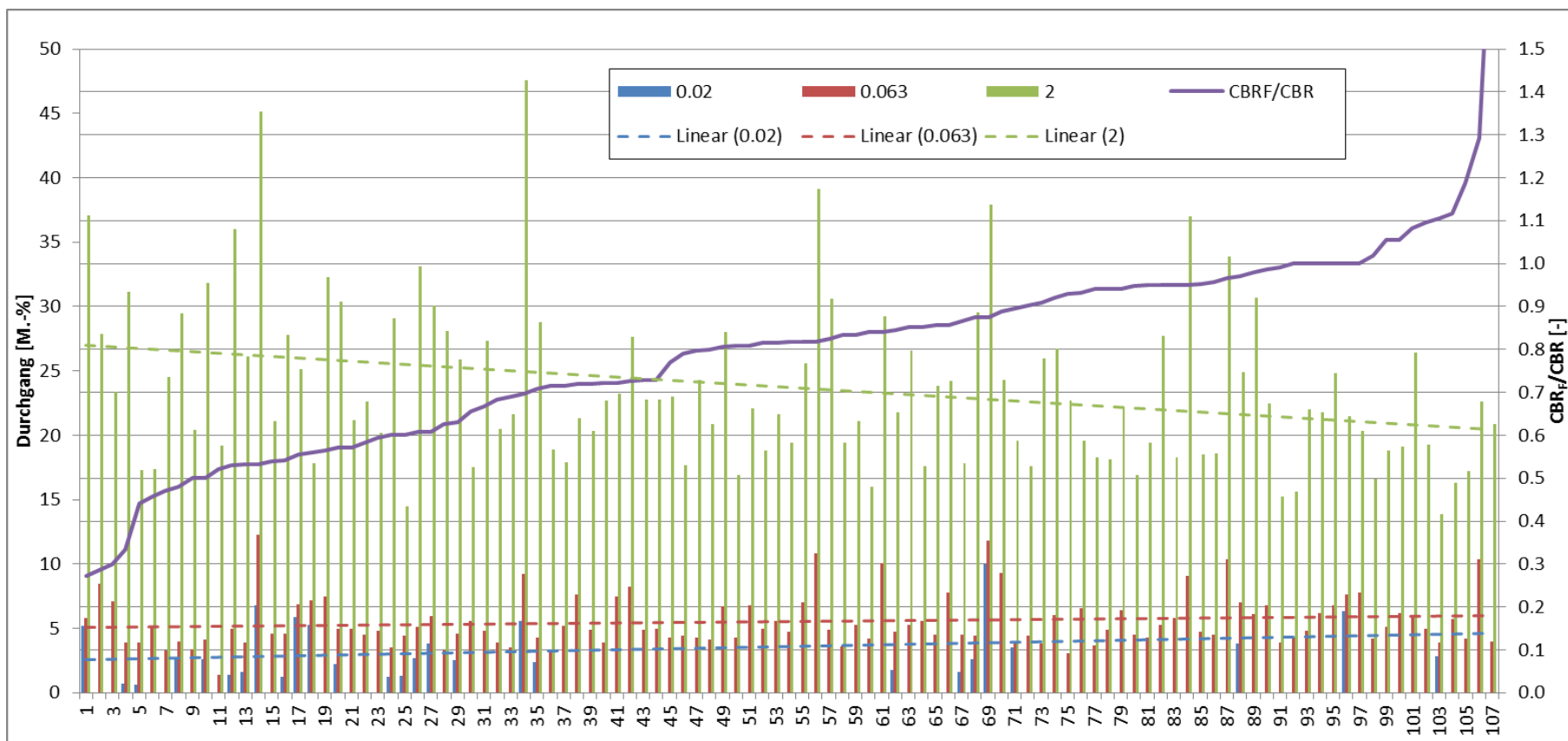


Abbildung 15: Durchgänge aller Proben mit aufsteigendem CBR_F/CBR -Koeffizienten

6.2 Vergleich Siebdurchgang 0.02 mm zu 0.063 mm

Die unten stehende Abbildung 16 zeigt, dass rein aus geometrischer Betrachtung der Datensätze ein Durchgang von 3 M.-% bei 0.02 mm einem Durchgang von 5 M.-% bei einer Siebweite von 0.063 mm entspricht. Dabei wurden die Proben in Betracht gezogen, bei denen neben der Siebanalyse auch die Schlämmanalyse durchgeführt wurde. Diese zeigen, dass im Mittel 3 M.-% bei 0.02 mm einem Durchgang von 5 M.-% bei 0.063 mm entsprechen. Somit ist eine Anhebung des Grenzwertes zur Beurteilung der Frostepfindlichkeit aus rein geometrischer Sicht plausibel. Die rot markierten Datenpunkte verweisen in der unten stehenden Grafik auf Proben, welche die CBR-Prüfung nicht bestanden haben. Mit einer Anhebung, werden in diesem Zusammenhang 3 der 4 Proben, bei dem auch eine Schlämmanalyse durchgeführt wurde, überschätzt, wobei diese auch bei dem „alten“ Kriterium nach SN 670 120b mit 3 M.-% bei 0.02 mm überschätzt worden wären. Eine detailliertere Betrachtung der nicht frostsicheren Proben erfolgt im Kapitel 6.4.

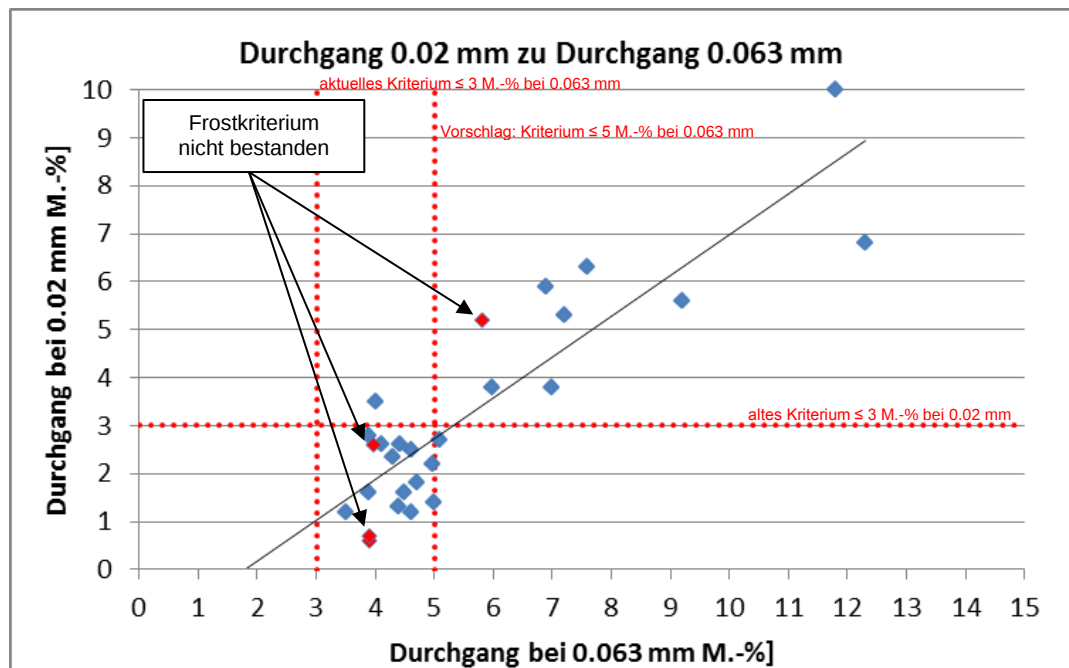


Abbildung 16: Vergleich Durchgang 0.02 mm zu Durchgang 0.063 mm

6.3 Vergleich CBR_F/CBR zu Siebdurchgang

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse und Vergleich des CBR_F/CBR -Verhältnisses zu den ermittelten Durchgängen bei den betrachteten Korndurchmessern wird deutlich, dass es keine offensichtlichen Korrelationen zwischen den einzelnen Kennwerten gibt. So zeigt sich besonders beim Vergleich des Frostkriteriums zum Durchgang bei 0.063 mm, der massgebenden Korngrösse gemäss SN 670 119-NA, keine offensichtliche Tendenz (siehe Abbildung 17). Diverse Proben weisen einen hohen Feinanteil auf (> 5 M.-% bei 0.063 mm) und haben dennoch die Frostprüfung erfüllt ($CBR_F/CBR > 0.5$). Bei einer möglichen Erhöhung des Grenzwertes bei 0.063 mm von 3 auf 5 M.-% werden vier der acht als nicht frostsicher bewerteten Proben (rote Punkte in Abbildung 17) überschätzt, d.h. die Proben würden als frostsicher bewertet werden, obwohl diese den CBR-Test nicht bestehen würden. Weiterhin muss beachtet werden, dass beim derzeitigen Grenzwert von 3 M.-% bei 0.063 mm 65 der 107 Proben ($> 60\%$) unterschätzt werden, d.h. die Frostsicherheit muss mittels CBR-Verfahren nachgewiesen werden, obwohl diese mittels CBR-Verfahren als frostsicher bewertet werden.

Auch beim Vergleich des Kriteriums bei der Korngrösse 0.02 mm (siehe Abbildung 18) wird keine eindeutige Korrelation zwischen Durchgang und CBR_F/CBR -Verhältnis sichtbar. Bis

auf eine Probe haben alle Gemische mit einem Anteil von > 3 M.-% die Frostprüfung erfüllt.

Im Laufe der Untersuchung wurde vermutet, dass nicht nur der Anteil bei 0.063 bzw. 0.02 mm entscheidend für die Frostepfindlichkeit sein könnte, sondern auch der Anteil im Bereich von 0.063 – 2 mm (Sand) einen massgeblichen Einfluss auf das Verhalten des Gemisches unter Frosteinwirkung haben könnte. Aus diesem Grund wurden ebenfalls die Massenanteile bei der Korngrösse 2 mm in die Bewertung einbezogen. Die Verteilung dieser Kenngrösse ist in Abbildung 19 zu finden. Auch dort wird erkennbar, dass es bei den untersuchten Proben keine eindeutige Wechselbeziehung zwischen CBR_F/CBR und dem Durchgang gibt. Einzig eine Tendenz wird erkennbar, dass bei kleiner werdendem Durchgang bei 2 mm der CBR_F/CBR -Koeffizient ansteigt.

