

Bewertungskriterien für den realitätsnahen Frosthebungsversuch

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Bewertungskriterien für den realitätsnahen Frosthebungsversuch

Projekt-Nr. 05.0181

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften

Lehrstuhl für Verkehrswegebau
Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg
Dipl.-Ing. Nina Flottmann

April 2019

Kurzfassung – Abstract

Bewertungskriterien für den realitätsnahen Frosthebungsversuch

Für die Beurteilung der Frostsicherheit von ungebundenen Schichten im Straßenbau werden je nach Anwendungsgebiet die Kriterien aus unterschiedlichen Regelwerken herangezogen. Die diesen Kriterien hinterlegten Prüfmethode sind auf Erfahrungen mit natürlichen Baustoffen abgestimmt und korrelieren nicht hinreichend mit den Materialveränderungen von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten in der Praxis. Daher wurde eine realitätsnahe Prüfmethode auf Basis österreichischer Erfahrungen entwickelt. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden nun Bewertungskriterien für diese Prüfmethode erarbeitet.

Zunächst wurden die in der Literatur als maßgeblich definierten Einflussgrößen auf die Frosthebung gezielt untersucht. Daraus ergab sich, dass der Frosthebungsparameter Maximale Frosthebung besonders für die Bewertung geeignet und die Parameter Bleibende Hebung und Hebungsgeschwindigkeit jeweils geeignet sind. Für die Entwicklung eines Bewertungskriteriums wurden zwei Ansätze verfolgt, von denen nur Ansatz A sich als zielführend herausstellte. Bei Bewertungsansatz A wurden die Flächen unter der Hebungskurve und die über der Kühlkopf-Temperaturkurve je Probe ermittelt und in Bezug gesetzt. Bewertungsansatz B wurde ursprünglich konzipiert, um Kennwerte aus dem Frosthebungsversuch und Materialkennwerte miteinander zu verknüpfen. Dieser Ansatz hat sich als nicht zielführend herausgestellt. Schlussendlich erzeugen die Überlagerungen der unterschiedlichen materialspezifischen Einflussfaktoren zu hohe Streuungen. Werden jedoch Materialgemische in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften, z.B. hoher Feinanteil, im Labor gezielt zusammengesetzt, lässt sich dieser materialspezifische Einflussfaktor auf die Frosthebung überwiegend korrelieren. Eine Übertragung dieser Korrelationen auf heterogene Baustoffgemische aus der Praxis ist nicht möglich.

Die Validierung des Bewertungskriteriums nach Ansatz A erfolgte mittels Frosthebungsdaten von RC-Baustoffgemischen aus der Praxis.

Grundsätzlich liegt mit dem Frosthebungsversuch nun ein prozesssicheres Verfahren vor, mit dem das Frostverhalten von RC-Baustoffgemischen und industriellen Nebenprodukten praxisgerecht geprüft und bewertet werden kann. Damit ist eine Möglichkeit geschaffen, die Gebrauchseigenschaft Frostempfindlichkeit der Materialien besser zu beurteilen.

Elaboration of evaluation criteria for a realistic test method of frost heaving

Evaluation of the frost resistance of unbound sub-base layers in road construction is based on criteria from different guidelines depending on the field of application. The test methods related with these criteria are based on parameters deduced from natural materials and do not correlate adequately with the material characteristics of recycled materials and industrial by-products in use. Therefore, a realistic test method based on Austrian data was developed. Within this research project, evaluation criteria have now been elaborated for the former.

First of all, the relevant influencing parameters influencing frost heaving and defined as such in the prior art has been identified and investigated. The maximum frost heave appeared especially appropriate as an evaluation criterion, where by the frost heave velocity as well as the heaving that remains after thawing provide additional valuation potential due to direct correlation with the maximum frost heave. For the development of an evaluation parameter, two different approaches were analyzed, of which only approach A turned out to be effective. Within this approach the areas below the heaving curve and above the head temperature curve were determined and related for each sample.

Approach B was designed to link characteristic values from the frost heave test and material specific parameters, but did not succeed. Although material mixtures composed in the laboratory with specific properties (for example high fine fraction), which could be mainly correlated to the frost heave, it was not possible to transfer these correlations to mixtures from applications on site.

The validation of the evaluation criterion according to approach A was made by means of frost-heave data from recycling material mixtures used on site. In general, the frost heave test represents a reliable method to examine and evaluate the behavior of recycled material mixtures and industrial by-products under frost. This provides an improved means assess the frost sensitivity of the materials.

Summary

Elaboration of evaluation criteria for a realistic test method of frost heaving

1. Assignment

The influence of frost on a highway depends not only on the construction of the road and the temperature effects, but also on the building material used. Ideally, the properties of the building materials and soils used must not be adversely affected by weather conditions. However especially the unbound sub-base layer and the subgrade are exposed to low temperatures and thus frost during their lifetime.

When it comes to the selection of materials, the parameter 'frost resistance' is of great importance. In practice both -natural materials as well as recycled materials and industrial by-products- are used. Since more than 70% of the construction and demolition waste is to be recycled by the end of 2020, according to the German law of circular economy, it can be assumed that the rate of re-used materials in road construction will continue to increase.

In order to evaluate the frost resistance of unbound sub-base layers in road construction the criteria from the guideline [ZTV E-StB 09] or technical specification [TL SoB StB 04/07] are used depending on the field of application. However, the test methods, which are related with these criteria, are based on historic experience gained with natural materials. Unfortunately, there is currently no standardized test method in Germany to adequately simulate the material characteristics of recycled materials and industrial by-products as well as the weather conditions in-situ when it comes to a realistic evaluation of the frost resistance or frost sensitivity for these materials.

The aim of this project is the elaboration of evaluation criteria for the realistic test method of frost heaving subject to the draft regulation of a [Technical test regulation for soil and rock in road construction - Part frost heave test].

2. Research methodology

First of all, the influence of the temperatures of the quench bath in the two frost chambers was analyzed. The draft of the "Technical test regulations for soil and rock in road construction, part: frost heave test" asks for a deviation of quench bath temperatures of not more than $1,5^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \text{ K}$. This is based on the technical achievability as well as on the assumption that a lower temperature deviation in the quench bath will increase the comparability of both frost chambers.

In the past, some efforts have already been made to separate the large number of influencing factors in the complex structure "building material mixture" or "soil" regarding the frost sensitivity. First of all, the relevant influencing parameters defined in the prior art literature – such as fine fraction, swelling and porosity – were investigated and analyzed with regard to frost heaving by means of specifically composed laboratory mixtures. Evaluation criteria were derived from the findings and validated on the basis of results from materials used in practice.

3. Test results

The data analysis regarding the influence of the quench bath temperature revealed, in line with [Jansen, 2102], that the absolute temperature in one quench bath is lower. To take account of this, the testing apparatus was modified. A control circuit with two temperature probes was able to obtain the desired regularity between the two water basins. Further data analysis revealed, that the desired tolerance of $\pm 0,1$ K of the test temperature in the quench bath, as formulated/defined in the draft of TP BF-StB, part: frost heave], can only be achieved with pure material mixtures. A tolerance of $\pm 0,3$ K is realistic with the influence of material mixtures in practice. In addition, it could be proven that the temperature of the water basins do not influence the test parameters "maximum frost heave" and "Formation of the ice lense".

The influence of the fine fraction on the frost heave has been proven by means of defined laboratory mixtures, for which natural material mixtures as well as mixtures with industrial by-products were composed with different fine fractions. Within the group of materials, good to very good correlations were found towards the parameters "maximum frost heave", "frost heave velocity" and "heave that remains after thawing".

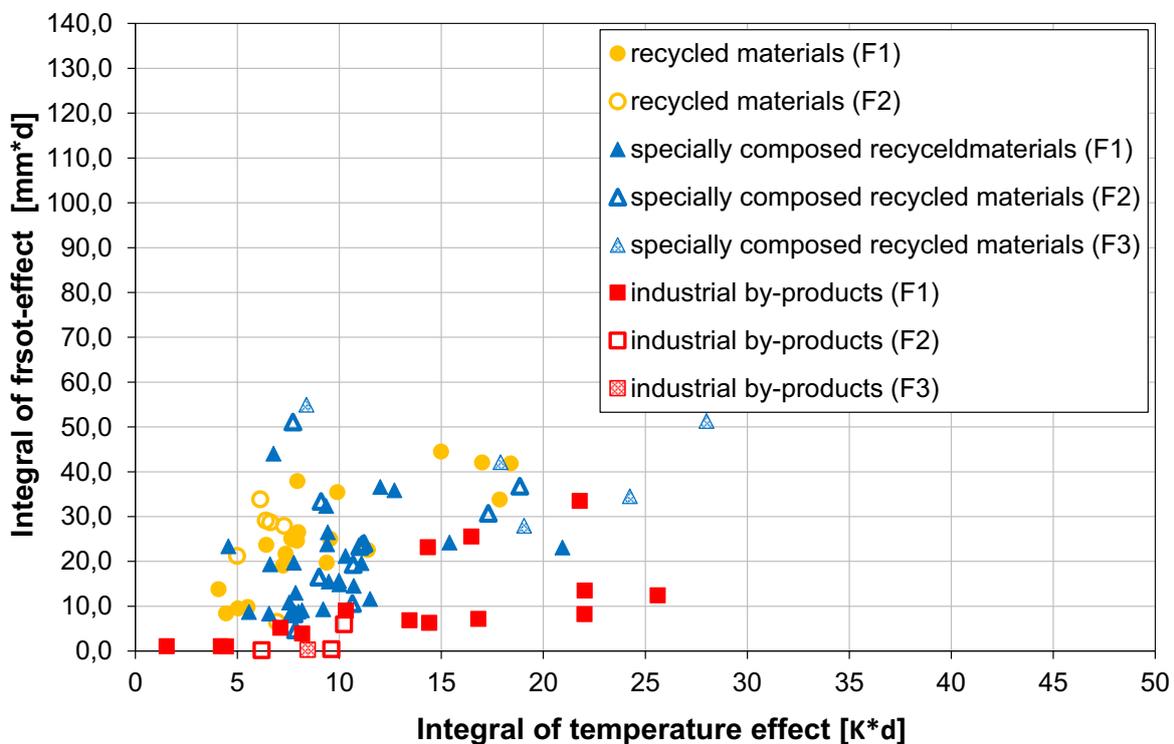
An influence of swelling capacity on frost heave could not be observed, although laboratory mixtures with a varying fraction of sand as were as well composed specifically. They comprised natural material mixtures and pure recycled material mixtures and, in addition to that, recycled material mixtures, which had been collected at recycling plants. The swelling capacity of the materials was determined by sand equivalent. None of the mixtures showed correlations between the swelling capacity and the frost heave values.

The influence of porosity on the frost heave could be verified partly. The porosity was determined directly and indirectly. Firstly, a total porosity was calculated on natural rocks, recycled material mixtures and industrial by-products based on their gross density as well as their pure density. Secondly, the accessible pore space of the above-named materials was determined by means of mercury porosimetry. It was decided to limit the evaluation of the experiment to a pore space between 3,500 nm and 100,000 nm, since the most significant differences between the investigated materials were observed in this range. In order to perform the frost heave tests, specific laboratory mixtures were also prepared, having mainly variations in the material type of the grain fraction 5/22,4 mm. Using the approach of the calculated total porosity, no correlations with frost heave values could be found. However, the results of the mercury porosimetry show that the materials with more than 60% accessible capillary pore space suffer almost no frost heave despite great scattering of the results.

In order to evaluate the influence of the material parameters, the calculated correlation functions were combined into three groups based on the gradient and the y-intercept. It was found that especially the maximum frost heave is suitable as an evaluation criterion and that the frost heave velocity as well as the heave that remains after thawing provide additional valuation potential due to direct correlation with the maximum frost heave. When considering the heave velocity, it is within irrelevant which timespan during the test, as similar trends were observed in the evaluation of the velocities of the individual test days. It is noted that higher correlations could be calculated at velocities between the 6th and 7th day.

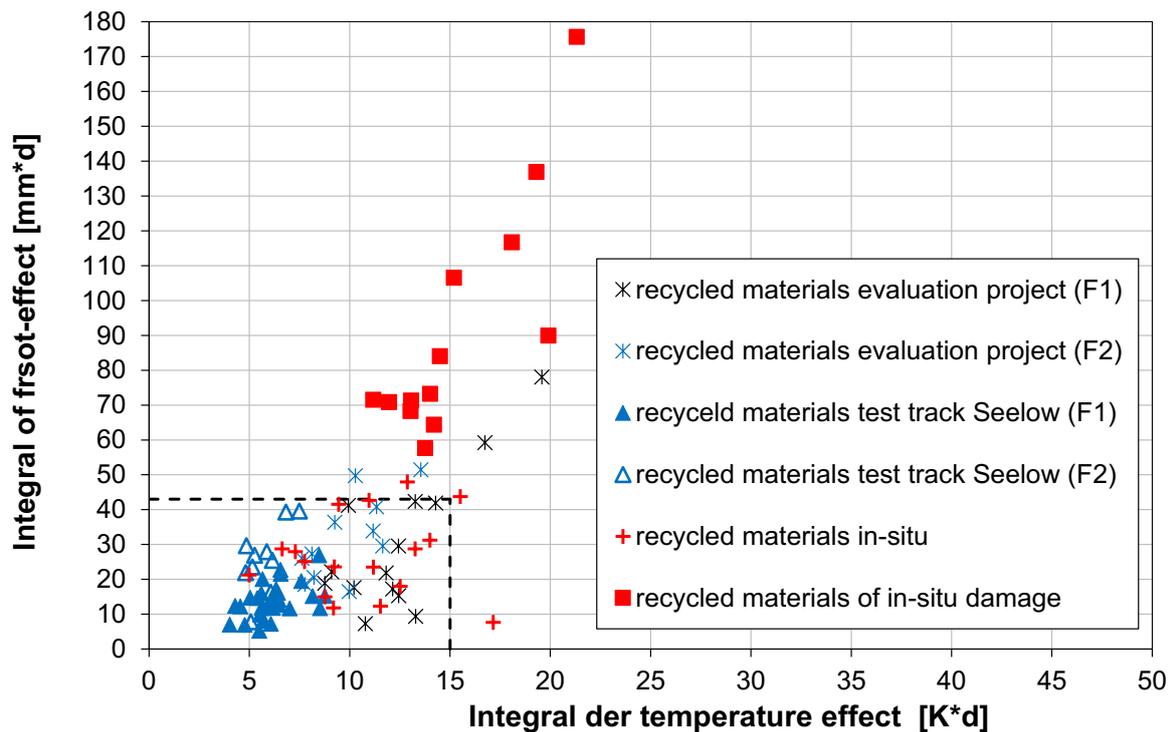
The material parameters of those analyzed which were suitable for evaluation were the grain fraction 5/22,4 mm and the part < 0,063 mm. Both parameter are reflected in natural and recycled material mixtures as well as mixtures of industrial by-products.

For the development of an evaluation criterion, further data from the data pool of the RUB was used, which comprises data from the BAST, the TU München und the HTW Dresden. This data concerns results of recycled mixtures from recycling plants, from specially composed recycled materials and from industrial by-products. Two approaches were followed, of which only one, approach A, lead to results. For this approach, the relationship of the surface below the heave curve and the surface above the temperature curve of the cooling head was established.



Approach B was designed to link characteristic values from the frost heave test and material specific parameters, but did not succeed.

The validation of the evaluation criterion according to approach A was made by means of frost-heave data from recycling material mixtures used on test track in Seelow [Jansen et al., 2011] and on the research project "evaluation of resources-saving base layers" [Radenberg et al., 2014]. Furthermore frost heave data from recycled material mixtures, which showed in-situ damage, were taken into account. The following figure shows an example of the results.



In summary, the following evaluation criteria were found on this basis:

- natural resources (frost susceptibility F1 according to soil classification)

Integral of frost-effect: $\leq 30 \text{ mm} \cdot \text{d}$

Integral of temperature effect: $\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$

- recycled materials (frost susceptibility F1 according to soil classification)

Integral of frost-effect: $\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$

Integral of temperature effect: $\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$

- industrial by-products (frost susceptibility F1 according to soil classification)

Integral of frost-effect: $\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$

Integral of temperature effect: $\leq 23 \text{ K} \cdot \text{d}$

The validation of evaluation criteria of industrial by-products was not possible because of missing data on in-situ test tracks.

This frost heave test is able to determine the susceptibility to frost in a practical and reliable way. The evaluation criterion which was suggested here above can furthermore be used to determine the susceptibility to frost of mixtures of recycled materials according to soil classification class F1.

Finally, the project comprised a literature review on the modeling of frost bodies. Although the research field exists since long time, the number of published studies and

models related to road construction is very limited and exclusively from East Asia. Therefore, the investigation was also extended to models that are not directly applicable to road construction. Currently, European research on the numerical simulation of frost bodies is limited to mainly two- or three-phase models. Based on this, a four-phase model is currently under development [Ricken, Bluhm, 2014], which correlates rock or solid, liquid, ice and air.

The two-, three- or four-phase models are used, for example, in tunnel construction or in foundation engineering. With regard to the application of unbound sub-base layers in road construction, only the four-phase model is relevant in practical terms, so this model was presented in detail. The models, which are currently under development in East Asia, were also explained in summary.

4. Consequences for practical situations

As the development of the evaluation criterion did not take into account material-specific influences, such as the composition of recycling material mixtures or also the industrial by-products, it may be necessary to modify the evaluation criterion once corresponding analyzes will be available.

In general, the frost heave test represents a reliable method to examine and evaluate the behavior of recycled material mixtures and industrial by-products under frost. This provides a possibility for both the public sector for road construction and the companies to more effectively assess the frost sensitivity of the materials. As a result, the acceptance and use of recycled materials will increase and the exploitation of natural resources will reduce.

Inhalt

Kurzfassung – Abstract	3
Inhalt	11
1. Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung	14
1.1 Einleitung und Problemstellung	14
1.2 Zielsetzung	15
2. Literaturübersicht	16
2.1 Frostindex und Frosteindringung	16
2.2 Anforderungen an das Frostverhalten in deutschen Regelwerken	18
2.3 Frosthebungsversuche und Frostkriterien	19
3. Vorgehensweise	25
3.1 Untersuchungsprogramm	25
3.2 Materialauswahl	26
3.2.1 Natursteine	26
3.2.2 Recycling-Baustoffgemische und industrielle Nebenprodukte.....	27
3.3 Allgemeine Voruntersuchungen	28
3.4 Bestimmung der Quellfähigkeit.....	29
3.5 Porositätsbestimmung	29
4. Untersuchungsergebnisse	32
4.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen	32
4.2 Ergebnisse der Bestimmung des Sandäquivalentes	42
4.3 Porositätsberechnung	43
4.4 Quecksilberporosimetrie.....	43
4.5 Vergleich der Porositätsberechnung mit der ermittelten Porosität aus der Quecksilberporosimetrie.....	47
5. Analyse der Einflussfaktoren	49
5.1 Einfluss der Wasserbadtemperaturen	49
5.1.1 Hintergrund.....	49
5.1.2 Datenanalyse	50
5.1.3 Modifikation des Kühlkreislaufes	58
5.2 Einfluss des Feinkornanteils auf die Frosthebung	61
5.2.1 Einfluss des Anteils < 0,063 mm	62
5.2.2 Einfluss der Korngrößenverteilung	68
5.2.3 Einfluss des Luftporenanteils.....	73
5.3 Einfluss der Quellfähigkeit auf die Frosthebung	78
5.3.1 Einfluss des Sandäquivalent-Wertes	79
5.3.2 Einfluss der Korngrößenverteilung	84
5.3.3 Einfluss des Luftporenanteils.....	88
5.4 Einfluss der Porosität auf die Frosthebung.....	92
5.4.1 Einfluss der berechneten Gesamtporosität.....	93
5.4.2 Einfluss aus kapillarfähigen Porenanteil	93
5.4.3 Einfluss der Korngrößenverteilung	99
5.4.4 Einfluss des Luftporenanteils.....	103
5.5 Zusammenfassende Bewertung der Einflussfaktoren	107

6	Entwicklung der Bewertungskriterien für den Frosthebungsversuch	110
6.1	Vorbemerkung	110
6.2	Bewertungsansatz A.....	111
6.3	Bewertungsansatz B.....	115
6.4	Auswahl des Bewertungsverfahrens.....	122
7.	Validierung und Empfehlung eines Bewertungskriteriums	125
7.1	Ergebnisse von Versuchen an Tragschichtmaterialien aus Praxis-anwendungen	125
7.2	Ergebnisse von Schadensfällen.....	126
7.3	Empfehlung eines Bewertungskriteriums.....	127
8.	Literaturrecherche zu Modellierungen von Frostkörpern	129
8.1	Allgemeines	129
8.2	Übersicht der Vierphasenmodelle.....	129
8.3	Modell nach Ricken und Bluhm	130
8.3.1	Allgemeines	130
8.3.2	Annahmen und Vereinfachungen	130
8.3.3	Validierungsansatz	130
8.3.4	Ergebnisse.....	131
8.4	Modell nach Li, Chen, Xu, Bin und Swoboda.....	135
8.4.1	Allgemeines	135
8.4.2	Annahmen und Vereinfachungen	135
8.4.3	Validierungsansatz und Ergebnisse.....	136
8.5	Modell nach Tan, Chen, Tian und Cao	139
8.5.1	Allgemeines	139
8.5.2	Annahmen und Vereinfachungen	139
8.5.3	Validierungsansatz	140
8.5.4	Ergebnisse.....	140
8.6	Modell nach Zhao, Gray und Male.....	143
8.6.1	Allgemeines	143
8.6.2	Vereinfachungen und Annahmen	144
8.6.3	Validierungsansatz	144
8.6.4	Ergebnisse.....	144
8.7	Modell nach Zhang, Teng, He und Sheng	146
8.7.1	Allgemeines	146
8.7.2	Vereinfachungen und Annahmen	147
8.7.3	Validierungsansatz	147
8.7.4	Ergebnisse.....	148
8.8	Analyse der ausgewählten Modelle unter straßenbauspezifischen Gesichtspunkten	150
8.8.1	Allgemeines	150
8.8.2	Schwerpunkt der Modellierung	150
8.8.3	Sättigungszustand des Bodens bzw. Feststoffes.....	150
8.8.4	Abmessungen der Probekörper bei der Validierung	151
8.8.5	Materialart.....	151

8.8.6 Materialeigenschaften	152
8.8.7 Gefriermethode	153
8.8.8 Temperaturverteilung im Boden	153
8.8.9 Verformungen.....	154
8.8.10 Zusammenfassende Bewertung der ausgewählten Modelle	154
9 Zusammenfassung und Ausblick	156
Literatur	160
Anhang	164
Anhang A - Einflussfaktor Feinanteile	165
Kornzusammensetzungen der Materialgemische	165
Ausgewählte Gegenüberstellungen von Materialkennwerten und Frosthebungskenndaten.....	166
Anhang B - Einflussfaktor Quellfähigkeit	170
Kornzusammensetzungen der Materialgemische	170
Ausgewählte Gegenüberstellungen der Materialkennwerten und Frosthebungskenndaten.....	171
Anhang C - Einflussfaktor Porosität	178
Porenraumverteilungen.....	178
Kornzusammensetzung der Materialgemische	187
Ausgewählte Gegenüberstellungen der Materialkennwerten und Frosthebungskenndaten.....	188
Anhang D.....	200
Bewertungsansatz A.....	200
Bewertungsansatz B.....	201
Vergleich der Bewertungsansätze	202
Anhang E.....	204
Einfluss der Wasserbadtemperatur.....	204
Modifizierter Kühlkreislauf.....	205

1. Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Einleitung und Problemstellung

Die angestrebte Nutzungsdauer von Verkehrswegen umfasst mehrere Jahrzehnte. Dafür ist es erforderlich, dass der Straßenober- und -unterbau eine über die Zeit möglichst gleichbleibende Tragfähigkeit und eine ausreichende Frostbeständigkeit aufweist. Bei der Bemessung fließen diese Ziele über die Frosteinwirkungszonen bzw. die daraus abgeleitete Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus als Frostschutzmaßnahmen ein. Diese basieren auf langjährigen Erfahrungen.

Neben dem Straßenaufbau und der Temperatureinwirkung auf den Straßenkörper beeinflusst auch der verwendete Baustoff das Frostverhalten des gesamten Straßenkörpers. Dem zufolge dürfen die Gebrauchseigenschaften der verwendeten Baustoffe und Böden nicht witterungsbedingt negativ beeinflusst werden. Insbesondere die ungebundenen Tragschichten und der Unterbau sind während ihrer Nutzungsdauer niedrigen Temperaturen und somit Frost ausgesetzt. Deren Verhalten bei Frosteindringung und zusätzlicher Verkehrsbelastung hängt im Wesentlichen von der Wechselwirkung zwischen Wasser und Boden bzw. Gestein ab. Bei der Auswahl der Baustoffe für diese Schichten ist daher dem Kriterium Frostsicherheit eine wichtige Bedeutung beizumessen. In der Praxis werden dafür neben natürlichen Baustoffen auch Recycling-Baustoffgemische und industrielle Nebenprodukte eingesetzt. Da nach dem [Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012] bis Ende 2020 mehr als 70 % der Bau- und Abbruchabfälle rezykliert werden sollen, ist davon auszugehen, dass die Anwendungsquote weiter ansteigen wird.

Die Beurteilung der Frostsicherheit der für ungebundene Schichten verwendeten Materialien erfolgt je nach Anwendungsgebiet gemäß den [ZTV E-StB 09] bzw. den [TL SoB StB 04/07]. Die diesem Kriterium hinterlegten Prüfmethode sind jedoch auf Erfahrungen mit natürlichen Baustoffen abgestimmt.

Vor dem Hintergrund einer praxisbezogenen Bewertung der Frostsicherheit bzw. Frostempfindlichkeit für Recycling-Baustoffgemische und industrielle Nebenprodukte in Deutschland sind die derzeit genormten Frost-Prüfverfahren nicht geeignet, da diese sowohl die Materialveränderungen als auch die Witterungsbedingungen in-situ nur unzureichend simulieren.

Aufgrund der Notwendigkeit eines geeigneten Prüfverfahrens entwickelten [Weingart, Wieland, 2005] eine entsprechende realitätsnahe Prüfmethode auf Basis österreichischer Erfahrungen zur Bestimmung der Frosthebung [Strasser et al., 2001], [RVS 11.062, 1999]. Seitdem liegt ein Prüfverfahren vor, mit dem die Frostbeanspruchung eines Baustoffgemisches ohne Bindemittel hinreichend praxisgerecht simuliert wird. Auf dem Weg zur Routineprüfung führte die Bundesanstalt für Straßenwesen 2010 Vergleichsuntersuchungen zwischen den Geräten verschiedener Prüfinstitute durch [Blume, 2010]. Mit Hilfe dieser Erfahrungen wurde der Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels - Teil Frosthebungsversuch überarbeitet.

1.2 Zielsetzung

In der Vergangenheit wurden bereits einige Anstrengungen unternommen, die Vielzahl der Einflussfaktoren im komplexen Gefüge „Baustoffgemisch“ bzw. „Boden“ auf die Eigenschaft Frostempfindlichkeit zu trennen. Vor allem konnten dabei die unterschiedlichen Gesteins- bzw. Gemischeigenschaften, wie die Porosität, die Quelfähigkeit und der Anteil an feiner Gesteinskörnung, als maßgebend herausgestellt werden.

Mit dem Frosthebungsversuch liegt ein prozesssicheres Verfahren vor, mit dem das Frostverhalten von Recycling-Baustoffgemischen und industriellen Nebenprodukten praxisgerecht geprüft werden kann.

Ziel dieses Projektes ist die Erarbeitung von Bewertungskriterien für diesen Versuch. Mit Hilfe von gezielt zusammengesetzten Baustoffgemischen werden die Auswirkungen der als maßgebend extrahierten Einflussgrößen untersucht und analysiert. Damit wäre sowohl für die öffentliche Straßenbauverwaltung als auch für die ausführenden Firmen eine Möglichkeit geschaffen, die Gebrauchseigenschaft „Frostempfindlichkeit“ der Materialien besser zu beurteilen. Infolge dessen wird somit die Akzeptanz der Recycling-Baustoffe erhöht und die Ausnutzung natürlicher Ressourcen reduziert.

2. Literaturübersicht

2.1 Frostindex und Frosteindringung

Die Frostzonenkarte von Deutschland enthält drei Frosteinwirkungszonen, die grob die klimatischen Verhältnisse widerspiegeln. Die Zonen wurden auf Basis der Frostindizes festgelegt. Für die Berechnung des Frostindex werden die täglichen Frosteinwirkungen während einer Frostperiode aufsummiert. Die Frosteinwirkung wird dabei aus Lufttemperatur und Zeitdauer der Einwirkung als °C*d berechnet. Eine Kälteperiode enthält mehrere, aufeinander folgende Frostperioden. Diese dürfen nicht durch Auftauen unterbrochen werden. Als Frostindex wird die Differenz zwischen dem Maximum und dem Minimum der Temperatursummenkurve bestimmt (Abbildung 1). Die Steigung der Kurve entspricht der mittleren Tagestemperatur.

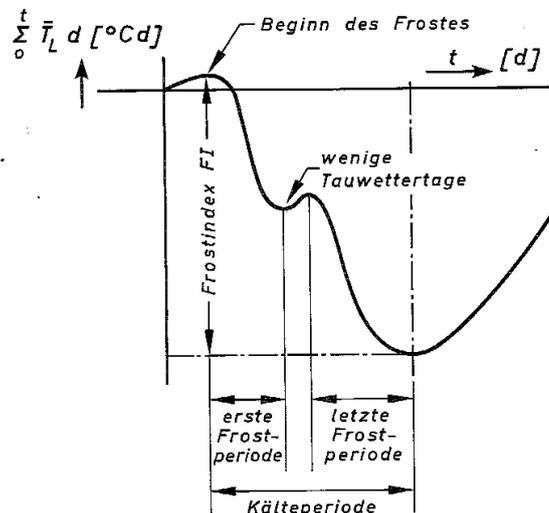


Abbildung 1: Beispiel für die Frostindexermittlung [Heft 105, 1994]

Maßgebend für die anfängliche Aufteilung der Zonen war der Winter 1962/63, da dieser in einer betrachteten Zeitspanne von rd. 50 Jahren Extremtemperaturen aufwies [Heft 105, 1994].

[Roos et al., 2008] aktualisierten grundlegend die Frostzonenkarte der [RStO 01, 2001] unter Berücksichtigung klimatischer Schwankungen und regionaler Besonderheiten. Dabei wurde zum einen ein maximaler Frostindex über die Winter 1955/56 bis 2004/05 und zusätzlich ein maximaler Frostindex mit einer Wiederkehrzeit von 30 Jahren statistisch ermittelt. Aufgrund des Anstiegs von Messstationen in den vergangenen Jahrzehnten ist eine detailgenauere Erfassung der Tagestemperaturen möglich. Bei der Auswertung konnten eine Vielzahl von Einflussfaktoren, wie die geografische Lage und die Bebauung, mit berücksichtigt werden. Daraus sind detailgenaue (1-km-Raster) Karten mit einem maximalen Frostindex über einen Beobachtungszeitraum von 50 Jahren (FI_{max}) und auch mit einem maximalen Frostindex für einen 30jährigen Wiederkehrzeitraum (FI_{30}) erstellt worden.

Basis zur Berechnung des forstsicheren Oberbaus nach den [RStO 01] ist die Annahme, dass eine Schichtdicke von 60 % der errechneten Frosteindringtiefe Frostschäden verhindern kann [Heft 105, 1994]. Damit erstellten [Blume, Plehm, 2009]

im Zusammenspiel mit dem oben genannten FI_{30} eine neue Frostzonenkarte. Diese fand Eingang in die [RStO 12] und ist in Abbildung 2 dargestellt.

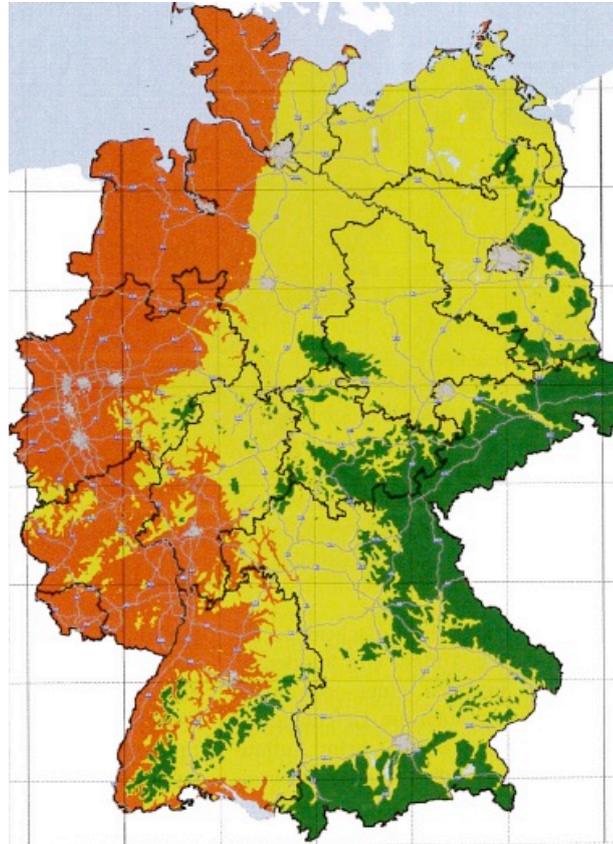


Abbildung 2: Frostzonenkarte nach [Blume, Plehm., 2009]

Darüber hinaus konnten erneut drei Frostzonen zusammengefasst werden. Jedoch weicht die neue Karte insbesondere in Süd- und Ostdeutschland von der alten ab, da hier in der Vergangenheit offenbar der Frostzonenbereich zu hoch eingeschätzt wurde. Eine Gegenüberstellung der veränderten Indizes für die Frostzonen enthält Tabelle 1.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der alten und neu berechneten Frostindizes

Frostzone	Grenzwerte der Frostindizes	
	$FI_{30}^{1)}$ [°C*d]	$F^{2)}$ [°C*d]
I	≤ 250	≤ 490
II	> 250 - ≤ 330	>490 - ≤ 580
III	> 330 - ≤ 580	>580 - ≤ 675

¹⁾ nach [Blume, Plehm, 2009];

²⁾ nach [Heft 105, 1994] ≈ FI_{Max} nach [Roos et al., 2008]

[Wellner et al., 2010] überprüften die Bestimmung der Frosteindringung auf Basis numerischer und statistischer Auswertemethoden mit aktuellen Klimadaten. Mittels Simulationsrechnungen wurden funktionale Zusammenhänge optimiert sowie auf

mehrschichtige Aufbauten und verschiedene Baustoffe angepasst. Damit könnte zukünftig der empirische Ansatz zur Berechnung des frostsicheren Oberbaus aktualisiert werden.

2.2 Anforderungen an das Frostverhalten in deutschen Regelwerken

In Deutschland wird bei den Anforderungen an das Frostverhalten von Böden und ungebundenen Baustoffgemischen in Abhängigkeit vom Anwendungsgebiet zwischen Frostempfindlichkeit und Frostwiderstand unterschieden.

Als frostempfindlich werden Böden oder Baustoffe bezeichnet, in denen durch Frosteinwirkung Gefügeveränderungen entstehen. Der Frostwiderstand ist definiert als Widerstand des wassergesättigten Gesteinskorns gegen Frosteinwirkung.

Bei der Anwendung unterhalb des Planums unbehandelter nicht bindiger Böden erfolgt die Beurteilung der Frostempfindlichkeit mit Hilfe granulometrischer Kenngrößen (Abbildung 1) nach den [ZTV E-StB 09, 2014]. Bei bindigen Böden werden zusätzlich deren plastische Kenngrößen mitbetrachtet.

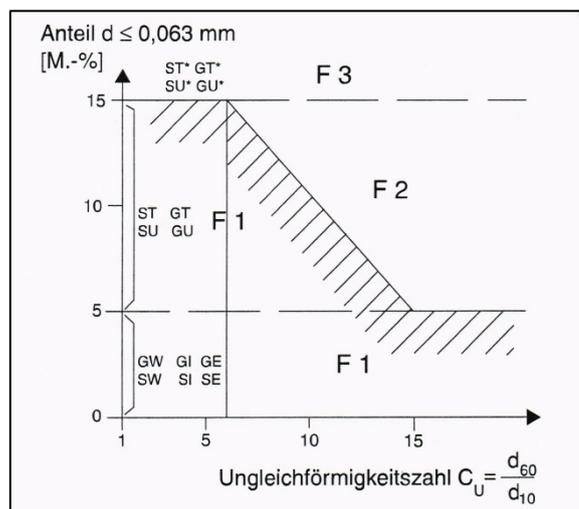


Abbildung 3: Klassifikation der Frostempfindlichkeit von Bodengruppen [ZTV E-StB 09, 2014]

Diese dreistufige Klassifikation wurde von [FLOSS, 1973] erstmals empfohlen und basiert auf den bisher erarbeiteten Frostkriterien u.a. nach [Casagrande, 1931] und [Schaible, 1957]. Seine abweichende Festlegung in Bezug auf die Korngröße $< 0,063 \text{ mm}$ erfolgte aufgrund der prüftechnischen Vereinfachung im Vergleich zur Korngröße $< 0,02 \text{ mm}$.

Eine Bewertung des Frostwiderstandes am Gestein, für den v.g. Anwendungsbereich am Felsgestein, erfolgt indirekt entweder durch die Prüfung der Wasseraufnahme nach [DIN EN 1097-6, 2013] oder durch die Prüfung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel nach [DIN EN 1367-1, 2007]. Kommen Recycling-Baustoffgemische oder industrielle Nebenprodukte nach den [TL BuB E-StB 09] zum Einsatz, werden diese in Ermangelung an Alternativen wie Böden oder Baustoffgemische klassifiziert.

Bei der Anwendung unbehandelter Baustoffgemische in den ungebundenen Schichten nach den [TL SoB-StB 04/07] findet keine direkte Bewertung der

Frostempfindlichkeit statt, da der Feinkornanteil auf 5 M.-% bei Anlieferung bzw. 7 M.-% im eingebauten Zustand begrenzt ist.

Der Frostwiderstand einzelner Kornklassen wird nach den [TL Gestein-StB 04/07] mittels Prüfung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel [DIN EN 1367-1, 2007] ermittelt. Für Recycling-Baustoffgemische und Hausmüllverbrennungsasche (industrielle Nebenprodukte) wird zusätzlich mit dem vorgenannten Prüfverfahren der Feinkornanteil an einem Korngemisch 0,063/X mm nach den [TL SoB-StB 04/07] begrenzt.

2.3 Frosthebungsversuche und Frostkriterien

Mithilfe von Frosthebungsversuchen lässt sich die Frostempfindlichkeit von Böden und Baustoffen direkt prüfen. In der Vergangenheit wurden Prüfstände entwickelt, bei denen das Prüfmedium von oben befroren wird und die Unterseite ungefroren bleibt. Es wird dabei zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden. In offenen Systemen kann im Gegensatz zu geschlossenen, das Wasser unbegrenzt nachgesaugt werden. Auch unterscheiden sich zum Teil die Randbedingungen, wie Probekörperabmessungen und Temperaturregime, grundlegend. Im Folgenden werden verschiedene Prüfstände, die mit offenem System befroren und ggf. die daraus entwickelten Frostkriterien vorgestellt.

In der Arbeit von [Casagrande, 1931] werden die Kornanteile $< 0,02$ mm als Beurteilungskriterium definiert. Enthält ein gleichförmiger Boden mehr als 3 M.-% dieser Korngröße und ein ungleichförmiger mehr als 10 M.-%, können erhebliche Eislinsen entstehen. Diese Einschätzung basiert auf den Ergebnissen zur Frosthebung und Frosteindringtiefe während des Winters 1928/29 in einem Großversuchsstand und seinen Beobachtungen in-situ. In Abbildung 4 sind der Bodenaufbau und die Hebungsraten dargestellt.

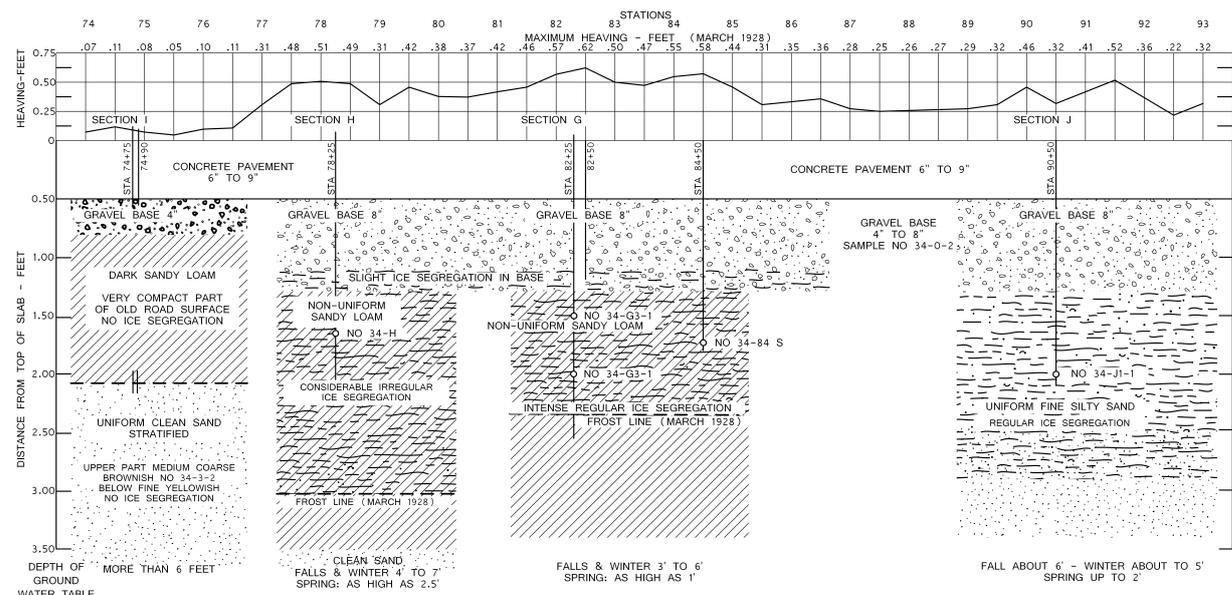


Abbildung 4: Bodenaufbau des Großversuchsstandes nach [Casagrande, 1931] aus [Jessberger, 1976]

1939 entwickelte [Dücker, 1939] einen Zwei-Kammer-Frostschrank, von dem eine Kammer in Abbildung 5 dargestellt ist. Seine Untersuchungen zielten auf die praxisgerechtere Beurteilung von Frostgefährdungen ab.

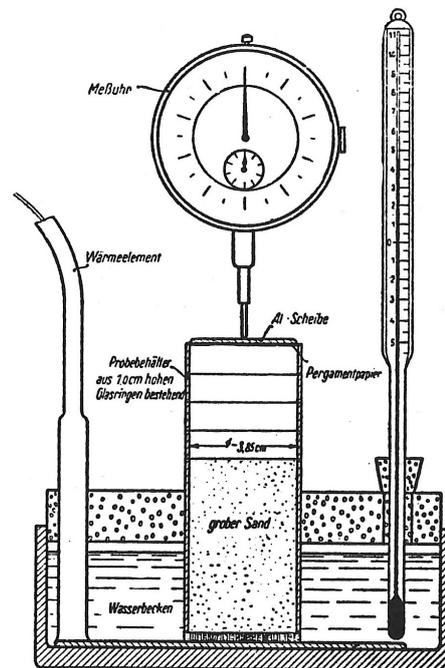


Abbildung 5: Versuchsanordnung von [Dücker, 1939] aus [Jessberger, 1976]

Der Prüfcylinder bestand aus aufgesteckten Glasringen mit je 1 cm Höhe und einem Innendurchmesser von 3,85 cm. Eine Schicht aus grobem Sand verband die Probe mit dem 0 °C-Wasserbad. Die lufttrocken eingefüllten Proben wurden ohne Auflast bei entsprechender Temperatur im Frostschrank von oben beansprucht. Sobald eine Frosthebung sichtbar eintrat, wurde die Probe 4 Stunden bei gleichbleibender Temperatur befroren. Anschließend wurden die Frosttiefe und die Wassergehalte im gefrorenen und ungefrorenen Bereich bestimmt.

Zur Beurteilung definierte [Dücker, 1939] dann auch den Frostgefährlichkeitsgrad F , bei dem die Frosthebung prozentual auf die Frosteindeutung bezogen wird. Die Grenze zwischen frostgefährlich und nicht frostgefährlich legte er auf $F = 3 \%$ fest. Jedoch stellte sich bei seinen späteren Arbeiten heraus, dass F temperaturabhängig und daher eine starre Grenze nicht eindeutig war. Aufgrund seiner Laborversuche sah er den Korndurchmesser 0,05 mm als Grenze zwischen Wasseraufnahme und Wasserabgabe an.

[Brandl, 1970] untersuchte in einer Frostkammer und anhand von in-situ Großversuchen den Einfluss geringer Anteile an bindigem Feinkorn in nicht bindigen Böden und die Gültigkeit des Frostkriteriums nach [Casagrande, 1931]. Abbildung 6 zeigt die Versuchsanordnung.

Der Prüfcylinder bestand aus aufgesteckten Kunststoffringen mit einer Höhe von je 10 cm und einem Innendurchmesser von 30 cm. Die mit Proctorenergie verdichtete Probe wurde mit einer 10 cm hohen Original-Ausbauprobe einer Straße belastet ($0,05 \text{ kp/cm}^2$) und rundherum mit Schaumstoff isoliert. Eine perforierte Bodenplatte verband die Probe mit einem Wasserbad von 4 °C. Die Befrostung erfolgte von oben.

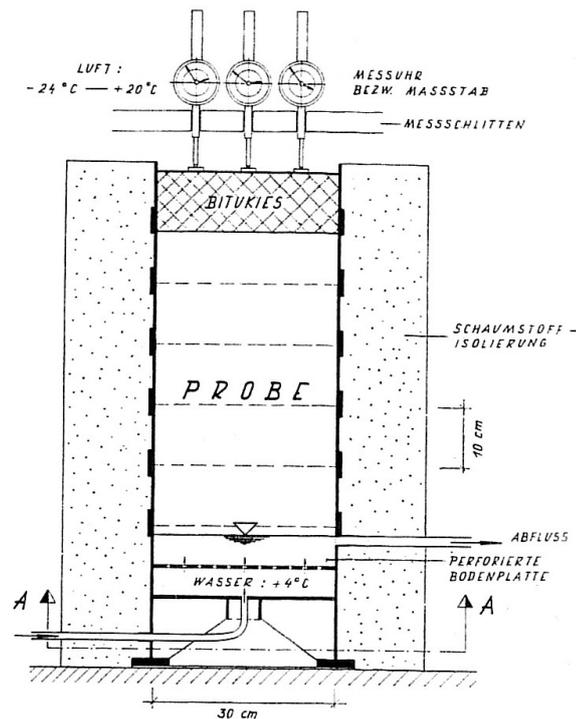


Abbildung 6: Versuchsanordnung nach [Brandl,1970]

Dieser Zyklus wurde zehnmal wiederholt, dann folgte eine Tauperiode bei +20 °C und abschließend eine siebentägige Frostperiode. Während des Versuchs wurden täglich an drei Stellen auf der Oberfläche die Höhenänderungen bestimmt. Nach Versuchsende, Auftauen der Probe und Abheben der Auflast wurde ein CBR-Versuch durchgeführt und der Wassergehalt in verschiedenen Höhenlagen des Probekörpers bestimmt.

Diverse Versuchsreihen in der Frostkammer und mit gleicher Materialzusammensetzung in den Großversuchsfeldern unter natürlichem Witterungseinfluss lassen den Schluss zu, dass Anteile bindigen Feinkorns, hier 8 M.-%, die Frosthebung in einem schädigenden Maße erhöhen. Darüber hinaus wird das Kriterium nach [Casagrande, 1931] bestätigt, jedoch als sehr streng angesehen. Geringfügige Überschreitungen der Anteile < 0,02 mm um 1 bis 2 M.-% führten nicht zwingend zu höheren Frosthebungen. Bei der Beurteilung sollte daher auch die Qualität der Gesteine und die mechanische Kornzertrümmerung bei der Beurteilung mit berücksichtigt werden.

In späteren Arbeiten wurde das Prüfverfahren in der Frostkammer bezüglich Dauer und Zyklen vielfältig variiert. Auch begann [Brandl, 1977] die mineralogische Zusammensetzung der verwendeten Gesteinsarten zu untersuchen und diese in das Frostkriterium mit einfließen zu lassen.

In Österreich werden Frosthebungsversuche nach der [ÖNorm B 4810, 2013] durchgeführt. Diese Norm ersetzte die [RVS 11.06.21, 1999], welche die Prüfung von Baustoffgemischen zur Anwendung in ungebundenen Tragschichten beschreibt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 7 dargestellt.

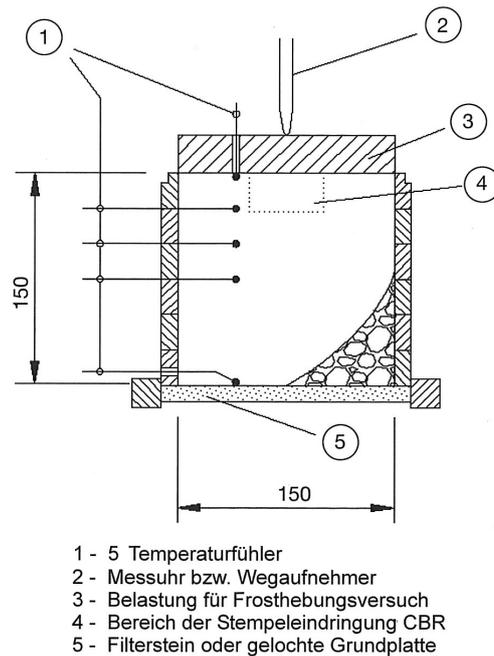
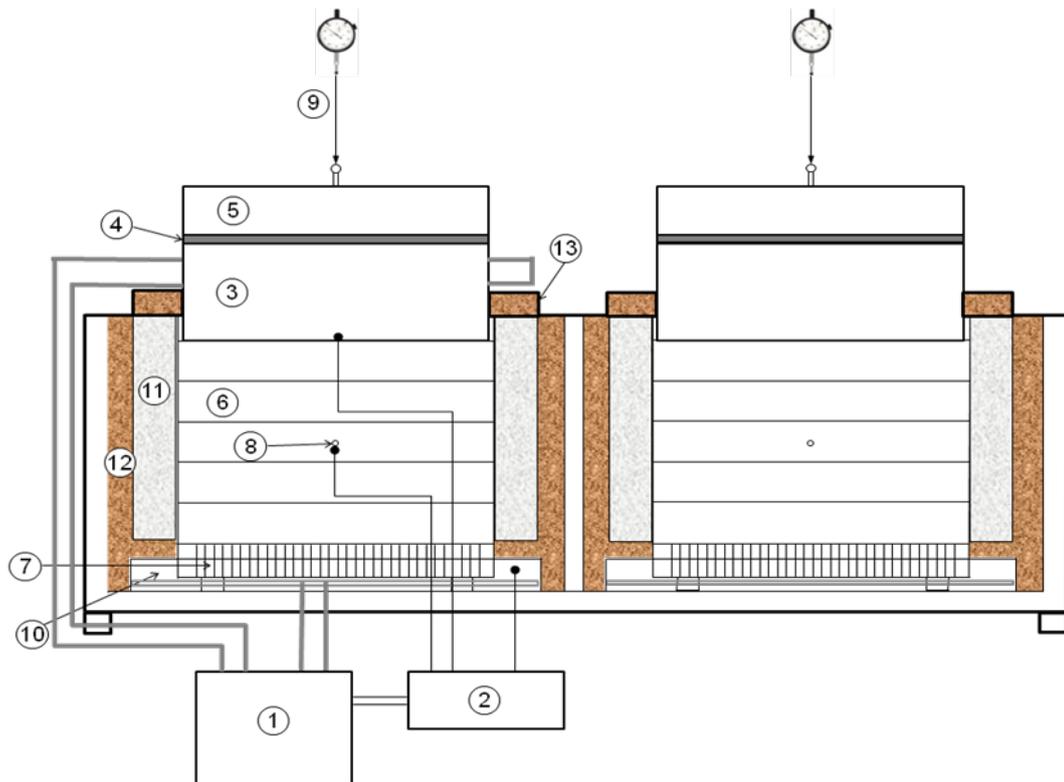


Abbildung 7: Versuchsanordnung nach [RVS 11.062, 1999] bzw. [ÖNorm B 4810, 2013]

Der Prüfcylinder besteht aus Kunststoffringen mit einem Innendurchmesser von 15 cm, die gesamte Probekörperhöhe beträgt ebenfalls 15 cm. Die mit Proctorenergie verdichtete Probe wird mit einer Auflast von $0,5 \text{ N/cm}^2$ belastet und rundherum mit Korkschröt isoliert. Eine gelochte Bodenplatte sorgt für stetigen Zufluss aus dem Wasserbad mit einer Temperatur von $+4 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Befrostung erfolgt auch hier von oben und umfasst einen neuntägigen Zyklus. Im Anschluss an eine 24-stündige Lagerung im Wasserbad bei einer Umgebungstemperatur von $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ erfolgt die Befrostung der Probe derart, dass die $0 \text{ }^\circ\text{-Isotherme}$ in den ersten vier Tagen mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/d in der Probe absinkt. Für die darauf folgenden drei Tage wird die $0 \text{ }^\circ\text{-Isotherme}$ in Probenmitte gehalten. Am letzten Tag wird die Probe bei Raumtemperatur über 24 Stunden aufgetaut. Zur Bewertung der Frostempfindlichkeit im Frosthebungsversuch werden die maximale Hebung, die bleibende Hebung und die Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag herangezogen. Die maximale Hebung darf nicht größer als 15 mm , die bleibende muss weniger als 2 mm und die Hebungsgeschwindigkeit darf nicht mehr als 1 mm/d betragen [RVS 11.06.21, 1999]. Diese Grenzwerte basieren auf Untersuchungen von [Waibel, 1975] und unveröffentlichten Versuchsergebnissen in Anlehnung an [Strasser et al., 2001], die im Normungsausschuss diskutiert worden sind.

[Weingart, Wieland, 2005] entwickelten auf Basis des genormten österreichischen Verfahrens den Frosthebungsversuch weiter und passten die Versuchsrandbedingungen den Klimaverhältnissen in Deutschland an. Die Zweikammer-Prüfapparatur ist in Abbildung 8 dargestellt.



- | | | | |
|---|---|----|---|
| 1 | Kryostat für die Temperaturregelung des Kühlkopfes und für die indirekte Temperierung des Wasserbades auf + 1,5 K | 7 | Gelochte Grundplatte zum Prüfzylinder (6) |
| 2 | Elektronische Regeleinheit mit Datenlogger | 8 | Temperaturfühler in Prüfkörpermitte |
| 3 | Kühlkopf für die Befrostung des Prüfkörpers | 9 | Elektronischer Wegaufnehmer |
| 4 | Isolierplatte zwischen Kühlkopf (3) und Edelstahlplatte (5) | 10 | Wasserbad mit konstanter Temperatur von + 1,5 °C |
| 5 | Edelstahlplatte als Teil der Auflast | 11 | Polystyrolring als Isolationsmaterial |
| 6 | Prüfzylinder aus Teflon (Multiringzelle) | 12 | isolierte Doppelwand der Prüfkammer |
| | | 13 | Abdeckhaube mit passender Öffnung für die Belastungsmasse |

Abbildung 8: Schematische Darstellung des Prüfgerätes für den Frosthebungsversuch [Blume, 2010]

Abweichend vom österreichischen Aufbau ist der Prüfzylinder 12,5 cm hoch mit einem Innendurchmesser von 15 cm. Er besteht aus 5 Teflon-Ringscheiben von je 20 mm Höhe, die untere ist 25 mm hoch. Die Isolierung wird mit einer Isolierplatte aus Styrodur vorgenommen. Die Temperatur des Wasserbades, in dem die Probekörper stehen, beträgt + 1,5 °C. Die Befrostung von Probenoberseite erfolgt, nach 24-stündiger Vortemperierung bei + 1,5 °C, mit einem Temperaturgradienten von 0,38 K/Tag bis die 0 °C-Isotherme die Probenmitte erreicht. Gemessen werden kontinuierlich während des Versuchs die Temperatur des Wasserbades, der Probe und der Probenoberseite sowie die Höhenänderung der Probe.

2010 führte die Bundesanstalt für Straßenwesen Vergleichsuntersuchungen zwischen den Geräten verschiedener Prüfinstitute durch [Blume, 2010]. Für die Untersuchungen wurde allen Teilnehmern Prüfmaterial zur Verfügung gestellt und eine detaillierte Arbeitsanweisung vorgegeben. Im Ergebnis wurde die Eignung des von [Weingart, Wieland, 2005] entwickelten Frosthebungsgerätes festgestellt. In Abhängigkeit vom Baustoff ließ sich mit dem vorgeschlagenen Frostregime zielsicher unterschiedliches Frostverhalten simulieren. Jedoch unterlag die

Einbaudichte im Vergleich zur vorgegebenen Proctordichte starken Schwankungen, was auf die Elastizität des Teflon-Prüfzylinders und die verschiedenen Einbauwassergehalte zurückgeführt wurde. Abschließend wurde, abweichend von der Arbeitsanweisung, der Einbau des Prüfgutes in den Prüfzylinder mit einfacher Proctorenergie und optimalem Wassergehalt empfohlen. Damit soll je egebauter Lage eine gleiche Einbaudichte und eine vergleichbare Lage der Bodenteilchen erreicht werden. Die Bestimmung des Wassergehaltes 24 h nach Versuchsende kann auf eine Gesamtprobe reduziert werden, da sich der Wassergehalt nach Versuchsende über die gesamte Probe angeglichen hat. Darüber hinaus wurde empfohlen, die Schwankungsbreite der Wasserbadtemperatur von $+ 1,5 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$ auf $\pm 0,1 \text{ K}$ herabzusetzen, um den daraus resultierenden Einfluss durch die vertikale Temperaturgradienten auf die maximalen Frosthebungen so gering wie möglich zu halten. Aus der für die Vergleichsuntersuchungen erstellten Arbeitsanweisung und den gewonnenen Erfahrungen wurde der Entwurf einer Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels, Teil: Frosthebungsversuch [TP BF-StB, Teil: FHV, Entwurf 2009] erstellt.

[Engel et al., 2014] untersuchten die Einflüsse des Prüfzylindermaterials auf die Einbaudichte und die der Probekörperherstellung auf die Frosthebung. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Einbaudichten zwischen einem Prüfzylinder aus Stahl und einem aus Teflon. Des Weiteren wurden Probekörper im Teflonzylinder mit einfacher Proctor-Verdichtungsenergie in Anlehnung an [DIN 18127,] und nach den [TP BF-StB, Teil: FHV] hergestellt. Bei letztgenannter Einbaumethode wird der Probekörper nach der Verdichtung gedreht und damit befindet sich die stärker verdichtete Schicht an der Oberseite des Probekörpers. Hinsichtlich ihrer Dichte unterschieden sich die beiden Einbaumethoden kaum. In den, an beiden Probekörpern, anschließend durchgeführten Frosthebungsversuchen konnten bei allen Versuchskennwerten (Maximale Frosthebung, Resthebung, Quellung in der Temperierphase, Eislinnenbildung, Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag) ebenfalls nur geringe Unterschiede ermittelt werden, jedoch war die Standardabweichung der Maximalen Frosthebung vergleichsweise hoch.

Abschließend wurde eine Empfehlung für die Interpretation von Frosthebungskurven gegeben.

3. Vorgehensweise

Basis dieses Forschungsauftrages ist der von [Weingart, Wieland, 2005] weiter entwickelte Frosthebungsversuch. Alle Probekörper für die Frosthebungsversuche wurden einfacher Proctorenergie und einem gemischspezifisch angepassten optimalen Wassergehalt (im Folgenden als Einbauwassergehalt bezeichnet) entsprechend der [TP BF-StB, Teil: FHV, Entwurf 2009] eingebaut.

Die Bearbeitung erfolgt in zwei unabhängigen Teilen. Zunächst werden im ersten Teil die Wasserbadtemperaturen der zwei Prüfkammern analysiert. Im zweiten Teil wird eine Vielzahl von Frosthebungsversuchen zur Ableitung eines Bewertungshintergrundes durchgeführt und ausgewertet. Mit einbezogen in die Auswertung, insbesondere in die zusammenfassende Bewertung (Kapitel 5.5) und die Validierung (Kapitel 6) wurden bereits beim Forschungsnehmer vorhandene Frosthebungsergebnisse sowie weitere Ergebnisse, die von der BAST, der TU München und der HTW Dresden zur Verfügung gestellt wurden.

3.1 Untersuchungsprogramm

Die Betrachtung zur Gleichmäßigkeit der Wasserbadtemperaturen wird mit dem an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) bereits vorliegenden Datenkollektiv vorgenommen.

Das Untersuchungsprogramm zur Ableitung eines Bewertungshintergrundes sah vor, die Einflüsse der Kenngrößen Feinkornanteil im Gesamtgemisch, Quellfähigkeit des Feinkorns und Porosität der Gesteinskörnung einzeln zu variieren. Diese drei Kriterien wurden wie folgt ausgewählt:

- Bereits bestehende Frostkriterien (siehe Kapitel 2) basieren auf einer indirekten Beurteilung der Frostverhaltens von Gesteinskörnungsgemischen über deren Feinanteil $< 0,063$ mm. Die empirischen Grenzwerte gelten für die Anwendung von natürlichen Gesteinskörnungsgemischen. Auf Recycling-Baustoffgemische oder industrielle Nebenprodukte lassen sich diese Erfahrungen, u.a. aufgrund der stofflichen Vielfalt im Gemisch, häufig nicht übertragen. Entgegen guter Praxiserfahrungen könnten diese Materialien dem folgend nicht eingesetzt werden.

Mit dem hier angewendeten Frosthebungsversuch sollen die direkten Einflüsse unterschiedlicher Feinanteile qualitativ und quantitativ auf die Frosthebung eines Baustoffgemisches untersucht werden.

- Der Frosthebungsversuch beginnt mit einer 24stündigen Phase, in der die Temperatur auf $+ 1,5$ °C im Probekörper abgesenkt wird. In dieser Phase können messbare Quellungen im Gesteinskörnungsgemisch auftreten. Beim „Erfahrungsaustausch Frosthebung“ am 26. Oktober 2010 in der BAST wurde diskutiert, ob ggf. Korrelationen zwischen dem Sandäquivalent und den Kennwert des Frosthebungsversuchs „Quellung innerhalb des 1. Versuchstages“ möglich sein könnten. Unter Umständen ließe sich dann auf den 9tägigen Frosthebungsversuch verzichten.
- Ist der zugängliche Porenraum im Gestein nicht ausreichend, um die Volumenzunahme des Wassers bei der Umwandlung von flüssig in einen festen Aggregatzustand aufzunehmen, können Frosthebungen entstehen. Mittels Quecksilberporosimetrie wurde dieser Porenraum anhand

unterschiedlicher Baustoffe quantifiziert und eine mögliche Korrelation zu den Kennwerten des Frosthebungsversuchs aufgestellt.

Anschließend wurde aus den gewonnenen Ergebnissen ein Bewertungskriterium entwickelt (Abbildung 9) und dieses mit vorhandenen Praxisergebnissen validiert. Dazu stehen Frosthebungsergebnisse verschiedener Materialien, die in der Praxis auffällige und unauffällige Hebungen zeigten, sowie die der Erprobungsstrecke mit ziegelreichem Recycling-Baustoffgemisch in Seelow zur Verfügung.

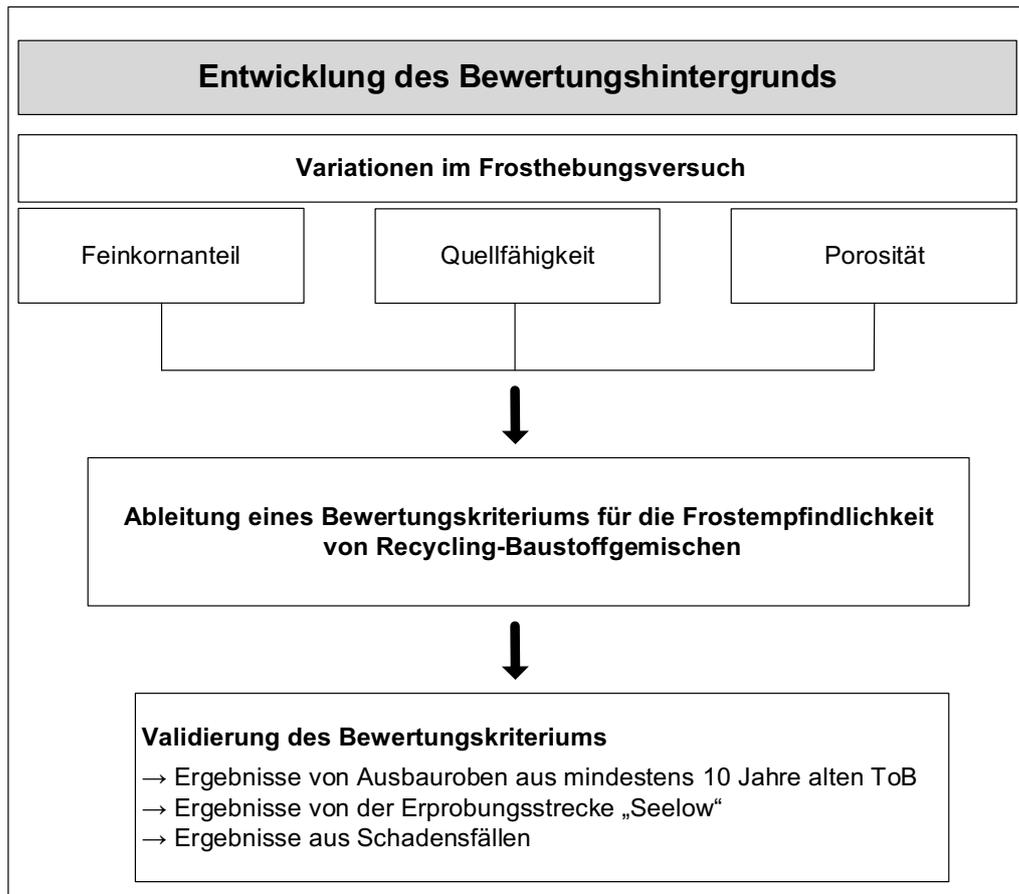


Abbildung 9: Untersuchungsprogramm zur Erstellung eines Bewertungshintergrundes

3.2 Materialauswahl

3.2.1 Natursteine

Insgesamt kamen acht verschiedene Gesteinsarten aus Naturstein zur Anwendung, wobei diese teilweise auch nur als Füller zugegeben wurden. Als Referenz diente ein nicht frostempfindlicher Diabas. Bild 1 zeigt die verwendeten Natursteine. Nicht abgebildet sind die folgenden mit untersuchte Gesteinsarten: Basalt (Eifel), Quarzsandstein, Moräne (Niederrhein).

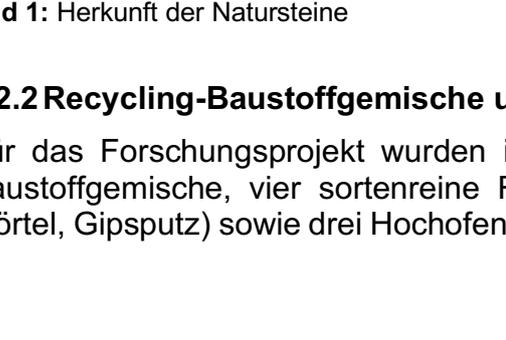
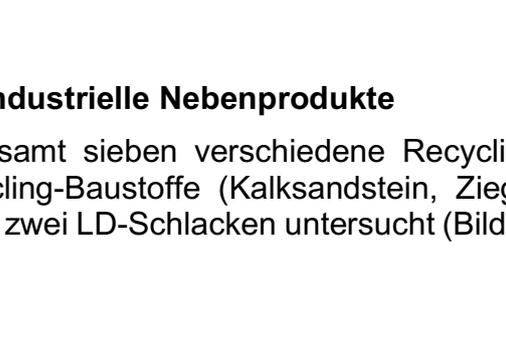
	
<p>Diabas, Steinbruch Bestwig, NRW</p>	<p>Granit, Steinbruch Heppenheim, Hessen</p>
	
<p>Basaltlava A (dicht/porös), Werk Ochtendunk, Rheinland-Pfalz</p>	<p>Kalkstein, Werk Wülfrath, NRW</p>
	
<p>Basaltlava B (dicht), Werk Nickenich, Rheinland-Pfalz</p>	<p>Grauwacke A, Steinbruch Kleinhammer, NRW</p>
<p>Lavaschlacke, Werk Maria Laach, Rheinland-Pfalz</p>	

Bild 1: Herkunft der Natursteine

3.2.2 Recycling-Baustoffgemische und industrielle Nebenprodukte

Für das Forschungsprojekt wurden insgesamt sieben verschiedene Recycling-Baustoffgemische, vier sortenreine Recycling-Baustoffe (Kalksandstein, Ziegel, Mörtel, Gipsputz) sowie drei Hochofen- und zwei LD-Schlacken untersucht (Bild 2).



Bild 2: Herkunft der Recycling-Baustoffgemische und industriellen Nebenprodukte

In die Auswertung miteinbezogen werden Ergebnisse von ziegelreichen Recycling-Baustoffgemischen und von Recycling-Baustoffgemischen verschiedener Recyclinganlagen, die im Rahmen anderer Projekte untersucht wurden. Darüber hinaus wurden auch Frosthebungsergebnisse von folgenden industriellen Nebenprodukten, die im Rahmen anderer Projekte bzw. von anderen Laboren untersucht worden sind, mit berücksichtigt (Elektroofenschlacke, Zinkwälzschlacke, Gießereirestsand, Kesselsand und Haumüllverbrennungsgasche). Mit Ausnahme der Hochofenschlacke stand jedoch nur eine überschaubare Anzahl an Ergebnissen zur Verfügung.

3.3 Allgemeine Voruntersuchungen

An allen Materialien wurde am Ausgangsmaterial die Korngrößenverteilung nach [DIN EN 933-1] und die Rohdichte nach [DIN EN 1097-6] bestimmt.

Die Bestimmung der Proctordichte und des optimalen Wassergehaltes nach [DIN EN 13286-2] wurde an separaten Proben aller Materialien durchgeführt.

In die Prüfringe des Frosthebungsgerätes wurden je nach Zielsetzung der Prüfung entweder gezielt zusammengesetzte Gemische oder das Ausgangsmaterial eingebaut.

3.4 Bestimmung der Quellfähigkeit

Mittels Sandäquivalent kann die Quellfähigkeit der Feinanteile bestimmt werden. Die Prüfung wurde gemäß [DIN EN 933-8] am Gesteinskörnungsgemisch 0/2 mm durchgeführt. In Bild 3 ist die verwendete Prüfapparatur abgebildet.



Bild 3: Prüfapparatur zur Bestimmung des Sandäquivalentes

3.5 Porositätsbestimmung

Die Porengrößenverteilung von Gesteinskörnungen wurde mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie bestimmt. Mit dieser Technik lassen sich Volumen und Größenverteilung von Poren erfassen. Möglich ist eine Erfassung von Porengrößen im Mesoporen- bis zum Kapillarporenbereich (Abbildung 10).

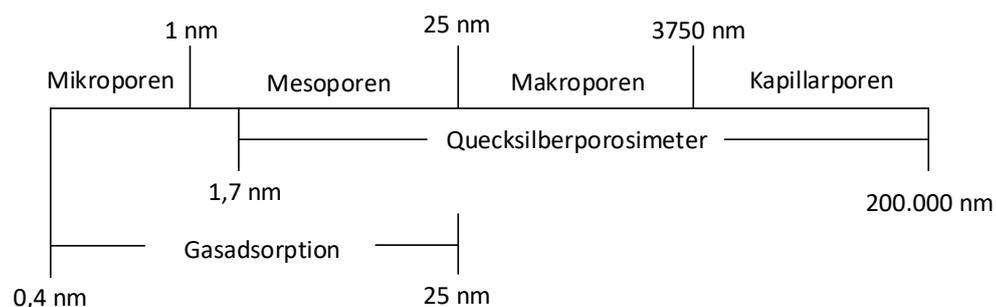


Abbildung 10: Erfassbare Porengrößen mit der Quecksilberporosimetrie
[in Anlehnung an Mittwollen, 2002]

Bei diesem Verfahren dringt Quecksilber unter Druckeinwirkung in die offenen Porenräume des Probenmaterials ein, was aufgrund der nicht-benetzenden Eigenschaft von Quecksilber möglich wird. Porenradius und einwirkender Penetrationsdruck stehen mit der Oberflächenspannung des Quecksilbers und dessen Benetzungswinkel wie folgt in Beziehung:

$$p * r = 2 * \gamma * \cos (\theta)$$

mit:

p = Penetrationsdruck

r = Porenradius

γ = Oberflächenspannung des Quecksilbers

θ = Benetzungswinkel

Die beiden letztgenannten Parameter werden während des Versuchs mit $\gamma = 0,48$ N/m und $\theta = 140^\circ$ als Konstante angenommen.

Der Porenradius verhält sich während des Versuchs antiproportional zum einwirkenden Druck, daher kann, unter der Annahme eines Druckgleichgewichts innerhalb der Probe, die Porenvolumenverteilung bestimmt werden. Je kleiner der Porenradius ist, desto mehr Druck wird für die Intrusion benötigt.

Die Versuchsdurchführung erfolgt mittels Dilatometer. Es stellt die Probenkammer für das zu untersuchende Material dar. Zusätzlich enthält der Versuchsaufbau ein kapillares Glasrohr, das in das Dilatometer eingesetzt wird. Darüber wird eine Metallhülle gestülpt. Abbildung 11 zeigt den schematischen Versuchsaufbau des Dilatometers.



Aus urheberrechtlichen Gründen entfernt

Abbildung 11: Dilatometer zur Versuchsvorbereitung

Zunächst wird die Probenmenge mit ca. 1,5 bis 2 g in das Dilatometer gegeben. Anschließend werden das kapillare Glasrohr und die Metallhülle mit dem Dilatometer zusammengefasst. Bei der Durchführung der Quecksilberporosimetrie werden sowohl ein Niederdruck- als auch ein Hochdruckprüfgerät verwendet, um die unterschiedlichen Druckbereiche für die Intrusion des Quecksilbers zu erreichen. Diese beiden Versuchsgeräte sind in Bild 4 abgebildet.

Zunächst wird das Dilatometer in das Niederdruckgerät eingebaut. Dort wird es durch das Entfernen der Luft evakuiert und Quecksilber in das kapillare Glasrohr eingelassen. Anschließend erfolgt eine Druckeinwirkung bis zu 200 bar. Infolge dessen dringt das Quecksilber in die größeren Porenbereiche der Probe ein. Um

eine vollständige Intrusion des Quecksilbers in die Porenräume der Gesteinskörnung zu erreichen, wird das Dilatometer nach Abschluss der Druckeinwirkung durch das Niederdruckgerät in das Hochdruckgerät eingebaut. Dort erfährt die Probe eine Druckeinwirkung von bis zu 2000 bar. Nach Beendigung des Versuches sind alle für die Quecksilberporosimetrie zugänglichen Poren mit Quecksilber gefüllt.



Bild 4: Niederdruck-Porosimeter (links) / Hochdruck-Porosimeter (rechts) [Rastbichler, 2016]

Während des Versuchs werden kontinuierlich der vorliegende Druck sowie die Veränderung der Quecksilbersäule gemessen, womit sich das eingebrachte Quecksilbervolumen bestimmen lässt. Auf der Grundlage der Messergebnisse beider Versuchsgeräte wird die Porenraumverteilung der Probe berechnet und die Intrusionskurve bestimmt.

Bei den Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass Quecksilber eine kompressive Flüssigkeit ist. Demzufolge wird über die gemessene Veränderung der Quecksilbersäule nicht nur durch die eingedrungene Flüssigkeit in die Probe, sondern auch durch die Kompression des Quecksilbers bestimmt. Um die Messergebnisse entsprechend zu kalibrieren, ist zu Beginn der Untersuchung ein Leerversuch erforderlich, bei dem ausschließlich das Quecksilber der Druckeinwirkung ausgesetzt wird. Dadurch lässt sich eine Kompressionskurve der Flüssigkeit ermitteln, die in der späteren Auswertung von der erfassten Messkurve subtrahiert werden muss.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Im Erdbau werden die verwendeten Böden entsprechend ihrer Granulometrie in drei Frostempfindlichkeitsklassen eingestuft. Dabei gilt die Klasse F1 als frostunempfindlich, F2 als gering bis mittel frostempfindlich und F3 als frostempfindlich. Abbildung 12 und 13 zeigen die Lage der für die Bestimmung der Einflussgrößen (Feinanteil, Quellfähigkeit, Porosität) verwendeten Materialien im Diagramm der Frostempfindlichkeitsklassifikation für Böden.

In Abbildung 12 überlagert sich im Diagramm die Lage der Grobkornvariation Diabas mit der von Lavaschlacke B1. In Abbildung 13 überdeckt sich die Lage der Ergebnisse der LD-Schlacke und einem RC-Baustoffgemisch von der Baustelle.

Alle verwendeten Materialgemische mit einem Anteil $\leq 0,063$ mm von ≤ 5 M.-% erfüllen die Anforderungen der [TL SoB-StB]. Die Anteile $\leq 0,063$ mm in den RC-Baustoffgemischen von der Baustelle betragen bis zu $\leq 7,0$ M.-% und entspricht damit noch den Anforderungen der [ZTV SoB-StB] an Tragschichtmaterialien im eingebauten Zustand.

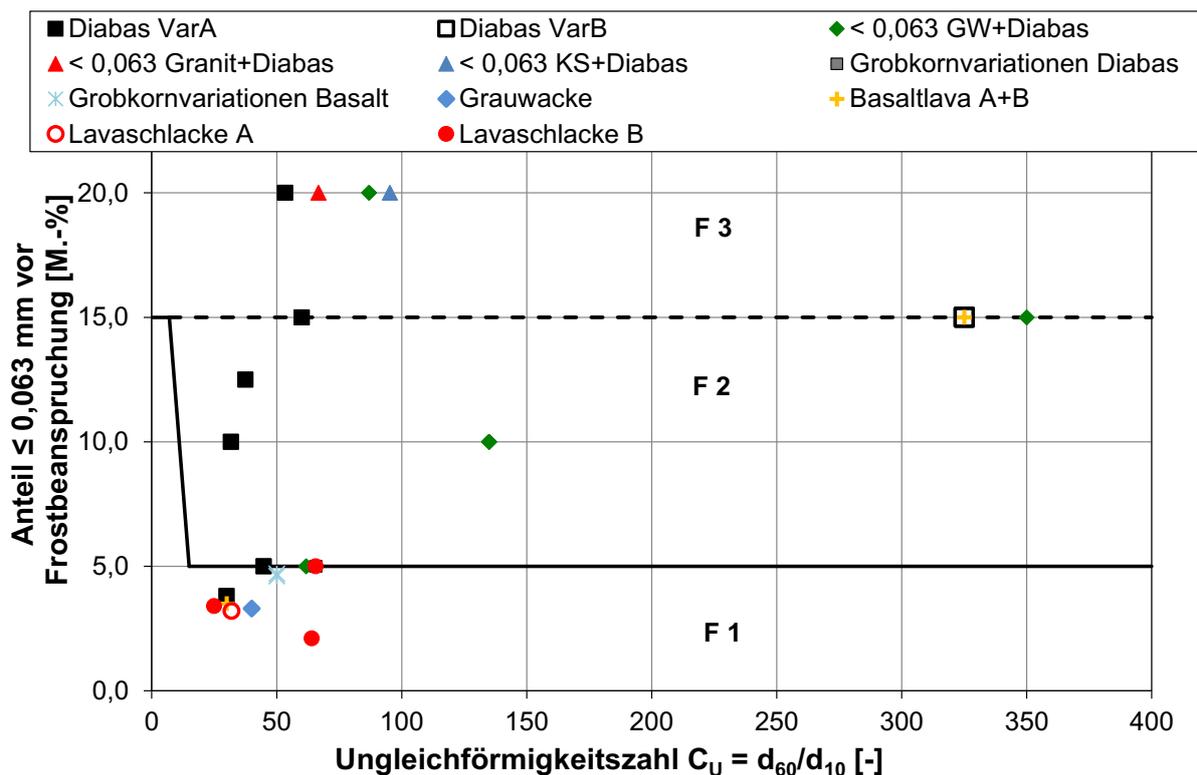


Abbildung 12: Lage der verwendeten natürlichen Materialgemische im Klassifikationsdiagramm für Böden

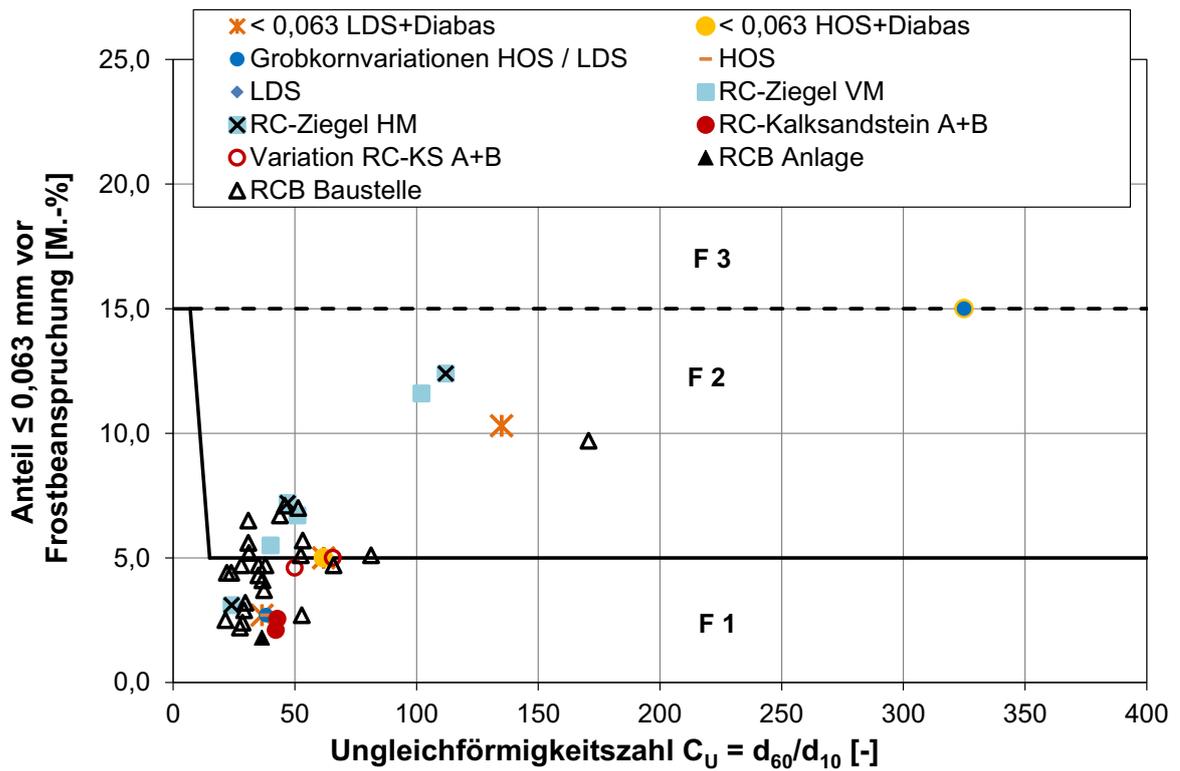


Abbildung 13: Lage der verwendeten Recycling-Materialgemische im Klassifikationsdiagramm für Böden

In den Tabellen 2 bis 4 sind die allgemeinen Kenndaten der verwendeten Materialien in Abhängigkeit der variierten Parameter für die Einflussfaktoren Feinanteil, Quellfähigkeit und Porosität zusammengestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Frosthebungsmaterialien für den Einflussfaktor Feinanteil

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Komanteil < 0,063 mm [M.-%]	Ungleich- förmigkeitszahl C_u [-]	Trockenröhrdichte (DIN EN 1097-6 Anhang A) ρ_p [Mg/m ³]	Korndichte (DIN 18124) ρ_s [g/cm ³]	Luftporen- anteil ² n_a [%]	Proctordichte (DIN 18127)		Einbaudichte ¹		Verdich- tungsgrad ³ D_{Pr} [%]
							ρ_{Pr} [g/cm ³]	W_{Pr} [%]	ρ_E [%]	W_E [%]	
Frostschutzmaterial 0/22 mm	Diabas Variante A	3,8	30,0	2,852	3,011	5,3 4,6	2,260	8,0	2,211 2,228	7,8	97,8 98,6
	Diabas Variante A	5,0	44,8	2,831	3,011	12,7 13,9	-	-	2,113 2,108	6,0 5,5	-
	Diabas Variante A	10,0	31,7	2,826	3,011	11,5 12,3	-	-	2,087 2,054	7,0 7,3	-
	Diabas Variante A	12,5	37,5	2,823	3,011	6,9 8,0	2,180	-	2,220 2,138	6,5 7,6	101,8 98,1
	Diabas Variante A	15,0	60,0	2,820	3,011	8,2	-	-	2,150	7,2	-
	Diabas Variante A	20,0	53,3	2,815	3,011	7,2 5,7	-	-	2,078 2,132	9,1 8,7	-
Schottertragschicht- material 0/22 mm	Diabas Variante B	15,0	325,0	2,834	2,859	8,8 10,4	2,389	5,6	2,235 2,196	5,5	93,6 91,9
	Grauwacke <0,063 + Diabas	5,0	61,8	2,830	2,997	8,1 8,8	2,258	6,0	2,228 2,212	5,9	98,7 98,0
Schottertragschicht- material 0/22 mm	Grauwacke <0,063 + Diabas	10,0	134,9	2,826	2,983	3,2 4,1	2,372	6,5	2,328 2,306	6,2	98,1 97,2
	Grauwacke <0,063 + Diabas	10,0	134,9	2,826	2,956	2,6 1,0	2,372	6,5	2,342 2,379	6,2	98,7 100,3
	Grauwacke <0,063 + Diabas	15,0	350,0	2,821	2,969	4,3 3,6	2,354	6,5	2,297 2,314	6,2	97,6 98,3

¹ Wert je Prüfcylinder im Frosthebungsgerät
²⁻³ Bezogen auf die Einbaudichte

Fortsetzung von Tabelle 2: Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Frosthebungsmaterialien für den Einflussfaktor Feinanteil

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Komanteil < 0,063 mm [M.-%]	Ungleichförmigkeitszahl C_u [-]	Trockenrohddichte (DIN EN 1097-6 Anhang A) ρ_p [Mg/m ³]	Korndichte (DIN 18124) ρ_s [g/cm ³]	Luftporenanteil ² n_a [%]	Proctordichte (DIN 18127)		Einbaudichte ¹		Verdichtungsgrad ³ D_{Pr} [%]
							ρ_{Pr} [g/cm ³]	W_{Pr} [%]	ρ_E [%]	W_E [%]	
Frostschutzmaterial 0/22 mm	Grauwacke <0,063 +Diabas	20,0	87,0	2,649	2,941	0,5 2,6	2,223	6,1	2,253 2,236	6,4 5,8	101,3 100,6
	Granit <0,063 +Diabas	20,0	66,7	2,694	2,962	0,0 3,5	2,185	7,0	2,277 2,177	6,8 7,2	104,2 99,6
	Kalkstein <0,063 +Diabas	20,0	95,2	2,768	2,949	7,2 4,9	2,227	6,1	2,202 2,261	6,0 5,9	98,9 101,5
Schottertragschichtmaterial 0/22 mm	Hochofenschlacke	2,7	38,2	2,720	2,950	10,7 11,3	2,015	6,3	2,064 2,049	6,5	102,4 101,7
	HOS <0,063 +Diabas	5,0	61,8	2,841	3,008	7,0 7,3	2,255	6,0	2,256 2,249	6,0	100,0 99,7
	HOS <0,063 +Diabas	15,0	325,0	2,780	2,934	10,9 10,8	2,210	7,4	2,097 2,100	6,5	94,9 95,0
Schottertragschichtmaterial 0/22 mm	LD-Schlacke	2,7	36,5	3,449	3,468	10,4 10,9	2,695	6,5	2,559 2,546	6,0	95,0 94,5
	LD <0,063 +Diabas	5,0	61,8	2,861	3,031	8,4 9,0	2,249	6,6	2,235 2,222	6,0	99,4 98,8
	LD <0,063 +Diabas	10,3	134,9	2,888	3,051	7,4 8,3	-	-	2,250 2,229	6,5	-

¹ Wert je Prüfcylinder im Frosthebungsgerät

²⁻³ Bezogen auf die Einbaudichte

Tabelle 3: Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Frosthebungsmaterialien für den Einflussfaktor Quellfähigkeit

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Kornanteil < 0,063 mm ¹ [M.-%]	Ungleich- förmigkeits- zahl ¹ C _u [-]	Trockenrohddichte (DIN EN 1097-6 Anhang A) ρ _p [Mg/m ³]	Korndichte (DIN 18124) ρ _s [g/cm ³]	Luftporen- anteil ² n _a [%]		Proctordichte (DIN 18127) ρ _{Pr} [g/cm ³]		Einbaudichte ¹ ρ _E [%]		Verdich- tungsgrad ³ D _{Pr} [%]
						ρ _{Pr} [g/cm ³]	W _{Pr} [%]	ρ _E [%]	W _E [%]			
Gesteinsmehl- varianten	Grauwacke 20% +Diabas	20,0	87,0	2,649	2,941	0,5 2,6	6,1	2,253 2,236	6,4 5,8	101,3 100,6		
	Granit 20% +Diabas	20,0	66,7	2,694	2,962	- 3,5	7,0	2,277 2,177	6,8 7,2	104,2 99,6		
	Kalkstein 20% +Diabas	20,0	95,2	2,768	2,949	7,2 4,9	6,1	2,202 2,261	6,0 5,9	98,9 101,5		
Sandvariationen	Diabas Variante A 20%	20,0	53,3	2,815	3,011	7,2 5,7	-	2,078 2,132	9,1 8,7	-		
	Quarzsandstein +Diabas	2,5	26,7	2,783	2,921	0,6 -	7,7	2,293 2,307	7,4	100,6 101,2		
	Moräne +Diabas	3,9	46,7	2,796	2,903	14,6 13,0	4,8	2,093 2,134	5,0	93,9 95,7		
	RC-Kalksand- stein A +	2,9	50,0	2,711	2,842	3,9 4,9	9,6	2,071 2,048	9,5	99,2 98,1		
	RC-Kalksand- stein A	2,6	42,9	2,429	2,577	8,2 8,2	19,0	1,540 1,516	18,4 19,3	100,7 99,1		
	RC-Kalksand- stein B	2,1	42,3	2,422	2,628	8,8 9,3	20,5	1,511 1,503	19,0	102,1 101,6		
	Diabas Variante A	3,8	30,0	2,852	3,011	5,3 4,6	8,0	2,211 2,228	7,8	97,8 98,6		

¹ Wert je Prüfcylinder im Frosthebungsgerät

²⁻³ Bezogen auf die Einbaudichte

Fortsetzung von Tabelle 3: Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Frosthebungsmaterialien für den Einflussfaktor Quellfähigkeit

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Kornanteil < 0,063 mm ¹ [M.-%]	Ungleich- förmigkeits- zahl ¹ C _u [-]	Trockenrohddichte (DIN EN 1097-6 Anhang A) ρ _p [Mg/m ³]	Korndichte (DIN 18124) ρ _s [g/cm ³]	Luftporen- anteil ² n _a [%]	Proctordichte (DIN 18127)		Einbaudichte ¹		Verdich- tungsgrad ³ D _{Pr} [%]
							ρ _{Pr} [g/cm ³]	W _{Pr} [%]	ρ _E [%]	W _E [%]	
dichte Natursteine	Basaltlava A	15,0	325,0	2,974	3,012	4,6 4,0	2,365 7,2	2,348 7,0	2,362 7,0	99,3 99,9	
	Basaltlava B1	15,0	325,0	3,066	3,104	2,0 2,4	2,552 6,2	2,537 6,0	2,527 6,0	99,4 99,0	
	Basaltlava B2	3,5	30,0	2,861	3,012	-	1,983 6,7	-	-	-	
poröse Natursteine	Diabas Variante A 5%	5,0	44,8	2,831	2,881	12,6 13,9	-	2,113 6,0	2,108 5,5	-	
	Lavaschlacke A	3,2	32,0	2,552	3,093	21,6 24,4	1,640 8,5	1,619 9,2	1,559 9,3	98,7 95,1	
	Lavaschlacke B1	5,0	65,6	2,493	3,093	15,4 15,7	1,687 15,1	1,539 14,8	1,537 14,7	91,2 91,1	
	Lavaschlacke B2	2,1	64,0	2,632	3,118	12,0 11,6	1,676 13,0	1,755 12,1	1,719 13,4	104,7 102,6	
	Lavaschlacke B3	3,4	25,0	2,645	3,047	21,0 20,6	1,654 12,4	1,595 11,7	1,603	96,4 96,9	
Schlacken	Hochofen- schlacke A	2,7	38,2	2,720	2,950	10,7 11,3	2,015 6,3	2,064 6,5	2,049	102,4 101,7	
	Hochofen- schlacke B	15,0	325,0	2,764	3,010	19,8 19,8	1,965 6,0	1,901 6,0	1,900	96,7 96,7	
RC-Baustoff- gemische (Anlage)	LD-Schlacke	2,7	36,5	3,449	3,468	10,4 10,9	2,695 6,5	2,559 6,0	2,546	95,0 94,5	
	RCB A	1,8	36,5	2,453	2,506	6,6 6,7	1,775 11,1	1,785 11,5	1,784	100,6 100,5	

¹ Wert je Prüfzylinder im Frosthebungsgerät
²⁻³ Bezogen auf die Einbaudichte

Fortsetzung von Tabelle 3: Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Frosthebungsmaterialien für den Einflussfaktor Quellfähigkeit

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Komanteil < 0,063 mm ¹ [M.-%]	Ungleichförmigkeitszahl ¹ C _u [-]	Trockenrohddichte (DIN EN 1097-6 Anhang A) P _p [Mg/m ³]	Korndichte (DIN 18124) P _s [g/cm ³]	Luftporenanteil ² n _a [%]	Proctordichte (DIN 18127)		Einbaudichte ¹		Verdichtungsgrad ³ D _{Pr} [%]
							ρ _{Pr} [g/cm ³]	W _{Pr} [%]	P _E [%]	W _E [%]	
RC-Baustoffmische (Baustelle)	RCB B	5,1 7,1	81,3 45,8	2,670	2,744	10,2 12,8	1,964	10,6	2,018 1,948	7,2	102,7 99,2
	RCB C	2,9 3,2	29,2 29,7	2,618	2,722	10,4 10,6	1,922	11,6	1,823 1,810	10,7 11,4	94,8 94,2
	RCB D	6,7 4,3	43,9 35,0	2,449	2,671	6,2 7,1	1,836	10,7	1,846 1,824	10,0	100,5 99,3
	RCB E	4,7 5,1	65,9 52,4	2,580	2,681	14,6 13,2	2,043	8,2	1,894 1,939	6,3 5,8	92,7 94,9
	RCB F	4,4 3,7	22,0 37,4	2,568	2,717	12,4 13,0	1,763	13,4	1,679 1,678	13,0	95,2 95,2
	RCB G	2,2 2,7	27,4 52,8	2,519	2,619	7,6 9,3	1,803	9,5	1,835 1,775	11,0	101,8 98,4
	RCB H	4,4 5,2	23,8 31,2	2,552	2,554	9,7 7,0	1,755	10,5	1,811 1,772	10,7 13,2	103,2 101,0
	RCB I	4,7 5,7	35,1 53,3	2,527	2,670	9,8 10,3	2,027	8,0	1,814 1,823	9,8 9,9	89,5 89,9
	RCB J	7,0	51,3	2,606	2,688	6,6 7,4	2,020	7,5	1,950 1,890	9,5 10,6	96,5 93,6
	RCB K	2,5 2,4	21,5 28,5	2,466	2,668	11,7 14,8	1,952	7,8	1,839 1,814	7,5 6,3	94,2 92,9
	RCB L	4,7 4,1	37,9 36,7	2,492	2,641	8,7 6,9	1,959	10,5	1,925 1,904	8,0	98,3 97,2
	RCB M	6,5 9,7	30,9 170,7	2,542	2,654	6,7 9,3	1,928	9,3	1,911 1,892	9,0	99,1 98,1
	RCB N	4,7 5,6	28,0 30,9	2,531	2,597	3,4 4,2	1,751	14,5	1,937 1,911	10,2 10,7	110,6 109,1

¹ Wert je Prüzfylinder im Frosthebungsgerät

²⁺³ Bezogen auf die Einbaudichte

Tabelle 4: Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Frosthebungsmaterialien für den Einflussfaktor Porosität

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Kornanteil < 0,063 mm [M.-%]	Ungleich- förmigkeitszahl C_u [-]	Trockenrohdichte (DIN EN 1097-6 Anhang A) ρ_p [Mg/m ³]	Korndichte (DIN 18124) ρ_s [g/cm ³]	Luftporen- anteil ² n_a [%]	Proctordichte (DIN 18127)		Einbaudichte ¹		Verdich- tungsgrad ³ D_{Pr} [%]
							ρ_{Pr} [g/cm ³]	W_{Pr} [%]	ρ_E [%]	W_E [%]	
Grobkornvariationen Diabas	Diabas + GW	5,0	65,6	2,749	2,862	2,4 1,9	2,200	8,5	2,214 2,224	7,7	100,6 101,1
	Diabas + Basalt/LavaB	5,0	65,6	2,952	3,057	-	-	-	-	-	-
	Diabas + LDS	5,0	65,6	3,205	3,293	3,1 0,2	2,451	6,5	2,543 2,612	7,0	103,7 106,6
	Diabas + Lavaschlacke B1	5,0	65,6	2,614	3,051	19,7 18,7	1,842	10,5	1,696 1,702	9,1 9,5	92,1 92,4
	Diabas + HOS	5,0	65,6	2,781	2,980	9,9 10,4	2,150	8,7	2,131 2,085	6,3 7,0	99,1 97,0
	Diabas +RC-KS B	5,0	65,6	2,617	2,806	6,7 3,7	1,790	14,5	1,785 1,853	14,0 13,7	99,7 103,5
Grobkornvariationen Basalt	Basalt + GW	4,8	50,0	2,878	2,932	7,9 7,5	2,330	6,5	2,243 2,246	6,4	96,3 96,4
	Basalt + Lavaschlacke A	4,6	50,0	2,779	3,065	23,8 26,1	1,833	7,5	1,760 1,706	7,3	96,0 93,1
	Basalt + RC- Kalksandstein A	4,6	50,0	2,716	2,819	9,2 9,6	1,850	12,0	1,836 1,802	12,6 13,3	99,2 97,4
	HOS + Diabas	15,0	325,0	2,780	2,934	10,9 10,8	2,210	7,4	2,097 2,100	6,5	94,9 95,0
Grobkornvariationen Hochfenschlacke	HOS	2,7	38,2	2,720	2,950	10,7 11,3	2,015	6,3	2,064 2,049	6,5	102,4 101,7
	Diabas + HOS	5,0	65,6	2,781	2,980	9,9 10,4	2,150	8,7	2,131 2,085	6,3 7,0	99,1 97,0

¹Wert je Prüßylinder im Frosthebungsgerät

²⁺³ Bezogen auf die Einbaudichte

Fortsetzung von Tabelle 4: Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Frosthebungsmaterialien für den Einflussfaktor Porosität

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Kornanteil < 0,063 mm [M,-%]	Ungleich- förmigkeitszahl C_u [-]	Trockenrohddichte (DIN EN 1097-6 Anhang A) ρ_p [Mg/m ³]	Korndichte (DIN 18124) ρ_s [g/cm ³]	Luftporen- anteil ²		Proctordichte (DIN 18127)		Einbaudichte ¹		Verdich- tungsgrad ³ D_{Pr} [%]
						n_a [%]	ρ_{Pr} [g/cm ³]	W_{Pr} [%]	ρ_E [%]	W_E [%]		
LD-Schlacke	LDS	2,7	36,5	3,449	3,468	10,4 10,9	2,695	6,5	2,559 2,546	6,0	95,0 94,5	
RC-Kalksandstein	RC-Kalksand- stein A	2,6	42,9	2,429	2,577	8,2 8,2	1,530	19,0	1,540 1,516	18,4 19,3	100,7 99,1	
	RC-Kalksand- stein B	2,1	42,3	2,422	2,628	8,8 9,2	1,465	20,5	1,511 1,503	19,0	103,1 102,6	
RC-Ziegel	Vormauerziegel A	6,7	51,0	2,478	2,709	15,6 15,5	1,818	9,7	1,809 1,811	9,7	99,5 99,6	
	Vormauerziegel B	5,5	40,0	2,517	2,681	10,3 10,5	1,819	10,3	1,884 1,879	10,3	103,6 103,3	
	Vormauerziegel C	11,6	102,0	2,333	2,698	21,7 21,8	1,609	11,8	1,602 1,599	11,8	99,6 99,4	
	Hintermauer- ziegel A	12,4	112,0	2,474	2,747	12,7 12,8	1,421	25,2	1,415 1,414	25,2	99,6 99,5	
	Hintermauer- ziegel B	7,2	47,0	2,587	2,734	13,0 13,0	1,425	24,8	1,415 1,415	24,8	99,3 99,3	
	Hintermauer- ziegel C	3,1	24,0	2,441	2,703	23,7 23,7	1,357	20,2	1,333 1,333	20,2	98,2 98,2	

¹Wert je Prüfcylinder im Frosthebungsgerät

²⁻³ Bezogen auf die Einbaudichte

Fortsetzung von Tabelle 4: Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Frosthebungsmaterialien für den Einflussfaktor Porosität

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Kornanteil < 0,063 mm [M,-%]	Ungleich- förmigkeitszahl C_u [-]	Trockenrohddichte (DIN EN 1097-6 Anhang A) ρ_p [Mg/m ³]	Korndichte (DIN 18124) ρ_s [g/cm ³]	Luftporen- anteil ² n_a [%]		Proctordichte (DIN 18127) ρ_{Pr} [g/cm ³]		Einbaudichte ¹ ρ_E [%]		Verdich- tungsgrad ³ D_{Pr} [%]
						W_{Pr} [%]	W_E [%]					
natürliche Gesteine	Lavaschlacke A	3,2	32,0	2,552	3,093	21,6 24,4	1,640 8,5	1,619 1,559	9,3	98,7 95,1		
	Lavaschlacke B1	5,0	65,6	2,493	3,093	15,4 15,7	1,687 15,1	1,539 1,537	14,8	91,2 91,1		
	Lavaschlacke B2	2,1	64,0	2,632	3,118	12,0 11,6	1,676 13,0	1,755 1,719	12,1 13,4	104,7 102,6		
	Lavaschlacke B3	3,4	25,0	2,645	3,047	21,0 20,6	1,654 12,4	1,595 1,603	11,7	96,4 96,9		
	Basaltlava B	3,5	30,0	2,861	3,012	-	1,983 6,7	-	-	-		
	Basalt	4,7	50,0	2,996	3,048	8,5 9,5	2,361 6,0	2,334 2,302	5,9	98,9 97,5		
	Grauwacke	3,3	40,0	2,733	2,788	8,1 10,6	2,218 5,5	2,178 2,114	5,7	98,2 95,3		

¹Wert je Prüfcylinder im Frosthebungsgerät

²⁻³ Bezogen auf die Einbaudichte

4.2 Ergebnisse der Bestimmung des Sandäquivalentes

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Sandäquivalente zusammengefasst. Es wurden sowohl natürliche als auch RC-Baustoffgemische und industrielle Nebenprodukte (jeweils an der Kornklasse 0/2 mm) untersucht, die auch für die Analyse der Materialparameter mit einbezogen wurden. Grundsätzlich wurde je Materialart ein Versuch als Doppelbestimmung durchgeführt, dessen Mittelwert in Tabelle 5 angegeben ist.

Die SE(10)-Werte der Materialien liegen zwischen 22 und 89. Nach [Krzemien, 1995] gelten die Materialien als frostsicher, die einen SE (10)-Wert von ≥ 50 aufweisen. Dieser Beurteilung war jedoch in Österreich eine Kategorisierung anhand der Anteile $< 0,063$ mm vorgeschaltet. Nur von den Materialgemischen, deren Anteil $< 0,063$ mm über 5 M.-% und unter 10 M.-% lagen, wurden der Sandäquivalent bestimmt und bewertet.

Tabelle 5: Sandäquivalente der Ausgangsmaterialien

Materialart	Sandäquivalent SE(10) [-]
Diabas	70
Quarzsandstein	28
Moräne	66
Lavaschlacke A	89
Basaltlava A	88
Hochofenschlacke A	91
Hochofenschlacke B	83
RC-Kalksandstein A	74
LD-Schlacke	88
RC-Kalksandstein B	73
RC-Baustoffgemisch A	74
RC-Baustoffgemisch B	34
RC-Baustoffgemisch C	30
RC-Baustoffgemisch D	63
RC-Baustoffgemisch E	50
RC-Baustoffgemisch G	52
RC-Baustoffgemisch I	53
RC-Baustoffgemisch J	38
RC-Baustoffgemisch K	76
RC-Baustoffgemisch L	55
RC-Baustoffgemisch M	22

4.3 Porositätsberechnung

Aus der ermittelten Trockenrohddichte ρ_P und der Dichte des Füllers ρ_f berechnet sich in Anlehnung an [DIN EN 1936, 2006] die Gesamtporosität des Gesteins wie folgt:

$$P = \left(1 - \frac{\rho_P}{\rho_f}\right) * 100 \quad [\text{Vol. -\%}]$$

mit: P = Gesamtporosität
 ρ_P = Trockenrohddichte [g/cm³]
 ρ_f = Dichte des Füllers [g/cm³]

In Tabelle 6 sind die Berechnungsgrundlagen und die Gesamtporosität zusammengestellt. Die Trockenrohddichten wurden an der Kornklasse 8/16 mm ermittelt. Für die Bestimmung der Dichte am Füller wurde jede Gesteinssorte auf die Korngröße < 0,063 mm zerkleinert.

Tabelle 6: Zusammenstellung der berechneten Gesamtporositäten

Material	Trockenrohddichte [g/cm ³]	Dichte des Füllers [g/cm ³]	Gesamtporosität [Vol.-%]
Diabas	2,831	2,881	1,7
Basalt	2,996	3,048	1,7
Basaltlava A	2,861	3,012	5,0
Basaltlava B	2,952	3,057	3,4
Lavaschlacke	2,493 - 2,632	3,093 - 3,118	19,4 - 13,2
Vormauerziegel	2,333 - 2,478	2,681 - 2,747	13,5 - 6,1
Hintermauerziegel	2,441 - 2,587	2,703 - 2,774	9,7 - 6,7
Hochofenschlacke	2,720	2,950 - 3,011	9,5 - 7,8
LD-Schlacke	3,449	3,468	0,6

4.4 Quecksilberporosimetrie

Die Quecksilberporosimetrie wurde durch eine Doppel-, bei sehr inhomogenen Materialien auch durch eine Vierfach-Bestimmung ermittelt. Für alle Untersuchungen wurden aufgemahlene Gesteinskörner der Kornklasse 1/2 mm verwendet. Die mit Quecksilber erfassten Porenräume lagen in einem Bereich von ca. 10 nm bis 100.000 nm. Die Spannweite variierte je nach Gesteinsart, so dass zum Teil sogar Messergebnisse von 7 bis 150.000 nm Porenraum erreicht wurden.

Im Allgemeinen wird aus den Messwerten standardmäßig eine Größenverteilung des Porenraums, ein kumuliertes Porenvolumen und eine durchschnittliche Porosität über ein festgesetztes Porenvolumen ausgewertet. Da es sich bei den hier verwendeten Gesteinsarten zum Teil um heterogenes und sehr porenreiches Material handelte, ergab sich bei dieser automatisierten Auswertung kein sinnvoller Ansatz. Für die Analyse wurde daher eine aus den Messwerten durchschnittlich errechnete Porosität aus Quecksilber-Intrusion und der Differenzen-Quotient der

Porenvolumina betrachtet. Dies ermöglichte einen differenzierteren Einblick in die Porenraumverteilung in Abhängigkeit einer ausgewählten Makrogröße. Eine Zusammenstellung der Porosität der verwendeten Materialien zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Zusammenstellung der durchschnittlichen Porositäten aus der Quecksilberporosimetrie

Gesteinsart	Durchschnittliche Porosität aus Hg-Intrusion [%]
Diabas	5,5
Grauwacke	2,7
Basalt	0,9
Basaltlava A, poröser Anteil	12,6
Basaltlava A, dichter Anteil	5,5
Basaltlava B	7,4
Lavaschlacke	18,8
RC-Kalksandstein A	27,1
RC-Kalksandstein B	21,6
RC-Ziegel	20,9 - 36,3
Hochofenschlacke	14,1 - 23,7
LD-Schlacke	13,9

Beispielhaft zeigen die Abbildungen 14 bis 17 die Porenraumverteilungen des dichten und porösen Anteils von Basaltlava A sowie Lavaschlacke. Aufgetragen ist jeweils der Differenzen-Quotient des Porenvolumens zum Logarithmus des Mittelwertes der Porenradien. Die Ergebnisse aller Einzelmessungen sind in Anhang D aufgeführt.

Kapillar wirksam werden Mikroporenräume ab einer Größe von rd. 100 nm, Kapillar brechend wirken Makroporen ab etwa 100.000 nm. Daher wurden die Bereiche des Porenraumvolumens unter und über 100 nm getrennt ausgewertet. Die durchschnittlichen volumetrischen und prozentualen Anteile der offenen Porenräume von 10 bis 100 nm, die von 100 bis 100.000 nm sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Bei den poröseren Materialarten, wie Lavaschlacke oder LD-Schlacke, zeigt sich bei den Porenraumverteilungen im Bereich ab 3500 nm eine deutliche Anhäufung von Porenvolumen. Diese Anteile wurden daher separat ausgewertet.

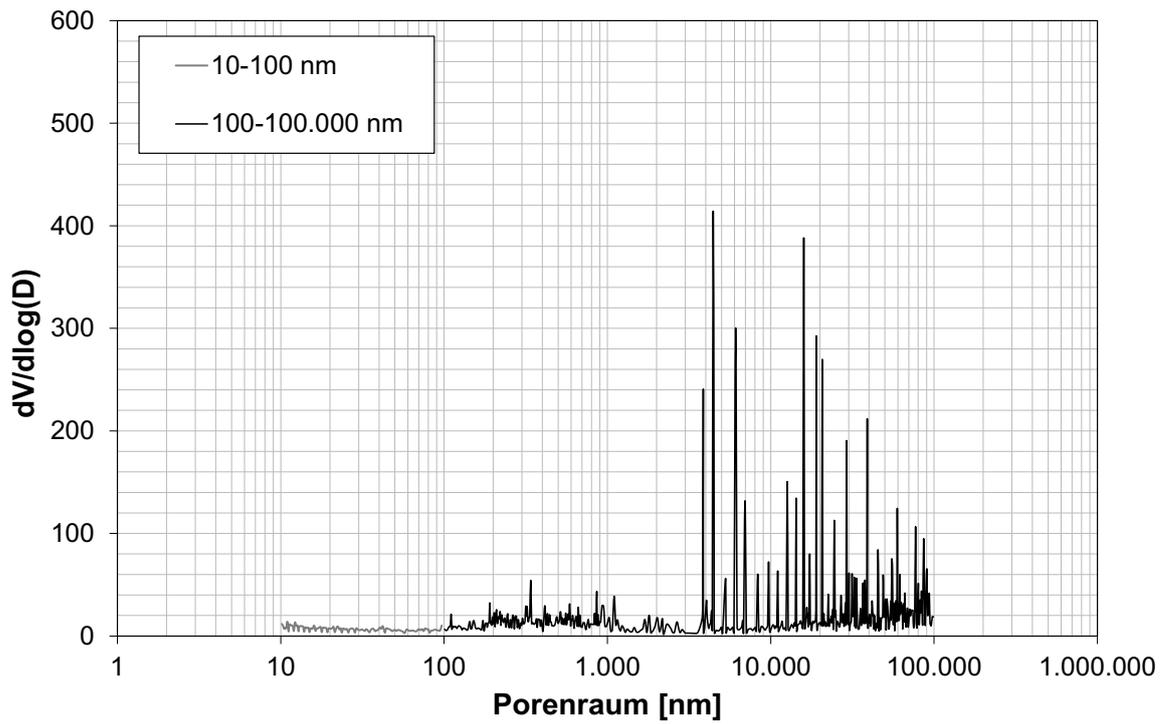


Abbildung 14: Porenraumverteilung von Basaltlava A (poröser Anteil, Probe 3)

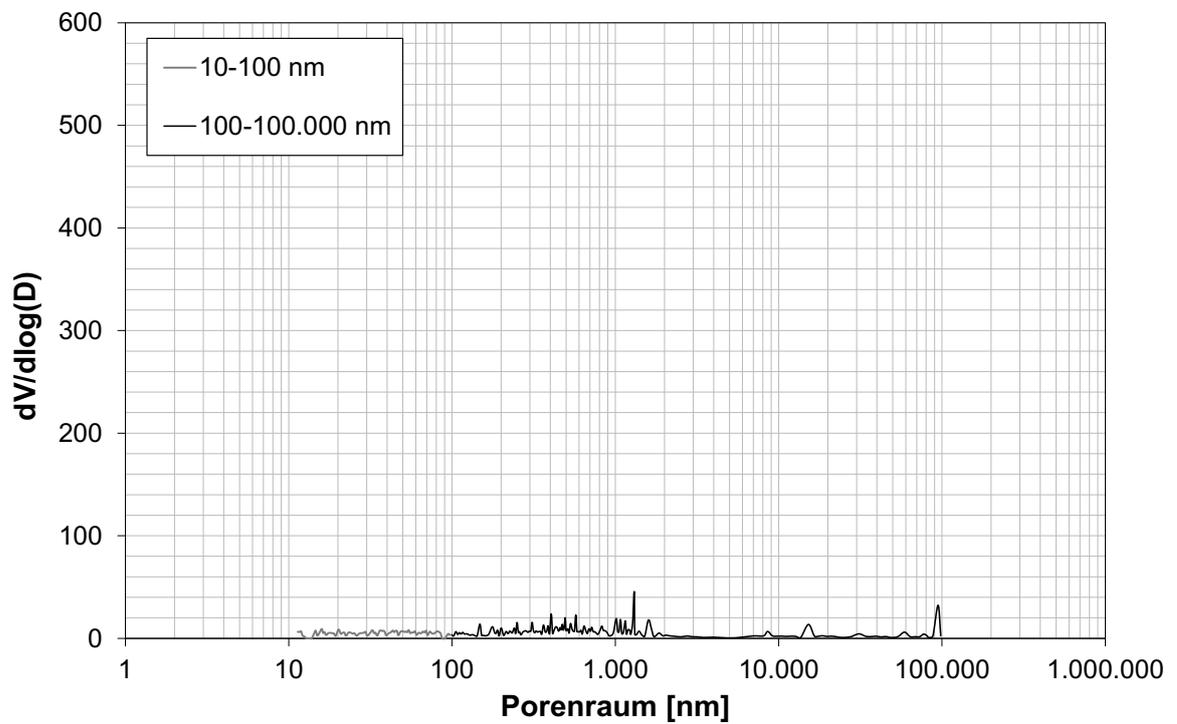


Abbildung 15: Porenraumverteilung von Basaltlava A (dichter Anteile, Probe1)

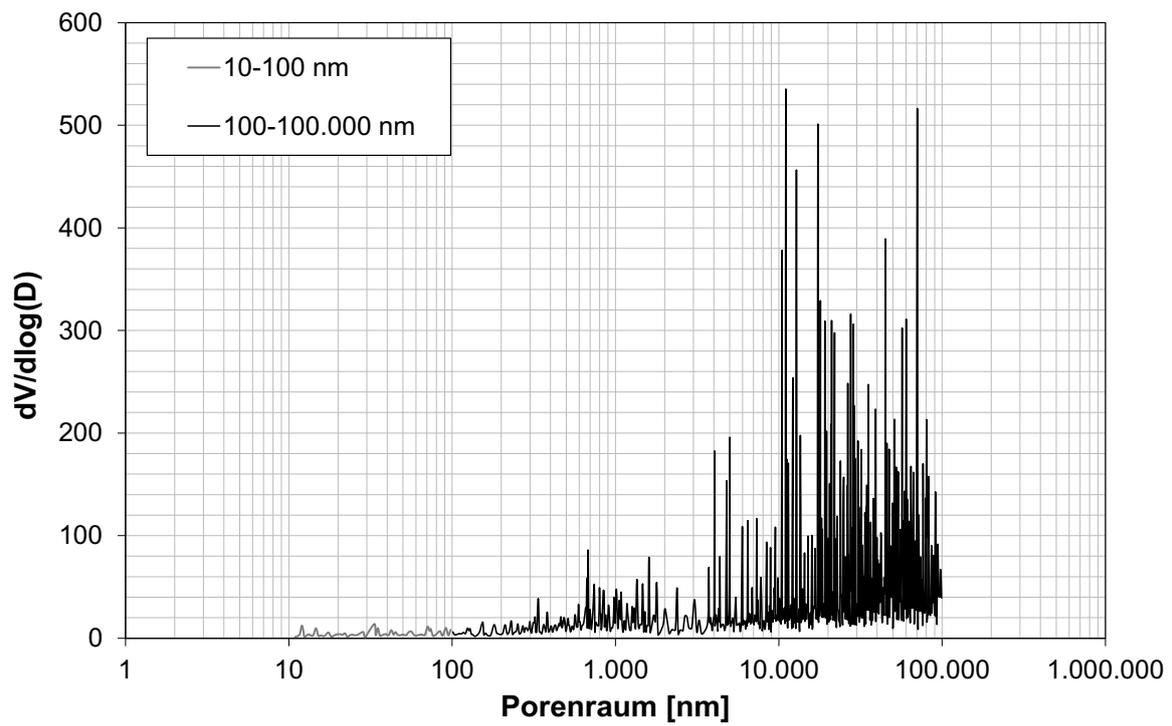


Abbildung 16: Porenraumverteilung von Lavaschlacke (Probe 2)

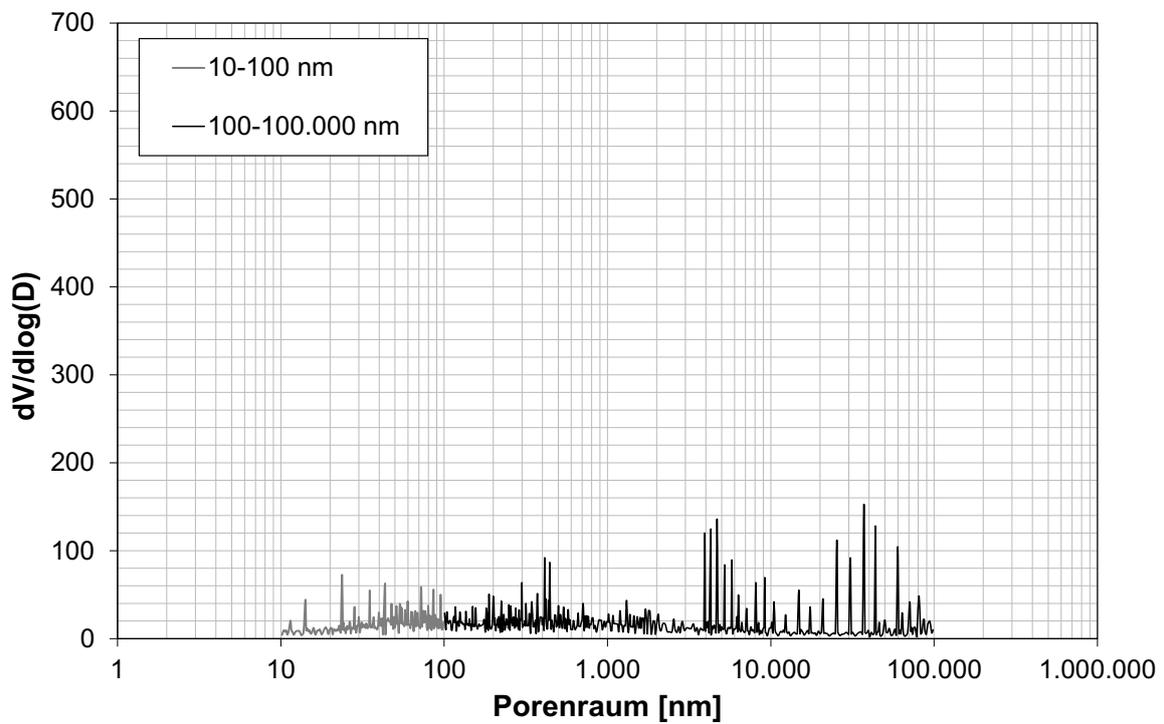


Abbildung 17: Porenraumverteilung von Hochofenschlacke (Probe 1)

Tabelle 8: Durchschnittliche Anteile der Porenräume 10 nm bis 100 nm, 100 nm bis 100.000 nm und 3.500 nm bis 100.000 nm auf Grundlage der Quecksilberporosimetrie

Gesteinsart	10 - 100 nm		100 - 100.000 nm		3.500 - 100.000 nm	
	[mm ³ /g]	[%]	[mm ³ /g]	[%]	[mm ³ /g]	[%]
Diabas	543,8	29,2	1330,1	70,9	719,6	38,4
Basaltlava A, poröser Anteil	841,3	8,9	10048,1	91,0	3240,6 - 12052,9	45,7 - 89,5
Basaltlava A, dichter Anteil	385,9	22,7	1386,2	77,4	125,3 - 1065,1	8,5 - 51,6
Basaltlava B	295,2	2,7 - 9,6	2836,6	90,4	2244,5	71,2
Lavaschlacke	137,3	0,4 - 1,4	37578,1	99,6	36447,9	95,4
RC-Kalksandstein B	38978,2	49,6	32880,0	50,4	29498,6	37,6
RC-Ziegel	5612,7	3,7 - 10,6	59622,9	92,3	25674,3	43,7
Hochofenschlacke	5742,6	28,2	15137,6	71,8	3431,6 - 11233,8	29,2
LD-Schlacke	329,8	1,7	19050,4	98,3	18285,1	94,4

4.5 Vergleich der Porositätsberechnung mit der ermittelten Porosität aus der Quecksilberporosimetrie

In Abbildung 18 sind die Porositäten, die über die Dichten der Materialien berechnet wurden, den gemessenen Porositäten, die über das intrudierte Quecksilber bestimmt wurden, gegenübergestellt.

Über die Dichten der verschiedenen Materialien wurden Porositäten zwischen 1,7 Vol.-% und 19,4 Vol.-% berechnet. Ungleich höher waren die mit dem Quecksilberporosimeter ermittelten Porositäten, die zwischen 2 Vol.-% und 36 Vol.-% lagen. Lediglich bei den sehr porösen Lavaschlacken und eingeschränkt auch bei den sehr dichten Natursteinen konnte mit beiden Verfahren ähnliche Porositäten ermittelt werden. Die berechnete Porosität wird mit dem Verhältnis aus Roh- und Korndichte bestimmt. Bei diesen Gesteinsarten ist vermutlich der Porenraum vergleichsweise zugänglich (Lavaschlacke) bzw. nicht zugänglich (dichte Gesteine), so dass sowohl bei der Korndichtebestimmung als auch bei der Eindringung des Quecksilbers ähnlich viel Porenraum erfasst werden konnte.

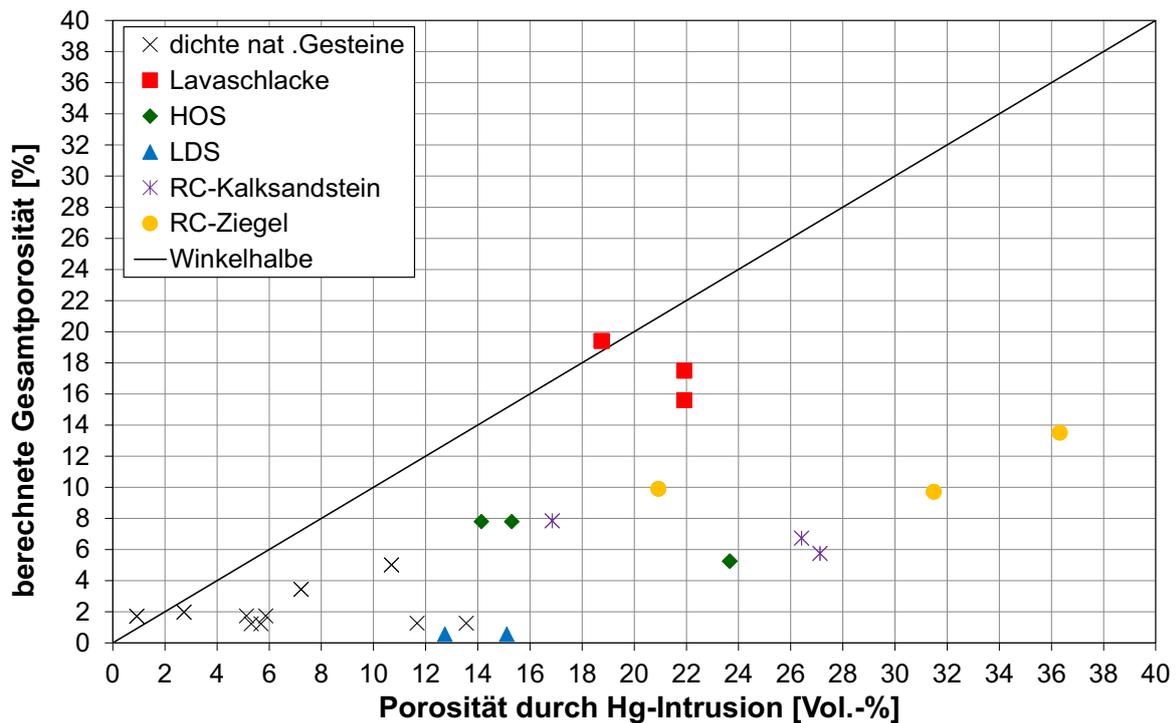


Abbildung 18: Korrelation zwischen der aus den Dichten berechneten Gesamtporosität und der durch Hg-Intrusion ermittelten Porosität

Bei allen anderen Gesteinsarten sind die über die Dichte berechneten Porositäten überwiegend geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Bestimmung der Rohdichte ein geringerer Teil des gesamten Porenvolumens der Probe erfasst werden kann. Die Bestimmung der Dichte wird mit entmineralisiertem Wasser unter Vakuum an einer aufgemahlene Probe durchgeführt. Der Mahlprozess dient dem Aufschluss möglichst kleiner Porenradien, in die das Wasser mit Hilfe des Vakuums eindringen kann. Über die eingedrungene Wassermenge wird das Porenvolumen berechnet. Wasser ist jedoch im Gegensatz zu Quecksilber eine Flüssigkeit, bei der die Adhäsionskräfte höher sind als die Kohäsionskräfte. Das Wasser kann demnach nur so weit in den Porenraum eindringen, bis seine Adhäsionskräfte im Gleichgewicht stehen, unabhängig vom darüber hinaus noch zugänglichen Porenraum.

Quecksilber hingegen dringt nur unter Druck in den Kapillarporenraum ein, da seine Kohäsionskräfte sehr hoch sind. Über die Menge des in die Probe eingedrungenen Quecksilbers und den dafür notwendigen aufgebrauchten Druck werden die Porenraumverteilung und die Porosität berechnet. Der zugängliche Porenraum ist demnach deutlich höher als bei der Dichtebestimmung.

Insgesamt sind die Ergebnisse der Porositäten aus Hg-Intrusion jedoch nicht mit geringeren Streuungen behaftet als die Berechnungen aus den Dichten.

5. Analyse der Einflussfaktoren

5.1 Einfluss der Wasserbadtemperaturen

5.1.1 Hintergrund

Das Prüfgerät zur Bestimmung der Frosthebung besteht aus zwei Prüfkammern. Diese beiden Prüfkammern enthalten jeweils getrennte Wasserbäder, deren Temperatur auf $+1,5\text{ °C}$ über einen Kryostaten mit einem Temperaturfühler gehalten wird. In Abbildung 19 ist der Aufbau des Prüfgerätes schematisch dargestellt.

[Weingart, Wieland, 2005] legten die Wasserbadtemperatur auf $+1,5\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$ fest. Mit der damit zulässigen Temperaturspanne von $+2\text{ °C}$ bis $+1\text{ °C}$ im Wasserbad und einer Befrostungstemperatur -3 °C bilden sich im Probekörper Temperaturgradienten von $0,36\text{ K/cm} \pm 0,04\text{ K/cm}$ aus. In Versuchsfeldern und aus Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes wurden von [Weingart, Wieland, 2005] Temperaturgradienten zwischen $0,24\text{ K/cm}$ und $0,62\text{ K/cm}$ ermittelt, so dass der Gradient von $0,36\text{ K/cm}$ den Gegebenheiten in situ angepasst ist.

Der Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau, Teil: Frosthebungsversuch [Entwurf TP BF-StB, Teil: FHV, 2009 aus [Blume, 2010]] fordert eine Genauigkeit der Wasserbadtemperaturen von $1,5\text{ °C} \pm 0,1\text{ K}$. Hintergründe sind die technischen Möglichkeiten sowie die Annahme, dass mit geringerer Temperaturschwankung im Wasserbad die Vergleichbarkeit beider Frostkammern erhöht würde.

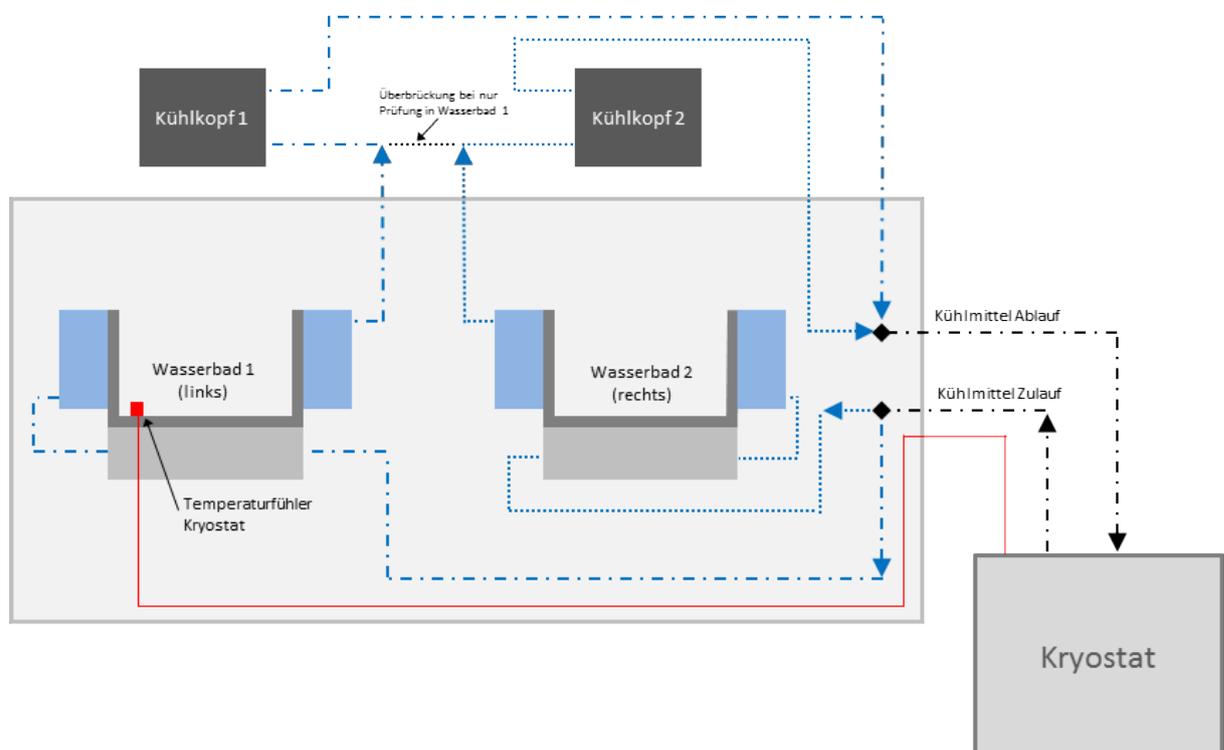


Abbildung 19: Schematischer Aufbau des Prüfgerätes [Jansen, 2012]

Von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wurde die Gleichmäßigkeit der Wasserbadtemperaturen in den zwei Prüfkammern exemplarisch ausgewertet [Jansen, 2012]. Insgesamt zeigte sich bei 14 Versuchen eine Spannweite zwischen den beiden Wasserbadtemperaturen während des Versuchs von 0,1 K bis 0,2 K, womit die Forderung der Genauigkeit erfüllt ist. Allerdings war die Spannweite der Temperatur im linken Wasserbad geringer als im rechten. Die absoluten Wasserbadtemperaturen lagen im linken Bad jedoch höher und lediglich im rechten war die Zieltemperatur von +1,5 °C eingehalten. [Jansen, 2012] vermutet, dass eine Ursache die Leitungslänge vom Kryostaten zum Wasserbad sein könnte und/oder die Steuerung der Wasserbadtemperatur durch einen einzelnen Temperaturfühler.

5.1.2 Datenanalyse

Das Prüfgerät an der RUB ist entsprechend dem der BASt aufgebaut. Der Kryostat der RUB ist jedoch nahezu mittig montiert, so dass der Leitungsweg zum rechten Wasserbad geringfügig länger ist als der zum linken. Den schematischen Aufbau ist der Abbildung 197 im Anhang E zu entnehmen.

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die über die Versuchsdauer berechneten Spannweiten der Wasserbadtemperaturen im linken und rechten Wasserbad des RUB-Prüfgerätes. Es wurden 34 natürliche und 43 Recycling-Baustoffe zusammengestellt, die sich durch ihre Sieblinien und stofflichen Zusammensetzungen unterscheiden.

Bei den dargestellten Baustoffgemischen wird, mit Ausnahme von sechs Einzelproben bei den natürlichen und einer bei den Recycling-Baustoffen, die geforderte Genauigkeit von 0,2 K erfüllt. Die Analyse der Wasserbadtemperatur-Verlaufskurven im Auswerteformular dieser sechs Proben zeigt lediglich bei zwei Proben im rechten Wasserbad (Nr. 10 und Nr. 14) in Abbildung 20 eine sichtbare Abweichung von der Genauigkeitstoleranz +0,2 K, die innerhalb eines Zeitraumes von 30 Minuten (Nr. 10) bzw. 1,5 Stunden (Nr. 14) wieder ausgeglichen war. Die Verlaufskurven aller anderen Proben sind unauffällig, auch die von Nr. 30 in Abbildung 20 (Kies/Sand-Gemisch) und Nr. 23 in Abbildung 21 (reiner Gips).

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die maximale Frosthebung und den Beginn der Eislinsenbildung dieser vorangehend spezifizierten sechs Proben. Trotz der tendenziell stärkeren Schwankungen in der Spannweite der Wasserbadtemperatur des linken Wasserbades lässt sich daraus kein Einfluss auf die Maximale Frosthebung oder den Beginn der Eislinsenbildung ableiten. Es zeigen sich keine ausgeprägt niedrigeren Maximalen Frosthebungen bzw. ein deutlich späteren Beginn der Eislinsenbildung bei den Proben, die im linken Wasserbad stehen. Dem zufolge kann anhand dieser Daten kein Einfluss der Leitungslänge vom Kryostaten zum Wasserbad festgestellt werden.

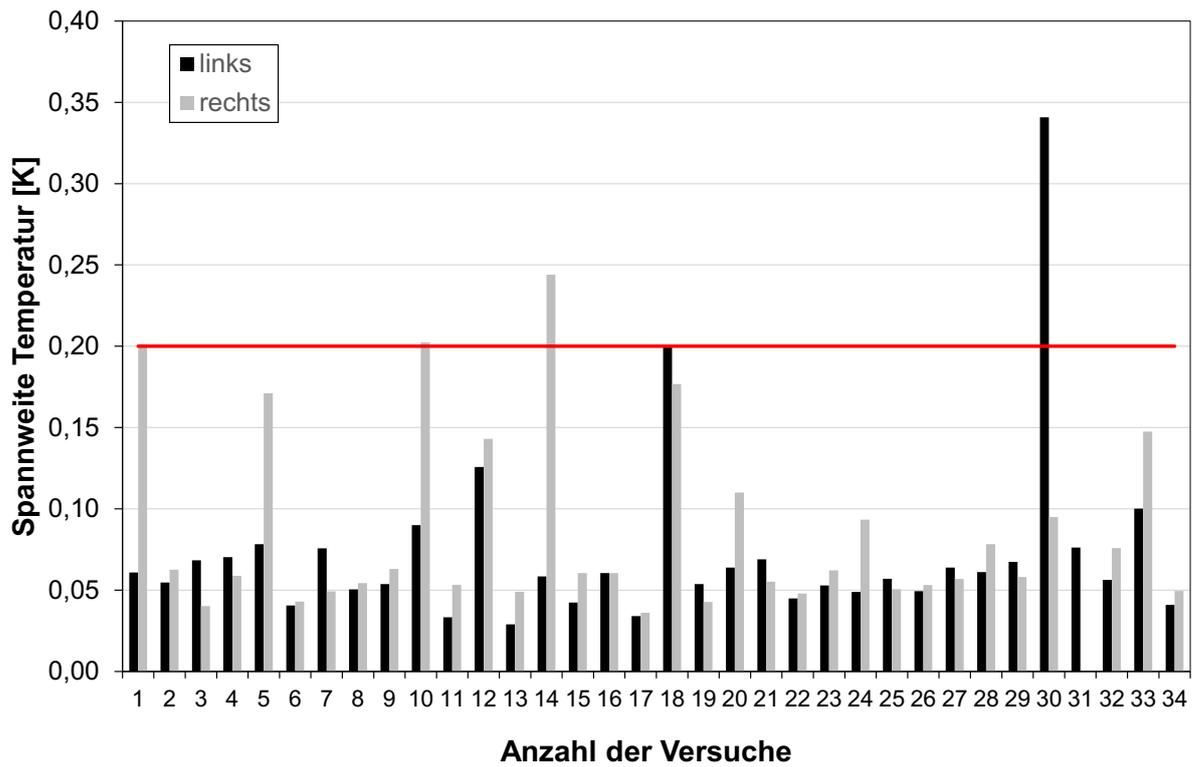


Abbildung 20: Spannweiten der Wasserbadtemperaturen im linken und rechten Wasserbad der RUB von natürlichen Baustoffgemischen

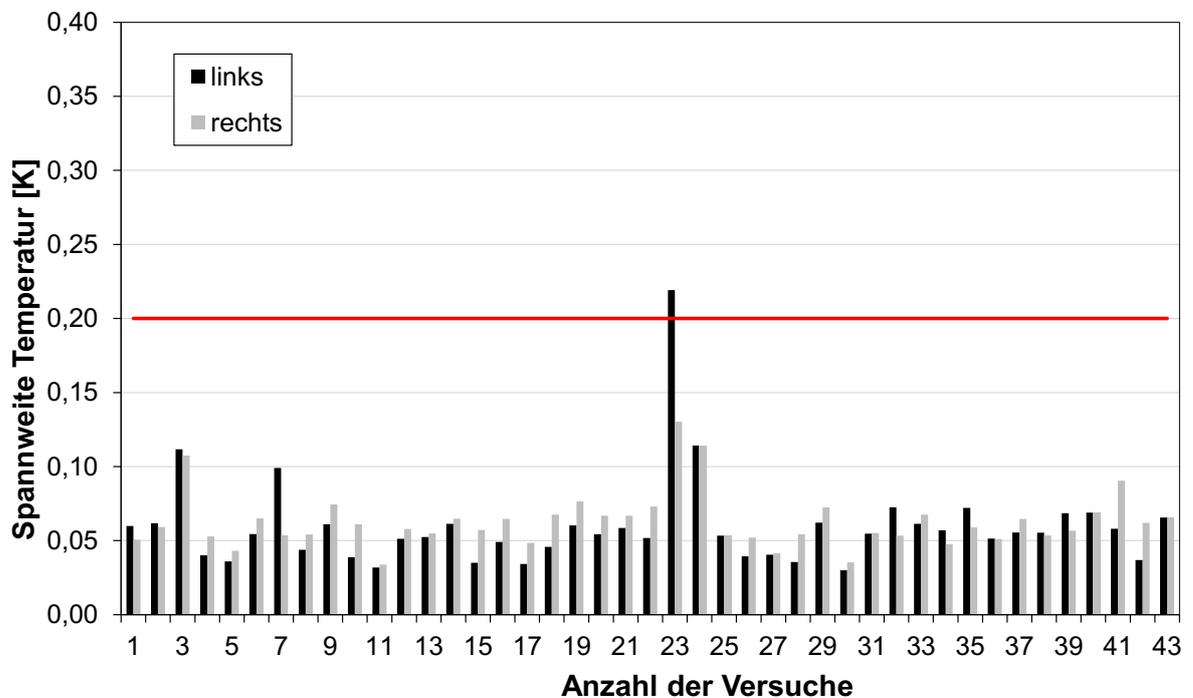


Abbildung 21: Spannweiten der Wasserbadtemperaturen im linken und rechten Wasserbad der RUB von Recycling-Baustoffgemischen

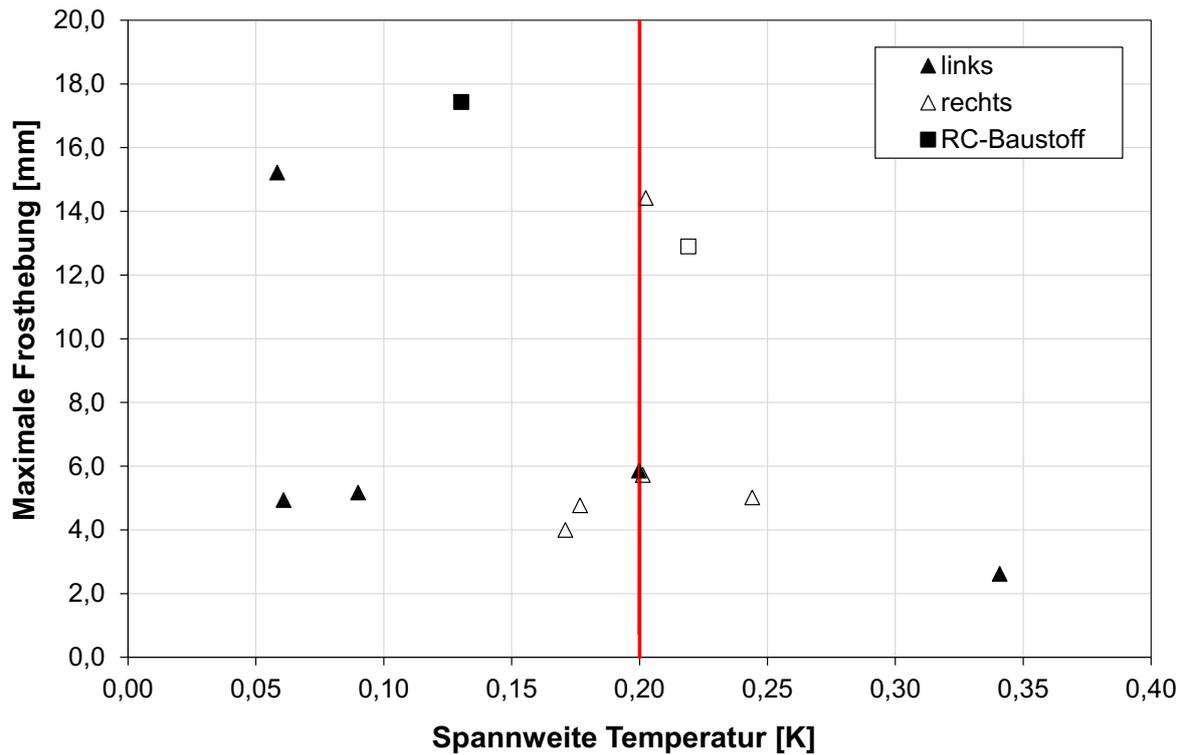


Abbildung 22: Maximale Frosthebung in Abhängigkeit von der Spannweite der Wasserbadtemperatur der Proben

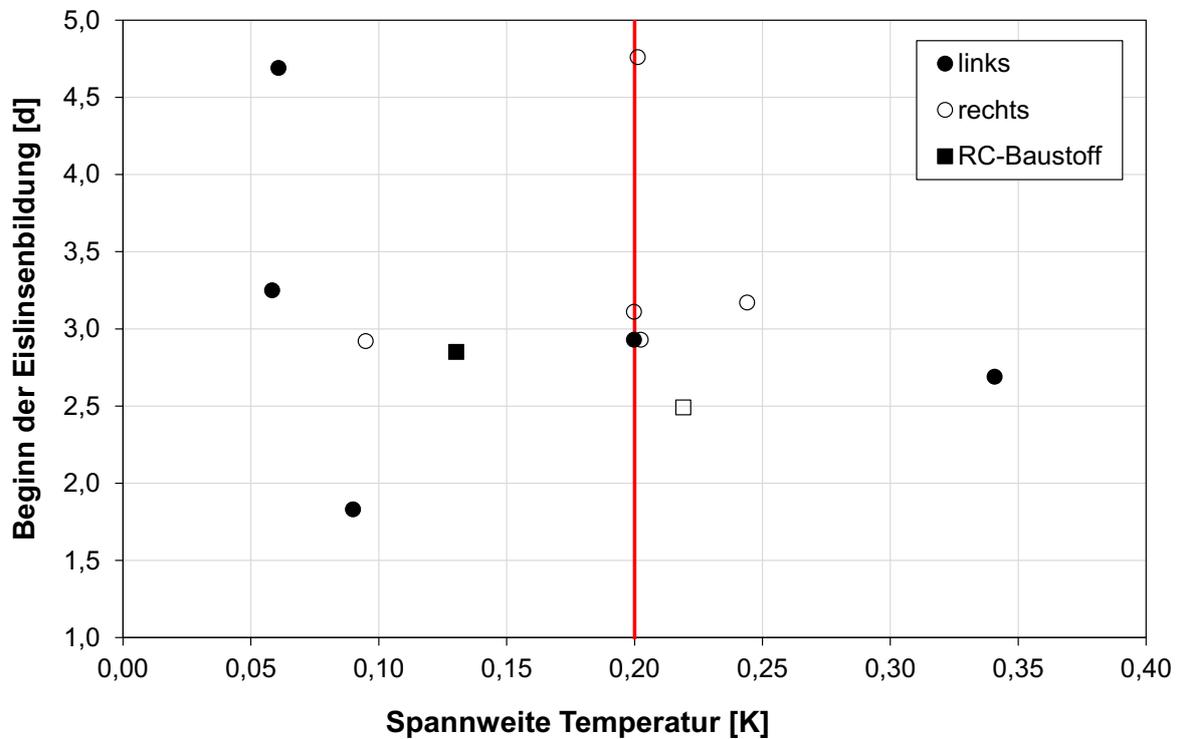


Abbildung 23: Beginn der Eisinsensbildung in Abhängigkeit von der Spannweite der Wasserbadtemperatur

Wie bei dem Gerät der BAST unterscheiden sich auch beim Gerät der RUB die Spannweiten der Wasserbadtemperaturen im linken und rechten Bad. Die

Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen die absoluten Temperaturwerte und deren Schwankungen während des Versuchs im linken, die Abbildung 26 und Abbildung 27 im rechten Wasserbad.



Abbildung 24: Temperaturspannweiten in der linken Kühlkammer (natürliche Baustoffgemische)

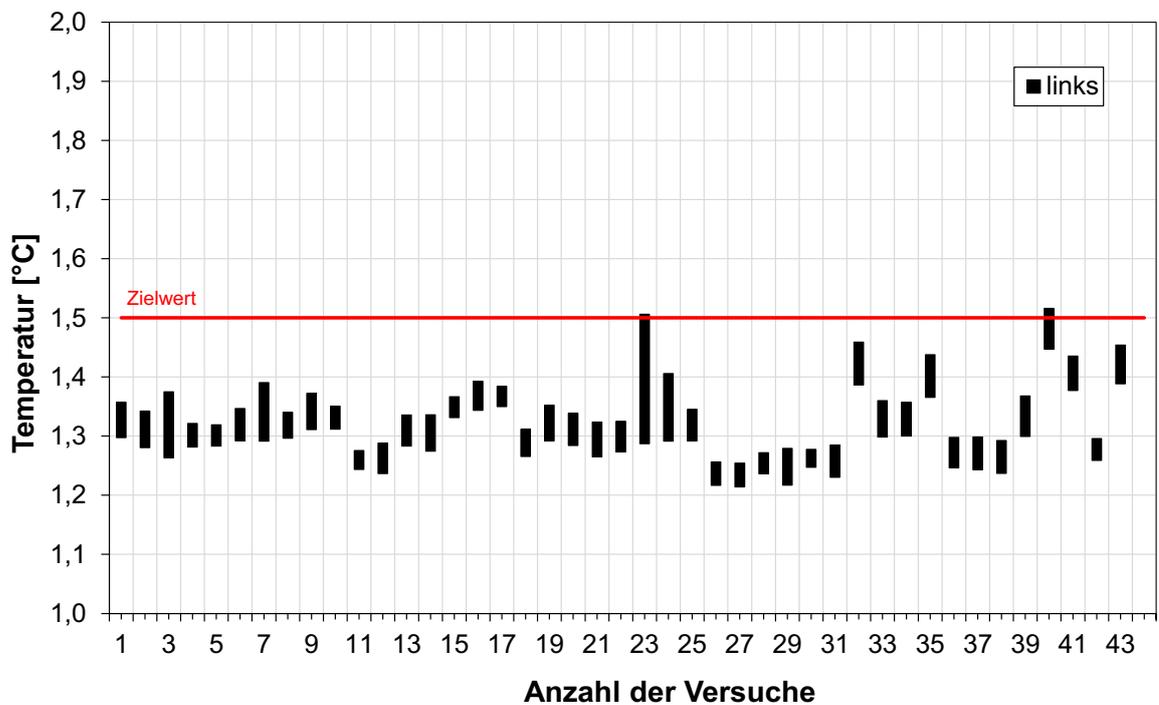


Abbildung 25: Temperaturspannweiten in der linken Kühlkammer (Recycling-Baustoffgemische)

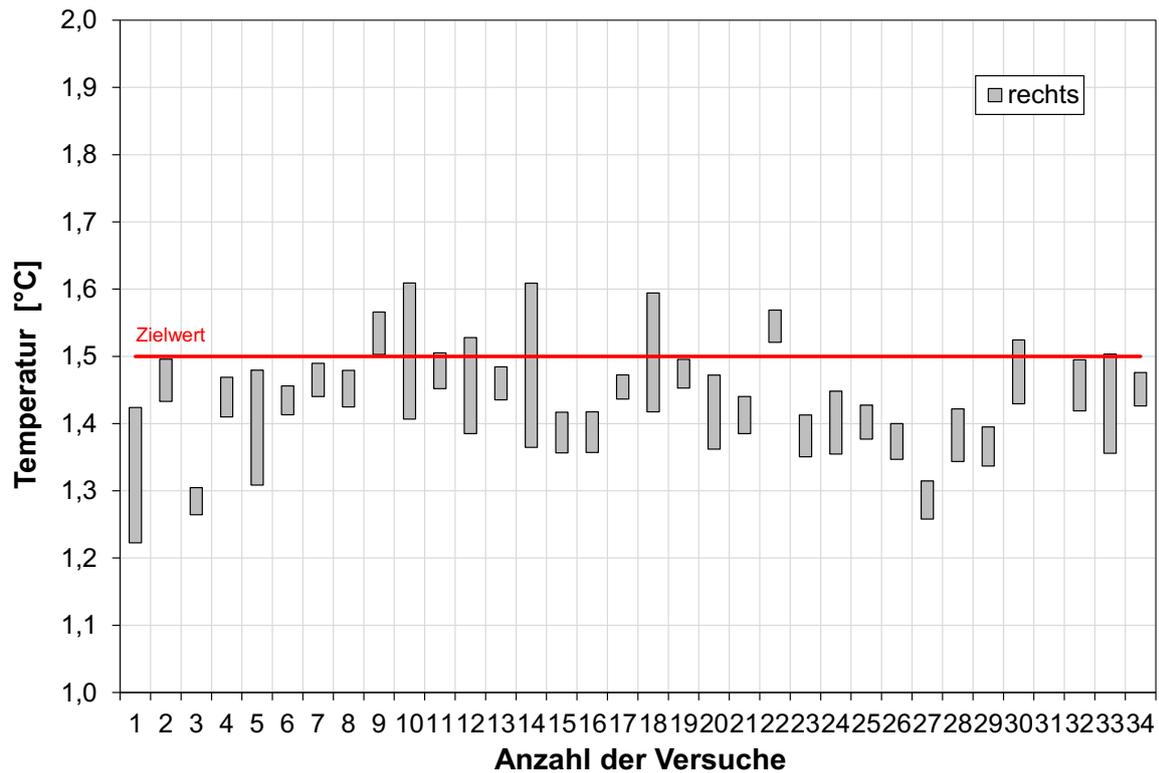


Abbildung 26: Temperaturspanweiten in der rechten Kühlkammer (natürliche Baustoffgemische)

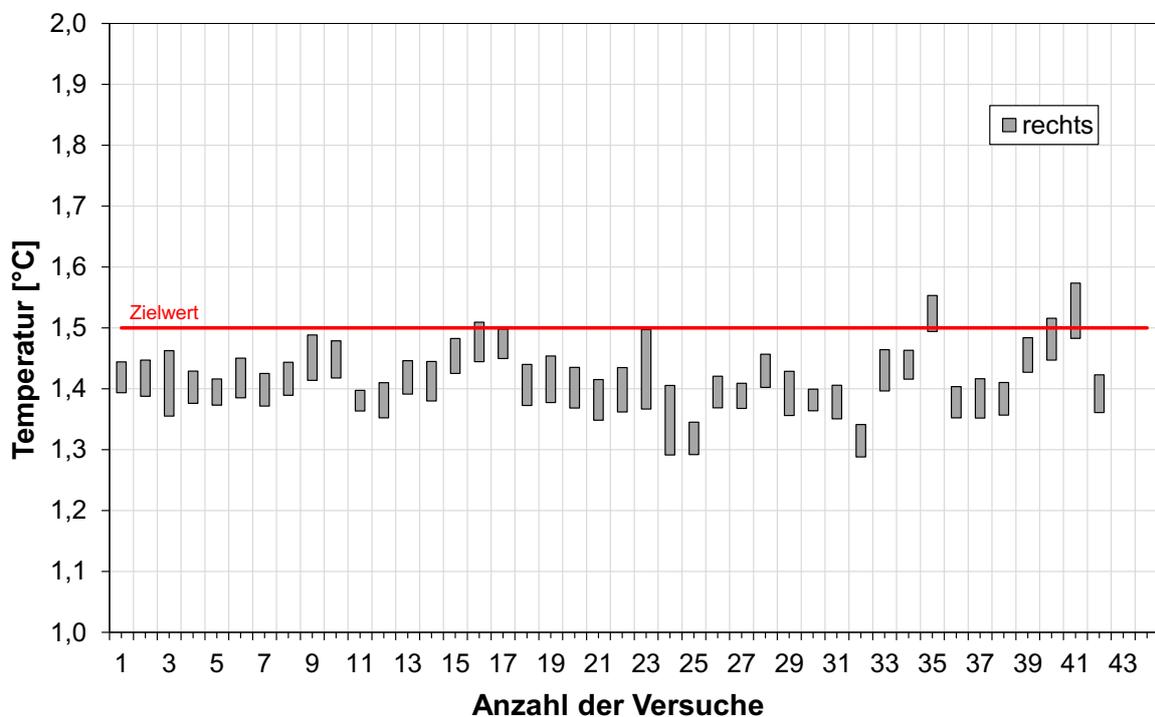


Abbildung 27: Temperaturspanweiten in der rechten Kühlkammer (Recycling-Baustoffgemische)

Grundsätzlich liegt das Temperaturniveau in beiden Bädern insgesamt bei etwa $+1,4 \text{ °C} \pm 0,2 \text{ K}$, was niedriger als die angestrebte Prüftemperatur von $+1,5 \text{ °C} \pm 0,1 \text{ K}$ ist. Darüber hinaus sind die Spanweiten im linken Wasserbad insgesamt um

rd. 0,1 K niedriger als im rechten. Die Temperatursteuerung beider Wasserbäder erfolgte derzeit über einen Temperaturfühler, der im linken Bad montiert ist.

Um den Einfluss der unterschiedlichen Temperaturniveaus zwischen den beiden Becken auf die Kennwerte zu analysieren, wurden zwei verschiedene sortenreine Recycling-Materialien ausgewählt. Beide Recycling-Gemische - RC-Kalksandstein und RC-Ziegel - wurden mit jeweils der gleichen Zusammensetzung der Sieblinie untersucht, um Überlagerungen von Einflussparametern soweit wie möglich einzugrenzen. Damit konnten Spannweiten der Wasserbadtemperaturen innerhalb des Genauigkeitsbereichs von $\pm 0,1$ K erreicht werden. In Anhang E sind Ergebnisse grafisch aufbereitet.

Die Abbildungen 27 bis 30 zeigen die Kennwerte Maximale Frosthebung bzw. Beginn der Eislinsenbildung in Abhängigkeit von der Temperatur-Spannweite im Wasserbad für diese beiden Materialsorten. Die Proben mit der Bezeichnung P1 wurden im linken Wasserbad, die mit der Bezeichnung P2 im rechten Wasserbad geprüft.

Bei den zwei Recycling-Kalksandstein-Proben mit der Bezeichnung P1 der Sorten 1 und 2 tritt eine höhere Maximale Frosthebung auf (Abbildung 28) im Vergleich zu den Proben mit der Bezeichnung P2 dieser Sorten. Jedoch wurden beide Proben der Sorte 1 (19,3 %) und beide der Sorte 2 (16,3 %) mit identischem Wassergehalt und nahezu identischer Dichte eingebaut. Die Differenz der Maximalen Frosthebung zwischen P1 und P2 lässt sich demnach nicht auf die niedrigere Beckentemperatur zurückführen. Die Maximalen Frosthebungen der Proben P1 und P2 der Sorten 3 und 4 weisen nahezu keinen Unterschied zwischen der Prüfung im linken und rechten Wasserbad auf.

In Abbildung 29 sind die Maximalen Frosthebungen in Abhängigkeit von der Spannweite der Wasserbadtemperatur für Ziegelmaterialien dargestellt. Zwischen den Maximalen Frosthebungen der Proben P1 und P2 im linken und rechten Becken ist kein eindeutiger Unterschied zu erkennen. Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass eine niedrigere Wasserbadtemperatur keinen Einfluss auf die Maximale Frosthebung hat.

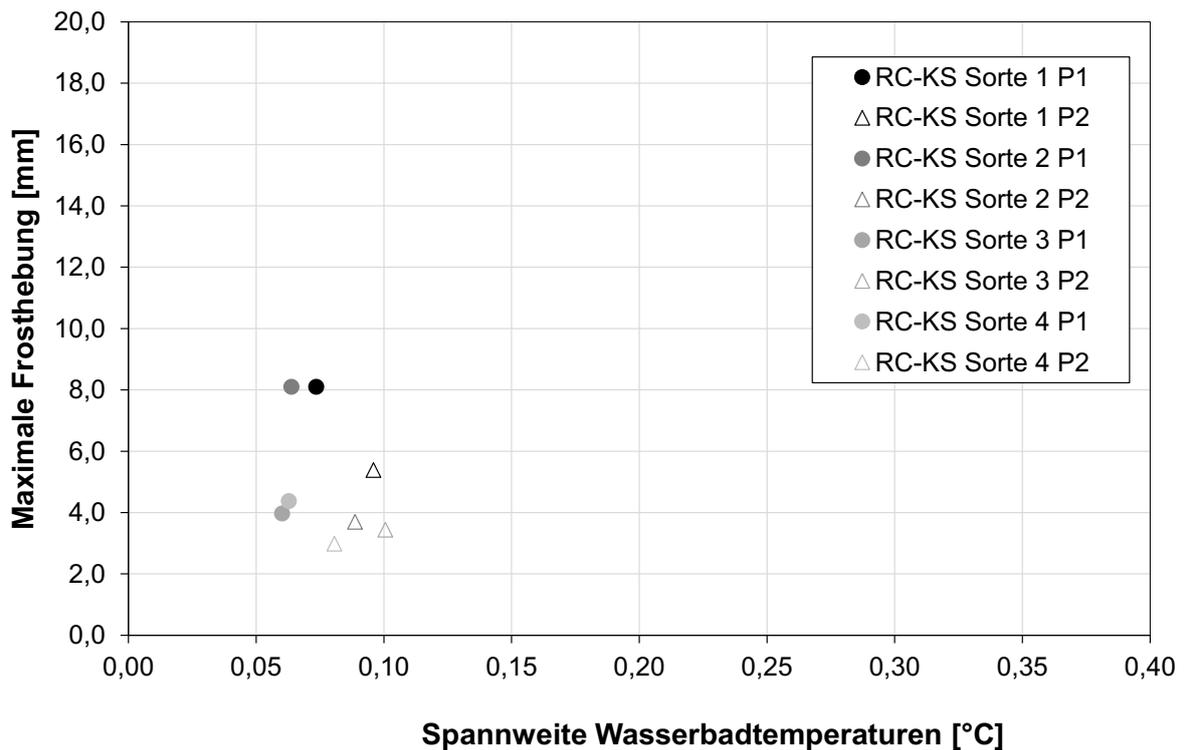


Abbildung 28: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Spannweite der Wasserbadtemperaturen (RC-Kalksandstein)

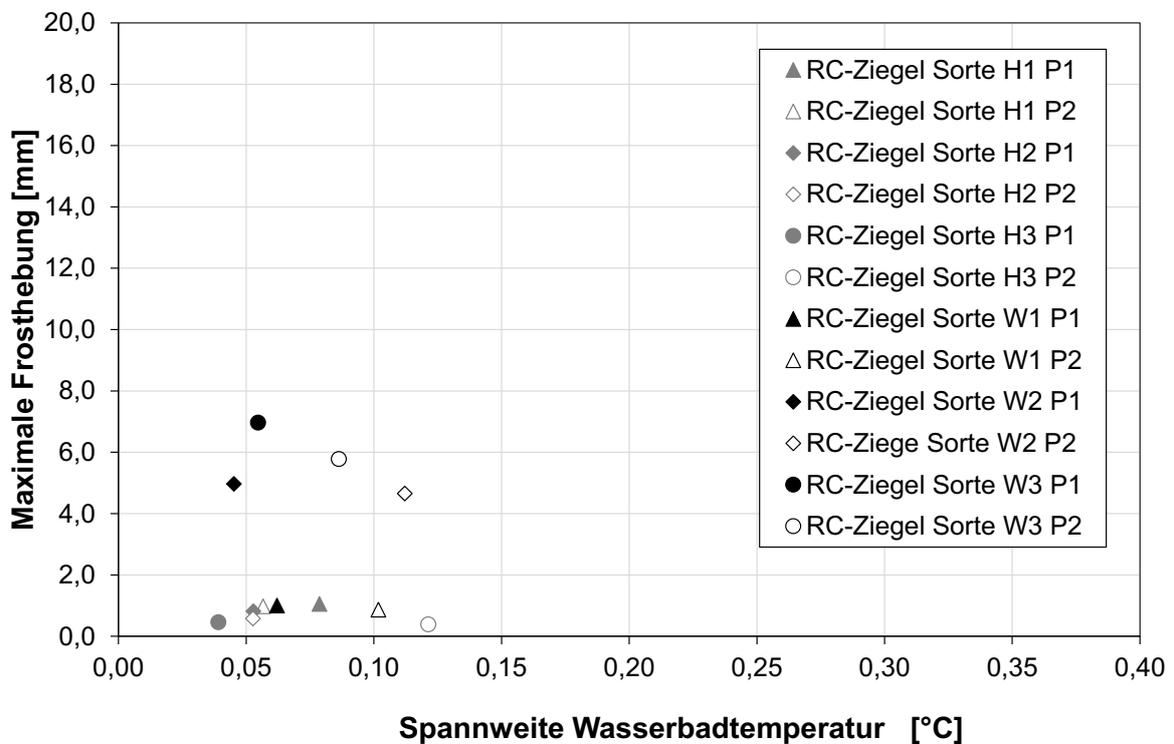


Abbildung 29: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Spannweite der Wasserbadtemperaturen (RC-Ziegel)

Wird die Eislinsenbildung betrachtet (Abbildung 30), so bildet sich bei allen vier Kalksandstein-Proben im linken Wasserbad (P1) die Eislinse nach 2,5 bis 3,5

Tagen. Im rechten, wärmeren Bad (P2) kommt es zu einer späteren Eislinnenbildung. Diese tritt zwischen einem halben bis zu maximal zwei Tagen später ein. In der Probe mit der Bezeichnung „P1“ von Sorten 2 bildet sich die Eislinne früher als in den Proben der anderen Sorten. Eine Auswirkung dessen auf eine dementsprechend höhere Maximale Hebung zeigt sich jedoch nicht. Der Beginn der Eislinnenbildung der Proben „P1“ der Sorten 1 und 3 unterscheiden sich nur geringfügig, jedoch sind zu Versuchsende deutlich unterschiedliche Maximale Frosthebungen messbar (Abbildung 28).

Abbildung 31 zeigt den Beginn der Eislinnenbildung in Abhängigkeit von der Spannweite der Wasserbadtemperaturen für die Ziegelmaterialien. Bei drei von vier geprüften Materialien bildet sich die Eislinne von P1 im linken, kälteren Bad ca. 0,5 Tag früher. Beim vierten Material (Sorte W1) tritt diese frühere Eisbildung im rechten Bad (P2) auf.

Die Vermutung, dass die Wasserbadtemperatur die Eislinnenbildung beeinflusst, wird demnach bestätigt. Darüber hinaus ist an den Streuungen der Ergebnisse auch zu erkennen, dass Überlagerungen mit anderen Einflussgrößen auftreten. Daher ist davon auszugehen, dass andere Kenngrößen der Materialien, wie Porosität oder Dichte, ebenfalls einen Einfluss auf den Beginn der Eislinnenbildung ausüben.

Zusammenfassend lässt sich anhand der hier ausgewerteten Versuche folgern, dass die Wasserbadtemperatur einen Einfluss auf den Beginn der Eislinnenbildung ausübt. Dies führt im Versuchsverlauf aber nicht zwingend zu höheren Maximalen Frosthebungen.

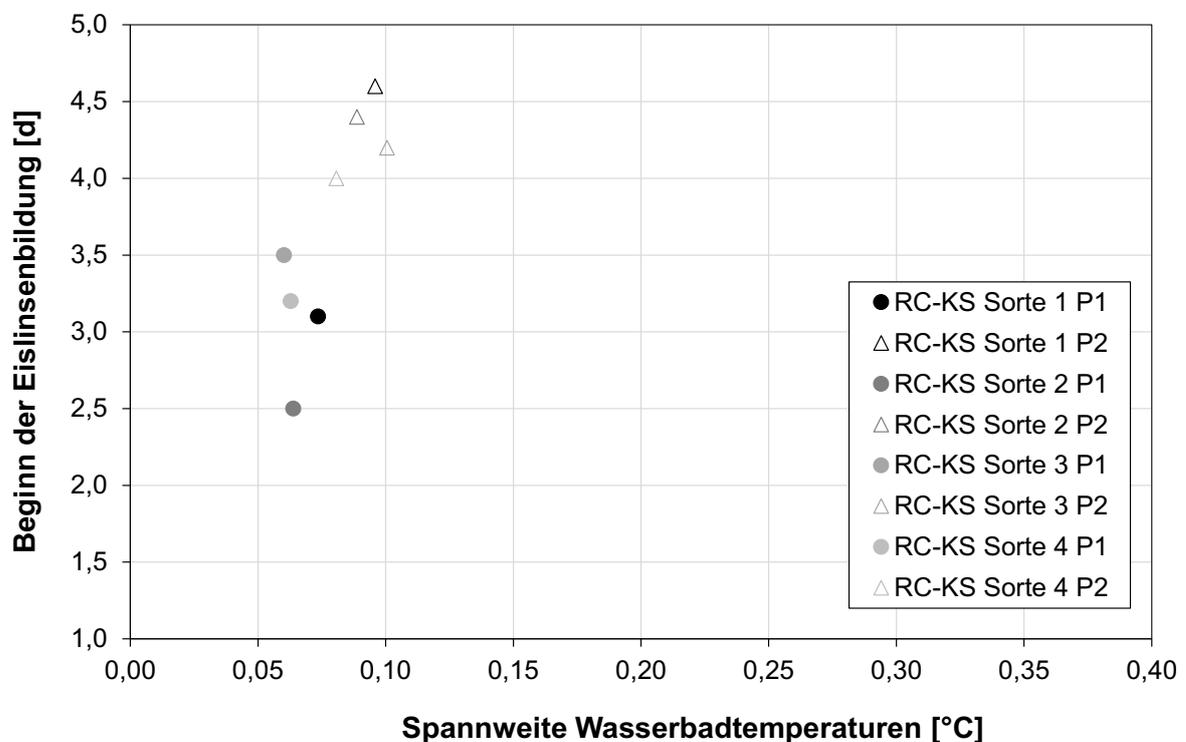


Abbildung 30: Gegenüberstellung von Beginn der Eislinnenbildung und Spannweite der Wasserbadtemperaturen (RC-Kalksandstein)

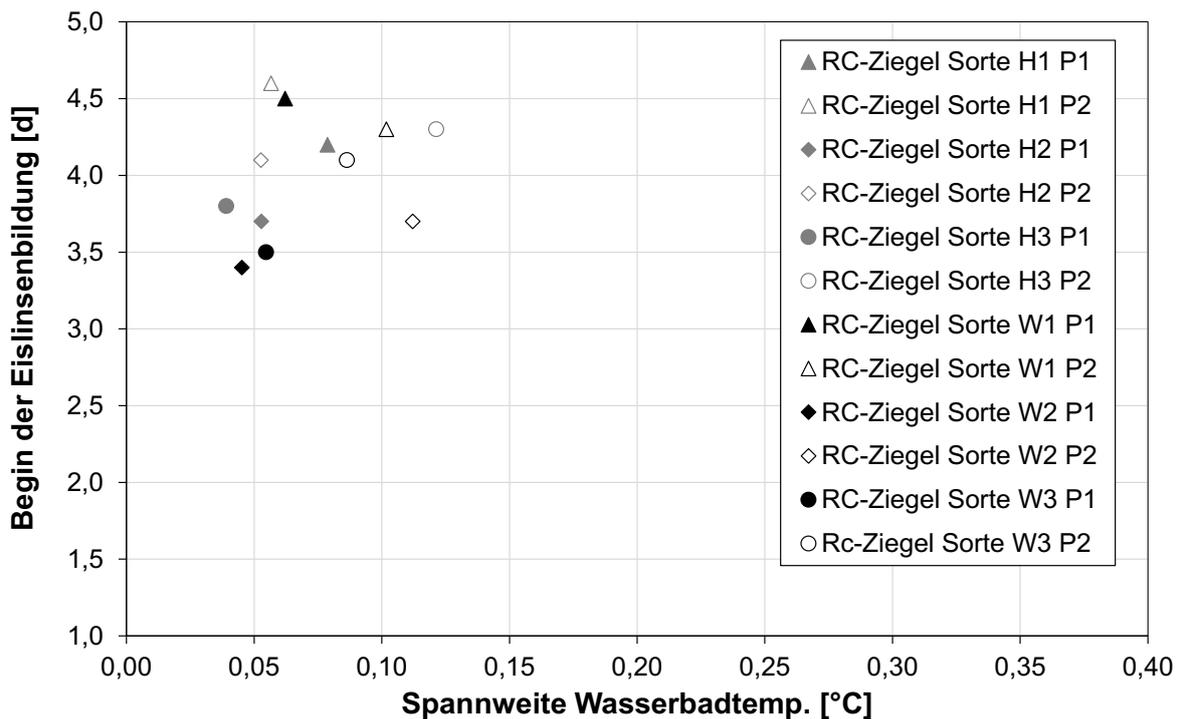


Abbildung 31: Gegenüberstellung von Beginn der Eislinnenbildung und Spannweite der Wasserbadtemperaturen (RC-Ziegel)

5.1.3 Modifikation des Kühlkreislaufes

Mit dem Ziel die Differenzen der Wasserbadtemperaturen zwischen den beiden Becken zu reduzieren, wurde das Frosthebungsgerät modifiziert. Beide Wasserbäder wurden mit je einem Temperaturfühler Pt50 ausgestattet, die in Reihe geschaltet den Kryostaten steuern. In Anhang E ist der modifizierte Kühlkreislauf dargestellt.

Die Wasserbäder werden indirekt durch das Kühlmittel temperiert. Die Kühlflüssigkeit läuft vom Kryostaten unterhalb der rechten in die linke Prüfkammer und aus den beiden Prüfkammern zu den Kühlköpfen. Der Rücklauf zum Kryostat erfolgt über den jeweiligen Kühlkopf.

Am Kryostaten wurde eine Temperatureinstellung von +1,5 °C vorgenommen und mit externen Thermometern in beiden Wasserbädern überprüft. Beide Wasserbecken konnten die gewünschte Temperatur nicht erreichen, daher wurde die Soll-Einstellung iterativ erhöht.