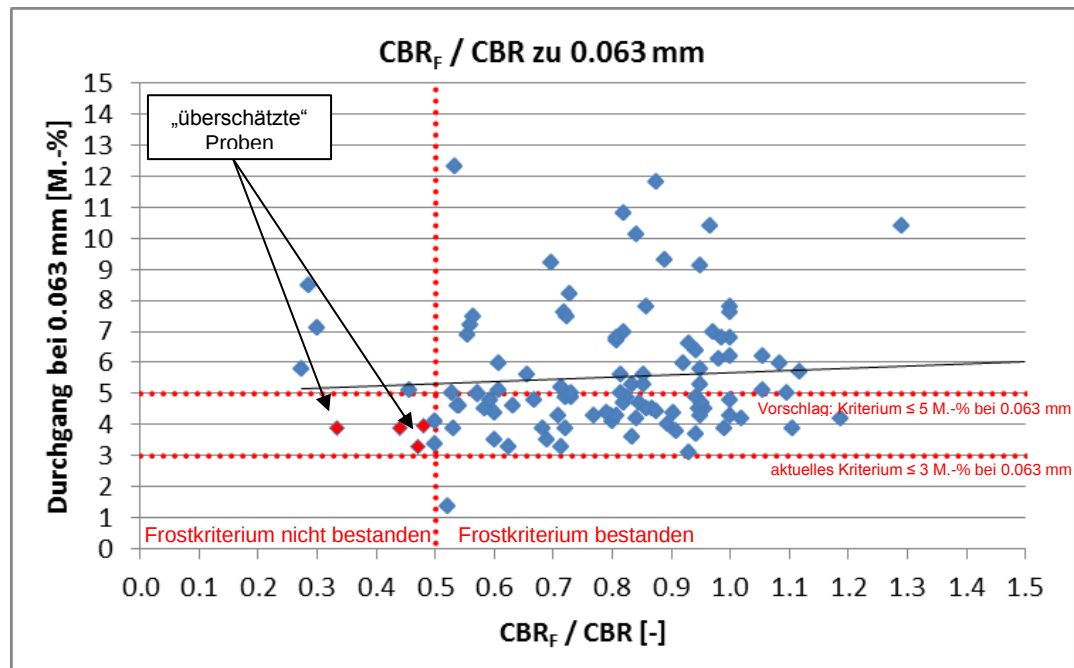


Abbildung 17: Vergleich CBR_F/CBR zu Durchgang 0.063 mm

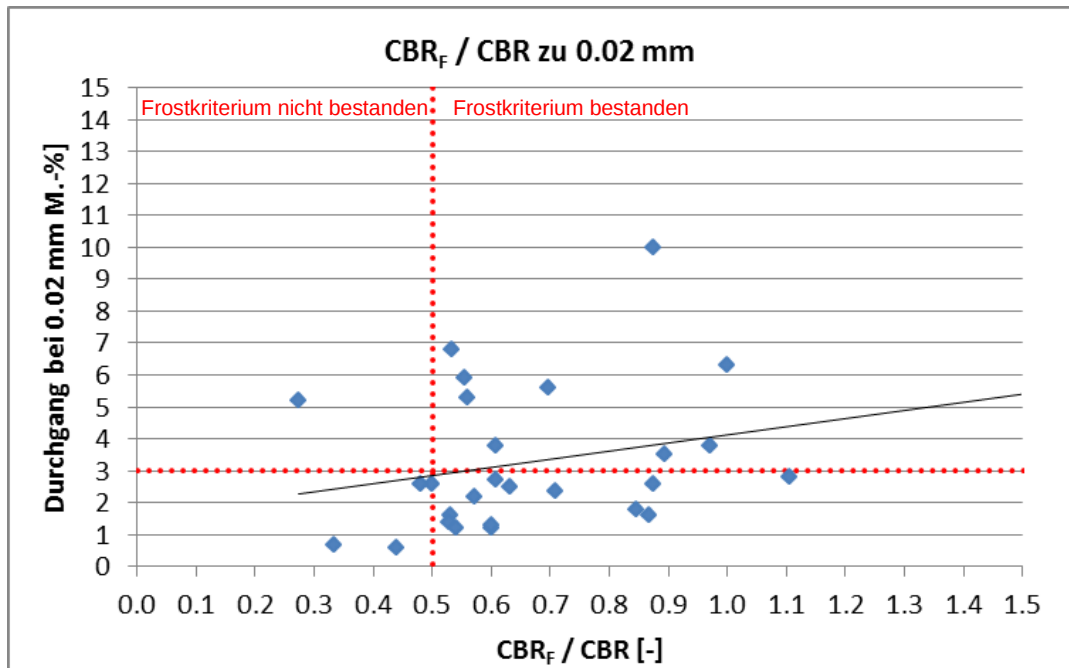


Abbildung 18: Vergleich CBR_F/CBR zu Durchgang 0.02 mm

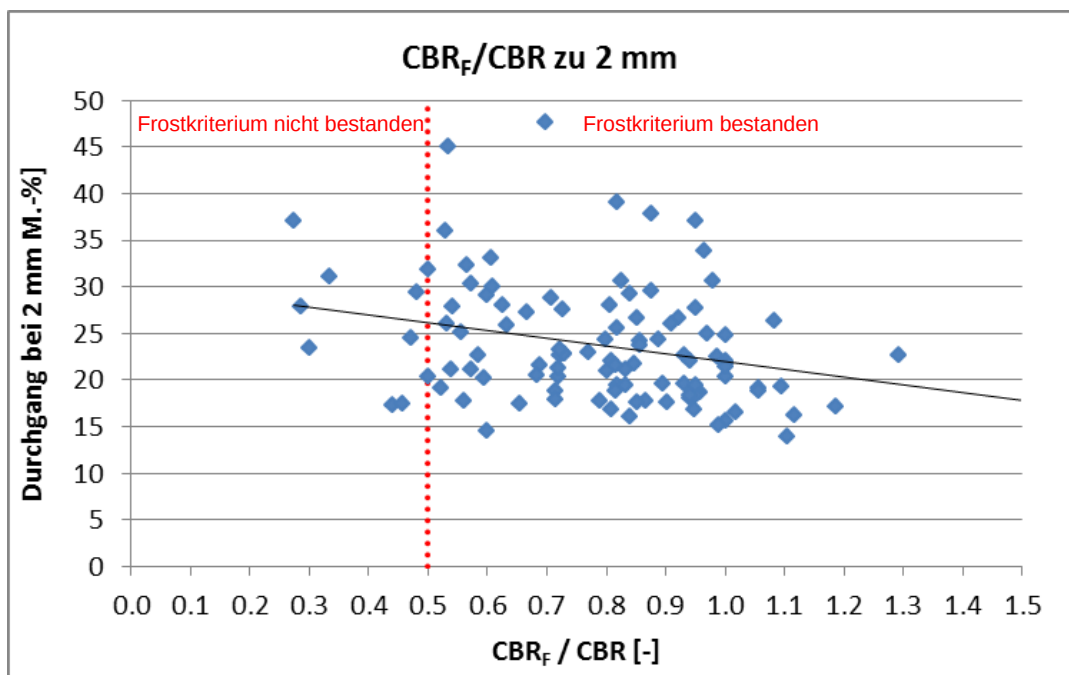


Abbildung 19: Vergleich CBR_F/CBR zu Durchgang 2 mm

6.4 Nicht frostsichere Proben

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, werden 8 untersuchte Proben in der CBR-Prüfung im Sinne der SN 670-119 NA als nicht frostsicher eingestuft. Nachfolgend werden diese Proben näher betrachtet. In Abbildung 20 sind die Korngrössenverteilungen der 8 als nicht frostsicher eingestuften Proben zu erkennen. Die Probenbezeichnungen entsprechen den Nummern in der Auflistung aller Proben im Anhang. Weiterhin wurden die Grenzkurven für ein UG 0/45 gemäss SN 670 119-NA (blau) eingefügt. Es wird deutlich, dass die Korngrössenverteilungen den kompletten normativen Bereich abdecken und keine „Anhäufung“ in einem definierten Bereich erkennbar ist. Es kann somit kein Rückschluss der Korngrössenverteilung auf die effektive Bewertung der Frostempfindlichkeit erkannt werden.

Zum weiteren Vergleich ist in der Abbildung die Fuller-Kurve eines Gemisches 0/63 mm dargestellt. Die Fuller-Kurve entspricht bei kugeligen Körnern einer idealen Siebkurve, bei dem die Probe den kleinstmöglichen Porenanteil besitzt. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Kurven im Allgemeinen für die Betonherstellung verwendet werden. Die Kurve wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$A = 100 \times \sqrt{\frac{d}{D}}$$

wobei A [M.-%] dem Durchgang bei der Sieböffnung d [mm] entspricht und D [mm] die Grösse des Maximalkorns ist. Im hier vorliegenden Fall wurde ein Grösstkorn von 63 mm angesetzt, da dies bei den üblichen UG 0/45 mm ebenfalls verwendet wird. Es zeigt sich, dass diese Idealkurve tendenziell im unteren des normativ zulässigen Bereiches liegt. Der Durchgang bei 0.063 mm beträgt bei der Fullerkurve in diesem Fall 3.2 M.-%.

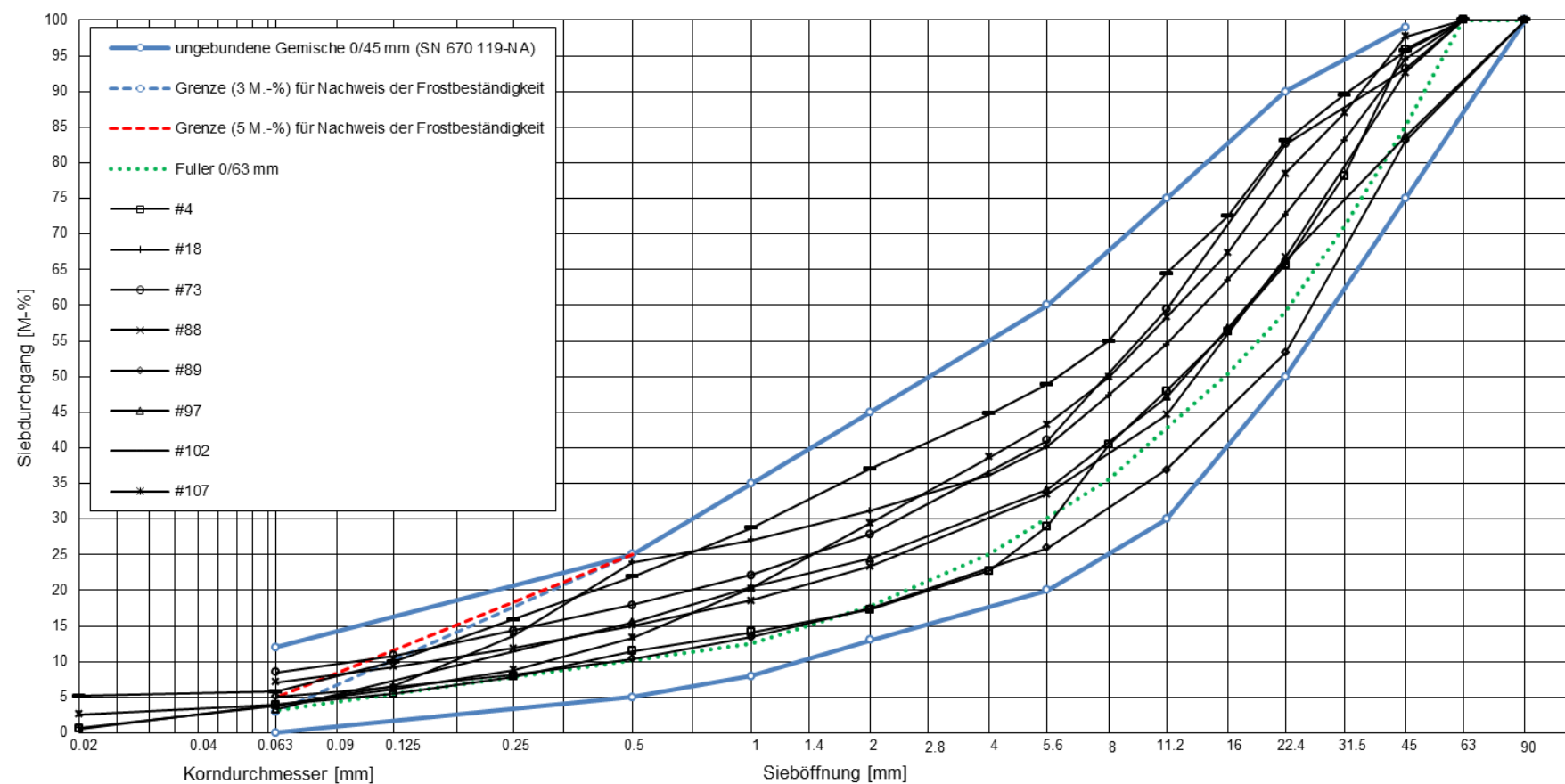


Abbildung 20: Siebkurven der nicht frostsicheren Proben

In Abbildung 21 sind alle als nicht frostsicher bewerteten Proben und deren Durchgänge bei 0.02 (bei 4 von 8 Proben), 0.063 und 2 mm mit aufsteigendem CBR_F/CBR-Koeffizient dargestellt. Es wird ersichtlich, dass bei tendenziell geringeren Durchgängen bei 0.063 und 2 mm der massgebliche CBR-Koeffizient ansteigt. Aufgrund des eher geringen Probenumfangs und der Messunsicherheit (vgl. Kap. 5.3.6) kann dieser Sachverhalt jedoch nicht quantifiziert werden. Jedoch wird auch in Abbildung 15 deutlich, dass die Tendenz des steigenden CBR-Koeffizienten bei sinkendem Durchgang bei 2 mm auch über alle Proben hinweg sichtbar ist.

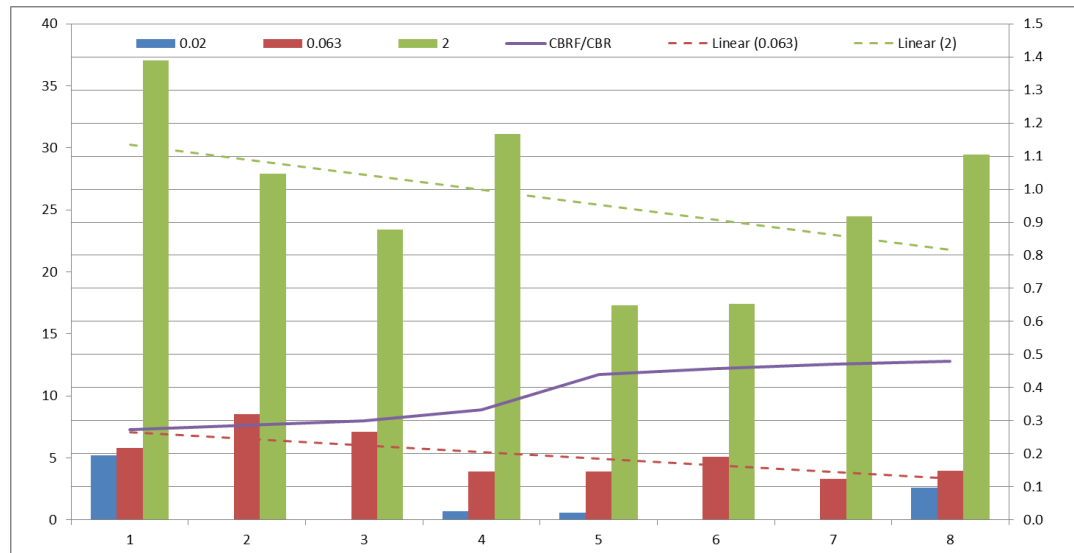


Abbildung 21: Vergleich der als nicht frostsicher bewerteten Proben

In Abbildung 20 sind bei zwei Proben Auffälligkeiten bezüglich der Gleichmässigkeit der Siebkurve zu erkennen. So zeigt sich bei Probe #18 ein sprunghafter Anstieg des Durchgangs ab Korngrösse 0.5 mm (siehe Abbildung 22). Bei Probe #4 zeigt sich ein ähnlicher sprunghafter Anstieg im Bereich von 4 – 8 mm (siehe Abbildung 23). Dieser erhöhte Anteil in einem Bereich kann zu einem nicht optimalen Korngerüst führen, was wiederum bei einer Frostbelastung zu einer kritischen Gefährdung und anschliessenden Schädigung führen kann.

Ein weiterer Faktor, welcher bei zwei der als nicht frostsicher bewerteten Proben (Proben #102 und #107) als massgeblich eingestuft wird, ist der Anteil schädlicher Inhalte, in diesem Fall Glimmer. Dieser Sachverhalt wird im Kapitel 6.8 und in einem Fallbeispiel (Kap. 7) näher erläutert und verdeutlicht. Auf die Bestimmung der petrographischen Zusammensetzung wurde in diesem Projekt verzichtet.

Weiterhin wurde geprüft, ob die als nicht frostsicher bewerteten Proben geografisch eingegrenzt werden können, um kritische Vorkommen zu identifizieren. Es wird jedoch ersichtlich, dass die Proben alle aus unterschiedlichen Vorkommen und Regionen stammen.