Im Rahmen des Projektes konnten mit dem modifizierten Kühlkreislauf acht Versuchsreihen durchgeführt werden. Bei jedem der Versuche wurde die Wasserbecken-Temperatur kontrolliert. Abbildung 32 zeigt die von dem Datenlogger übermittelten Temperaturspannweiten dieser Versuche.

In den Versuchen Nr. 2 bis Nr. 4 war es zunächst gelungen, beide Wasserbecken auf ein nahezu identisches Temperaturniveau zu steuern, welches jedoch deutlich unter dem Zielwert von 1,5 °C lag. Durch Iteration der Kryostat-Einstellungen wurde in den Versuchen Nr. 6 bis Nr. 8 der Zielwert von + 1,5 °C in beiden Becken erreicht, jedoch waren die Temperatur-Spannweiten innerhalb dieser drei Versuche hoch.

In den Versuchen Nr. 6 und Nr. 7 weichen die Temperaturen nach oben und bei Nr. 8 nach unten ab.

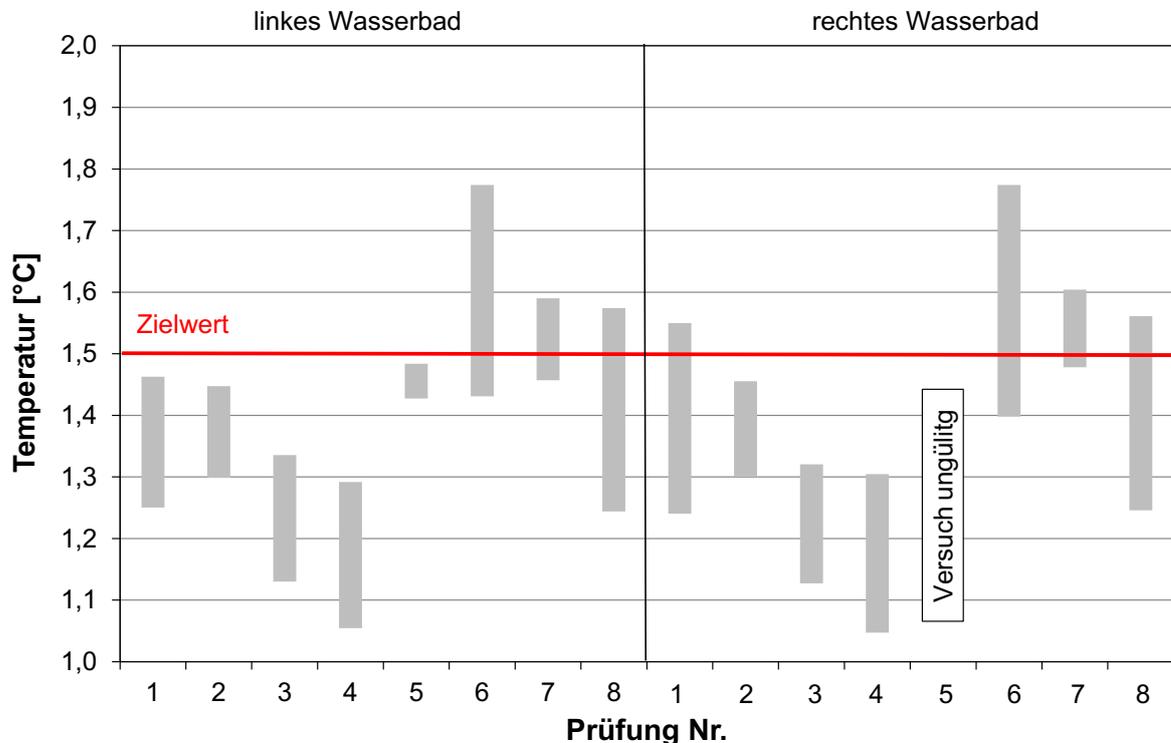


Abbildung 32: Temperaturspannweiten beider Wasserbäder

Abbildung 33 zeigt die Temperatur-Spannweite der Versuche Nr.6 bis Nr.8 zum Zielwert $+1,5\text{ °C}$ in beiden Wasserbecken, die für die Festlegung der Temperatur-Toleranz herangezogen wurden. Unabhängig von der Materialart der untersuchten Gemische errechnet sich zum geforderten Zielwert von $+1,5\text{ °C}$ ein Delta zum Temperaturmaximum zwischen $+0,06\text{ K}$ bis $+0,27\text{ K}$ und zum Minimum zwischen $-0,02\text{ K}$ und $-0,25\text{ K}$. Daraus ergibt sich eine maximale Spannweite von $+1,5\text{ °C} \pm 0,3\text{ K}$.

Nach Abschluss der Ringuntersuchung wurde von [Blume, 2010] zur Erhöhung der Genauigkeit der Frosthebungskennwerte empfohlen, die Spannweite des Zielwertes von $1,5\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$ auf $\pm 0,1\text{ K}$ abzusinken. Auf Basis der hier analysierten Frosthebungsergebnisse ist das Einhalten der Toleranz von $\pm 0,1\text{ K}$ nur bei sortenreinen Materialgemischen möglich, wie die Auswertungen in Anhang E zeigen. Aufgrund von Einflüssen aus Material und dessen Zusammensetzung kann zielsicher eine Toleranz der Zieltemperatur von $1,5\text{ °C} \pm 0,3\text{ K}$ im Wesentlichen eingehalten werden.

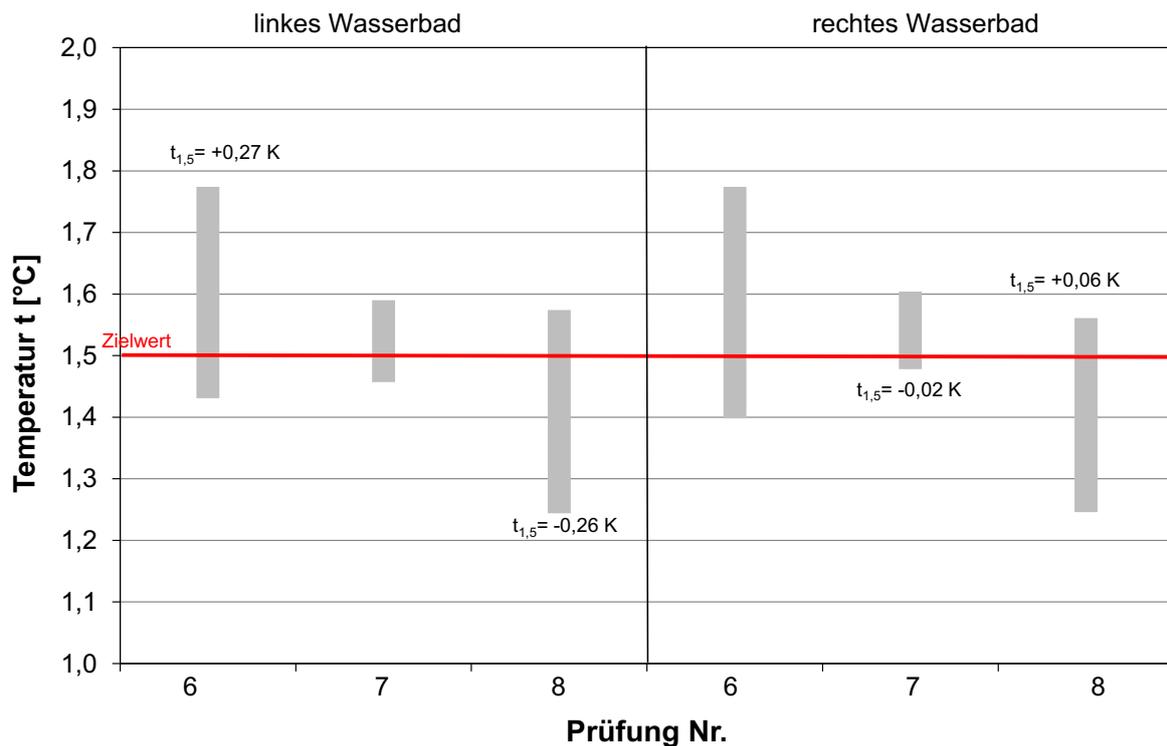


Abbildung 33: Absolute Temperatur-Spannweiten der untersuchten Materialgemische

Insgesamt ist das Temperaturniveau in den Wasserbädern des Frosthebungsgerätes abhängig vom internen Regelkreislauf des Kryostaten. Hier sind neben der Soll-Temperatur, insbesondere die PID-Parameter Proportionalbereich X_p , Nachstellzeit T_v und Vorhaltezeit T_n für den externen Regelkreislauf zu nennen, die an die jeweilige Versuchsanlage angepasst werden müssen. Der Proportionalbereich X_p sollte nach Rücksprache mit dem Hersteller bei 0,3 K liegen. Die anderen Parameter müssen iteriert werden. Für die Einstellung der Soll-Temperatur ist eine vorherige separate externe Temperaturmessung der Wasserbäder zwingend notwendig, um einen Anhaltspunkt für die Einstellungsänderung zu erhalten. In Tabelle 9 sind die nach Iteration festgelegten externen Steuerungsparameter am Kryostaten der RUB zusammengefasst.

Tabelle 9: Nach Iteration festgelegte Steuerungsparameter des Kryostaten der RUB

Steuerungsparameter	Einstellung
Nachstellzeit T_v	150
Vorhaltezeit T_n	2300
Proportionalbereich X_p	0,3
Kaskadenregelung X_{pu}	1,7
Maximale Temperatur intern	1,6
Minimale Temperatur intern	-2,5
Soll-Temperatur	5,2

5.2 Einfluss des Feinkornanteils auf die Frosthebung

Zur Bestimmung des Einflusses der Feinkornanteile auf die Frosthebung wurden Materialgemische hergestellt, die sich sowohl in der Gesteinsart als auch in ihrem prozentualen Feinanteil unterschieden. Dafür wurden überwiegend natürliche Materialien ausgewählt, um die Stoffeinträge möglichst gering zu halten. Als Referenz diente ein Gesteinskörnungsgemisch aus Diabas, das mit Feinanteilen $< 0,063$ mm von 5 M.-% bis 20 M.-%, bei gleichbleibender Zusammensetzung $> 0,063$ mm/22,4 mm untersucht worden ist. In weiteren Untersuchungen variieren im Bereich des Anteils $< 0,063$ mm die Gesteinsart und die Zugabemenge. Verwendet wurden Grauwacke, Granit, Kalkstein, Hochofenschlacke und LD-Schlacke. Die Korngrößenverteilungen der Materialgemische sind in Anhang A aufgeführt.

Für die Auswertung der Einflussgröße Feinanteil auf die Frosthebung wurden folgende Parameter aus dem Frosthebungsversuch verwendet:

- Quellung
- Beginn der Eislinsenbildung (bezogen auf den Versuchsbeginn)
- Hebungsgeschwindigkeit zwischen
 - dem 5. und 6. Tag
 - dem 6. und 7. Tag
 - dem 7. und 8. Tag
- Maximale Frosthebung
- Bleibende Hebung

Dem gegenübergestellt wurden die folgenden Materialkennwerte:

- Anteil der Kornklasse $< 0,063$ mm vor Frosthebung
- Kornanteile 5/22,4 mm
- Ungleichförmigkeitszahl
- Einbauwassergehalt
- Einbaudichte
- Ausbauwassergehalt
- Ausbaudichte

- Luftporenanteil

In der Bodenmechanik wird der Luftporenanteil ursprünglich als zusätzlicher Materialkennwert aus den Kennwerten der Proctorkurve berechnet. Dieser wird aus dem

waagerechten Abstand der Sättigungskurve zur Proctorkurve bestimmt und dient als Maß für den Anteil luftgefüllter Poren n_a am Gesamtvolumen. Dieser Anteil n_a wird in Anlehnung an [DIN 18127, 2012] wie folgt berechnet:

$$n_a = 1 - \rho_d * \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_w} \right) \quad [\text{Vol. -\%}]$$

mit:

ρ_d = Einbaudichte trocken [g/cm³]

ρ_s = Rohdichte des Materialgemisches [g/cm³]

ρ_w = Dichte des Wassers [g/cm³]

w = Einbauwassergehalt [%]

Für die Beurteilung der jeweiligen Materialkennwerte auf die Parameter aus dem Frosthebungsversuch wurden zunächst einfache lineare Regressionen erstellt. Die Ausreißer wurden mittels statistischer Analyse herausgefiltert. Dargestellt in den Diagrammen dieses Kapitels sind nur Korrelationen mit Bestimmtheitsmaßen von $> 0,7$. Gemäß den Grundlagen der Statistik weisen Bestimmtheitsmaße von $0,7$ bis $0,9$ darauf hin, dass die ausgewählten unabhängigen Kennwerte für eine Kombination geeignet sind. Bestimmtheitsmaße $> 0,9$ sind besonders gut geeignet. Nichts desto trotz können auch kleinere Bestimmtheitsmaße auf einen Zusammenhang der gegenübergestellten Kennwerte hindeuten, was bei den Auswertungen berücksichtigt wurde.

Bei folgenden Materialparametern wurden keine Zusammenhänge zu den Frosthebungs-kennwerten gefunden:

- Einbauwassergehalt
- Einbaudichte
- Ausbauwassergehalt
- Ausbaudichte

In Anhang A ist beispielhaft je ein Diagramm dieser Materialparameter dargestellt.

5.2.1 Einfluss des Anteils $< 0,063$ mm

In Abbildung 34 ist die Quellung innerhalb des 1. Versuchstages und in Abbildung 35 der Beginn der Eislinnenbildung dem Anteil $< 0,063$ mm vor Frostbeanspruchung gegenübergestellt.

Die Quellung innerhalb des 1. Versuchstages liegt bei allen Proben zwischen $-0,2$ mm und maximal $0,8$ mm.

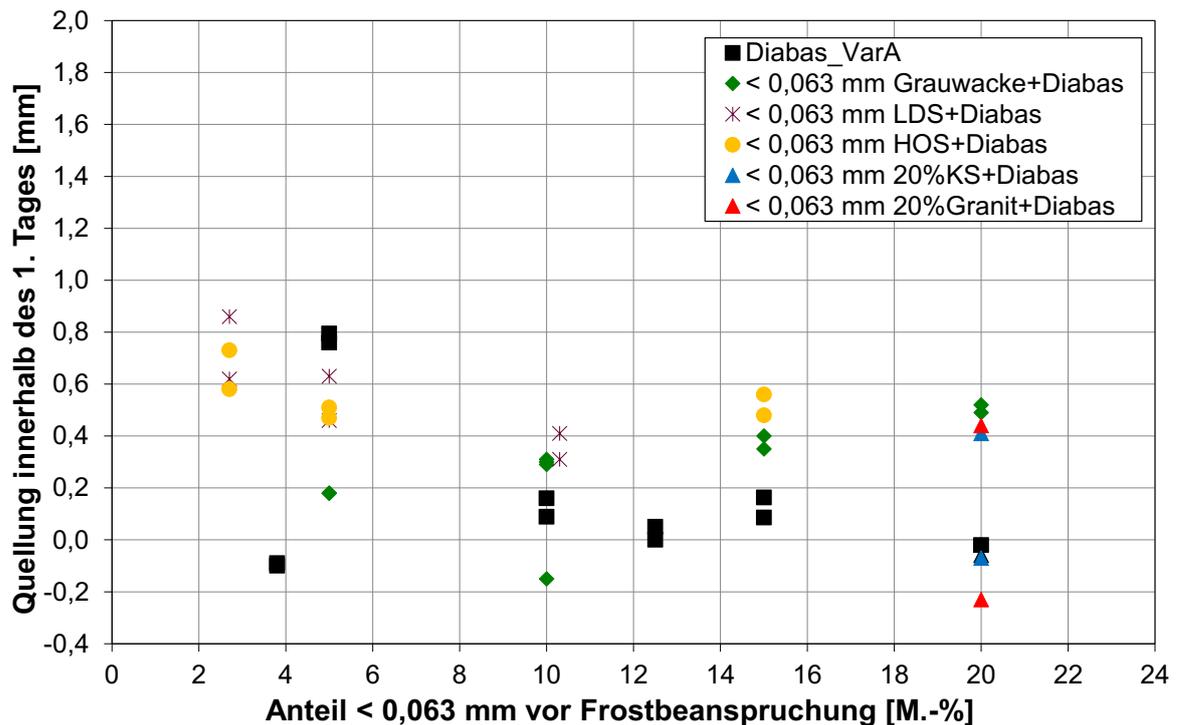


Abbildung 34: Gegenüberstellung von Quellung und Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

Bei allen Materialgemischen treten sowohl mit zunehmendem als mit abnehmendem Feinanteil nur geringe Veränderungen in der Quellung auf. Dementsprechend liegen die Bestimmtheitsmaße der Daten unter 0,7. Ein Einfluss der Feinanteile < 0,063 mm auf den Kennwert Quellung ist bei diesen Materialzusammensetzungen nicht gegeben.

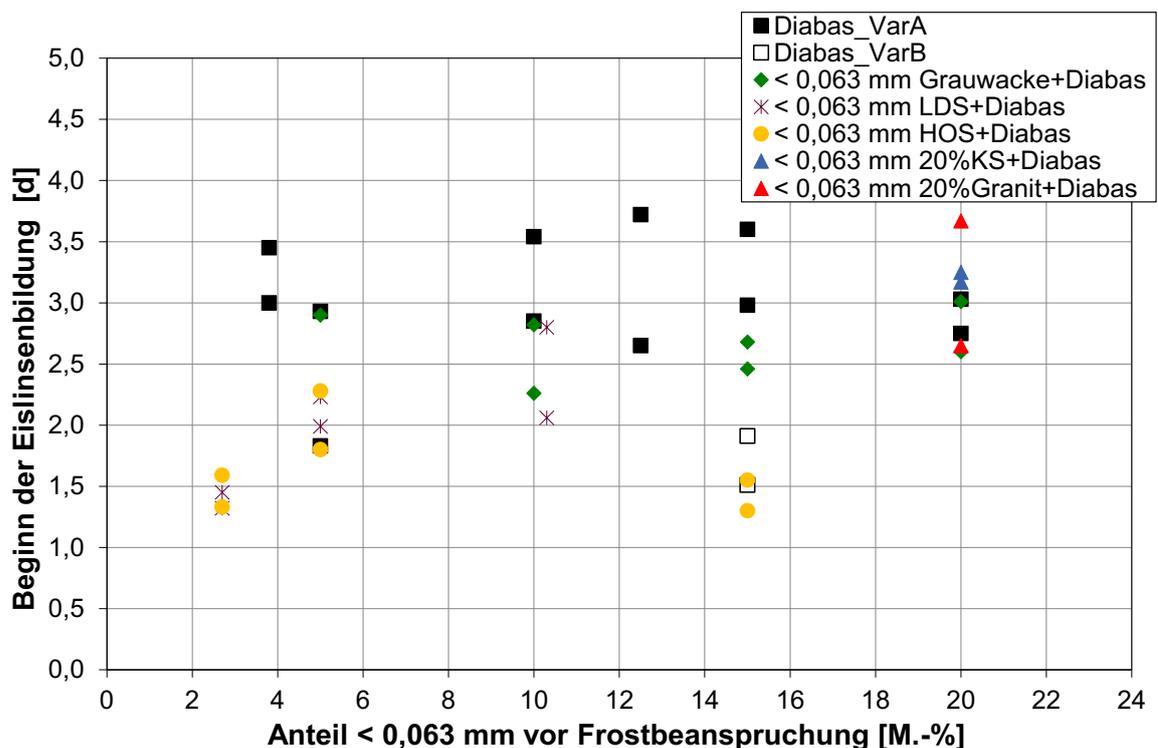


Abbildung 35: Gegenüberstellung von Beginn der Eislinnenbildung und Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

Die Bildung der Eislinsen beginnt frühestens nach 1,3 Tagen, kann aber auch erst nach 3,7 Tagen eintreten. Auch hier zeigen sich bei allen Materialgemischen keine mathematisch eindeutigen Zusammenhänge mit dem Anteil $< 0,063$ mm. Die Bestimmtheitsmaße liegen unter 0,7. Tendenziell lässt sich aber erkennen, dass bei den rein natürlichen und in diesen Fällen dichteren Materialgemischen, unabhängig vom Feinanteil die Bildung der Eislinse frühestens nach rd. 2,5 Tagen eintritt.

Abbildung 36 bis Abbildung 38 zeigen die Gegenüberstellungen der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 8. Tag, jeweils gestaffelt in Tagesabschnitte.

Die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag nach Versuchsbeginn liegen zwischen 0,2 und 3,4 mm/d. Für alle Materialgemische gilt, dass mit zunehmendem Feinanteil die Hebungsgeschwindigkeit mehr oder weniger stark ansteigt. Ein belegbarer Zusammenhang findet sich aber lediglich für die Kennwerte der Gemische mit Hochofen- bzw. LD-Schlacke mit Bestimmtheitsmaßen von mehr als 0,9.

Die Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag liegt zwischen 0,1 mm/d und 2,2 mm/d. Es zeigen sich die gleichen Zusammenhänge wie bei den Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag. Die Streuungen der Ergebnisse werden jedoch geringer. Es korrelieren die Anteile $< 0,063$ mm der Gemische mit Diabas mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,7, die mit Hochofen- und LD-Schlacke mit 0,9.

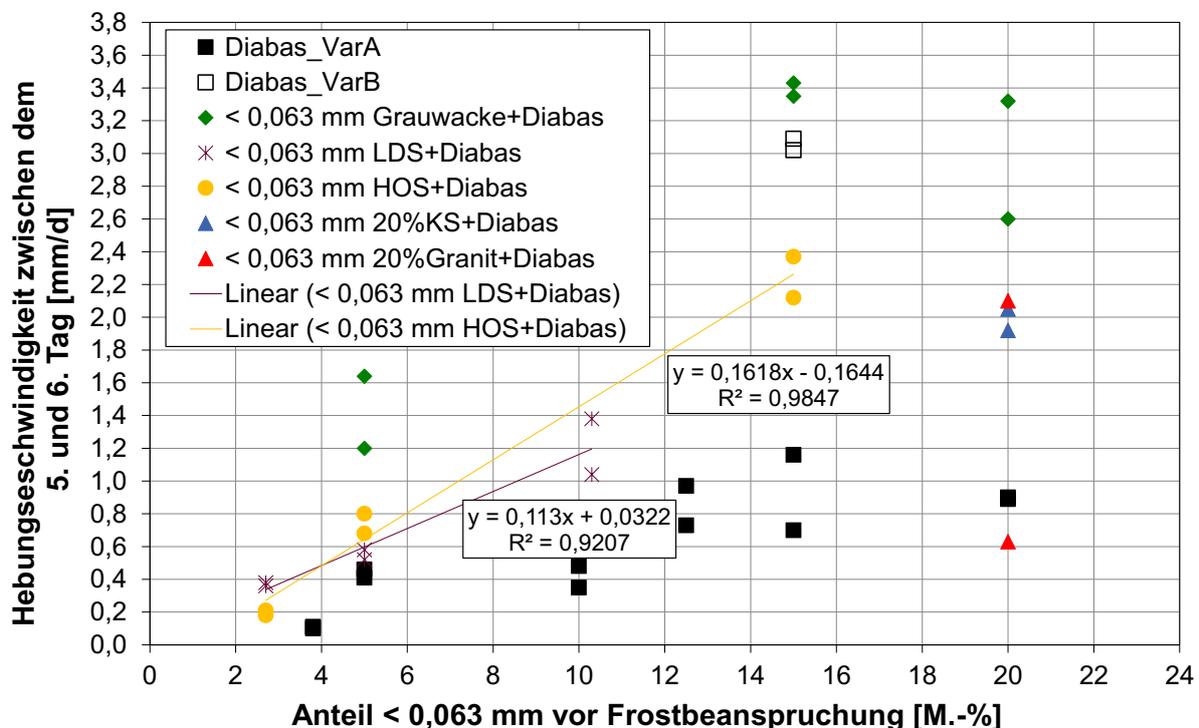


Abbildung 36: Gegenüberstellung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und dem Anteil $< 0,063$ mm vor Frostbeanspruchung

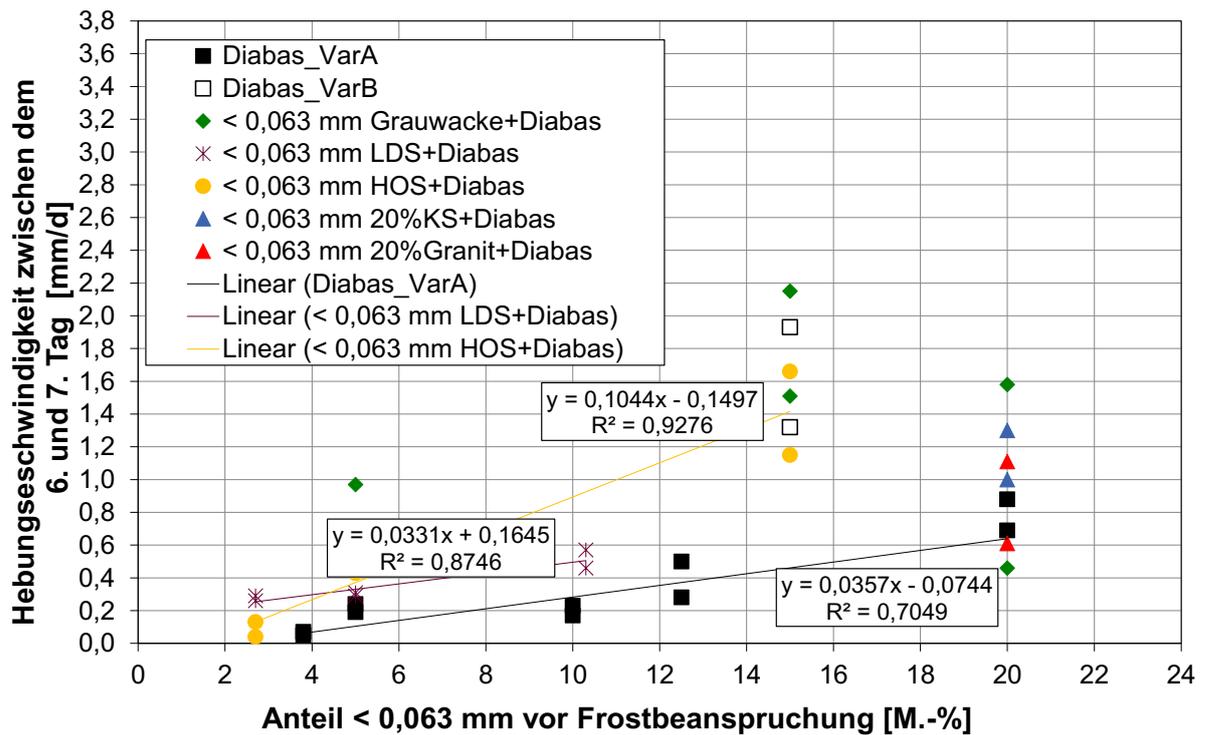


Abbildung 37: Gegenüberstellung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und dem Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

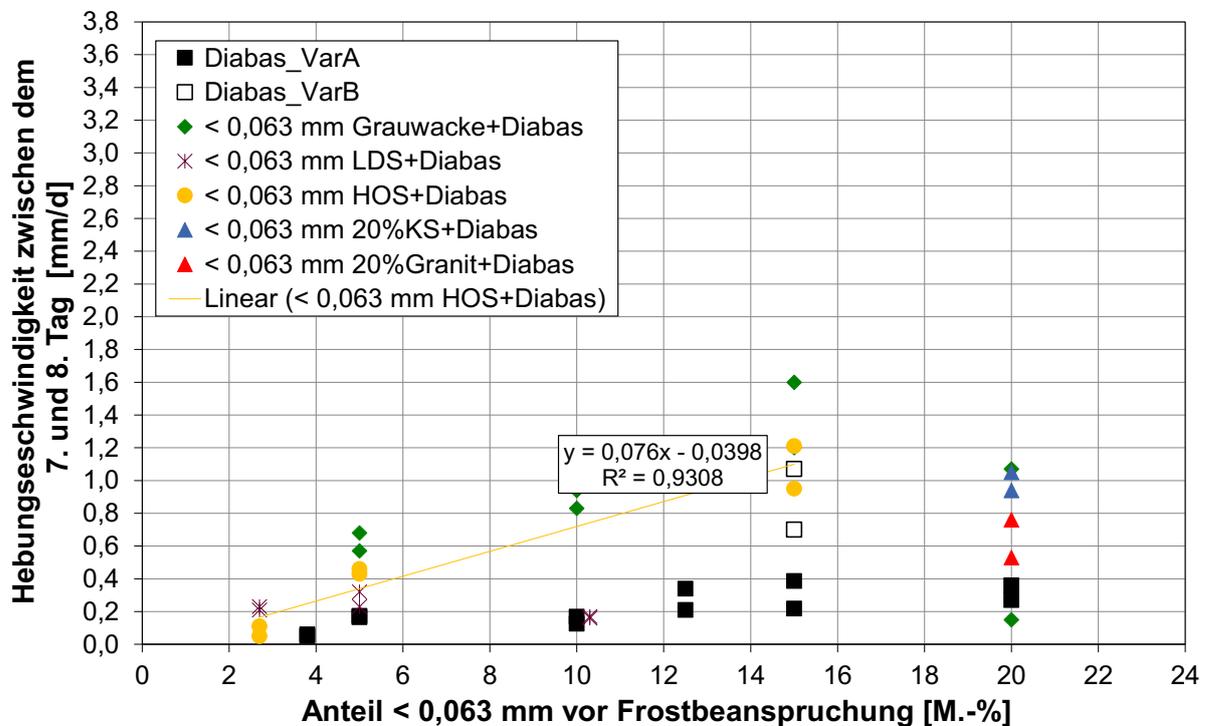


Abbildung 38: Gegenüberstellung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag und dem Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

Die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 7. und 8. Tag liegen zwischen 0,1 und 1,4 mm/d. Lediglich die Gemische mit der Hochofenschlacke sind zu diesem

Versuchszeitpunkt für eine Korrelation der Hebungsgeschwindigkeit geeignet. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,93.

Insgesamt betrachtet reduzieren sich die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 8. Tag mit zunehmender Versuchsdauer bei allen Materialgemischen um mehr als die Hälfte. Darüber hinaus nimmt die Hebungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Feinanteil zu.

Auffällig sind die durchgängig hohen Hebungsgeschwindigkeiten der Materialgemische mit Grauwacke. Im Vergleich zu den Gemischen mit Diabas setzt bei der Grauwacke die Eislinsenbildung zwar durchschnittlich einen Tag früher ein, worauf sich die hohen Hebungsgeschwindigkeiten aber nicht zurückführen lassen. Abbildung 39 zeigt die Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und dem Beginn der Eislinsenbildung (bezogen auf den Versuchsbeginn).

Tendenziell haben die Gemische mit Grauwacke jedoch eine etwas höhere Trockendichte (Abbildung 40) und weisen zudem eine etwas feinere Kornverteilung auf.

Bereits [Lovell, 1983] beschrieb die Einflüsse aus Kornverteilung und Verdichtungsenergie auf die Frosthebung. Eine Überlagerung dieser Faktoren könnte demnach zu den höheren Hebungsgeschwindigkeiten geführt haben.

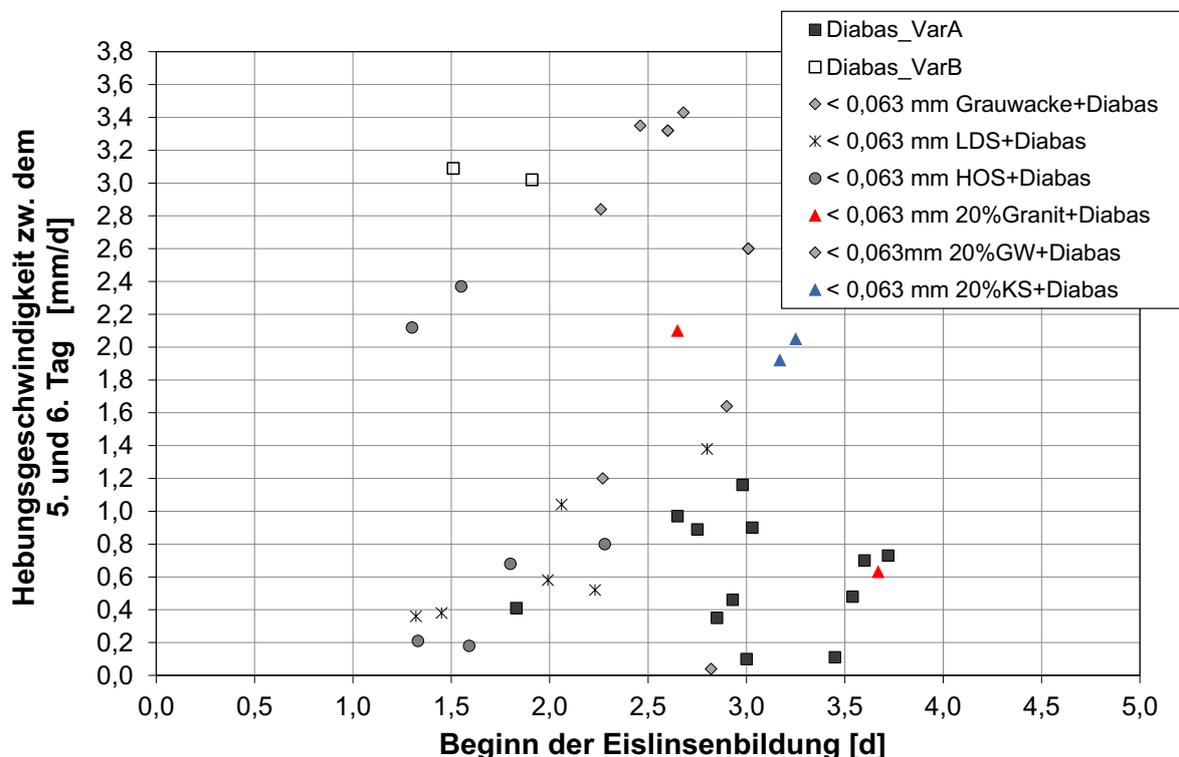


Abbildung 39: Gegenüberstellung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und Beginn der Eislinsenbildung

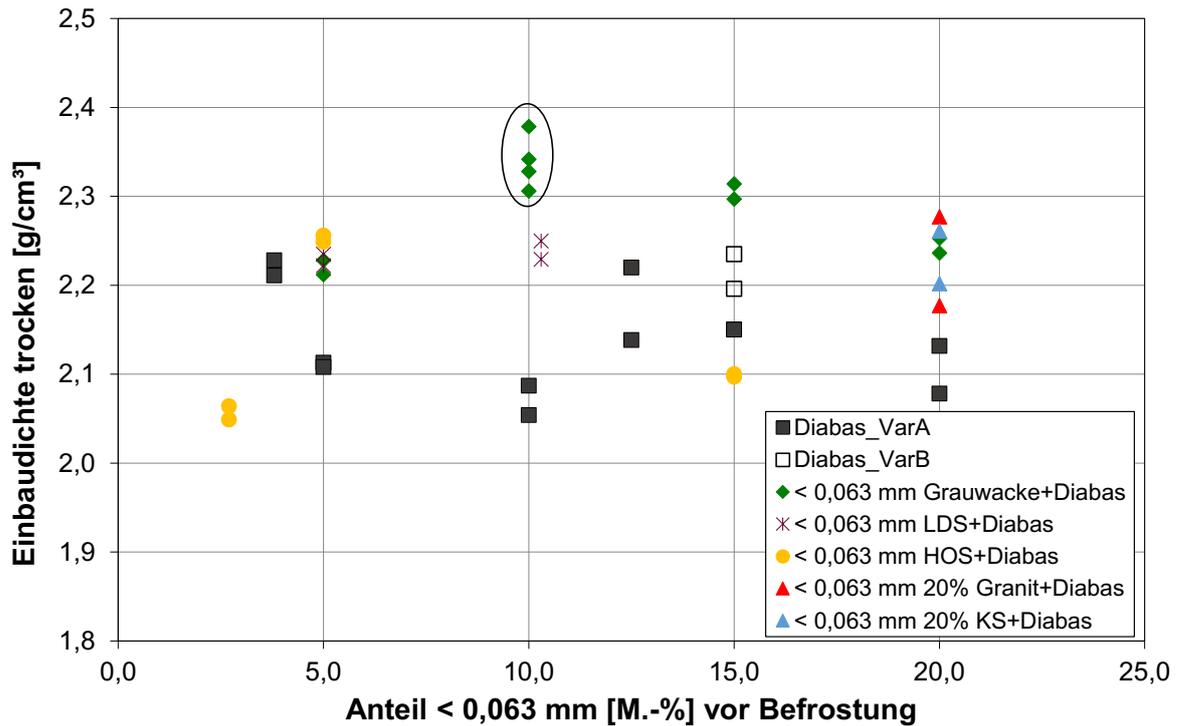


Abbildung 40: Gegenüberstellung von Einbaudichte und dem Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

In Abbildung 41 und Abbildung 42 sind die Maximalen Frosthebungen und die Bleibenden Hebungen den Anteilen < 0,063 mm vor Frosthebung gegenübergestellt.

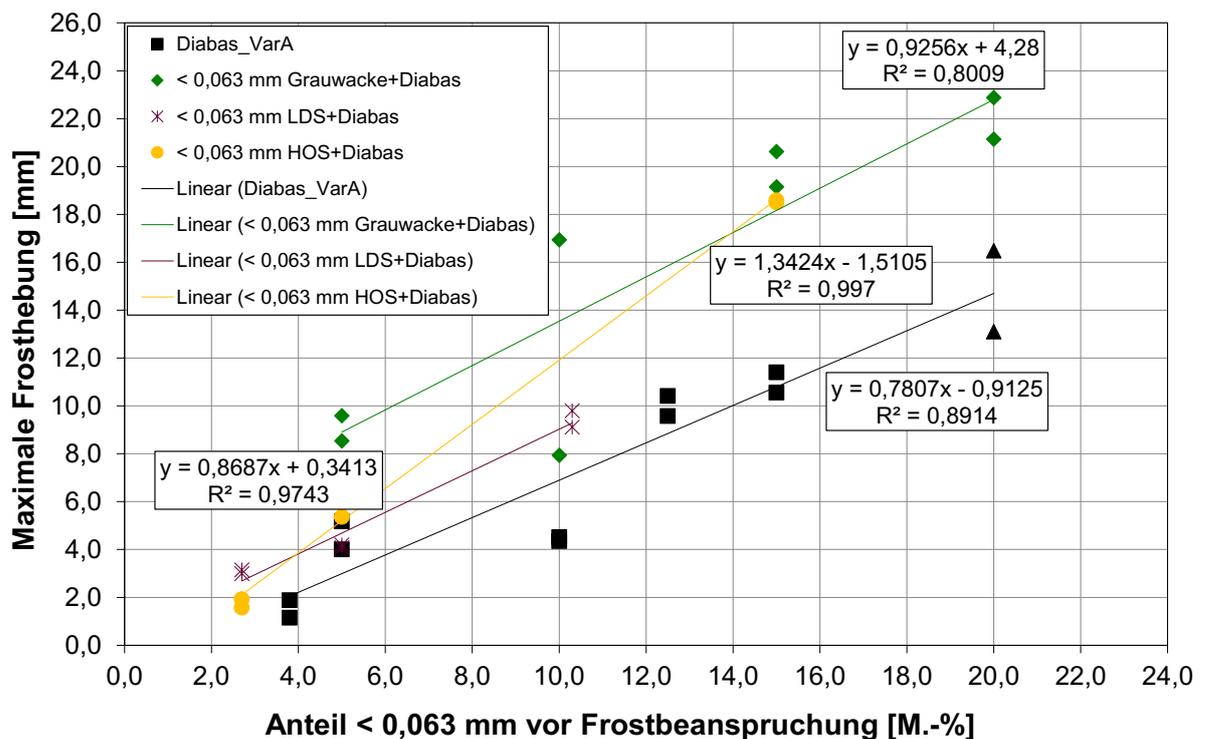


Abbildung 41: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

Die Maximalen Frosthebungen liegen zwischen 1,1 mm und 22,9 mm. Grundsätzlich ist bei beiden Kennwerten aus dem Frosthebungsversuch ein Zusammenhang zum Anteil < 0,063 mm gegeben. Alle verwendeten Gemische, mit Ausnahme der mit Grauwacke, weisen hohe Bestimmtheitsmaße von $\geq 0,87$ auf. Die Ergebnisse bestätigen diverse Forschungsarbeiten zur Beurteilung von Frosthebungen [Lottmann et al, 2004]. Der Anteil < 0,063 mm kann demnach für die Beurteilung herangezogen werden.

Die Bleibenden Hebungen liegen zwischen 0,1 mm und 3,3 mm. Eingeschränkt ist bei diesen Kennwerten ein Zusammenhang gegeben. Die Materialgemische mit Diabas und mit LD-Schlacke korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,87 bzw. 0,89, die mit Hochofenschlacke mit 0,98. Dem gegenüber weisen die Materialgemische mit Grauwacke, die eine hohe maximale Frosthebung und vergleichsweise höhere Hebungsgeschwindigkeit erzeugten, keine Korrelationen auf.

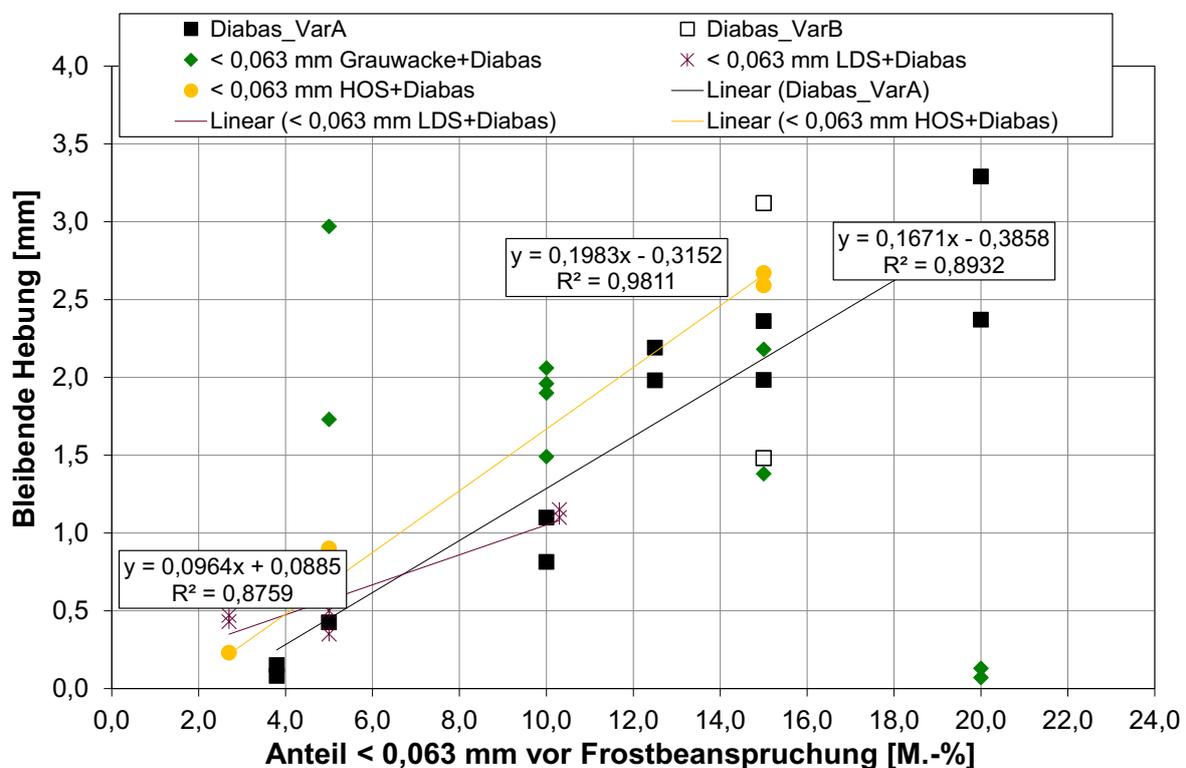


Abbildung 42: Gegenüberstellung von Bleibender Hebung und dem Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

5.2.2 Einfluss der Korngrößenverteilung

In Abbildung 43 ist die Quellung innerhalb des 1. Tages der Ungleichförmigkeitszahl gegenübergestellt.

Die Quellungen reichen von -0,23 mm bis zu 0,86 mm innerhalb des 1. Tages. Die Ungleichförmigkeitszahl der Materialgemische befindet sich überwiegend im Bereich zwischen 30 und 90. Es zeigen sich keine Korrelationen zwischen diesen Kennwerten und auch keine materialspezifischen Tendenzen.

Die Eislinsenbildung setzt nach etwa 1,5 Tagen bis zu 3,7 Tagen ein. Auch hohe Ungleichförmigkeitszahlen > 300 zeigen keine Besonderheiten, somit hat dieser Kennwert keinen Einfluss auf den Beginn der Eislinsenbildung.

In Abbildung 45 sind die Kennwerte der Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag der Ungleichförmigkeitszahl gegenübergestellt. Es liegen Hebungsgeschwindigkeiten in einer Spanne von 0,1 mm/d und 3,3 mm/d vor. Die Gegenüberstellungen der Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 6. und 7. Tag sowie dem 7. und 8. Tag mit der Ungleichförmigkeitszahl zeigen eine ähnliche Tendenz. Daher sind die Abbildungen in Anhang A enthalten.

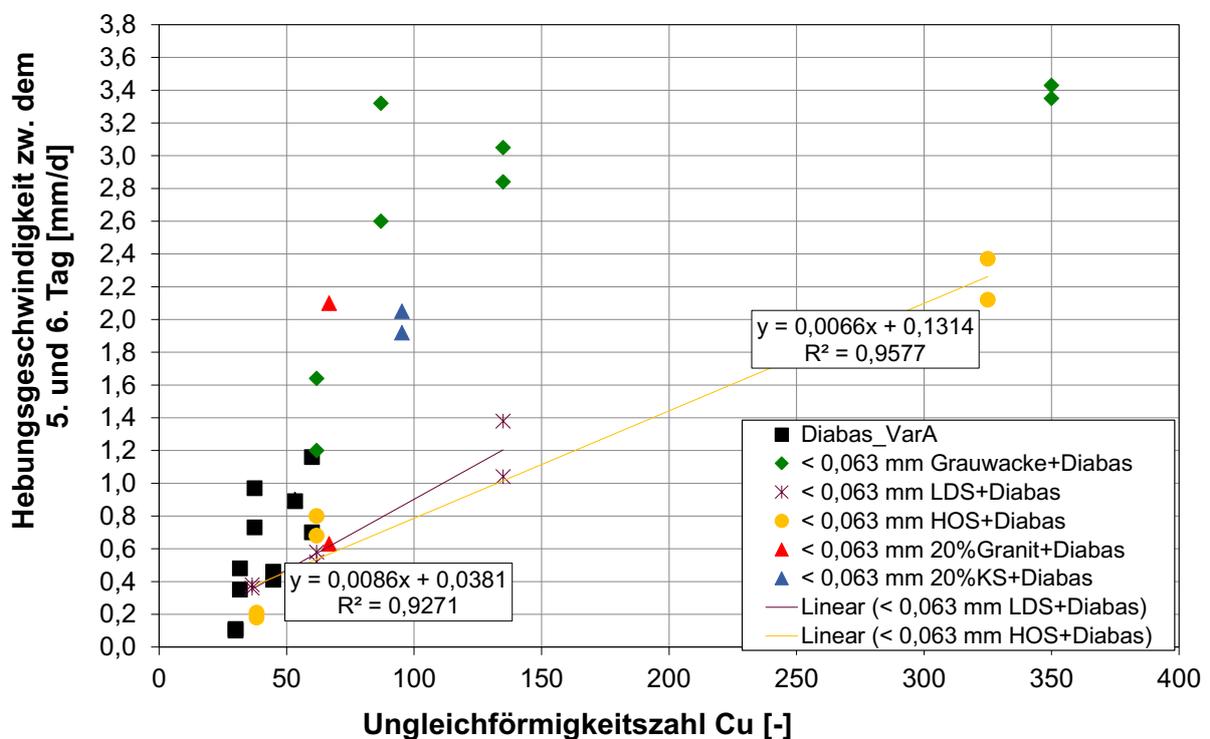


Abbildung 45: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und Ungleichförmigkeitszahl

Aufgrund der zielgenauen Zusammensetzungen der einzelnen Gemische ergeben sich lediglich für die Gemische mit Hochofen- und LD-Schlacke gute Korrelationen zwischen den beiden Kennwerten Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und Ungleichförmigkeitszahl. Im weiteren Versuchsverlauf reduzieren sich die Abhängigkeiten. Bei der Gegenüberstellung der Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 7. und 8. Tag und der Ungleichförmigkeitszahl ist kaum mehr eine Spreizung der Versuchsergebnisse zu erkennen. Insgesamt betrachtet hat der Parameter Ungleichförmigkeitszahl und damit die Korngrößenverteilung aufgrund der geringen Spreizung der Versuchsergebnisse nur einen geringen Einfluss auf die Hebungsgeschwindigkeiten.

Abbildung 46 beinhaltet die Gegenüberstellung der Maximalen Frosthebung mit der Ungleichförmigkeitszahl. Die Maximalen Frosthebungen liegen zwischen 1,3 mm

und 22,9 mm. Für die Materialgemische mit Hochofen- bzw. LD-Schlacke ergeben sich Korrelationen mit Bestimmtheitsmaßen $> 0,97$. Die Kennwerte aus den Gemischen mit Grauwacke zeigen ein Bestimmtheitsmaß von 0,74. Tendenziell sind demnach Abhängigkeiten zwischen der Maximalen Frosthebung und der Ungleichförmigkeitszahl vorhanden.

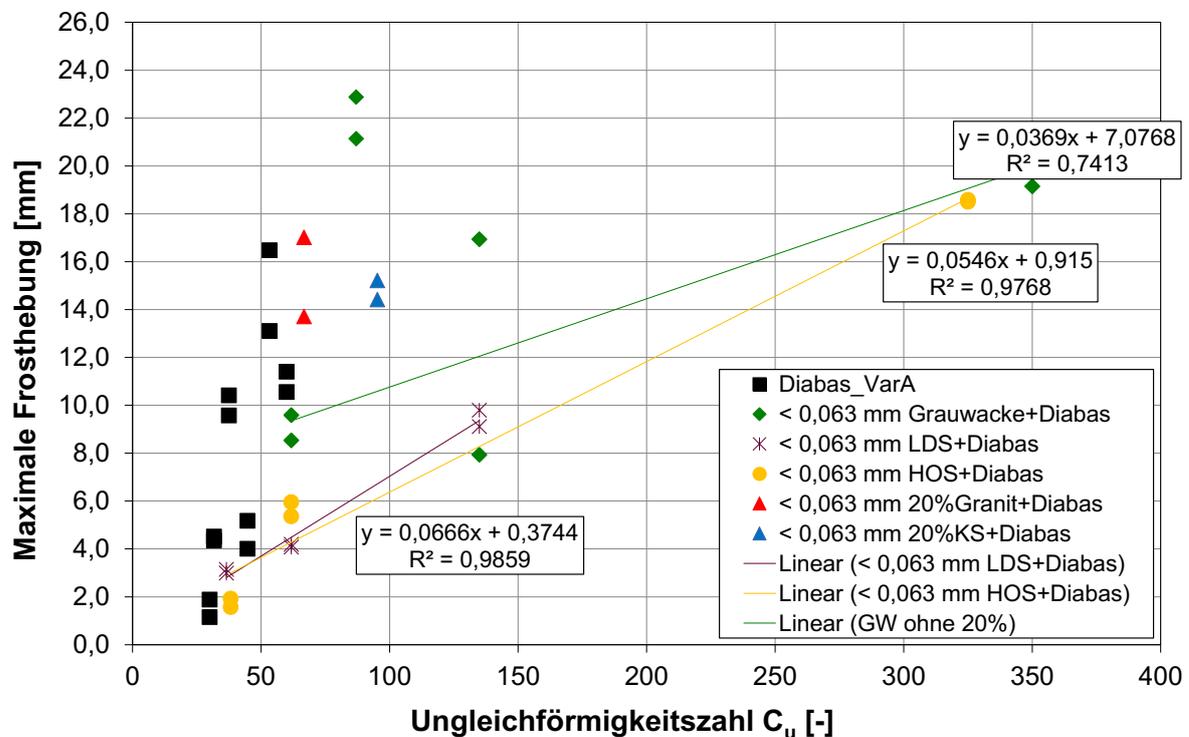


Abbildung 46: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Ungleichförmigkeitszahl

Die Gemische mit Diabas und die mit 20 %igem Anteil $< 0,063$ mm Granit/Kalkstein/Grauwacke wurden im oberen Bereich der Grenzsieblinie für Frostschutzschichten nach den [TL SoB-StB, 2004] zusammengesetzt. Die Maximalen Frosthebungen dieser Gemische schwanken zwischen 13 mm und 22,4 mm, wobei die Gemische mit Grauwacke höhere maximale Hebungen erzeugt haben. Die Gesteinsart scheint demnach die maximalen Hebungen ebenfalls zu beeinflussen.

Die Materialgemische mit Feinanteilen $< 0,063$ mm aus Grauwacke zwischen 5 M.-% und 15 M.-% wurden im Vergleich zu den oben genannten 20 M.-%-Gemischen tendenziell etwas gröber zusammengesetzt (vgl. Anhang A). Die Ungleichförmigkeit schwankt zwischen 61,8 und 350. Auch die Gemische mit Hochofen- und LD-Schlacke weisen vergleichbare Kornverteilungskurven auf. Ihre Ungleichförmigkeiten liegen zwischen 31,5 und 325. Bei diesen drei Materialgemischen korrelieren die Bestimmtheitsmaße im mittleren bis sehr guten Bereich mit der Maximalen Hebung bzw. der Bleibenden Hebung. Demnach beeinflusst eine stetige, eher feinkörnig zusammengesetzte Sieblinie diese beiden Kennwerte und kann zu höheren Maximalen und Bleibenden Hebungen führen.

Die Auswertung zu Anteilen der Kornklasse 5/22,4 mm im Gesamtgemisch unterstreichen dies. Abbildung 47 zeigt die Gegenüberstellung der Anteile der Kornklasse 5/22,4 mm zur Maximalen Frosthebung.

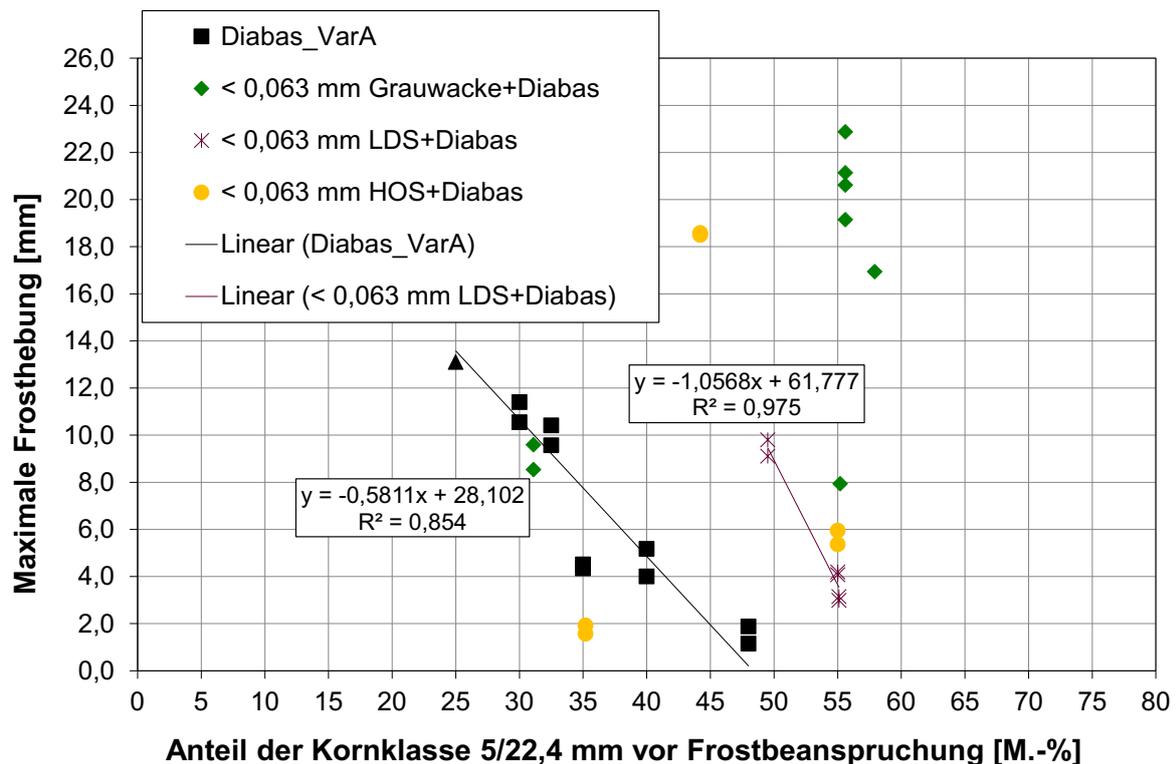


Abbildung 47: Gegenüberstellung vom Anteil der Kornklasse 5/22,4 mm und Maximaler Frosthebung

Mit zunehmendem Grobkornanteil sind die im Bodengefüge vorhandenen Hohlräume für die Volumenvergrößerung bei der Umwandlung von Wasser zu Eis ausreichend vorhanden, um geringere Hebungen, bezogen auf das Gesamtgemisch, zu erzeugen.

In Abbildung 48 ist die Bleibende Frosthebung der Ungleichförmigkeitszahl gegenübergestellt. Die Bleibenden Hebungen liegen zwischen 0,1 mm und 3,3 mm. Auch hier errechnen sich Bestimmtheitsmaße für die Materialgemische mit Hochofenschlacke von 0,95 und mit LD-Schlacke von 0,90.

Mit steigender Ungleichförmigkeitszahl, was einem weiter gestuften Materialgemisch gleichbedeutend ist, nehmen auch die bleibenden Hebungen tendenziell zu. Dies kann für eine Bewertung jedoch nicht herangezogen werden, da andere Einflussgrößen diesen Effekt überlagern. Beispielsweise sind innerhalb der Gruppe von Gemischen mit 20 %igem Feinanteil auch tendenziell feinkörnigere Korngrößenverteilung untersucht worden. Diese Gemische wiesen vergleichsweise keine höheren Bleibenden Hebungen auf.

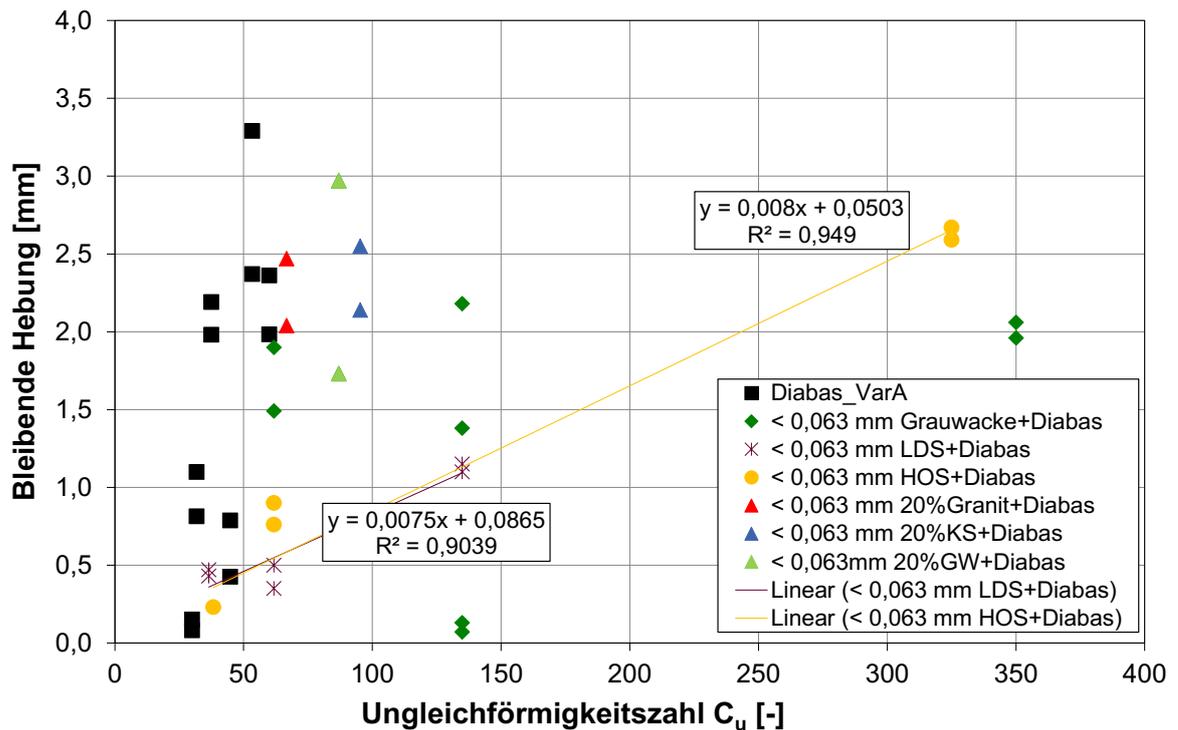


Abbildung 48: Gegenüberstellung von Bleibender Frosthebung und Ungleichförmigkeitszahl

5.2.3 Einfluss des Luftporenanteils

In Abbildung 49 ist der Kennwert Quellung innerhalb des 1. Tages dem Luftporenanteil des Gesamtvolumens gegenübergestellt.

Der Luftporenanteil der Materialgemische liegt zwischen 3,5 Vol.-% und 14,6 Vol.-%. Da die Streuungen der Kennwerte innerhalb der einzelnen Materialgruppen hoch sind, ist keine Regression möglich. Werden die Materialgruppen einzeln betrachtet, so ist kein Einfluss des Luftporenanteils auf die Quellung zu erkennen. Insgesamt betrachtet liegen jedoch nahezu alle dargestellten Werte innerhalb eines Bereiches. Tendenziell könnte demnach die Quellung der Materialien mit zunehmendem Luftporenanteil ansteigen.

Der Luftporenanteil hat keinen Einfluss auf den Beginn der Eislinnenbildung (Darstellung in Anhang A).

Abbildung 50 bis Abbildung 52 stellen die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag, dem 6. und 7. Tag sowie dem 7. und 8. Tag gegenüber.

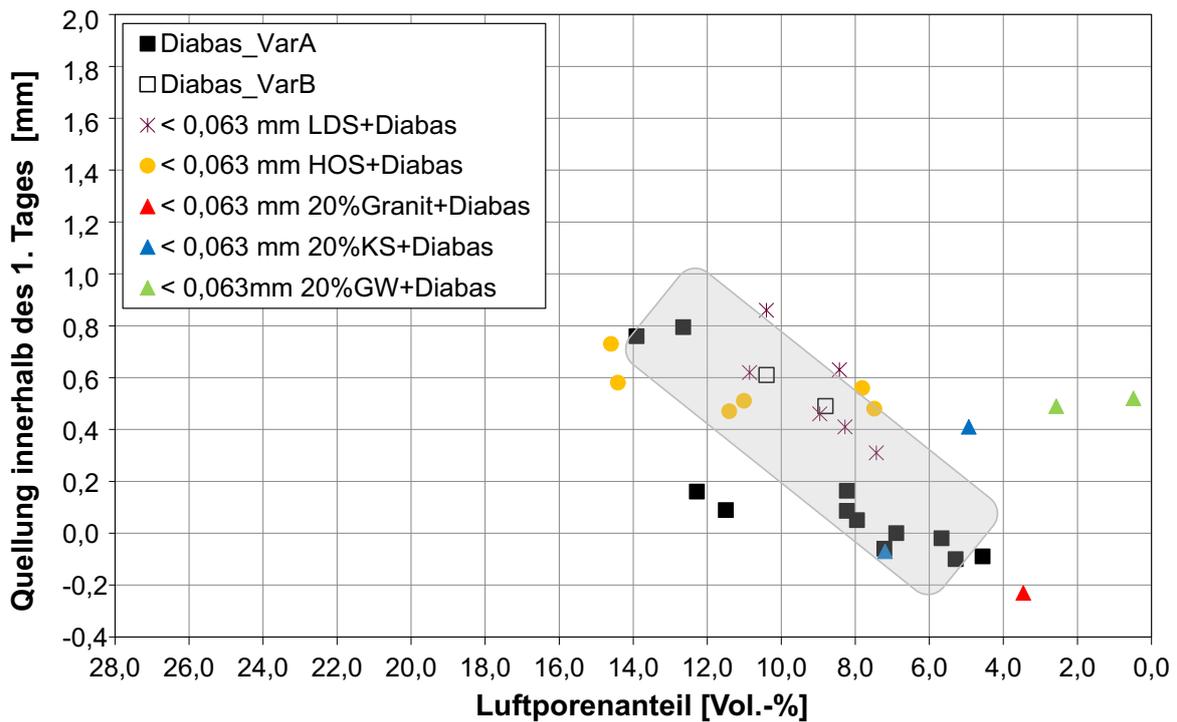


Abbildung 49: Gegenüberstellung von Quellung innerhalb des 1. Tages und Luftporenanteil

Die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag reichen von 0 mm/d bis 3,4 mm/d, zwischen dem 6. und 7. Tag von 0 mm/d bis 2,2 mm/d und zwischen dem 7. und 8. Tag von 0 mm/d bis 1,6 mm/d. Tendenziell steigen alle drei Hebungsgeschwindigkeiten bei sinkendem Luftporenanteil an. Bei den Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag errechnete sich aus den Ergebnissen der Gemische mit LD-Schlacke ein Bestimmtheitsmaß von 0,71. Die Streuung der Kennwerte nimmt jedoch mit fortschreitender Versuchsdauer zu. Für die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 6. und 7. Tag war es lediglich möglich einen Bereich des Luftporenanteils zu definieren, der die tendenzielle Zunahme der Hebungsgeschwindigkeit darstellen könnte.

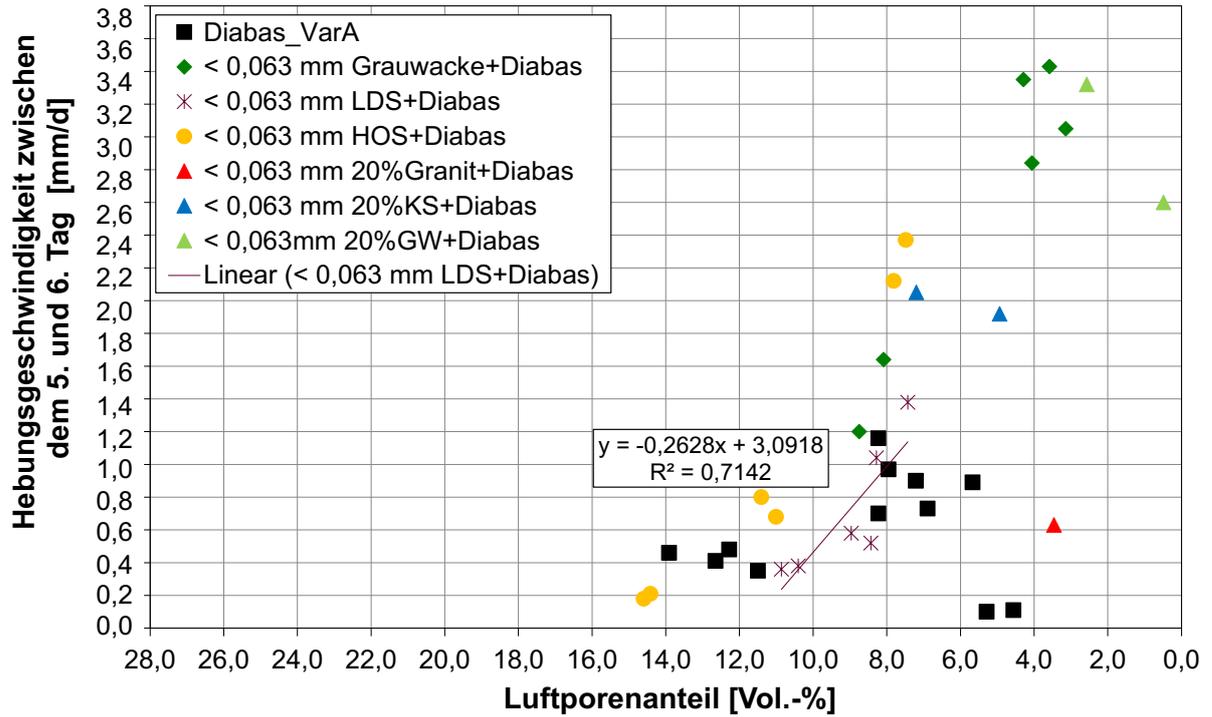


Abbildung 50: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und Luftporenanteil

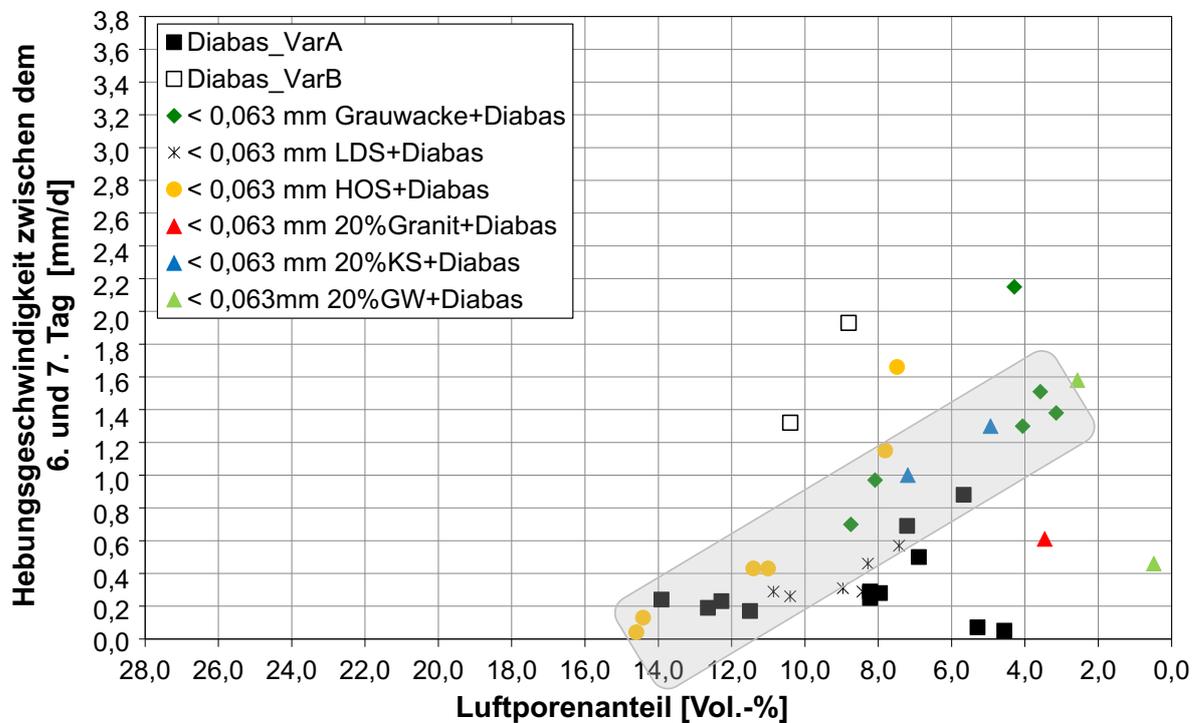


Abbildung 51: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und Luftporenanteil

Insgesamt betrachtet liegt ein eingeschränkter Einfluss des Luftporenanteils auf die Maximale Frosthebung vor.

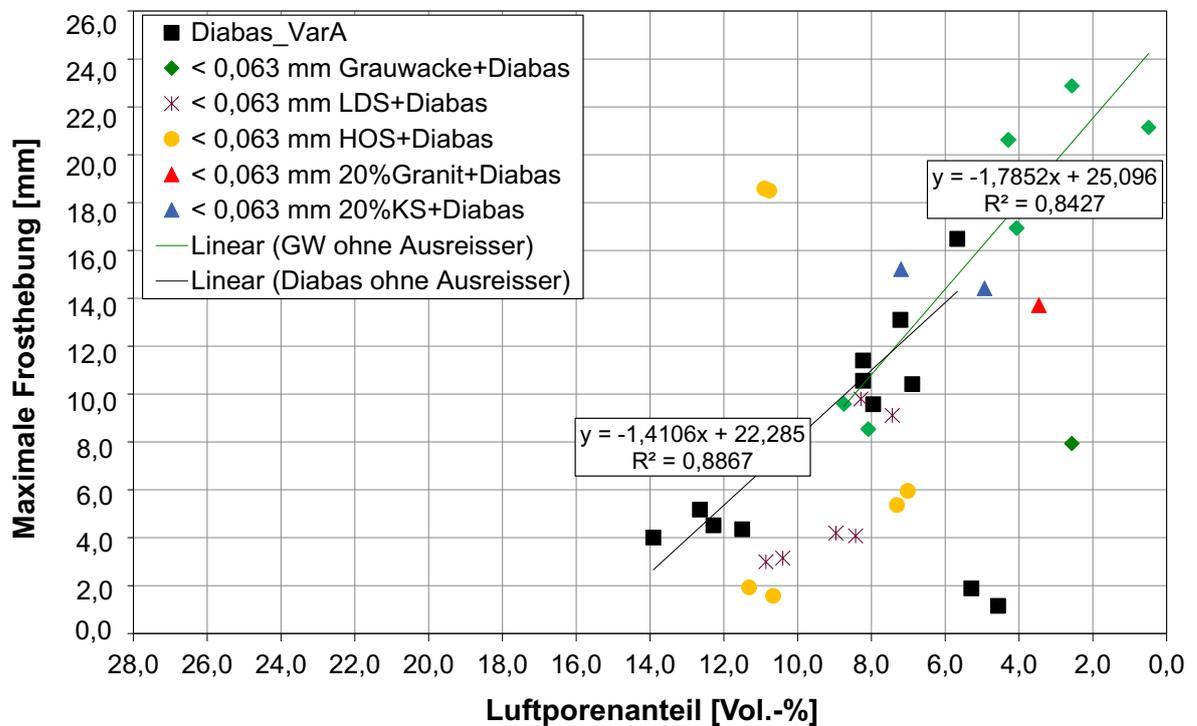


Abbildung 53: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Luftporenanteil

In Abbildung 54 sind die Bleibenden Hebungen dem Luftporenanteil gegenübergestellt. Die Bleibenden Hebungen reichen von 0,1 mm bis 3,3 mm. Insgesamt streuen die Hebungen, mit Ausnahme der Ergebnisse von Gemischen mit Diabas, stark. Diese Materialgemische korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,94. Grundsätzlich sind demnach die beiden Kennwerte Bleibende Hebung und Luftporenanteil voneinander abhängig.

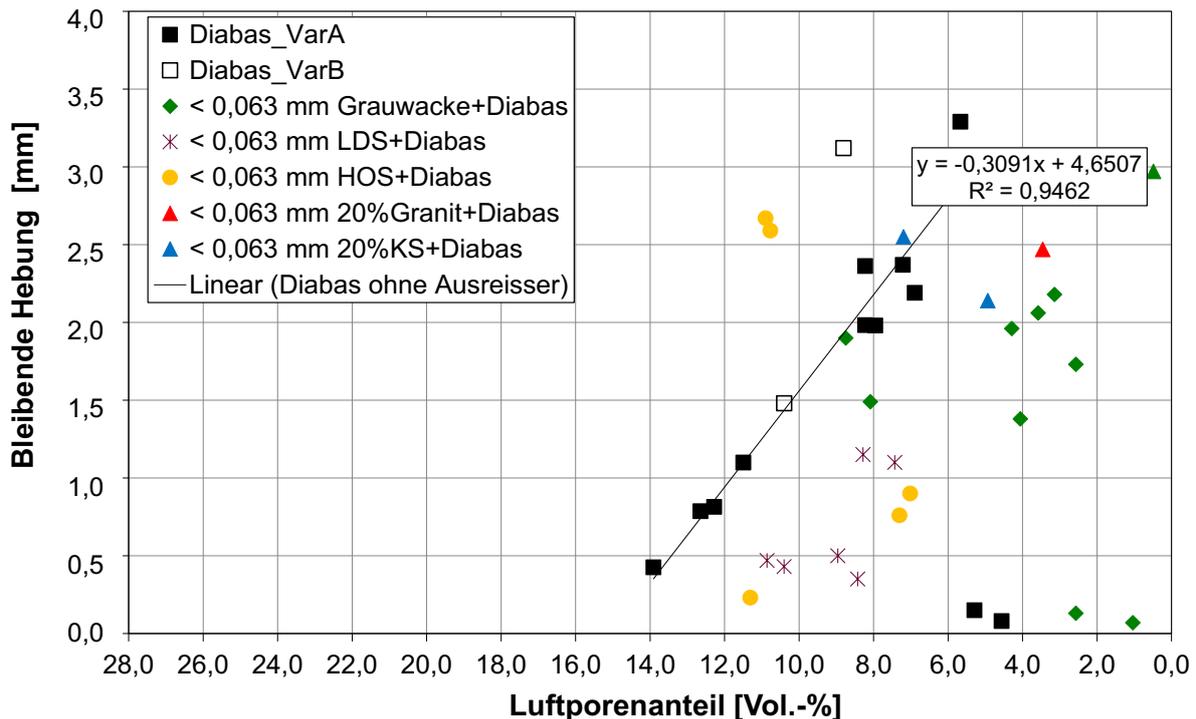


Abbildung 54: Gegenüberstellung von Bleibender Hebung und Luftporenanteil

Tendenziell weisen die Ergebnisse der Gemische mit einem Feinanteil von mehr als 20 M.-% eine höhere Resthebung auf, als die Gemische mit geringerem prozentualen Feinanteil. Beim Auftauprozess kommt es durch Kornumlagerungen zu einer Veränderung der optimalen Lagerungsdichte der Gesteinskörnungen im Probekörper. Dies könnte die höhere Bleibende Hebung hervorrufen.

5.3 Einfluss der Quellfähigkeit auf die Frosthebung

Zur Bestimmung des Einflusses der Quellfähigkeit auf die Frosthebung wurden Materialien ausgewählt, die sich in ihrem Sandanteil unterscheiden. Es wurden Gemische mit natürlichen und sortenreinen Recycling-Materialien gezielt zusammengesetzt. Darüber hinaus wurden verschiedene Gemische auf natürlicher und Recycling-Basis mit einbezogen. Verwendet wurden Diabas, Basaltlava, Granit, Kalkstein, Grauwacke, Quarzsandstein, Moräne, Lavaschlacke, Hochofen- und LD-Schlacke, RC-Kalksandstein und diverse RC-Baustoffgemische von Anlagen und Baustellen. Die Korngrößenverteilungen der Materialgemische sind in Anhang B enthalten.

Für die Auswertung der Einflussgröße Quellfähigkeit auf die Frosthebung wurden folgende Parameter aus dem Frosthebungsversuch verwendet:

- Quellung
- Hebungsgeschwindigkeit zwischen
 - dem 5. und 6. Tag
 - dem 6. und 7. Tag
 - dem 7. und 8. Tag
- Maximale Frosthebung

- Bleibende Hebung

Dem gegenübergestellt wurden die folgenden Materialkennwerte:

- Sandäquivalent (SE)
- Anteil der Kornklasse $< 0,063$ mm vor Frosthebung
- Kornanteile 5/22,4 mm
- Ungleichförmigkeitszahl
- Einbauwassergehalt
- Einbaudichte
- Ausbauwassergehalt
- Ausbaudichte
- Luftporenanteil (vgl. Kapitel 5.2)

Zur Beurteilung der jeweiligen Materialparameter auf die Kennwerte aus dem Frosthebungsversuch wurde zunächst eine einfache lineare Regression erstellt. Die Ausreißer wurden mittels statistischer Analyse herausgefiltert. In den Diagrammen dieses Kapitels sind wiederum nur die Korrelationen dargestellt, bei denen sich ein Bestimmtheitsmaß von $> 0,7$ errechnete.

Bei folgenden Materialparametern wurden keine Zusammenhänge zu den Frosthebungskennwerten festgestellt:

- Einbauwassergehalt
- Einbaudichte
- Ausbauwassergehalt
- Ausbaudichte

In Anhang B ist beispielhaft je ein Diagramm dieser Materialparameter dargestellt.

5.3.1 Einfluss des Sandäquivalent-Wertes

Abbildung 55 zeigt die Gegenüberstellung von Sandäquivalent (SE) und Quellung innerhalb des 1. Tages.

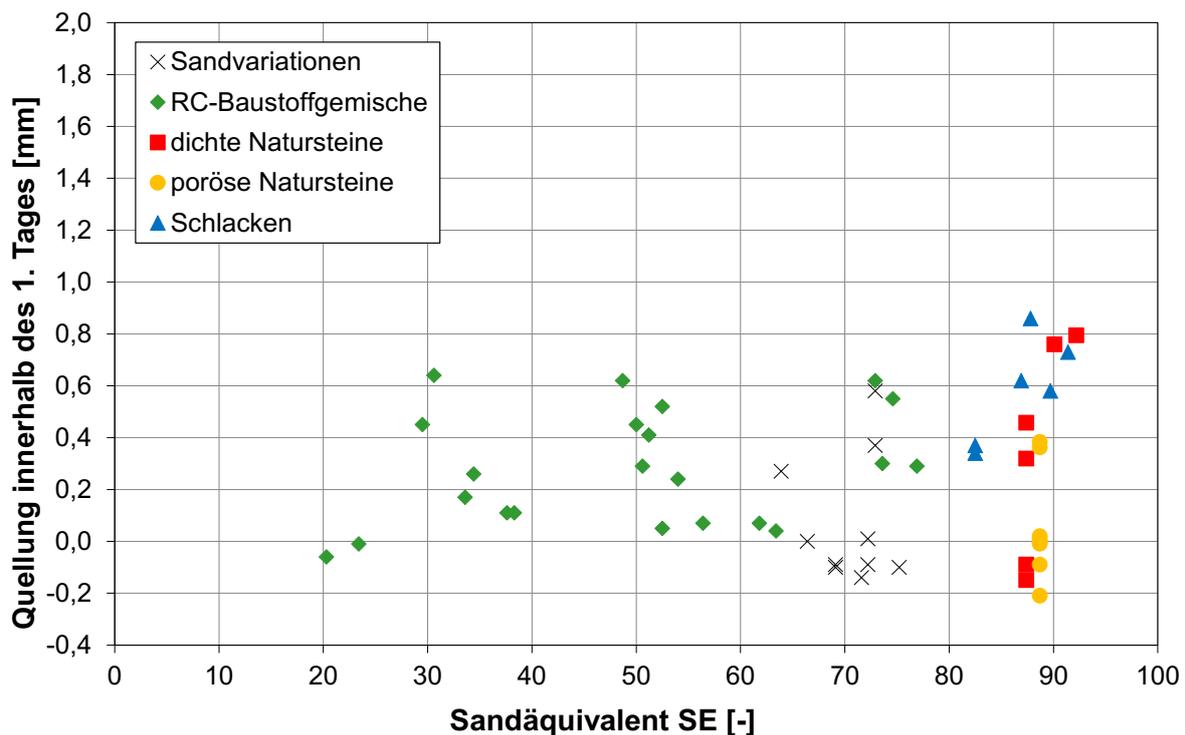


Abbildung 55: Gegenüberstellung von Sandäquivalent und Quellung innerhalb des 1. Tages

Die Ergebnisse des SE-Versuchs liegen zwischen 20,3 und 92,2. Alle Natursteingemische weisen Ergebnisse zwischen 60 und 90 auf, wobei die Quellungen zwischen -0,2 mm und 0,8 mm liegen.

Die RC-Baustoffgemische hingegen decken die Spannweite beim Sandäquivalent zwischen 20 und 75 ab. Diese Gemische quellen bis zu einer Hebung von 0,6 mm. Jedoch ist auch bei diesen Materialien mit niedrigem SE, die eher zum Quellen neigen sollten als die Materialien mit $SE > 50$, kein tendenzieller Anstieg der Hebungen infolge Quellung zu verzeichnen. Ein Einfluss des Materialparameters Sandäquivalent auf den Kennwert Quellung aus dem Frosthebungsversuch ist daher nicht gegeben.

Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigen die Gegenüberstellung von Sandäquivalent und der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. bzw. 7. und 8. Tag. Die Gegenüberstellung von Sandäquivalent und Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag bringt im Vergleich zur Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag (Abbildung 57) keine neuen Erkenntnisse und ist daher dem Anhang B beigelegt.

Die Hebungsgeschwindigkeiten liegen zwischen 0 mm/d und 2,1 mm/d. Zwischen dem 5. und 6. Versuchstag steigt die Hebungsgeschwindigkeit bei den RC-Baustoffgemischen an. Es konnte ein Bestimmtheitsmaß von 0,81 ermittelt werden. Bei der Analyse der stofflichen Zusammensetzung konnte keine kausale stoffliche Einflussgröße gefunden werden. Bei den Materialgemischen mit Schlacke wurden Korrelationen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,91 ermittelt. Dieser Einfluss des SE auf die Hebungsgeschwindigkeit lässt sich jedoch auf einen erhöhten Feinanteil, der in den Gemischen mit Geschwindigkeiten > 1 mm/d vorhanden ist, zurückführen. Innerhalb der Gruppe der Materialien aus Naturstein ließen sich

keine Regressionen zwischen dem SE und der Hebungsgeschwindigkeit korrelieren.

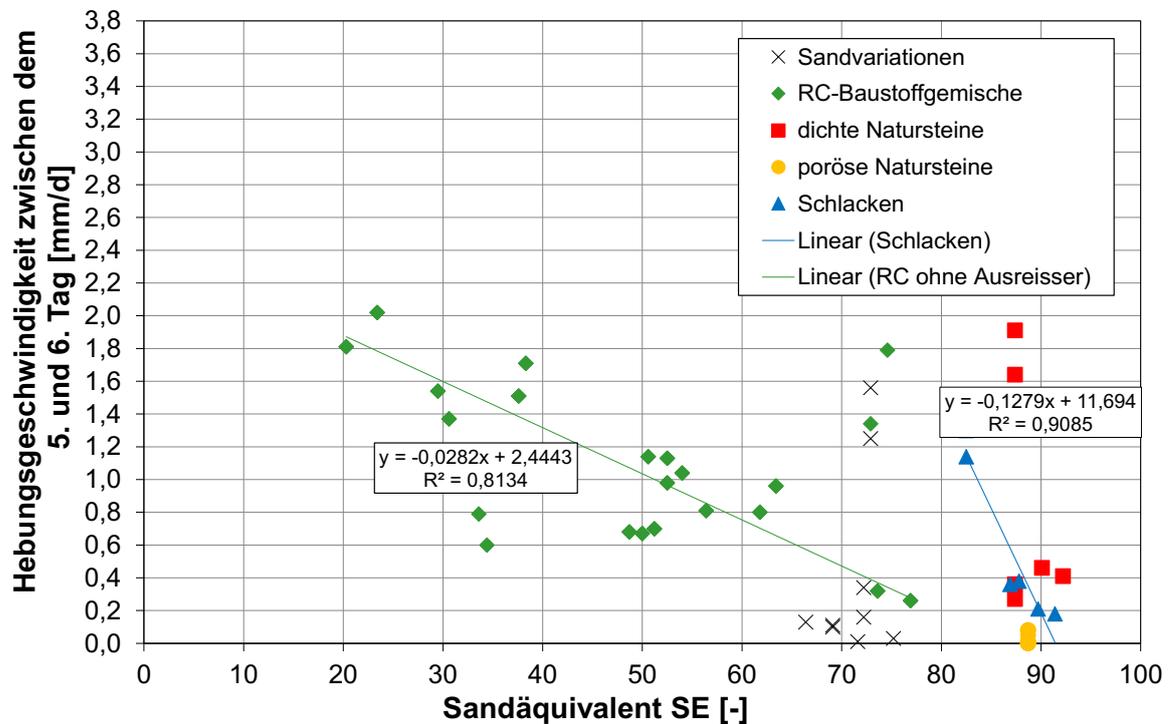


Abbildung 56: Gegenüberstellung von Sandäquivalent und Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag

Zwischen dem 7. und 8. Versuchstag hat sich das Hebungspotential in den RC-Baustoffgemischen erschöpft. Alle Materialgemische weisen Hebungsgeschwindigkeiten unter 0,8 mm/d auf. Daher ist davon auszugehen, dass bei diesen RC-Baustoffgemischen mit dem Materialparameter Sandäquivalent keine Einschätzung über den Hebungsverlauf während des Versuchs möglich ist.

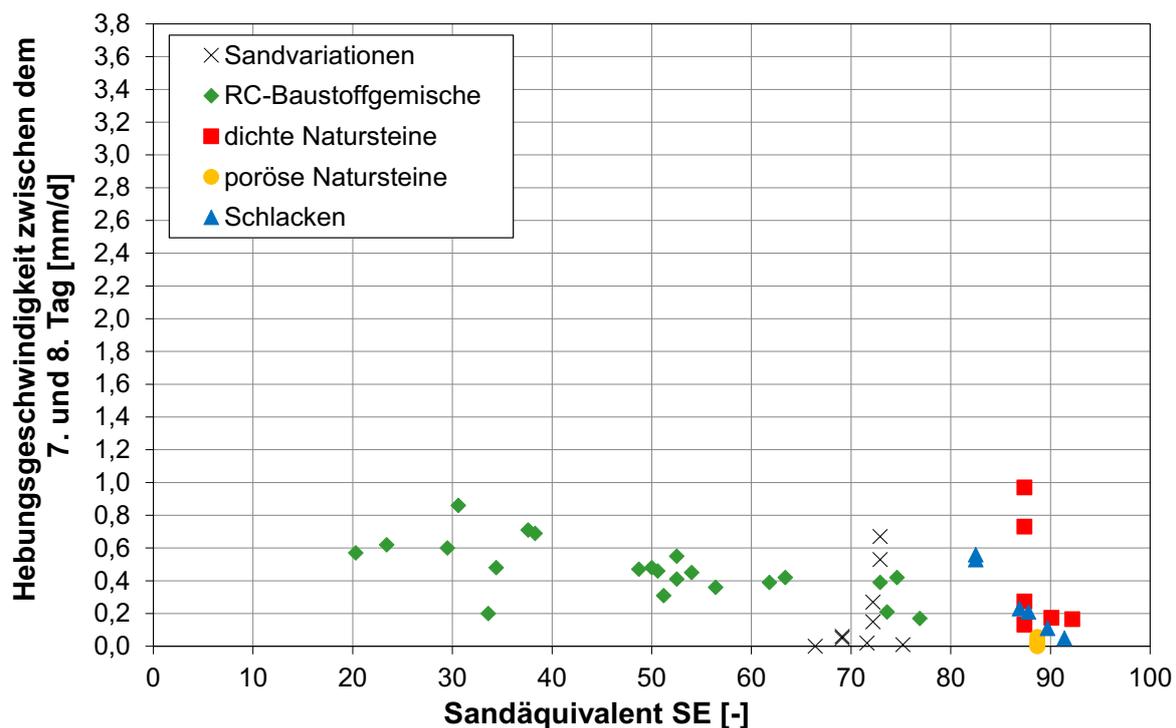


Abbildung 57: Gegenüberstellung von Sandäquivalent und Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag

In Abbildung 58 ist der Sandäquivalent der Maximalen Frosthebung gegenübergestellt.

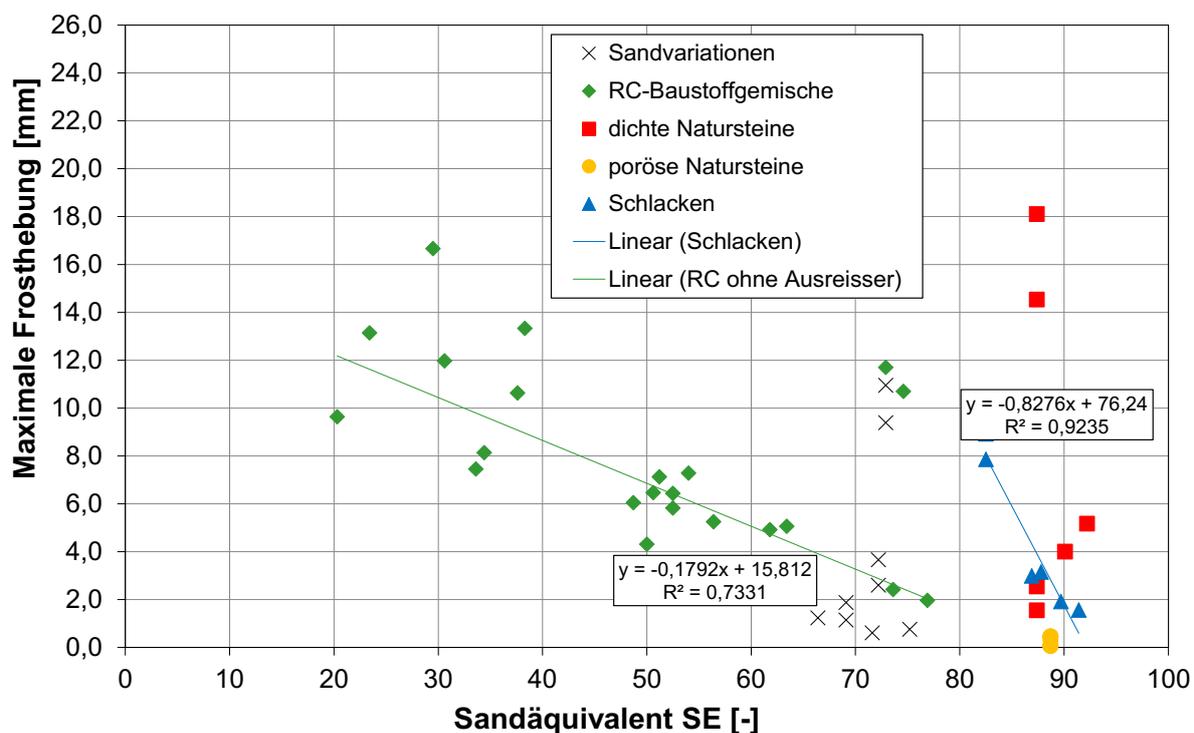


Abbildung 58: Gegenüberstellung von Sandäquivalent und Maximaler Frosthebung

In der Materialgruppe der RC-Baustoffgemische konnte ein Zusammenhang zwischen Maximaler Frosthebung und Sandäquivalent mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,73 ermittelt werden. Die maximalen Hebungen belaufen sich überwiegend auf unter 10 mm. Die sechs Materialgemische, die höhere Hebungen aufweisen, können weder anhand ihres Sandäquivalentes noch ihrer stofflichen Komponenten eindeutig gekennzeichnet werden.

Bei den Materialgemischen aus Schlacken ergab sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,92. Deutlich zu erkennen ist, dass die Maximale Frosthebung mit sinkendem Sandäquivalent zunimmt. Das gilt für die RC-Baustoffgemische ebenso wie für die Schlacken. Allerdings sind die Ergebnisse der Schlacken nicht eindeutig auf einen Anstieg der Anteile mit Quellpotential zurück zu führen. Hier kommt es zu Überlagerungen mit anderen Einflüssen, z.B. dem Feinanteil.

Abbildung 59 zeigt die Gegenüberstellung von Sandäquivalent und Bleibender Hebung.

Die Hebungen nach Versuchsende liegen überwiegend unter 1,5 mm. Die RC-Baustoffgemische mit den Bleibenden Hebungen > 1,5 mm sind auch durch die tendenziell höheren Maximalen Hebungen aufgefallen. Die zwei Materialgemische mit Schlacken und natürlichen Gesteinskörnungen mit Hebungen > 1,5 mm enthalten einen deutlich höheren Kornanteil < 0,063 mm. Ein eindeutiger Einfluss des Materialkennwertes Sandäquivalent auf die Bleibende Hebung ist nicht vorhanden.

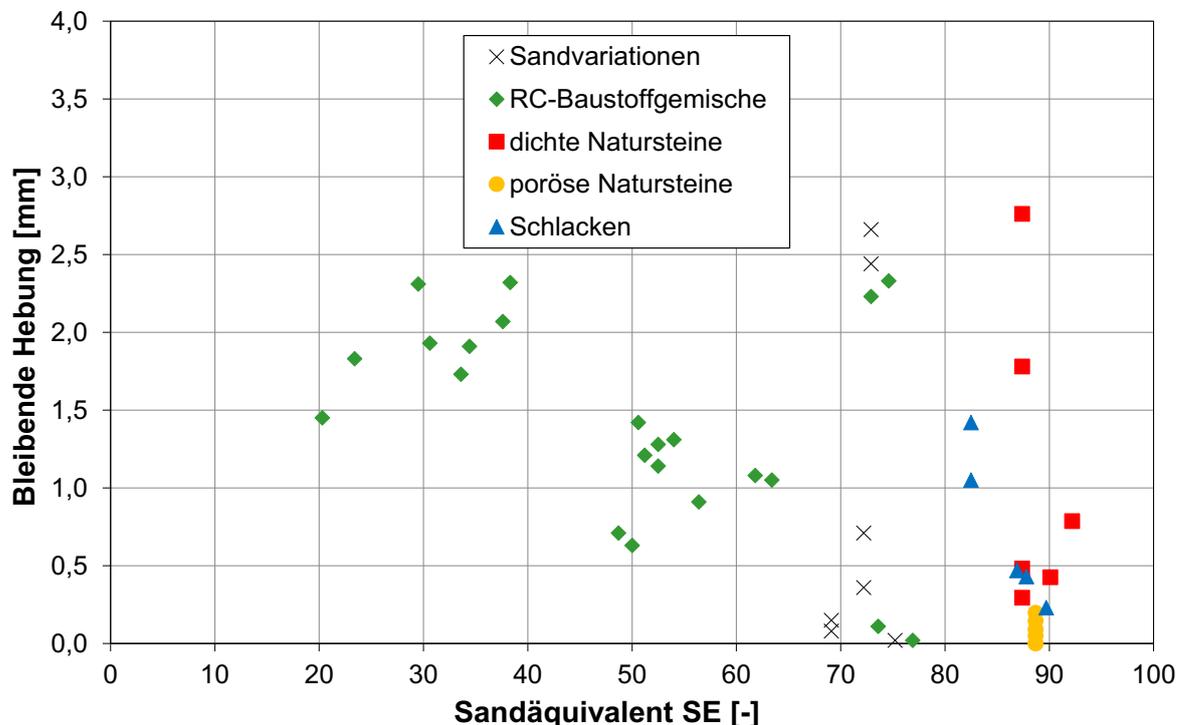


Abbildung 59: Gegenüberstellung von Sandäquivalent und Bleibender Hebung

5.3.2 Einfluss der Korngrößenverteilung

In Abbildung 60 ist die Quellung innerhalb des 1. Tages dem Anteil < 0,063 mm im Gesamtgemisch gegenübergestellt. Ein Großteil der untersuchten Materialien liegt im Bereich bis 7 M.-% Anteil < 0,063 mm. Deren Quellung reicht dabei von -0,2 mm bis 0,8 mm. Bei einigen Materialien wurden Gemische mit höheren Feinkornanteilen zusammengesetzt.

Es konnte mit Ausnahme der Gemische mit dichten Natursteinen (Bestimmtheitsmaß 0,76) kein Einfluss des Parameters Anteil < 0,063 mm auf die Quellung im Frosthebungsversuch gefunden werden.

Das ermittelte Bestimmtheitsmaß bei den Gemischen mit dichten Natursteinen ist jedoch nicht plausibel. Dieser vermeintliche Anstieg der Quellung innerhalb des 1. Tages ist der vergleichsweise hohen Einbaudichte dieser Gemische geschuldet (Abbildung 61), was die Durchlässigkeit des Gemisches verringert. Eine verzögerte Bildung der Eislinse durch eine eventuelle hohe kapillare Steighöhe konnte jedoch nicht festgestellt werden (Abbildung 62).

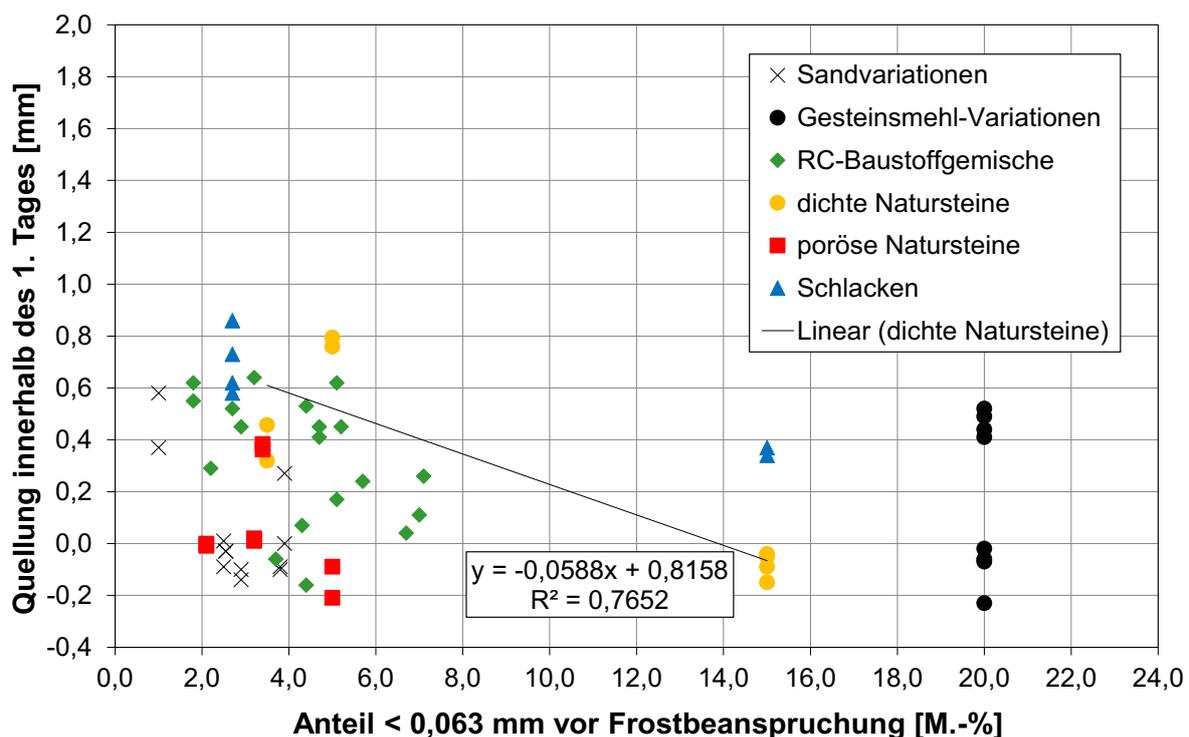


Abbildung 60: Gegenüberstellung von Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung und Quellung innerhalb des 1. Tages

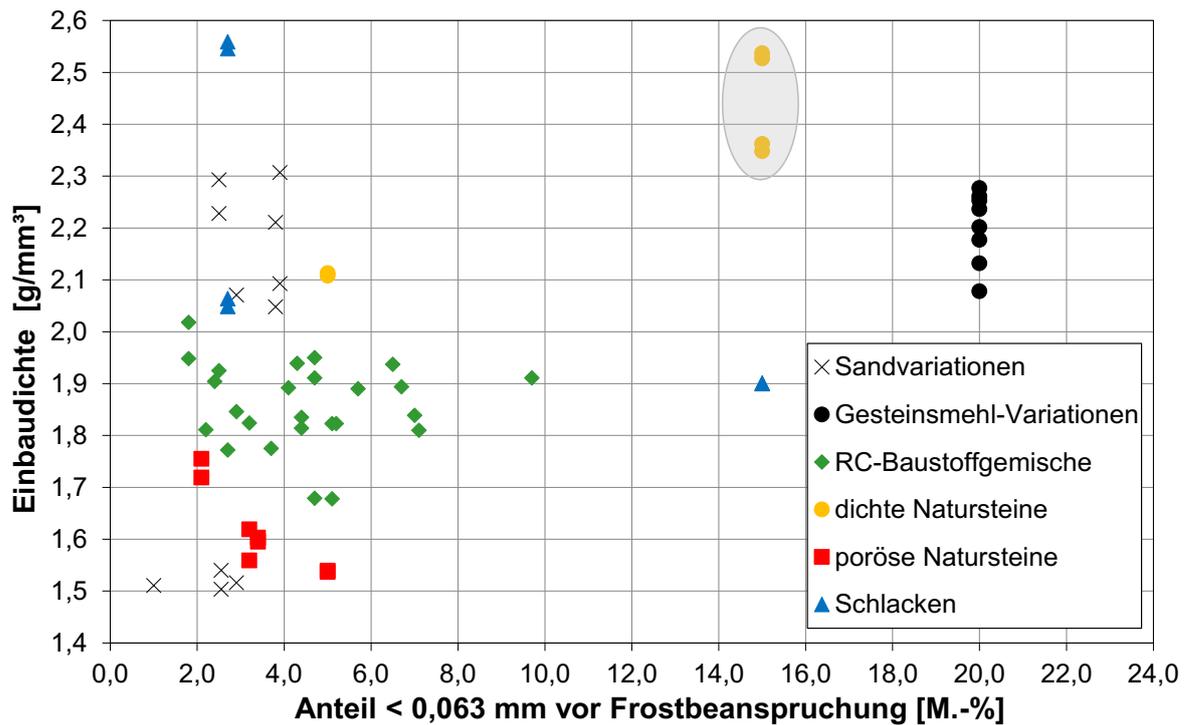


Abbildung 61: Gegenüberstellung von Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung und Einbaudichte

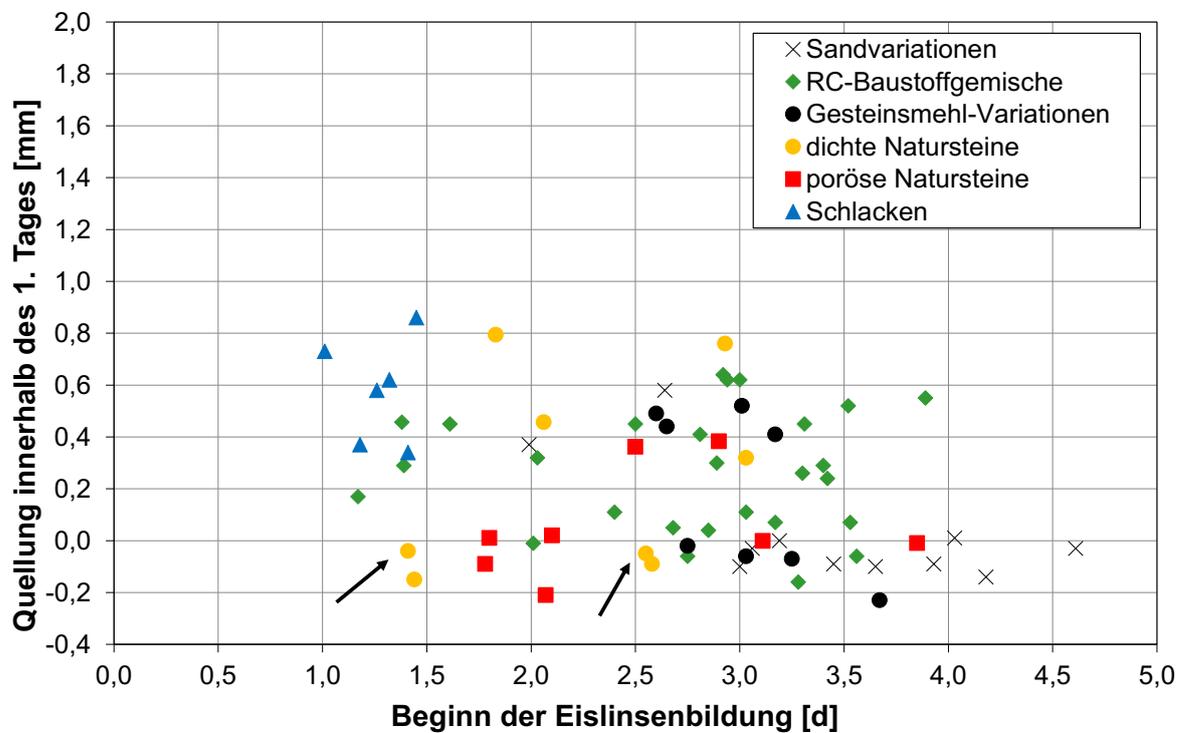


Abbildung 62: Gegenüberstellung von Quellung innerhalb des 1. Tages und Beginn der Eislinsenbildung (bezogen auf den Versuchsbeginn)

In Abbildung 63 sind die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag dem Anteil $< 0,063$ mm vor Frostbeanspruchung gegenübergestellt.

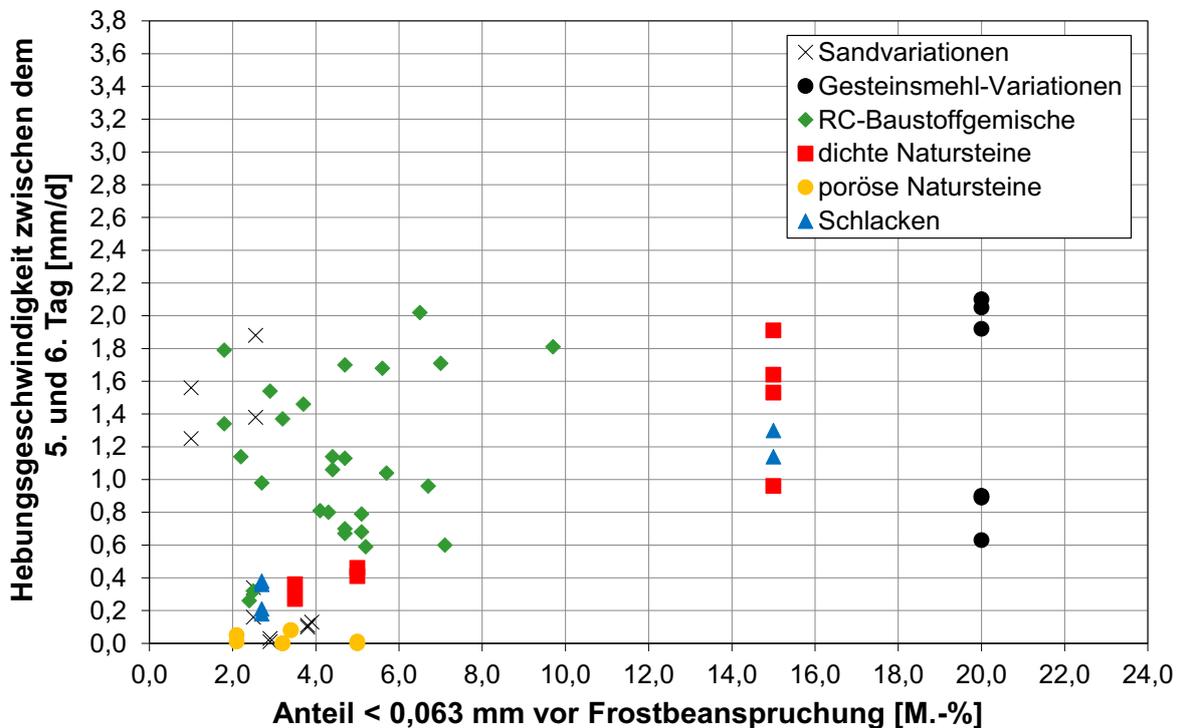


Abbildung 63: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und Anteil $< 0,063$ mm vor Frostbeanspruchung

In den vorangegangenen Auswertungen wurde bereits lediglich an den RC-Baustoffgemischen ein Quellpotential festgestellt. Bezogen auf den Materialparameter Anteil $< 0,063$ mm vor Frostbeanspruchung zeigen sich innerhalb der Materialgruppe RC-Baustoffgemische keine Einflüsse auf die Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag. Auch bei der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag sowie zwischen dem 7. und 8. Tag konnten keine Einflüsse gefunden werden. Die Diagramme sind in Anhang B beigefügt.

Abbildung 64 zeigt die Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Anteil $< 0,063$ mm vor Frostbeanspruchung.

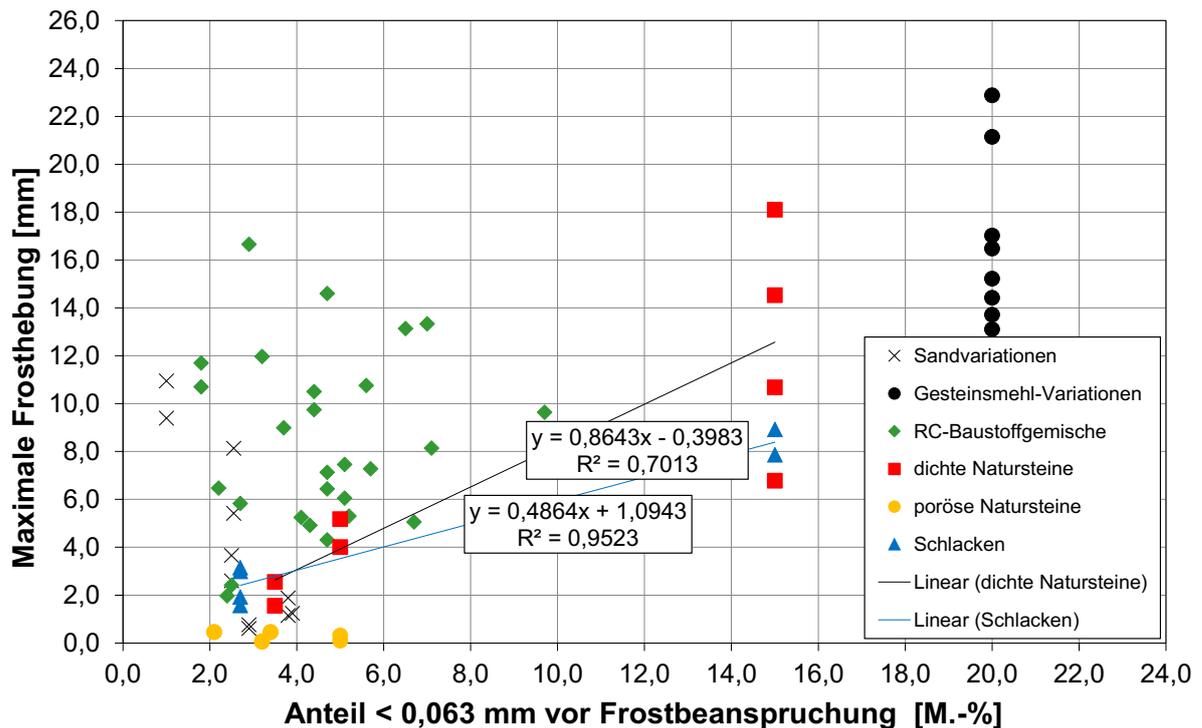


Abbildung 64: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

Die maximalen Frosthebungen liegen zwischen 0 mm und 22,9 mm. Die untersuchten Materialgemische zeigen keine Zusammenhänge zwischen den beiden Parametern, mit Ausnahme der Gemische mit dichten Natursteinen und Schlacken. Hier konnten Korrelationswerte von 0,7 (Naturstein) und 0,95 (Schlacke) ermittelt werden. Diese Zusammenhänge sind jedoch auf die hohen Feinkornanteile und nicht auf die Quellung zurückzuführen.

Vergleichbare Ergebnisse zeigen sich bei den Gegenüberstellungen des Frosthebungsparameter Bleibende Hebung zum Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung (Abbildung 65). Die Bleibenden Hebungen betragen maximal 3,5 mm.

Auch zwischen den Frosthebungsparametern und dem Kornanteil 5/22,4 mm oder der Ungleichförmigkeitszahl konnten keine Korrelationen festgestellt werden. Diagramme der Material- und Frosthebungsparameter sind dem Anhang B beigefügt.

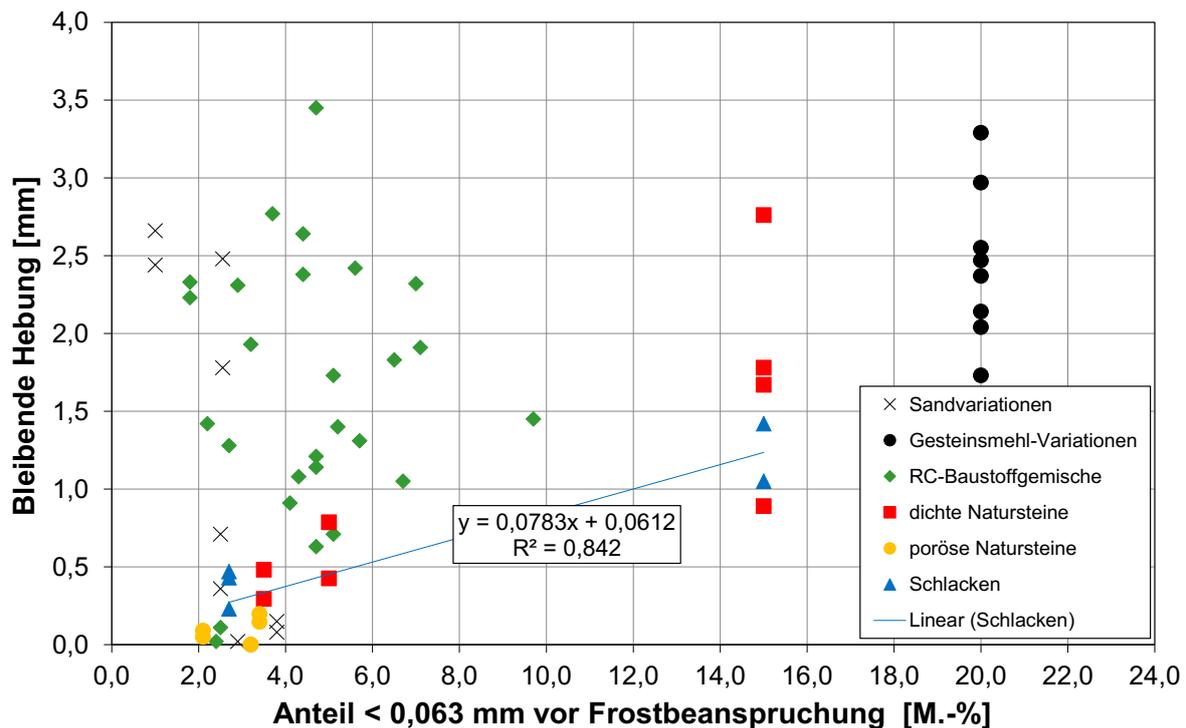


Abbildung 65: Gegenüberstellung von Bleibender Hebung und Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung

5.3.3 Einfluss des Luftporenanteils

In Abbildung 66 ist die Quellung innerhalb des 1. Tages dem Luftporenanteil gegenübergestellt. Die Quellungen liegen zwischen -0,2 mm und 0,9 mm und streuen je nach Materialgemisch stark.

Eine Korrelation zeigt sich lediglich bei den dichten Natursteinen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,92. Mit zunehmendem Luftporenanteil nimmt die Quellung zu, da diese Materialgemische ein offeneres, stärker durchlässiges Gefüge haben.

Dies spiegelt sich auch bei den ermittelten Einbaudichten wider. In Abbildung 67 ist der Luftporenanteil den Einbaudichten gegenübergestellt. Alle Gemische mit dichten Natursteinen weisen mit zunehmendem Luftporenanteil niedrigere Einbaudichten auf. Dies begünstigt den Wasserzutritt in den Probekörper und den Quellprozess bei diesen Materialien.

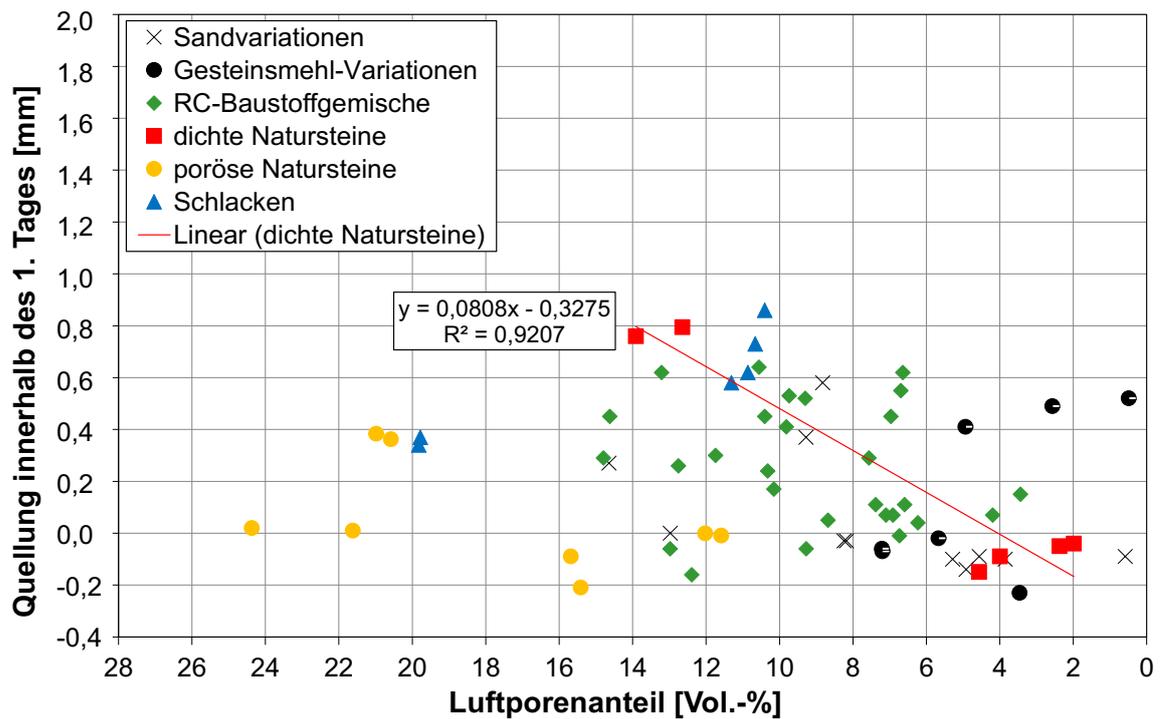


Abbildung 66: Gegenüberstellung von Luftporenanteil und Quellung innerhalb des 1. Tages

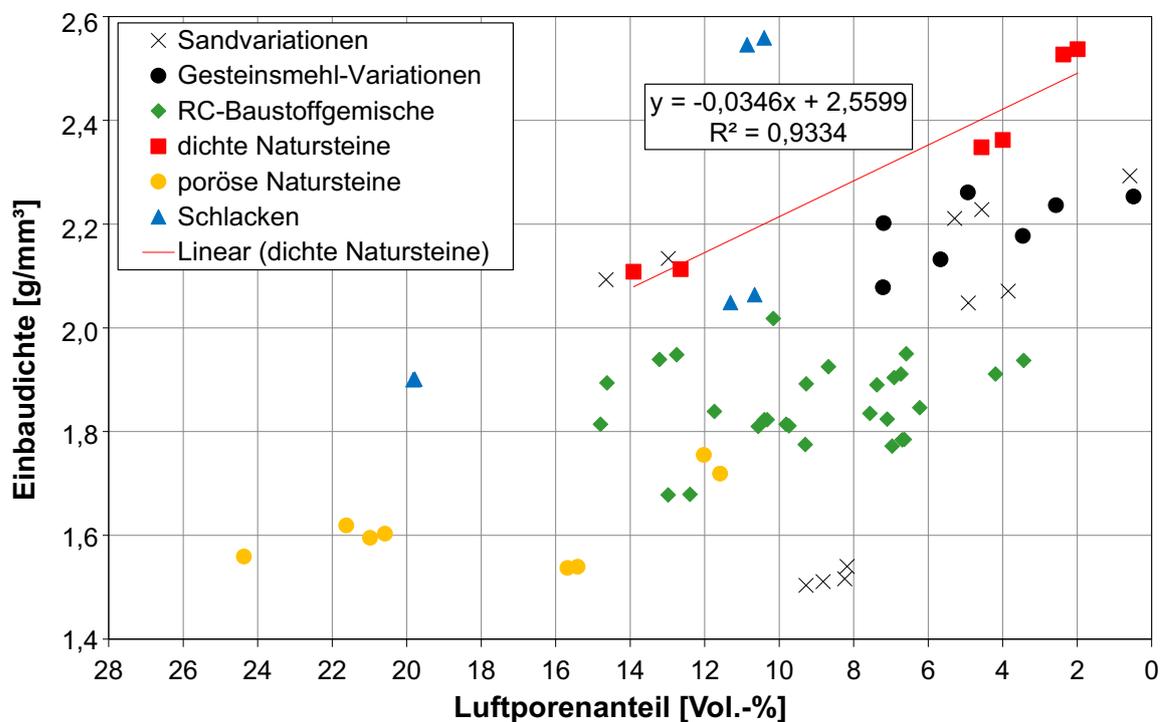


Abbildung 67: Gegenüberstellung von Luftporenanteil und Einbaudichte

Abbildung 68 zeigt die Gegenüberstellung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und dem Luftporenanteil.

Die Materialgemische heben sich im betrachteten Versuchszeitraum überwiegend zwischen 0 mm/d und 2,0 mm/d. Korrelationen innerhalb der Materialgemische konnten aufgrund der großen Streuungen nicht berechnet werden. Die natürlichen Materialgemische, die anfänglich in Abhängigkeit vom Luftporenanteil stärker gequollen sind, weisen keine Besonderheiten in der Hebungsgeschwindigkeit auf. Gleiches zeigt sich bei der Gegenüberstellung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und dem Luftporenanteil, welche in Anhang B dargestellt ist.

Die anfänglich hohen Hebungsgeschwindigkeiten nehmen im Laufe des Versuchs ab, so dass zum Ende der Befrostungsphase alle Gemische eine Hebungsgeschwindigkeit von unter 1 mm/d aufweisen (Abbildung 69).

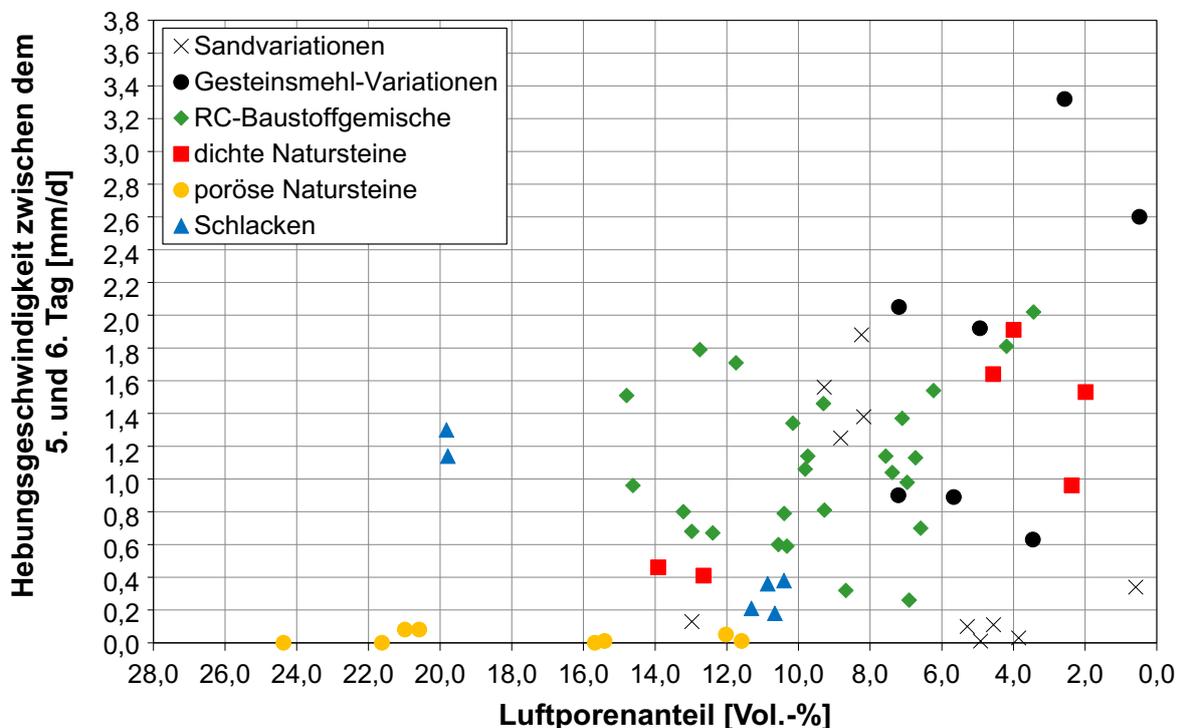


Abbildung 68: Gegenüberstellung von Luftporenanteil und Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag

In Abbildung 70 ist die Maximale Frosthebung und in Abbildung 71 die Bleibende Hebung dem Luftporenanteil gegenübergestellt.

Die Maximalen Frosthebungen betragen 0 mm bis 22,9 mm. Innerhalb der untersuchten Materialgemische sind große Streuungen der Messergebnisse vorhanden, daher lassen sich keine Korrelationen errechnen. Insgesamt betrachtet nehmen jedoch die maximalen Frosthebungen mit sinkendem Luftporenanteil zu. Ab einem Luftporenanteil von etwa 14 Vol.-% kann der vorhandene Porenraum die Volumenausdehnung des Eises nicht mehr aufnehmen. Die Maximalen Frosthebungen steigen an.

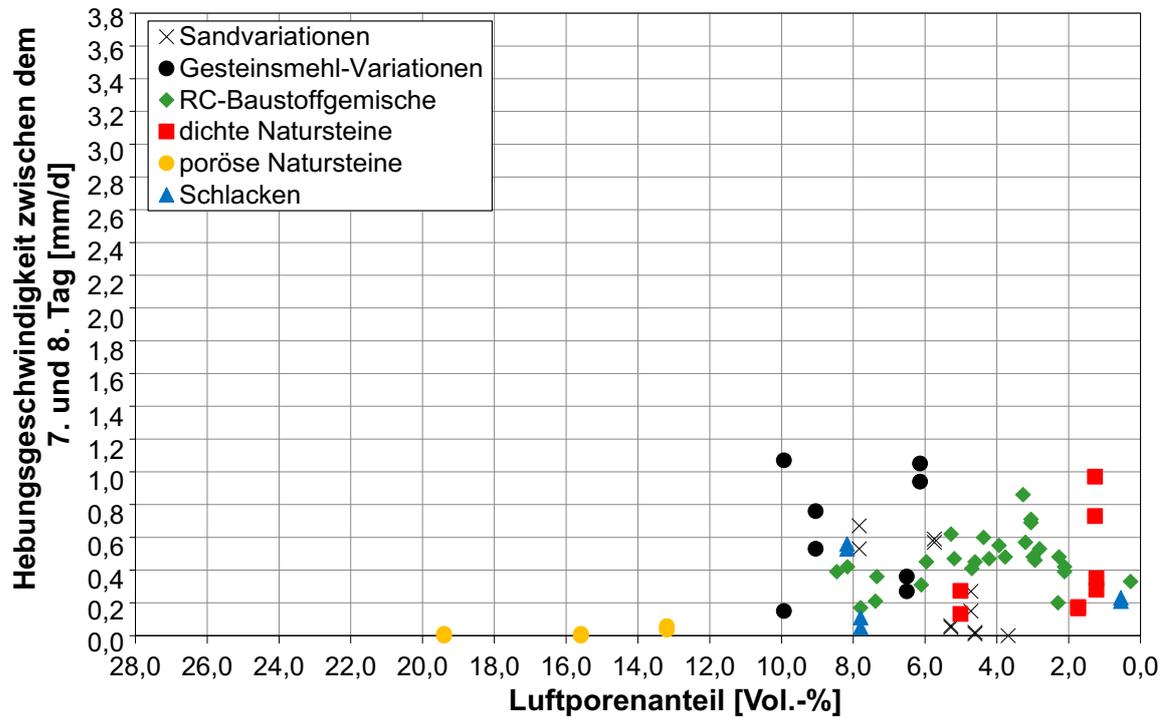


Abbildung 69: Gegenüberstellung von Luftporenanteil und Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag

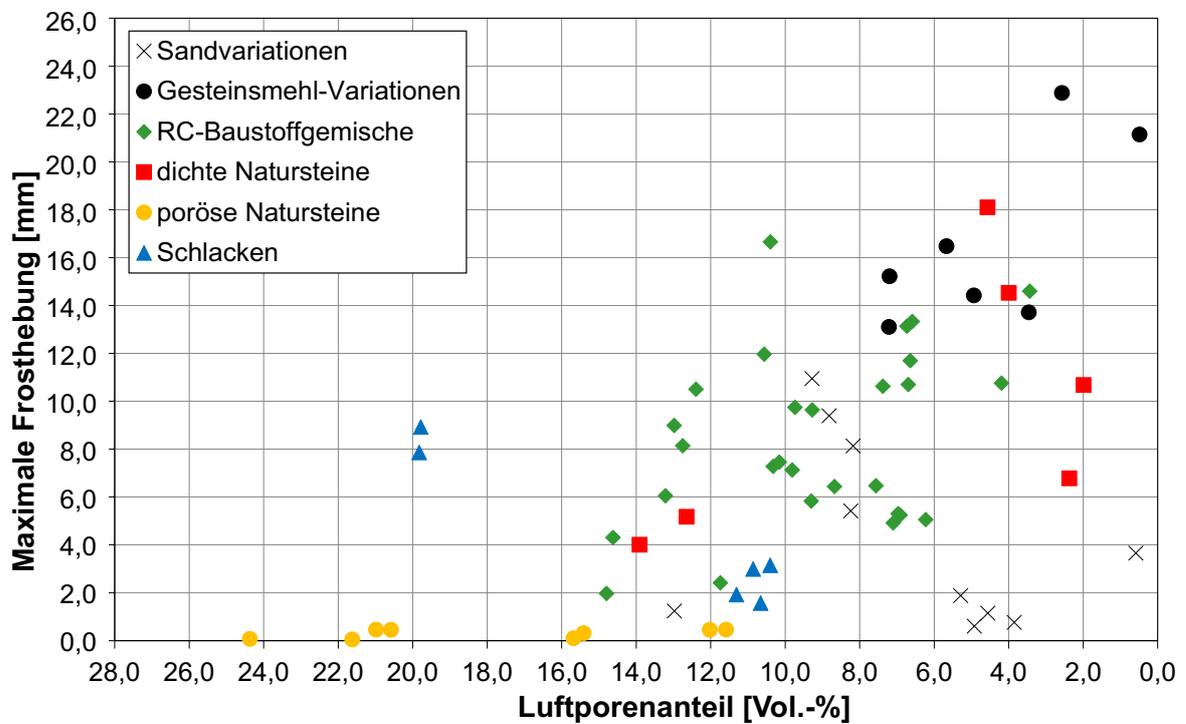


Abbildung 70: Gegenüberstellung von Luftporenanteil und Maximaler Frosthebung

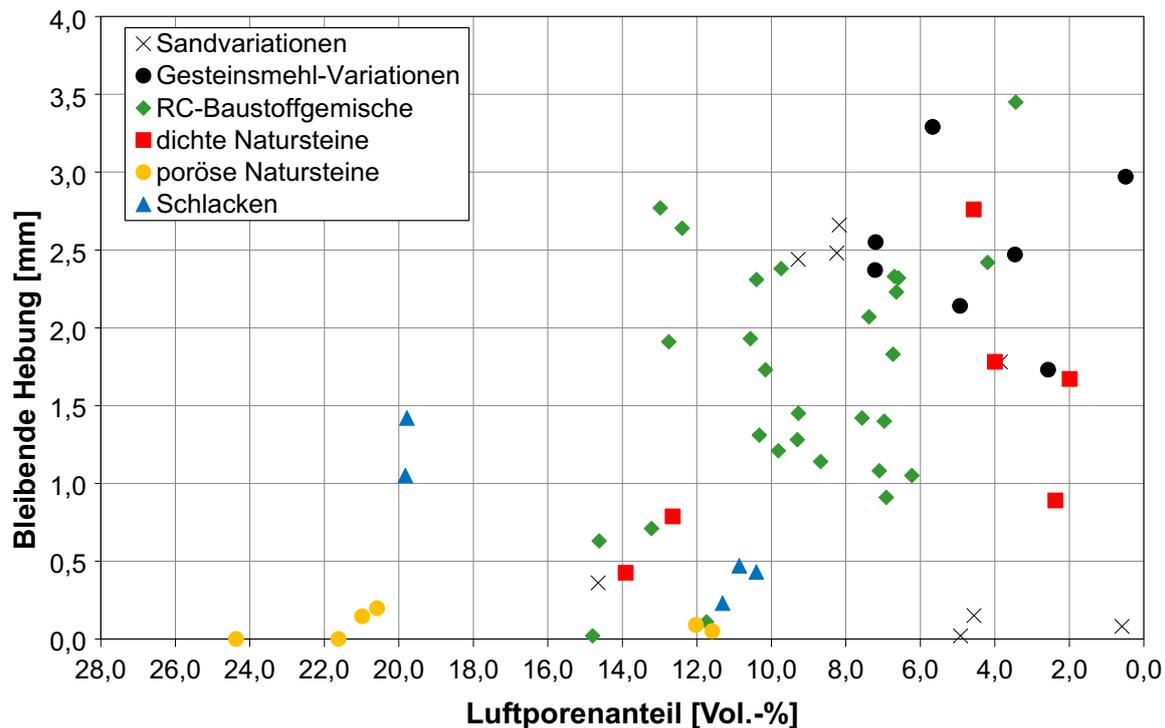


Abbildung 71: Gegenüberstellung von Luftporenanteil und Bleibender Frosthebung

Die Bleibenden Hebungen liegen zwischen 0 mm und 3,5 mm. Auch diese Ergebnisse der Materialgemische unterliegen starken Streuungen. Es zeigen sich keine Abhängigkeiten zwischen der Bleibenden Hebung und dem Luftporenanteil.

5.4 Einfluss der Porosität auf die Frosthebung

Um den Einfluss der Porosität auf die Frosthebung abzuleiten, wurden Frosthebungsversuche mit natürlichen und Recycling-Materialgemischen unterschiedlicher Porosität und identischer Korngrößenverteilung durchgeführt. Als Referenz diente ein Gesteinskörnungsgemisch aus Diabas. Bei gleichbleibender Zusammensetzung bis zu einer Korngröße von 2 mm, wechselt die Gesteinsart im Grobkornbereich zwischen 2 mm und 22,4 mm. Verwendet wurden Grauwacke, Lavaschlacke, Basaltlava, RC-Kalksandstein, ein RC-Baustoffgemisch, Hochofen- und LD-Schlacke. In diese Analysen miteinbezogen wurden Untersuchungsergebnisse von je drei Recycling-Vormauer- und Recycling-Hintermauerziegeln. Eine Tabelle der Korngrößenverteilungen der Materialgemische ist in Anhang C enthalten.

Um eine Aussage über die Porenverteilung zu erhalten, wurden Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie herangezogen.

Für die Auswertung der Einflussgröße Porosität auf die Frosthebung wurden folgende Parameter aus dem Frosthebungsversuch verwendet:

- Quellung
- Beginn der Eislinsenbildung (bezogen auf den Versuchsbeginn)

- Hebungsgeschwindigkeit zwischen
 - dem 5. und 6. Tag
 - dem 6. und 7. Tag
 - dem 7. und 8. Tag

- Maximale Frosthebung
- Bleibende Hebung

Dem gegenübergestellt wurden die folgenden Materialkennwerte:

- Anteil kapillarfähiger Poren aus Quecksilberporosimetrie (vgl. Kapitel 4.4)
- Ungleichförmigkeitszahl
- Einbauwassergehalt
- Einbaudichte
- Ausbauwassergehalt
- Ausbaudichte
- Luftporenanteil

Für die Beurteilung des Einflusses der einzelnen Materialkennwerte auf die Parameter aus dem Frosthebungsversuch wurden einfache lineare Regressionen erstellt. Die Ausreißer wurden mittels statistischer Analyse herausgefiltert. Die mit einem Bestimmtheitsmaß von $> 0,7$ wurden in die Diagramme dieses Kapitels aufgenommen.

Bei folgenden Materialparametern wurden keine Zusammenhänge zu den Frosthebungskennwerten festgestellt:

- Einbauwassergehalt
- Einbaudichte
- Ausbauwassergehalt
- Ausbaudichte

In Anhang C ist beispielhaft je ein Diagramm dieser Materialparameter dargestellt.

5.4.1 Einfluss der berechneten Gesamtporosität

Die Ergebnisse der Porositäten aus Quecksilber-Intrusion sind nicht mit geringeren Streuungen behaftet als die Porositätsberechnungen aus den Dichten (vgl. Kapitel 4.5). Gegenüberstellungen zu den Frosthebungskennwerte brachten keine neuen Erkenntnisse. Daher wurde auf eine ausführlichere Auswertung dieses Kennwertes bezogen auf die Frosthebungskennwerte an dieser Stelle verzichtet. In Anhang C sind die Diagramme dargestellt.

5.4.2 Einfluss aus kapillarfähigen Porenanteil

Aus den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie kann die Porenraumverteilung als Funktion des Porenradius berechnet werden. Die übliche Darstellung dieser Verteilung für die untersuchten Materialien befindet sich in Kapitel 4.4.

Grundsätzlich sind Poren ab einer Größe von 100 nm kapillarfähig. Bei den Auswertungen der Porenraumverteilungen der Materialien zeigte sich aber eine Anhäufung von Porenraum ab einer Größe von etwa 3.500 nm. Daher wurde bei den Auswertungen zum Einfluss des kapillarfähigen Porenanteils der Porenraum im Bereich von 3.500 bis 100.000 nm mit herangezogen. Das Porenvolumen zwischen dem Porendurchmesser von 100 bis 100.000 nm bzw. 3.500 bis 100.000 nm wurde durch Aufsummieren bestimmt.

In Abbildung 72 ist die Quellung innerhalb des 1. Tages der Summe des Porenvolumens innerhalb der Porengrößen von 100 nm bis 100.000 nm gegenübergestellt.

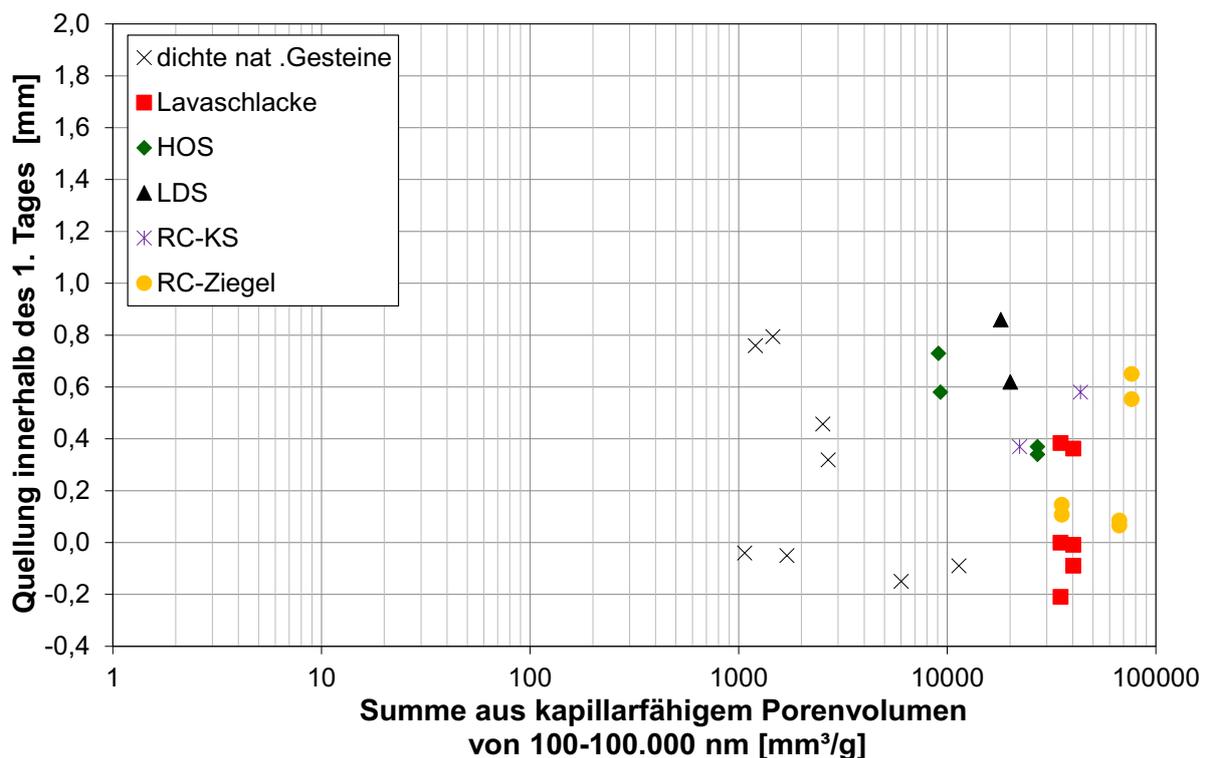


Abbildung 72: Gegenüberstellung von Quellung innerhalb des 1. Tages und Summe des kapillarfähigen Porenvolumen von 100 nm bis 100.000 nm

Das Volumen des kapillarfähigen Porenraums beträgt bei den dichteren Materialien 1.000 mm³/g bis 11.375 mm³/g, bei den poröseren Materialien liegt das Volumen zwischen 9.074 mm³/g und 76.542 mm³/g. Unabhängig, ob es sich um dichteres oder poröseres Material handelt, nimmt die Quellung tendenziell mit zunehmendem Porenvolumen ab. Die gemessenen Quellungen der Materialien betragen -0,21 mm bis 0,86 mm. Materialabhängigkeiten lassen sich jedoch erst dann korrelieren, wenn der kapillarfähige Porenvolumen auf die Summe zwischen 3.500 nm und 100.000 nm beschränkt wird (Abbildung 73). In Bereich von 3.500 nm bis 35.000 nm Porenvolumen nehmen die Quellungen innerhalb des 1. Tages logarithmisch mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,93 ab.

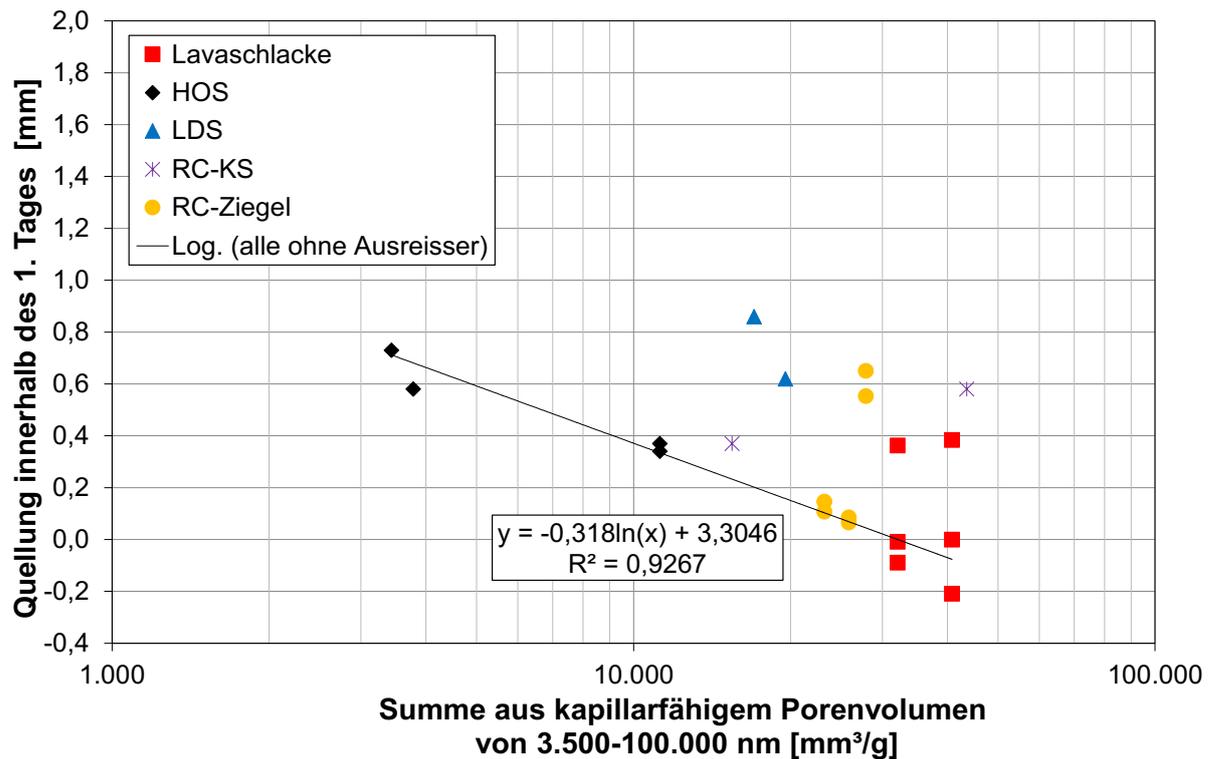


Abbildung 73: Gegenüberstellung von Quellung innerhalb des 1. Tages und Summe des kapillarfähigen Porenraums von 3.500 nm bis 100.000 nm

Die Abnahme der Quellung beeinflusst die Eislinsenbildung jedoch nicht. Abbildung 74 stellt den Beginn Eislinsenbildung der Summe des Porenraums zwischen 3.500 nm und 100.000 nm gegenüber.

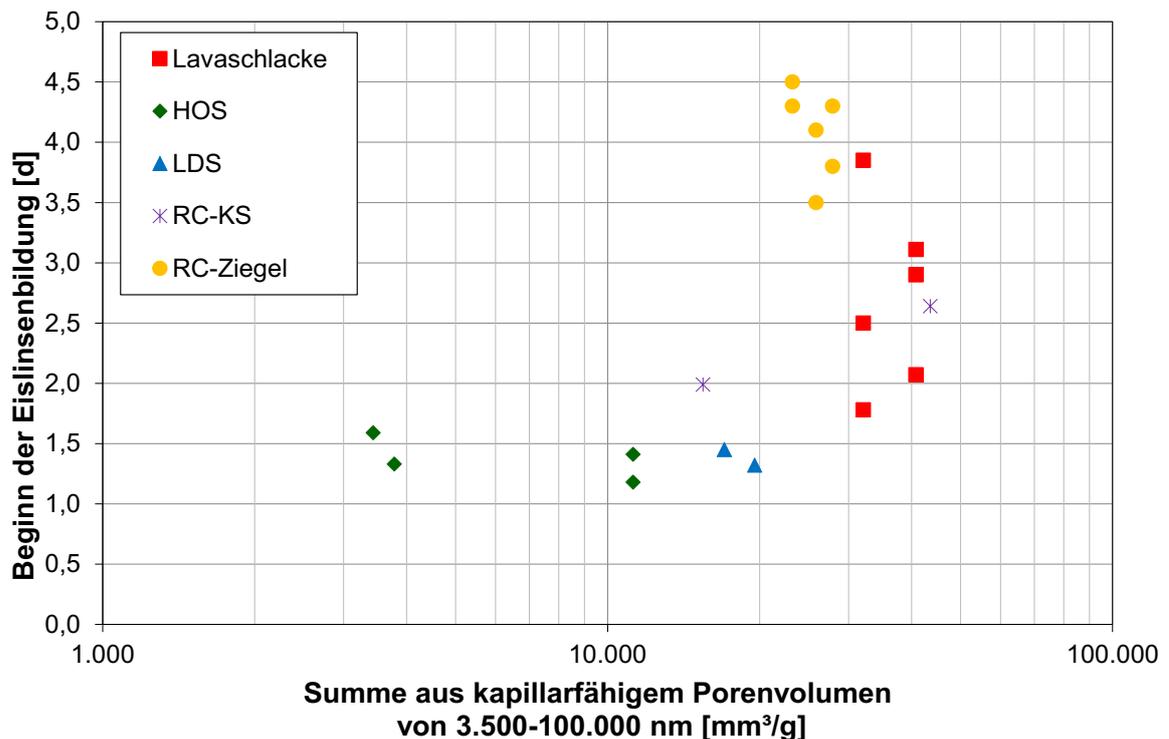


Abbildung 74: Gegenüberstellung von Beginn der Eislinsenbildung und Summe des kapillarfähigen Porenvolumen von 3.500 nm bis 100.000 nm

Die Bildung der Eislinen beginnt frühestens nach 1,2 Tagen und spätestens nach 4,5 Tagen. Die Summe des Porenraums hat darauf keinen Einfluss. Sie liegt überwiegend zwischen 10.000 mm³/g und 40.000 mm³/g.

In Abbildung 75 ist die Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag der Summe aus kapillarfähigem Porenraum im Bereich zwischen 3.500 nm und 100.000 nm gegenübergestellt. Da die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 6. und 7. Tag geringer sind als zwischen dem 5. und 6. Tag ergibt sich hieraus keine weitere Erkenntnis. Das Diagramm ist in Anhang C beigefügt.

Zwischen dem 5. und 6. Tag heben sich die untersuchten Gemische mit Geschwindigkeiten zwischen 0,18 mm/d und 1,56 mm/d. Tendenziell teilen sich die Materialien in zwei Gruppen, die mit sehr geringen Hebungen bis max. 0,4 mm/d und die mit Hebungen zwischen rd. 1,0 mm/d und 1,6 mm/d. Diese Teilung egalisiert sich mit zunehmender Versuchsdauer. Zwischen dem 7. und 8. Tag (Abbildung 76) sind alle Hebungsgeschwindigkeiten unter 0,7 mm/d gesunken.

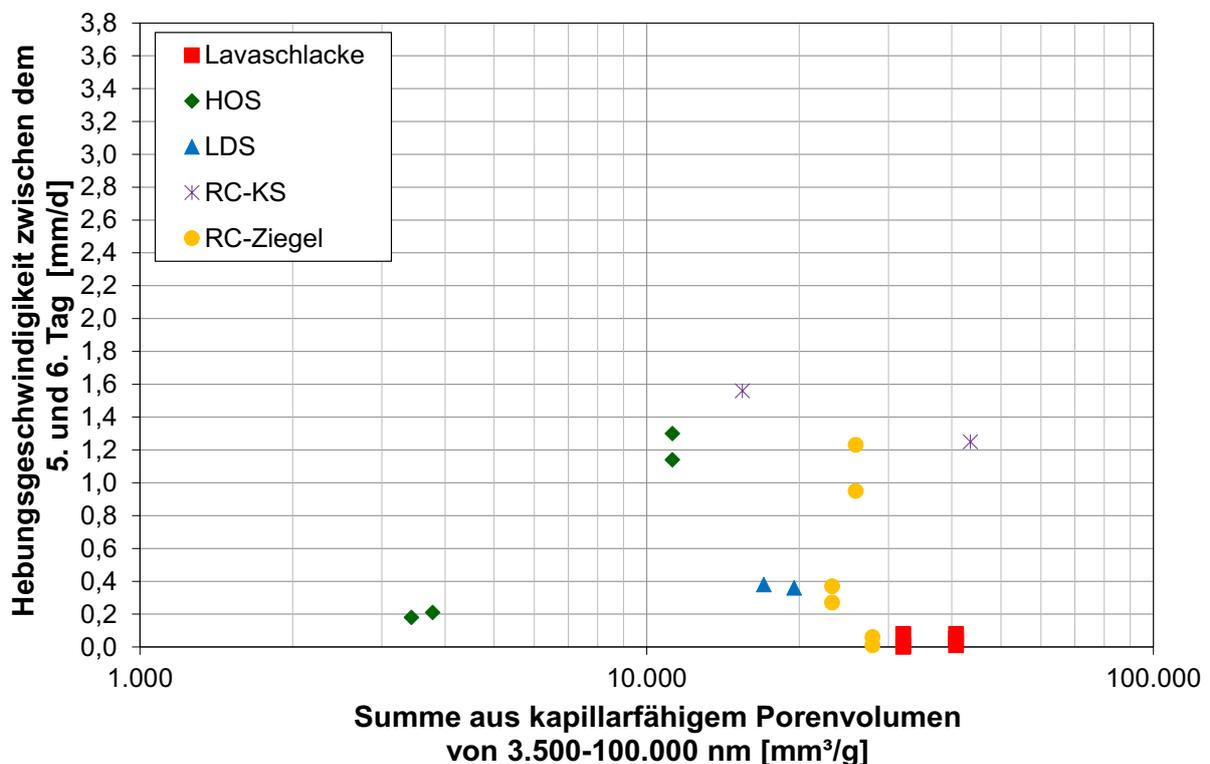


Abbildung 75: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und kapillarfähigem Porenvolumen von 3.500 nm bis 100.000 nm

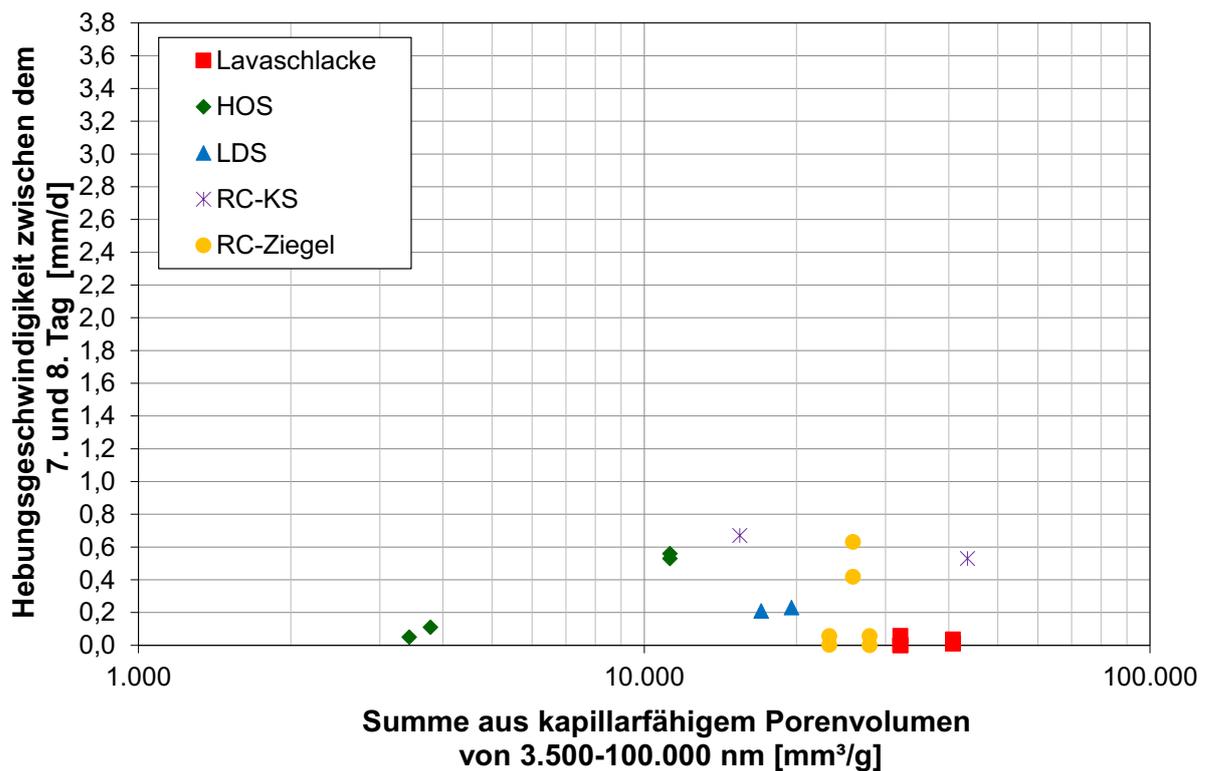


Abbildung 76: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag und kapillarfähigem Porenvolumen von 3.500 nm bis 100.000 nm

Die Summe der kapillarfähigen Anteile des Porenraums von 3.500 nm bis 100.000 nm ist in Abbildung 77 der Maximalen Frosthebung gegenübergestellt.

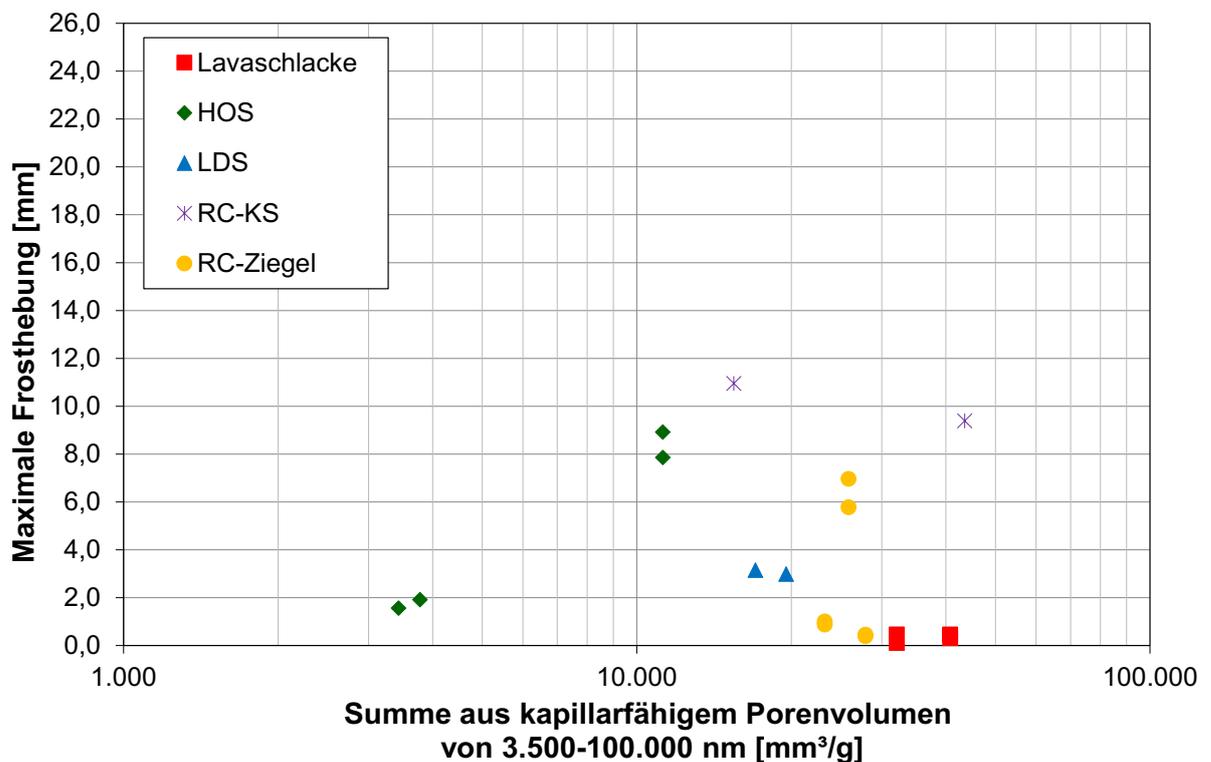


Abbildung 77: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Summe aus kapillarfähigem Porenraum von 3.500 bis 100.000 nm

Die Maximalen Frosthebungen liegen zwischen 0 mm und 11,0 mm. Es zeigen sich keine Korrelationen. Jedoch sind auch hier, wie in Abbildung 75, die tendenzielle Zweiteilung der Materialkennwerte zu erkennen. Die Materialien, die zwischen dem 5. und 6. Tag eine eher höhere Hebungsgeschwindigkeit zeigten, weisen auch am Ende des Versuchs eine höhere Maximale Frosthebung auf, als die Materialien mit geringer Hebungsgeschwindigkeit.

In Abbildung 78 ist die Bleibende Hebung der Summe aus kapillarfähigem Porenraum von 3.500 nm bis 100.000 nm gegenübergestellt.

Die Bleibenden Hebungen liegen zwischen 0 mm und 2,7 mm. Die Materialkennwerte lassen keine Korrelationen zu.

Insgesamt betrachtet, lassen sich die Frosthebungs-kennwerte nicht ausschließlich mit den Parametern Porosität oder kapillarfähiger Porenanteil beschreiben. Auch die prozentuale Auswertung des Porenvolumens (Abbildung 79) bringt keinen Aufschluss. Jedoch weisen die Materialien mit sehr geringer Frosthebung überwiegend mehr als 60 % kapillarfähigen Porenraum auf.

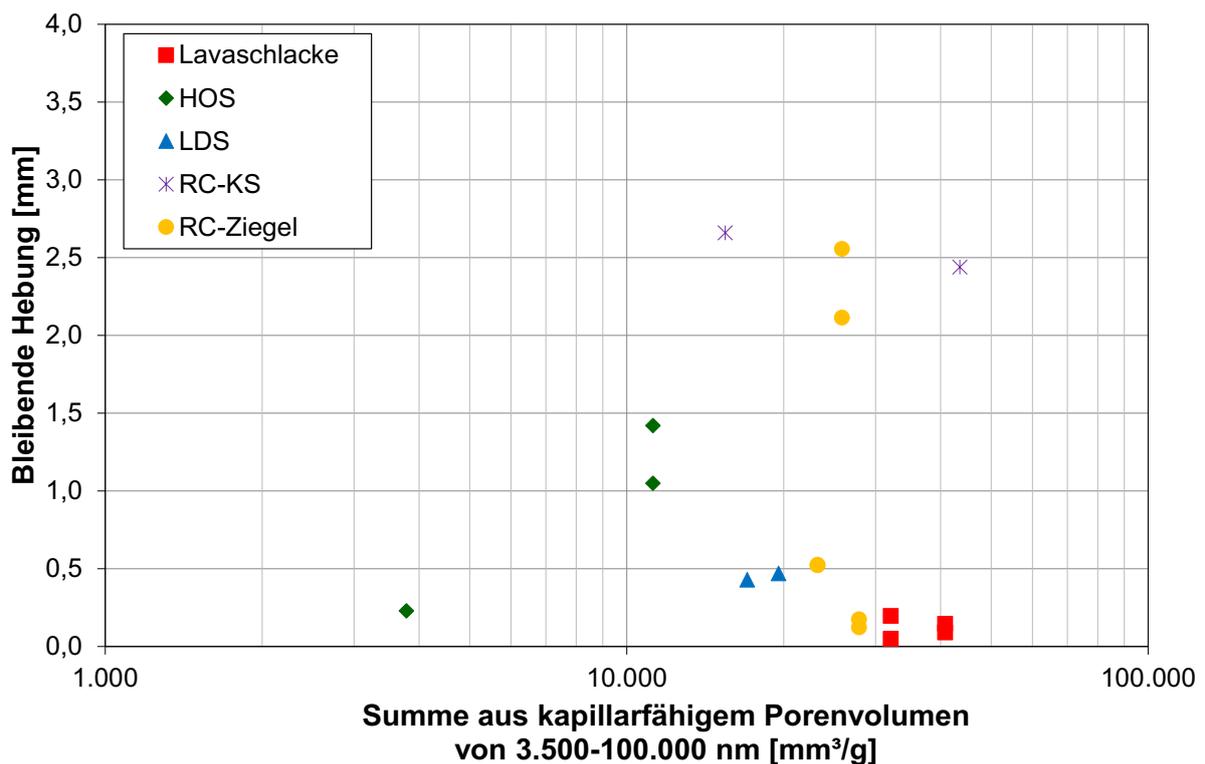


Abbildung 78: Gegenüberstellung von Bleibender Frosthebung und Summe aus kapillarfähigem Porenraum von 3.500 nm bis 100.000 nm

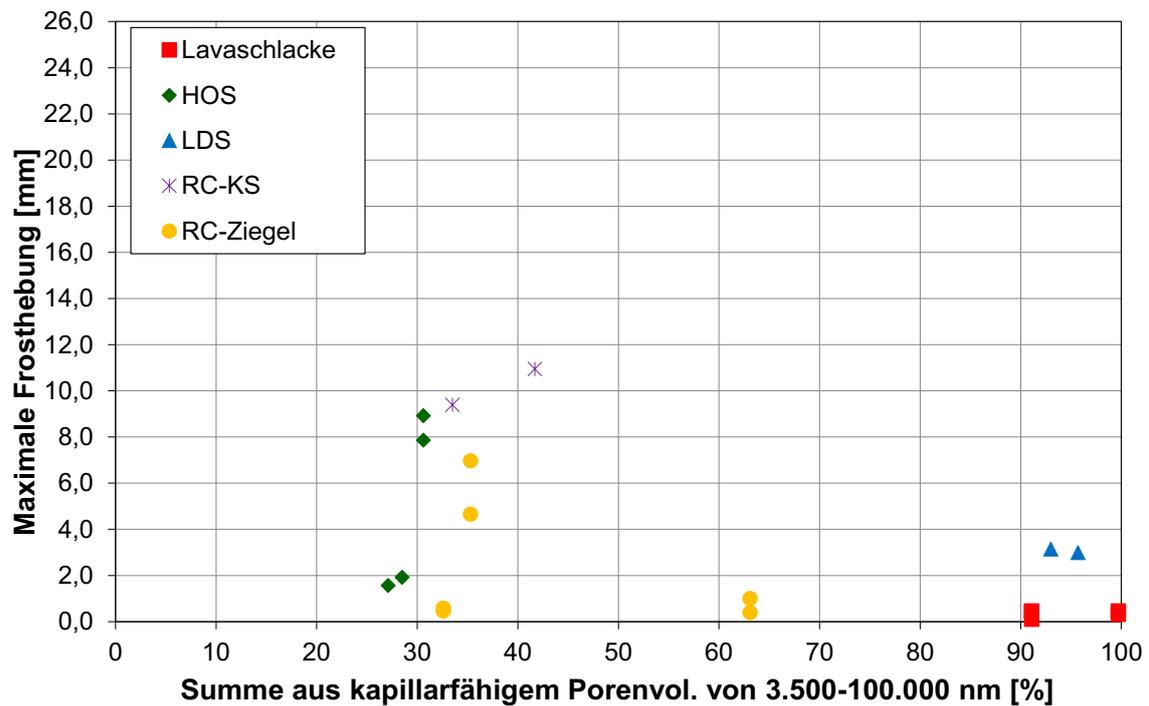


Abbildung 79: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und prozentalem kapillarfähigem Porenraum von 3.500 bis 100.000 nm

5.4.3 Einfluss der Korngrößenverteilung

In Abbildung 80 ist die Quellung innerhalb des 1. Tages der Ungleichförmigkeitszahl der Materialgemische gegenübergestellt.

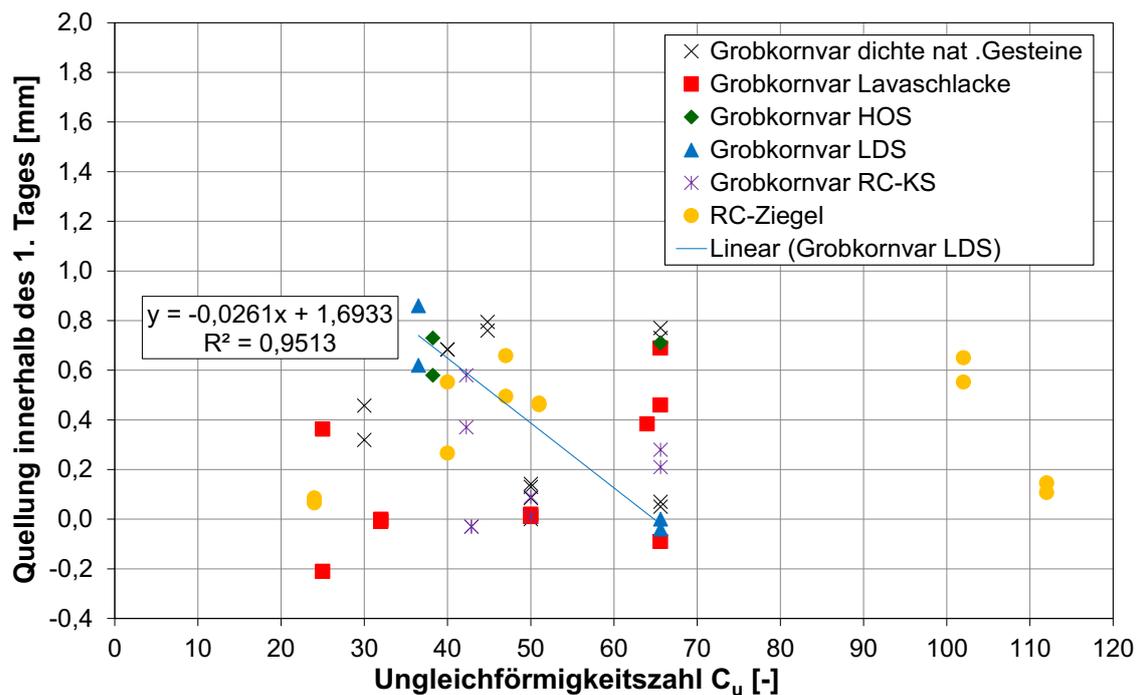


Abbildung 80: Gegenüberstellung von Quellung innerhalb des 1. Tages und Ungleichförmigkeitszahl

Die Quellung innerhalb des 1. Tages liegt zwischen -0,09 mm und 0,86 mm. Die errechneten Ungleichförmigkeitszahlen liegen zwischen 24 und 112. Mit Zunahme der Ungleichförmigkeitszahl ist im Materialgemisch ein höherer Anteil feinerer Gesteinskörnung enthalten. Ein mathematischer Zusammenhang zwischen diesen beiden Kennwerten zeigt sich nicht. Eine Ausnahme stellt die Grobkornvariation mit LD-Schlacke dar. Eine Korrelation von 0,95 ergibt sich aus zunehmender Ungleichförmigkeitszahl und abnehmender Quellung. Diese Tendenz lässt sich auf die anderen untersuchten Materialgemische nicht übertragen.

In Abbildung 81 ist der Beginn der Eislinsenbildung der Ungleichförmigkeitszahl gegenübergestellt.