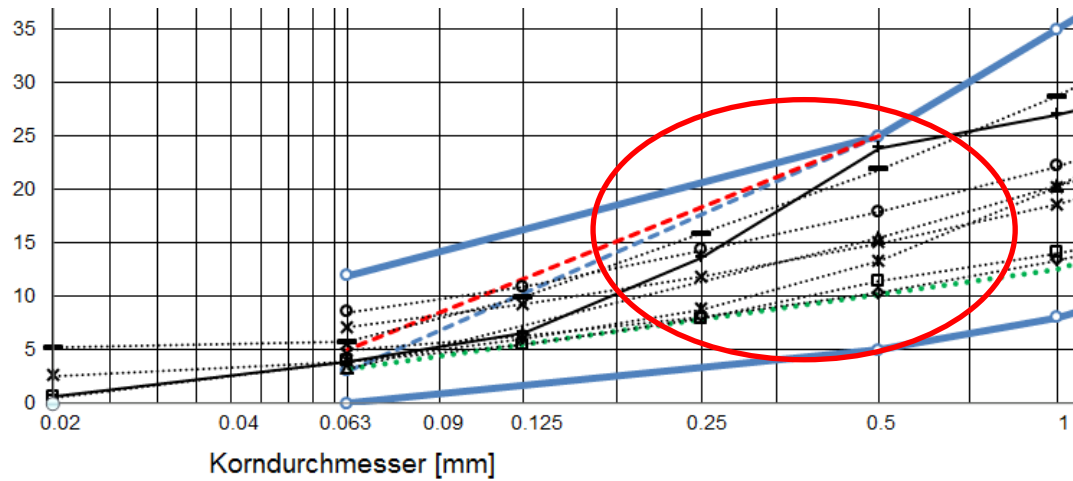


Abbildung 22: Ausschnitt aus Abbildung 20 „Siebkurven der nicht frostsicheren Proben“ / 0 - 1 mm

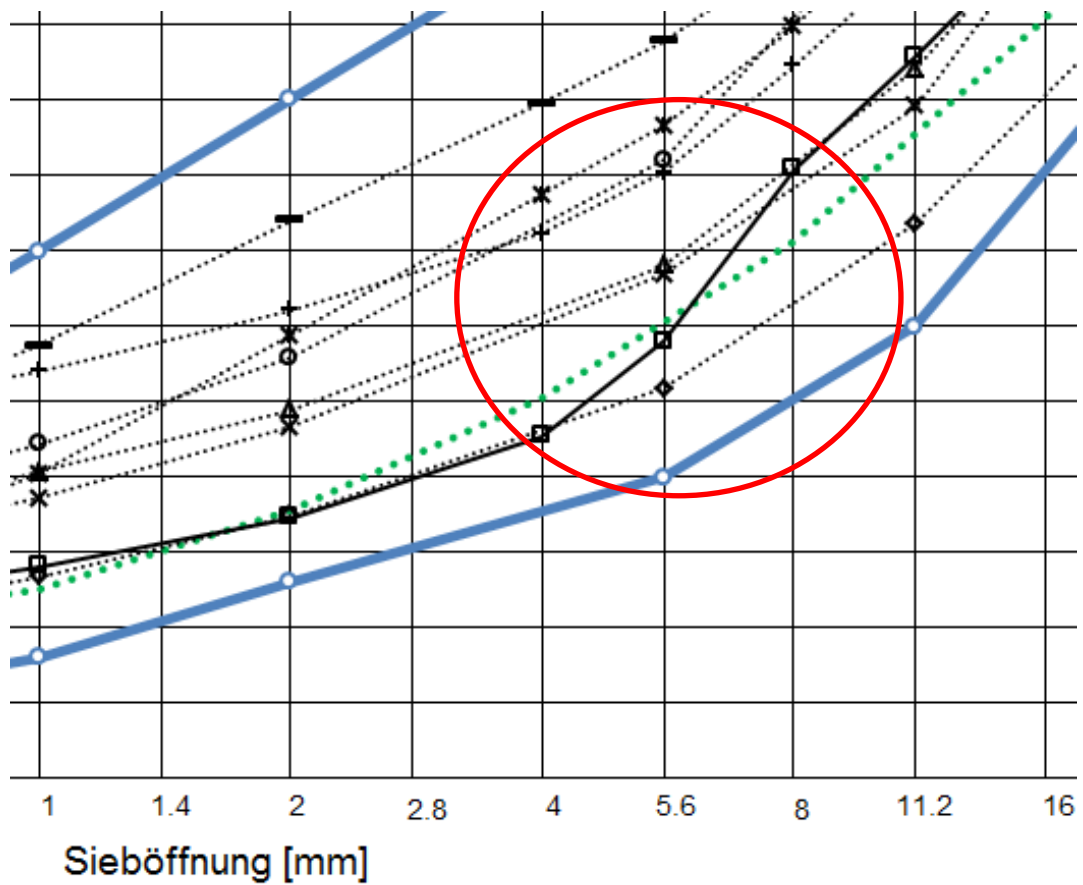


Abbildung 23: Ausschnitt aus Abbildung 20 „Siebkurven der nicht frostsicheren Proben“ / 1 - 16 mm

6.5 Korngrößen bei verschiedenen Durchgängen

Zur weiteren Einordnung der Gemische wurden in einem ersten Schritt aus den Korngrößenverteilungen die jeweiligen Korngrößen bei den Durchgängen 10, 30, 50 und 60 % herausgelesen (siehe Abbildungen 24 – 27). Es wird deutlich, dass es wie in Kapitel 6.3 keine Korrelation der CBR-Werte bezüglich der Korngrößen gibt. So weisen die Gemische bei einem Durchgang von 10 % eine Korngröße von 0.063 – 1 mm auf ohne dass eine Tendenz bezüglich der CBR-Werte zu erkennen ist. Gleiches verhält sich bei den Durchgängen von 30 % (Korngröße 0.063 – 10 mm), 50 % (2 – 22 mm) und 60 % (4 mm – 29 mm).

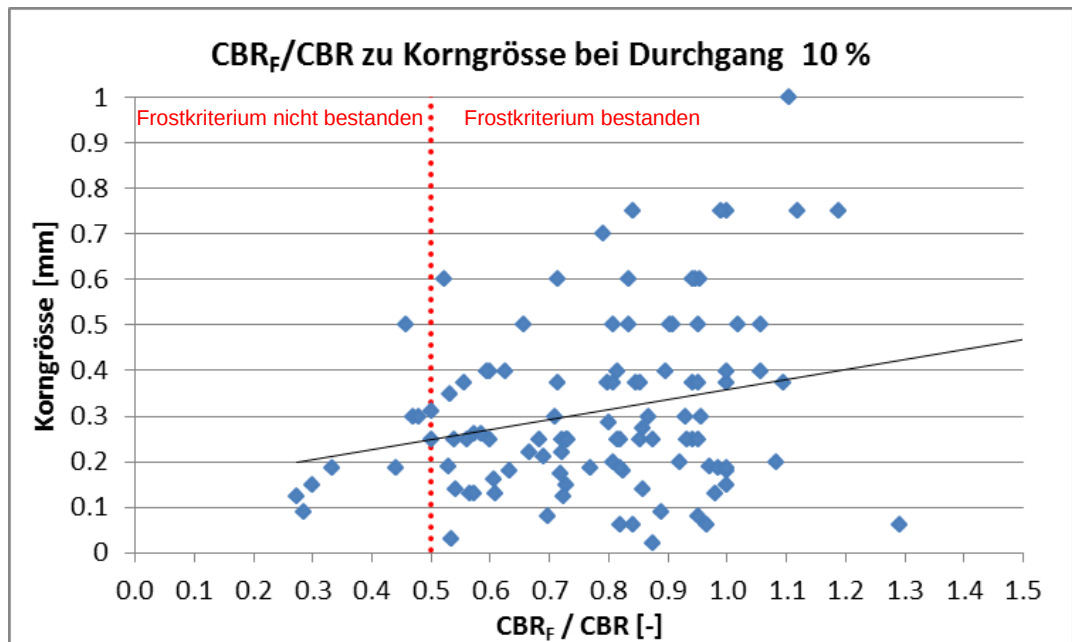


Abbildung 24: Vergleich CBR_F / CBR zu Durchgang 10 %

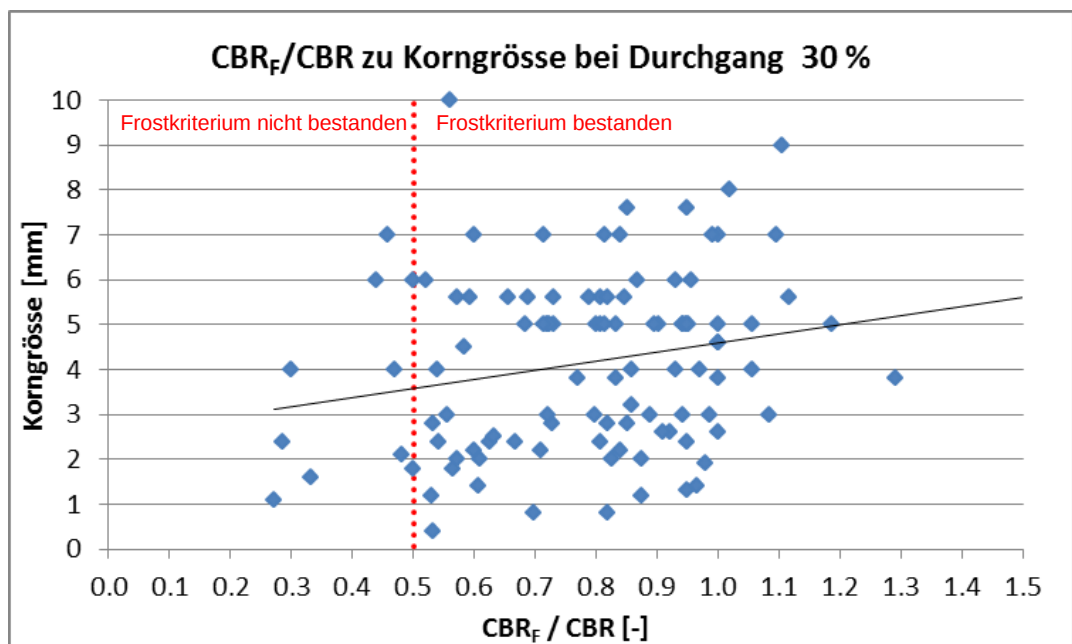


Abbildung 25: Vergleich CBR_F / CBR zu Durchgang 30 %

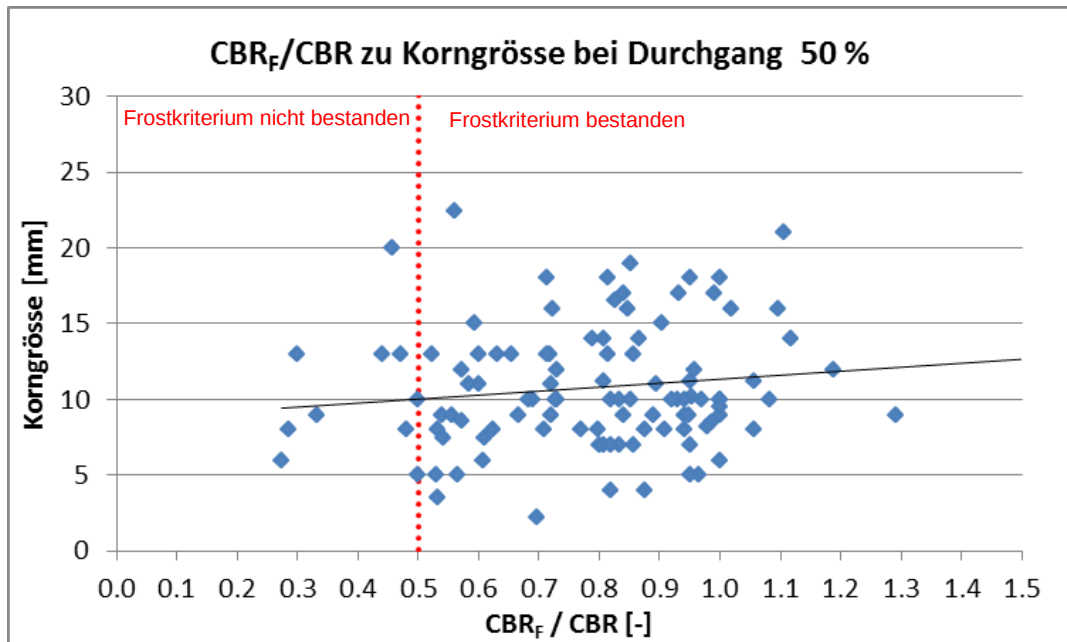


Abbildung 26: Vergleich CBR_F/CBR zu Durchgang 50 %

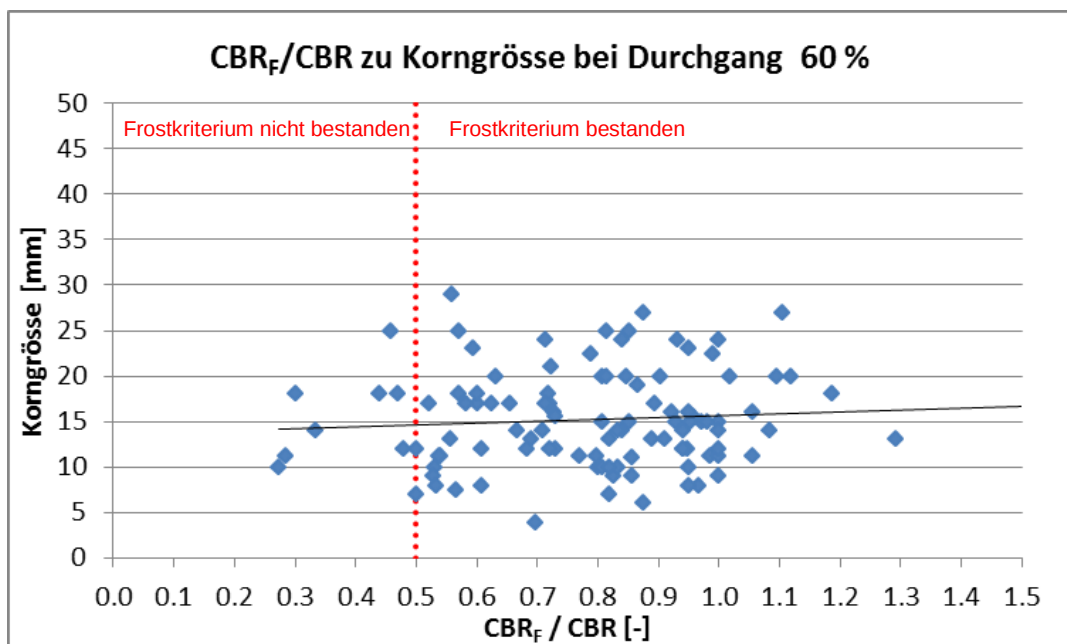


Abbildung 27: Vergleich CBR_F/CBR zu Durchgang 60 %

6.6 Ungleichförmigkeit, Krümmungszahl und Durchlässigkeit

Zur allgemeinen Klassifikation der Sieblinien wurden die Kennwerte der Ungleichförmigkeit, Krümmungskennzahl und Durchlässigkeit berechnet bzw. abgeschätzt. Die Berechnung der Kennwerte ist Kap 5.2 zu entnehmen. Es zeigt sich auch hier, dass es bei den Vergleichen zu den Klassifikationskennwerten Ungleichförmigkeit, Krümmung und Durchlässigkeit keine eindeutige Korrelation zu den CBR-Werten gibt. Die Ungleichförmigkeitskennzahl liegt im Bereich von ca. 20 – 300, was gemäss Kap 5.2.1 einem sehr ungleichförmigen Boden entspricht. Die Krümmungszahl deutet mit Werten von 0.6 bis 17.6 bei allen Proben auf einen intermittierend gestuften Boden hin. Die Durchlässigkeit entspricht gemäss (Kap.4.4) einem Grobsand bis Mittelkies. Bei allen drei Kennwerten ist keine Tendenz bezüglich der CBR-Werte zu erkennen.

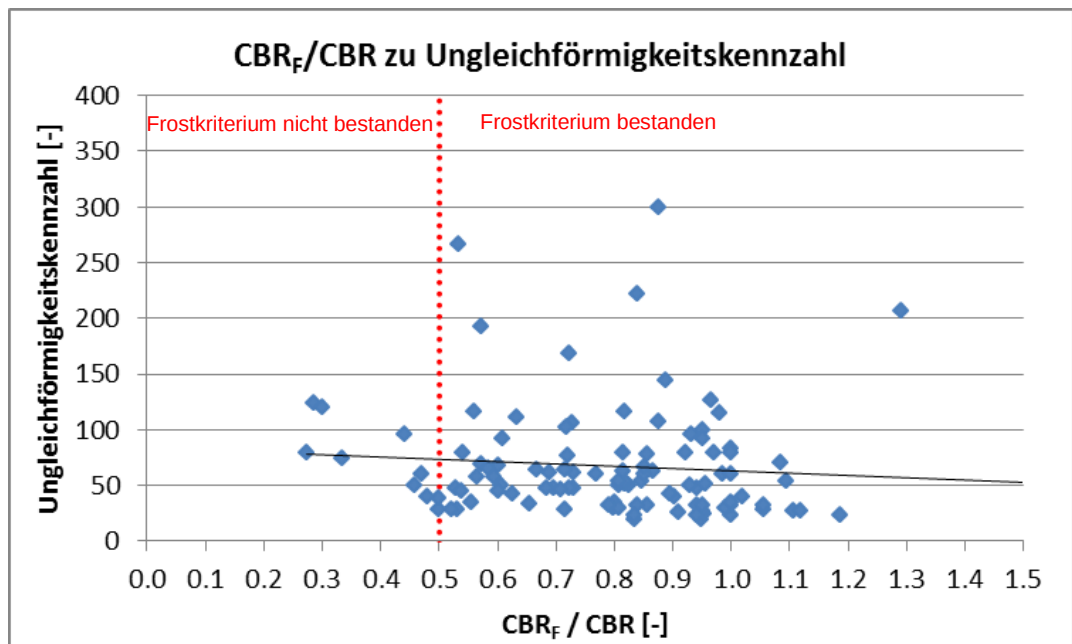


Abbildung 28: Vergleich CBR_F/CBR zu Ungleichförmigkeitskennzahl

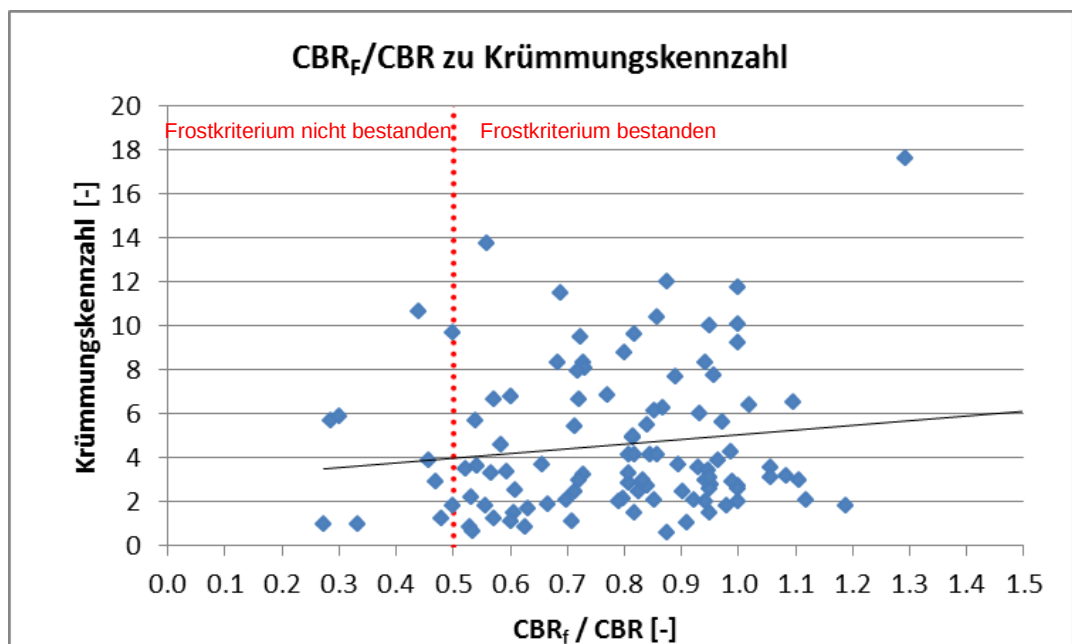


Abbildung 29: Vergleich CBR_F/CBR zu Krümmungszahl

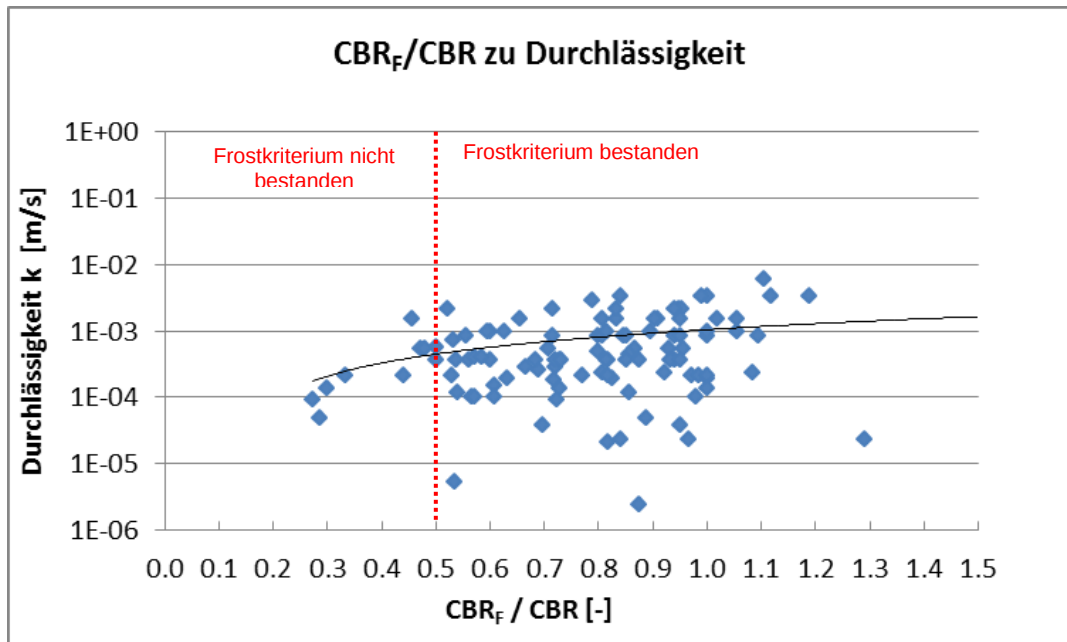


Abbildung 30: Vergleich CBR_F/CBR zu Durchlässigkeit

6.7 Optimaler Wassergehalt und Proctordichte

Der optimale Wassergehalt und die Proctordichte, die für die CBR-Verfahren bestimmt und am Gemisch eingestellt werden müssen, können zusätzlich als Bewertungskriterium herangezogen werden. In den nachfolgenden Diagrammen sind die Messwerte des CBR_F/CBR im Bezug zum optimalen Wassergehalt und der Proctordichte aufgetragen. Es zeigt sich auch hier, dass es keine Korrelation der CBR-Werte mit den Kennwerten aus dem Proctorversuch gibt. Bei Wassergehalten von ca 3 – 7 % stellen sich CBR-Werte von 0.3 bis 1.1 ein, ohne dass eine Tendenz zu erkennen ist. Auch bei der Proctordichte, welche sich bei den untersuchten Gemischen im Bereich von 2'000 – 2'700 kg/m³ bewegt, zeigt sich keine Tendenz der CBR-Werte. Obwohl die Dichte und der Wassergehalt im Einbauzustand einen massgeblichen Einfluss auf die Frostsicherheit haben, kann dieser Einfluss mit den CBR-Verfahren augenscheinlich nicht eindeutig abgebildet werden.