Der Bildung der Eislinse beginnt zwischen 1,2 Tagen und 4,6 Tagen. Es bestehen bei diesen Materialgemischen keinerlei mathematische Korrelationen, die sich auf die Ungleichförmigkeitszahl zurückführen lassen.

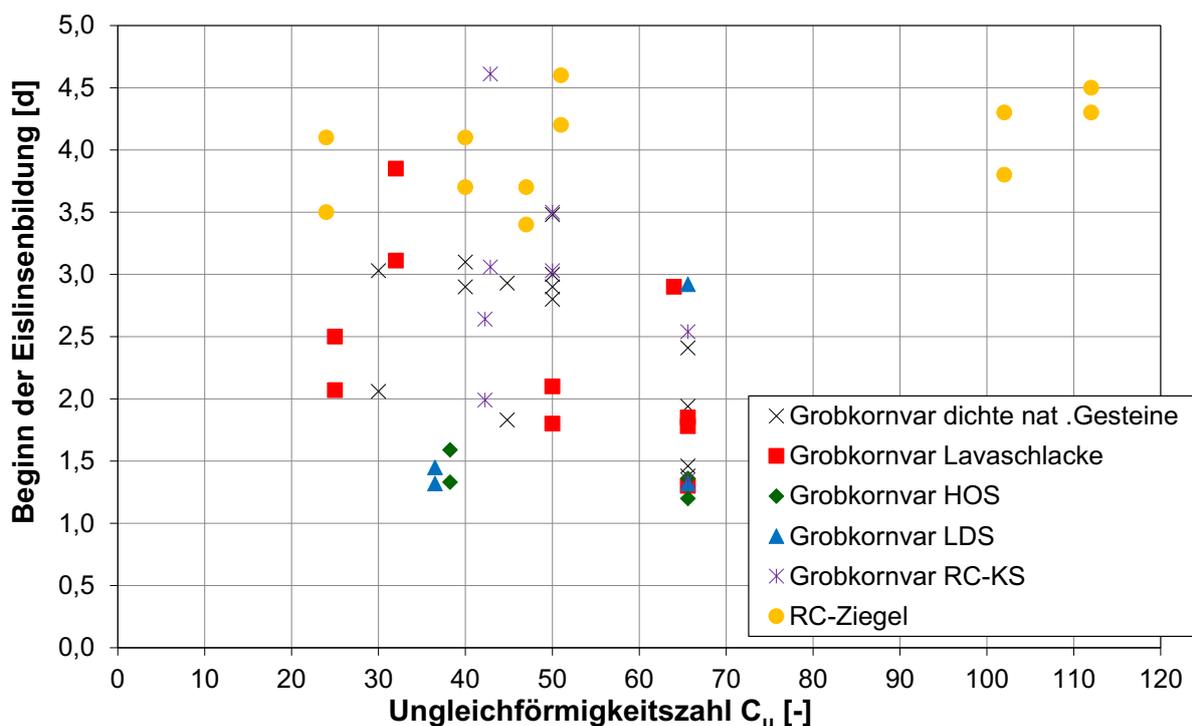


Abbildung 81: Gegenüberstellung von Beginn der Eislinsenbildung und Ungleichförmigkeitszahl

Abbildung 82 zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag. Die Darstellung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und dem 7. und 8. Tag sind aufgrund gleicher Tendenzen in Anhang C beigefügt.

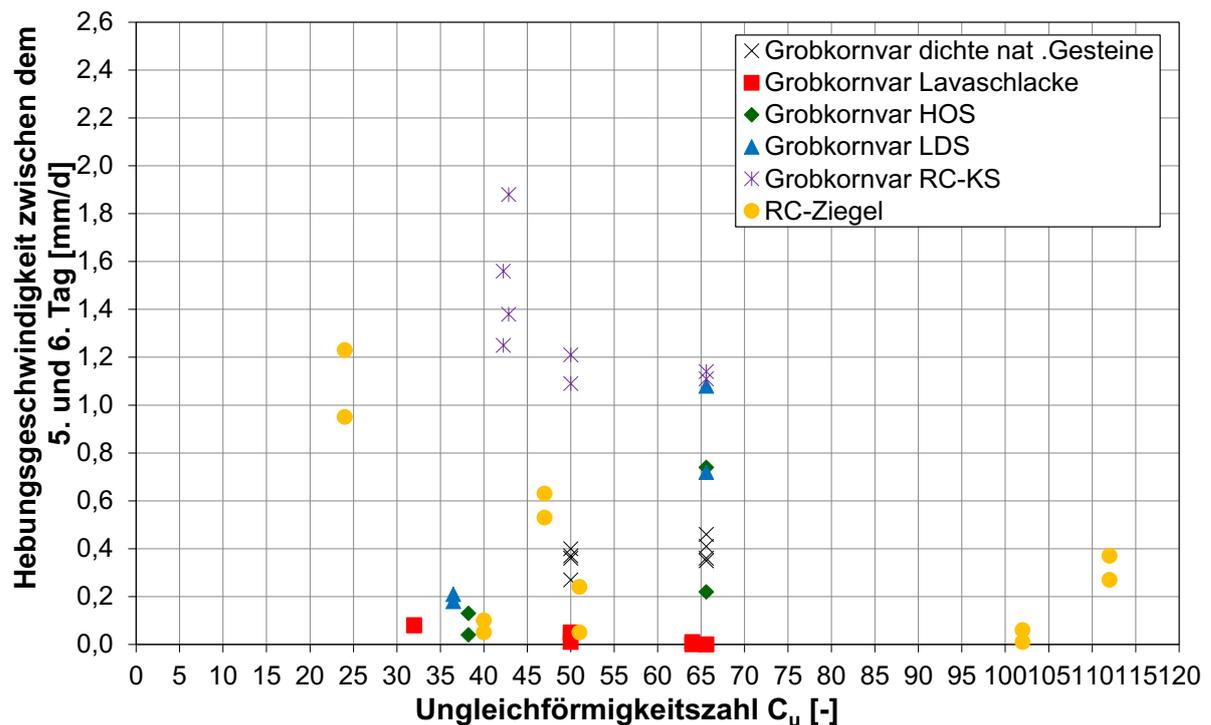


Abbildung 82: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zw. dem 5. und 6. Tag und Ungleichförmigkeitszahl

Die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag liegen zwischen 0 mm/d und 2,0 mm/d. Es sind keine mathematischen Zusammenhänge der Hebungsgeschwindigkeit zur Ungleichförmigkeitszahl zu erkennen. Jedoch ist auffällig, dass Materialgemische aus Lavaschlacke oder RC-Ziegel teilweise gar keine Hebungsgeschwindigkeit aufweisen.

Mit fortschreitender Versuchsdauer reduzieren sich die Hebungsgeschwindigkeiten der Materialgemische, so dass zwischen dem 7. und 8. Versuchstag nur noch Geschwindigkeiten bis maximal 0,8 mm/d vorliegen. Diese Auffälligkeit der Materialgemische mit Lavaschlacke und teilweise RC-Ziegel bleibt auch bis zu dieser Versuchszeit bestehen.

In Abbildung 83 ist die Maximale Frosthebung der Ungleichförmigkeitszahl gegenübergestellt. Die Maximalen Frosthebungen dieser Materialgemische liegen zwischen 0 mm und 13,1 mm. Auch wenn sich erneut keine Korrelationen finden, so lässt sich tendenziell feststellen, dass mit steigender Ungleichförmigkeitszahl die Maximalen Frosthebungen leicht zunehmen. Die zeigt sich insbesondere bei den Materialgemischen mit Lavaschlacke. Die sortenreinen Gemische weisen keinerlei Hebung auf. Hingegen hebt sich das Gemisch, welches in der Kornklasse 0/5 mm ausschließlich Diabas enthält, um rd. 2,5 mm.

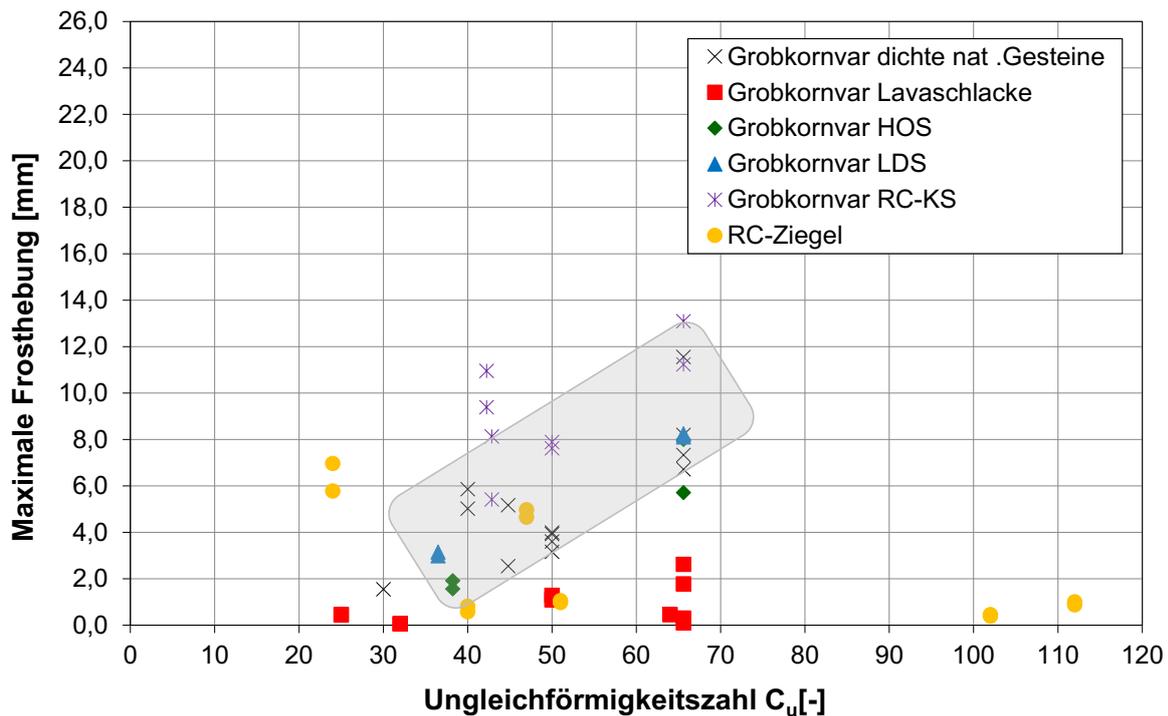


Abbildung 83: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Ungleichförmigkeitszahl

In Abbildung 84 ist die Bleibende Hebung der Ungleichförmigkeitszahl gegenübergestellt. Die Bleibenden Hebungen dieser Gemische liegen zwischen 0 mm und 3,21 mm. Es zeigen sich auch bei den Bleibenden Hebungen keine Zusammenhänge zur Ungleichförmigkeitszahl. Die Materialgemische mit Lavaschlacke weisen insgesamt die geringsten Bleibenden Hebungen auf.

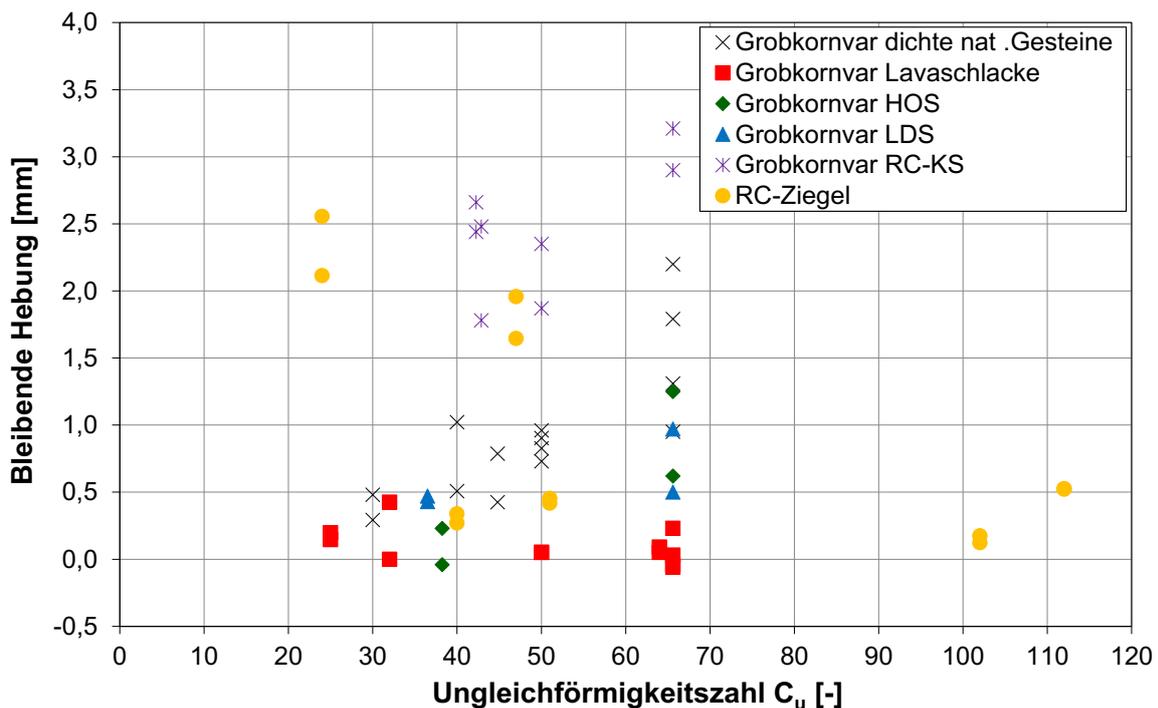


Abbildung 84: Gegenüberstellung von Bleibender Frosthebung und Ungleichförmigkeitszahl

5.4.4 Einfluss des Luftporenanteils

In Abbildung 85 ist die Quellung innerhalb des 1. Tages dem Luftporenanteil gegenübergestellt. Die Quellungen liegen zwischen -0,21 mm und 0,86 mm. Der errechnete Luftporenanteil reicht von 0 Vol.-% bis 26,1 Vol.-%. In Abhängigkeit vom Luftporenanteil steigt die Quellung nicht an.

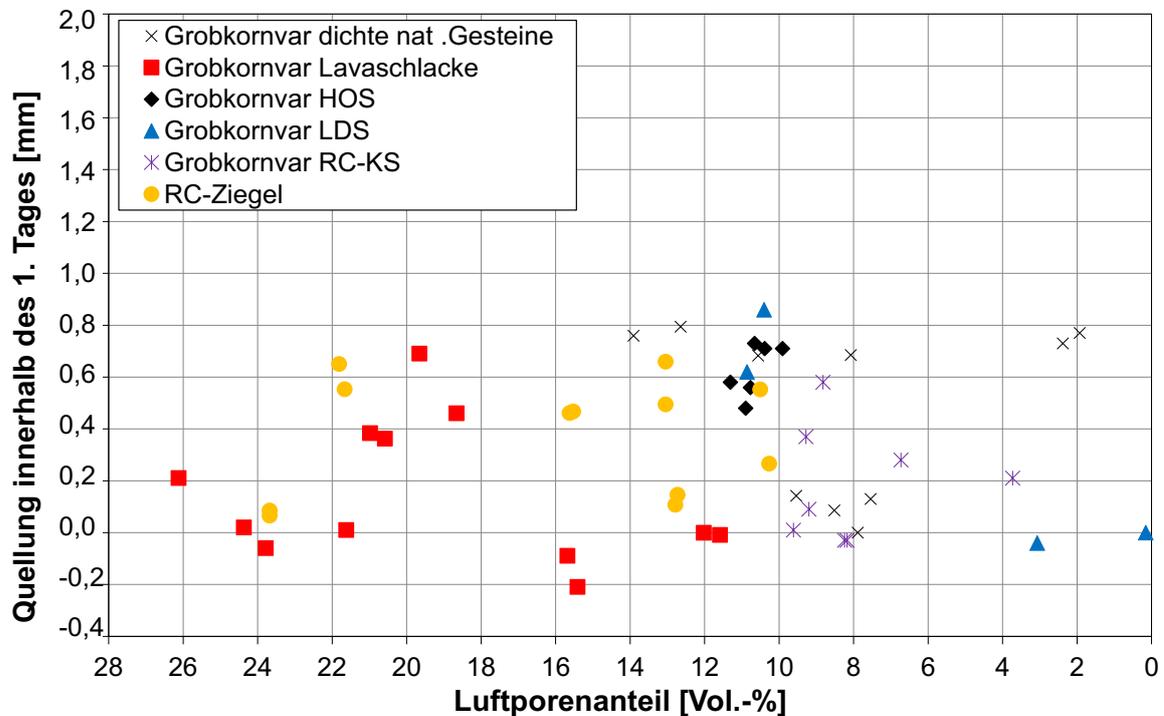


Abbildung 85: Gegenüberstellung von Quellung innerhalb des 1. Tages und Luftporenanteil

In Abbildung 86 ist der Beginn der Eislinsenbildung dem Luftporenanteil gegenübergestellt. Bei den Materialgemischen mit Lava-, Hochofen- und LD-Schlacke tritt die Bildung der Eislinse unabhängig vom Luftporenpotential überwiegend nach maximal 2 Tagen ein, hingegen bei den dichten Gemischen erst nach 2,5 Tagen bis 3 Tagen. Zum Materialkennwert Luftporenanteil zeigt der Beginn der Eislinsenbildung dennoch keine Korrelationen.

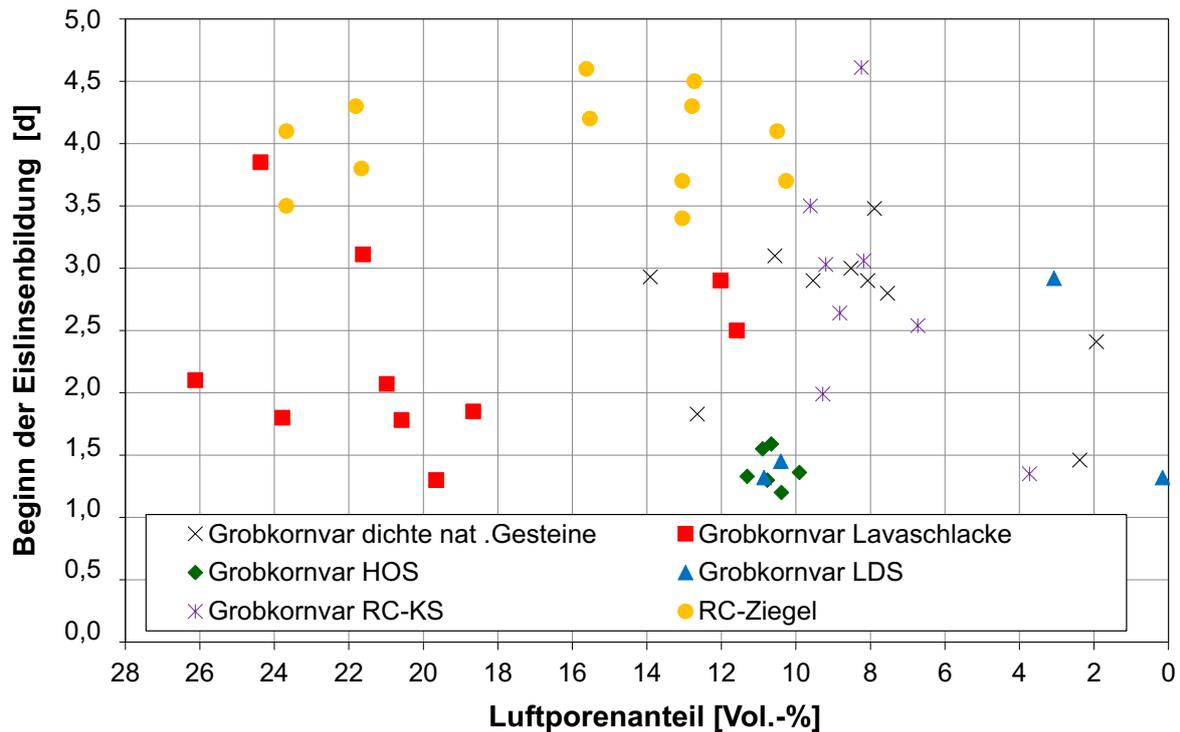


Abbildung 86: Gegenüberstellung von Beginn der Eislinnenbildung und Luftporenanteil

In Abbildung 87 sind die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5. und 6. Tag dem Luftporenanteil gegenübergestellt. Die Abbildungen der Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 6. und 7. bzw. 7. und 8. Tag zum Luftporenanteil sind in Anhang C enthalten. In allen drei Abbildungen zeigen sich ähnliche Tendenzen.

Die Hebungsgeschwindigkeiten zwischen dem 5 und 6. Tag betragen 0 mm/d bis 2,4 mm/d, zwischen dem 7. und 8. Tag reduziert sich die Geschwindigkeit auf maximal 1,2 mm/d. Die Materialgemische mit Lavaschlacke weisen nahezu keine Hebungsgeschwindigkeiten auf.

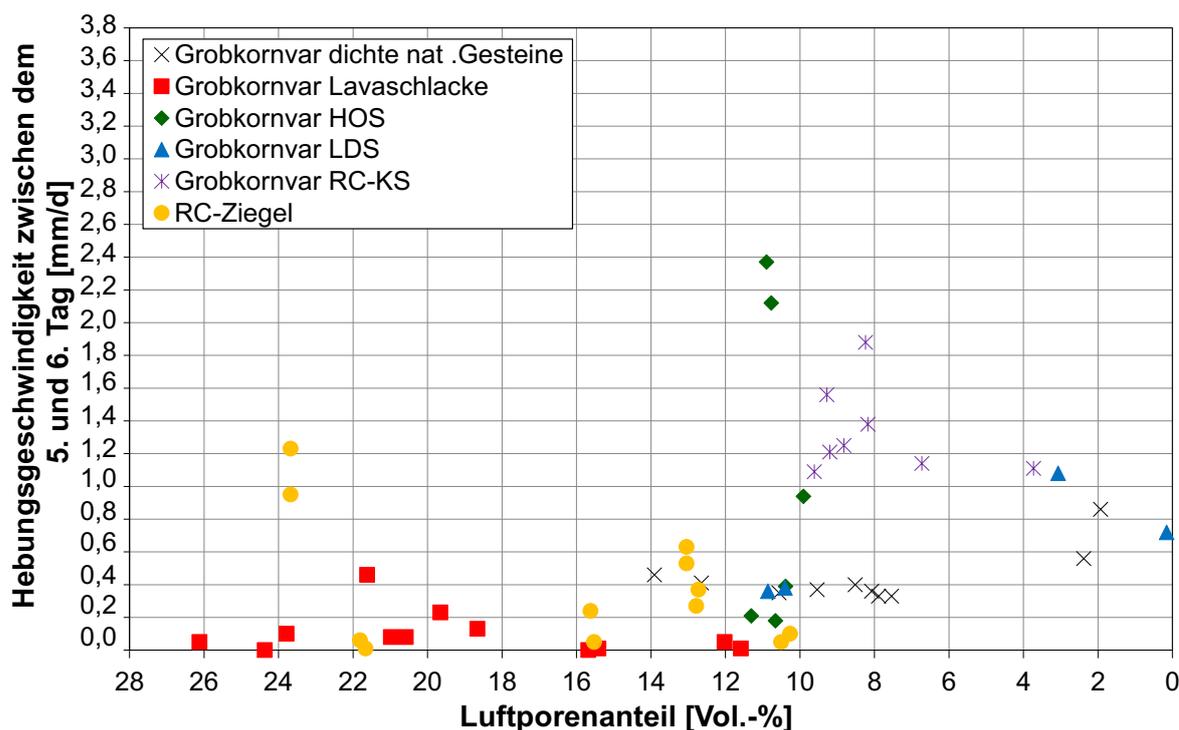


Abbildung 87: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und Luftporenanteil

Die Hebungsgeschwindigkeiten der Materialgemische aus dichten natürlichen Gestein zeigen nur geringe Hebungsgeschwindigkeiten zwischen 0,4 mm/d (5./6. Tag) und 0,2 mm/d (7./8. Tag). Ein mögliches Hebungspotential lässt sich bei den Materialgemischen mit RC-Kalksandstein erkennen, deren Geschwindigkeiten zwischen 1,9 mm/d (5./6. Tag) und 0,8 mm/d (7./8. Tag) liegen. In der Gruppe der Materialgemische mit Hochofenschlacke treten die höchsten Hebungsgeschwindigkeiten auf (2,4 mm/d zwischen dem 5. und 6. Tag, 1,2 mm/d zwischen dem 7. und 8. Tag). Diese beiden Messwerte basieren jedoch auf einem, im Vergleich zu den anderen Gemischen mit Hochofenschlacke, erhöhten Feinanteil.

Insgesamt lässt sich demnach festhalten, dass der Luftporenanteil nur geringen Einfluss auf die Hebungsgeschwindigkeiten der geprüften Materialgemische hat.

In Abbildung 88 ist die Maximale Frosthebung dem Luftporenanteil gegenübergestellt.

Werden die Materialgemische mit Hochofenschlacke und erhöhtem Feinanteil nicht mitbetrachtet (Hebungen rd. 18,5 mm), zeigen alle anderen Materialien Maximale Frosthebungen zwischen 0 mm und 13,1 mm. In der Gruppe der Grobkornvariationen korrelieren die Maximalen Frosthebungen von RC-Kalksandstein mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,89, die Grobkornvariationen mit LD-Schlacke mit 0,96.

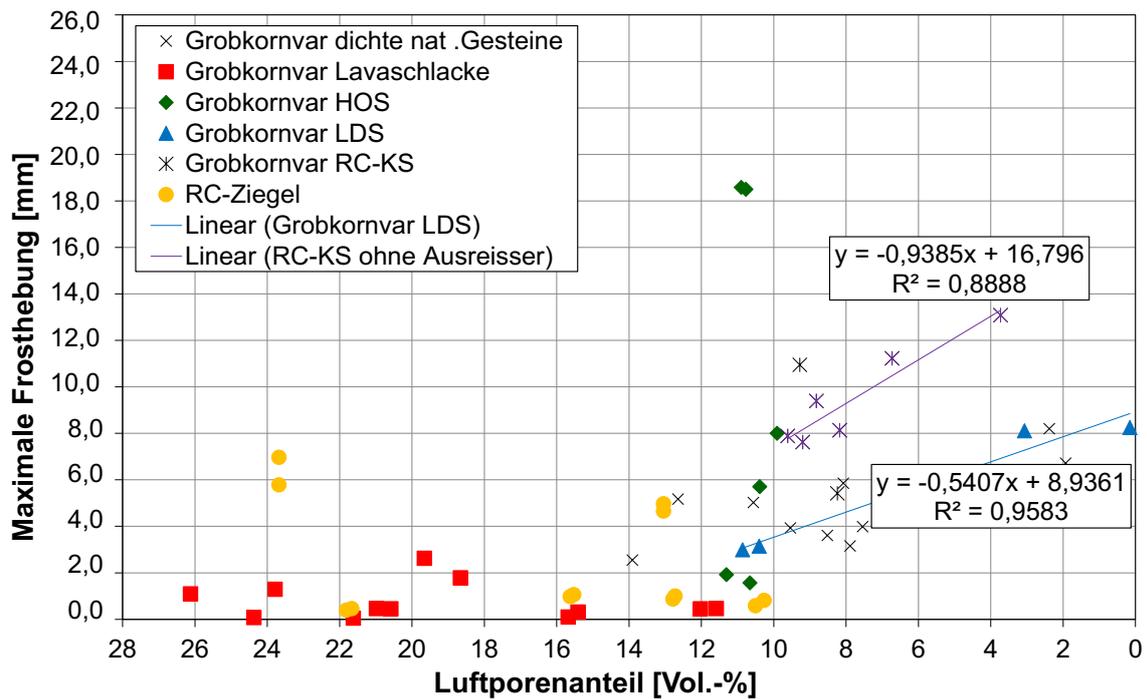


Abbildung 88: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Luftporenanteil

Auch bei den Materialgemischen aus dichten natürlichen Gesteinen nimmt tendenziell die maximale Hebung mit sinkendem Luftporenanteil zu. Eine Korrelation ergibt sich dabei jedoch nicht. Die Gemische mit Lavaschlacke zeigen nahezu keine Hebungen. Insgesamt betrachtet nimmt ab einem Luftporenanteil von rd. 13 Vol.-% die Maximale Hebung zu.

In Abbildung 89 ist die Bleibende Hebung dem Luftporenanteil gegenübergestellt.

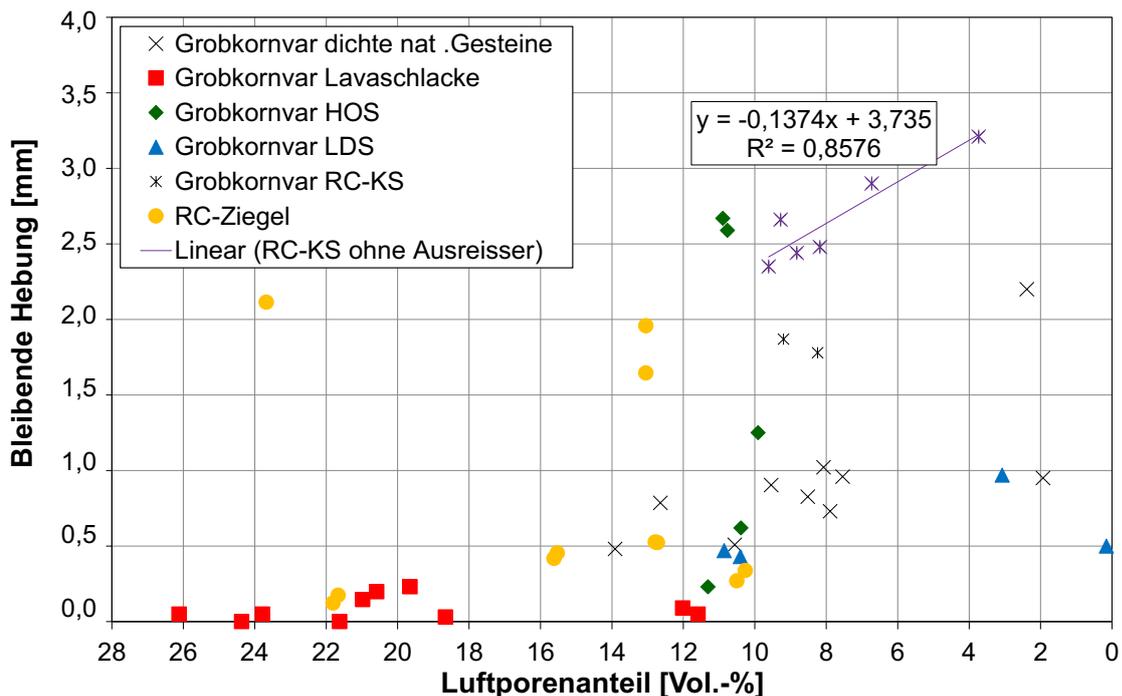


Abbildung 89: Gegenüberstellung von Bleibender Hebung und Luftporenanteil

Die Bleibenden Hebungen liegen zwischen 0 mm und 3,2 mm. Die Hebungen der Grobkornvariationen aus RC-Kalksandstein korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,86. Alle anderen Bleibenden Hebungen korrelieren nicht. Bei den Gemischen mit dichten natürlichen Materialien zeigt sich ein tendenziell leichter Anstieg der Bleibenden Hebungen im Gegensatz zu den anderen Materialgemischen. Die Gemische mit Lavaschlacke weisen annähernd keine Hebungen auf.

Insgesamt betrachtet, hat der Luftporenanteil einen eher geringen Einfluss auf das Frosthebungsverhalten.

5.5 Zusammenfassende Bewertung der Einflussfaktoren

Zur Bewertung der jeweiligen Materialkennwerte auf die Parameter aus dem Frosthebungsversuch wurden zunächst einfache lineare Regressionen betrachtet. Die Ausreißer wurden mittels statistischer Analyse herausgefiltert. Materialgemische, bei denen die Messwerte mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von $> 0,7$ korrelieren, wurden kategorisiert. Gemäß den Grundlagen der Statistik weist $0,7 < R^2 < 0,9$ auf einen guten, und $R^2 > 0,9$ auf einen sehr guten Zusammenhang zweier unabhängiger Kennwerte hin.

Als Maß für eine entsprechende Beeinflussung der jeweiligen Parameter dienten die Steigung und der y-Achsenabschnitt der Winkelhalbierenden. Mit diesen beiden Indikatoren wurde die jeweilige Trendlinie bewertet und den folgenden drei Kategorien zugeordnet:

(-) Parameter x-Achse hat einen **geringen Einfluss** auf den Parameter der y-Achse:

Steigung der Trendlinie m_t ist kleiner als die Steigung der Winkelhalbierenden m_w und

y-Achsenabschnitt der Trendlinie b_t ist kleiner als y-Achsenabschnitt der Winkelhalbierenden b_w

(+) Parameter der x-Achse hat **Einfluss** auf Parameter der y-Achse:

Steigung der Trendlinie m_t ist kleiner als die Steigung der Winkelhalbierenden m_w und

y-Achsenabschnitt der Trendlinie b_t ist größer als y-Achsenabschnitt der Winkelhalbierenden b_w

oder

Steigung der Trendlinie m_t ist größer als die Steigung der Winkelhalbierenden m_w und

y-Achsenabschnitt der Trendlinie b_t ist kleiner als y-Achsenabschnitt der Winkelhalbierenden b_w

(++) Parameter der x-Achse hat **großen Einfluss** auf Parameter der y-Achse:

Steigung der Trendlinie m_t ist größer als die Steigung der Winkelhalbierenden m_w und

y-Achsenabschnitt der Trendlinie b_t ist größer als y-Achsenabschnitt der Winkelhalbierenden b_w

Über die Indikatoren hinaus wurde zwischen natürlichen und RC-Baustoffgemischen sowie Gemischen aus Schlacken unterschieden. Die Bewertung der Einflussfaktoren ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Bewertung der Einflussfaktoren

Achsenparameter		Material	Bewertung
x	y		
Kornklasse 5/22,4 mm	Maximale Frosthebung	N S	++
Luftporenanteil n_a	Bleibende Hebung	N	++
Summe kapillarfähigen Porenvolumens (3.500-100.000 nm)	Quellung innerhalb des 1. Tages	S	++
Anteil < 0,063 mm	Maximale Frosthebung	N S	+
	Bleibende Hebung	S	+
Ungleichförmigkeitszahl C_u	Maximale Frosthebung	N, S	+
Luftporenanteil n_a	Maximale Frosthebung	N	+
	Quellung innerhalb des 1. Tages	N	+
Anteil < 0,063 mm	Hebungsgeschwindigkeit	N S	-
	Quellung innerhalb des 1. Tages	N	-
Ungleichförmigkeitszahl C_u	Hebungsgeschwindigkeit	S	-
	Bleibende Hebung	S	-
Luftporenanteil n_a	Maximale Frosthebung	RCB S	-
	Bleibende Hebung	RCB	-
Sandäquivalent SE	Maximale Frosthebung	RCB	-
	Hebungsgeschwindigkeit		

N: Natürliche Materialgemische

RCB: RC-Baustoffgemische

S: Schlacken

Bei der Auswertung der Einflussfaktoren zeigt sich zunächst, dass der Frosthebungsparameter Maximale Frosthebung besonders für die Bewertung geeignet ist. Bei sechs Materialkennwerten konnten mit der Maximalen

Frosthebung Korrelationen errechnet werden, bei dem Parameter Bleibende Hebung vier und den Parametern Hebungsgeschwindigkeit und Quellung innerhalb des 1. Tages jeweils mit drei.

Bei der Bewertung der Korrelationen von Materialparametern und Hebungsgeschwindigkeiten ist es letztendlich unerheblich, welcher Zeitraum innerhalb des Versuchs betrachtet wird. Innerhalb des im Rahmen dieses Projektes ausgewerteten Versuchskollektivs zeigten sich überwiegend ähnliche Tendenzen bei der Auswertung der Geschwindigkeiten zwischen den einzelnen Versuchstagen. Es konnten Korrelationen zwischen 0,82 und 0,99 ermittelt werden. Im Vergleich konnten bei den Geschwindigkeiten zwischen dem 6. und 7. Tag mehr Korrelationen mit den Materialparametern errechnet werden.

Darüber hinaus eignen sich die Materialparameter Kornanteil 5/22,4 mm und Anteil < 0,063 mm vor Frostbeanspruchung zur Bewertung, da diese sowohl natürliche als auch Schlacken Materialgemische ansprechen.

Der Luftporenanteil hat einen Einfluss auf die Frosthebungskennwerte, insbesondere bei den natürlichen Materialgemischen. Jedoch zeigt sich dieser Einfluss bei den RC-Baustoffgemischen und den Schlacken nur in geringem Maße. Daher eignet sich dieser Materialparameter für eine Bewertung der Frosthebungskennwerte nicht.

Die Ungleichförmigkeitszahl von Gemischen aus Schlacke übt einen geringen Einfluss auf die Frosthebungskennwerte aus. Lediglich bei der Korrelation mit der Maximalen Frosthebung konnte ein tendenziell etwas größerer Einfluss dieses Materialparameters festgestellt werden. Dieser Kennwert wird daher für die Bewertung nicht herangezogen.

Auf Basis dieser Auswertungen ist der Einfluss des Sandäquivalentes gering und eignet sich daher nicht für eine Bewertung.

6 Entwicklung der Bewertungskriterien für den Frosthebungsversuch

6.1 Vorbemerkung

Für die Durchführung des Frosthebungsversuchs wurde auf Basis vorangehender Projekte [Weingart, Wieland, 2005; Blume, 2010] der Entwurf einer Technischen Prüfvorschrift erstellt, nach der die in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse durchgeführt wurden [TP BF-StB, Entwurf Teil: FHV, 2009]. Die Prüfdauer beträgt insgesamt 9 Tage. Zunächst werden die Proben am ersten Tag bei $+1,5\text{ °C}$ vortemperiert. In der Temperierungsphase folgen die Frost-Phasen 1 und 2. In Phase 1 wird die Prüftemperatur so geregelt, dass am Ende von vier Tagen in Probenmitte eine Temperatur von $\pm 0\text{ °C}$ erreicht wird. Diese Temperatur wird in Phase 2 drei Tage lang gehalten. Den beiden Frost-Phasen folgt ein 24stündiger Auftauprozess bei einer Temperatur von $+10\text{ °C}$. Die Temperaturen des Probekörpers, des Wasserbades und des Kühlkopfes werden mit Temperaturfühlern im 5-Minuten-Rhythmus erfasst. Ebenso wird die Hebung des Probekörpers über einen Wegaufnehmer aufgezeichnet. Die Verlaufskurven werden über ein Frosthebungs-Zeit-Diagramm ausgewertet, welches beispielhaft in Abbildung 90 dargestellt ist.

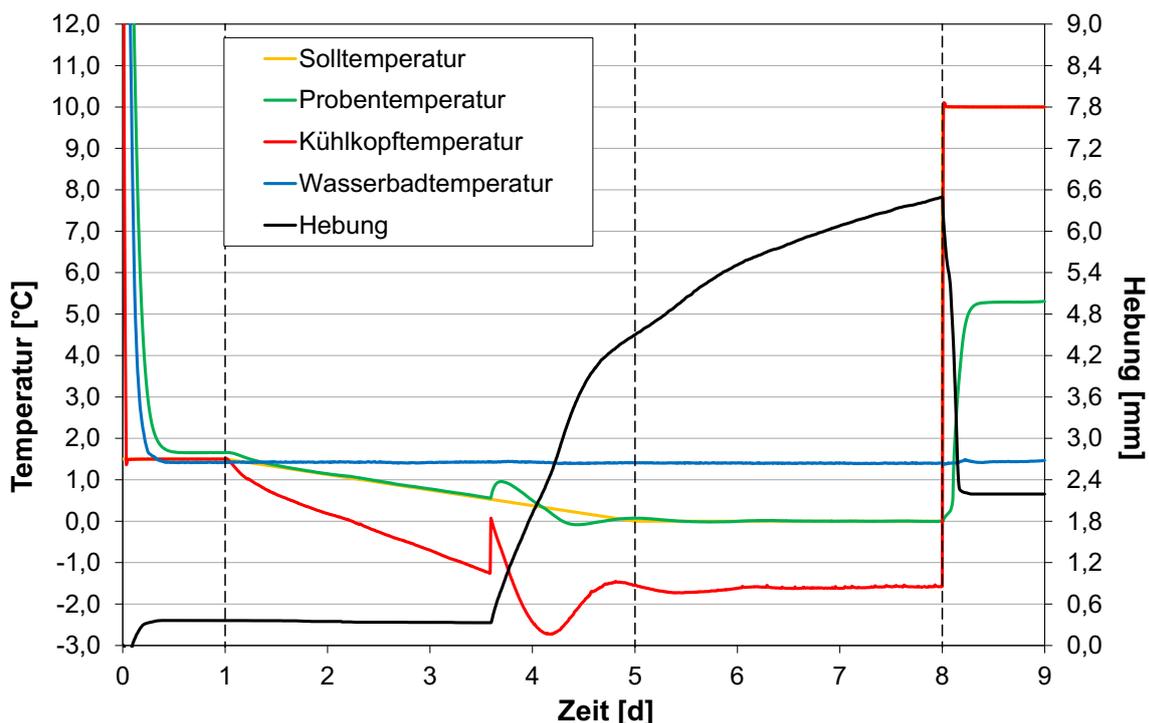


Abbildung 90: Beispiel eines Frosthebungs-Zeit-Diagramms

Für die Entwicklung der Bewertungskriterien wurden neben den im Rahmen des Projektes erzeugten Daten, weitere Datensätze der RUB sowie von der BAST, der TU München und der HTW Dresden mit einbezogen. Im Folgenden werden die nicht im Projekt generierten Daten als Datenpool bezeichnet.

6.2 Bewertungsansatz A

Während der Frost-Phase 1 ändert sich der Aggregatzustand des in der Probe vorhandenen Wassers von flüssig zu fest. Dabei wird Energie freigesetzt, die in Form eines Temperatursprungs bei der Aufzeichnung der Kühlkopftemperatur registriert wird. In Abbildung 90 ist dieser Temperatursprung zwischen dem 3. und 4. Tag zu erkennen. Durch die Umwandlung von Wasser in Eis vergrößert sich ihr Volumen um rd. 9 %. Ist das vorhandene Porenvolumen der Probe nicht ausreichend, beginnt sie sich zeitgleich zu heben, was im Beispiel in Abbildung 90 der Fall ist. Da die Probe in einem ca. 10 cm tiefen Wasserbad (ab Unterkante Probekörper) steht, ist eine stetige Wasserwanderung aufgrund kapillarer Sogwirkung ungehindert möglich. Die Hebungen schreiten dadurch bis zum Befrostungsende voran.

Für den Bewertungsansatz A wird eine flächenbezogene Auswertung durchgeführt. Mit Hilfe der Trapezregel kann die Fläche unter der Kurve näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$A = \sum_i^n \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx = \sum_i^n (t_2 - t_1) * \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

mit:

i = Beginn der Eislinsenbildung

n = Befrostungsende nach 8 Tagen

t_1 = Zeit bei Intervall i

t_2 = Zeit bei Intervall $i+ 1$

$f(a)$ = senkrechte Gerade zum Zeitpunkt t_1

$f(b)$ = senkrechte Gerade zum Zeitpunkt t_2

Je Zeit-Hebungs- bzw. -Temperatur-Paar kann entsprechend der oben beschriebenen Formel das Integral der Temperatureinwirkung über die Kühlkopftemperaturkurve und entsprechend das über die Hebungskurve berechnet werden. Abbildung 91 zeigt ein Beispiel für den Bewertungsansatz A.

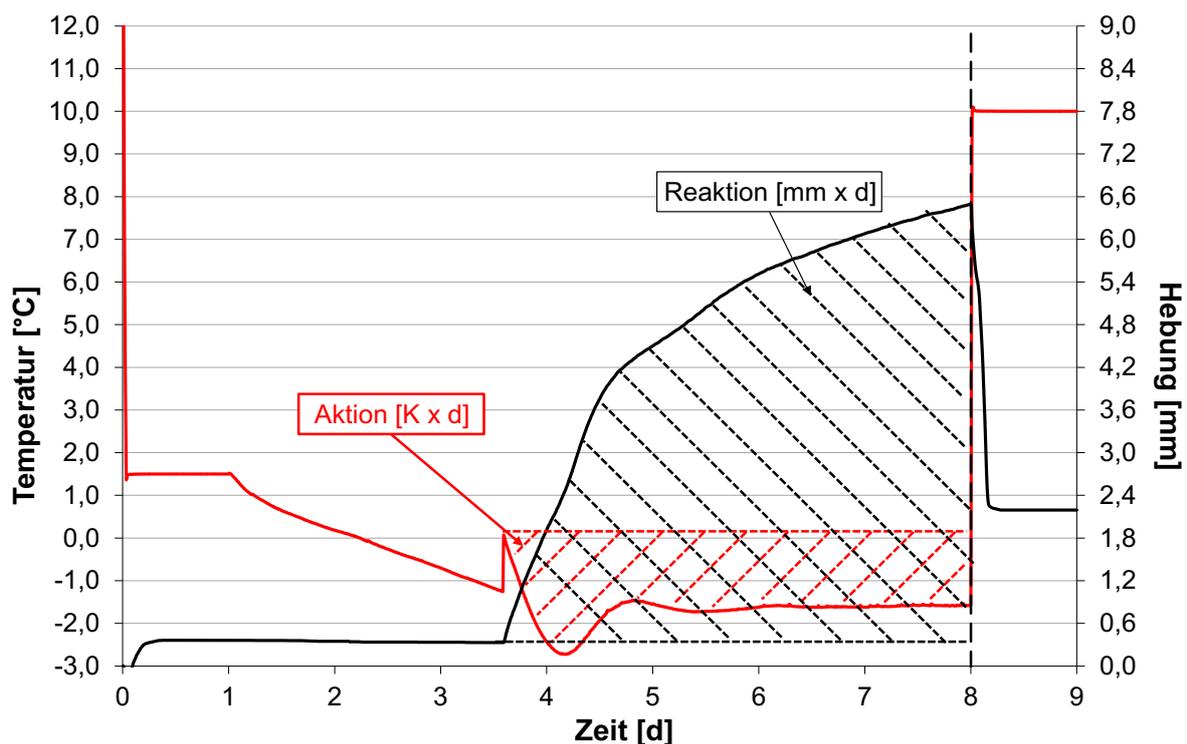


Abbildung 91: Beispiel für Bewertungsansatz A

Mit dieser Bewertungsmethode ist eine differenzierte Betrachtung jeder einzelnen Probe möglich. Es werden sowohl der Zeitpunkt der Eislinsenbildung als auch die Schwankungen der Messwerte mit erfasst. Die Berechnung kann mit jeder Berechnungssoftware und den entsprechend aufbereiteten Daten durchgeführt werden. Eine entsprechende Auswertevorlage wurde erarbeitet und dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

Die Flächenauswertungen, der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Untersuchungen, sind in Abbildung 92 dargestellt. Separat gekennzeichnet ist für jedes Materialgemisch die Frostempfindlichkeit gemäß Bodenklassifikation.

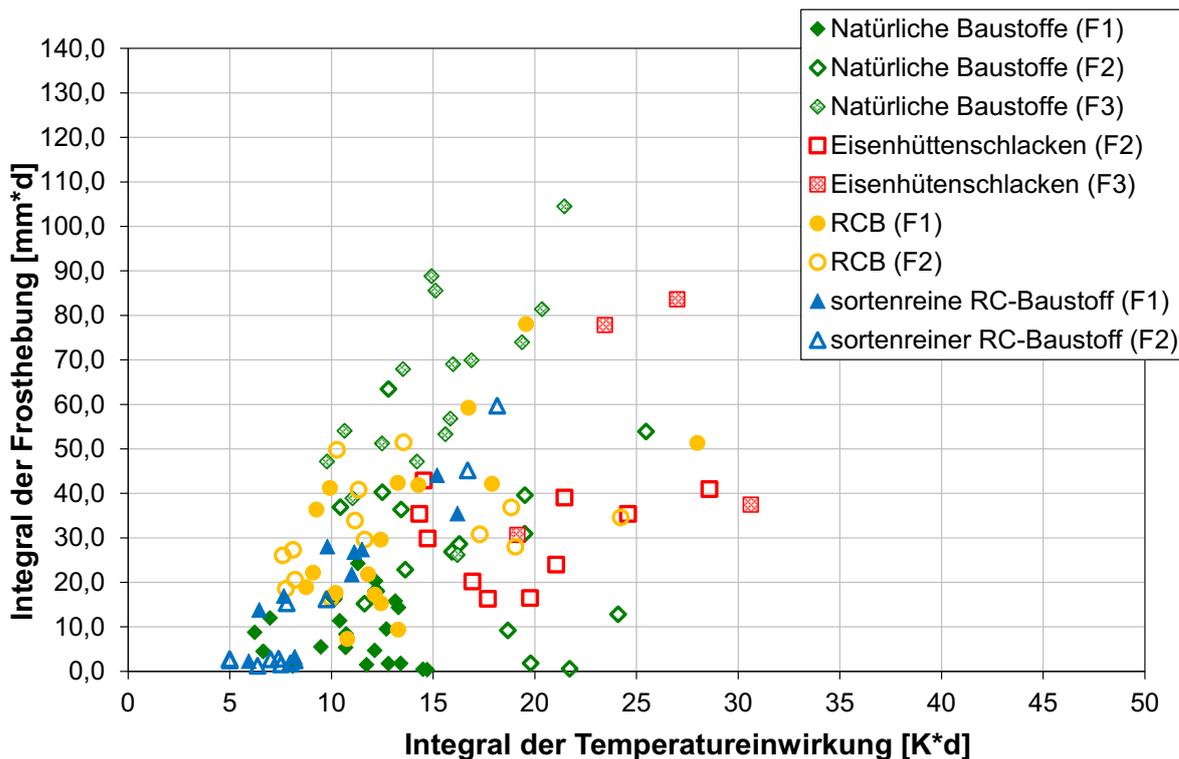


Abbildung 92: Flächenbezogene Auswertung der durchgeführten Frosthebungsversuche

Die Integrale der Frosthebung („Reaktion“) liegen zwischen 0,5 mm*d und 104,5 mm*d. Die der Temperatureinwirkung („Aktion“) sind nicht kleiner als 5,0 K*d und steigen bis auf 30,6 K*d an. Die überwiegende Anzahl der Ergebnisse kann einem Bereich der Frosthebung bis 60 mm*d sowie bei der Temperatureinwirkung zwischen etwa 5 K*d und 25 K*d zugeordnet werden. Die Histogramme über die Verteilung der Messwerte sind in Anhang D beigefügt.

Zur Festlegung eines Bewertungshintergrundes wurden statistische Analysen mit der Software Statistica durchgeführt. Im Rahmen dieser Analysen wurden statistische Ausreißer erfasst. Diese werden standardmäßig durch den Koeffizienten 1,5 definiert. Alle Datensätze, die um mehr als das 1,5-fache des gewählten Interquartilsabstandes entfernt liegen, werden als Ausreißer definiert.

Insgesamt betrachtet liegen alle natürlichen Materialien, die gemäß Bodenklassifikation F1 entsprechen, in einem Bereich unterhalb von 30 mm*d und 15 K*d.

Ohne die Berücksichtigung der Materialien der Klasse F3 gemäß Bodenklassifikation und der berechneten Ausreißer, wurde das 85%-Quartil als Datengrundlage herangezogen. Dementsprechend errechnen sich folgende Bereiche:

- Integral der Frosteinwirkung ≤ 41 mm*d und
- Integral der Temperatureinwirkung ≤ 20 K*d.

In diesen Bereich fallen, mit Ausnahme von drei Ergebnissen, alle RC-Baustoffgemische die F1 gemäß Bodenklassifikation entsprechen. Diese drei Gemische weisen keine Auffälligkeiten in ihrer stofflichen Zusammensetzung o.ä. auf.

Werden ausschließlich die Ergebnisse der Materialgemische aus RC-Baustoffen und Eisenhüttenschlacken betrachtet, verschiebt sich der Bereich für das Integral der Temperatureinwirkung wie folgt:

RC-Baustoffgemische: $\leq 16 \text{ K}^*\text{d}$

Eisenhüttenschlacken: $\leq 27 \text{ K}^*\text{d}$

Des Weiteren wurden Ergebnisse von RC-Baustoffgemischen (Anlage), im Labor z.T. zusammengesetzten RC-Baustoffgemischen und industriellen Nebenprodukten aus dem Datenpool der RUB herangezogen. In der Gruppe der industriellen Nebenprodukte sind Frosthebungsergebnisse von Hochofenstückschlacke, Elektroofenschlacke, LD-Schlacke, Zinkwälzschlacke, Kesselsand, Gießereirestsand und Hausmüllverbrennungssasche enthalten. Auch diese Messdaten wurden flächenbezogen ausgewertet und ihrer Frostempfindlichkeit gemäß Bodenklassifikation aufgeschlüsselt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 93.

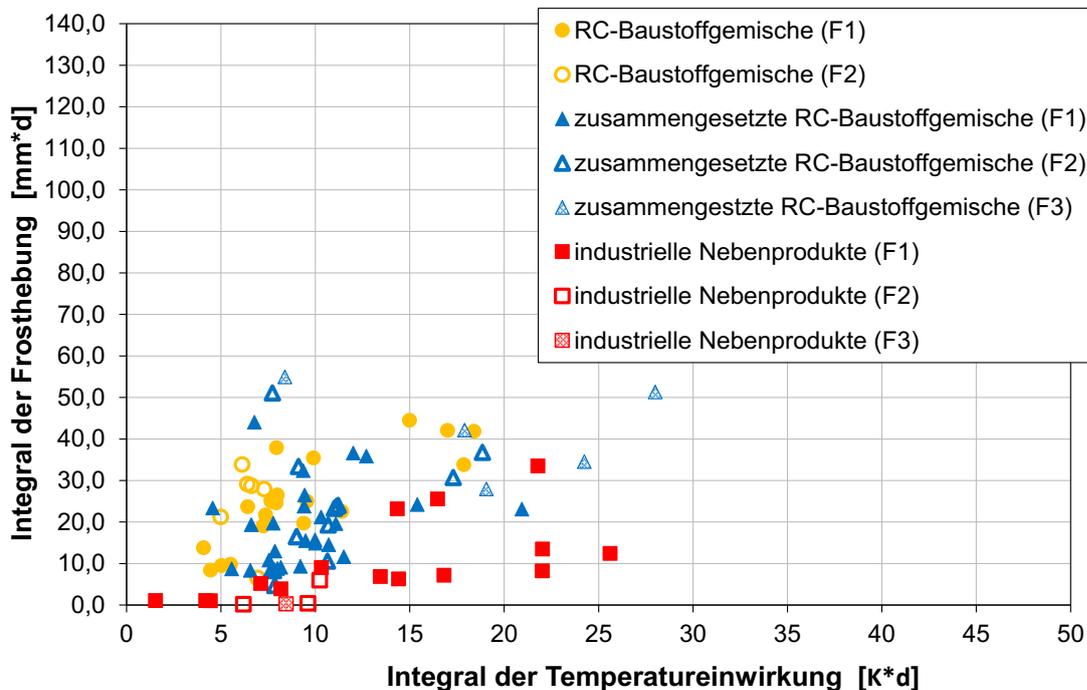


Abbildung 93: Flächenbezogene Auswertung von RC-Baustoffgemischen und industriellen Nebenprodukten

Die RC-Baustoffgemische und industriellen Nebenprodukte, die F1 gemäß Bodenklassifikation entsprechen, liegen alle unterhalb von 45 mm*d und im Bereich bis 26 K*d. Diese Daten wurden ebenfalls um Ausreißer bereinigt und ohne dies F3-Datensätze statistisch ausgewertet. Aufgrund der Datenqualität wurde das 80 %-Quartil herangezogen. Im Vergleich zu den auf Basis der Laborergebnisse errechneten Bereichen, ergeben sich folgende geringfügige Veränderungen:

- Integral der Frosteinwirkung $\leq 43 \text{ mm}^*\text{d}$
- Integral der Temperatureinwirkung für RC-Baustoffgemische $\leq 15 \text{ K}^*$
- Integral der Temperatureinwirkung industrielle Nebenprodukte $\leq 23 \text{ K}^*\text{d}$

6.3 Bewertungsansatz B

International werden zur Bewertung der Frostepfindlichkeit mit Frosthebungsversuchen überwiegend die Maximale Frosthebung, die Hebungsgeschwindigkeit oder auch die Bleibende Hebung jeweils alleinstehend und/oder kombiniert herangezogen. Für die Kennwerte existieren in der Regel auch Anforderungswerte. Diese sind jedoch nur eingeschränkt auf den hier zu bewertenden Frosthebungsversuch übertragbar, da die Randbedingungen und die Temperatureinwirkungen der zugehörigen Frostversuche sehr unterschiedlich sind.

In Österreich wird ein vergleichbares Prüfverfahren in Rahmen einer dreistufigen Frostbewertung angewendet. Zugelassen ist in der dritten und letzten Bewertungsstufe eine Maximale Frosthebung bis 15 mm bei einer Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag von weniger als 1 mm/d [ÖNORM B4810, 2013]. Die anderen beiden Bewertungsstufen gelten ausschließlich für natürliche Gesteinskörnungen. Bewertungsstufe 1 enthält ein Kornkriterium für den Anteil < 0,02 mm und Stufe 2 ein Mineralkriterium. Wenn diese beiden Stufen mit den Ergebnissen des zu prüfenden Materials nicht erfüllt werden oder es sich um ein Recycling-Baustoffgemisch handelt, wird ein Frosthebungsversuch durchgeführt.

Die Auswertung der Einflussfaktoren auf den in diesem Projekt verwendeten Frosthebungsversuch (vgl. Kapitel 5.5) ergab, dass der Parameter Maximale Frosthebung besonders geeignet und die Parameter Bleibende Hebung und Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag geeignet für die Bewertung der Versuchsergebnisse sind.

In Abbildung 94 ist die Maximale Frosthebung der Bleibenden Hebung der Materialien mit der Frostepfindlichkeit F1 und F2 gemäß Bodenklassifikation gegenübergestellt. Die Materialien der Frostepfindlichkeit F2 gemäß Bodenklassifikation enthalten nicht mehr als 7 M.-% Anteil < 0,063 mm und genügen damit den Anforderungen nach ZTV SoB-StB im eingebauten Zustand.

Die Maximalen Frosthebungen liegen zwischen 0 mm und 16,9 mm, die Bleibenden Hebungen betragen maximal 3,2 mm. Die Daten korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,71.

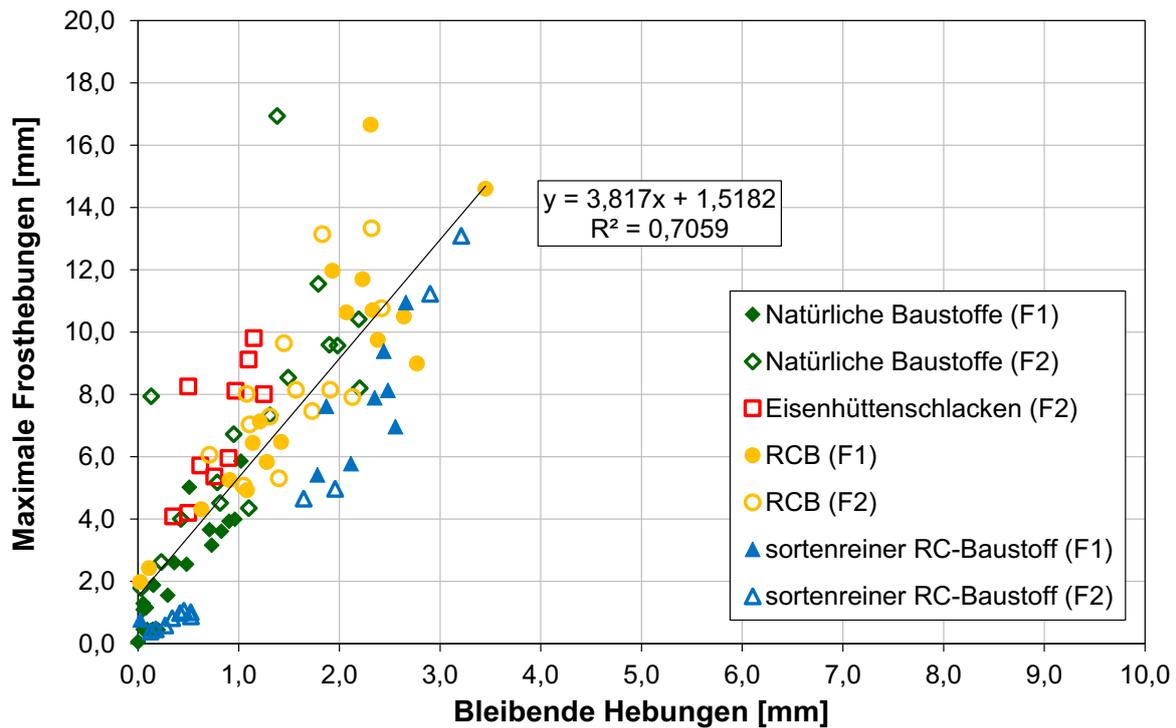


Abbildung 94: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Bleibender Hebung

Auswertungen der Datensätze mit Frosthebungen > 10 mm in Bezug auf Abhängigkeiten zu ihren Materialkennwerten, die in Kapitel 5 als mögliche Bewertungskriterien herausgearbeitet wurden, waren nicht zielführend. Die Diagramme des Kennwertes Maximale Frosthebung zu den Materialkennwerten Kornklasse 5/22,4 mm und Feinanteil sowie die Bleibende Hebung zum Luftporenanteil sind in Anhang D beigefügt.

Zur Festlegung eines Bewertungsmaßstabes wurden die Frosthebungskennwerte Maximale Frosthebung, Bleibende Hebung und Hebungsgeschwindigkeit der Materialgemische, die der Frostempfindlichkeit F1 und F2 gemäß Bodenklassifikation (und Anteil < 0,063 mm < 7 M.-%) entsprechen, mit der Software Statistica analysiert und mittels Box-Whisker-Plots dargestellt.

Der Abstand zwischen dem oberen und unteren Ende der Box wird als Interquartilsabstand bezeichnet. In der Box befinden sich mindestens 50 % der Messwerte und der Median, der als kleines Quadrat, im besten Fall in der Mitte der Box, dargestellt ist. Für die Bewertung der Frosthebungskennwerte maßgebend ist hier das obere Quartil. An den Quartilsbereich schließen sich die Whisker an, die als „T“ dargestellt werden und die übrigen Daten umfassen, die nicht als Ausreißer deklariert wurden. Statistische Ausreißer werden standardmäßig durch den Koeffizienten 1,5 definiert. Demnach werden alle Datensätze, die um mehr als das 1,5-fache der Länge der Box entfernt liegen, als Ausreißer definiert.

In Abbildung 95 ist der Box-Whisker-Plot der Maximalen Frosthebung für natürliche (nat GK) und RC-Baustoffgemische (RCB), sortenreine RC-Baustoffgemische (S RCB) und Eisenhüttenschlacken (Schl) dargestellt.

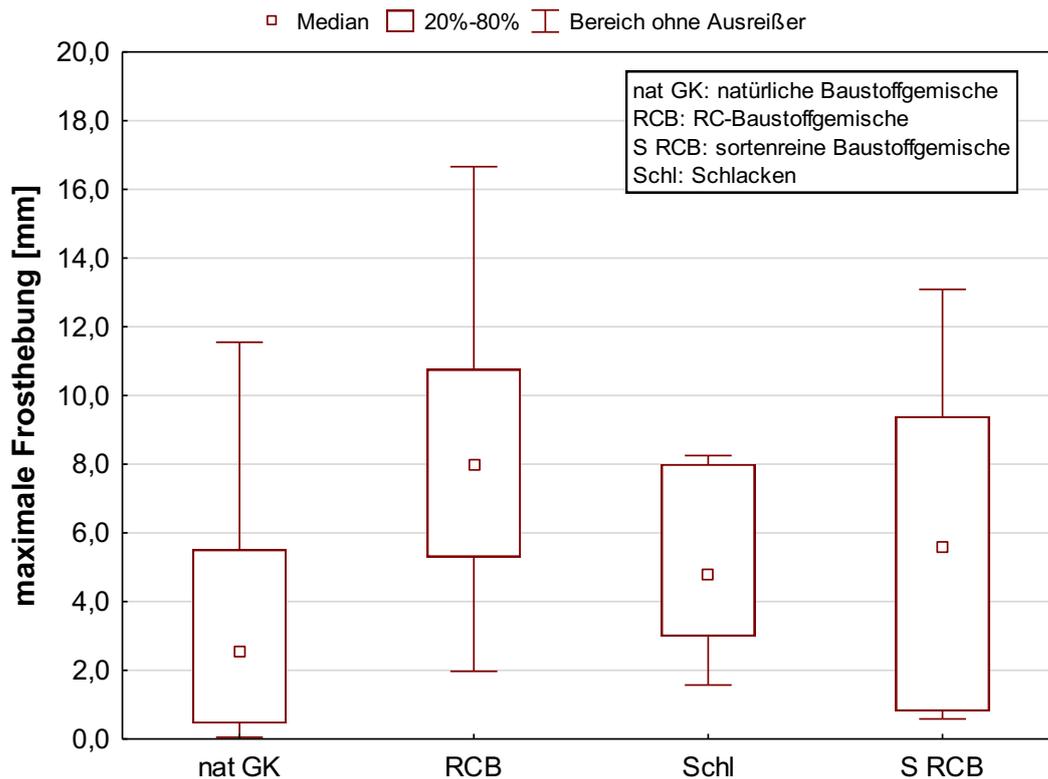


Abbildung 95: Box-Whisker-Plots der Kennwertes Maximale Frosthebung

Innerhalb der Box befinden sich die Werte der Maximalen Frosthebung zwischen dem 20 %- und dem 80 %-Quantil. Je nach Baustoffgemisch sind die Boxen der Maximalen Frosthebung verschieden hoch. Für die RC-Baustoffgemische liegt das obere Quartil bei 10,7 mm und damit am höchsten im Vergleich der vier betrachteten Gemische. Bei den sortenreinen RC-Baustoffgemischen endet die Box bei 9,4 mm und bei den Schlacken bei 8,0 mm. Die Maximalen Frosthebungen der natürlichen Baustoffgemische sind mit 5,5 mm am niedrigsten.

Auf dieser Basis errechnet sich die Bewertungsgrenze für die Bleibende Hebung über die Korrelationsformel aus Abbildung 94 wie folgt:

$$x = \frac{10,7 - 1,5182}{3,817} = 2,41 \text{ mm}$$

Abbildung 96 zeigt die Box-Whisker-Plots für den Kennwert Bleibende Hebung. Innerhalb der Box befinden sich die Messwerte zwischen dem 20 %- und dem 80 %-Quantil.

Die Boxen haben alle einen unterschiedlichen Interquartilsabstand. Das höchste obere Quartil wird von sortenreinen RC-Baustoffgemischen erzielt und liegt bei 2,48 mm, das von RC-Baustoffgemischen bei 2,35 mm. Sowohl für die Baustoffgemische mit Schlacke als auch für die mit natürlichen Gesteinskörnungen schließt das Quartil unterhalb von 1,0 mm. Die Berechnung des Bewertungsmaßstabes für die Bleibende Hebung und das maßgebende maximale Ergebnis der statischen Auswertung stimmen überein.

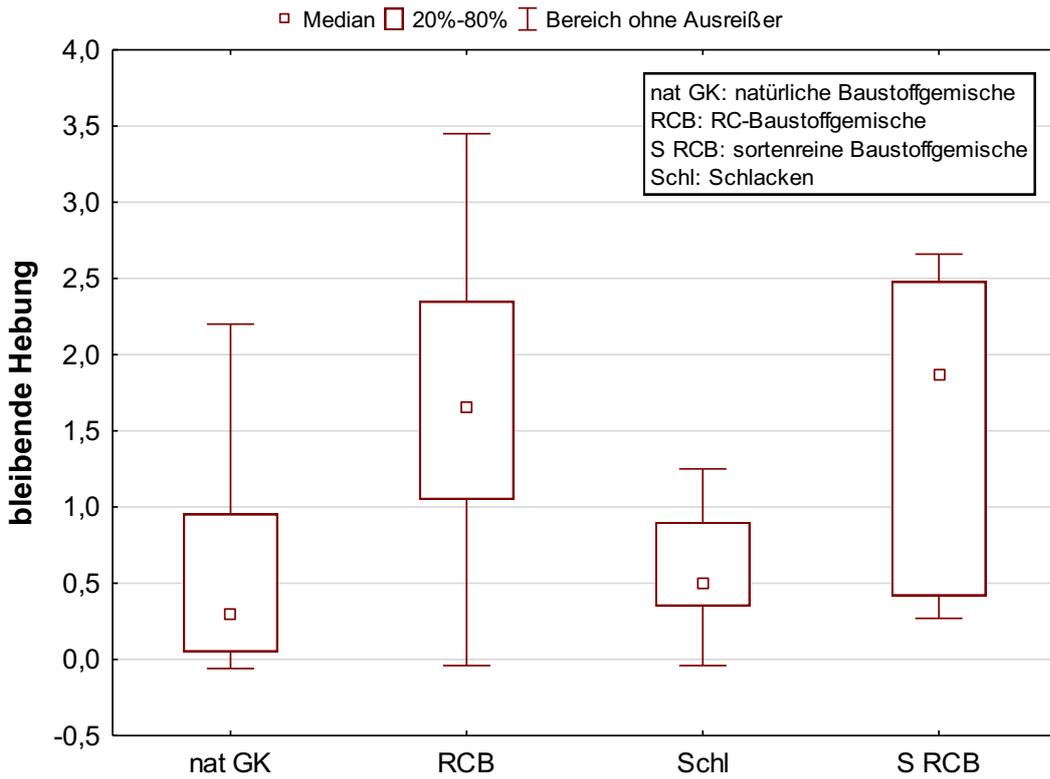


Abbildung 96: Box-Whisker-Plots der Kennwertes Bleibende Hebung

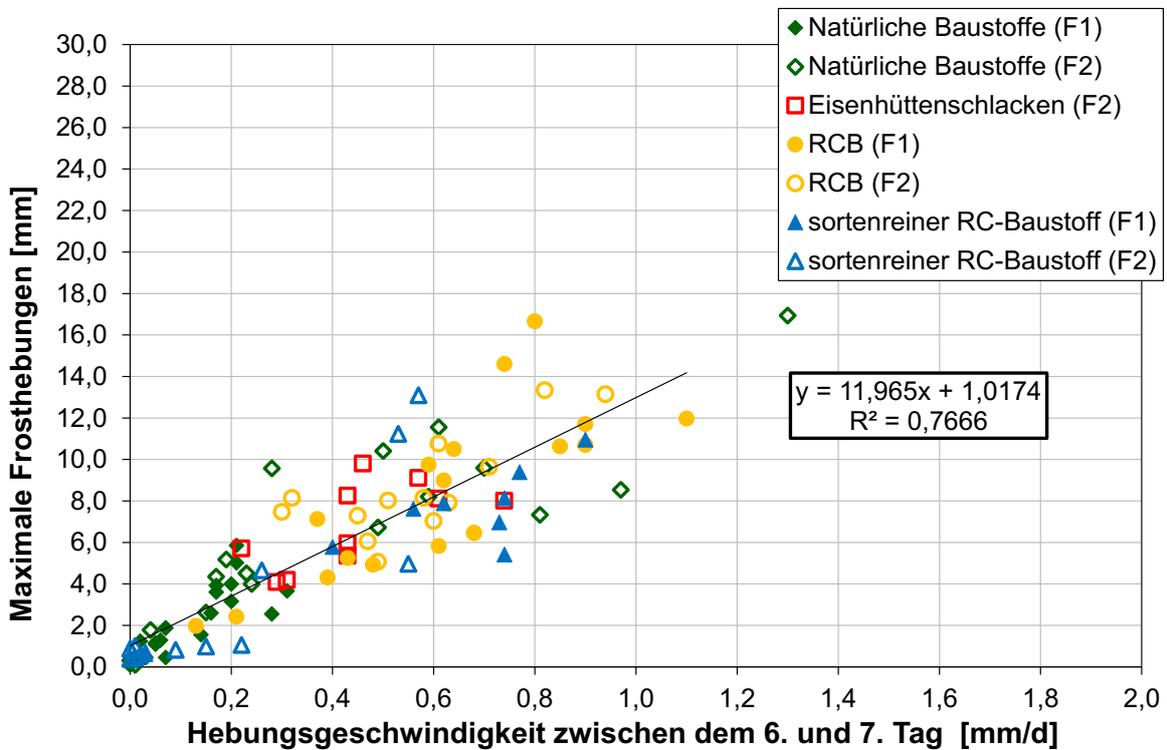


Abbildung 97: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Hebungsgeschwindigkeit zw. dem 6. und 7. Tag

In Abbildung 97 ist die Maximale Frosthebung der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag gegenübergestellt. Die Hebungsgeschwindigkeiten

liegen zwischen 0 mm/d und 23,8 mm/d. Diese korrelieren mit der Maximalen Frosthebung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,72. Über die Geradengleichung der Korrelation berechnet sich die Hebungsgeschwindigkeit bei einer Maximalen Frosthebung von 10,7 mm wie folgt:

$$x = \frac{10,7 - 1,0174}{11,965} = 0,81 \text{ mm/d}$$

In Abbildung 98 sind die Box-Whisker-Plots für den Kennwert Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag dargestellt. Innerhalb der Box befinden sich die Messwerte zwischen dem 15 %- und dem 85 %-Quartil.

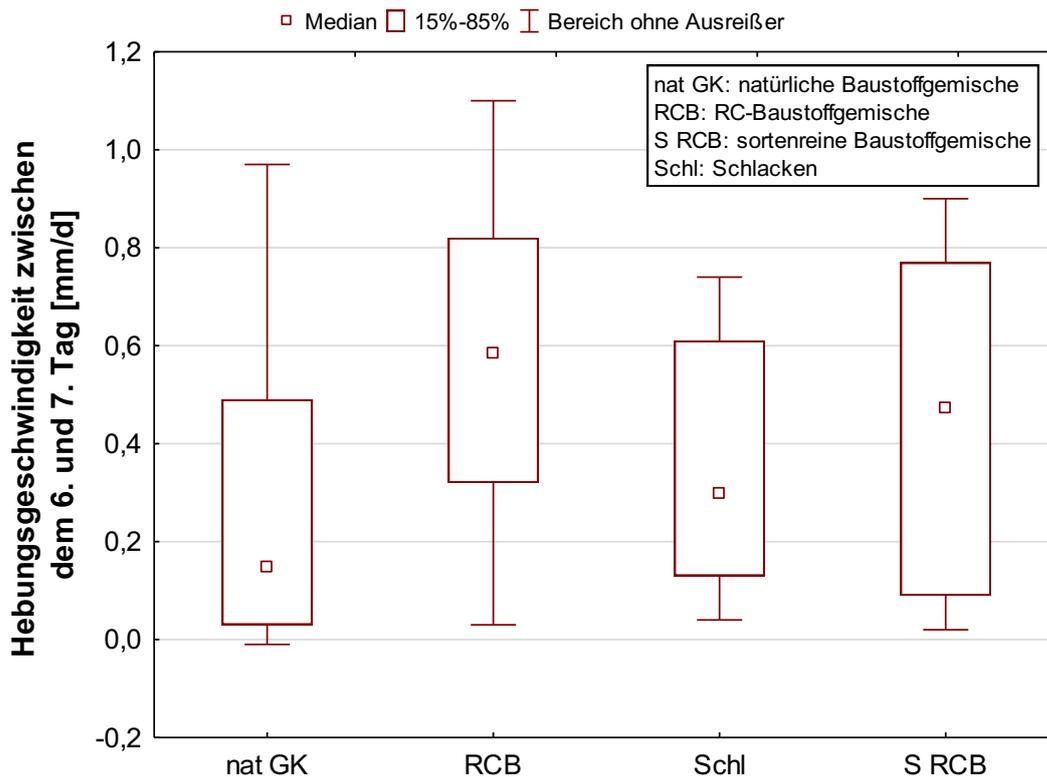


Abbildung 98: Box-Whisker-Plots der Kennwertes Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag

Das obere Quartil der RC-Baustoffgemische weist die höchste Hebungsgeschwindigkeit auf und ist maßgebend. Es endet bei 0,82 mm/d, das der sortenreinen RC-Baustoffgemische bei 0,77 mm/d. Bei den Schlacken liegt das obere Ende der Box bei 0,61 mm/d und bei den natürlichen Baustoffgemischen bei 0,49 mm/d.

Die Berechnungen des Bewertungsmaßstabes für die Hebungsgeschwindigkeit und das maßgebende Ergebnis der statistischen Auswertung zeigen eine gute Übereinstimmung.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich zusammenfassend für die Versuchsdaten die folgenden Bewertungsgrenzen für eine Frostempfindlichkeit F1 und F2 gemäß Bodenklassifikation:

- die maximale Frosthebung: 11 mm,
- die bleibende Hebung: 2,5 mm,

- die Hebungsgeschwindigkeit
zwischen den 6. und 7. Tag: 0,8 mm/d

Werden die Ergebnisse der Frosthebungsversuche aus dem Datenpool ausgewertet, so kann ein ähnlicher Bewertungsmaßstab angelegt werden.

Im Datenpool sind neben den RC-Baustoffgemischen (RCB) und den sortenreinen RC-Baustoffgemischen (S RCB) in der Gruppe der industriellen Nebenprodukte (INP) Frosthebungsergebnisse von Hochofenstückschlacke, Elektroofenschlacke, LD-Schlacke, Zinkwälschlacke, Kesselsand, Gießereirestsand und Hausmüllverbrennungsgasche enthalten.

Abbildung 99 bis Abbildung 101 zeigen die Box-Whisker-Plots für die drei Kennwerte Maximale Frosthebung, Bleibende Hebung und Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag. Innerhalb der Boxen befinden sich die Messwerte zwischen dem 20 %- und dem 80 %-Quartil. Für alle 80 %-Quartile innerhalb einer Auswertung gilt, dass die höchst gelegene Box maßgebend ist.

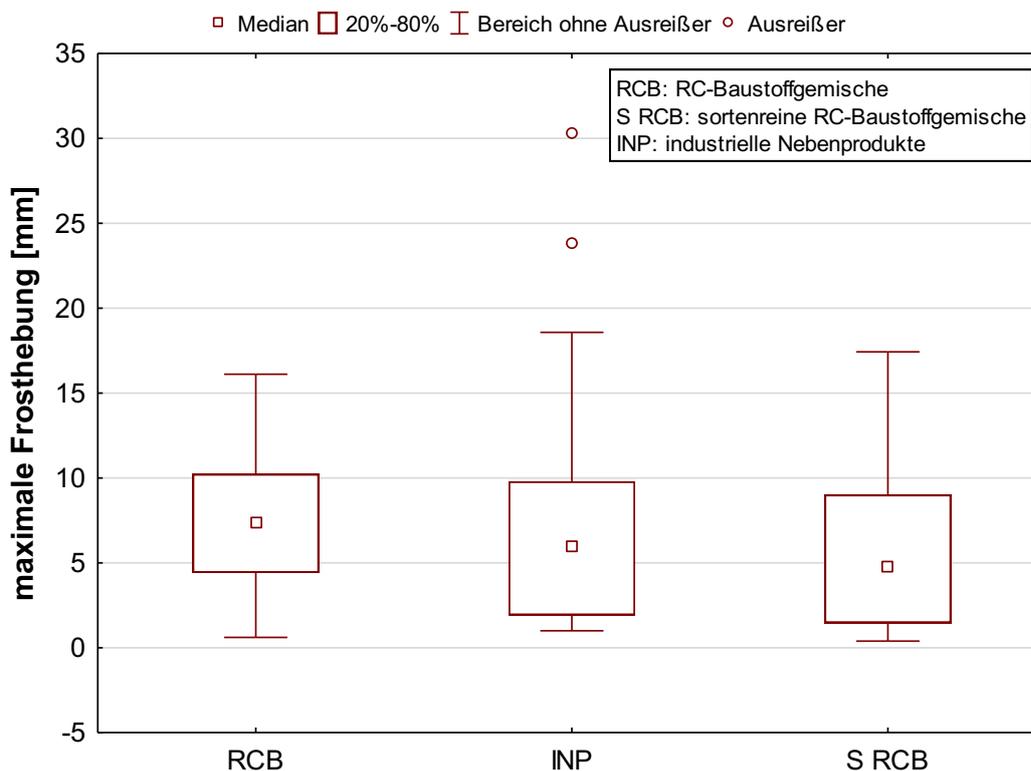


Abbildung 99: Abgleich der Bewertungsgrenzen für die Maximale Frosthebung mit dem Datenpool

Das obere Quartil in der Box der Maximalen Hebungen von RC-Baustoffgemischen liegt bei 10,2 mm, das der industriellen Nebenprodukte bei 9,8 mm und das der sortenreinen RC-Baustoffgemische bei 9,0 mm.

Bei der Bleibenden Hebung unterscheidet sich ebenfalls der Interquartilsabstand der Boxen, jedoch ausgeprägter als bei der maximalen Hebung. Das obere Quartil in der Gruppe der RC-Baustoffgemische liegt bei 2,4 mm und das der sortenreinen RC-Baustoffgemische bei 2,5 mm. Die industriellen Nebenprodukte weisen niedrigere Hebungen auf, dementsprechend endet die Box bei 1,4 mm.

Die 80 %-Quartile der Hebungsgeschwindigkeiten liegen für RC-Baustoffgemische bei 0,67 mm/d, für industrielle Nebenprodukte und für sortenreine RC-Baustoffgemische bei 0,75 mm/d.

Die Bewertungsmaßstäbe für alle drei Frosthebungskennwerte, die mit den Labor-daten dieses Projektes generiert wurden, können auf den Datenpool übertragen werden.

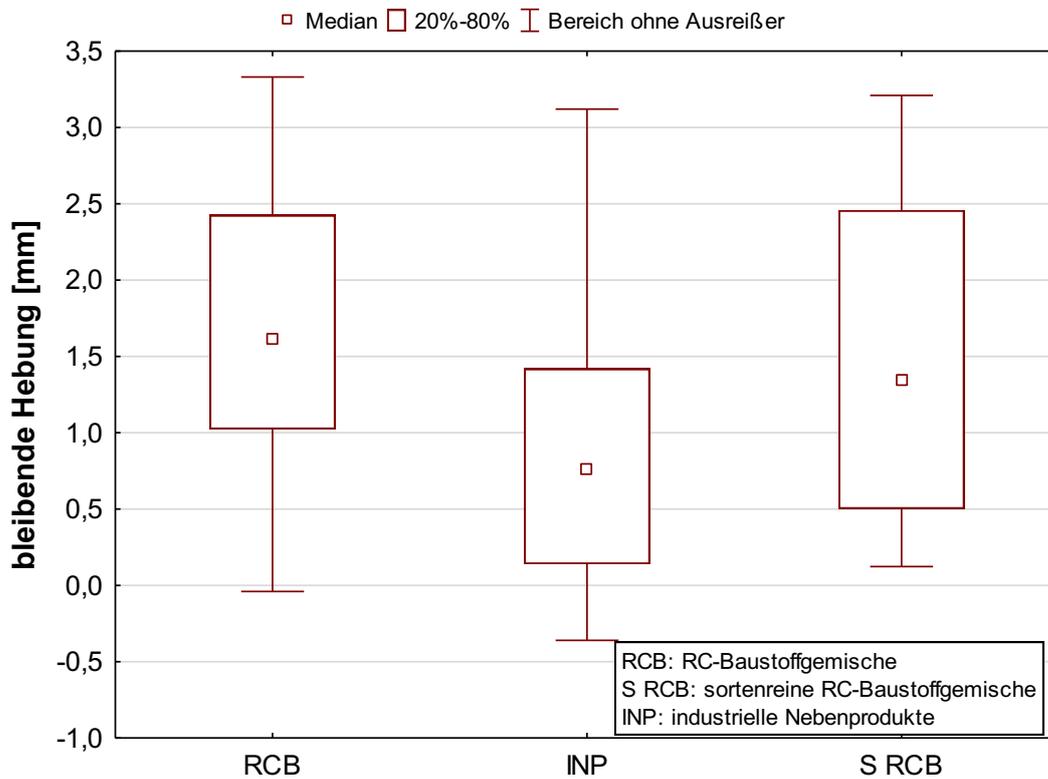


Abbildung 100: Abgleich der Bewertungsgrenzen für die Bleibende Hebung mit dem Datenpool

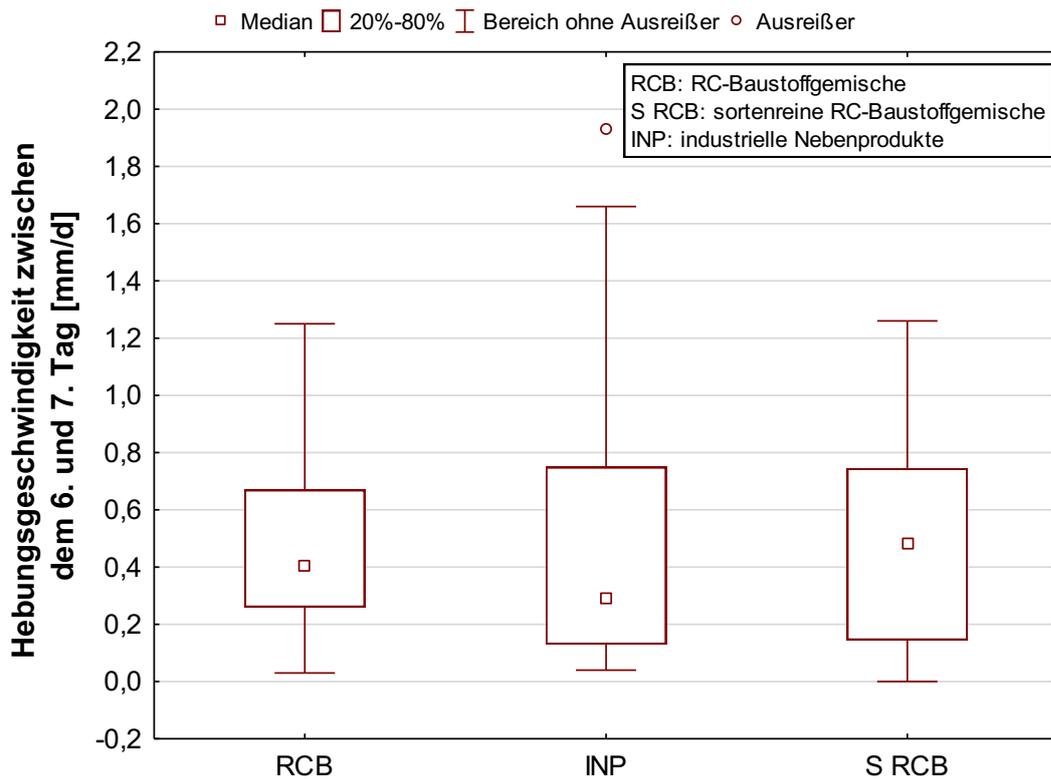


Abbildung 101: Abgleich der Bewertungsgrenzen für die Hebungsgeschwindigkeit mit dem Datenpool

6.4 Auswahl des Bewertungsverfahrens

Im Rahmen der Entwicklung eines Bewertungshintergrundes für den Frosthebungsversuch wurden zwei Bewertungsansätze entwickelt. Ansatz A beinhaltet die Auswertung der Fläche unter der Hebungskurve und die unter der Kurve der Kühlkopftemperatur. In Ansatz B wurden die im Versuch erzeugten Kennwerte Maximale Frosthebung, Bleibende Hebung und Hebungsgeschwindigkeit statistisch ausgewertet und daraus ein Bewertungsmaßstab abgeleitet. Zum Abgleich, dass beide Ansätze die gleiche Bewertung liefern, wurden die Intergrale der Frosthebung den Kennwerten aus dem Frosthebungsversuch gegenübergestellt (Abbildung 102).

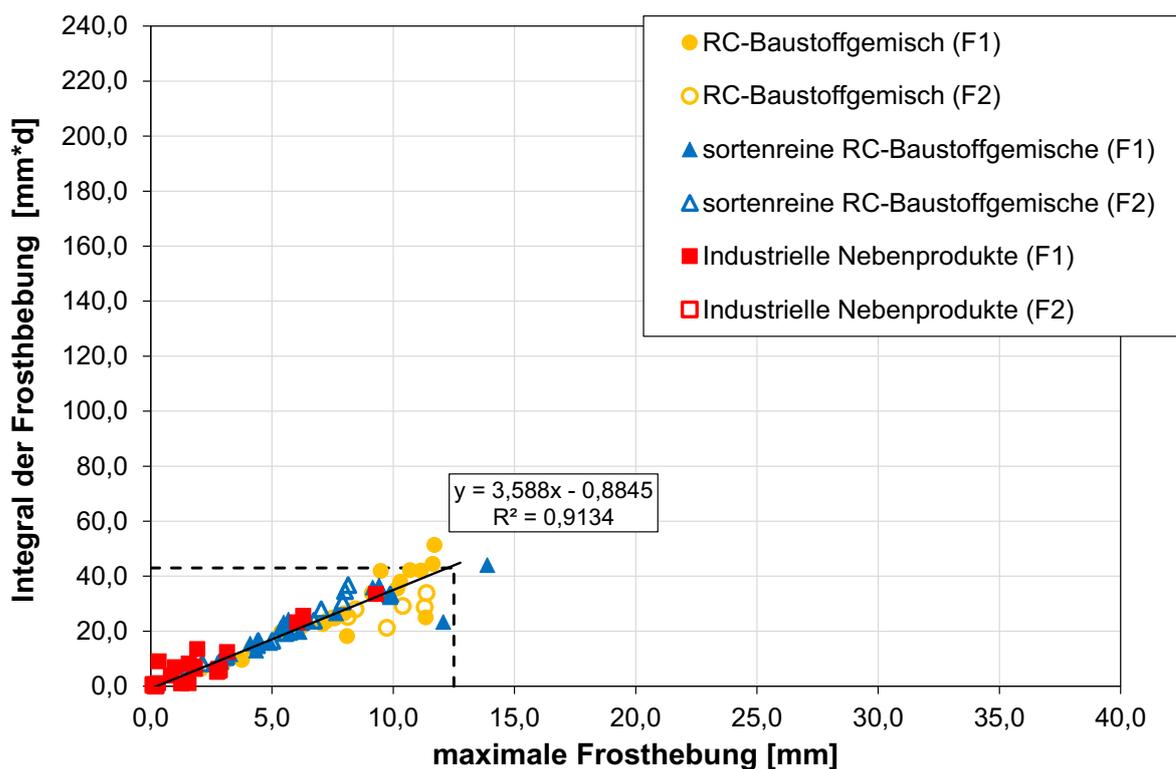


Abbildung 102: Vergleich der Bewertungsansatz A und B für den Kennwert Maximale Frosthebung

Für die Gegenüberstellung wurden die Daten aus dem Datenpool, die einer Frostempfindlichkeit F1 und F2 gemäß Bodenklassifikation entsprechen, herangezogen. Die Daten der Klasse F2 genügen den Anforderungen der [ZTV SoB-StB] an den Anteil $< 0,063$ mm im eingebauten Zustand. Es liegt eine Bestimmtheitsmaß von 0,91 bei einer linearen Regression vor.

Wird aus der Trendlinienformel die maximale Frosthebung mit dem Integral der Frosthebung ≤ 43 mm*d aus Ansatz A als Bezugspunkt berechnet, so ergibt sich diese zu 12,2 mm. Im Vergleich zu dem Wert von 11 mm für die maximale Frosthebung, der auf statistischer Basis in Ansatz B ermittelt wurde, entspricht das einem um rd. 9 % höheren Wert. Bei den Gegenüberstellungen des Integrals der Frosthebung zur Bleibenden Hebung und der Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag konnten keine Korrelationen ermittelt werden. Die Diagramme hierzu sind in Anhang D beigefügt.

Bewertungsansatz B wurde ursprünglich konzipiert, um Kennwerte aus dem Frosthebungsversuch und Materialkennwerte miteinander zu verknüpfen. Dieser Ansatz hat sich als nicht zielführend herausgestellt. Schlussendlich erzeugen die Überlagerungen der unterschiedlichen materialspezifischen Einflussfaktoren zu hohe Streuungen. Werden jedoch Materialgemische in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften, z.B. hoher Feinanteil, im Labor gezielt zusammengesetzt, lässt sich dieser materialspezifische Einflussfaktor auf die Frosthebung überwiegend korrelieren. Eine Übertragung dieser Korrelationen auf heterogene Baustoffgemische aus der Praxis, wie sie schwerpunktmäßig im Datenpool der RUB vorhanden sind, ist nicht möglich.

Für die Validierung der Frosthebungs Kennwerte wird daher der Bewertungsansatz A herangezogen. Bei der flächenbezogenen rechnerischen Auswertung der Versuchsdaten und des Datenpools zeigt sich, dass sich insbesondere die Ergebnisse von RC-Baustoffgemischen und industriellen Nebenprodukten gut differenzieren lassen.

7. Validierung und Empfehlung eines Bewertungskriteriums

7.1 Ergebnisse von Versuchen an Tragschichtmaterialien aus Praxisanwendungen

Im Rahmen des Projekts „Evaluation Ressourcen schonender Tragschichten“ [Radenberg et al., 2014] sind an 15 verschiedenen Strecken aus den Tragschichten RC-Baustoffgemische entnommen worden. Die Materialien waren zum Entnahmezeitpunkt den Einwirkungen aus Wetter und Verkehr über einen Zeitraum von 10 bis 23 Jahren ausgesetzt. Vorhandene Schadensmerkmale an den Straßenoberflächen stammten ursächlich nicht aus der Tragschicht. Keines der entnommenen RC-Baustoffgemische wies Spuren quellfähiger Komponenten auf. Von diesen 15 Materialien liegen Ergebnisse von Frosthebungsversuchen vor, die an der RUB durchgeführt wurden.

Des Weiteren ist in 2006 von der BAST eine Erprobungsstrecke in Seelow angelegt worden, deren Tragschichten abschnittsweise aus RC-Baustoffgemischen mit definierten Ziegelanteilen hergestellt wurden [Jansen et al., 2011]. Neben verschiedenen Untersuchungsreihen zur Tragfähigkeit dieser Straßenabschnitte wurden auch Materialproben u.a. für Frosthebungsversuche entnommen, die bei der BAST durchgeführt worden sind.

In Abbildung 103 sind die Ergebnisse dieser Frosthebungsversuche an Praxismaterialien, ausgewertet mit dem flächenbezogenen Bewertungsansatz, dargestellt.

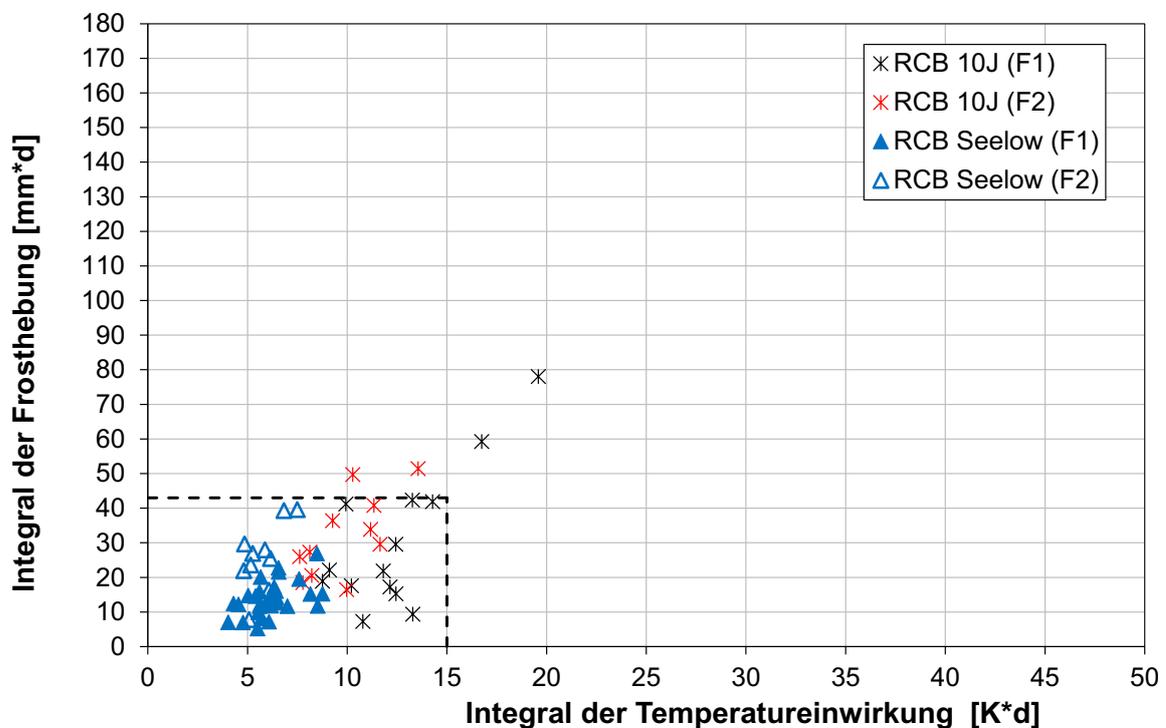


Abbildung 103: Frosthebungsergebnisse der Materialien aus der Versuchsstrecke in Seelow und der 15 Tragschichten aus RC-Baustoffgemischen

Die Intergrale der Frosteinwirkung der Proben aus den Versuchsstrecken liegen zwischen 5,2 und 78,1 mm*d, die der Intergrale der Temperatureinwirkung zwischen 4,2 und 19,6 K*d. In Kapitel 6.2 wurde als Bewertungsmaßstab für das

Integral der Frosthebung $\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$ und $\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$ für den Intergral der Temperatureinwirkung von RC-Baustoffgemischen errechnet, die einer Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation entsprechen.

Dieser Bereich wird von nahezu allen Ergebnissen der 15 Materialien eingehalten. Lediglich zwei RC-Baustoffgemische aus den 15 Strecken erzielen höhere Frosthebungsintergrale. Diese beiden Materialien sind stofflich und mineralogisch unauffällig. Jedoch beginnt deren Eislinnenbildung im Vergleich zu anderen RC-Baustoffgemischen bereits nach 1,2 bzw. 2,0 Versuchstagen, kombiniert mit einer hohen Maximalen Frosthebung.

7.2 Ergebnisse von Schadensfällen

Seit 2007 werden an der RUB natürliche und Recycling-Baustoffgemische und industrielle Nebenprodukte mit dem Frosthebungsgerät untersucht. In diesem Zeitraum wurden auch Untersuchungen an RC-Baustoffgemischen mit schädigendem Frosthebungspotential durchgeführt. Alle Proben wurden im Anschluss an den Frosthebungsversuch gesiebt und deren Frostempfindlichkeit entsprach F1 gemäß Bodenklassifikation. Nur im Ausnahmefall standen der RUB Informationen zur Korngrößenverteilung im Anlieferungszustand und zum exakten Schadensbild zur Verfügung. Die Frosthebungsergebnisse wurden daher zur Validierung kategorisiert. In die Kategorie Praxisdaten fallen alle Ergebnisse aus Frosthebungsversuchen, bei denen der RUB die Schadensursache unklar war. Bei der Kategorie Schadensfälle konnte der Schaden mineralogisch ursächlich auf die Tragschicht bzw. das dort verbaute RC-Baustoffgemisch zurückgeführt werden. Insbesondere die Ergebnisse dieser Frosthebungsversuche dienen der Validierung des entwickelten Bewertungskriteriums für RC-Baustoffgemische.

In Kapitel 6.2 wurden für das Frosthebungsintergral ($\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$) und für die Temperatureinwirkung ($\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$) Bewertungsmaßstäbe für Baustoffgemische der Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation entwickelt. Diese Grenzen und die Praxisdaten, ausgewertet mit der flächenbezogenen Versuchsauswertung aus Ansatz A, sind in Abbildung 104 dargestellt.

Die Ergebnisse der Praxisproben liegen zwischen $5 \text{ K} \cdot \text{d}$ und $17 \text{ K} \cdot \text{d}$ sowie bei maximal $49 \text{ mm} \cdot \text{d}$. Die Ergebnisse der Schadensfälle schwanken zwischen $10 \text{ K} \cdot \text{d}$ und $20 \text{ K} \cdot \text{d}$ sowie $57 \text{ mm} \cdot \text{d}$ bis $175 \text{ mm} \cdot \text{d}$.

Auf Basis dieser Darstellung ist davon auszugehen, dass die untersuchten Tragschichtmaterialien in der Kategorie „Praxisproben“ wahrscheinlich nicht die Ursache für den Schaden der Straße waren. Die nachweislich schadhafte Tragschichtmaterialien, die hier der Kategorie „Schadensfälle“ zugeordnet wurden, weisen alle Integrale der Frosthebung von $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}$ auf. Vor dem Hintergrund dieser deutlichen Trennung der Straßenschäden auslösenden und unbedenklichen Tragschichtmaterialien, wird die hier entwickelte Bewertungsgrenze für das Integral der Frosteinwirkung von $\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$ bestätigt.

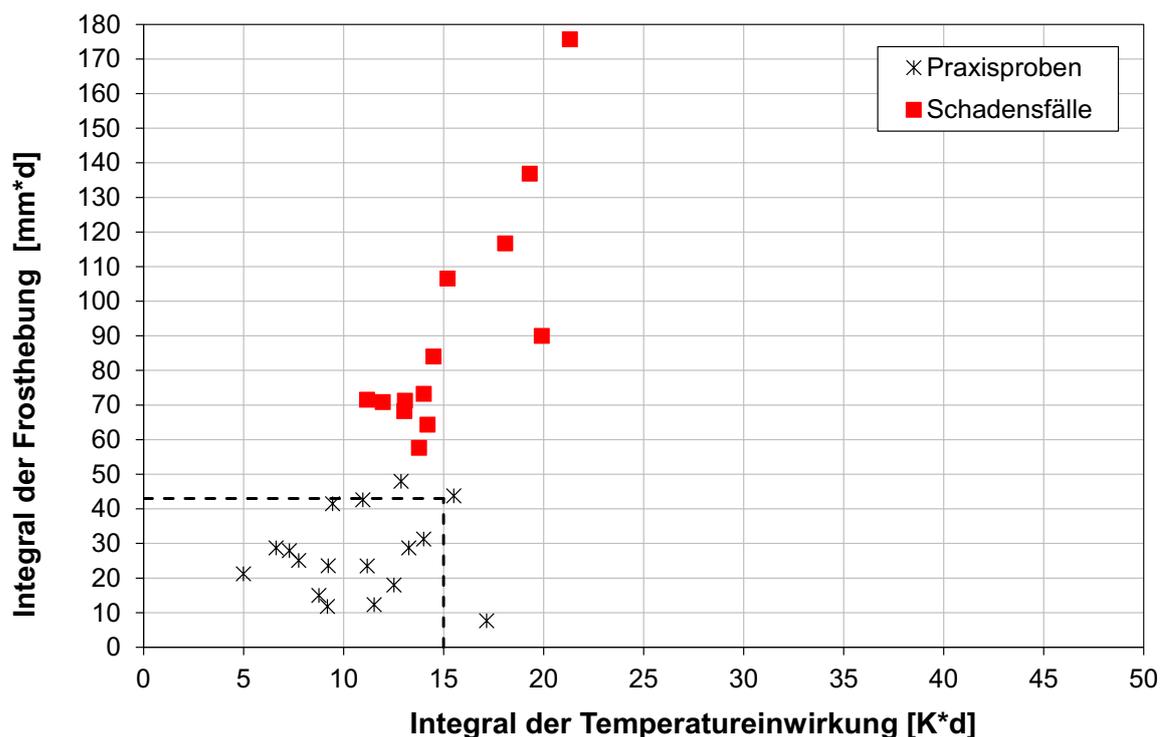


Abbildung 104: Frosthebungsergebnisse aus Schadensfällen unterschiedlicher Kategorien

7.3 Empfehlung eines Bewertungskriteriums

Nach den [TL SoB-StB, 2007] müssen Baustoffgemische für Frostschutz- und Schottertragschichten einen Widerstand gegen Frostbeanspruchung aufweisen. Das diesem Anforderungswert hinterlegte Prüfverfahren sieht eine volle Wassersättigung des Prüfgutes vor, was einer sehr starken Beanspruchung entspricht und nicht den Bedingungen in der Praxis entspricht. Die Erfahrungen zeigen, dass RC-Baustoffgemische trotz guter Praxiserfahrungen die Anforderungen nicht erfüllen. Eine Anforderung an die Frostempfindlichkeit besteht derzeit nicht.

Nach den [ZTV E-StB, 2017] wird die Frostempfindlichkeit von Böden und Baustoffen gemäß Bodenklassifikation indirekt über die Korngrößenverteilung eingestuft. Diese basiert auf langjährigen Erfahrungen mit natürlichen Baustoffen.

Für die Bewertung der Frostempfindlichkeit von Baustoffen wurde eine Vielzahl von Laborversuchen durchgeführt. Bei der Auswertung stellt sich eine flächenbezogene Auswertung der Frosthebungskurven als zielführender heraus, als die Auswertung von Frosthebungsparametern in Kombination mit Materialparametern. Für die flächenbezogene Auswertung wurde ein automatisiertes Formular entwickelt.

Zusammenfassend werden auf Basis der Laborversuche und des Datenpools der RUB folgende Bewertungskriterien für den Frosthebungsversuch empfohlen:

- natürliche Baustoffe (Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation)

Integral der Frosteinwirkung: $\leq 30 \text{ mm} \cdot \text{d}$

Integral der Temperatureinwirkung: $\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$

- RC-Baustoffgemische (Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation)
 - Integral der Frosteinwirkung $\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$
 - Integral der Temperatureinwirkung $\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$
- Industrielle Nebenprodukte (Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation)
 - Integral der Frosteinwirkung $\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$
 - Integral der Temperatureinwirkung industrielle Nebenprodukte $\leq 23 \text{ K} \cdot \text{d}$

Die Bewertungsansätze für natürliche Baustoffe und industrielle Nebenprodukte konnten mangels Praxisdaten nicht validiert werden.

Mit dem hier durchgeführten Frosthebungsversuch kann die Frostempfindlichkeit praxisingerecht untersucht werden. Darüber hinaus ist mit dem oben empfohlenen Bewertungskriterium eine Bewertung der Frostempfindlichkeit von RC-Baustoffgemischen gemäß Bodenklassifikation F1 möglich.

8. Literaturrecherche zu Modellierungen von Frostkörpern

Die Literaturrecherche wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Kim Brandes am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der RUB durchgeführt [Brandes, 2017].

8.1 Allgemeines

Auf vielen Gebieten des Bauingenieurwesens existieren numerische Modelle. Die veröffentlichten Studien und Modelle bezogen auf den Straßenbau sind jedoch sehr begrenzt. Daher wurde die Literaturrecherche auf Modelle ausgeweitet, die nicht direkt auf den Straßenbau übertragbar sind.

Derzeit beschränkt sich die Forschung zur numerischen Simulation von Frostkörpern auf Drei- oder Vierphasenmodelle. Diese Modelle finden z.B. im Tunnelbau oder im Grundbau Anwendung. In Bezug auf Tragschichten im Straßenbau fokussiert sich die Recherche auf Vierphasenmodelle, welche im Allgemeinen die Phasen Gestein bzw. Feststoff, Flüssigkeit, Eis und Luft umfassen.

8.2 Übersicht der Vierphasenmodelle

In Tabelle 11 werden die zur näheren Erläuterung ausgewählten Vierphasenmodelle mit ihren jeweiligen Anforderungen und Schwerpunkten aufgelistet. Die Modelle werden anschließend detailliert beschrieben, um einen Vergleich und eine Analyse unter straßenbauspezifischen Gesichtspunkten durchführen zu können.

Tabelle 11: Tabellarische Übersicht der 4-Phasen-Modelle [Brandes, 2017]

Quelle	Modellierte Phasen	Anforderungen an Boden	Schwerpunkte
Ricken, T.; Bluhm, J.: Modeling of liquid and gas saturated porous solids under freezing and thawing cycles (2013)	Beton, Wasser, Eis, Luft	gesättigt	Beschreibung des Phasenwechsels unter Berücksichtigung der Kapillareffekte, Porositätsänderungen, Verteilung des Wasser- und Eisdruckes, Festkörper-Verformung
Li, N.; Chen, F.; Xu, B.; Swoboda, G.: Theoretical modeling framework for an unsaturated freezing soil (2008)	Boden, Eis, Wasser, Luft	ungesättigt, halboffen, halbversiegelt, gefroren	Beschreibung der Wärmeübertragung und Wasserinfiltration, der Transportvorgänge und gleichmäßigen Wärme- und Stoffübertragungen in den Phasenwechseln
Tan, X.; Chen, W.; Tian, H.; Cao, J.: Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical solution and application (2011)	Boden, Eis, Wasser, Luft	gesättigt	Beschreibung der Wasserströme und Wärmetransporte unter Einfluss der Wärmeleitung, der latenten Wärme und der Sickergeschwindigkeit
Zhao, L.; Gray, D.; Male, D.: Numerical analysis of simultaneous heat and mass transfer during infiltration into frozen ground (1997)	Boden, Eis, Wasser, Luft	ungesättigt	Beschreibung der Wärmeübertragung und Wasserinfiltration während der Gefrier- und Auftauphasen
Zhang, S.; Teng, J.; He, Z.; Sheng, D.: Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study (2016)	Wasser, Boden, Eis, Luft	ungesättigt	Beschreibung der Feuchtigkeits- und Wärmebewegungen mit Berücksichtigung von Dampfströmen

8.3 Modell nach Ricken und Bluhm

8.3.1 Allgemeines

Bei dem nachfolgend beschriebenen Modell nach Ricken und Bluhm handelt es sich um die numerische Simulation der Frostkörperbildung eines wassergesättigten, porösen Mediums. Dabei wird ein Vierphasenmodell, bestehend aus den Komponenten Feststoff, Wasser, Luft und Eis zugrunde gelegt. Für den Feststoffanteil wurde eine Probe aus porösem Beton gewählt.

Der Schwerpunkt dieses Modells liegt in der Beschreibung des Phasenwechsels von Wasser zwischen seiner flüssigen und seiner festen Phase vor, während und nach der Eisbildung unter thermischer Belastung. Dabei wurden Kapillareffekte, Porositätsänderungen, Verteilung des Wasser- und Eisdruckes und Festkörperverformungen berücksichtigt. Darüber hinaus wurden die Ausdehnung des Eises während der Gefrierphase, der Wasser- und Gasdruck in den umgebenden Oberflächen, die Temperaturverteilung, die kapillare Saugwirkung und der Einfluss der Permeabilität mitbetrachtet. Für die Simulation von Frost-Tau-Zyklen sind die linearisierten Formen der Gleichgewichtsbedingungen im Rahmen eines Standard-Galerkin-Verfahrens ins Finite-Elemente-Programm FEAP implementiert worden. Das Galerkin-Verfahren ermöglicht eine numerische Näherungslösung von Differentialgleichungen. Die Randbedingungen des Problems werden durch Dirichlet- oder Neumann- Einschränkungen formuliert [Ricken, Bluhm, 2013].

8.3.2 Annahmen und Vereinfachungen

Für die Umsetzung in ein numerisches Modell werden laut Ricken und Bluhm Annahmen und Vereinfachungen für eine präzisere Beschreibung der thermischen Effekte und der kapillaren Saugwirkung getroffen. In dem Modell wird von einer geringen Bewegung des Festkörpers und des Wasserstroms während des gesamten Prozesses ausgegangen. Aufgrund dessen können dynamische Effekte vernachlässigt werden. Weitere Annahmen betreffen sowohl die Inkompressibilität des Festkörpers, des Wassers und des Eises sowie die Kompressibilität der Luft. Des Weiteren wird angenommen, dass lokale Temperaturunterschiede im Feststoff nicht vorhanden sind und sich die Moleküle in Eis und Feststoff gleich sättigen. Eine Ausnahme dabei bildet ihre Sättigung des Feststoffes, die vor Beginn des Phasenwechsels im Prüfmedium Wasser herrscht. Sobald die Eislinnenbildung beginnt, nimmt die anfängliche Festkörpersättigung einen konstanten Wert an. Der molekulare Austausch beschränkt sich auf den Wechsel von Flüssigwasser- und Eisanteilen, der innere Energiehaushalt bleibt bei der Modellierung unberücksichtigt.

Für die Beschreibung dieses Vierphasenmodells werden Skalarfeldgleichungen aufgestellt. Die Feldgleichungen für poröse Medien setzen sich in diesem Modell aus den Gleichgewichtsbedingungen der einzelnen Bestandteile zusammen. [Ricken, Bluhm, 2013].

8.3.3 Validierungsansatz

Bei der numerischen Simulation wird ein quadratischer Probekörper mit einem Querschnitt von 15 cm² und einer Höhe von 7,5 cm verwendet. Die Abmessungen beziehen sich auf den CIF-Test („Capillary suction, Internal damage and Freeze-

thaw test“), der in der Betontechnologie Anwendung findet [CEN/TR 15177, 2006]. Mithilfe des CIF-Tests wird der Widerstand von Beton gegen Frost-Tau-Wechsel, anhand der Feuchteaufnahme und dem Wassersättigungsgrad, bestimmt. Zudem ermöglicht der Test die Messung von inneren Schäden in der Betonstruktur, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Betons führen [Setzer et al., 2001]. Der Probekörper liegt dabei einseitig beansprucht in einem abgeschlossenen System, so dass kein Energieaustausch mit der Umgebung stattfinden kann. Für die Simulation der kapillaren Saugwirkung gilt der Probekörper als vollständig ummantelt, damit während des Frost-Tau-Zyklus Wasser und Luft an den seitlichen, unbelasteten Oberflächen nicht angesaugt oder ausgepresst werden kann. Verformungen des Probekörpers sind nur nach oben hin zulässig. In Abbildung 105 ist das statische System des Probekörpers während des CIF-Testes zu sehen. Die beanspruchte Probekörperseite ist wasserdurchlässig ($w_{LS} \neq 0$, $w_{GS} = 0$), wohingegen die gegenüberliegende gasdurchlässig ist ($w_{LS} = 0$, $w_{GS} \neq 0$).

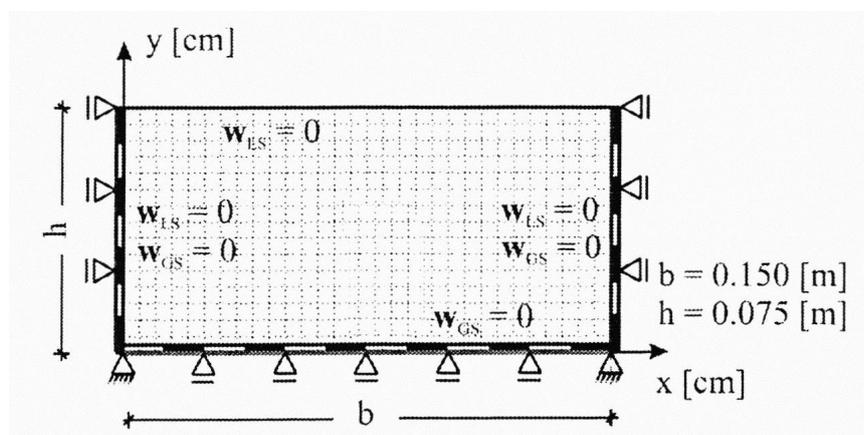


Abbildung 105: Statisches System des CIF-Testes [Brandes, 2017, in Anlehnung an Ricken, Bluhm, 2013]

8.3.4 Ergebnisse

Der erste Teil der Simulation dauert etwa 5,5 Stunden. Innerhalb dieser Zeit erreicht der Probekörper seine volle Sättigung, bei einer konstant gehaltenen Temperatur von + 20 °C. Aufgrund kapillarer Saugwirkung wird das Luftvolumen geringer, so dass sich der Volumenanteil des Wassers ausdehnen kann. Nach 5,4 Stunden ist der Probekörper voll gesättigt und am Fuß des Probekörpers druckfrei. An der Oberfläche des Probekörpers herrscht ein innerer Wasserdruck von - 750 Pa, der linear über die Probentiefe zunimmt.

In Tabelle 12 sind die Materialparameter für die Zusammensetzung des Betons zu Beginn der Simulation aufgelistet. Diese Werte können sich im Laufe der Simulation verändern. Beispielsweise ändert sich die anfängliche Verteilung des Volumens durch die Frostkörperentstehung und die Permeabilität von Wasser.

Im zweiten Teil der Simulation wird der Boden des gesättigten Probekörpers innerhalb von 4 Stunden Schritt für Schritt von + 20 °C auf - 20 °C abgekühlt. Während der Temperaturniedrigung findet der Phasenwechsel zwischen flüssigem Wasser und Eis statt. In der Frostphase wird diese Temperatur für drei Stunden gehalten, bevor sie dann über vier Stunden wieder auf + 20 °C erhöht wird. Mit einer einstündigen Tauphase endet der Zyklus. Demnach dauert ein Frost-Tau-

Zyklus nach diesem Modell insgesamt 17,5 h. In Abbildung 106 ist beispielhaft der beschriebene Temperaturzyklus eines Probekörpers skizziert.

Tabelle 12: Materialparameter der anfänglichen Bodenzusammensetzung [Ricken, Bluhm, 2013]

Parameter	Einheit	Beton	Eis	Wasser	Luft
Schermodul	[N/m ²]	12.5e+9	4.17e+9	-	-
Schubmodul	[N/m ²]	8.33e+9	2.78e+9	-	-
Kompressionsmodul	[N/m ²]	16.67e+9	5.56e+9	20e+9	-
Wärmedehnungskoeffizient (273K)	[1/K]	(0.9-1.2)e-6	5.1e-5	1.8e-4	-
spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]	900(273-373K)	2090(273K)	4190(293K)	720
Wärmeleitkoeffizient	[W/m·K]	1.1(293K)	2.2(273K)	0.58(293K)	0.2(293K)
spezifische Schmelzwärme	[kJ/kg]	2081(1986K)	334(273K)	-	14(54K)
reale Dichte	[kg/m ³]	2000	920	1000	1.204
anfänglicher Volumenanteil	[-]	0.5	0.0	0.1	0.4
Faktor der Darcy Permeabilität	[Ns/m ²]	-	-	1.0e+4/1.0e+18	0.5e+5

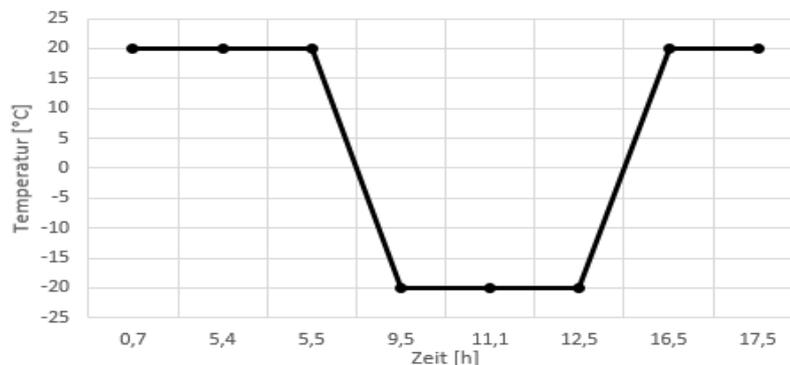


Abbildung 106: Temperaturzyklus [Ricken, Bluhm, 2013]

Während der Abkühlphase beginnt das Frieren des Wassers in den Poren des Probekörpers. Die Phase wechselt von flüssig zu Eis. Dabei sinkt der Volumenanteil des Wassers, der des Eises nimmt zu und der Wassersättigungsgrad des Probekörpers nimmt ab. Aufgrund der entstandenen Differenz zwischen den Volumina von Wasser und Eis, wird ein kleiner Anteil des Wassers aus dem System ausgepresst.

Während der Auftauphase steigen das Wasservolumen und der Sättigungsgrad wieder an, damit sinken die Volumina des Eises und der Luft. Zusätzliches Wasser wird vom System aufgenommen, da das Wasservolumen und der damit verbundene Sättigungsgrad nach der Eisbildung höhere Werte im Gegensatz zum Zeitpunkt vor der Eisbildung annehmen. Dieser Prozess, sowie ebenfalls die erhöhte Wasseraufnahme des Betons, die nach jedem Zyklus während des CIF-Testes beobachtet wurde, werden als kapillare Saugwirkung bezeichnet.

In Abbildung 107 sind beispielhaft die Verläufe der Volumenanteile von Wasser, Eis, Boden und Luft in Abhängigkeit der Zeit eines Frost-Tau-Zyklus dargestellt. Der maximal auftretende Wasservolumenanteil kann einen Wert von 0,4 erreichen, bei einer maximalen Wassersättigung von 0,9 gilt der Probekörper als wassergesättigt.

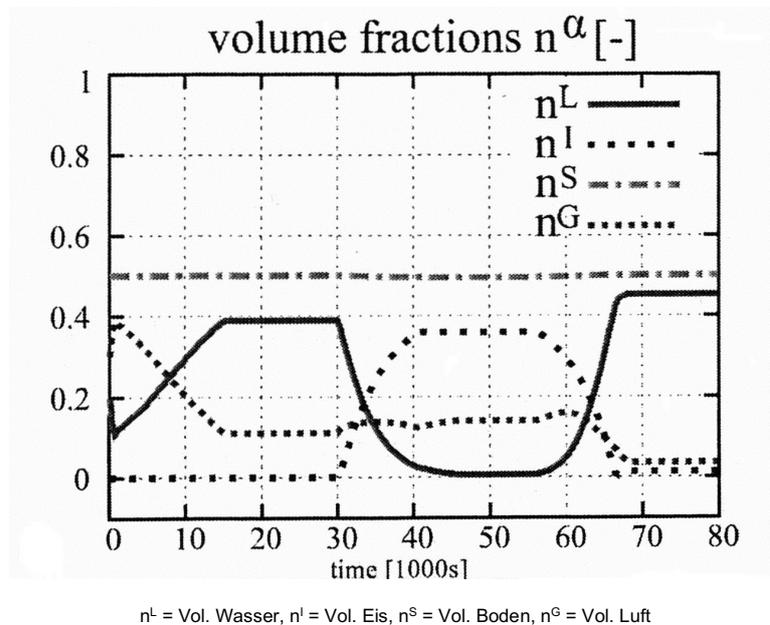


Abbildung 107: Volumenanteile als Funktion der Zeit bei einer Höhe von 0.94 cm [Brandes, 2017, in Anlehnung an Ricken, Bluhm, 2013]

Im Modell nach Ricken und Bluhm wird ebenfalls der Einfluss der Druckdifferenz zwischen Eis und Wasser, in Abhängigkeit des Vorfaktors \bar{u}_{IL} , beschrieben. Der Vorfaktor \bar{u}_{IL} kann zwischen den Werten 0 und 0,848 gewählt werden und steuert die Druckdifferenz zwischen Eis und Wasser während des Phasenwechsels. Dies bedeutet, dass der Faktor den Einfluss der Grenzflächenenergie zwischen Eis und Wasser, sowie die Porenstruktur und Porengröße des porösen Feststoffs berücksichtigt. Für den ersten Teil der Simulation werden das Volumen der Luft und des Vorfaktors \bar{u}_{IL} gleich Null gesetzt und die Kapillareffekte werden vernachlässigt. Die simulierte maximale Volumenänderung liegt dann nach etwa 3 h (Tauperiode) bei rd. 1,045. Die Verläufe der jeweiligen Volumenänderungen von Wasser, Eis, Luft und Feststoff sind ähnlich (Abbildung 108).

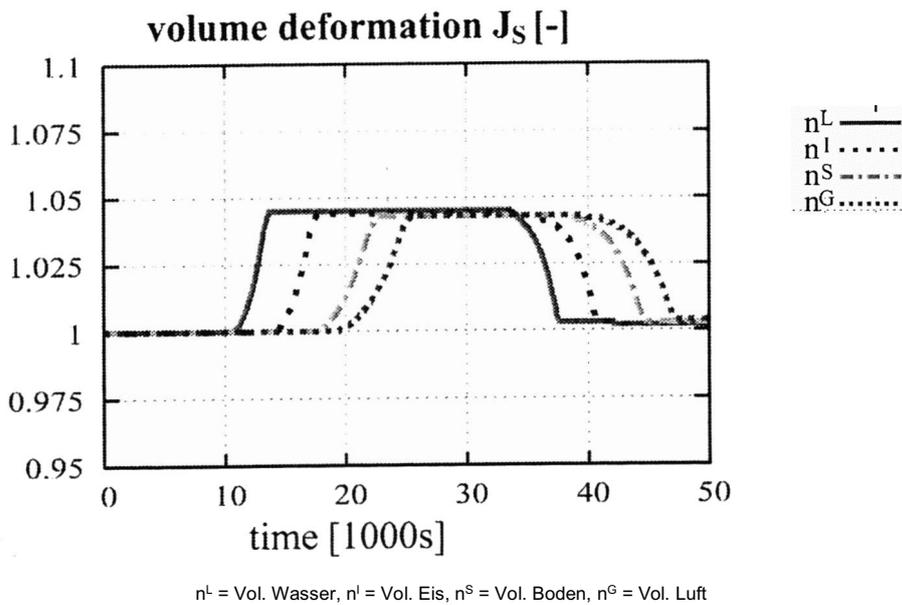


Abbildung 108: Volumenverformungen J_S mit einer Darcy Permeabilität von 10^{18} [Ns/m⁴] [Brandes, 2017, in Anlehnung an Ricken, Bluhm, 2013]

Im nächsten Schritt wird bei der Simulation der Maximalwert des Vorfaktors mit 0,848 herangezogen. Die maximale Volumenänderung liegt dann bei 1,075 (Abbildung 109) nach einem Zeitraum von ca. 7 h (Abkühlphase). Auch hier sind die Verläufe der Volumenänderung ähnlich. Jedoch haben alle Verläufe im Vergleich zur Simulation ohne Eisdruck ein ausgeprägtes Maximum, aufgrund dessen in der Gefrierphase zusätzliches Wasser in das System eindringt.

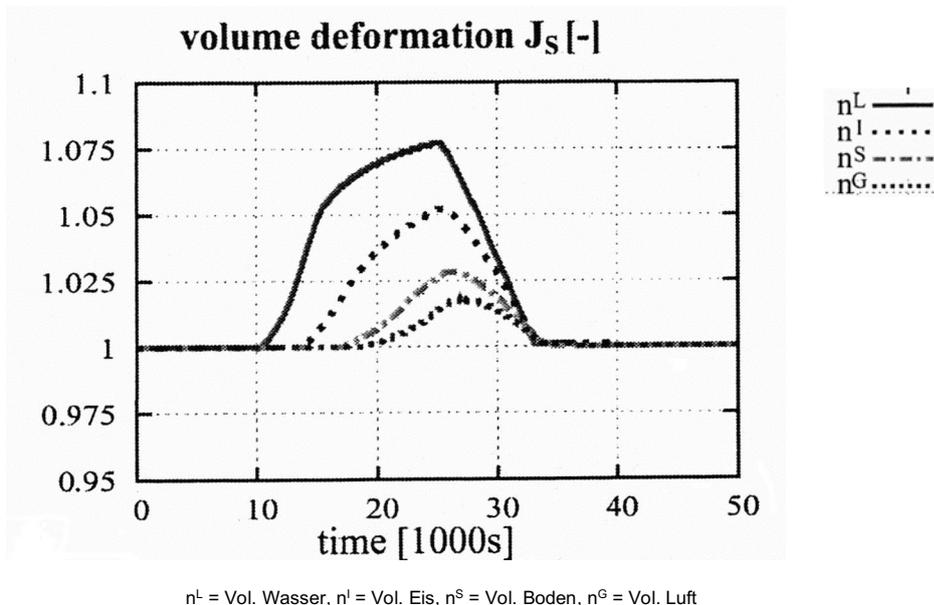


Abbildung 109: Volumenverformung J_S bei einem Vorfaktor 0,848 [Brandes, 2017, in Anlehnung an Ricken, Bluhm, 2013]

Diese numerisch simulierten Verformungen des Probekörpers decken sich mit den Messungen während des CIF-Tests.

8.4 Modell nach Li, Chen, Xu, Bin und Swoboda

8.4.1 Allgemeines

Die Modellierung von Li, Chen, Xu, Bin und Swoboda fokussiert sich auf die Gefrier- und Auftauphasen eines ungesättigten, porösen und mehrphasigen Systems, das sich aus den vier Phasen Wasser, Eis, Boden und Luft zusammensetzt.

Der Schwerpunkt der numerischen Simulation liegt in der Beschreibung der Luftphase, welche sich in zwei verschiedene Bereiche unterteilen lässt. Entweder ist die Luft, die sich im Boden befindet, mit der Atmosphäre verbunden und somit Teil eines offenen porösen Systems. Oder die Luft ist von der Atmosphäre isoliert und Teil eines versiegelten porösen Systems. Des Weiteren wird auch die Interaktion zwischen Wasser, Wärme und Verformung sowie die zwischen Boden- und Eispartikeln im gefrorenen Bereich mit berücksichtigt und modelliert.

Bei der Temperaturveränderung während der Simulation von -1 °C auf -30 °C nimmt die Dicke der Eislinsen von einigen Millimetern auf einige Meter zu. In Abhängigkeit von der Größe der Eislinse kann die Luft im Eis als isoliert von der Atmosphäre betrachtet werden, wie es z. B. in Tonschichten der Fall ist. Handelt es sich um einen auftauenden Sandboden, dann gilt die Luft im Boden als offen zur Atmosphäre [Li et al., 2008].

8.4.2 Annahmen und Vereinfachungen

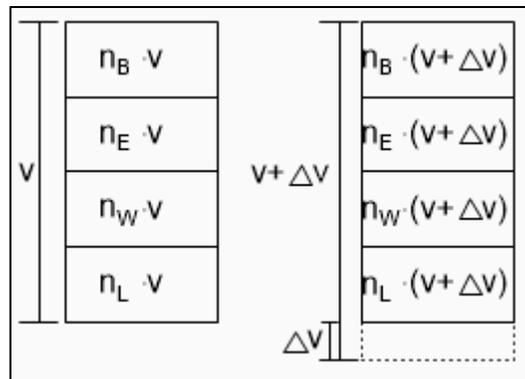
Bei der Simulation wird ein Probekörper aus vielen kleinen und homogen verteilten Eislinsen zusammengesetzt. Dadurch ist idealerweise ein Teil der Luft offen zur Atmosphäre, während der andere Teil von der Atmosphäre isoliert ist. Demzufolge wird die Simulation mit einem halbversiegelten und einem halboffenen System durchgeführt. Diese Verteilung entspricht der eines natürlichen Bodens, in dem sich die Luft während der ungesättigten, gefrorenen Phase weder vollständig offen zur Atmosphäre, noch vollständig isoliert von der Atmosphäre befindet. Die Flüssigkeit in einem ungesättigten, gefrorenen Boden bewegt sich aufgrund des Temperaturgradienten. Wenn eine größere Menge an Wasser in das System fließt, dann wird die Luft im versiegelten Teil unter Druck gesetzt bzw. im offenen abtransportiert. Somit wird das Luftvolumen verringert, während sich das Wasservolumen vergrößert.

Die Feldmatrix zur numerischen Simulation setzen sich aus dem effektiven Spannungsprinzip, den Gleichgewichtsbedingungen, der Kontinuitätsgleichung, der Energieerhaltungsgleichung, sowie diversen Ergänzungsgleichungen zusammen. Die Matrizen wurden getrennt für gefrorene offene und gefrorene, versiegelte, ungesättigte Böden aufgestellt. Bei der Simulation wurden diese beiden Fälle wieder miteinander verknüpft.

Abbildung 110 zeigt die schematische Darstellung des Systems, bestehend aus Boden, Eis, Wasser und Luft. Die jeweiligen Anteile verändern sich mit dem Phasenwechsel zwischen Wasser und Eis. Die linke Darstellung zeigt die Ausgangssituation. Die Veränderungen durch den Phasenwechsel werden hingegen in der rechten Darstellung visualisiert. Aufgrund von Hebungen verändert sich folglich die Länge des Einheitsvolumens um Δv .

Die Gesamtverformung des Systems setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Zum einen gibt es die zusätzlichen Verformungen, welche aufgrund der

Feuchtigkeitswanderung und Volumenvergrößerung beim Phasenübergang von Wasser zu Eis entstehen. Zum anderen werden Verformungen, die durch mechanische Einwirkungen verursacht werden, mit einbezogen.



n_W = Vol. Wasser, n_E = Vol. Eis, n_B = Vol. Boden, n_L = Vol. Luft

Abbildung 110: Änderungen der Anteile der einzelnen Komponenten eines Einheitsvolumens [Brandes, 2017, in Anlehnung an Li et al., 2008]

Für die Lösung der numerischen Fragestellung wird ein Computerprogramm, basierend auf der geotechnischen Simulationssoftware FINAL, herangezogen. Dieses Programm analysiert die Temperatur-Feuchtigkeits-Verformungs-Belastung eines ungesättigten Frost-Tau-Bodens [Li et al., 2008].

8.4.3 Validierungsansatz und Ergebnisse

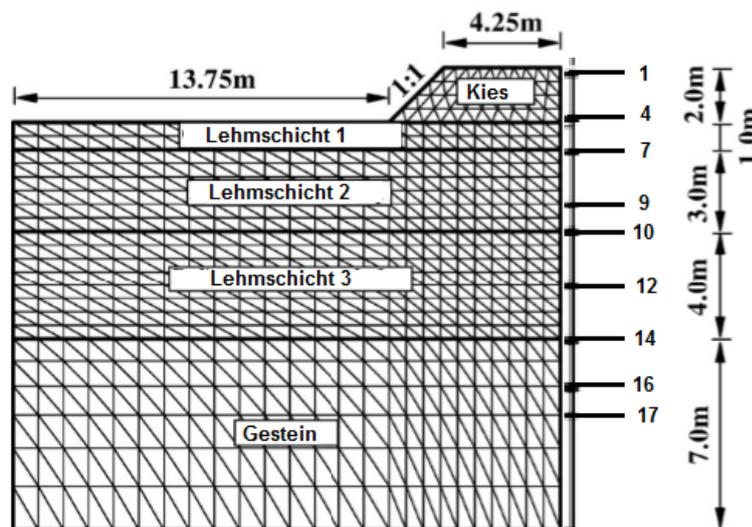
Die Validierung des vorgestellten Modells wird mit in-situ Messungen eines Fahrbahnteilstücks der Hua Shixia-Autobahn in Qinghai-Tibetan durchgeführt. Das Hochland liegt 4200 m über dem Meeresspiegel, wo in weiten Teilen Permafrost herrscht. Neben dem Autobahnteilstück wurde eine Messstation installiert, die die Bodentemperatur und die Hebungen in unterschiedlichen Tiefen kontinuierlich aufzeichnete. In

Tabelle 13 sind die gemessenen Parameter der einzelnen Schichten des Straßenkörpers aufgelistet.

Das numerische Modell des Straßenkörpers im Querschnitt für den ausgewählten Bereich der Autobahn ist in Abbildung 111 zu sehen. Zusätzlich sind die für die Validierung des Modells verwendeten Messpunkte markiert. In-situ besteht die Straßenoberfläche aus einer asphaltgebundenen Schicht, diese wurde nicht simuliert.

Tabelle 13: Gemessene Parameter unter der Fahrbahn der Autobahn

Parameter	Kies	Lehmschicht 1	Lehmschicht 2	Lehmschicht 3	Gestein
Wassergehalt	0.08-0.1	0.40	1.785	0.245	0.04
Gewicht [g/cm ³]	2.1	0.46	0.31	1.52	2.5
Trockengewicht [g/cm ³]	1.8	0.64	0.10	1.02	2.5
Wärmekapazität ungefrorener Boden [J/m ³ ·K]	2.82·10 ⁶	1.17·10 ⁶	1.03·10 ⁶	2.82·10 ⁶	2.29·10 ⁶
Wärmekapazität gefrorener Boden [J/m ³ ·K]	2.23·10 ⁶	1.34·10 ⁶	0.89·10 ⁶	2.23·10 ⁶	2.29·10 ⁶
thermische Leitfähigkeit ungefrorener Boden [W/m·K]	1.128	0.388	0.732	1.128	2.700
thermische Leitfähigkeit gefrorener Boden [W/m·K]	1.580	0.464	2.150	1.580	2.700
ungefrorener Wassergehalt	0.092	0.40	0.40	0.245	0.04

**Abbildung 111:** Numerisches Modell des Straßenaufbaus im Querschnitt [Brandes, 2017, in Anlehnung an Li et al., 2008]

Die Gesamtdicke des Straßenaufbaus beträgt 17 m, dessen einzelne Schichten aus Lehm, Sand-Kies und Gestein bestehen. Da die seitlichen Flanken abgedichtet sind, kann ein Wasserzutritt nur von oben erfolgen. Die Auswertung der Temperaturverläufe an der Oberfläche und den Schichtgrenzen (Punkte 1, 4, 7 und 14) über einen Zeitraum von einem Jahr zeigt, dass die Temperaturen im Straßenkörper mit steigender Tiefe bis maximal 6 m geringeren Schwankungen unterliegen als die Straßenoberfläche, die direkten Temperatureinwirkungen ausgesetzt ist. Bei der Simulation wurden Temperaturschwankungen bis in eine Tiefe von 8 m errechnet.

As Referenz für die Validierung der Verformungen (Hebungen) dienten die gemessenen Verformungen zum Jahreswechsel 1998/1999.

In Abbildung 112 ist die Gesamtverformung des Straßenkörpers über einen Zeitraum von drei Jahren und 4,5 Monaten ab Referenz dargestellt. Die größten Hebungen sind in der obersten Schicht zu beobachten und flachen mit der Tiefe ab. Die maximale relative Verformung tritt am Rand der Fahrbahn auf.

Insgesamt über ein Jahr betrachtet errechnet das Modell Frosthebungen bzw. entsprechende Verformungen aufgrund von Tauphasen über einen Zeitraum von jeweils 6 Monaten. In-situ wurden die Frosthebungs- und Tauphasen ebenfalls in diesem Zeitraum festgestellt [Li et al., 2008].

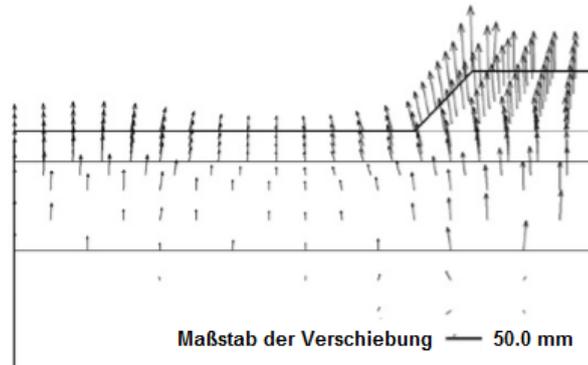


Abbildung 112: Verformungen des Straßenquerschnittes [Brandes, 2017, in Anlehnung an Li et al., 2008]

Zusammenfassend zeigt die Validierung der Simulation eines Straßenkörpers, dass das theoretische numerische Modell für das gekoppelte Verhalten zwischen Temperatur-Feuchtigkeit-Verformung geeignet ist.

8.5 Modell nach Tan, Chen, Tian und Cao

8.5.1 Allgemeines

Das Modell von Tan, Chen, Tian und Cao dient der Simulation von Wasserströmen und Wärmetransporten und basiert auf den Theorien der Kontinuumsmechanik, der Thermodynamik und des Segregationspotenzials. Das Segregationspotenzial wird anhand eines proportionalen Zusammenhangs zwischen dem Wassereintritt und dem Temperaturgradienten in der Frostzone definiert und ist thermohydraulisch gekoppelt. Es wird sowohl der Einfluss von Wärme als auch der der Sickergeschwindigkeit auf die Temperaturverteilung berücksichtigt. Das Vierphasenmodell beinhaltet die Komponenten Eis, Luft, Boden und Wasser. Die Validierung der simulierten Gesamtfeuchtigkeitsverteilung erfolgt mit den Ergebnissen aus einem Laborexperiment von Mizoguchi (1990). Darüber hinaus werden die Simulationsergebnisse mit denen von Hansson et al. (2004) verglichen [Tan et al., 2011].

8.5.2 Annahmen und Vereinfachungen

Für die Umsetzung des Modells werden Vereinfachungen getroffen. Das Bodenmaterial wird als homogen, isotrop und durchgängig gesättigt angenommen. Der Verdunstungsprozess des Wassers bleibt unberücksichtigt. Allgemein wird der Gefrierprozess entsprechend der Temperaturverteilung in die gefrorene und die ungefrorene Zone unterteilt.

Die Gleichungen zur Beschreibung der thermohydraulischen Prozesse umfassen die Energieerhaltungsgleichung und die Wassermassenerhaltungsgleichung.

Die Energieerhaltungsgleichung der gefrorenen und ungefrorenen Zone unterscheidet sich durch den Phasenwechsel des Mediums und im Hinblick auf ihre Wasserströmung. Demnach ist die Energieerhaltungsgleichung jeweils getrennt aufzustellen und anschließend für die Gesamtenergieerhaltung zu kombinieren.

Die Wassermassenerhaltungsgleichung setzt sich aus den Volumenanteilen des flüssigen Wassers und des Eises sowie dem Wasserdruck zusammen [Tan et al., 2011].

8.5.3 Validierungsansatz

Das Laborexperiment von Mizoguchi, das zur Validierung herangezogen wird, wurde als Vierfachbestimmung mit einem Lehmboden durchgeführt. Die zylindrischen Probekörper (Höhe 20 cm, Durchmesser 8 cm) wurden dabei auf eine Umgebungstemperatur von + 6,7 °C temperiert. Eine Probe diente als Referenz und verblieb in dieser Temperaturumgebung. Die anderen drei wurden einer Frostbeanspruchung unterzogen. Dabei zirkuliert eine auf - 6 °C temperierte Flüssigkeit durch den Probekörper bei konstanter Umgebungstemperatur. Aufgrund dieser Temperaturdifferenzen verläuft der Gefrierprozess in der Probe von oben nach unten. Je eine Probe wurde nach ca. 12 h, 24 h und 50 h in 1 cm dicke Scheiben geteilt, an denen der Wassergehalt durch Ofentrocknung bestimmt wurde. [Tan et al., 2011].

8.5.4 Ergebnisse

Die Gesamtfeuchtigkeitsverteilung in einem Probekörper wird mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) simuliert. Dafür legen Tan, Chen, Tian und Cao Randbedingungen und Parameter fest, die den Probekörperabmessungen des Laborexperimentes nach Mizoguchi entsprechen (Abbildung 113). Entlang der Symmetrieachse wird der Wärmetransport simuliert. Die äußeren Ränder werden als wasserdicht angenommen. Die anfängliche einheitliche Temperatur der Probe beträgt + 6,7 °C.

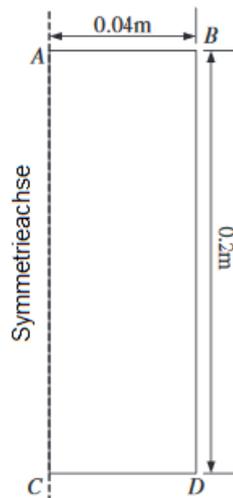


Abbildung 113: Modell für die Finite-Elemente-Methode [Brandes, 2017 in Anlehnung an TAN et al., 2008]

In Tabelle 14 sind die Hauptparameter für die FEM zusammengestellt, die während der Simulation unverändert blieben. Festgelegt waren jeweils für den Lehmboden, das Wasser und das Eis die Kennwerte Wassergehalt, Permeabilität in der gefrorenen bzw. ungefrorenen Zone, Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärme.

In Abbildung 114 (a)-(d) sind die Simulationsergebnisse den Validierungsergebnissen zu den Prüfzeitpunkten gegenübergestellt. Aufgetragen ist jeweils der Gesamtwassergehalt entlang der Symmetrieachse zur Probenhöhe. Es zeigte sich, dass tendenziell die simulierten Ergebnisse mit den Feuchtigkeitsgehalten aus dem Labor übereinstimmen. Die Simulationsergebnisse zum Vergleich von Hansson et al. weisen jedoch Abweichungen auf, die sich mit fortschreitender Versuchsdauer vergrößern.

Tabelle 14: Hauptparameter für die FEM-Kalkulation [Tan et al., 2011]

Parameter	Wassergehalt [%]	Permeabilität [m ²]		Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	Dichte [kg·m ⁻³]	spezifische Wärme [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
		gefrorene Zone	ungefrorene Zone			
Lehmboden	35	$4,5 \cdot 10^{-19}$	$6,6 \cdot 10$	1,62	2215	850
Wasser	-	-	-	0,56	1000	4180
Eis	-	-	-	2,24	917	2090

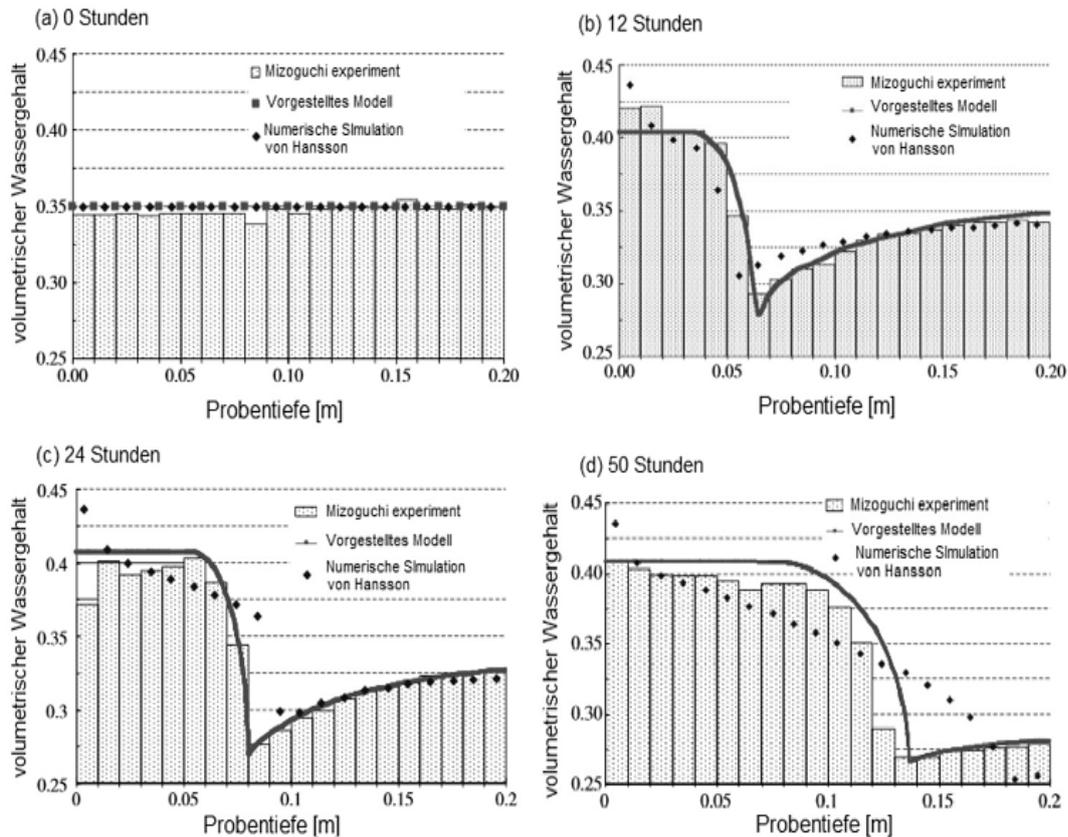


Abbildung 114 (a)-(d): Gesamtfuchtigkeitsgehalte zu unterschiedlichen Zeiten entlang der Achse

AC [Brandes, 2017, in Anlehnung an TAN et al., 2008]

Zu Beginn des Versuchs bzw. der Simulation (Abbildung 114 (a)) liegt der Gesamtfuchtigkeitsgehalt konstant über die gesamte Probenhöhe bei 0,35 und damit geringfügig oberhalb des labortechnischen Anfangswertes von 0,33. Die ungefrorene Probe bei + 6,7 °C Anfangstemperatur ist gesättigt. Im Verlauf des Versuchs wird der Probekörper von oben nach unten befroren. Im Boden entsteht eine Eislinse, die Wasser aus ungefrorenen Bereichen nachsaugt. Dies führt einerseits zu einer Erhöhung des Wassergehaltes im Bereich der Eislinse und gleichzeitig zu einer Abnahme der Feuchtigkeit im Boden des ungefrorenen Bereichs. Je größer die Eislinse wächst, desto stärker nimmt der Wassergehalt unterhalb der Gefrierzone ab.

Temperaturmessungen über die gesamte Probenhöhe zu den vier Prüfzeitpunkten ergeben, dass in der Gefrierzone ein hoher Temperaturgradient und dementsprechend in der ungefrorenen ein geringerer Gradient wirkt. Darüber hinaus zeigt sich, dass bei Temperaturen unter -1 °C der Wassergehalt konstant 0,41 beträgt. Zwischen -1 °C und 0 °C sinkt der Wassergehalt durch den Wechsel des Aggregatzustandes auf das jeweilige Minimum ab. Anhand der Laboruntersuchungen ist diese Abhängigkeit von der Probekörperhöhe und damit auch indirekt von der Temperatur nachweisbar (Abbildung 114 (b) – (d)).

Praxisanwendung

Anhand der entwickelten Simulation der Gesamtfeuchteverteilung nach Tan, Chen, Tian und Cao wurde im Planungsstadium der Effekt wärmedämmender Materialien am Galongla-Tunnel im Tibet analysiert und dimensioniert. Der Tunnel befindet sich rund 4300 Meter über dem Meeresspiegel. In den Wintermonaten können die Temperaturen bis auf -30 °C absinken. Die Gefrierperiode in diesem Tunnel erstreckt sich über acht Monate. Dadurch entstehen Eislinsen mit einer durchschnittlichen Tiefe von fünf bis sechs Metern, deren maximale Tiefe reicht bis zu 15 Metern.

Abbildung 115 zeigt die Simulation des Tunneleingangs. Die Symmetrieachse von AB bis DE wird als undurchlässig angenommen, ebenso der Untergrund EF.

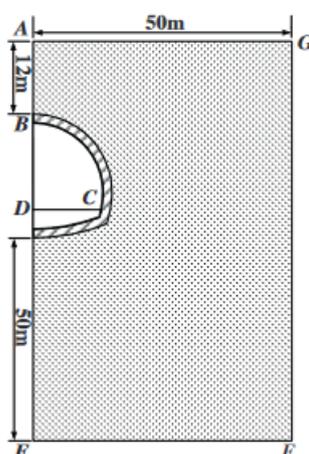


Abbildung 115: Simulation des Galongla-Tunnels [Tan et al., 2008]

Entlang der Tunnelaußenkante wurden zusätzlich 6 cm Dämmung dimensioniert und verbaut. Auf diese Weise konnten die Temperaturen im Tunnel über der Frostgrenze gehalten werden [Tan et al., 2011].

Die Ergebnisse aus der Praxisanwendung und Laborvalidierung zeigen, dass die Simulation in der Praxis erfolgreich eingesetzt werden kann.

8.6 Modell nach Zhao, Gray und Male

8.6.1 Allgemeines

Das Modell nach Zhao, Gray und Male beschreibt die Wärmeübertragung und die Wasserinfiltration in einem gefrorenen, homogenen, ungesättigten Boden. In der numerischen Analyse werden die Auswirkungen der Oberflächensättigung, die der Anfangsbodensättigung und die der Anfangstemperatur auf die Menge und die Geschwindigkeit der Wasser-Infiltration sowie auf die Wärmeübertragung innerhalb eines gefrorenen Bodens simuliert. Das Modell basiert auf einem vierphasigen Medium, das Bodenpartikel, Eis, Wasser und ein Gasmisch enthält. Das Gasmisch besteht sowohl aus Wasserdampf, als auch aus trockener Luft [Zhao et al., 1997].

8.6.2 Vereinfachungen und Annahmen

Der Gefrierprozess wird als eindimensionaler, vorübergehender, gleichmäßiger Wärme- und Stoffstrom mit entsprechenden Phasenwechseln in einem ungesättigten, homogenen Boden mittleren Volumens definiert. Zur Bestimmung des mittleren Volumens wird angenommen, dass alle Bestandteile des Modells sich im thermischen Gleichgewicht befinden. Dabei werden auch die Grenzflächen zwischen Flüssigwasser - Eis, Flüssigwasser - Wasserdampf und Eis - Wasserdampf mitberücksichtigt. Des Weiteren wird angenommen, dass die Geschwindigkeit während der Änderung des Aggregatzustandes von Wasser (flüssig/gasförmig; fest/ gasförmig) proportional zum volumetrischen Wasser- und Eisgehalt ist.

Die eindimensionalen Gleichungen sind die Energieeinsparungsgleichung, die Flüssigphasen-Kontinuitätsgleichung, die Eisphasen-Kontinuitätsgleichung, die Flüssigphasen-Impulsgleichung und die Dampfphasen-Diffusionsgleichung. Diese Gleichungen werden iterativ anhand einer impliziten, differentiellen Matrix gelöst.

8.6.3 Validierungsansatz

Für das sogenannte „Kontrollvolumen“ wird eine Temperatur von -4 °C und ein Sättigungsgrad von 0,4 angenommen. Wenn Wasser durch die Schneeschmelze oder durch Niederschlag auf die Bodenoberfläche eines gefrorenen Bodens trifft, steigt die Oberflächentemperatur auf 0 °C und der Sättigungsgrad der Oberfläche auf 0,75 an. Das Eis an der Oberfläche schmilzt. Ein erneuter Wechsel des Aggregatzustandes des Wassers von flüssig zu fest beginnt nach fünf Stunden, wenn der Niederschlag oder die Schneeschmelze nicht voranschreiten.

In Tabelle 15 sind die für die Simulation verwendeten Parameter zusammengestellt. Für den Boden werden die Eigenschaften eines schluffigen Lehms herangezogen. [Zhao et al., 1997].

Tabelle 15: Werte der Parameter und physikalischen Eigenschaften für die numerische Simulation
[Brandes, 2017]

Parameter	Einheit	
gesättigte Wasserdurchlässigkeit	[m ²]	$7.44 \cdot 10^{-14}$
Porengrößenverteilung	[-]	0.18
Lufttrittspotential	[m]	0.7033
Sättigung Oberfläche	[-]	0.49
anfängliche Sättigung	[-]	0.75
anfängliche Temperatur	[-]	0.4
spezifische Schmelzwärme	[K]	269
	[°C]	-4

8.6.4 Ergebnisse

Der Infiltrationsprozess von Wasser in einen gefrorenen Boden wird in dem hier vorgestellten Modell mit zwei Strömungsphasen beschrieben: der Übergangsphase und der quasi-stationären Phase.

Die Übergangsphase beginnt unmittelbar mit dem Eintritt von Wasser in die Bodenoberfläche. In dieser Phase sinken innerhalb kurzer Zeit die Infiltrationsgeschwindigkeit und die Wärmeübertragungsgeschwindigkeit. Währenddessen steigt die Wasserleitfähigkeit an und der Kapillardruckgradient sinkt.

Zu Beginn der Infiltration in den gefrorenen Boden wird Wärme in das Kontrollvolumen eingeleitet. Vor dem Phasenwechsel von Eis zu flüssigem Wasser werden rund 62 % dieser leitfähigen Energie für das Schmelzen des Eises genutzt. Mit der verbleibenden Energie werden die Bodenpartikel erwärmt. Während des Phasenwechsels betragen die Wärmeübertragungsgeschwindigkeit und die Energieänderungsgeschwindigkeit 0. Die Temperatur im Boden steigt von -4 °C auf $-1,34\text{ °C}$. Nach dem Phasenwechsel wird der Wärmeübertragungsprozess im Kontrollvolumen durch latente Energie, die vorab durch das Einfrieren des flüssigen Wassers freigesetzt wurde, angetrieben. Mehr als 90 % dieser freigesetzten Energie werden in tiefere Schichten des Bodens abgeleitet.

Bei der quasi-stationären Phase ändert sich die Infiltrationsgeschwindigkeit nur noch geringfügig und die Wärmeübertragungsgeschwindigkeit an der Oberfläche erreicht annähernd einen konstanten Wert. In dieser Phase wird die benötigte Energie zur Steigerung der Temperatur in einer gefrorenen Bodenschicht durch die freigesetzte Energie beim Gefrierprozess der darüber liegenden Schichten gewonnen.

Des Weiteren geht aus den Simulationsergebnissen hervor, dass sich die Infiltrationsgeschwindigkeit proportional zur Wasserleitfähigkeit und zum Kapillardruckgradienten verändert. Wasser dringt in gefrorene Böden unter dem kombinierten Einfluss von Kapillar- und Schwerkraften ein, die effektive Sättigung des Bodens steigt an. Veränderungen in der Oberflächensättigung haben auch Auswirkungen auf die Bodentemperatur und die Geschwindigkeit des Phasenwechsels von Eis zu flüssigem Wasser, der in der Simulation nach rd. 12 h stattfindet.

Die Aufzeichnung von in-situ Temperaturkurven in Abhängigkeit verschiedener Oberflächensättigungsgrade und deren Eindringtiefe in den Boden, haben erkennen lassen, dass je höher der Oberflächensättigungsgrad und damit geringer die Durchlässigkeit des Bodens ist, desto schneller dringen kalte Temperaturen ein. Folglich beeinflussen Änderungen in der Anfangssättigung sowohl den Kapillardruckgradienten als auch die Infiltration. Eine Erhöhung des Wertes der Anfangssättigung führt somit zu einer Senkung des Kapillardruckgradienten und damit auch zur Senkung der Infiltration. Darüber hinaus wird mit der Simulation der Zusammenhang zwischen Anfangstemperatur und Infiltration untersucht. Die Abnahme der Infiltration bei sinkender Anfangstemperatur ist auf eine Abnahme der Durchlässigkeit durch Zunahme von Eis zurückzuführen. Die Auswirkungen der Anfangstemperatur auf die Infiltration sind relativ klein im Vergleich zu den Einflüssen anderer Parameter, wie z.B. der Oberflächensättigung.

Die Anfangstemperatur beeinflusst auch den Eisgehalt. Aufgrund der größeren Menge latenter Wärme, die durch das Einfrieren von Wasser freigesetzt wird und dem dadurch größeren Temperaturgradienten, steigt die Temperatur eines kalten Bodens folglich schneller an [Zhao et al., 1997].

8.7 Modell nach Zhang, Teng, He und Sheng

8.7.1 Allgemeines

Das Modell von Zhang, Teng, He und Sheng stellt einen Ansatz zur numerischen Modellierung von Feuchtigkeits- und Wärmebewegungen in ungesättigten, gefrorenen Böden dar. Dabei werden Dampfströme in Verdunstungs- und Kondensationsprozessen mitberücksichtigt.

Eine Parameterstudie dazu zeigt auf, dass der Dampfstrom erheblich zur Eisbildung beiträgt und insgesamt in dem hier angenommenen ungesättigten, geschlossenen System bei gleichmäßigem Temperaturgradienten mehr als 10 % der gesamten Wasserströme ausmacht.

Zhang, Teng, He und Sheng definieren den Gefriervorgang als einen gekoppelten Prozess von Wärme- und Wasserübertragungen. Wenn sich in dem gefrorenen Boden ein Temperaturgradient ausbildet, strömt die Wärme ebenso wie das Porenwasser von der höheren Temperatur zur niedrigeren. Die Bewegung von Wasser und Wärme in ungesättigten Böden wird in Abbildung 116 schematisch dargestellt.

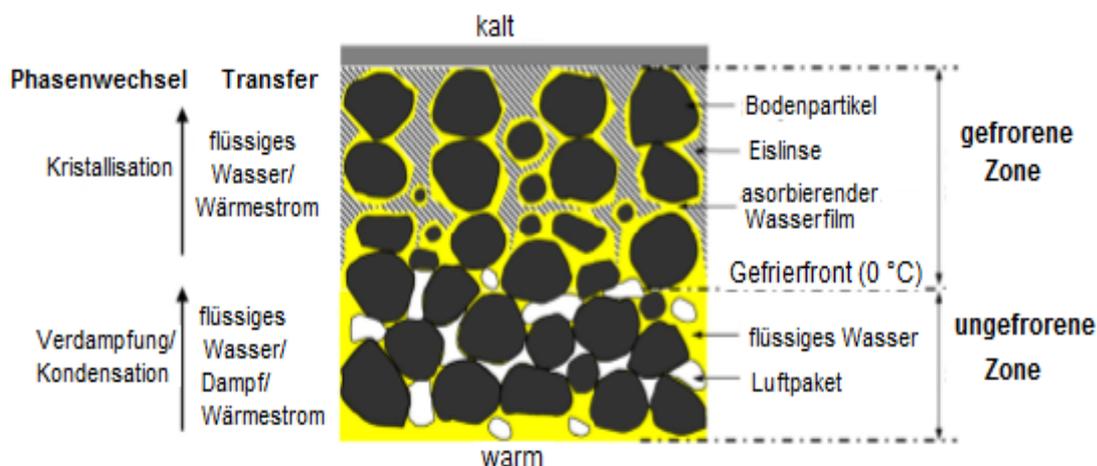


Abbildung 116: Schematische Darstellung von Wasser-, Dampf- und Wärmestrom in ungesättigten Gefrierböden [Brandes, 2017, in Anlehnung an ZHANG et al., 2016]

Der ungesättigte Boden wird in eine gefrorene und in eine ungefrorene Zone unterteilt. Die beiden Zonen werden durch die Gefrierfront voneinander getrennt, an der eine Temperatur von 0 °C herrscht und somit den Übergangsbereich zwischen den Zonen darstellt. Die ungefrorene Zone besteht aus Bodenpartikeln, Luft und flüssigem Wasser. Sobald die Bodentemperatur in einer bestimmten Tiefe einen Wert unterhalb von 0 °C annimmt, beginnt das flüssige Wasser zu Eis zu erstarren. In der gefrorenen Zone befindet sich zusätzlich neben den Bodenpartikeln und dem Eis ein ungefrorener Wasserfilm, der an den Bodenpartikeln haftet. Dieser Wasserfilm weist eine geringe freie Energie bei niedriger negativer Temperatur auf. Durch diese Kapillare wird das flüssige Wasser angesaugt und die Eislinse vergrößert [ZHANG et al., 2016].

8.7.2 Vereinfachungen und Annahmen

Zur Vereinfachung der Beschreibung von Wasser-, Dampf- und Wärmeübertragungen mit Phasenwechsel werden modellspezifische Annahmen getroffen. Die Verformung des Bodens aufgrund von Temperaturschwankungen, Porenwasserdruck und/oder Eisbildung wird vernachlässigt, ebenso die Hysterese im Wasserrückhaltevermögen des ungesättigten Bodens. Die spezifische Dampfdichte des gefrorenen Bodens ist gering, daher wird angenommen, dass der Dampfstrom an der Gefrierfront zu flüssigem Wasser kondensiert und somit nur noch Eis und flüssiges Wasser in der gefrorenen Zone existieren. Unverändert bleiben der atmosphärische Porenluftdruck im Boden während der Simulation sowie die Lage der Gefrierfront in einer Tiefe, in der die Temperatur 0 °C beträgt.

Zur Simulation der eindimensionalen gekoppelten Wärme- und Stofftransporte in ungesättigten Gefrierböden wird ein nicht näher bezeichnetes mathematisches Modell herangezogen. Dieses beruht auf Gleichungen, die sich aus dem Wasser- und Dampfstrom, dem Wärmetransport sowie den bodenhydraulischen und bodenthermischen Eigenschaften zusammensetzen. Der Wasser- und Dampfstrom im ungesättigten Boden wird durch den Temperaturgradienten bestimmt. Der volumetrische Wassergehalt wird im Rahmen dieses Simulationsmodells in drei Komponenten unterteilt: Wasser-, Eis- und Dampfgehalt [Zhang et al., 2016].

8.7.3 Validierungsansatz

Das entwickelte Modell wird anhand eines Laborexperiments validiert. Dabei wurde eine ungesättigte zylinderförmige schluffige Bodenprobe in einem Frostversuch von oben nach unten ohne externe Wasserzufuhr eingefroren.

Der Probekörper bestand aus einem Zylinder mit einer Höhe von 60 cm und einem Durchmesser von 24 cm. Während des Versuchs wurden die Seitenflächen der Probe thermisch isoliert. Die Temperatur wurde mittels Durchströmung mit einem Kühlmittel von oben nach unten eingebracht. In dem Versuchsprogramm wurden fünf Prüfzyklen durchlaufen, deren Ergebnisse in Tabelle 16 zusammengestellt sind. Die Anfangstemperatur des Bodens in jedem Durchgang betrug 10 °C, die obere Temperatur (Gefriertemperatur) sowie der anfängliche volumetrische Wassergehalt variieren. Die Dichte des Versuchsbodens bleibt konstant [Zhang et al., 2016].

Tabelle 16: Testbedingungen für das Bodengefrierexperiment [Brandes, 2017]

Durchgang	anfänglicher volumetrischer Wassergehalt [%]	Gefrierdauer [d]	Obere Temperatur [°C]	Untere Temperatur [°C]	Bodendichte [g cm ⁻³]
1	17.3	14	-13	10	1.3
2	21.1	14	-13	10	1.3
3	25.2	14	-13	10	1.3
4	25.2	14	-10	10	1.3
5	25.2	14	-7	10	1.3

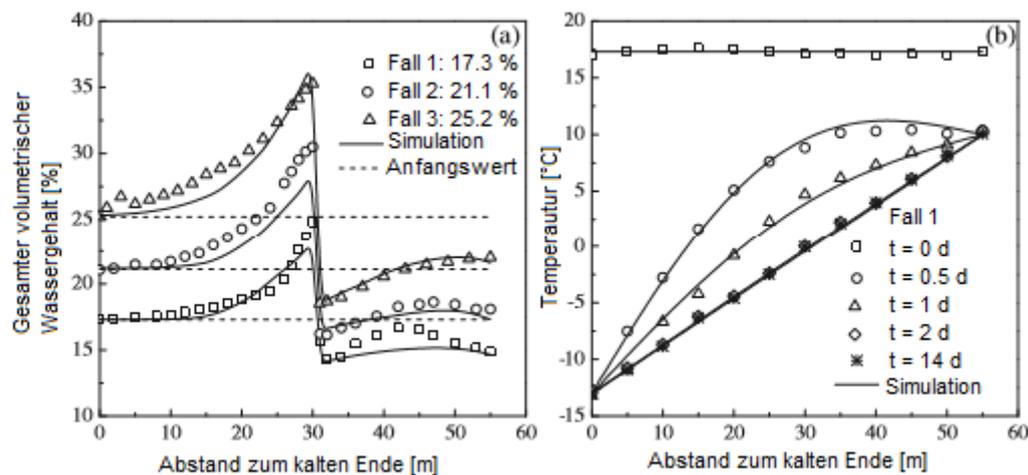


Abbildung 117: (a) Profile der Gesamtwassergehalte und (b) der Temperatur
 [Brandes, 2017, in Anlehnung an ZHANG et al., 2016]

8.7.4 Ergebnisse

Die Bodentemperatur wurde während des Versuchs kontinuierlich in verschiedenen Tiefen gemessen. Die Bestimmung des Wassergehaltes erfolgte nach Versuchsende durch Teilung des Probekörpers in 10 cm breite Streifen. Die Ergebnisse aus diesem Test dienen der Validierung des numerischen Modells mit identischen Anfangsbedingungen.

In Abbildung 117 (a) werden die ersten drei im Hinblick auf den Gesamtwassergehalt mit den simulierten Werten verglichen.

Es zeigt sich, dass der Wassergehalt innerhalb der oberen, kälteren Hälfte des Zylinders ansteigt, da sich dort die Frostzone befindet. An der Gefrierfront erfolgt ein abrupter Abfall des Wassergehaltes. Diese ist circa 30 cm von der kalten Zylinderoberfläche entfernt. Auch beeinflusst der anfängliche Wassergehalt die anfallende Wassermenge an der Gefrierfront. Je höher der Anfangswert, desto mehr Wasser sammelt sich an der Gefrierfront. In Abbildung 117 (b) geht aus dem Temperaturprofil von Prüfzyklus 1 hervor, dass sich nach 2 Tagen ein annähernd linearer Temperaturverlauf einstellt. Die minimalen Differenzen der Temperaturprofile von Tag 2 und Tag 14 belegen, dass die Bodentemperatur innerhalb von zwei Versuchstagen einen stationären Zustand erreicht. Die Gefrierfront befindet sich dann in einer Tiefe von 30 cm.

Der Dampfstrom ist nach zehn Tagen etwas höher als nach zwei Tagen. Dies ist auf die vermehrt für den Dampftransfer zur Verfügung stehenden Poren nach zehn Tagen zurückzuführen, die mit Wasser gefüllt werden. Um die Rolle des Dampftransfers in ungesättigten Gefrierböden zu klären und die Auswirkungen von relevanten Faktoren auf den Gefrierboden zu bewerten, wurde eine Analyse mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Anfangswassergehalt
- Grenztemperatur
- Bodenhydraulische Eigenschaften

Im Rahmen der Analyse wurde eine ein Meter hohe homogene Bodensäule für sieben Tage einem Temperaturgradienten von 20 °C/m ausgesetzt. Die Temperaturen an der Ober- und Unterseite blieben jeweils konstant. Der Anfangswassergehalt betrug 20% über die gesamte Höhe der Bodensäule. Die Bodensäule war über beide Stirnflächen an äußere Wasserströme geschlossen. Das Ergebnis zeigt, dass der Dampfstrom erheblich zur Eisbildung beiträgt.

Der Einfluss des anfänglichen Wassergehaltes auf das Verhalten des gefrorenen Bodens wurde mittels Variation der Anfangswassergehalte ebenfalls untersucht. Der Gesamteisgehalt des gefrorenen Bodens stieg linear mit zunehmendem Anfangswassergehalt an. Somit konnte mehr Wasser eingefroren werden, wenn der Anfangswassergehalt höher war, ebenso wie die hydraulische Leitfähigkeit. Demnach konnte mehr freies Wasser in die Gefrierzone angesaugt werden. Das Dampfstromverhältnis sank zunächst exponentiell mit dem Anstieg des Anfangswassergehaltes. Bei geringerem volumetrischen Wassergehalt nahm der Dampfstrom mehr als 50% des Gesamtwasserstromes ein und kann damit bei der Simulation nicht vernachlässigt werden.

Weitere Ergebnisse beziehen sich auf den Parameter Temperatur. Ein höherer Temperaturgradient führt laut Zhang, Teng, He und Sheng zu mehr Dampfströmung. Eine höhere Temperatur führt zu einer Zunahme der Verdampfungsrate im Boden. Der Wassergehalt und die Temperatur in dem ungefrorenen Boden stehen nach einer gewissen Versuchslaufzeit im Gleichgewicht.

Damit die Auswirkungen der Frosteindringtiefe auf den Dampfstrom und die Eisbildung im Boden bewertet werden konnte, wurden verschiedene Temperaturen über die Stirnflächen des Probekörpers eingebracht. Obwohl für alle Fälle der gleiche Temperaturgradient von $0,2\text{ °C/cm}$ eingestellt wurde, impliziert eine geringere obere Temperatur eine niedrigere Gefrierfront. Der Gesamteisgehalt steigt annähernd linear an, während das Dampfstromverhältnis exponentiell mit zunehmender Tiefe der Gefrierfront sinkt.

Der Gesamteisgehalt steigt annähernd linear mit zunehmender hydraulischer Leitfähigkeit. Eine höhere Leitfähigkeit führt dazu, dass mehr Wasser in Form von Flüssigkeit oder Dampf zur Gefrierfront geliefert wird und somit ein größerer Eisgehalt in der Gefrierzone entsteht. Bei kleiner Leitfähigkeit fließt lediglich eine geringe Menge Wasser aus der ungefrorenen Zone in der Nähe der Gefrierfront aus. Im Fall einer hohen Leitfähigkeit erreicht der Wassergehalt in der ungefrorenen Zone relativ schnell einen stationären Zustand mit einem konstanten Wasserstrom.

Die parametrische Analyse zeigt auch, dass der Gesamteisgehalt und das Verhältnis des Dampfstroms linear ansteigen und exponentiell mit zunehmendem Anfangswassergehalt sinken. Je höher der Temperaturgradient, desto höher ist das Dampfstromverhältnis, während der Gesamteisgehalt weniger empfindlich gegenüber dem Temperaturgradienten ist. Eine tiefer liegende Gefrierfront führt laut Zhang, Teng, He und Sheng folglich stets zu einem größeren Gesamteisgehalt und einem höheren Dampfstromverhältnis [Zhang et al., 2016].

Aus der Modellbeschreibung und der Verifizierung anhand der Bodensäule geht hervor, dass das Modell einschließlich der Rahmen- und Anfangsbedingungen fähig ist, den Gefrierprozess eines ungesättigten Bodens wirksam zu simulieren.

8.8 Analyse der ausgewählten Modelle unter straßenbauspezifischen Gesichtspunkten

8.8.1 Allgemeines

Alle hier vorgestellten Modelle simulieren Vierphasen-Systeme, die aus Boden bzw. Feststoff, Wasser, Eis und Luft bestehen. Ihre Unterschiede und der eventuelle straßenbautechnische Bezug werden im Hinblick auf folgende Schwerpunkte gegenübergestellt:

- Schwerpunkt der Modellierung
- Sättigungszustand des Bodens bzw. Feststoffs
- Abmessungen des Probekörper
- Materialart und -eigenschaften
- Gefriermethode
- Temperaturverteilung im Boden
- Verformungen (Hebungen)

Die Modelle werden in diesem Kapitel gemäß Tabelle 17 bezeichnet.