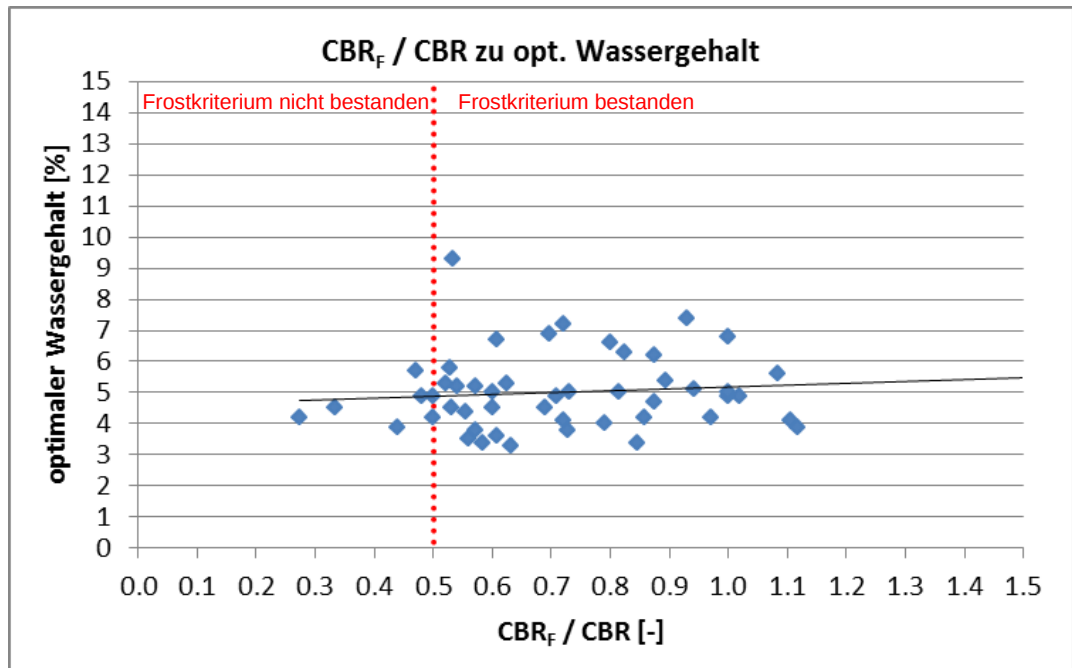


Abbildung 31: Vergleich CBR_F/CBR zu opt. Wassergehalt

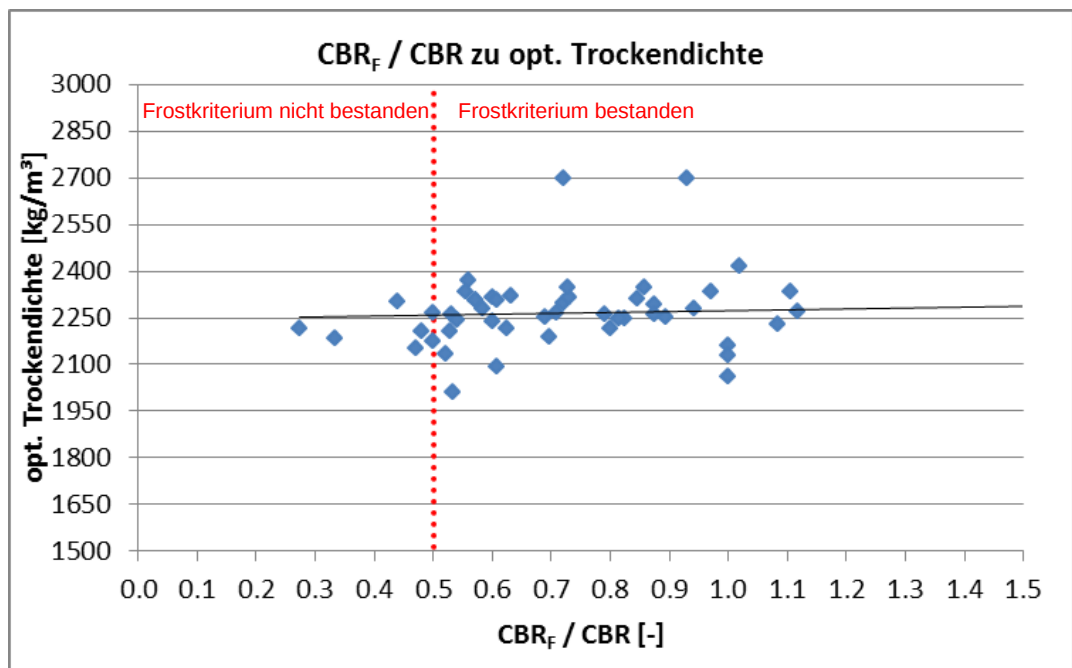


Abbildung 32: Vergleich CBR_F/CBR zu Proctordichte

6.8 Schädliche Anteile

Im Verlaufe der Projektbearbeitung hat sich weiterhin der Einfluss eventuell schädlicher Anteile gezeigt. So wiesen einige Gemische einen hohen Anteil Glimmer auf, was sich auch auf den Wasseranspruch des Gemisches bzw. das Verdichtungsverhalten beim Proctorversuch auswirkt. Da Glimmer zur Gruppe der Schichtsilikate gehören und eine hohe Spaltbarkeit aufweisen, können diese, ähnlich wie bei Gesteinskörnung von Beton gemäss SN EN 670 102b [6], als schädlicher Anteil angesehen werden. In Abbildung 40 ist exemplarisch eine Bodenprobe aus einem untersuchten Gemisch zu erkennen, welche eine ausgeprägte Schichtung und einen deutlichen „Glimmerglanz“ aufweist. Auf eine petrographische Untersuchung der zu untersuchenden Gemische musste verzichtet

werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein erhöhter Anteil von schädlichen Anteilen, besonders hydrophiler Anteile, den Wasserhaushalt und somit die Frostepfindlichkeit von ungebundenen Gemischen massgeblich beeinflusst.

In diesem Zusammenhang sei auf die österreichische ÖNORM B 48 11 [7] verwiesen, in der die Bewertung der Frostsicherheit einerseits über die Anteile bei 0.02 und 0.063 mm und andererseits auch mithilfe eines Mineralkriteriums durchgeführt wird (siehe Tabelle 2). So wird bei einem Anteil von > 3 M.-% bei 0.02 mm eine Röntgendiffraktometrie durchgeführt, um den Anteil „aktiver“ Minerale, also Minerale, die als nachteilig bezüglich der Frostsicherheit eingestuft werden (Schichtsilikate), zu bestimmen. Werden die dort beschriebenen Grenzwerte überschritten, müssen Frosthebungsversuche durchgeführt werden.

Tabelle 2: Mineralkriterium ÖNORM B4811 [7]

Anteil an Korngrößen < 0,020 mm in % der Masse	Mineralbestand des Anteiles an Korngrößen < 0,020 mm
bis 3	Keine Mineralbestimmung erforderlich
über 3 bis 5	Bei erprobten Materialien gilt: Keine Mineralbestimmung erforderlich. Bei nicht erprobten Materialien gilt: 1) Nicht aktive Minerale: 100 % sind zulässig. 2) Gemenge aus nicht aktiven und aktiven Mineralen sind zulässig, wobei die nachstehend angeführten Grenzwerte (a bis e) nicht überschritten werden dürfen und zusätzlich die folgenden Grenzwerte (f bis i) von Kombinationen der aktiven Minerale nicht überschritten werden dürfen: a) 10 % Kaolinitgruppe, b) 30 % Chloritgruppe, c) 30 % Vermikulitgruppe, d) 40 % Smektitgruppe (z. B. Montmorillonit), e) 50 % Glimmergruppe, f) 60 % Glimmergruppe + Chloritgruppe, g) 50 % Glimmergruppe + Chloritgruppe + Kaolinitgruppe, h) 50 % Glimmergruppe + Kaolinitgruppe, i) 40 % Glimmergruppe + Chloritgruppe + Kaolinitgruppe + Smektitgruppe (z. B. Montmorillonit, Mixed-Layer), j) Weitere hier nicht angeführte Mischungen von Schichtsilikaten sind bis zu einer Gesamtsumme von maximal 40 % zulässig. Für die Ermittlung der Summengruppen f) bis j) sind Werte kleiner als 5 % nicht zu berücksichtigen. Zwischen 3 % (100 % aktive Minerale) und 5 % der Masse (angegebene Grenzwerte von a) bis j) des Anteiles an Korngrößen < 0,020 mm sind die zulässigen Grenzwerte zu interpolieren. Werden diese interpolierten Werte überschritten, sind Frosthebungsprüfungen gemäß 5.4 erforderlich. 3) Wenn aufgrund einer intensiven rotbraunen Färbung des Materials der Verdacht auf das Vorhandensein von Eisenhydroxiden besteht, sind Frosthebungsprüfungen gemäß 5.4 durchzuführen.
über 5 bis 8	Bei einem Anteil an Korngrößen < 0,020 mm von 8 % der Masse sind nur nichtaktive Minerale zulässig. Zwischen den Masseanteilen von 5 % (Grenzwert von a) bis j) und 8 % (0 % aktive Anteile) sind die zulässigen Anteile zu interpolieren. Werden diese interpolierten Werte überschritten, sind Frosthebungsversuche gemäß 5.4 erforderlich.

6.9 CBR-Verfahren

Das CBR-Verfahren sieht einen 24-stündigen Frostzyklus der Oberseite der Probe vor, um eine realitätsnahe Beanspruchung des Gemisches zu simulieren (vgl. Kap 5.3.4). Es hat sich jedoch gezeigt, dass die „erwünschte“ Frosthebung, welche die Gefügestörung hervorruft und die Bewertung mit Hilfe des Stempel Eindringversuches erst ermöglicht, nach 24 h teilweise noch nicht abgeschlossen ist (siehe Beispiel in Abbildung 33). So zeigt sich im Vergleich, dass bei der Wasserlagerung des CBR₂-Verfahrens die Hebung teilweise erst nach 48 h abgeschlossen ist (siehe Beispiel in Abbildung 34). Es stellt sich somit die Frage, ob aufgrund des Unterbruches der Hebung eine Bewertung des Materials letztendlich möglich bzw. zuverlässig ist.

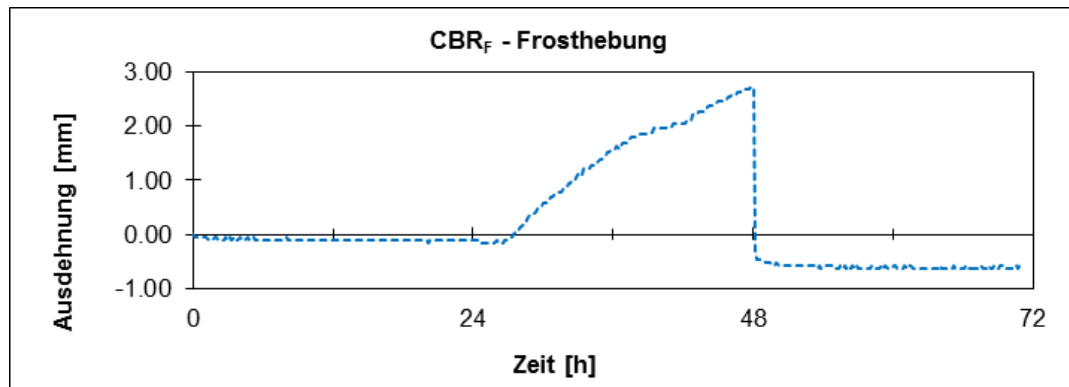


Abbildung 33: Beispiel einer nicht abgeschlossenen Frosthebung im CBR_F-Verfahren

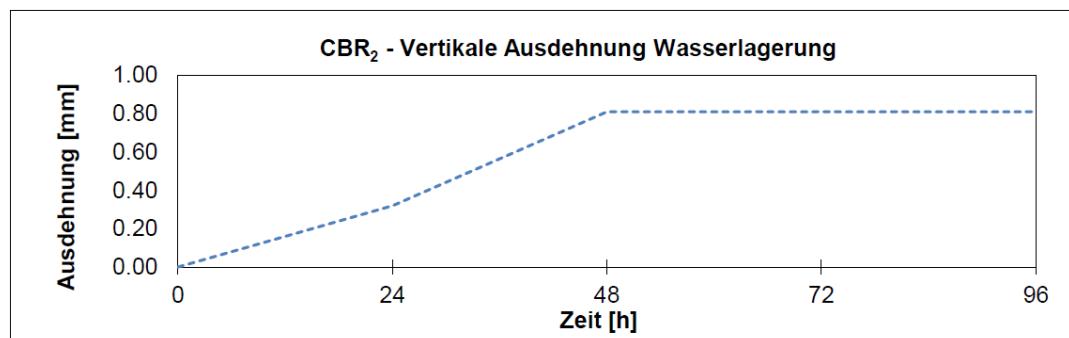


Abbildung 34: Beispiel einer Hebung bei Wasserlagerung im CBR₂-Versuch

Weiterhin wird erkenntlich, dass sich die Hebungskurve nicht wie in der SN 670 321a (Abbildung 13) darstellt. Die Setzung nach dem Frostzyklus entspricht im Allgemeinen der Hebung während des Frostzyklus oder übertrifft diese, sodass nach der CBR-Prüfung ein augenscheinlich dichteres Material vorliegt. In der SN 670 321a wird von einer ungleich kleineren Setzung ausgegangen. Es stellt sich somit die Frage, ob beim CBR_F-Verfahren Materialtransporte durch den Frostzyklus stattfinden (Auswaschen von Feinanteil) oder ob die Gewichtsplatten auf der Probe einen zu hohen Einfluss auf die Setzung und somit den darauf folgenden Stempel Eindringversuch haben.

7 Fallbeispiel

Nachfolgend sollen diverse Sachverhalte, welche im vorigen Kapitel erläutert wurden, anhand eines exemplarischen Fallbeispiels des Baustoff-Prüflabors der VSH AG verdeutlicht werden.

7.1 Allgemeines

Im Jahr 2014 untersuchte die VersuchsStollen Hagerbach AG einen Frostscha- den an einer Bergstrasse auf ca. 1'300 m ü. M. Der Frostscha- den trat im Winter 2013/14 an der neu sanierten Strasse auf. Laut Auftraggeber sind dabei Frosthebungen an der bergseitigen Fahrbahn von mehreren Zentimetern aufgetreten.

Vor Ort zeigten sich diverse Schädigungen der Strasse (Wellenbildung und Risse, siehe Abbildung 35 und Abbildung 36). Es wurden an 2 Stellen Proben für Laboruntersuchungen zur Bewertung der Frostepfindlichkeit entnommen. Bei der Probenahme wurde das Material mit einem Kleinbagger entnommen und nacheinander schichtweise auf dem Asphalt verteilt und homogenisiert, um repräsentative Laborproben zu entnehmen.



Abbildung 35: Wellenbildung



Abbildung 36: Risse

Bei der Probenahme wurde zusätzlich der Aufbau des Querschnittes aufgenommen. Dieser ist in Abbildung 37 dargestellt.

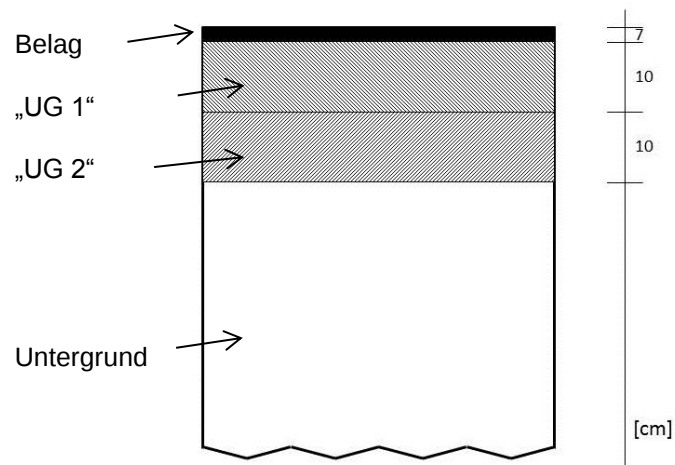


Abbildung 37: Aufbau Strasse Fallbeispiel

7.2 Untersuchungen und Ergebnisse

Die Siebanalysen der einzelnen Schichten haben ergeben, dass der Nachweis der Frostepfindlichkeit über den Feinanteil gemäss SN 670 119-NA:2011 (Anteil < 0.063 mm maximal 3 M.-%) für alle Schichten nicht erfüllt ist. Die Probe „UG 1“ hat einen Feinanteil von 5.0 M.-%, Probe „UG 2“ einen Feinanteil von 3.5 M.-% und der Untergrund einen Anteil < 0.063 mm von 12.3 M.-%. Es ist jedoch zu beachten, dass der Untergrund nicht dem Produkt eines ungebundenen Gemisches gemäss SN 670 119-NA:2011 entspricht und somit das Kriterium des Feinanteils nur orientierend herangezogen werden kann.