Tabelle 17: Kurzbezeichnungen der ausgewählten Modelle

	Kurzbezeichnung
Modell nach Ricken und Bluhm	Modell A
Modell nach Li, Chen, Xu und Swoboda	Modell B
Modell nach Tan, Chen, Tian und Cao	Modell C
Modell nach Zhao, Gray und Male	Modell D
Modell nach Zhang, Teng, He und Sheng	Modell E

8.8.2 Schwerpunkt der Modellierung

Der Schwerpunkt von Modell A ist der Frost-Tau-Zyklus und der Phasenwechsel zwischen Wasser und Eis. Modell B simuliert ausschließlich die Luftveränderungen während der Frost-Tau-Wechsel. Die Wasserströme und Wärmetransporte während des Phasenwechsels zwischen Wasser und Eis sind die Akzente von Modell C. In Modell D hingegen werden die Infiltration von Wasser in einen gefrorenen Boden, insbesondere die dabei auftretenden Wärme- und Massentransporte von Wasser und Eis berücksichtigt. Der Einfluss des Dampfes bzw. der Luft während des Phasenwechsels ist der Schwerpunkt von Modell E.

Grundsätzlich fokussieren sich die Simulationen auf verschiedene Schwerpunkte und dementsprechend müssen unterschiedliche Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden. Derzeit scheint es nicht möglich zu sein, alle materialspezifischen Einflussfaktoren und Prozesse bei der Frostentstehung miteinander zu verknüpfen und vollständig zu modellieren. Die hier vorgestellten Modelle können daher nur ein Ansatz für eine Entwicklung sein.

8.8.3 Sättigungszustand des Bodens bzw. Feststoffes

In den Modellen A und C werden vollständig gesättigte Böden, in den anderen drei ungesättigte Böden simuliert. Hinsichtlich einer möglichen Übertragbarkeit der Simulationen auf gefrorene ungebundene Tragschichten im Straßenbau ist

lediglich die Modellierung ungesättigter Materialien praxisnah. In der Frostschuttschicht des Straßenkörpers sind Gestein, Wasser, Luft und Eis enthalten. Würden alle Zustände in dieser Schicht präzise modelliert werden, so müsste ggf. noch der Übergang von flüssigem Wasser zu Eis separat betrachtet werden. Damit wäre jedoch ein Vier-Phasen Modell nicht ausreichend.

8.8.4 Abmessungen der Probekörper bei der Validierung

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen werden jeweils durch die Prüfung an einem Probekörper im Labor (Modell A, C und E) oder an in-situ Verhältnissen (Modell B) validiert.

Allen Laborprobekörpern gemein ist die seitlich thermisch isolierte Abdichtung, so dass der Frost nur an den Stirnflächen eindringen kann. Bei Modell A sind die Abmessungen jedoch quadratisch, im Gegensatz zu den Modellen C und E, deren Probekörper zylinderförmig sind. Die Volumina der Probekörper unterscheiden sich ebenfalls deutlich und reichen von 112 cm³ in Modell A bis zu rd. 27.000 cm³ in Modell E.

In Bezug auf den Straßenbau und den dort vorliegenden Dimensionen ist es sinnvoll eine großvolumige, zylinderförmige Probe zu untersuchen, da aufgrund der Geometrie große Schichtdicken betrachtet werden können. Ebenso praxisgerecht ist die Simulation der Frosteindringung über die Stirnflächen, wobei der Prozess von oben nach unten zu bevorzugen ist. Überdies verhindert eine seitliche thermische Isolierung des Probekörpers die Abkühlung oder Erwärmung durch äußere Einflüsse.

8.8.5 Materialart

Die für die Modellierung B, C, D und E herangezogenen Materialien sind überwiegend gebundene Böden – Lehm und/oder Schluff bzw. Gemische daraus. Ein schluffiger Lehmboden, entsprechend Modell D, unterscheidet sich vom reinen Lehmboden aus Modell C in seiner stetigen Kornzusammensetzung aus Sand, Schluff und Ton. Demgegenüber zeichnet sich Modell B durch ein Mehrschichtensystem aus, das dreischichtigen Ton, Kies und Gestein enthält. In Modell A wird Festbeton bei der Simulation zugrunde gelegt, was für Frostschuttschichten im Straßenbau nicht geeignet ist. In Europa kommen ungebundene, überwiegend gebrochene Materialien in diesen Schichten zur Anwendung.

Folglich liegt ein Schwachpunkt der vorgestellten Modelle in der Wahl und Darstellung der Materialart, die sich überwiegend aus nur einer Sorte zusammensetzt. In der Praxis enthält das verwendete Tragschichtmaterial häufig unterschiedliche Materialsorten, die gebrochen und ungebrochen, natürlich oder rezykliert sein können. Demnach sollte für eine Modellierung ein Mehrschichtensystem entwickelt werden, das die verschiedenen materialbedingten Prozesse der Frostentstehung berücksichtigt. Modell B bietet einen Ansatz für ein Mehrschichtensystem.

8.8.6 Materialeigenschaften

Bei der Frostentstehung bilden die Materialeigenschaften einflussreiche Parameter. Im Besonderen sind dabei der Wassergehalt zu Versuchsbeginn, die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität, die Porosität und die Durchlässigkeit hervorzuheben.

In Tabelle 18 sind die Werte der vorgenannten Parameter, die vor Beginn der Simulation vorliegen, zusammengestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Schwerpunkte ist nicht in jedem Modell jeder Parameter angegeben.

Tabelle 18: Materialparameter der ausgewählten Modelle

		Modelle				
		A	B	C	D	E
Wassergehalt	[%]	10	4-40	35	40	17,3 - 25,2
Wärmeleitfähigkeit	[W/m*K]	1,1	0,4 - 1,1	1,6	-	-
Wärmekapazität	[J/m ³ *K]	900 ¹⁾	1,0 - 2,5 x 10 ⁶	-	-	-
Porosität	[-]	-	-	-	0,5	-
Durchlässigkeit	[m/s]	-	-	6,6 x 10 ⁻¹⁵	7,4 x 10 ⁻¹⁴	-

¹⁾ In [J/kg*K]

Der Wassergehalt zu Versuchsbeginn ist der einzige Parameter, der in allen Modellen angegeben war. Er schwankt zwischen 4 % und 40 %. Den geringsten Wert nimmt das Gestein im Mehrschichtensystem von Modell B an und den höchsten der Boden aus Lehm (Modell B) bzw. aus schluffigem Lehm (Modell D).

Der Anfangswassergehalt der Lehmböden ist in den Modellen B, C und D sehr unterschiedlich. Grundsätzlich haben Lehmböden jedoch aufgrund ihrer Eigenschaft als bindiger Boden einen höheren Wassergehalt als nichtbindiger Boden. Dieser kann durch äußere Einwirkungen, z.B. Regen oder kapillare Saugwirkung, erhöht werden. Im Hinblick auf die Frostentstehung bestimmt der Anfangswassergehalt über den weiteren Verlauf des Frosts und das Verhalten des Bodens. Folglich ergibt sich in Bezug auf den Straßenbau, dass ein höherer Anfangswassergehalt zu einer vermehrten Ansammlung von Wasser an der Gefrierfront führen und beim Gefrieren ein schnelleres Wachstum der Eislinse erfolgen könnte. Somit begünstigt ein eher trockener Boden den Schutz vor Frost.

Die Wärmeleitfähigkeiten der Modelle A, B und C werden mit rd. 1,0 angegeben, was in einem mittleren Bereich für Baustoffe liegt. Die auf die Probe einwirkende Temperatur wird mäßig weitergeleitet, was wiederum zur Folge hat, dass ggf. die Bildung der Eislinse in den Modellen A, B und C sich verzögert. Anhand von Mehrschichtenmodell B ist festzustellen, dass allein der dreischichtige Lehmboden Temperaturen unterschiedlich leitet. In den Modellen D und E wird die Wärmeleitfähigkeit des Materials nicht berücksichtigt.

In der Tragschicht kann die Zusammensetzung hinsichtlich Materialart stark variieren, dementsprechend verändert sich auch die Wärmeleitfähigkeit der Schicht. Die unterschiedlichen Leitfähigkeiten der einzelnen Materialarten können

die Frostkörperbildung beeinflussen. Daher sollten die stofflichen Komponenten einer Tragschicht möglichst genau bestimmt werden.

Für Modell A wird eine spezifische Wärmekapazität von $900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ angegeben und ist ein Maß für die Wärmespeicherkapazität des verwendeten Materials bezogen auf den einwirkenden Temperaturgradienten und die Masse. Die Wärmekapazität des ungefrorenen Bodens von Modell B liegt nach Materialart zwischen $1,03 \times 10^6$ und $2,82 \times 10^6 \text{ J/m}^3\cdot\text{K}$. Im Gegensatz zur spezifischen Wärmekapazität dient hier als Bezug das jeweilige Schichtvolumen. Die angegebenen Werte sind in einen niedrigen Bereich für Baustoffe einzuordnen. Die Modelle C, D, und E berücksichtigen diesen Faktor nicht.

Beim Aggregatzustandswechsel von Wasser zu Eis kühlt das Material ab und setzt dabei Energie frei. Demzufolge bedingt eine niedrige Wärmekapazität eine höhere Erwärmung bei niedriger Wärmezufuhr und umgekehrt eine schnelle Abkühlung bei geringer Wärmeabgabe. Daher sollte die Wärmekapazität in die numerische Simulation mit aufgenommen werden, da sie die Geschwindigkeit der Frost- und Tauprozesse mitbestimmt.

Die Porosität wird nur in Modell D mit 0,49 berücksichtigt. Das Porenvolumen nimmt damit annähernd die Hälfte des betrachteten Materialvolumens ein. So nimmt die Kapillarität des Materials zu. Aus straßenbautechnischer Sicht ist die Porosität einer von vielen Einflussparametern auf die Frostentstehung. Eine hohe Porosität bedeutet auch ein im Vergleich zum Festkörpervolumen verhältnismäßig großer Anteil an Poren, was sowohl eine höhere Wasseraufnahme zulässt, aber auch Raum für die Volumenvergrößerung beim Wechsel des Aggregatzustandes von Wasser zu Eis schafft. Dies sollte bei der Simulation berücksichtigt werden.

Die Durchlässigkeit in Modell C wird mit $6,6 \times 10^{-15} \text{ m/s}$ und in Modell D mit $7,4 \times 10^{-14} \text{ m/s}$ angegeben. Die Materialien besitzt somit eine sehr geringe Durchlässigkeit. In den drei anderen Modellen wird die Durchlässigkeit nicht angegeben. Wasser, welches in die Oberfläche eindringt, versickert nur langsam. Ist kein hoher Anfangswassergehalt vorhanden, werden die Poren allmählich mit Wasser angereichert. Eine schlechte Durchlässigkeit verzögert die Eisbildung, bei hohen Anfangswassergehalten erhöht sie aber diese, da Wasser auch nicht abfließen kann. U. a. in Bezug auf die Frostdauer ist die Durchlässigkeit daher für den Straßenbau ein wichtiger Aspekt.

8.8.7 Gefriermethode

Zur Herabsetzung der Temperatur in den Materialien werden in den Simulationen verschiedene Methoden angewendet. Die Modelle C und E verwenden ein zirkulierendes Kühlmittel, das mit sehr niedriger Temperatur durch das Material fließt und somit dessen Temperatur verhältnismäßig schnell herabsetzt. Dies ist eine effiziente und praxisnahe Möglichkeit des Temperatureintrags von oben nach unten. In Modell A wird die Temperatur mittels Prüfflüssigkeit entsprechend dem CIF-Test in den Probekörper eingebracht. Die Gefriermethode für die Modelle B und D ist nicht näher beschrieben.

8.8.8 Temperaturverteilung im Boden

Die Bodentemperatur wird durch den Wärmeverlust, die Wärmezufuhr, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität beeinflusst. In Modell A wird eine

Bodenprobe aus Beton von + 20 °C auf bis zu - 20 °C abgekühlt. Diese hohe Temperaturdifferenz ist darauf zurückzuführen, dass Beton ein sehr frost- und hitzebeständiges Material ist. Demnach werden höhere bzw. niedrigere Temperaturen für die Simulation angenommen. Bei Modell C und Modell E hingegen liegt das Temperaturregime auf einem wesentlich geringeren Niveau. Bereits geringe Temperaturen reichen hier aus, um Veränderungen im Boden hervorzurufen. Lehmböden sind von Grund auf durch einen erhöhten Wassergehalt gleichmäßig feucht. Das Wasser ist in den Poren überwiegend einheitlich verteilt, sodass es ab Temperaturen von 0 °C in der ganzen Bodenprobe flächendeckend zum Gefrieren des Wassers kommt. Die anderen Modelle lassen keine detaillierten Rückschlüsse auf die zugrunde gelegte Temperaturverteilung zu.

Aus straßenbautechnischer Sicht sollte daher bei der Wahl des Temperaturregimes einer Simulation der Fokus auf den anstehenden Frostzonen liegen. Die Bodentemperaturen variieren je nach Region, Witterungsverhältnissen und Außenlufttemperaturen und beeinflussen damit die Größe der Eislinse und mögliche Frosthebungen.

8.8.9 Verformungen

Für die Anwendung von Modellen ist eine möglichst praxisgetreue Prognose der Verformungen von großer Bedeutung. Die Verformungen aufgrund von Frost im Boden werden in den Modellen A und B als Hebungen an der Oberfläche wahrgenommen. Die Bildung von Eis in der Betonprobe von Modell A bewirkt eine ausschließlich vertikale Hebung aufgrund der starren seitlichen Lagerung und unteren Abdichtung. Modell B verfolgt einen praxisnäheren Ansatz. Hier werden die Verformungen, die an der Oberfläche auftreten, vertikal und horizontal definiert. In den Modellen C bis E bleiben die Verformungen unberücksichtigt.

8.8.10 Zusammenfassende Bewertung der ausgewählten Modelle

Da sich mit Ausnahme des Modells B alle anderen Modelle nicht direkt auf den Straßenbau beziehen, werden im Folgenden die straßenbautechnisch relevanten Punkte tabellarisch zusammengefasst (Tabelle 19). Die Zusammenstellung basiert auf der zuvor durchgeführten Analyse. Es werden alle Materialparameter mit einbezogen, da sie sowohl individuell als auch in Kombination untereinander und in Verbindung mit weiteren äußeren Einwirkungen, wie Temperatur und Witterung, Einfluss auf die Frostentstehung nehmen.

Ein straßenbautaughches Modell sollte idealerweise für unterschiedliche Materialien, die vorab auf ihre maßgebenden Parameter untersucht worden sind, anwendbar sein. Zu Beginn der Simulation wird das Material auf eine einheitliche Temperatur gebracht, die an die Witterungsverhältnisse und die Frostzone, die in dem Gebiet der Probenentnahme vorliegt, angepasst werden sollte. Dies gilt auch für die Gefriertemperatur. Beispielsweise in Gebieten mit einem hohen Frostindex und entsprechend langen Frostperioden sollte die Frosttemperatur stark abgesetzt werden. Während in dauerhaft wärmeren Regionen eine geringere Frosttemperatur ausreichen würde. Nach der Simulation könnten ggf. die auftretenden Verformungen des Materials mit einem Laborversuch validiert werden. Im Hinblick auf die sich daraus ergebenden straßenbautechnischen Auswirkungen kann die

Frostschuttschicht des Straßenoberbaus so dimensioniert werden, dass keine Frosthebungen auf die Fahrbahndecke übertragen werden können.

Tabelle 19: Zusammenstellung der straßenbautechnisch relevanten Punkte aus den ausgewählten Modellen [Brandes, 2017]

Einflussfaktor	
Sättigungszustand	ungesättigt
Materialart	mehrschichtig
Materialparameter	Wassergehalt Wärmeleitfähigkeit Wärmekapazität Porosität Durchlässigkeit
Gefriermethode	Zirkulierende Flüssigkeit
Temperatur an der Unterkante	an die Frostzone angepasst

9 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Baustoffen in ungebundene Schichten im Straßenbau oder von Baustoffen und Böden im Erdbau werden je nach Anwendungsgebiet die Kriterien aus den [ZTV E-StB 09] bzw. den [TL SoB StB 04/07] herangezogen. Die diesen Kriterien hinterlegten Prüfmethode sind auf Erfahrungen mit natürlichen Baustoffen abgestimmt. Vor dem Hintergrund einer praxisbezogenen Bewertung der Frostempfindlichkeit für Recycling-Baustoffgemische und industrielle Nebenprodukte in Deutschland sind die derzeit genormten Frost-Prüfverfahren nicht geeignet, da diese sowohl die Materialveränderungen als auch die Witterungsbedingungen in-situ nur unzureichend simulieren. Aufgrund der Notwendigkeit eines geeigneten Prüfverfahrens entwickelten [Weingart, Wieland, 2005] eine entsprechende realitätsnahe Prüfmethode auf Basis österreichischer Erfahrungen zur Bestimmung der Frosthebung [Strasser et al., 2001], [RVS 11.06.21, 1999]. Seitdem liegt ein Prüfverfahren vor, mit dem die Frostbeanspruchung eines Baustoffgemisches ohne Bindemittel hinreichend praxisgerecht simuliert werden kann. Auf dem Weg zur Routineprüfung führte die Bundesanstalt für Straßenwesen 2010 Vergleichsuntersuchungen zwischen den Geräten verschiedener Prüfinstitute durch [Blume, 2010]. Mit Hilfe dieser Erfahrungen wurde der Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels - Teil Frosthebungsversuch [TP BF-StB, Entwurf Teil: FHV] überarbeitet.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde nun ein Bewertungskriterium für diesen Frosthebungsversuch erarbeitet. Vorab wurde zunächst der Einfluss der Wasserbadtemperatur in den Frostkammern auf die maximale Frosthebung und den Beginn der Eislinsenbildung anhand vorhandener Datensätze analysiert. Anschließend erfolgte mittels einer Vielzahl von Frosthebungsversuchen die gezielte Untersuchung der in der Literatur als maßgeblich definierten Einflussgrößen auf die Frosthebung (Feinanteil, Quellfähigkeit und Porosität).

Bei der Datenanalyse zum Einfluss der Wasserbadtemperaturen konnte ebenso wie in [Jansen, 2012] festgestellt werden, dass die absolute Wasserbadtemperatur in einem Wasserbad niedriger ist. Dem zur Folge wurde das Prüfgerät modifiziert. Eine Steuerung mit zwei Temperaturfühlern konnte die gewünschte Gleichmäßigkeit zwischen den beiden Wasserbecken erzielen.

Weitere Datenanalysen ergaben, dass die im Entwurf der TP BF-StB, Teil Frosthebungsversuch geforderte Toleranz der Prüftemperatur im Wasserbad von $\pm 0,1$ K nur bei sortenreinen Baustoffgemischen ein zu halten ist. Werden die Einflüsse von Materialart und dessen Zusammensetzung berücksichtigt, kann zielsicher eine Prüftemperatur von $+ 1,5 \text{ °C} \pm 0,3$ K eingehalten werden. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass die Parameter Maximale Frosthebung und Beginn der Eislinsenbildung nur untergeordnet von Abweichungen der Wasserbadtemperatur beeinflusst werden.

Der Einfluss der Feinanteile auf die Frosthebung konnte anhand von definiert zusammengesetzten Labormischungen nachgewiesen werden. Für die Labormischungen wurden sowohl natürliche Baustoffgemische als auch Gemische mit industriellen Nebenprodukten mit verschiedenen Feinanteilen zusammengesetzt. Innerhalb der jeweiligen Materialsorte errechneten sich gute bis sehr gute Korrelationen zu den Kennwerten Maximale Frosthebung, Bleibende Hebung und Hebungsgeschwindigkeit.

Ein Nachweis des Einflusses der Quellfähigkeit auf die Frosthebung konnte nicht erbracht werden. Auch für diesen Einflussfaktor wurden Labormischungen mit variierendem Sandanteil gezielt zusammengesetzt. Verwendet wurden natürliche Baustoffe, sortenreine Recycling-Baustoffe und Recycling-Baustoffgemische, die an Recycling-Anlagen entnommen worden waren. Die Quellfähigkeit der Materialien wurde mittels Sandäquivalent bestimmt. Bei keinem der Baustoffgemische konnten Korrelationen zwischen der Quellfähigkeit und den Frosthebungs Kennwerten errechnet werden.

Der Einfluss der Porosität auf die Frosthebung konnte mit Einschränkungen nachgewiesen werden. Die Porosität wurde direkt und indirekt ermittelt. Zum einen wurde an natürlichen Gesteinen, RC-Baustoffgemischen und industriellen Nebenprodukten über deren Roh- und Reindichte eine Gesamtporosität berechnet. Zum anderen wurde bei den vorgenannten Materialien mittels Quecksilberporosimetrie der zugängliche Porenraum bestimmt. Die Auswertung des Versuchs wurde auf einen kapillarfähigen Porenraum zwischen 3.500 nm und 100.000 nm beschränkt, da sich hier die signifikantesten Unterschiede zwischen den untersuchten Materialien zeigten. Für die Frosthebungsversuche wurden ebenfalls gezielt zusammengesetzte Labormischungen hergestellt, in denen überwiegend die Materialart des Kornanteils 5/22,4 mm variierte. Dabei kamen poröse und dichte natürliche Baustoffgemische, sortenreine RC-Baustoffe und Gemischen aus industriellen Nebenprodukten zur Anwendung.

Mit dem Ansatz der berechneten Gesamtporosität konnten keine Korrelationen mit Frosthebungs Kennwerten berechnet werden. Dem gegenüber zeigt sich bei den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie, dass trotz großer Streuungen der Ergebnisse die Materialien mit mehr als 60 % kapillarfähigem Porenraum nahezu keine Frosthebungen aufwiesen. Auch die Labormischungen aus natürlichen Baustoffgemischen mit einem Luftporenanteil von mehr als 14 Vol.-% hoben sich unter Frosteinwirkung nicht bzw. nur geringfügig, was für sortenreine RC-Baustoffe jedoch nicht galt.

Um den Einfluss der Materialkennwerte bewerten zu können, wurden die errechneten Korrelationsgleichungen in Abhängigkeit von Steigung und y-Achsenabschnitt in drei Gruppen kategorisiert.

Daraus ergab sich, dass der Frosthebungsparameter Maximale Frosthebung für die Bewertung besonders geeignet, die Parameter Bleibende Hebung und Hebungsgeschwindigkeit jeweils geeignet sind. Bei der Betrachtung der Hebungsgeschwindigkeit war es unerheblich, welcher Zeitraum innerhalb des Versuchs herangezogen wurde. Innerhalb des im Rahmen dieses Projektes ausgewerteten Datenkollektivs ergaben sich überwiegend ähnliche Tendenzen bei der Auswertung der Geschwindigkeiten zwischen den einzelnen Versuchstagen. Es konnten Korrelationen zwischen 0,82 und 0,99 ermittelt werden. Im Vergleich konnten bei den Geschwindigkeiten zwischen dem 6. und 7. Tag mehr Korrelationen mit den Materialparametern errechnet werden.

Bei den untersuchten Materialparametern waren der Kornanteil 5/22,4 mm und der Anteil $< 0,063$ mm zur Bewertung geeignet. Beide Parameter sprechen natürliche Baustoffe, RC-Baustoffgemische und auch Gemische aus industriellen Nebenprodukten an. Der errechnete Luftporenanteil im Gemisch eignet sich für die Bewertung nicht, da sich nur bei natürlichen Baustoffen eindeutige Abgrenzungen ergeben.

Für die Entwicklung eines Bewertungskriteriums wurden zusätzlich Datensätze aus dem Datenpool der RUB herangezogen, der auch Daten der BAST, der TU München und HTW Dresden beinhaltet. Dabei handelt es sich um Ergebnisse von RC-Baustoffgemischen aus RC-Anlagen, von gezielt zusammengesetzten sortenreinen RC-Baustoffen und von industriellen Nebenprodukten. Es wurden zwei Ansätze verfolgt, von denen nur Ansatz A sich als zielführend herausstellte. Bei Bewertungsansatz A wurden die Flächen unter der Hebungskurve und die über der Kühlkopf Temperaturkurve je Probe ermittelt und in Bezug gesetzt. Hiermit konnten belastbare Bewertungskriterien abgeleitet werden. Es wurde eine automatisiertes Auswerteformular entwickelt.

Bewertungsansatz B wurde ursprünglich konzipiert, um Kennwerte aus dem Frosthebungsversuch und Materialkennwerte miteinander zu verknüpfen. Dieser Ansatz hat sich als nicht zielführend herausgestellt. Schlussendlich erzeugen die Überlagerungen der unterschiedlichen materialspezifischen Einflussfaktoren zu hohe Streuungen. Werden jedoch Materialgemische in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften, z.B. hoher Feinanteil, im Labor gezielt zusammengesetzt, lässt sich dieser materialspezifische Einflussfaktor auf die Frosthebung überwiegend korrelieren. Eine Übertragung dieser Korrelationen auf heterogene Baustoffgemische aus der Praxis, wie sie schwerpunktmäßig im Datenpool der RUB vorhanden sind, ist nicht möglich.

Die Validierung des Bewertungskriteriums nach Ansatz A erfolgte mittels Frosthebungsdaten von RC-Baustoffgemischen aus der Versuchsstrecke der BAST in Seelow [Jansen et al., 2011] und dem Pool der 15 Strecken, die im Rahmen des Forschungsprojektes „Evaluation Ressourcen schonender Tragschichten“ [Radenberg et al., 2014] untersucht worden sind. Darüber hinaus wurden Frosthebungsdaten von RC-Baustoffgemischen, die in-situ Schäden erzeugten, mit berücksichtigt.

Zusammenfassend werden auf Basis der Laborversuche und des Datenpools der RUB folgende Bewertungskriterien für den Frosthebungsversuch empfohlen:

- natürliche Baustoffe (Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation)
 - Integral der Frosteinwirkung: $\leq 30 \text{ mm} \cdot \text{d}$
 - Integral der Temperatureinwirkung: $\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$
- RC-Baustoffgemische (Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation)
 - Integral der Frosteinwirkung $\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$
 - Integral der Temperatureinwirkung $\leq 15 \text{ K} \cdot \text{d}$
- Industrielle Nebenprodukte (Frostempfindlichkeit F1 gemäß Bodenklassifikation)
 - Integral der Frosteinwirkung $\leq 43 \text{ mm} \cdot \text{d}$
 - Integral der Temperatureinwirkung industrielle Nebenprodukte $\leq 23 \text{ K} \cdot \text{d}$

Die Bewertungsansätze für natürliche Baustoffe und industrielle Nebenprodukte konnten mangels Praxisdaten nicht validiert werden.

Mit dem hier durchgeführten Frosthebungsversuch kann die Frostempfindlichkeit praxisgerecht und prozesssicher untersucht werden. Darüber hinaus ist mit dem oben empfohlenen Bewertungskriterium eine Bewertung der Frostempfindlichkeit von RC-Baustoffgemischen gemäß Bodenklassifikation F1 möglich.

Abschließend wurde eine Literaturstudie zur Modellierung von Frostkörpern durchgeführt. Obwohl das Forschungsfeld seit langem besteht, war die Anzahl an veröffentlichten Studien und Modellen bezogen auf den Straßenbau sehr begrenzt und stammte ausschließlich aus dem ostasiatischen Raum. Daher wurde die Recherche auch auf solche Modelle ausgeweitet, die nicht direkt auf den Straßenbau anwendbar sind. Derzeit beschränkt sich die europäische Forschung zur numerischen Simulation von Frostkörpern auf überwiegend Zwei- oder Dreiphasenmodelle. Darauf aufbauend befindet sich derzeit ein Vierphasenmodell in der Entwicklung [Ricken, Bluhm, 2014], welches die Anteile aus Gestein bzw. Feststoff, Flüssigkeit, Eis und Luft umfasst.

Die Zwei-, Drei- oder Vierphasenmodelle finden Anwendung, z.B. im Tunnelbau oder im Grundbau. Bezogen auf den Anwendungsfall der ungebundenen Tragschichten im Straßenbau ist lediglich das Vierphasenmodell praxisrelevant, daher wurde dieses Modell ausführlich vorgestellt. Ebenso zusammenfassend erläutert wurden die Modelle, welche sich in Ostasien in der Entwicklung befinden.

Bei der Entwicklung des Bewertungskriteriums wurden materialspezifische Einflüsse, wie die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffgemische oder auch die chemische der industriellen Nebenprodukte nicht berücksichtigt. Mit diesen Analysen müsste das Bewertungskriterium ggf. noch modifiziert werden.

Auch ist eine Validierung des Bewertungskriteriums für industrielle Nebenprodukte zwingend notwendig.

Literatur

Blume, U.: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S63, 2010, Bergisch Gladbach

Blume, U., Plehm, T.: Aktualisierung der Frostzonenkarte zur Dimensionierung des frostsicheren Oberbaus, Straße & Autobahn 12/2009, S. 793-799, Kirschbaum Verlag, Bonn

Brandes, K.: Vergleichende Zusammenstellung numerischer Modelle zu Simulation von Frostköpern, Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum, 2017, Bochum (unveröffentlicht)

Brandl, H.: Großversuche zur Ermittlung der Frostgefährdung von Kiesen, Straße & Autobahn 3/1970, S. 102-111, Kirschbaum Verlag, Bonn

Brandl, H.: Ungebundene Tragschichten im Straßenbau, Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 67, 1977, Wien

Casagrande, A.: Discussion on frost heaving, Proceedings Highway Research Board, Vol. 11, Part 1, S. 168-172, 1931, Washington

Dücker, A.: Untersuchungen über die Frostgefährlichkeit nichtbindiger Böden, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Band 17, 1939

Eden, W.: Einfluss der Verdichtung von Kalk-Sandrohmassen auf die Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen, Universität Kassel, Fachbereich Bauingenieurwesen, Dissertation, 2010, Kassel

Engel, J.; Lauer, C.; Wolter, S.: Randbedingungen für den Frosthebungsversuch bei Böden und Baustoffen, Abschlussbericht zum FE 05.165/2011/DGB, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2014, Bergisch Gladbach (unveröffentlicht)

Floss, R.: Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Auswahl und Dimensionierung von Straßenbefestigungen, Straße & Autobahn 1/1973, S. 17-26, Kirschbaum Verlag, Bonn

Jansen, D.: Auswertung der Wasserbadtemperaturen im Frosthebungsgerät der BASt, 2012, Bergisch Gladbach (unveröffentlicht)

Jansen, D.; Kunz, K.: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Straßenbau, Heft S 70, Verlag für neue Wissenschaft, 2011, Bremerhaven

Jessberger, L.: Vergleichende Beurteilung der gebräuchlichen Frostkriterien für Frostschutz-Kies-Sande anhand der Originalveröffentlichungen, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 208, 1976, Bonn

Krzemien, R.: Untersuchungen von Feinanteilen in Korngemischen für ungebundene Tragschichten, Straßenforschungsauftrag Nr. 3131 des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten, 1995, Wien

Li, N.; Chen, F.; Xu, B.; Swoboda, G.: Theoretical modeling framework for an unsaturated freezing soil, Cold Regions Science and Technology, Heft 54, S. 19-35, 2008

- Lottmann, A.; Haltenroth, G.; Richter, F.: Bemessungsgrundlagen für den frostsicheren Oberbau, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 879, 2004, Bonn
- Lovell, C.W.: Frost susceptibility of soils, Proceedings 4th International Conference on Permafrost, 1983, Alaska, USA
- Mittwollen, J.-P.: Verdichtungsverhalten, Festigkeit und Struktur von planen Minitabletten, Dissertation, Universität Hamburg, 2002, Hamburg
- Neroth, G.; Vollenschaar, D.: Wendehorst Baustoffkunde, vieweg+Teuber Verlag, 2011, Wiesbaden
- Porotec GmbH: Bedienungsanleitung für das Porosimeter PASCAL 140/240/440, 2001, Hofheim
- Radenberg, M.; Sedaghat, N.; Kollar, J.; Flottmann, N.: Evaluation Ressourcen schonender Tragschichten, FE 06.0096/2011/FRB der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2014, Bochum
- Rastbichler, T.: Einfluss der Porosität und der Porenstruktur auf die Frostempfindlichkeit von Baustoffgemischen, Masterarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum, 2016, Bochum (unveröffentlicht)
- Ricken, T.; Bluhm, J.: Modeling of liquid and gas saturated porous solids under freezing and thawing cycles, Aktuelle Forschung in der Bodenmechanik 2013, Kapitel 2 des Tagungsbandes zur 1. Deutschen Bodenmechanik Tagung Bochum, Springer Vieweg Verlag, 2014, Heidelberg
- Roos, M.; Gerth, W.-P.; Augter, G.: Aktualisierung der Frostdimensionierung im Straßenbau, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1002, 2008, Bonn
- Schaible, L.: Frost und Tauschäden an Verkehrswegen und deren Bekämpfung, Verlag Ernst & Sohn, 1957, Bonn
- Setzer, M.-J., Auberg, R.; Kasperek, S.; Palecki, S.; Heine, P.: CIF-Test – capillary suction, internal damage and freeze-thaw-test, Materials and Structures 34, S. 515-525, 2004
- Strasser, W., et al.: Frosthebungsverhalten von ungebundenen Tragschichten, Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 508, 2001, Wien
- Waibel, P.: Der Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung der Feinanteile auf die Frostsicherheit von Kiestragschichten, Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 47, 1975, Wien
- Weingart, W.; Wieland, M.: Weiterentwicklung des Frosthebungsversuchs, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 927, 2005, Bonn
- Wellner, F.; Kayser, S.; Patzak, J.: Überprüfung und Bewertung der Frostdimensionierung nach den RStO, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1045, 2010, Bonn
- Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile – Beton, Mauerwerk – Band 2, Bauverlag 1993, Wiesbaden

Tan, X.; Chen, W.; Tian, H.; Cao, J.: Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media – numerical simulation and application, Cold Regions Science and Technology, Heft 68, S. 74-84, 2011

Zhang, S.; Teng, J.; He, Z.; Sheng, D.: Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study, Cold Regions Science and Technology, Heft 126, S. 1-9, 2016

Zhao, L.; Gray, D.; Male, D.: Numerical analysis of simultaneous heat and mass transfer during infiltration into frozen ground, Journal of Hydrology, Heft 200, S. 345-363, 1997

Zhou, M.: Computational Simulation of Soil Freezing: Multiphase Modeling and Strength Upscaling, Dissertation am Institut für Strukturelle Mechanik der Ruhr-Universität Bochum, 2013, Bochum

Gesetzestexte, Normen, Richtlinien

Gesetz Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen – Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG vom 24.02.2012 BGBl. 1, S. 212 ff, 2012

DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Ausgabe 2012, Beuth-Verlag, Berlin

DIN EN 933-8: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 8: Beurteilung von Feinanteilen – Sandäquivalent-Verfahren, Ausgabe 2015, Beuth-Verlag, Berlin

DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanischen und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Ausgabe 2013, Beuth-Verlag, Berlin

DIN EN 1097-7: Prüfverfahren für mechanischen und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Füller – Pyknometer-Verfahren, Ausgabe 2008, Beuth-Verlag, Berlin

DIN EN 1367-1: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen, Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel, Ausgabe 2007, Beuth-Verlag, Berlin

DIN EN 13286-2: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehalt – Proctorversuch, Ausgabe 2013, Beuth-Verlag, Berlin

DIN EN 1936: Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, Rohdichte, der offenen Porosität und Gesamtporosität, Ausgabe 2007, Beuth-Verlag, Berlin

DIN – Fachbericht CEN/TR 15177: Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton – Innere Gefügestörung, Ausgabe 2006, Beuth-Verlag, Berlin

DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch; Ausgabe 2012, Beuth-Verlag, Berlin

Heft 105: Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen, Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“, Arbeitsausschuss „Frost“, Schriftenreihe Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Ausgabe 1994, Kirschbaum Verlag, Bonn

Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus (RStO), Ausgabe 2001, FGSV-Verlag, Köln

Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus (RStO), Ausgabe 2012, FGSV-Verlag, Köln

RVS 11.06.21: Grundlagen, Prüfverfahren Steinmaterial, Punkt 1, Frosthebungsversuche, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße & Verkehr (FSV), Ausgabe 2013, 1999, Wien

ÖNorm B 4810: Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau – Beurteilung der Frostsicherheit, Ausgabe 2013, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB StB), Ausgabe 2004/Fassung 2007, FGSV-Verlag, Köln

Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB), Ausgabe 2004, Fassung 2007, FGSV-Verlag, Köln

Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus (TL BuB E-StB), Ausgabe 2009, FGSV-Verlag, Köln

Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil: Frosthebungsversuch (TP BF-StB, Teil: FHV), Entwurf 2009

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB), Ausgabe 2009, FGSV-Verlag, Köln

Anhang

- Teil A: Einflussfaktor Feinanteile
- Teil B: Einflussfaktor Quellfähigkeit
- Teil C: Einflussfaktor Porosität
- Teil D: Bewertungsansätze und deren Vergleich
- Teil E: Einfluss der Wasserbadtemperaturen und modifizierter Kühlkreislauf

Anhang A - Einflussfaktor Feinanteile

Kornzusammensetzungen der Materialgemische

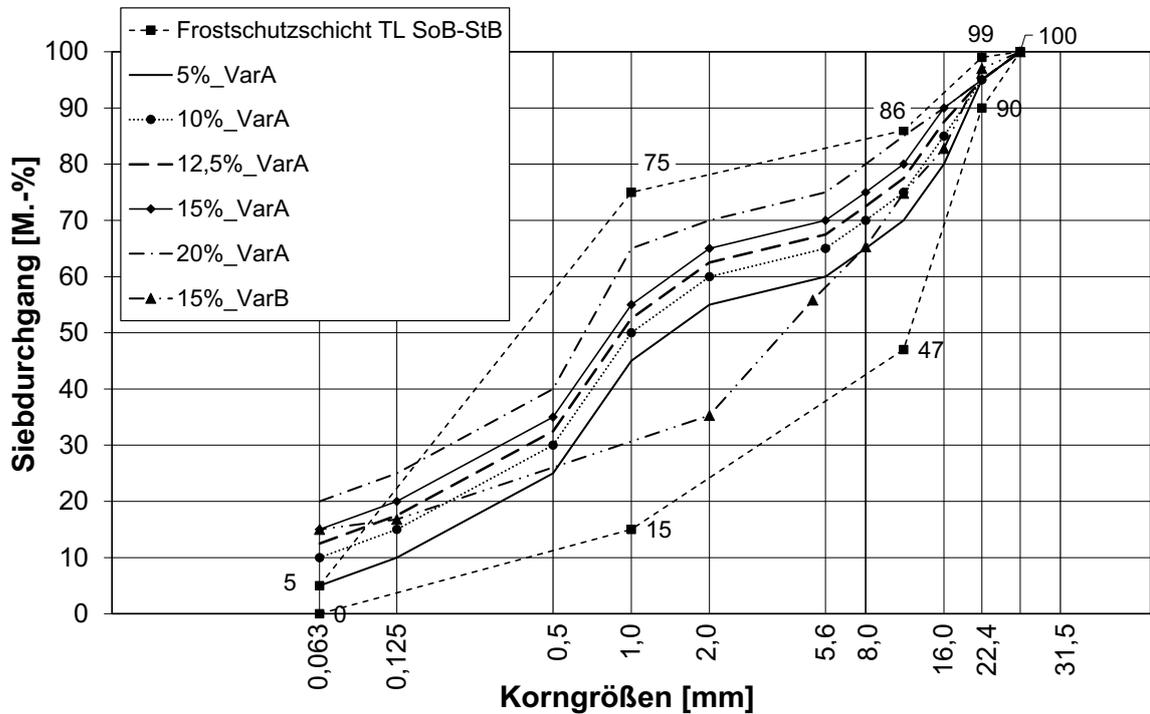


Abbildung 118: Zusammensetzung der Materialgemische Diabas Variante A und B

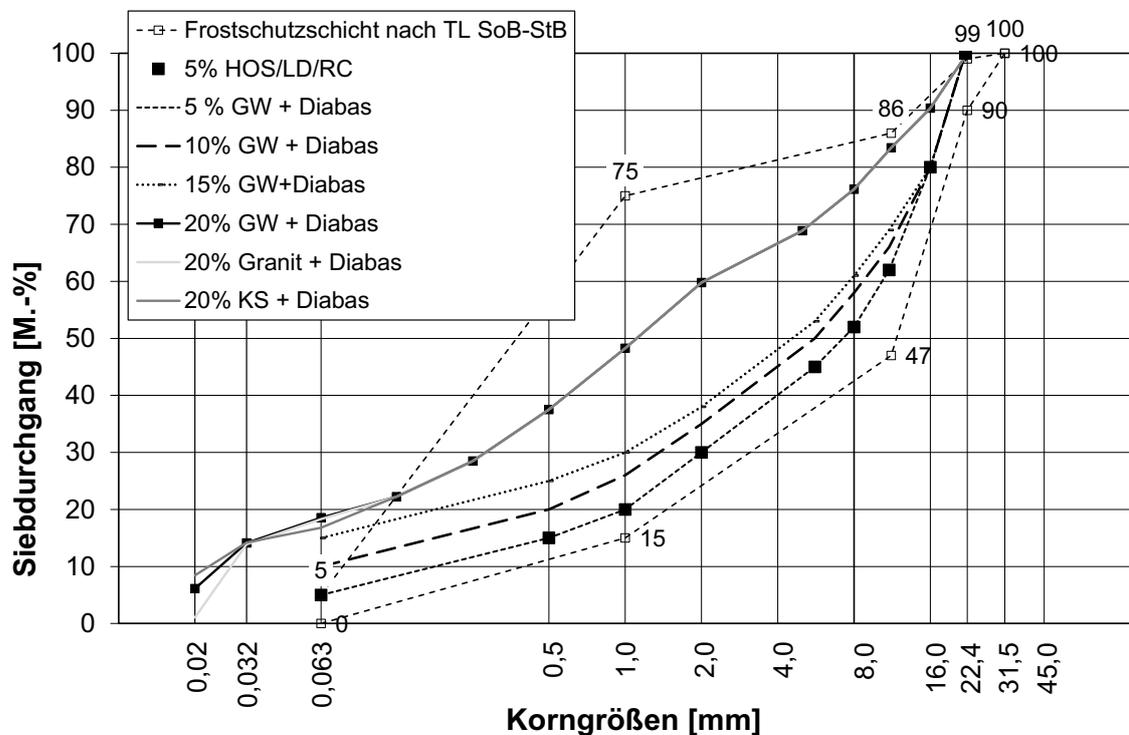


Abbildung 119: Zusammensetzung der Materialgemische mit Grauwacke, mit verschiedenen Gesteinsmehlarten (20 M.-% Zugabe) und mit 5 M.-% HOS/LDS

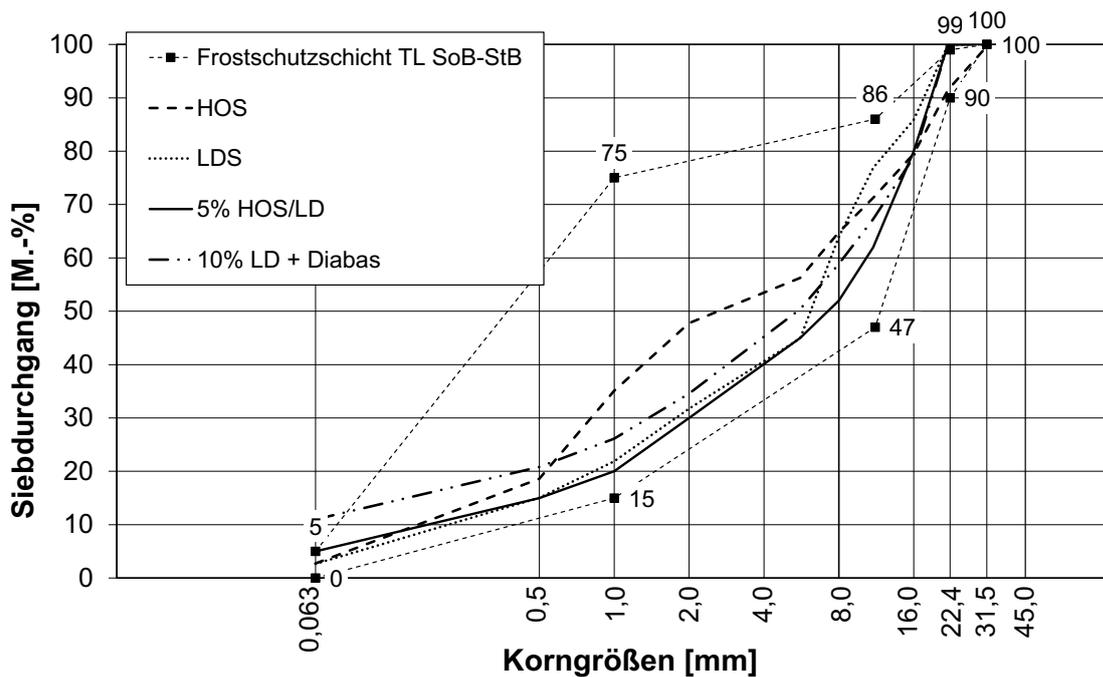


Abbildung 120: Zusammensetzung der Materialgemische Hochofenschlacke und LD-Schlacke

Ausgewählte Gegenüberstellungen von Materialkennwerten und Frosthebungskennwerten

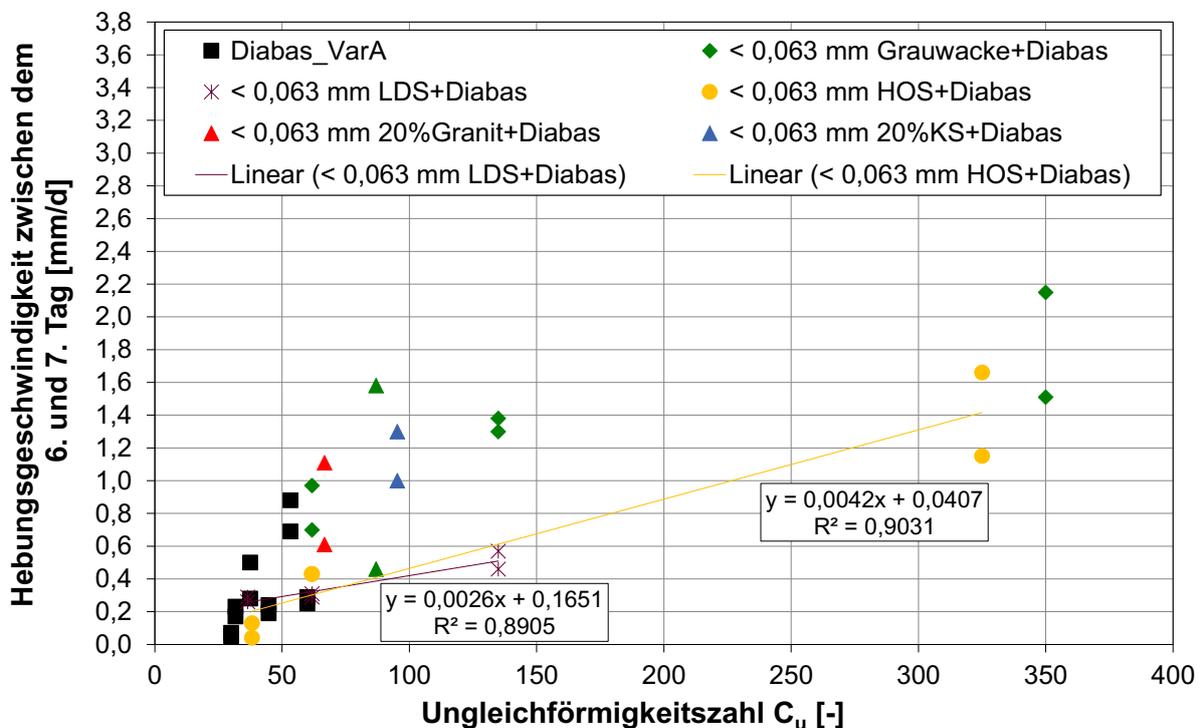


Abbildung 121: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und Ungleichförmigkeitszahl

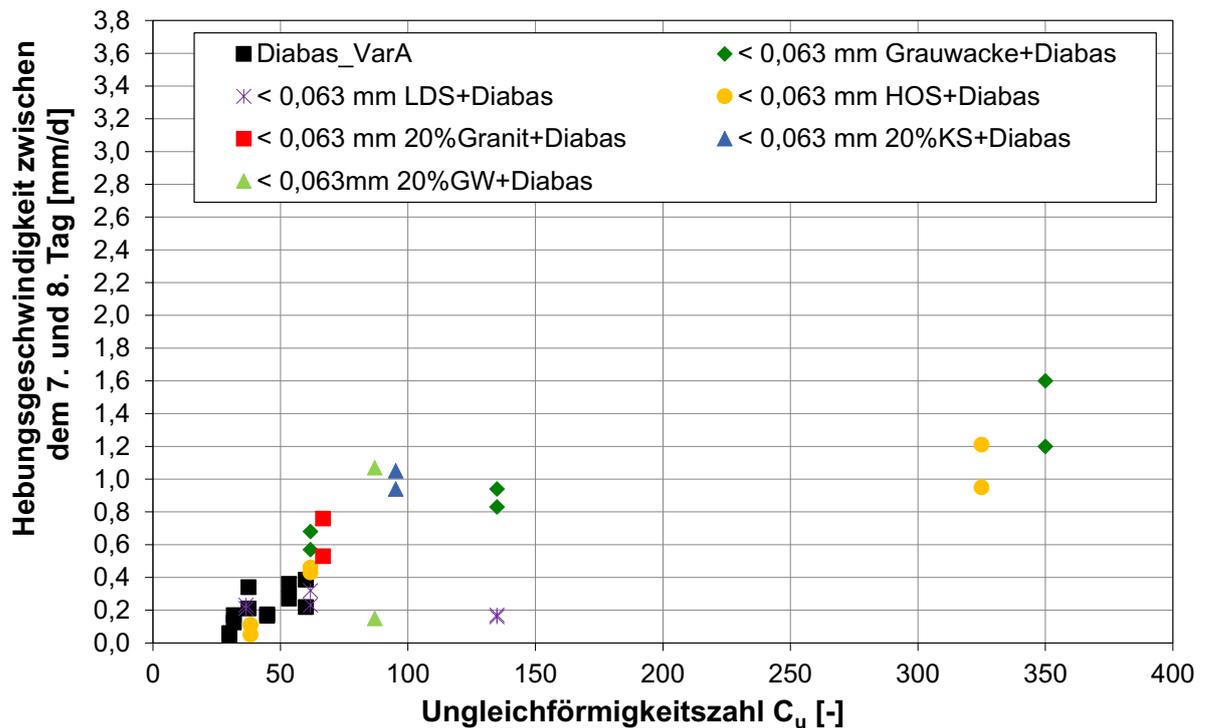


Abbildung 122: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag und Ungleichförmigkeitszahl

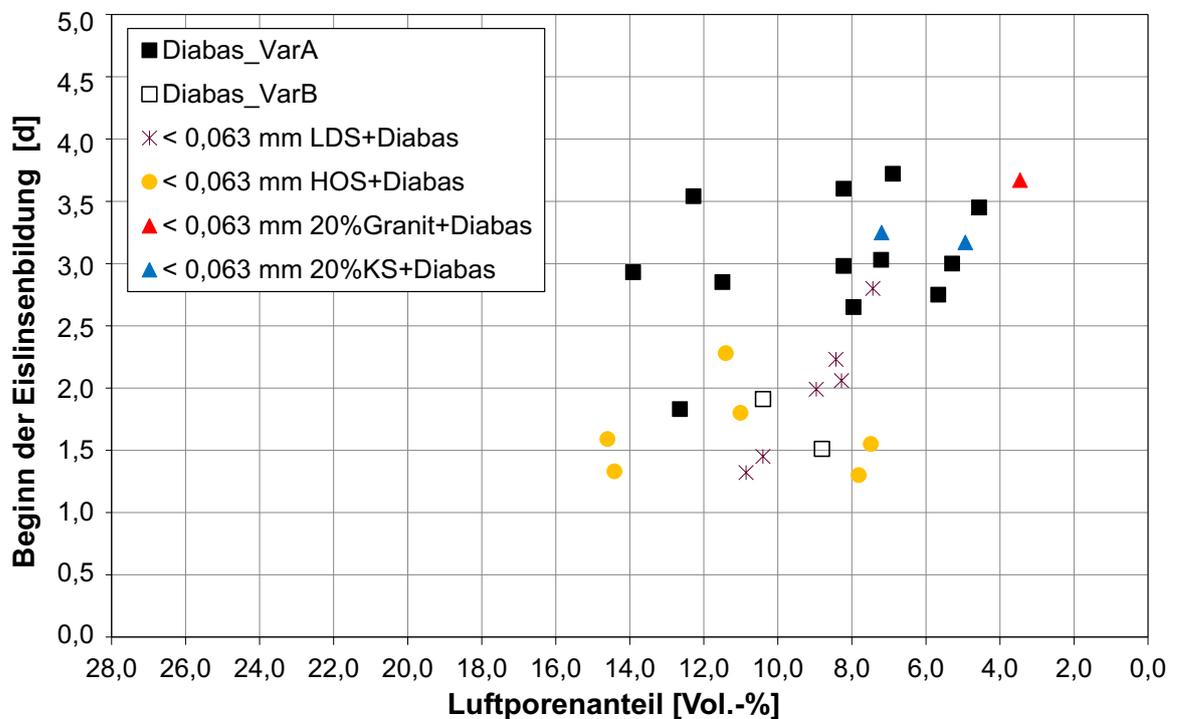


Abbildung 123: Gegenüberstellung von Beginn der Eislinsenbildung und Luftporenanteil

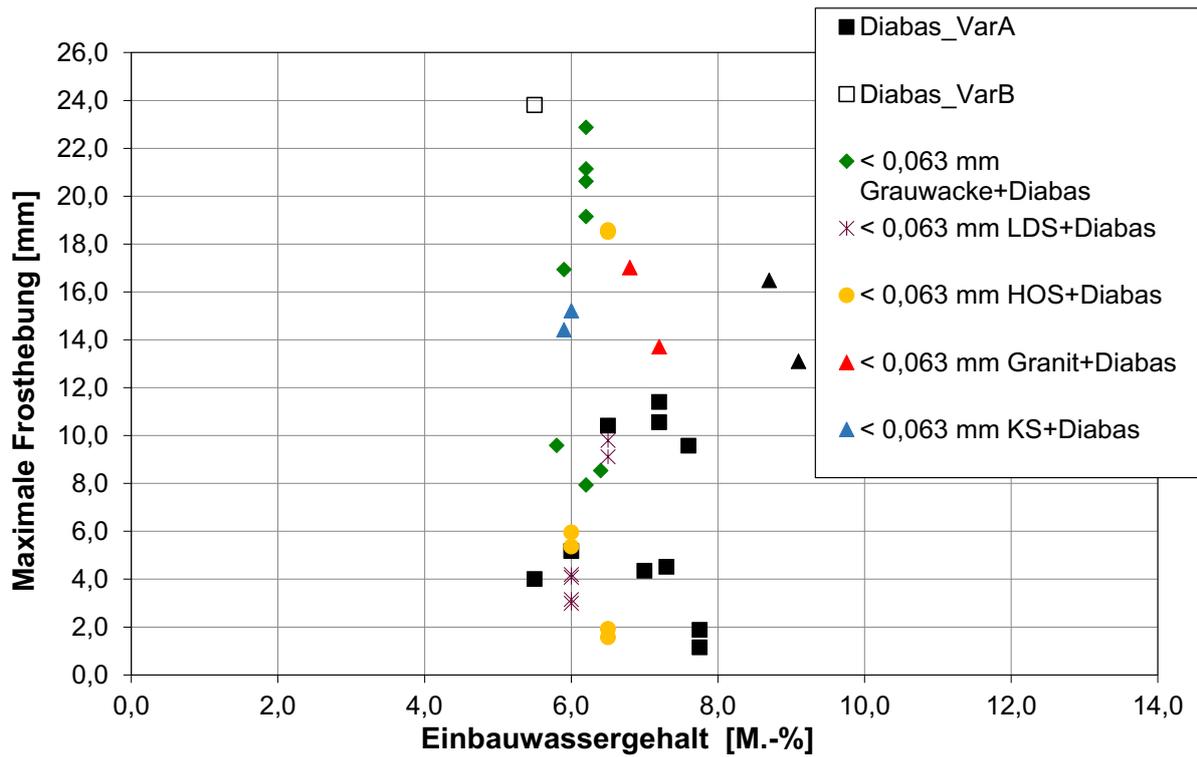


Abbildung 124: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Einbauwassergehalt

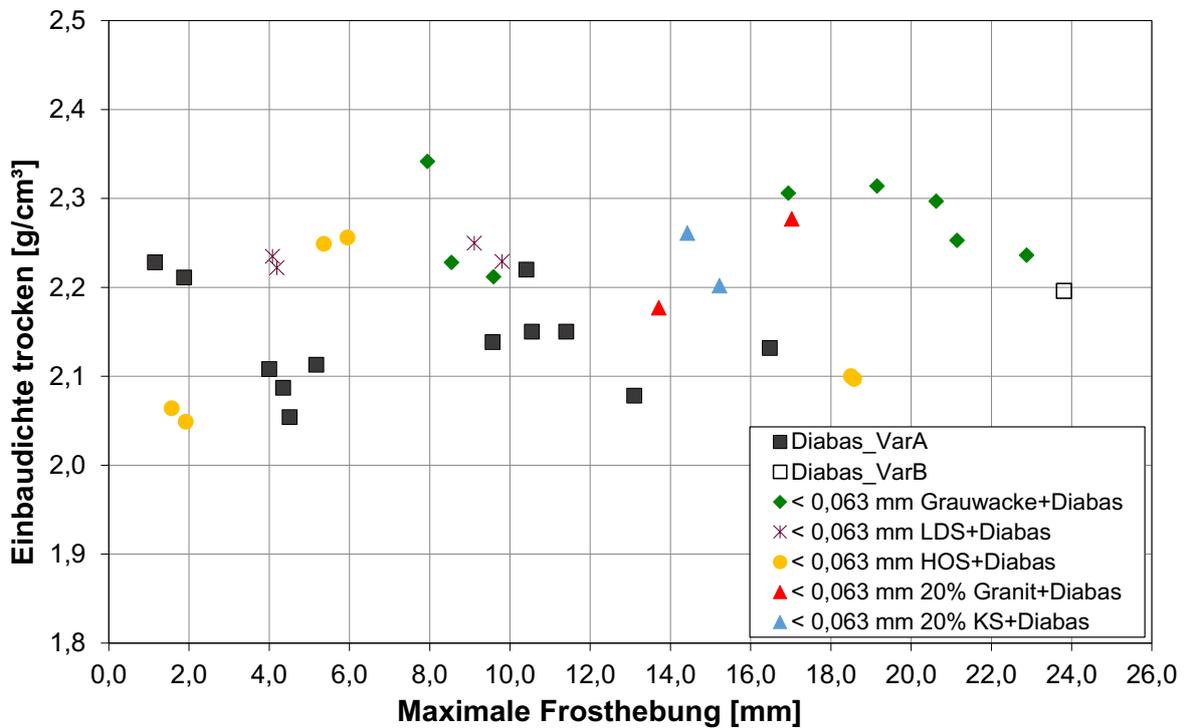


Abbildung 125: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Einbaudichte

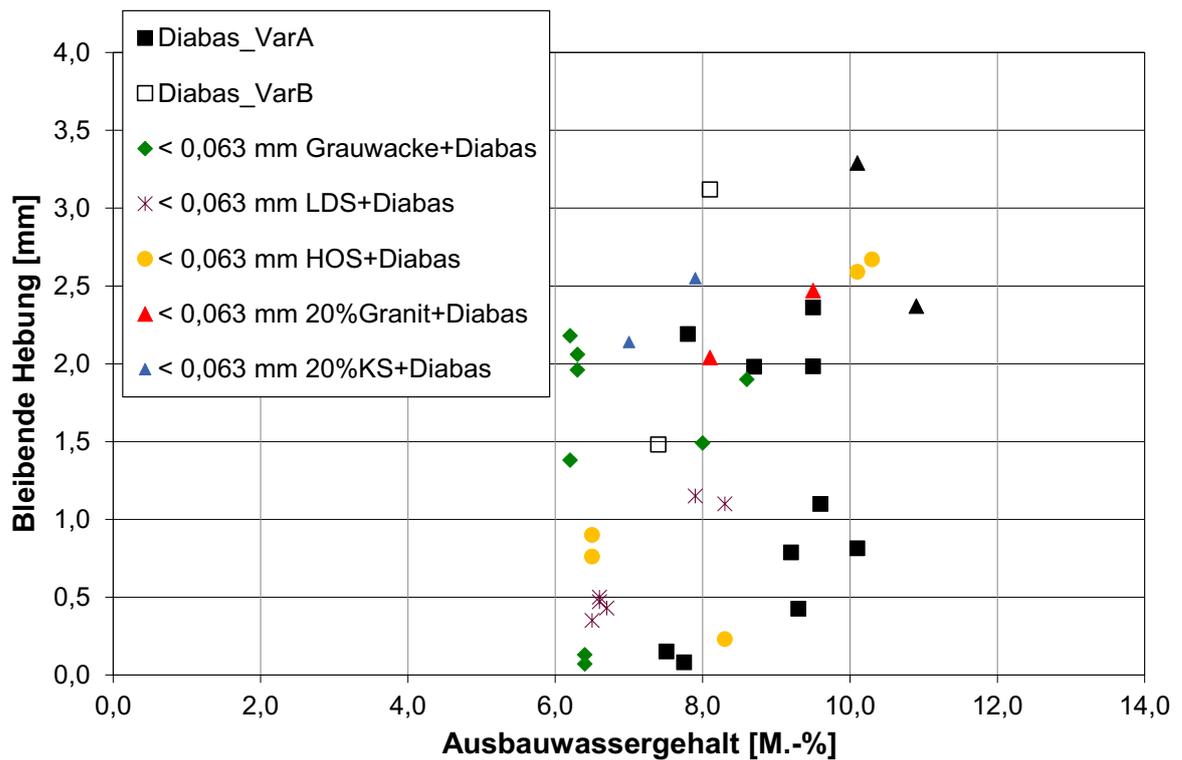


Abbildung 126: Gegenüberstellung von Bleibender Frosthebung und Ausbauwassergehalt

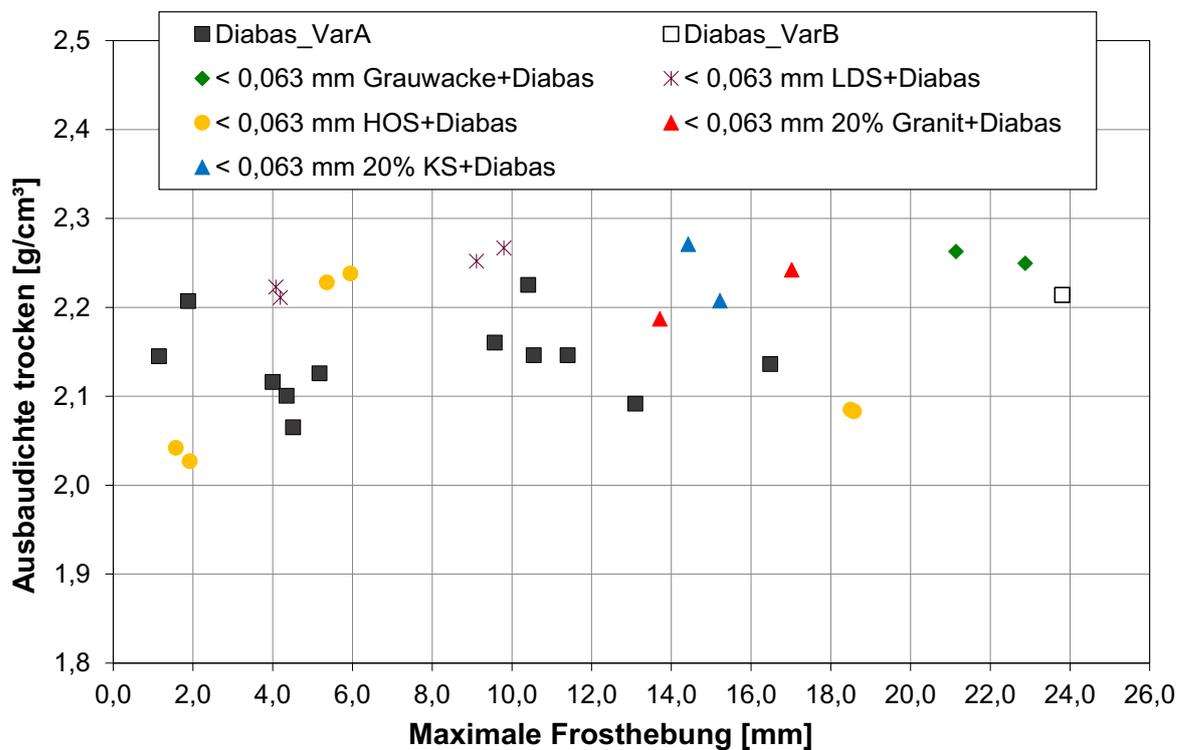


Abbildung 127: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Ausbaudichte

Anhang B - Einflussfaktor Quellfähigkeit

Kornzusammensetzungen der Materialgemische

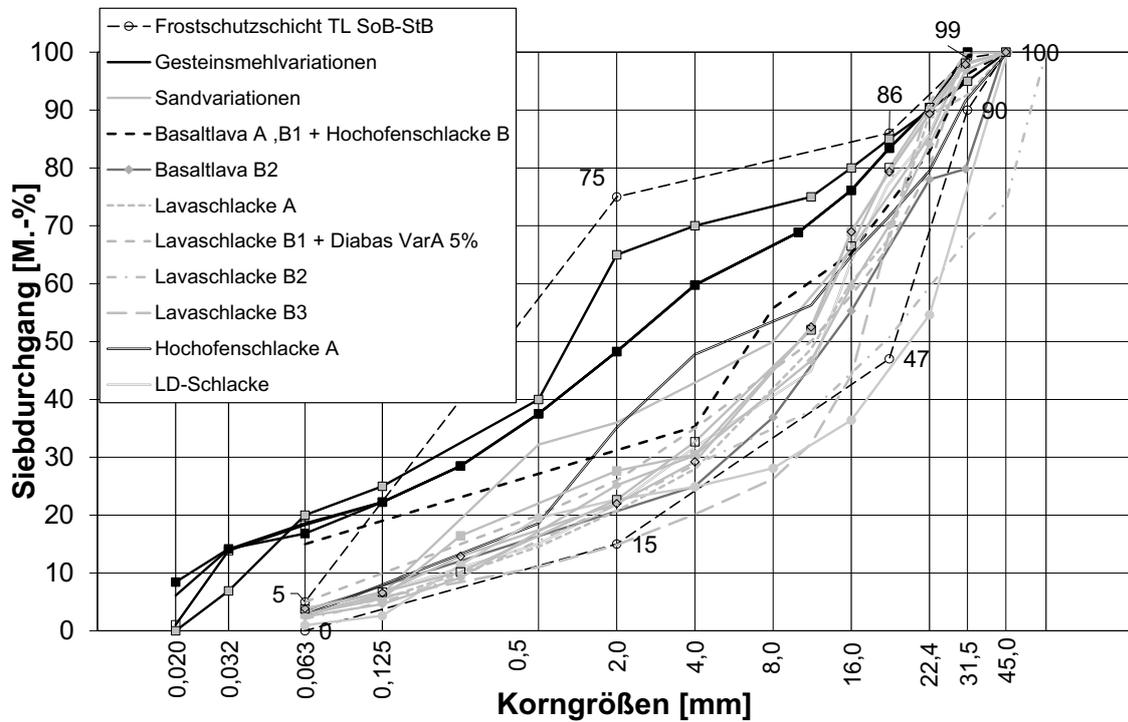


Abbildung 128: Zusammensetzung der Materialgemische mit natürlichen Gesteinskörnungen

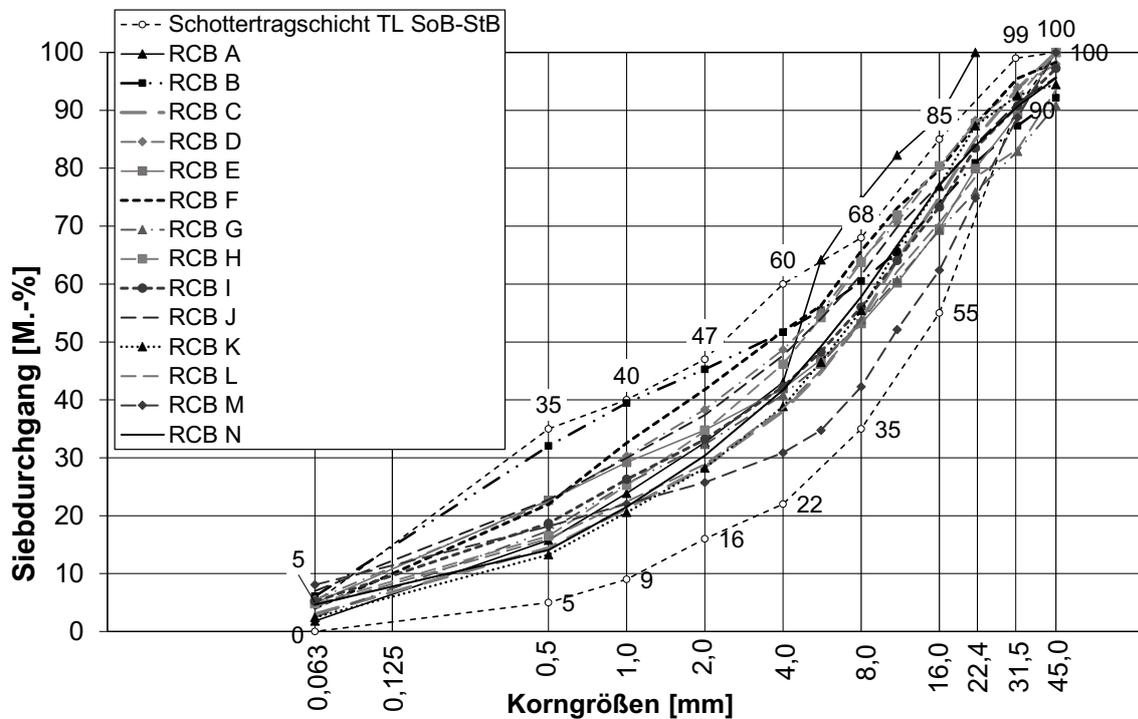


Abbildung 129: Zusammensetzung der Materialgemische mit RC-Baustoffgemischen

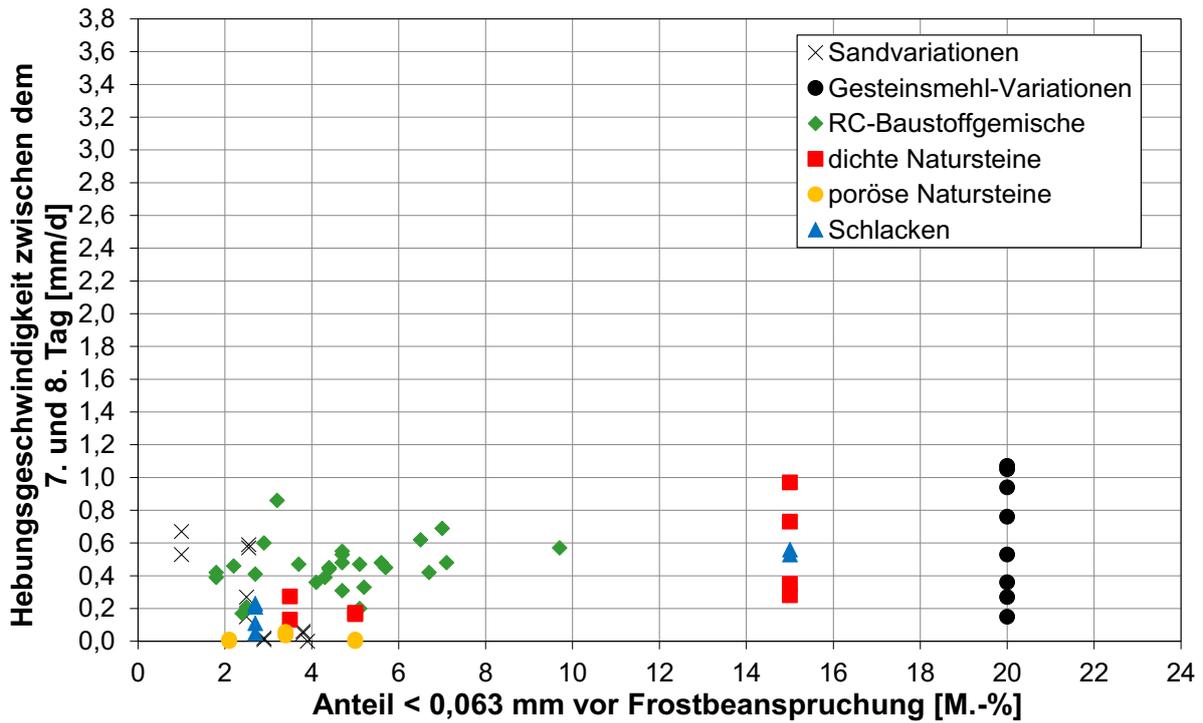


Abbildung 132: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag und Anteil < 0,063 mm

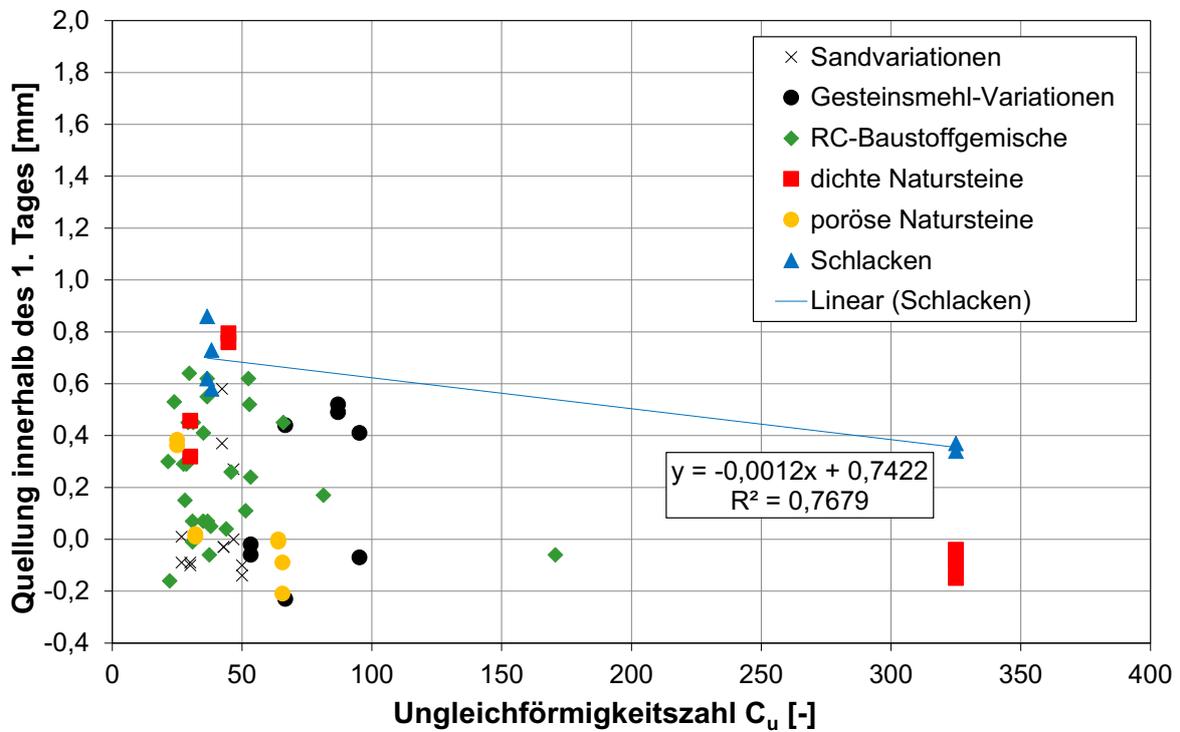


Abbildung 133: Gegenüberstellung von Quellung innerhalb des 1. Tages und Ungleichförmigkeitszahl

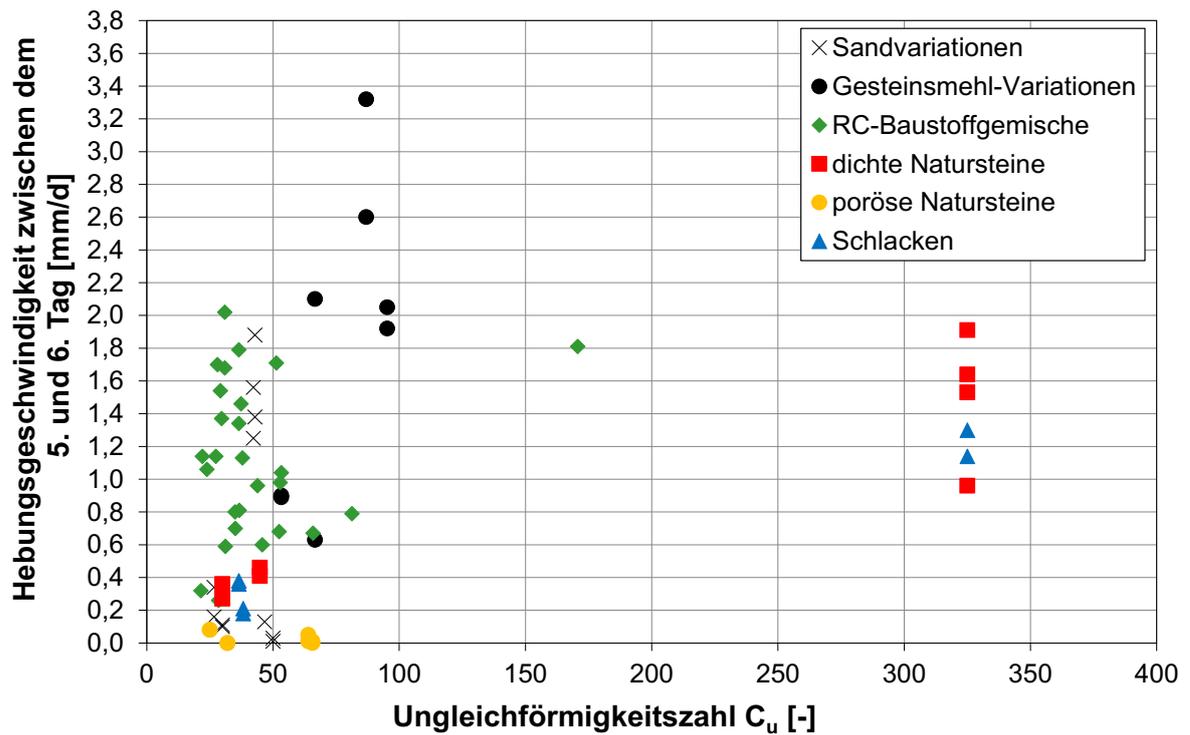


Abbildung 134: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und Ungleichförmigkeitszahl

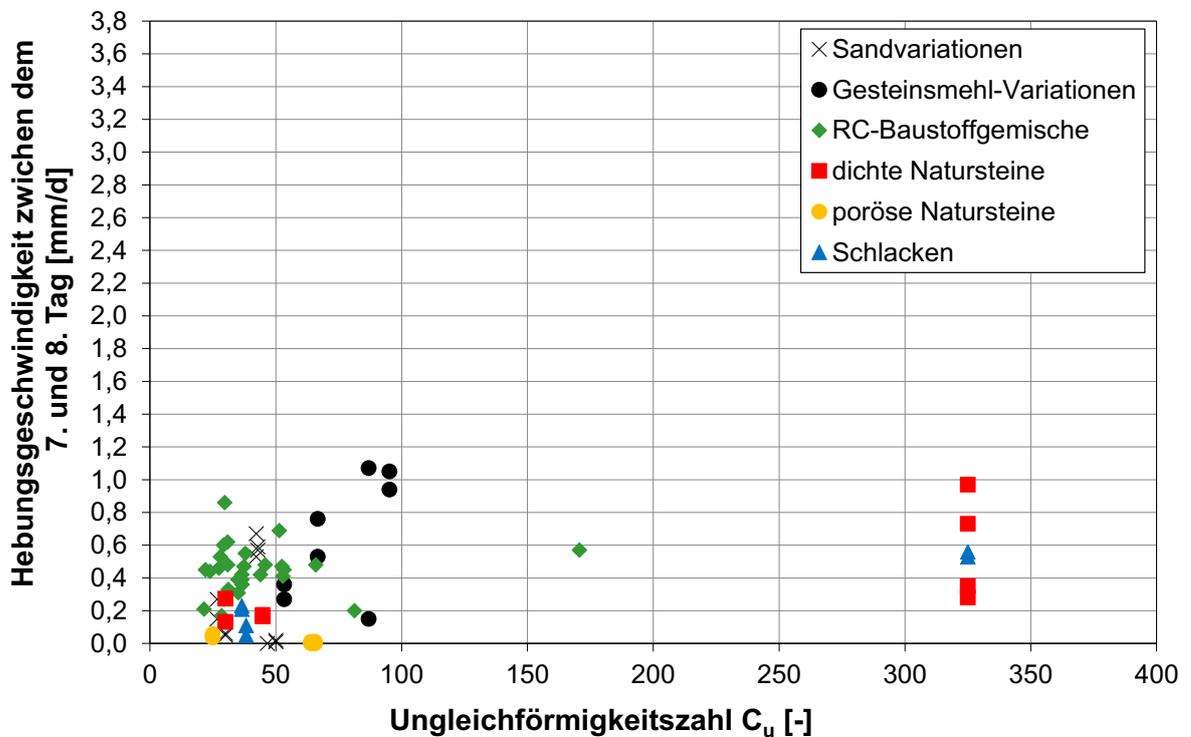


Abbildung 135: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag und Ungleichförmigkeitszahl

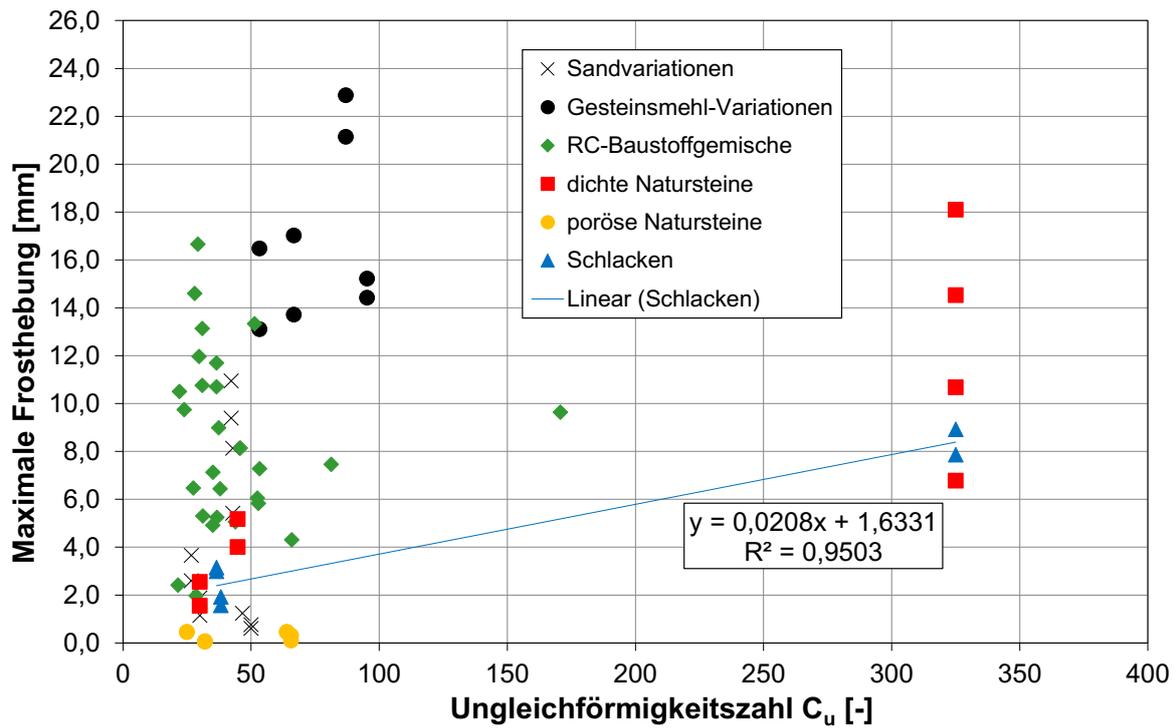


Abbildung 136: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Ungleichförmigkeitszahl

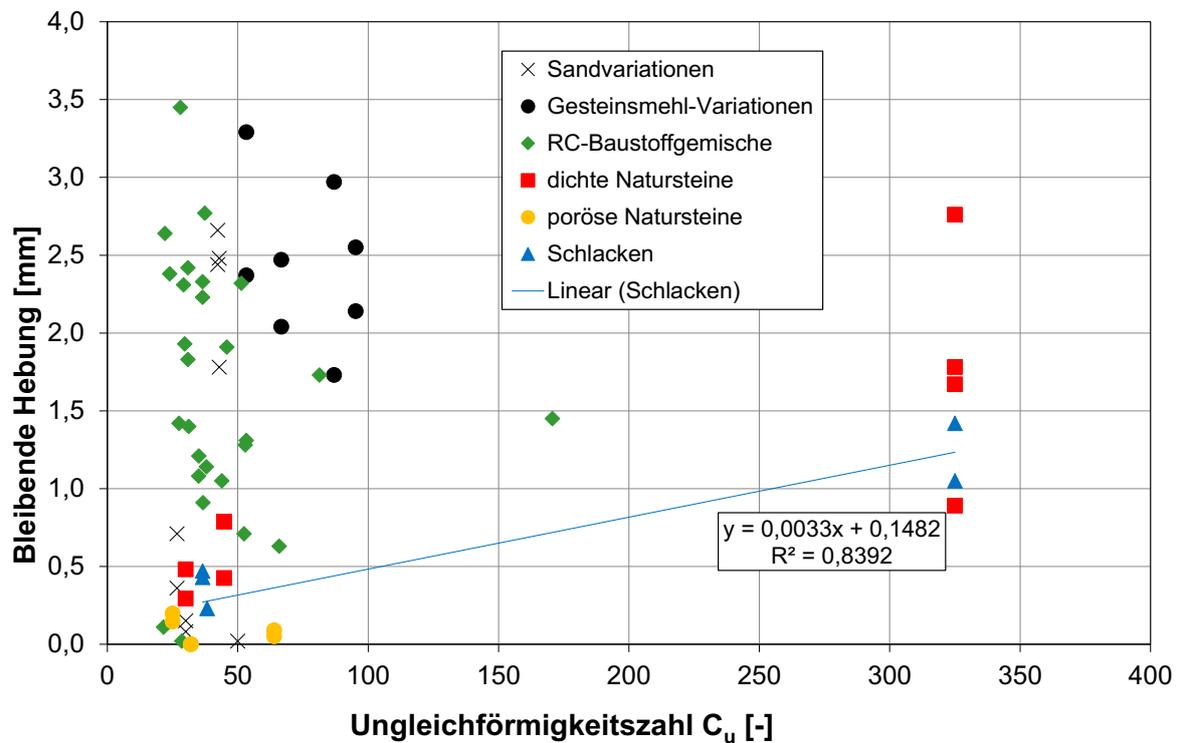


Abbildung 137: Gegenüberstellung von Bleibender Hebung und Ungleichförmigkeitszahl