Die Ergebnisse der CBR-Versuche der einzelnen Schichten haben gezeigt, dass alle Gemische die Anforderungen an die Frostbeständigkeit knapp erfüllen (siehe nachfolgende Tabelle 3).

Tabelle 3: ermittelte CBR-Koeffizienten des Fallbeispiel

	UG 1	UG 2	Untergrund
CBR ₂ / CBR	0.9	0.8	0.8
CBR _F / CBR	0.5	0.6	0.5

Weiterhin hat sich gezeigt, dass bei den Proben „UG 1“ und „Untergrund“ eine Frosthebung auftritt, welche nach dem 24-stündigen Frostzyklus gemäss Norm noch nicht abgeschlossen ist (siehe Abbildung 38).

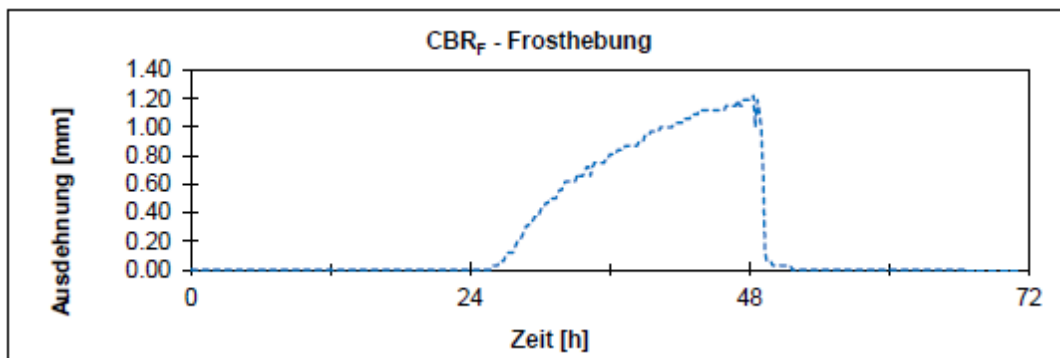


Abbildung 38: Frosthebung während CBRF-Verfahren UG 1

7.3 Schlussfolgerungen Fallbeispiel

Die Probenahme vor Ort und die darauf folgenden Laboruntersuchungen deuteten darauf hin, dass es materialtechnologische und konstruktive Gründe für die aufgetretene Frostschädigung geben könnte.

7.3.1 Materialtechnologisch

Die Frostbeständigkeit der Probe „UG 1“ ist nachgewiesen. Jedoch wurde im Versuch eine deutliche Frosthebung ermittelt, welche nach 24 h noch nicht abgeschlossen war. Bei einer dauerhaften Frostbeanspruchung und einer erhöhten Anzahl von Frost-Tauwechseln, welche auf einer Höhe von ca. 1'300 m ü. M. zu erwarten sind, können sich hinsichtlich Frostbeständigkeit negative Auswirkungen ergeben.

Die Probe „UG 2“ wird aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen als nicht kritisch eingestuft.

Der Untergrund entspricht nicht dem Produkt eines ungebundenen Gemisches nach SN 670 119-NA:2011 und erfüllt die Frostbeständigkeit nur knapp. Wie bei der Probe „UG 1“ ist die Frosthebung beträchtlich und ebenfalls nach 24 h noch nicht abgeschlossen. Auch beim Untergrund wird vermutet, dass die Frostbeständigkeit je nach Anzahl und Härte der Frostzyklen in Frage gestellt ist.

Weiterhin scheint der **Glimmergehalt** der Gemische sehr hoch zu sein, was zu einer erhöhten Wasseraufnahme führt und somit die Frostbeständigkeit negativ beeinflussen kann. Der Glimmergehalt und der Einfluss auf die Frostbeständigkeit wurde jedoch nicht weiter geprüft und bewertet.



Abbildung 39: grössere Steine in den Schichten

Bei der Probenahme ist aufgefallen, dass sich in den Schichten grössere **Schiefersteine** befinden, die die Eigenschaften des Gemisches beeinflussen können (siehe Abbildung 39). Die Herkunft der Steine kann nicht mit Sicherheit bestimmt werden. Eine

ausreichende Homogenität und Verdichtung der Gemische kann daher letztendlich nicht nachgewiesen werden. Weiterhin zeigen diese Steine bereits eine starke Rissbildung bzw. Spaltung der Schieferschichten (siehe Abbildung 40), was negative Auswirkungen auf die Frostbeständigkeit haben kann.



Abbildung 40: gespaltener Schieferstein

7.3.2 Konstruktiv

Es gilt zu überprüfen, ob der **Aufbau der Strasse** gemäss SN 640 324:2011 [8] und SN 670 140b:2001 [9] unter den Randbedingungen der Frostempfindlichkeitsklasse, Frosteindringtiefe X_{30} , den hydrologischen Verhältnissen und der Oberbaudicke als frostsicher eingestuft werden kann.

7.4 Bedeutung für das vorliegende Forschungsprojekt

Die in diesem Fallbeispiel erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass bezüglich der Frostempfindlichkeit von ungebundenen Gemischen mehrere Faktoren in Betracht gezogen werden müssen. So sind alle Proben, welche vor Ort entnommen wurden, gemäss aktueller Normung als frostsicher eingestuft worden, obwohl es zu teils erheblichen Hebungen und Setzungen gekommen ist. Es sind daher neben der Korngrössenverteilung und der CBR-Koeffizienten, welche in der aktuellen Normung massgebend sind, weitere materialtechnologische und konstruktive Faktoren in Betracht zu ziehen, welche die Frostempfindlichkeit von Böden erheblich beeinflussen.

8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Analyse der Daten und die Ergebnisse der durchgeführten Laborversuche erlauben vier Schlussfolgerungen, die sich auf den Feinanteil und das CBR Verfahren einerseits, und andererseits auf schädliche Bestandteile sowie den fachgerechten Einbau ungebundener Gemische beziehen.

- **Der Grenzwert des Feinanteils bei 0.063 mm kann von 3 Masseprozent auf 5 Masseprozent angehoben werden.**

Basierend auf der Auswertung der Datensammlung sowie der zusätzlichen durchgeführten Untersuchungen im Labor konnte nachgewiesen werden, dass der Grenzwert der Feinanteile von 3 M.-% ohne messbare Einbussen der Bewertungssicherheit der Frostepfindlichkeit auf 5 M.-% angehoben werden kann. Durch die bestehenden Grenzen der Korngrössenverteilung gemäss SN 670 119-NA weisen die in der Schweiz produzierten und verkauften ungebundenen Gemische eine durchwegs hohe Qualität und ausreichende Frostsicherheit auf. Ein Anteil von 99 % der untersuchten ungebundenen Gemische erfüllte das Frostkriterium trotz teilweise erheblich höherer Feinanteile (vgl. Kap. 6.2). Nur vier Proben haben mit einem Feinanteil von weniger als 5 % die Prüfung der Frostepfindlichkeit nicht bestanden, wobei jedoch die Gründe für das Nicht-Bestehen nicht abschliessend genannt werden können. Weiterhin zeigte sich, dass die Resultate der CBR-Versuche keine eindeutige Korrelation zum Durchgang bei verschiedenen Korngrössen hat (siehe Kap. 6.3), was eine erhöhte Toleranz bei der Bewertung von Korngrössenverteilungen rechtfertigt. Zusätzlich wurde die Annahme bestätigt, dass ein Durchgang von 3 M.-% bei 0.02 mm einem Durchgang von 5 M.-% bei 0.063 mm entspricht.

- **Eine Optimierung des CBR-Verfahrens ist notwendig.**

Aufgrund der im Projekt gemachten Beobachtungen wird vermutet, dass das CBR-Verfahren, und insbesondere die Lagerung beim Versuch für den CBR_F - Wert, nicht den realen Frost-Bedingungen entspricht, was zu einer zweifelhaften Bewertung der Frostbeständigkeit führt. So zeigen diverse Versuche an ungebundenen Gemischen, dass die Hebung während eines Frostzyklus nicht abgeschlossen wird und die Setzung nach dem Frostzyklus teilweise grösser ist als die Hebung während des Gefrierens (siehe Kap. 6.9). Weiterhin stellt sich die Frage, warum die Vorbehandlung beim CBR_2 -Verfahren (Wasserlagerung) 96 Stunden dauert und der Frostzyklus nur 24 Stunden. Ein optimiertes CBR Prüfverfahren, das die physikalische Realität des frostbedingten Hebens und Senkens besser widerspiegelt, sollte aussagekräftigere Bewertungen der Frostbeständigkeit erlauben.

- **Beurteilung von schädlichen Bestandteilen ist wesentlich.**

Es wird angenommen, dass schädliche Bestandteile (z.B. Glimmer) einen massgeblichen Anteil auf die Frostbeständigkeit eines Gemisches haben können (vgl. Kap. 6.8). Daher wird empfohlen, eine petrographische Untersuchung des Vorkommens gemäss SN EN 670 115 durchzuführen, wenn der Feinanteil bei 0.063 mm zwischen 3 M.-% und 5 M.-% liegt. Bei einem erhöhten Anteil Schichtsilikate (in Anlehnung an die österreichische Normung) wird empfohlen, zusätzlich zu den petrographischen Untersuchungen eine CBR-Prüfung durchzuführen. Liegt der Feinanteil bei 0.063 mm über 5 M.-%, sind CBR-Prüfungen auf jeden Fall durchzuführen. Auf die Petrographie kann dann verzichtet werden.

- **Dimensionierung nach SN EN 640 324 und SN 670 140b**

Weiterhin muss erwähnt werden, dass besonders der fachgerechte Einbau des Materials die Frostbeständigkeit des Gemisches beeinflusst. So wird das hochwertigste Material einer Frostbeanspruchung nicht standhalten, wenn die z.B. durch die SN 640 324 vorgeschriebenen Kriterien für die Dimensionierung eines Strassenaufbaus nicht eingehalten werden. Vor allem eine nicht ordnungsgemässe Entwässerung beeinflusst die Materialeigenschaften des Gemisches soweit, dass die Ergebnisse aus Materialprüfungen hinfällig sind. Es muss also zusätzlich beim Verarbeiten der Gemische ein grundlegendes Verständnis der Materialeigenschaften und Einflussgrössen auf die Dauerhaftigkeit vorhanden sein und - wenn nötig - geschult werden.

9 Ausblick

Die Frostepfindlichkeit von ungebundenen Gemischen hängt von einer Vielzahl von Randbedingungen auf Seite der Produzenten, aber auch auf Seite der Verwender ab. Zwar ist die Korngrößenverteilung massgeblich als Bewertungskriterium in der aktuellen Normung verankert, auch aufgrund der einfachen und schnellen Möglichkeit der Prüfung, jedoch haben die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes gezeigt, dass die alleinige Betrachtung der Korngrößenverteilung keine eindeutigen Aussagen über die Frostepfindlichkeit erlaubt. Auch das CBR-Verfahren, welches bei dem Überschreiten des Grenzwertes des Feinanteils zur Bewertung der Frostepfindlichkeit herangezogen wird, liefert aufgrund der besprochenen Problematik keine zweifelsfreien Ergebnisse.

Ziel des weiteren Vorgehens bezüglich der Optimierung der Bewertung der Frostepfindlichkeit von ungebundenen Gemischen muss es sein, die diversen Randbedingungen, welche im vorliegenden Forschungsprojekt besprochen wurden, zu validieren und für die zweifelsfreie Bewertung heranzuziehen. Nur so können die unterschiedlichen Randbedingungen und entsprechenden Prüfmethoden optimal kombiniert werden, um eine aussagekräftige und verlässliche Bewertung der Frostepfindlichkeit von ungebundenen Gemischen zu erhalten.

So muss geklärt werden, ob das jetzige CBR_F-Verfahren, d.h. die Vorlagerung vor dem Stempeleindringversuch, einen vollständigen und realitätsnahen Frostzyklus abbildet und eine solide Bewertung der Frostepfindlichkeit ermöglicht. Es sind diverse Variablen im Verfahren, vor allem die Dauer bzw. Intensität des Frostzyklus zu variieren und mit Erfahrungen aus der Praxis gegenüberzustellen.

Weiterhin muss validiert werden, welche Einflüsse schädliche Mineralien, vor allem Tonmineralien, auf die Frostepfindlichkeit haben. Es ist allgemein bekannt, dass solche Mineralien eine erhöhte Wasseraufnahme und eine darauf folgende Volumenzunahme haben, die die Eigenschaften von Kiesgemischen negativ beeinflussen können. Als Vergleich dazu können Erkenntnisse aus Forschung und Praxis aus Österreich hinzugezogen werden. Dort ist bereits ein Mineralkriterium zur Bewertung der Frostepfindlichkeit in der aktuellen Normung verankert. Eine Validierung eines allfälligen vergleichbaren Mineralkriteriums muss zwingend mit eigenen Untersuchungen, d.h. petrographischen Analysen, von schweizerischen Vorkommen und entsprechenden Erfahrungen aus der Praxis untermauert werden. Solche Untersuchungen haben den Vorteil, dass diese einerseits bei der Eignungsprüfung von ungebundenen Gemischen durchgeführt werden können und andererseits gleichzeitig die Eignung der untersuchten Vorkommen für unterschiedliche Zwecke vereinfacht, z.B. Gesteinskörnung für Beton oder Asphalt.

Es ist weiterhin massgebend, dass die Verwender der ungebundenen Gemische eine grundlegende Kenntnis über die Eigenschaften dieser haben und die diversen Einflüsse kennen, welche diese Eigenschaften, besonders die Frostepfindlichkeit, negativ beeinflussen können. Das bedingt auch, dass die normativen Grundlagen zum Einbau der ungebundenen Gemische, wie z.B. Schichtdicken und Verdichtung, eingehalten werden.

Anhang

#	Kornmisch / Bezeichnung	Durchgang bei Durchmesser X [%]			Proctordichte		ca. Korndurchmesser bei Durchgang X [mm]				Ungleichförmig- keitszahl Cu	Krümmungs- zahl C _c	Durchlässigkeit nach Beyer [m/s]	CBR-Werte [%]			CBR-Verhältnisse	
		0.063 mm	0.02 mm	2 mm	opt. Wassergehalt [%]	Proctor- dichte [kg/m³]	10%	30%	50%	60%				CBR	CBR ₂	CBR _F	CBR ₂ /CBR	CBR _F /CBR
1	0/45	4.7	1.8	21.8	3.4	2310	0.38	5.6	16	20	53	4.2	8.44E-04	195	175	165	0.90	0.85
2	0/45	5.1	2.7	33.1	6.7	2093	0.16	1.4	6	8	50	1.5	1.54E-04	140	130	85	0.93	0.61
3	0/45	7.0	3.8	24.9	4.2	2335	0.19	4.0	10	15	79	5.6	2.17E-04	170	140	165	0.82	0.97
4	0/45	3.9	0.6	17.3	3.9	2302	0.19	6.0	13	18	96	10.7	2.11E-04	125	130	55	1.04	0.44
5	PSS 0/22	9.2	5.6	47.6	6.9	2190	0.08	0.8	2	4	48	2.1	3.84E-05	165	170	115	1.03	0.70
6	0/45	3.9	1.6	26.1	4.5	2263	0.35	2.8	8	10	29	2.2	7.35E-04	160	155	85	0.97	0.53
7	0/45	4.5	1.6	17.8			0.30	6.0	14	19	63	6.3	5.40E-04	150	160	130	1.07	0.87
8	0/45	4.1		20.9	6.6	2215	0.29	5.0	7	10	35	8.8	4.87E-04	125	115	100	0.92	0.80
9	0/45	4.9		20.3	4.1	2300	0.22	5.0	11	17	77	6.7	2.90E-04	125	125	90	1.00	0.72
10	0/45	7.2	5.3	17.8	3.5	2370	0.25	10.0	22	29	116	13.8	3.75E-04	125	85	70	0.68	0.56
11	0/16	4.1	2.6	31.8	4.2	2176	0.25	1.8	5	7	28	1.9	3.75E-04	160	120	80	0.75	0.50
12	0/45	3.9	2.8	13.9	4.1	2333	1.00	9.0	21	27	27	3.0	6.00E-03	95	100	105	1.05	1.11
13	0/45	4.9		18.1	5.1	2282	0.25	5.0	9	12	48	8.3	3.75E-04	85	95	80	1.12	0.94
14	0/45	5.0	1.4	36.0	5.8	2207	0.19	1.2	5	9	47	0.8	2.17E-04	85	75	45	0.88	0.53
15	0/45	3.5	1.2	29.1	5	2241	0.25	2.2	11	17	68	1.1	3.75E-04	100	75	60	0.75	0.60
16	Mutterboden	12.3	6.8	45.1	9.3	2010	0.03	0.4	4	8	267	0.7	5.40E-06	45	35	24	0.78	0.53
17	0/45	4.4	1.3	14.5	4.5	2318	0.40	7.0	13	18	45	6.8	9.60E-04	125	100	75	0.80	0.60
18	0/45	3.9	0.7	31.1	4.5	2184	0.19	1.6	9	14	75	1.0	2.11E-04	105	75	35	0.71	0.33
19	0/45	4.6	1.2	27.8	5.2	2243	0.14	2.4	8	11	80	3.7	1.18E-04	185	175	100	0.95	0.54
20	0/16	11.8	10.0	37.9	6.2	2292	0.02	1.2	4	6	300	12.0	2.40E-06	200	205	175	1.03	0.88
21	0/45	4.9		22.8	5	2315	0.25	5.0	10	12	48	8.3	3.75E-04	240	185	175	0.77	0.73
22	0/45	5.0		21.2	5.2	2305	0.26	5.6	12	18	69	6.7	4.06E-04	175	145	100	0.83	0.57
23	0/45	7.8		24.2	4.2	2348	0.14	4.0	13	11	79	10.4	1.18E-04	210	145	180	0.69	0.86
24	0/45	8.2		27.6	3.8	2348	0.15	2.8	10	16	107	3.3	1.35E-04	110	75	80	0.68	0.73
25	0/45	4.5		22.6	3.4	2281	0.26	4.5	11	17	65	4.6	4.06E-04	180	120	105	0.67	0.58
26	0/45	3.1		22.7	7.4	2700	0.30	4.0	10	15	50	3.6	5.40E-04	57.2	56.1	53.2	0.98	0.93
27	0/45	4.2		16.6	4.9	2418	0.50	8.0	16	20	40	6.4	1.50E-03	54.8	54.5	55.8	0.99	1.02
28	0/45	3.9		22.7	7.2	2700	0.25	3.0	9	12	48	3.0	3.75E-04	78.6	61.8	56.7	0.79	0.72
29	0/45	3.4		20.4	4.9	2265	0.31	6.0	10	12	39	9.7	5.77E-04	70	65	35	0.93	0.50
30	0/45	3.5		21.6	4.5	2254	0.21	5.6	10	13	62	11.5	2.65E-04	225	200	155	0.89	0.69
31	0/45	4.9		30.6	6.3	2247	0.18	2.0	17	9	50	2.5	1.94E-04	200	105	165	0.53	0.83
32	0/63	5.0		22.8			0.25	5.6	12	16	62	8.1	3.75E-04	185	160	135	0.86	0.73
33	0/45	6.2		19.1			0.40	4.0	8	11	28	3.6	9.60E-04	90	90	95	1.00	1.06
34	0/45	6.2		21.8			0.18	5.0	10	15	83	9.3	1.94E-04	80	75	80	0.94	1.00
35	0/45	3.3		28.1	5.3	2218	0.40	2.4	8	17	43	0.8	9.60E-04	80	65	50	0.81	0.63

Abbildung A1: Datensätze 1/3

#	Korngemisch / Bezeichnung	Durchgang bei Durchmesser X [%]			Proctordichte		ca. Korndurchmesser bei Durchgang X [mm]				Ungleichförmig- keitszahl Cu	Krümmungs- zahl C _e	Durchlässigkeit nach Beyer [m/s]	CBR-Werte [%]			CBR-Verhältnisse	
		0.063 mm	0.02 mm	2 mm	opt. Wassergehalt [%]	Proctor- dichte [kg/m³]	10%	30%	50%	60%				CBR	CBR ₂	CBR _F	CBR ₂ /CBR	CBR _F /CBR
36	0/16	4.5		23.8			0.28	3.2	7	9	33	4.1	4.54E-04	105	100	90	0.95	0.86
37	0/22	4.3		24.3			0.38	3.0	8	11	30	2.1	8.44E-04	69.7	55.5	55.6	0.80	0.80
38	0/63	6.8		24.8	4.9	2163	0.38	2.6	6	9	24	2.0	8.44E-04	75	85	75	1.13	1.00
39	0/45	10.4		22.6			0.06	3.8	9	13	206	17.6	2.38E-05	120	150	155	1.25	1.29
40	0/45	5.0		19.3			0.38	7.0	16	20	53	6.5	8.44E-04	105	140	115	1.33	1.10
41	0/45	6.8		22.5			0.19	3.0	9	11	60	4.3	2.11E-04	140	130	138	0.93	0.99
42	0/45	5.3		21.1			0.50	3.8	7	10	20	2.9	1.50E-03	90	80	75	0.89	0.83
43	0/63	4.3		15.6			0.75	7.0	18	24	32	2.7	3.38E-03	125	125	125	1.00	1.00
44	0/45	10.1		29.2			0.06	2.2	9	14	222	5.5	2.38E-05	125	135	105	1.08	0.84
45	0/45	6.7		28.0			0.20	2.4	7	10	50	2.9	2.40E-04	155	140	125	0.90	0.81
46	0/45	4.3		16.9			0.50	5.6	11	15	30	4.2	1.50E-03	130	105	105	0.81	0.81
47	0/45	3.9		20.5			0.25	5.0	10	12	48	8.3	3.75E-04	205	160	140	0.78	0.68
48	0/45	4.6		21.1			0.25	4.0	9	11	45	5.7	3.75E-04	130	80	70	0.62	0.54
49	0/45	4.3		23.0			0.19	3.8	8	11	60	6.9	2.11E-04	130	150	100	1.15	0.77
50	0/45	4.7		19.4			0.25	5.6	10	13	52	9.6	3.75E-04	110	115	90	1.05	0.82
51	0/45	4.5		18.6			0.30	6.0	12	16	52	7.7	5.40E-04	115	115	110	1.00	0.96
52	0/22	10.4		33.9			0.06	1.4	5	8	127	3.9	2.38E-05	145	120	140	0.83	0.97
53	0/22	4.5		16.9			0.60	5.0	9	12	20	3.5	2.16E-03	95	100	90	1.05	0.95
54	0/22	7.0		25.6			0.19	2.8	7	10	53	4.2	2.11E-04	110	120	90	1.09	0.82
55	0/22	7.8		20.3	6.8	2062	0.19	4.6	9	11	60	10.1	2.11E-04	85	75	85	0.88	1.00
56	0/100	7.6		21.3			0.18	5.0	13	18	103	7.9	1.84E-04	160	165	115	1.03	0.72
57	0/45	5.6		17.5			0.50	5.6	13	17	34	3.7	1.50E-03	145	155	95	1.07	0.66
58	0/45	5.1		18.8			0.50	5.0	11	16	32	3.1	1.50E-03	90	90	95	1.00	1.06
59	0/45	9.3		24.3			0.09	3.0	9	13	144	7.7	4.86E-05	90	75	80	0.83	0.89
60	0/45	6.4		22.1			0.38	3.0	8	12	32	2.0	8.44E-04	85	70	80	0.82	0.94
61	0/45	4.2		17.2			0.75	5.0	12	18	24	1.9	3.38E-03	80	80	95	1.00	1.19
62	0/45	4.7		18.5			0.60	5.0	10	15	25	2.8	2.16E-03	105	100	100	0.95	0.95
63	0/45	4.8		27.3			0.22	2.4	9	14	64	1.9	2.90E-04	180	125	120	0.69	0.67
64	0/22	10.8		39.1			0.06	0.8	4	7	117	1.5	2.16E-05	110	110	90	1.00	0.82
65	0/63	7.5		23.2			0.13	5.0	16	21	168	9.5	9.38E-05	90	65	65	0.72	0.72
66	0/45	5.3		26.6			0.25	2.8	10	15	60	2.1	3.75E-04	135	135	115	1.00	0.85
67	0/45	5.6		17.6			0.38	7.6	19	25	67	6.2	8.44E-04	135	135	115	1.00	0.85
68	0/63	6.8		22.1			0.38	5.0	14	20	53	3.3	8.44E-04	130	110	105	0.85	0.81
69	0/63	4.8		20.2			0.40	5.6	15	23	58	3.4	9.60E-04	160	95	95	0.59	0.59
70	0/63	6.0		26.7			0.20	2.6	10	16	80	2.1	2.40E-04	190	160	175	0.84	0.92

Abbildung A2: Datensätze 2/3

#	Korngemisch / Bezeichnung	Durchgang bei Durchmesser X [%]			Proctordichte		ca. Korndurchmesser bei Durchgang X [mm]				Ungleichförmig- keitszahl Cu	Krümmungs- zahl C _s	Durchlässigkeit nach Beyer [m/s]	CBR-Werte [%]			CBR-Verhältnisse	
		0.063 mm	0.02 mm	2 mm	opt. Wassergehalt [%]	Proctor- dichte [kg/m³]	10%	30%	50%	60%				CBR	CBR ₂	CBR _F	CBR ₂ /CBR	CBR _F /CBR
71	0/22	7.5		32.3			0.13	1.8	5	8	58	3.3	1.01E-04	115	65	65	0.57	0.57
72	0/45	5.0		18.8			0.40	7.0	18	25	63	4.9	9.60E-04	135	115	110	0.85	0.81
73	0/45	8.5		27.9			0.09	2.4	8	11	124	5.7	4.86E-05	175	110	50	0.63	0.29
74	0/45	3.8		26.0			0.50	2.6	8	13	26	1.0	1.50E-03	110	85	100	0.77	0.91
75	0/63	3.9		15.2			0.75	7.0	17	22	30	2.9	3.38E-03	102	89	101	0.87	0.99
76	0/63	4.4		17.6			0.50	5.0	15	20	40	2.5	1.50E-03	155	135	140	0.87	0.90
77	0/45	6.6		19.6			0.25	6.0	17	24	96	6.0	3.75E-04	145	130	135	0.90	0.93
78	0/45	9.1		37.0			0.08	1.3	5	8	100	2.6	3.84E-05	100	100	95	1.00	0.95
79	0/45	5.8		18.3			0.25	7.6	18	23	92	10.0	3.75E-04	100	100	95	1.00	0.95
80	0/45	5.3		27.7			0.38	2.4	7	10	27	1.5	8.44E-04	100	115	95	1.15	0.95
81	0/45	3.3		18.9			0.60	5.0	13	17	28	2.5	2.16E-03	105	100	75	0.95	0.71
82	0/45	4.8		22.0			0.40	3.8	10	14	35	2.6	9.60E-04	120	185	120	1.54	1.00
83	0/45	4.0	3.5	19.6	5.4	2253	0.40	5.0	11	17	43	3.7	9.60E-04	95	120	85	1.26	0.89
84	0/45	6.9	5.9	25.1	4.4	2334	0.38	3.0	9	13	35	1.8	8.44E-04	225	200	125	0.89	0.56
85	0/45	4.3	2.4	28.8	4.9	2267	0.30	2.2	8	14	47	1.2	5.40E-04	120	100	85	0.83	0.71
86	0/45	4.2		16.0			0.75	7.0	17	24	32	2.7	3.38E-03	125	110	105	0.88	0.84
87	0/45	5.2		17.9			0.38	7.0	18	24	64	5.4	8.44E-04	140	95	100	0.68	0.71
88	0/45	7.1		23.4			0.15	4.0	13	18	120	5.9	1.35E-04	100	50	30	0.50	0.30
89	0/45	5.1		17.4			0.50	7.0	20	25	50	3.9	1.50E-03	175	150	80	0.86	0.46
90	0/45	6.1		30.7			0.13	1.9	8	15	115	1.9	1.01E-04	245	245	240	1.00	0.98
91	0/45	3.7		18.3			0.60	5.0	10	14	23	3.0	2.16E-03	85	85	80	1.00	0.94
92	0/45	3.6		19.4			0.60	5.0	10	14	23	3.0	2.16E-03	90	80	75	0.89	0.83
93	0/45	4.3		19.4			0.50	5.0	11	16	32	3.1	1.50E-03	100	90	95	0.90	0.95
94	0/22	7.6	6.3	21.5	5	2130	0.15	4.6	10	12	80	11.8	1.35E-04	120	120	120	1.00	1.00
95	0/45	5.6		21.6	5	2250	0.25	5.0	13	20	80	5.0	3.75E-04	135	125	110	0.93	0.81
96	0/45	6.0		26.4	5.6	2230	0.20	3.0	10	14	70	3.2	2.40E-04	120	140	130	1.17	1.08
97	0/45	3.3		24.5	5.7	2152	0.30	4.0	13	18	60	3.0	5.40E-04	85	50	40	0.59	0.47
98	0/45	4.0		20.9	5.8	2155	0.30	6.0	15	18	60	6.7	5.40E-04	80	125	150	1.56	1.88
99	0/45	1.4		19.2	5.3	2135	0.60	6.0	13	17	28	3.5	2.16E-03	115	65	60	0.57	0.52
100	0/45	5.7		16.3	3.9	2270	0.75	5.6	14	20	27	2.1	3.38E-03	85	75	95	0.88	1.12
101	0/45	4.4		17.7	4	2260	0.70	5.6	14	22	32	2.0	2.94E-03	95	90	75	0.95	0.79
102	0/45	5.8	5.2	37.1	4.2	2218	0.13	1.1	6	10	80	1.0	9.38E-05	110	90	30	0.82	0.27
103	0/45	6.0	3.8	30.1	3.6	2309	0.13	2.0	8	12	92	2.6	1.01E-04	115	75	70	0.65	0.61
104	0/45	4.6	2.5	25.9	3.3	2321	0.18	2.5	13	20	111	1.7	1.94E-04	95	55	60	0.58	0.63
105	0/45	4.4	2.6	29.6	4.7	2262	0.25	2.0	8	27	108	0.6	3.75E-04	120	125	105	1.04	0.88
106	0/45	5.0	2.2	30.4	3.8	2309	0.13	2.0	9	25	192	1.2	1.01E-04	105	60	60	0.57	0.57
107	0/45	4.0	2.6	29.5	4.9	2205	0.30	2.1	8	12	40	1.2	5.40E-04	125	90	60	0.72	0.48

Abbildung A3: Datensätze 3/3

Glossar

Begriff	Bedeutung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
CBR	„California-Bearing-Ratio“ ohne Vorlagerung
CBR ₂	„California-Bearing-Ratio“ mit 96 stündiger Wasserlagerung
CBR _F	„California-Bearing-Ratio“ mit 72 stündigem Frost-Tau-Zyklus
C _c	Krümmungszahl [-]
C _u / U	Ungleichförmigkeitskennzahl [-]
d	Durchmesser
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
k	Durchlässigkeit [m/s]
M.-%	Masse-Prozent
MJ/m ³	Mega-Joule pro Kubikmeter
NA	Nationaler Anhang
ÖNORM	Österreichische Norm
SAS	Schweizerische Akkreditierungsstelle
SN	Schweizer Norm
UG	ungebundenen Gemisch
VSH	VersuchsStollen Hagerbach AG
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
ZTV	Zusätzliche technische Vertragsbedingungen

Literaturverzeichnis

Normen / Regelwerke

- [1] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2011), „**Gesteinskörnung für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Strassenbau**“, *SN 670 119-NA:2011; SN EN 13242:2002 / A1:2007; SN EN 13285:2010*
- [2] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2001), „**Versuche an Böden, Frosthebungsversuch und CBR-Versuch nach dem Auftauen (CBR_f)**“, *SN 670 321a:2001*.
- [3] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2006), „**Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 47 Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (...), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes**“, *SN 670 330-47:2006; EN 13286-47:2004*.
- [4] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (1998), „**Kiessande für Fundationsschichten**“, *SN 670 120d:1998*
- [5] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), „**Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnung – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren**“, *SN 670 902-1:2013; EN 933-1:2012*
- [6] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2009), „**Gesteinskörnung für Beton**“, *SN 670 102b-NA:2009; EN 12620:2002 / A1:2008*
- [7] Österreichisches Normungsinstitut ON (2013), „**Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Strassen- und Flugplatzbau – Bewertung der Frostsicherheit**“, *ÖNORM B 4811:2013-08*
- [8] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2011), „**Dimensionierung des Strassenaufbaus – Unterbau und Oberbau**“, *SN 640 324:2011*
- [9] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2001), „**Frost**“, *SN 670 140b:2001*
- [10] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV (2009), „**Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Strassenbau**“, *ZTV E-StB 09*

Publikationen

- [11] Karl Josef Witt (Hrsg.), **Grundbau-Taschenbuch Teil 1, 7. Auflage** ; Ernst & Sohn, 2008
 - [12] Karl Josef Witt (Hrsg.), **Grundbau-Taschenbuch Teil 2, 7. Auflage** ; Ernst & Sohn, 2008
 - [13] Thomas Plehm, **Merkblatt über die Verhütung von Frostschäden an Strassen**, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV; 2013
 - [14] Gerd Möller, **Geotechnik – Grundbau, 2. Auflage**, Ernst & Sohn, 2012
 - [15] Spektrum.de, **Frostkriterien**, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, abgerufen am 02.11.2016
 - [16] Detlef Rütz, **Wissensspeicher Geotechnik, 18. Auflage**, Eigenverlag Geotechnik Weimar, 2011
 - [17] Nicolas Guscioni, **Leitfaden zur Validierung von Prüfmethoden und Bestimmung der Messunsicherheit für Laboratorien im Bauwesen, Dokument-Nr. 326.dw**, Schweizerische Akkreditierungsstelle SAS, 2013
-

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 08.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 12.09.10 / 02.11.2010

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2011/505
Projekttitel: Optimierung des Prüfaufwandes zur Kontrolle der Frostopfindlichkeit von Gesteinskörnungen für ungebundene Gemische
Enddatum: 2016

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden Daten gesammelt, um die Bewertung der Frostopfindlichkeit gemäss SN 670-119 NA zu überprüfen und zu optimieren. Dazu wurden aus der gesamten Schweiz Datensätze von ungebundenen Gemischen gesammelt und ausgewertet, welche von Unternehmern zur Verfügung gestellt wurden. Anschliessend sind ausgewählte, für die Schweiz repräsentative, ungebundene Gemische auf deren Frostopfindlichkeit hin mittels ausgewählter Laborprüfungen überprüft und bewertet wurden. Dabei wurde zuerst der Durchgang bei 0.063 mm mittels einer Siebanalyse ermittelt und mit der Normanforderung der SN 670 119-NA von 3 M.-% verglichen. Sollte dieser Grenzwert überschritten sein, wurde die Frostopfindlichkeit mittels CBR-Verfahren geprüft und bewertet. Von ausgewählten Proben wurde zusätzlich anhand einer Schlämmanalyse das „alte“ Kriterium der Frostopfindlichkeit überprüft, welches einem maximalen Durchgang von 3 M.-% bei einer Korngrösse von 0.02 mm vorgibt.

Basierend auf der Auswertung der Datensammlung sowie der zusätzlichen durchgeführten Untersuchungen im Labor konnte nachgewiesen werden, dass der Grenzwert der Feinanteile von 3 M.-% ohne messbare Einbussen der Bewertungssicherheit der Frostopfindlichkeit auf 5 M.-% angehoben werden kann. Durch die bestehenden Grenzen der Korngrössenverteilung gemäss SN 670 119-NA weisen die in der Schweiz produzierten und verkauften ungebundenen Gemische eine durchwegs hohe Qualität und ausreichende Frostsicherheit auf. Ein Anteil von 99 % der untersuchten ungebundenen Gemische erfüllte das Frostkriterium trotz teilweise erheblich höherer Feinanteile. Nur vier Proben haben mit einem Feinanteil von weniger als 5 % die Prüfung der Frostopfindlichkeit nicht bestanden, wobei jedoch die Gründe für das Nicht-Bestehen nicht abschliessend genannt werden können. Weiterhin zeigte sich, dass die Resultate der CBR-Versuche keine eindeutige Korrelation zum Durchgang bei verschiedenen Korngrössen hat, was eine erhöhte Toleranz bei der Bewertung von Korngrössenverteilungen rechtfertigt. Zusätzlich wurde die Annahme bestätigt, dass ein Durchgang von 3 M.-% bei 0.02 mm einem Durchgang von 5 M.-% bei 0.063 entspricht.

Aufgrund der im Projekt gemachten Beobachtungen wird vermutet, dass das CBR-Verfahren, und insbesondere die Lagerung beim Versuch für den CBRF - Wert, nicht den realen Frost-Bedingungen entspricht, was zu einer zweifelhaften Bewertung der Frostbeständigkeit führt. So zeigen diverse Versuche an ungebundenen Gemischen, dass die Hebung während eines Frostzyklus nicht abgeschlossen wird, und die Setzung nach dem Frostzyklus teilweise grösser ist als die Hebung während des Gefrierens. Ein optimiertes CBR Prüfverfahren, das die physikalische Realität des frostbedingten Hebens und Senkens besser widerspiegelt, sollte aussagekräftigere Bewertungen der Frostbeständigkeit erlauben.

Es wird angenommen, dass schädliche Bestandteile (z.B. Glimmer) einen massgeblichen Anteil auf die Frostbeständigkeit eines Gemisches haben können. Daher wird empfohlen, eine petrographische Untersuchung des Vorkommens gemäss SN EN 670 115 durchzuführen, wenn der Feinanteil bei 0.063 mm zwischen 3 M.-% und 5 M.-% liegt. Bei einem erhöhten Anteil Schichtsilikate (in Anlehnung an die österreichische Normung) wird empfohlen, zusätzlich zu den petrographischen Untersuchungen eine CBR-Prüfung durchzuführen. Liegt der Feinanteil bei 0.063 mm über 5 M.-%, sind CBR-Prüfungen auf jeden Fall durchzuführen. Auf die Petrographie kann dann verzichtet werden.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die im Forschungsprojekt gesetzten Ziele wurden erreicht. Die Korrelation des Feinanteils bei 0.02 mm und 0.063 mm konnte dargestellt werden. Eine Empfehlung für Optimierung des Prüfaufwandes konnte damit formuliert werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Es wird empfohlen, die in der Zusammenfassung des Projektes formulierte Anpassung des Grenzwertes des Feinanteils zur Bewertung der Frostepfindlichkeit von ungebundenen natürlichen Gesteinskörnungen in die entsprechende nationale Norm zu übernehmen.

Die aufgeworfenen Fragen zur CBR-Prüfungen und Petrographien und den daraus abgeleiteten Beurteilungen zur Frostepfindlichkeit von Gesteinskörnungsgemischen sollten in einem weiteren Forschungsprojekt vertieft behandelt werden.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Wietek

Vorname: Maximilian

Amt, Firma, Institut: VersuchsStollen Hagerbach AG

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. Basierend auf der Auswertung der Datensammlung sowie der zusätzlich durchgeführten Untersuchungen im Labor konnte nachgewiesen werden, dass der Grenzwert der Feinanteile von 3 M.-% ohne messbare Einbussen der Bewertungssicherheit der Frostempfindlichkeit auf 5 M.-% angehoben werden kann.
3. Zeitlicher Verlauf: Das Projekt konnte mit leichten Verzögerungen infolge Personalkapazitäten und verspäteten Materiallieferungen zeitnah durchgeführt werden.

Umsetzung:

Die im Rahmen des Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse zur Frostempfindlichkeit von ungebundenen Gesteinskörnungen 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:

Im Projektverlauf haben sich Fragen zur CBR-Frost-Prüfung ergeben. Bei den Untersuchungen, die im Projekt gemacht wurden, hat sich gezeigt, dass z.B. die Lagerung beim Versuch für den CBRF - Wert nicht den realen Frost-Bedingungen entspricht, was zu einer zweifelhaften Bewertung der Frostbeständigkeit führt. Daher sollte die Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Gesteinskörnungsgemischen in einem weiteren Forschungsprojekt vertieft behandelt werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Es wird empfohlen, die in der Zusammenfassung des Projektes formulierte Anpassung des Grenzwertes des Feinanteils zur Bewertung der Frostempfindlichkeit von ungebundenen natürlichen Gesteinskörnungen in der zuständigen NFK zu diskutieren und bei der nächsten Überarbeitung der Norm SN 670 119-NA zu berücksichtigen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Montani

Vorname: Sara

Amt, Firma, Institut: Geotechnisches Institut AG, Bern

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (Forschung im Strassenwesen → Downloads → Formulare) heruntergeladen werden.