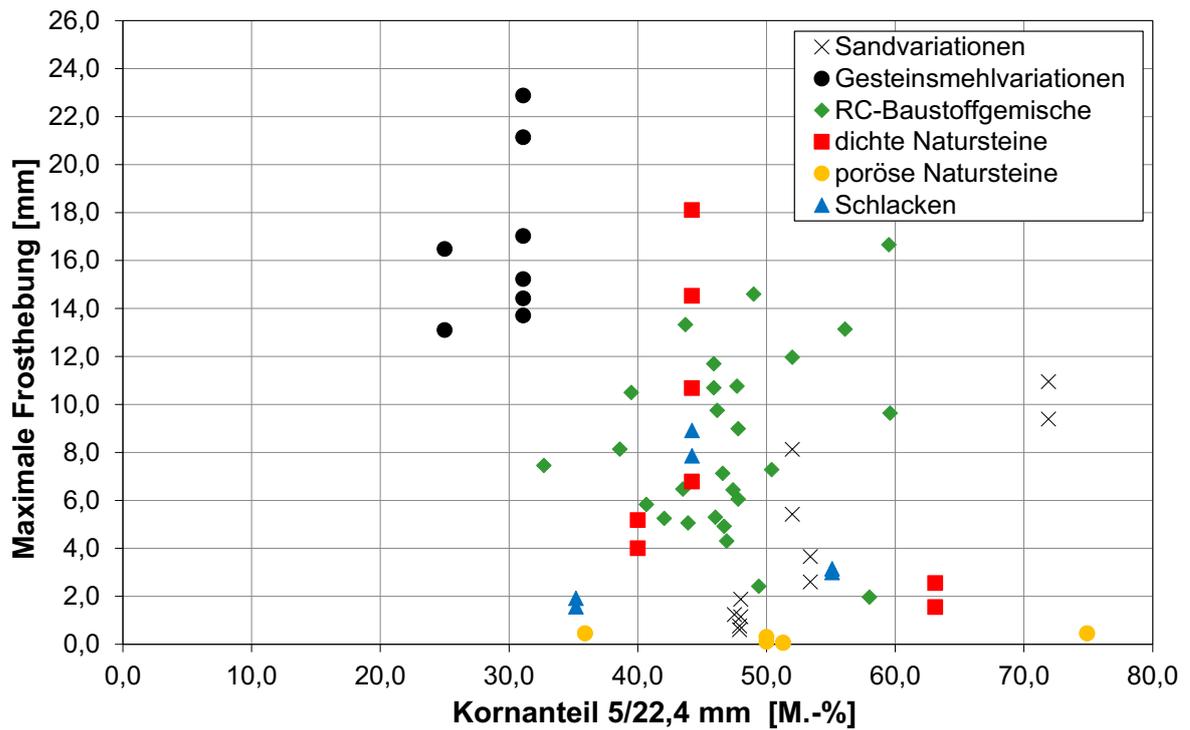


Abbildung 138: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Kornanteil 5/22,4 mm

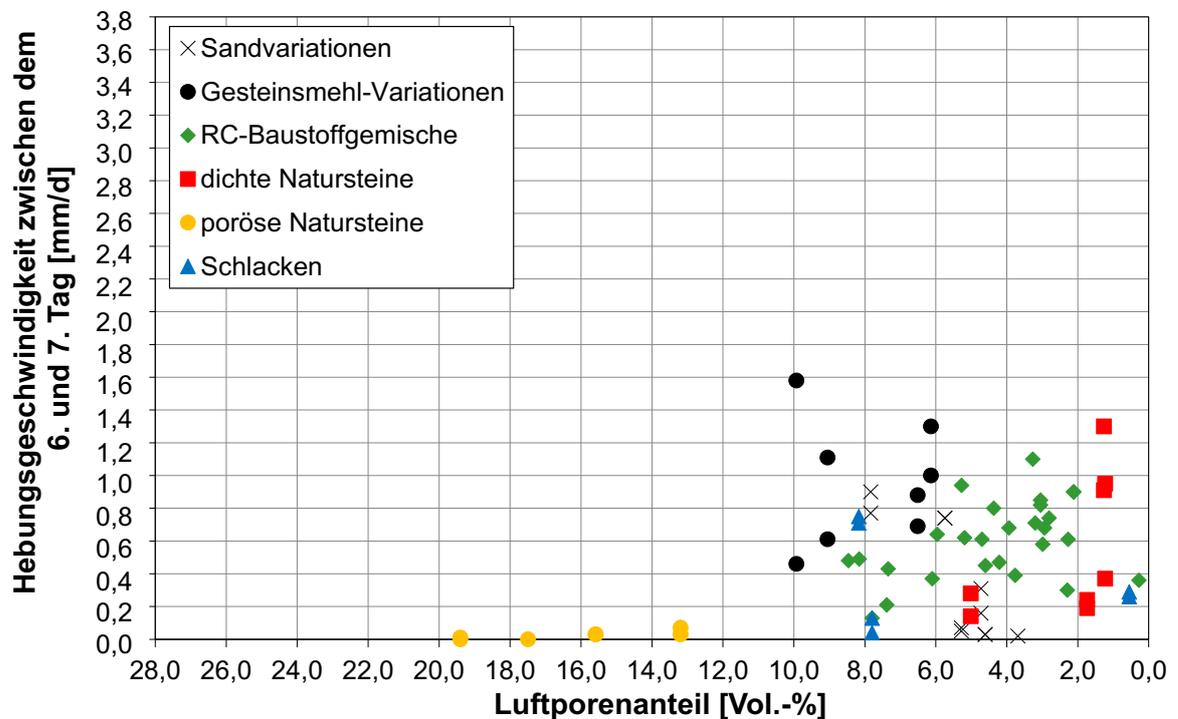


Abbildung 139: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und Luftporenanteil

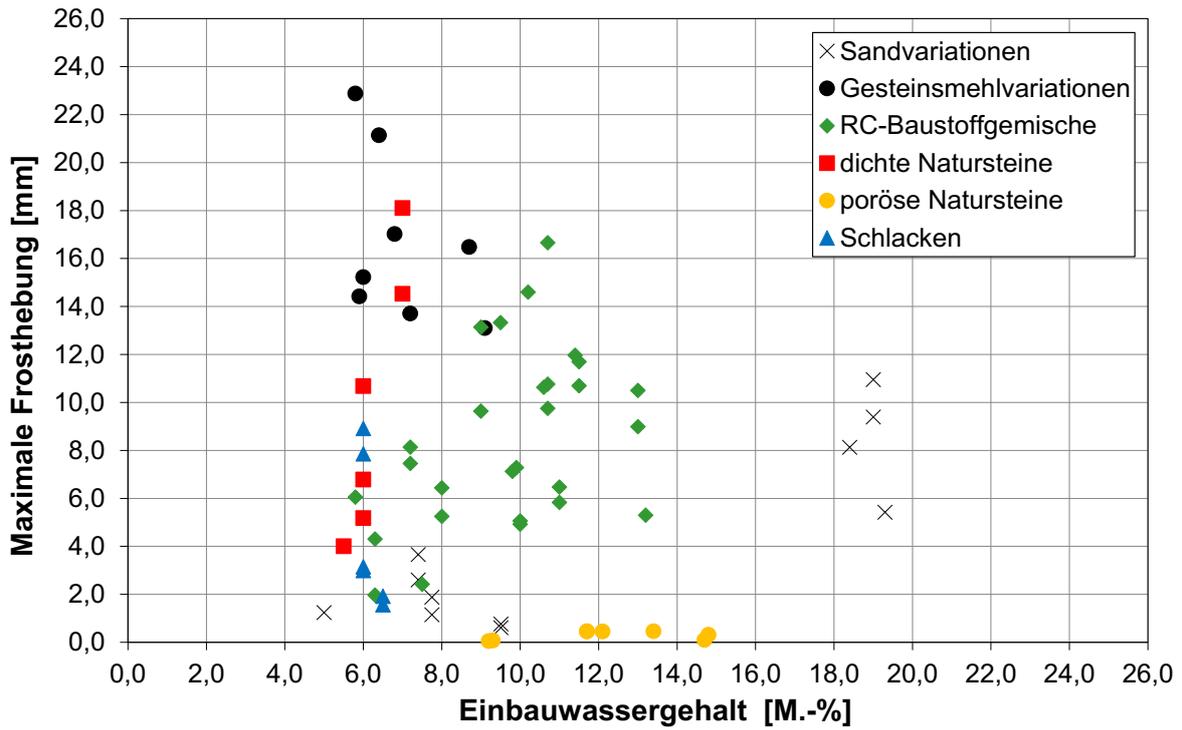


Abbildung 140: Gegenüberstellung von maximaler Frosthebung und Einbauwassergehalt

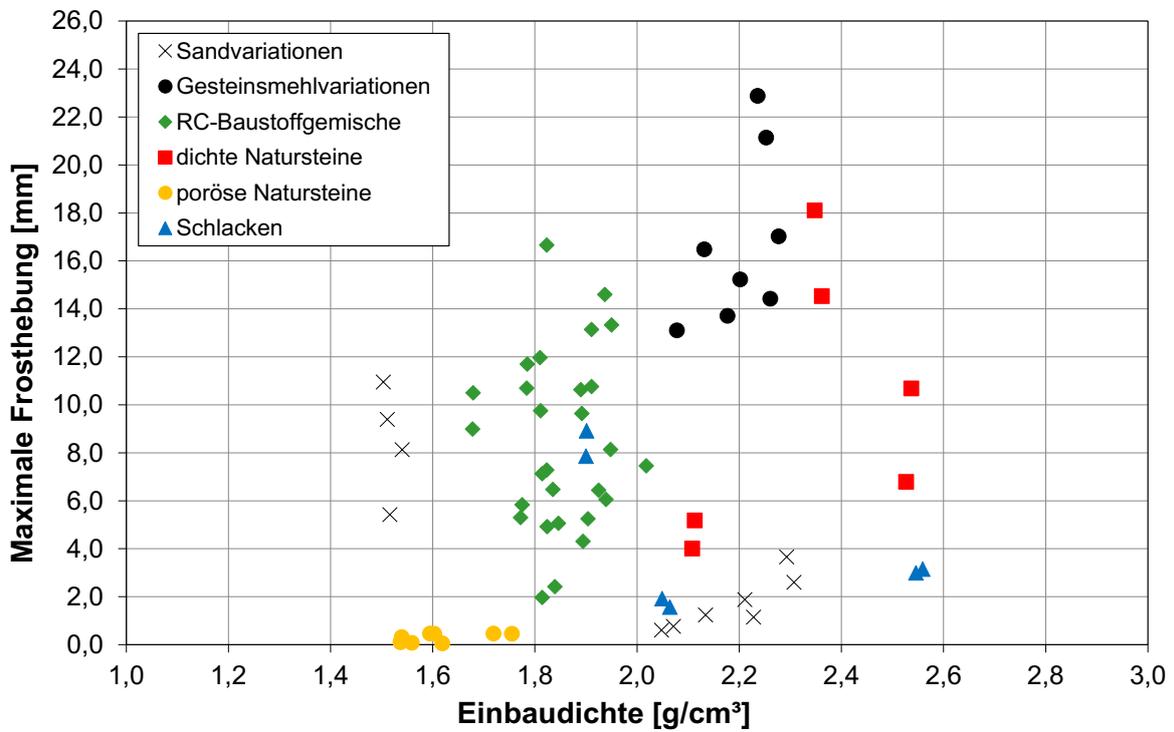


Abbildung 141: Gegenüberstellung von maximaler Frosthebung und Einbaudichte

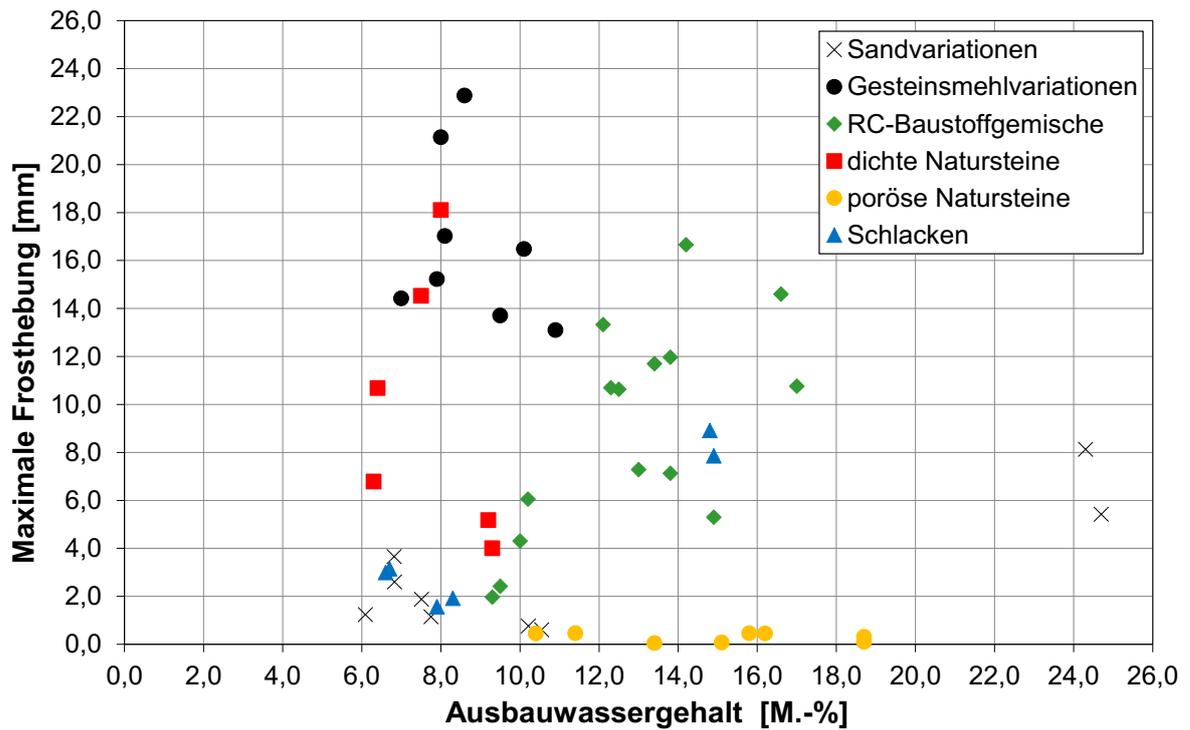


Abbildung 142: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Ausbawassergehalt

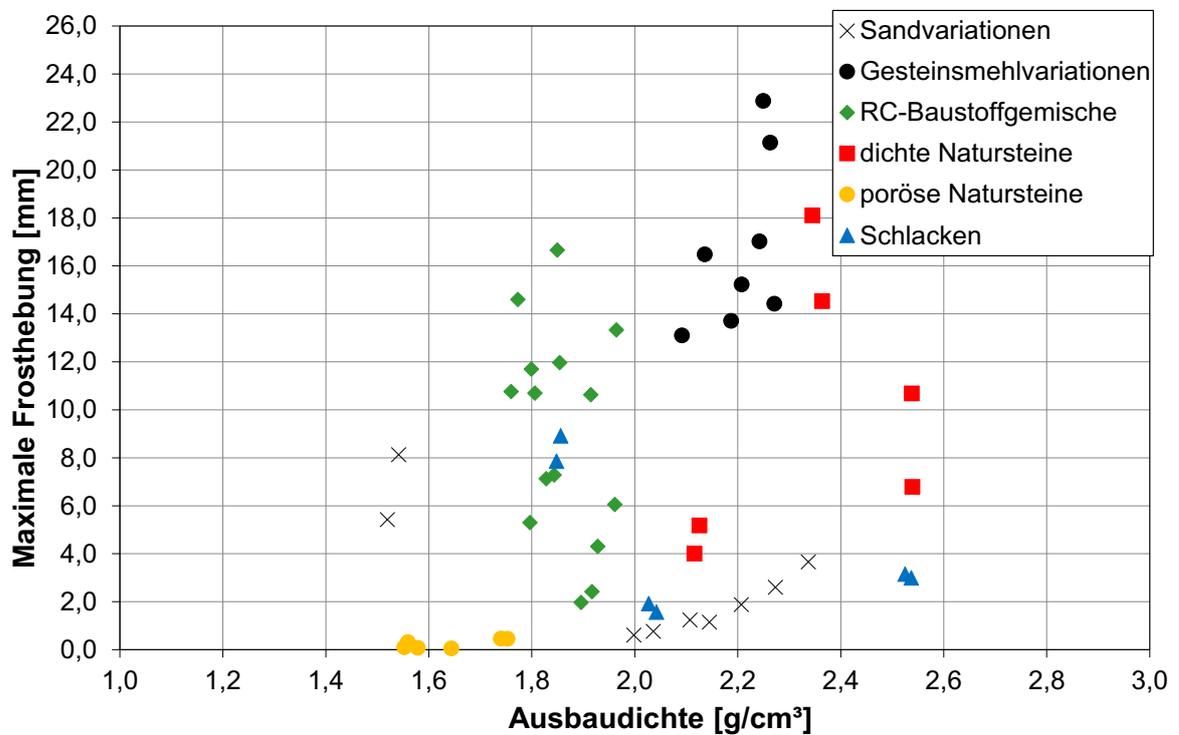


Abbildung 143: Gegenüberstellung von maximaler Frosthebung und Ausbaudichte

Anhang C - Einflussfaktor Porosität

Porenraumverteilungen

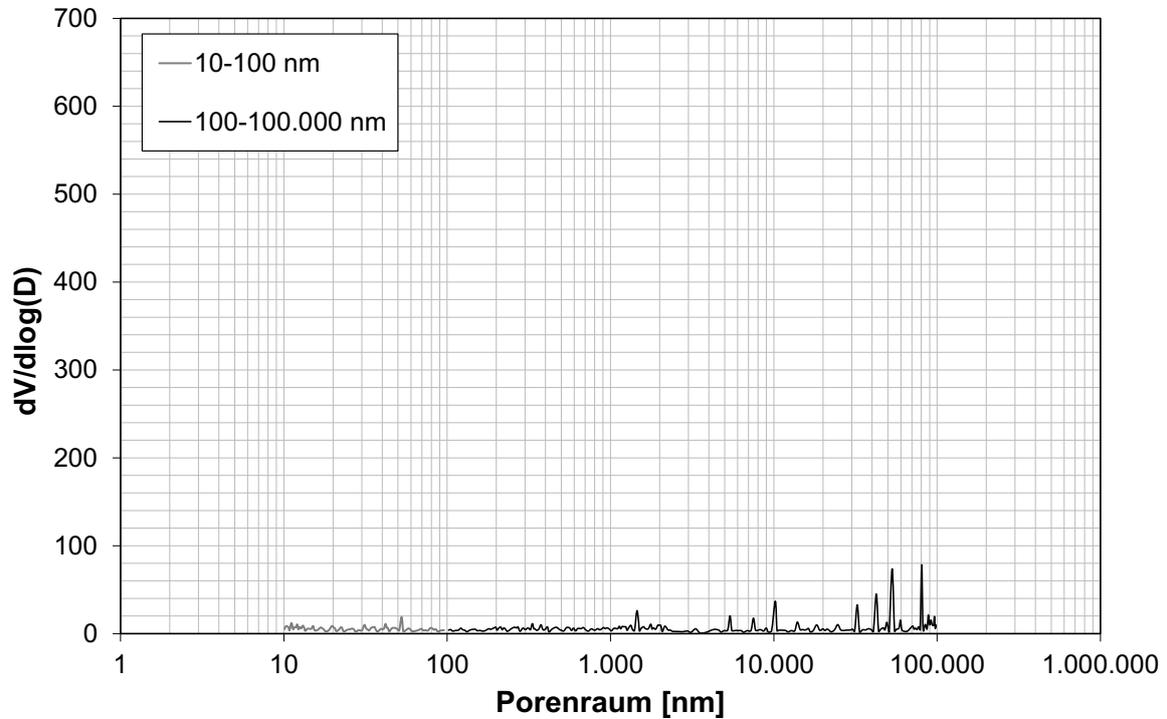


Abbildung 144: Porenraumverteilung von Diabas (Probe 1)

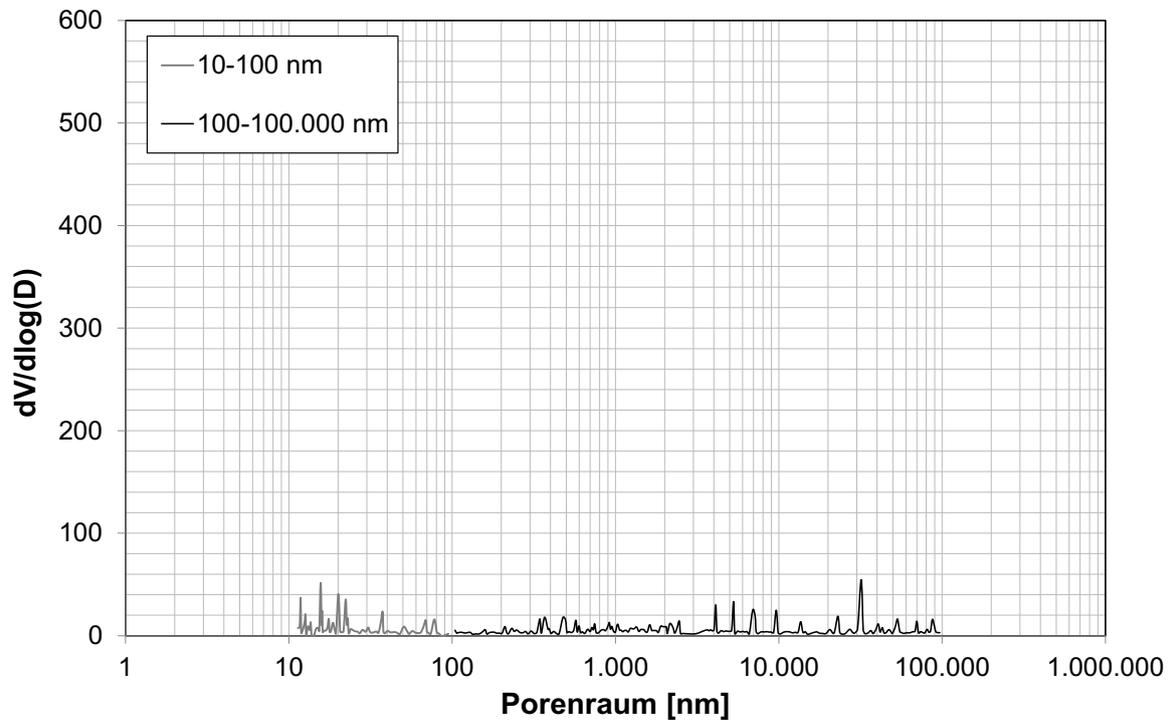


Abbildung 145: Porenraumverteilung von Diabas (Probe 2)

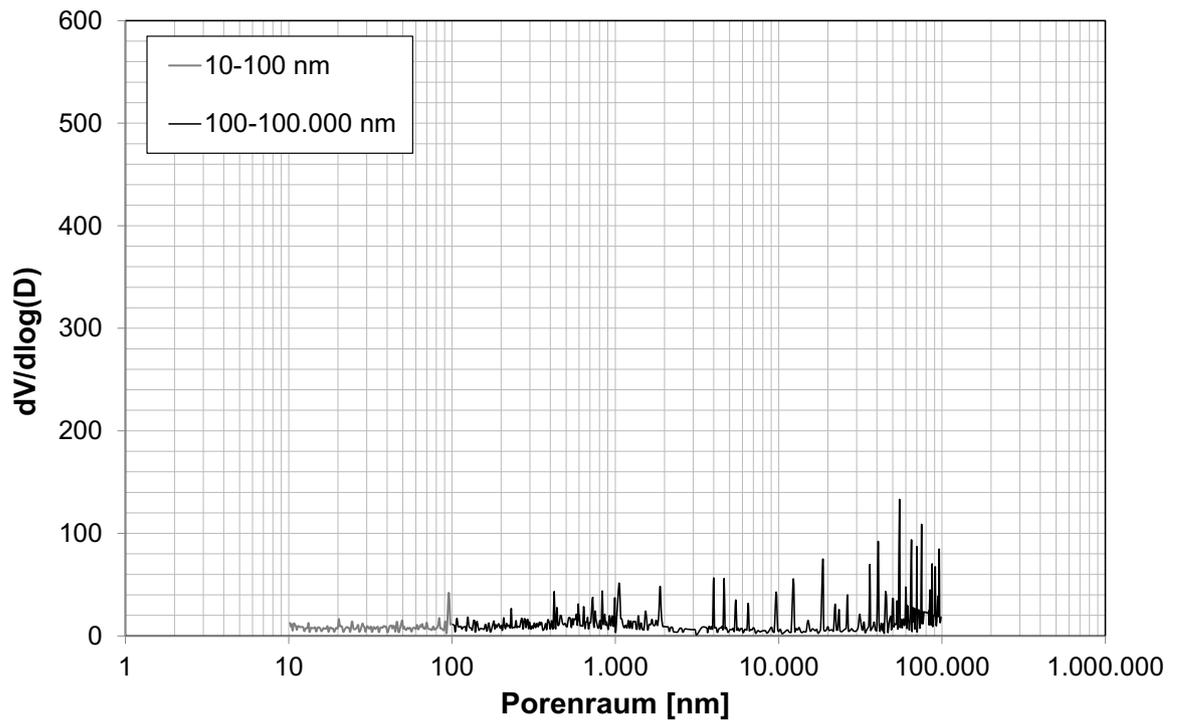


Abbildung 146: Porenraumverteilung von Basaltlava A (poröse Anteile, Probe 1)

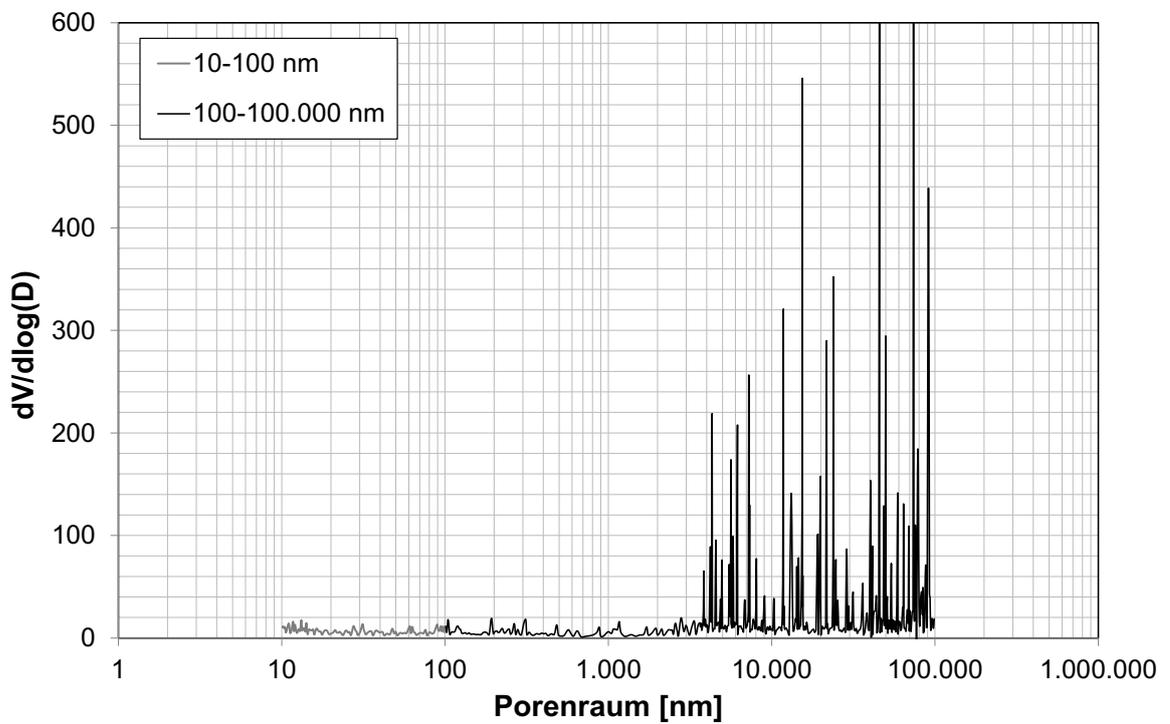


Abbildung 147: Porenraumverteilung von Basaltlava A (poröse Anteile, Probe 2)

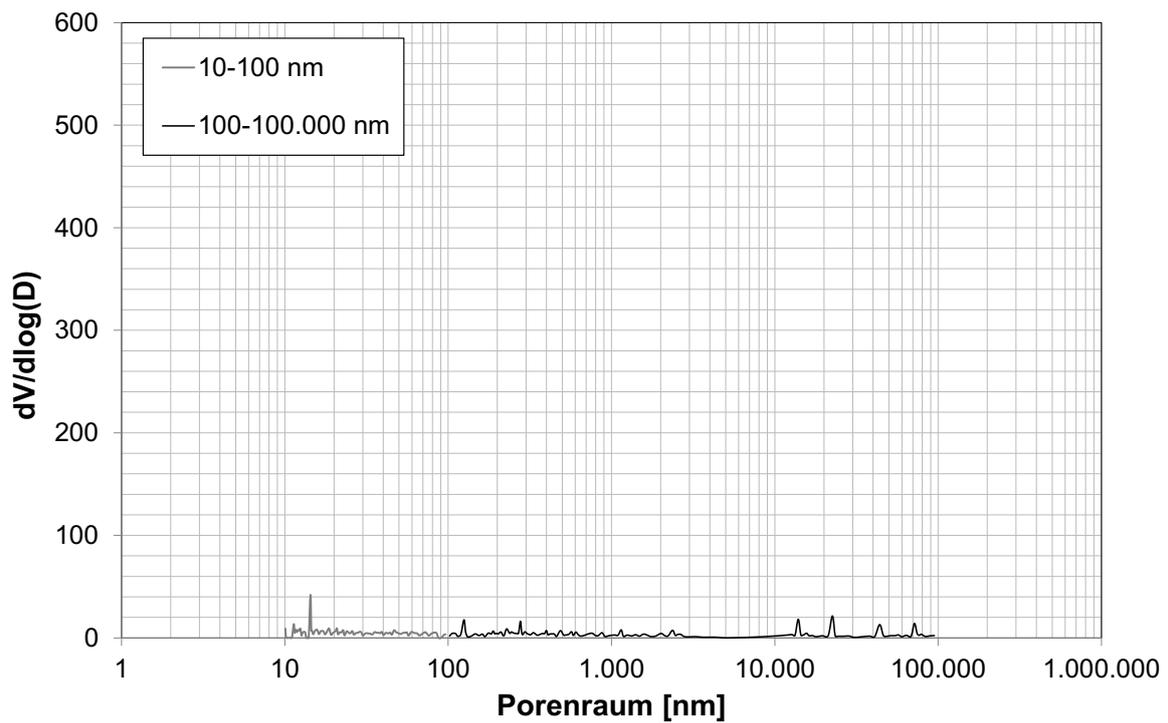


Abbildung 148: Porenraumverteilung von Basaltlava A (dichte Anteile, Probe 2)

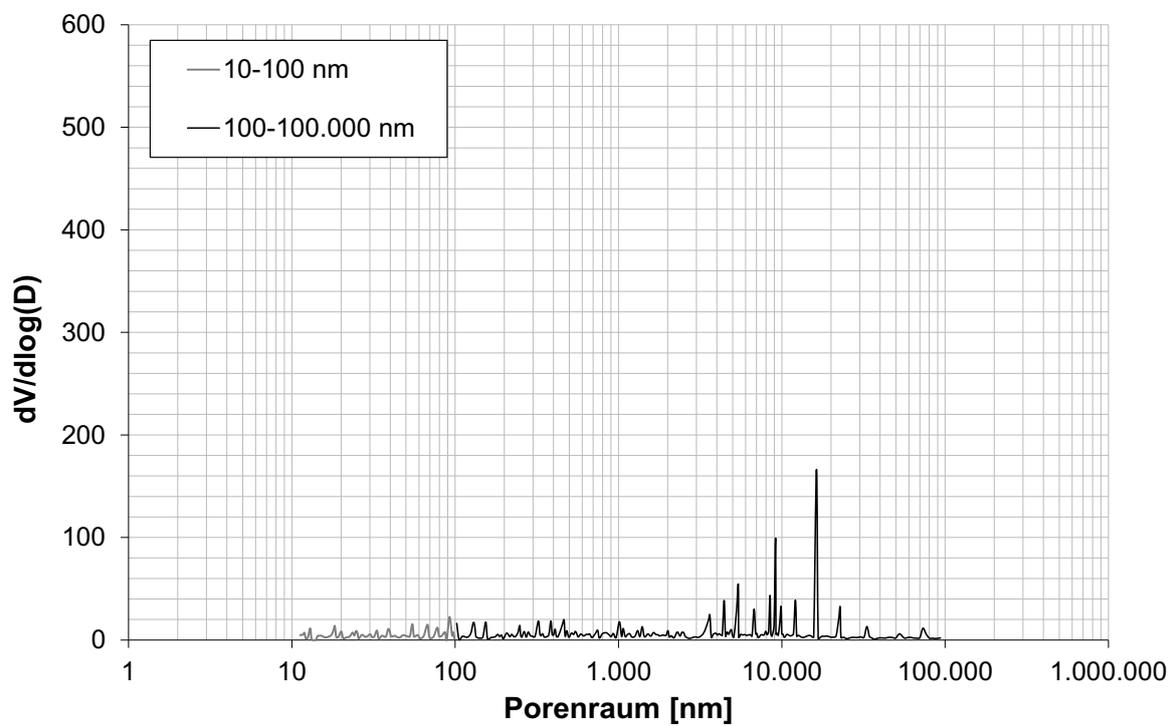


Abbildung 149: Porenraumverteilung von Basaltlava A (dichte Anteile, Probe 3)

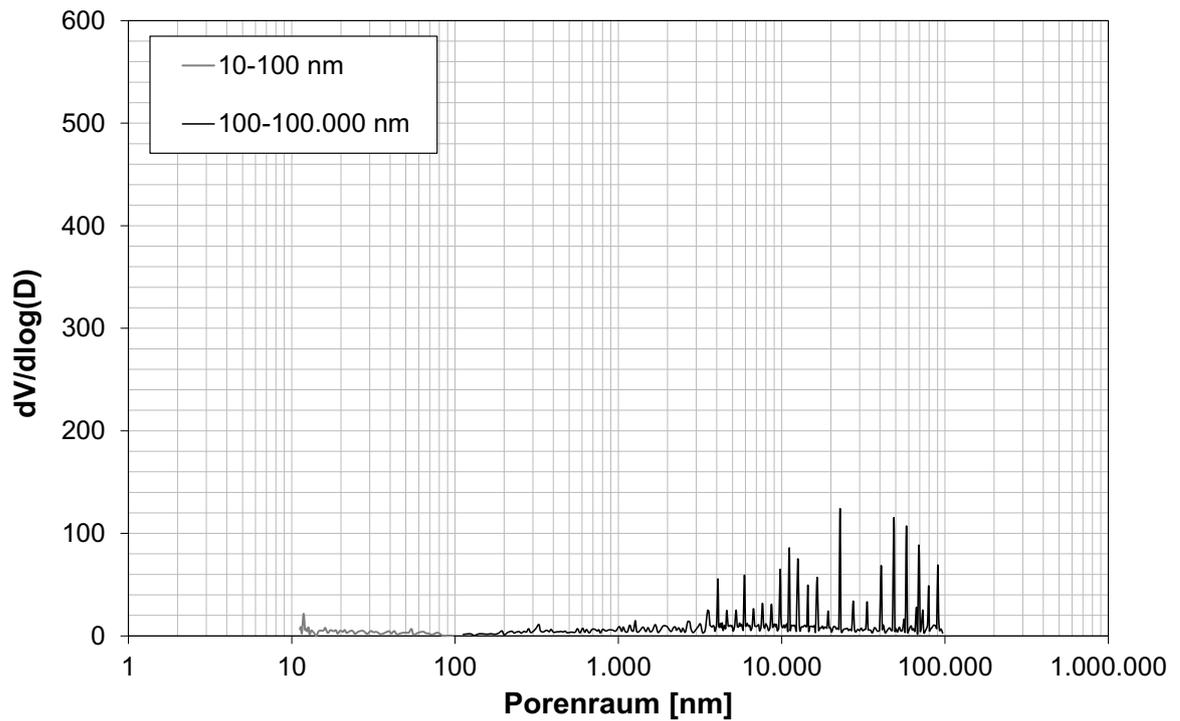


Abbildung 150: Porenraumverteilung von Basaltlava B (Probe 1)

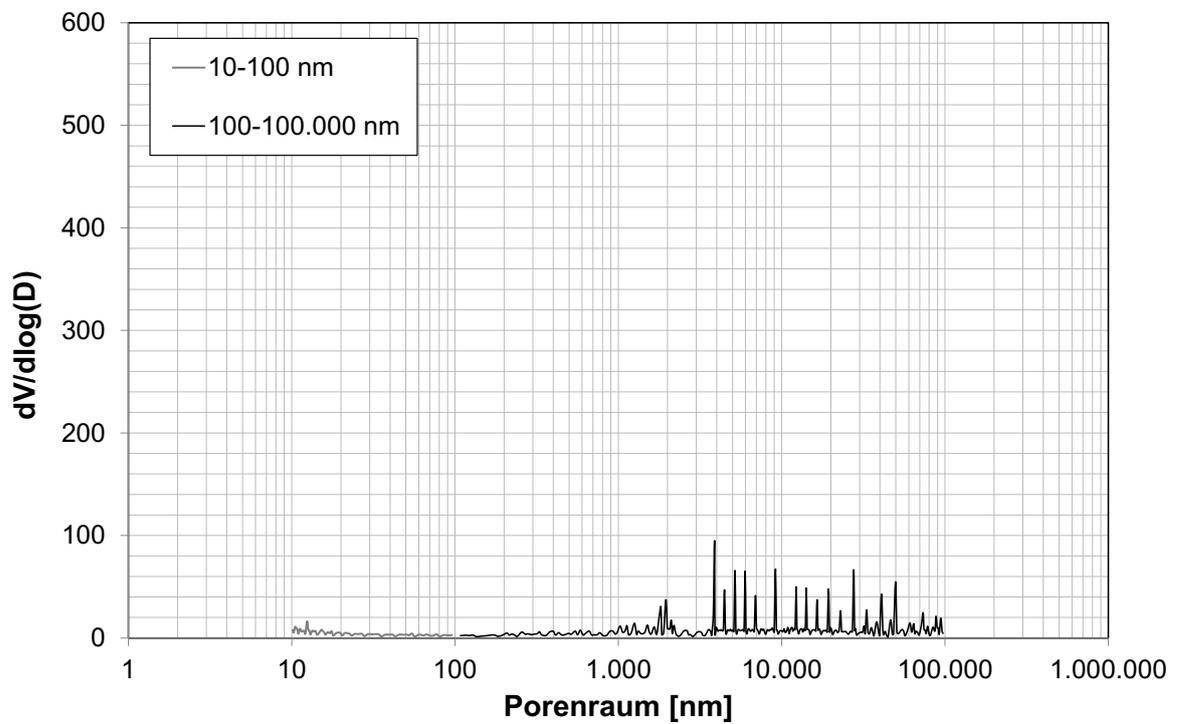


Abbildung 151: Porenraumverteilung von Basaltlava B (Probe 2)

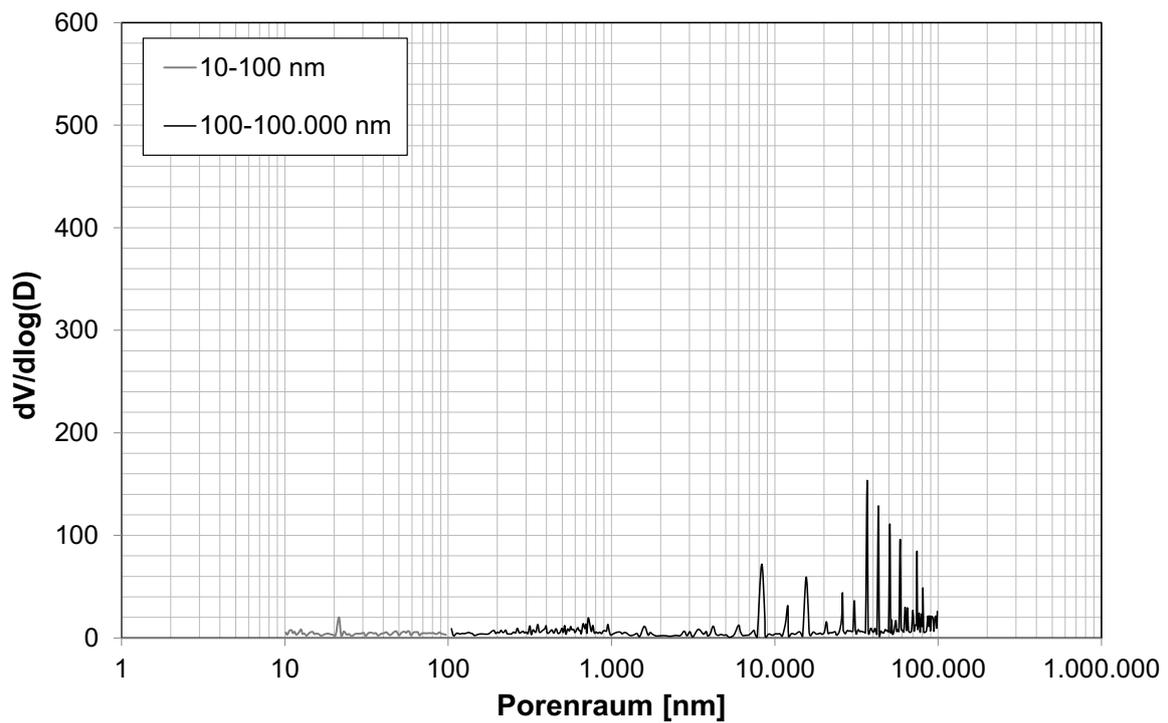


Abbildung 152: Porenraumverteilung von Basaltlava B (Probe 3)

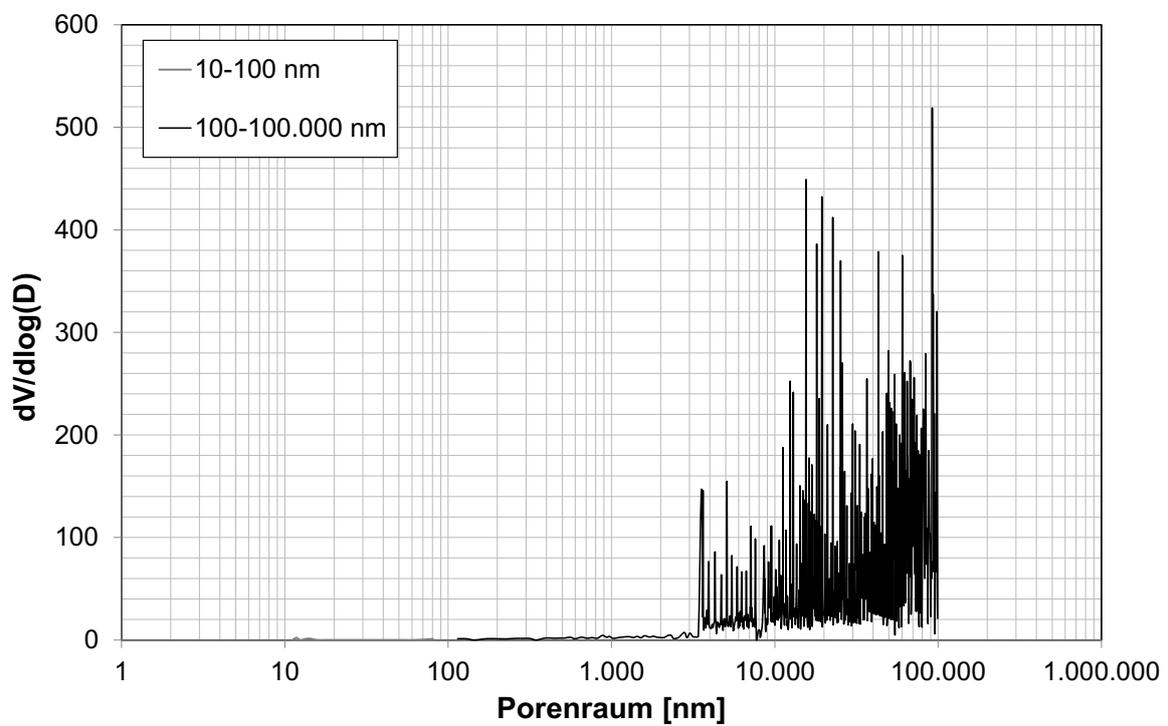


Abbildung 153: Porenraumverteilung von Lavaschlacke (Probe 1)

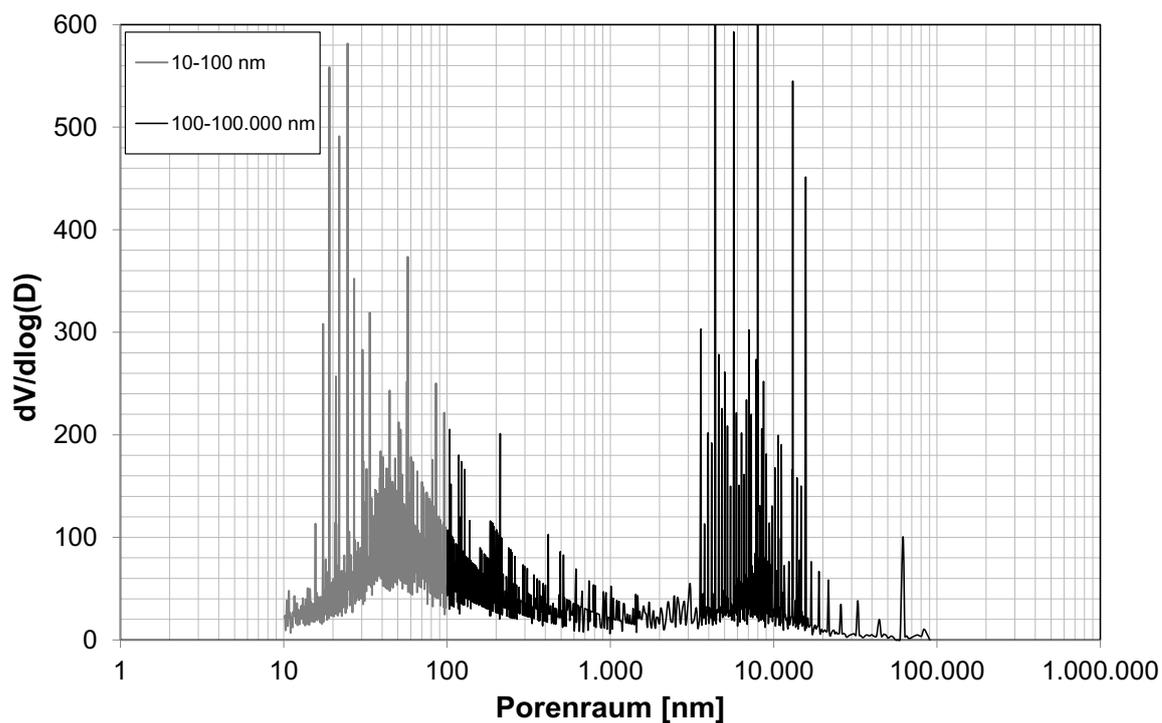


Abbildung 154: Porenraumverteilung von RC-Kalksandstein B (Probe 1)

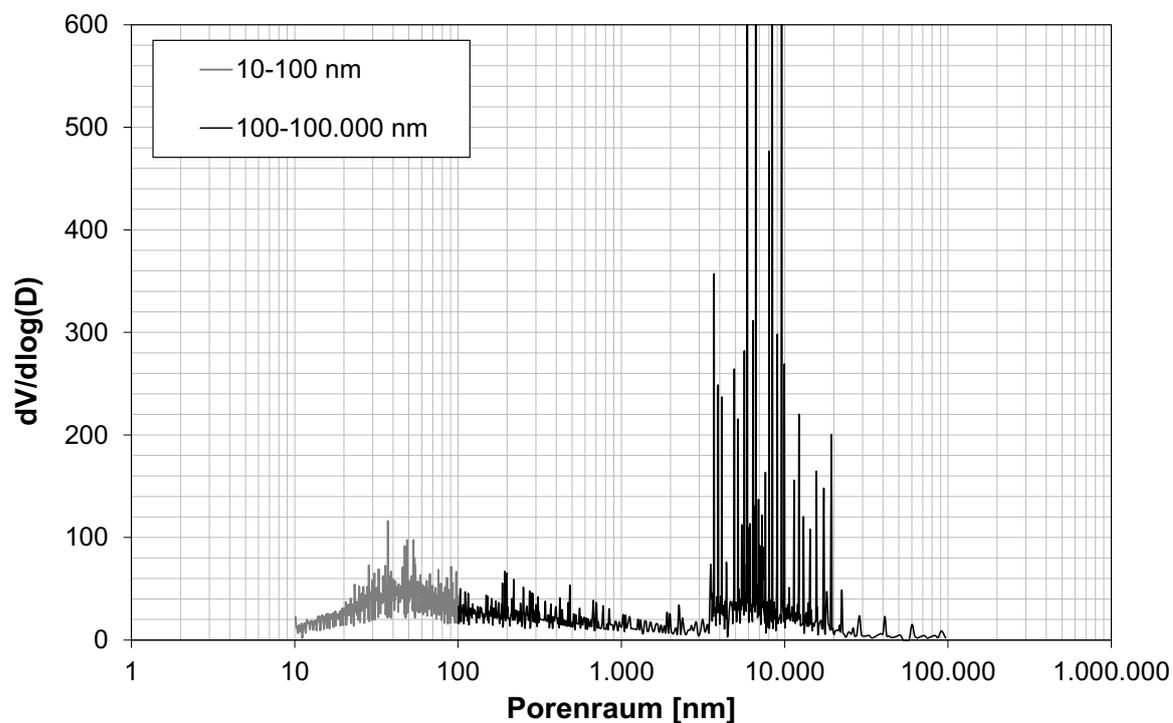


Abbildung 155: Porenraumverteilung von RC-Kalksandstein B (Probe 2)

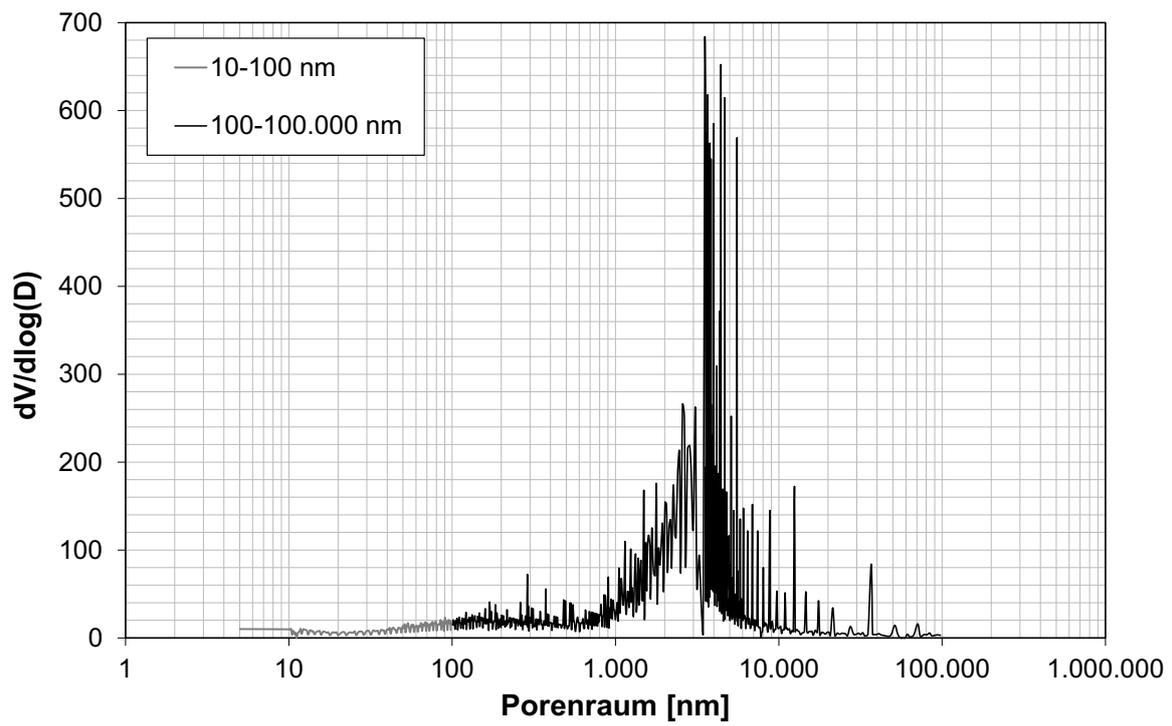


Abbildung 156: Porenraumverteilung von RC-Ziegel (Probe 1)

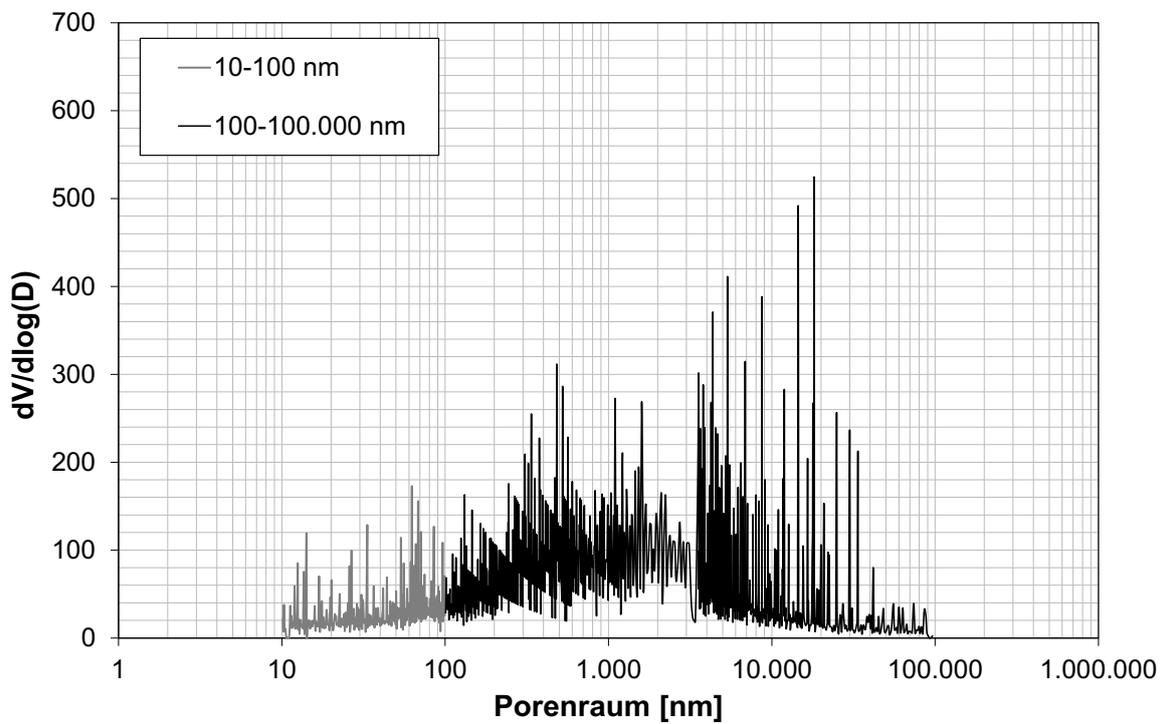


Abbildung 157: Porenraumverteilung von RC-Ziegel (Probe 2)

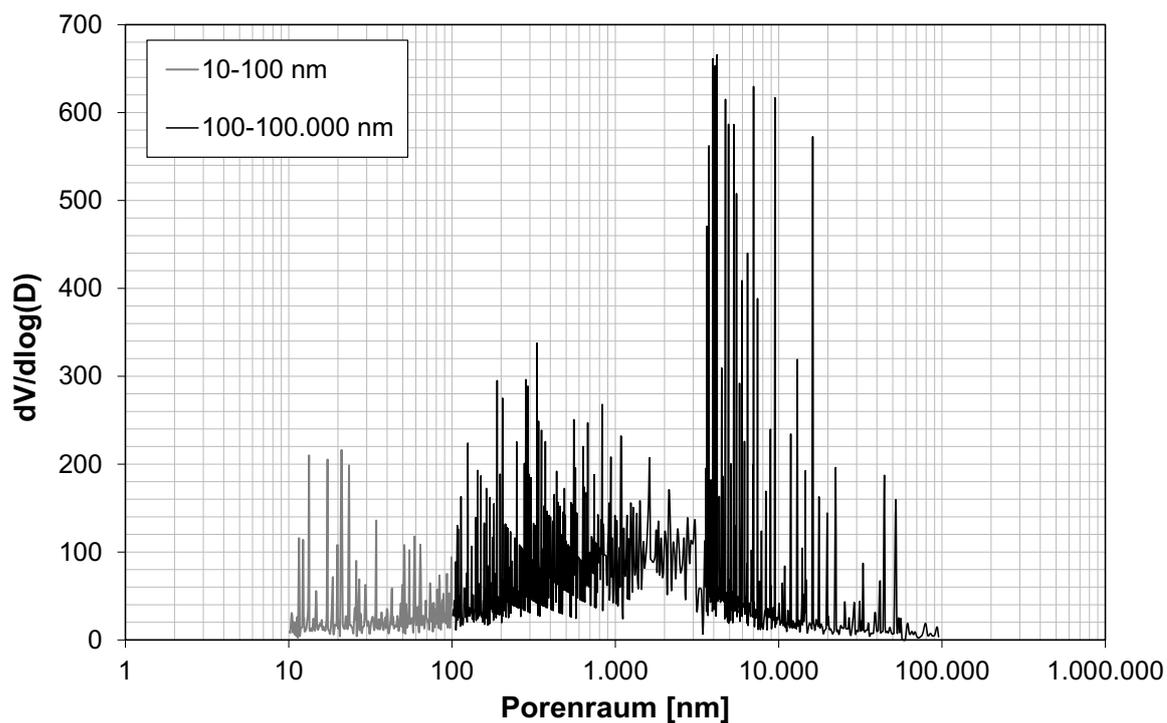


Abbildung 158: Porenraumverteilung von RC-Ziegel (Probe 3)

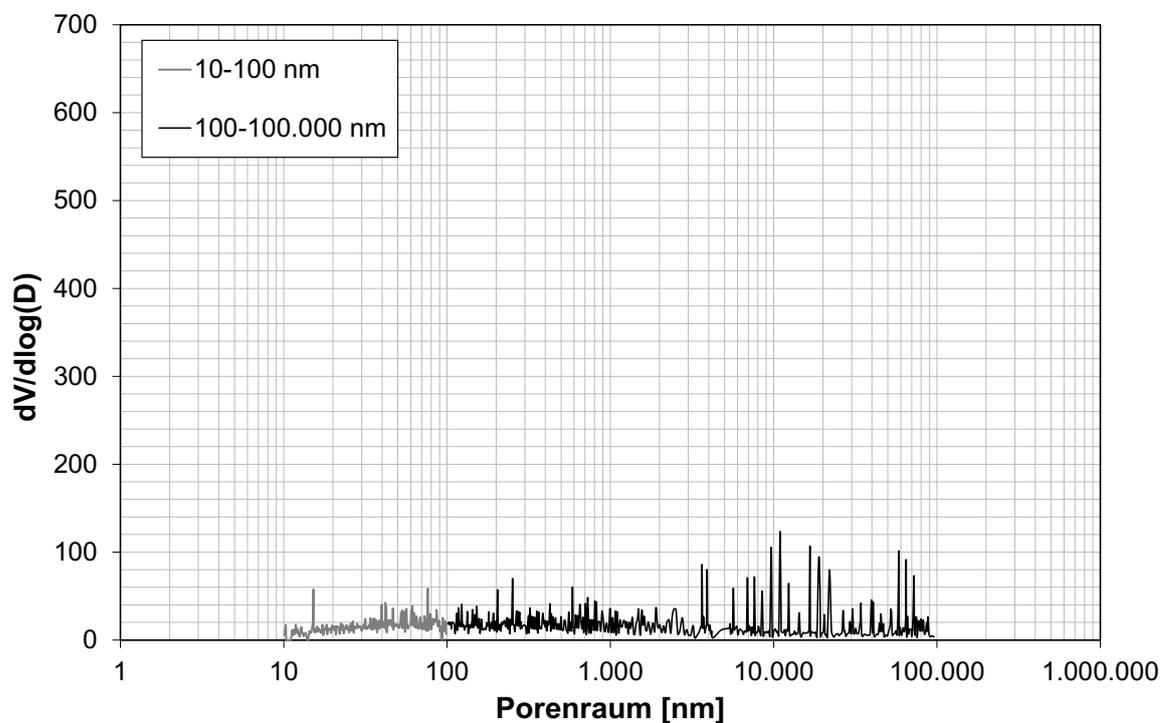


Abbildung 159: Porenraumverteilung von Hochofenschlacke (Probe 2)

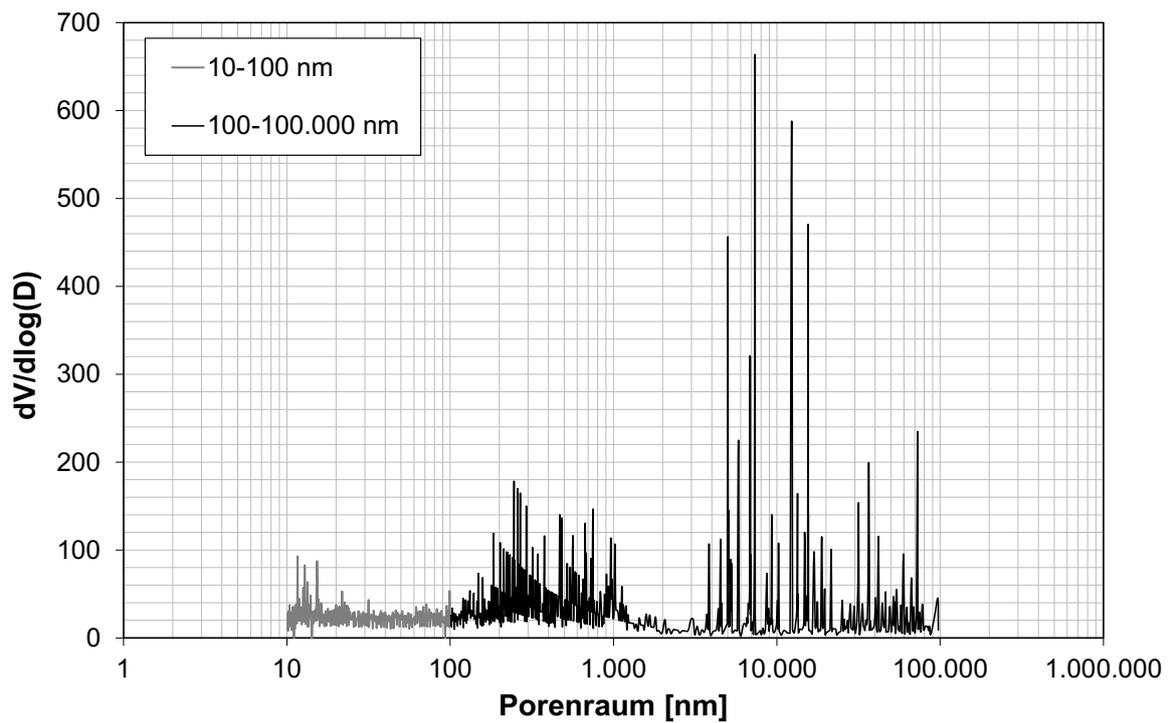


Abbildung 160: Porenraumverteilung von Hochofenschlacke (Probe 3)

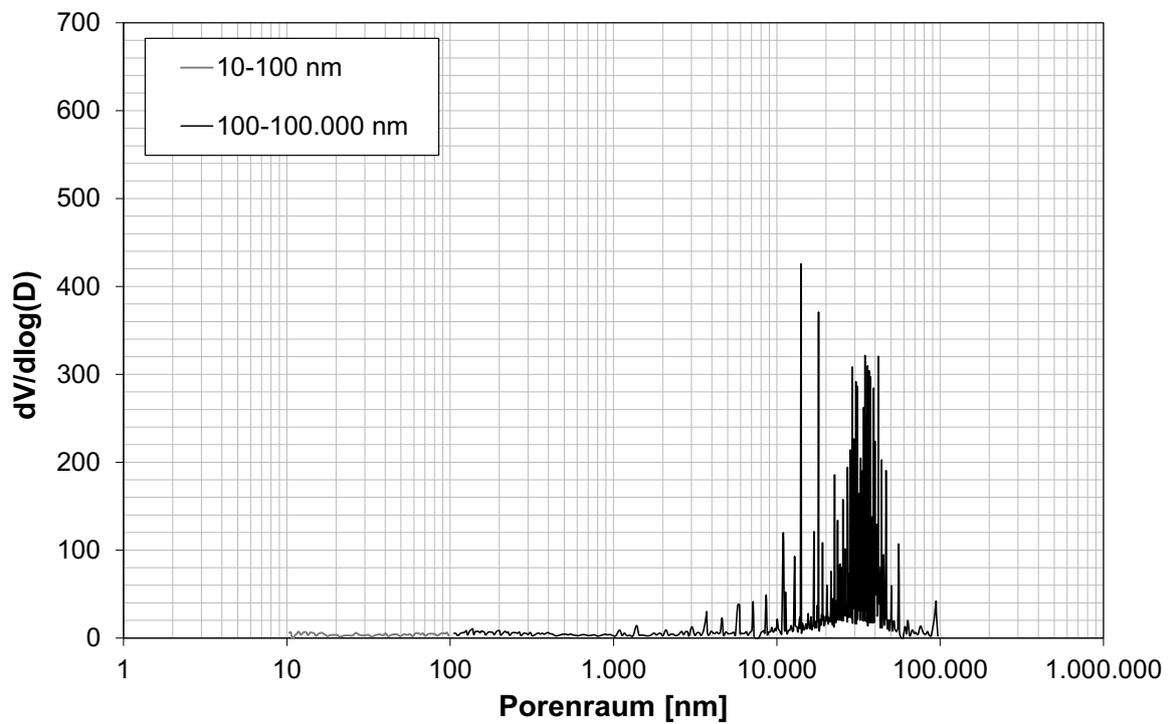


Abbildung 161: Porenraumverteilung von LD-Schlacke (Probe 1)

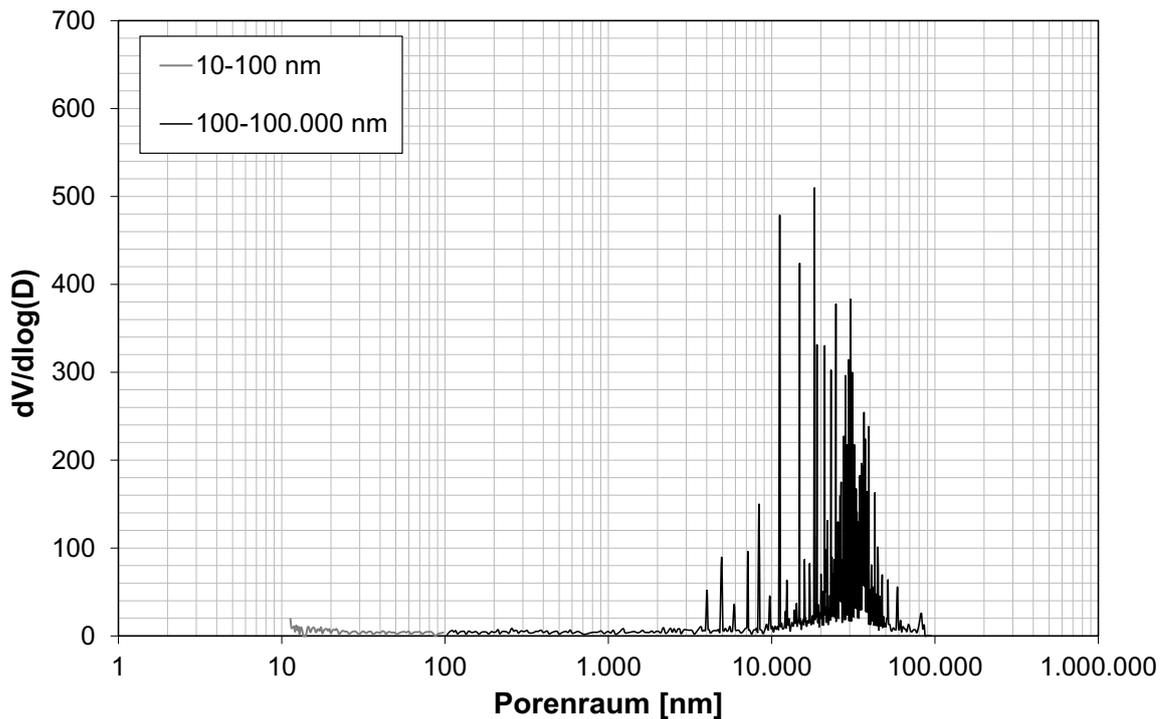


Abbildung 162: Porenraumverteilung von LD-Schlacke (Probe 2)

Kornzusammensetzung der Materialgemische

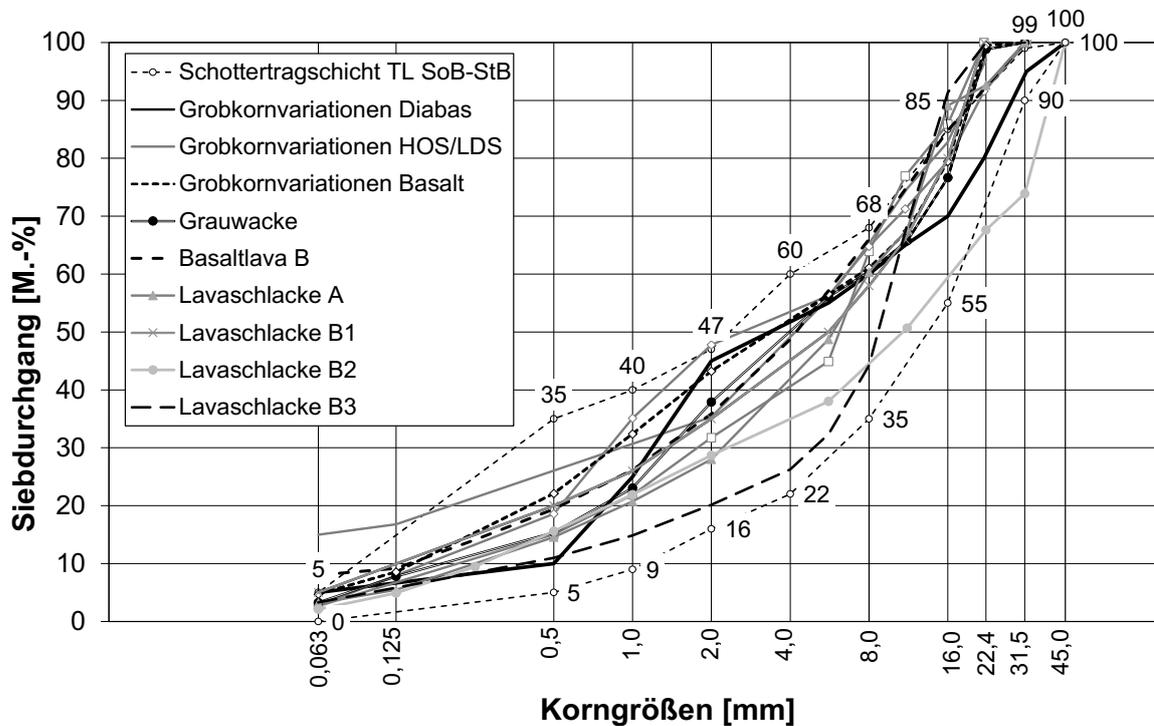


Abbildung 163: Kornverteilungen der Materialien für den Einflussfaktor Porosität (natürliche Materialien)

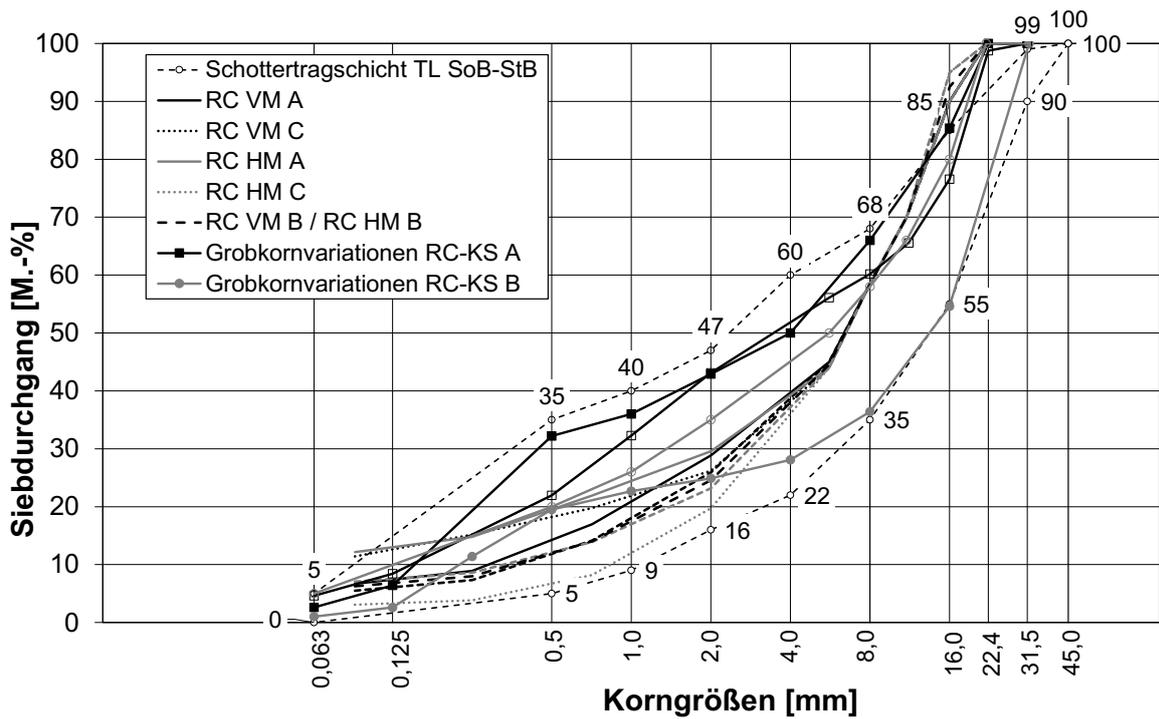


Abbildung 164: Kornverteilungen der Materialien für den Einflussfaktor Porosität (Recycling-Materialien)

Ausgewählte Gegenüberstellungen der Materialkennwerten und Frosthebungskenndaten

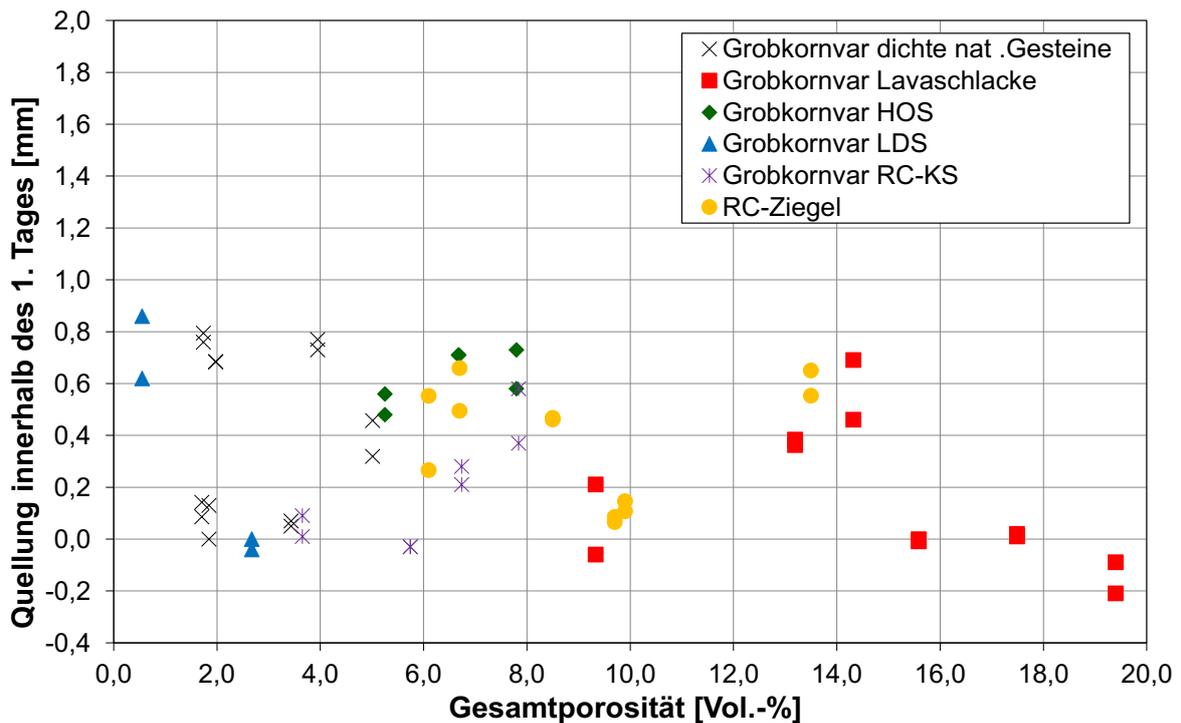


Abbildung 165: Gegenüberstellung Quellung innerhalb des 1. Tages und Gesamtporosität

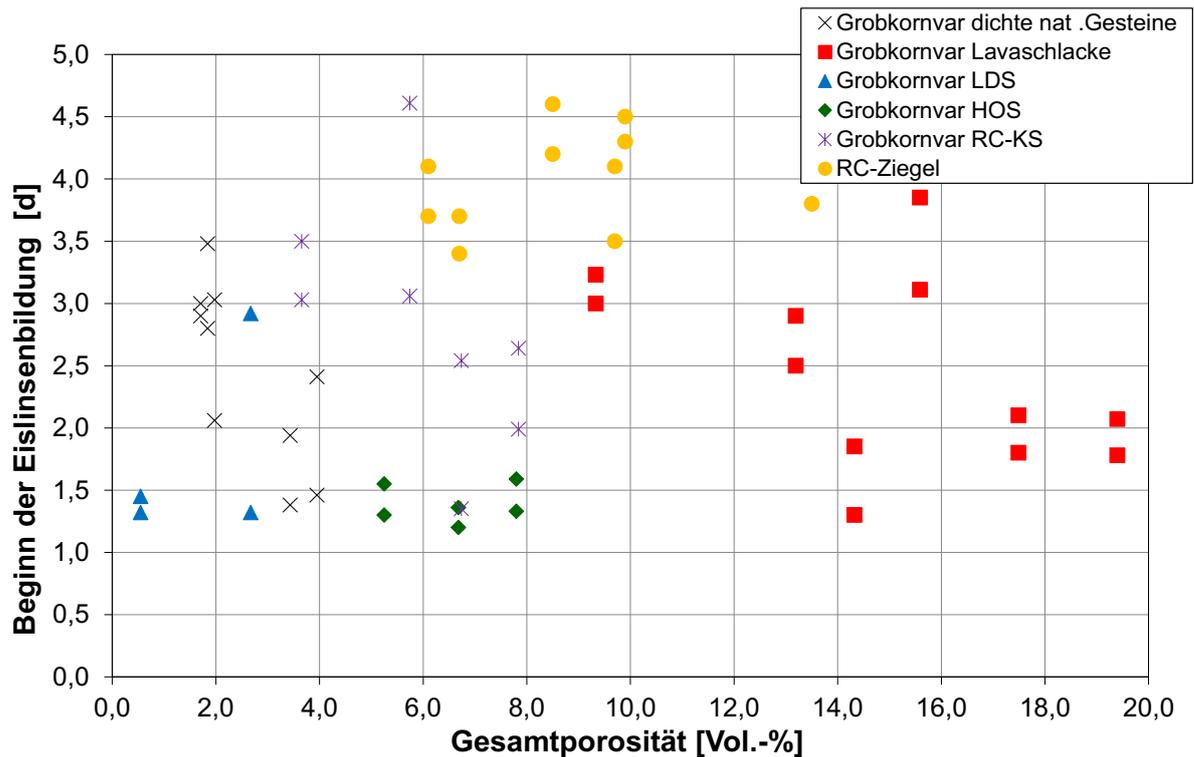


Abbildung 166: Gegenüberstellung Beginn der Eisinsensbildung und Gesamtporosität

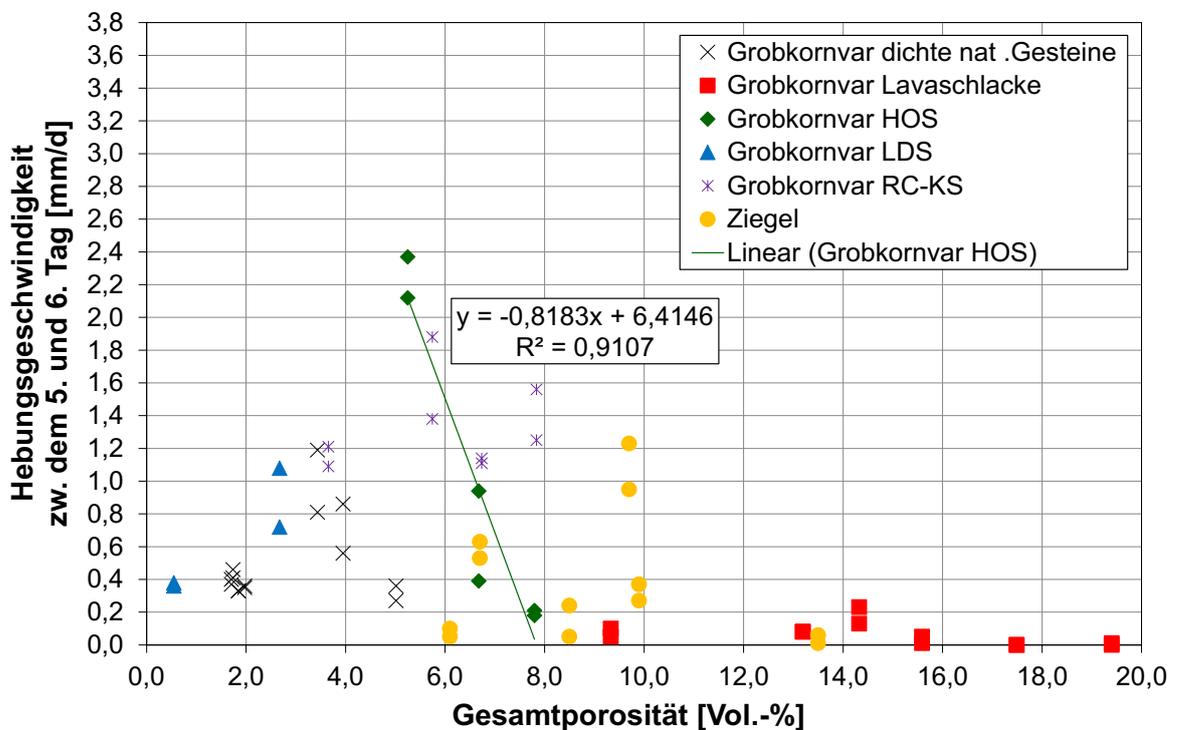


Abbildung 167: Gegenüberstellung Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 5. und 6. Tag und Gesamtporosität

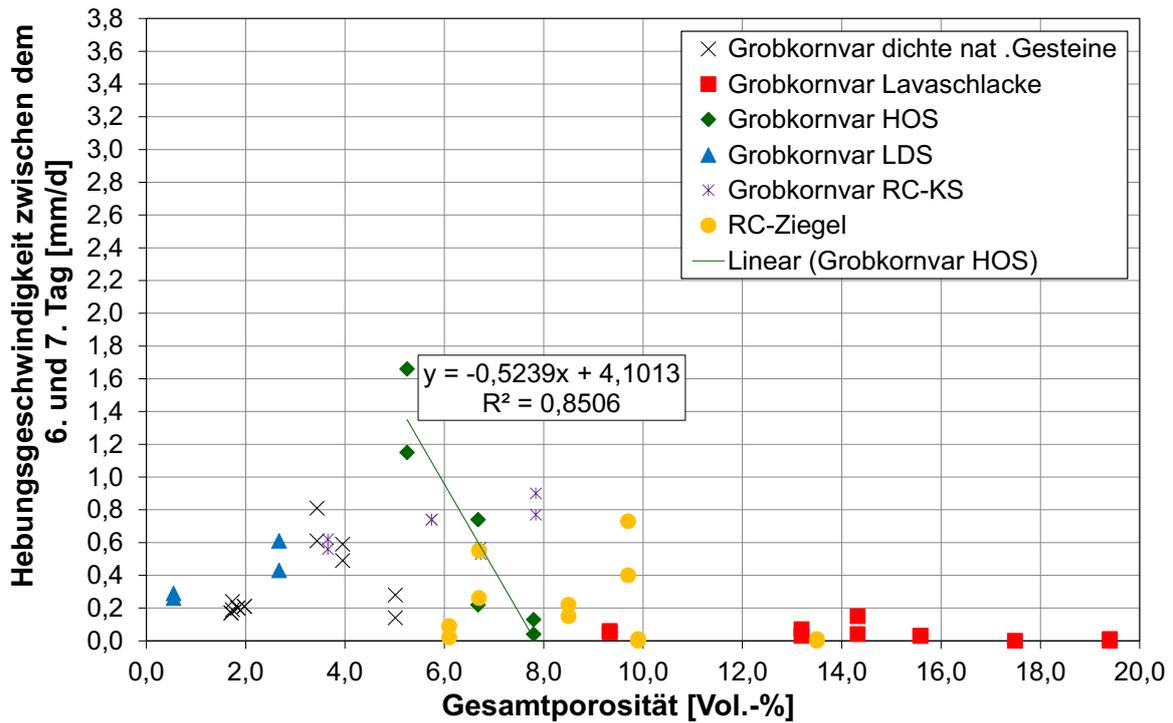


Abbildung 168: Gegenüberstellung Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und Gesamtporosität

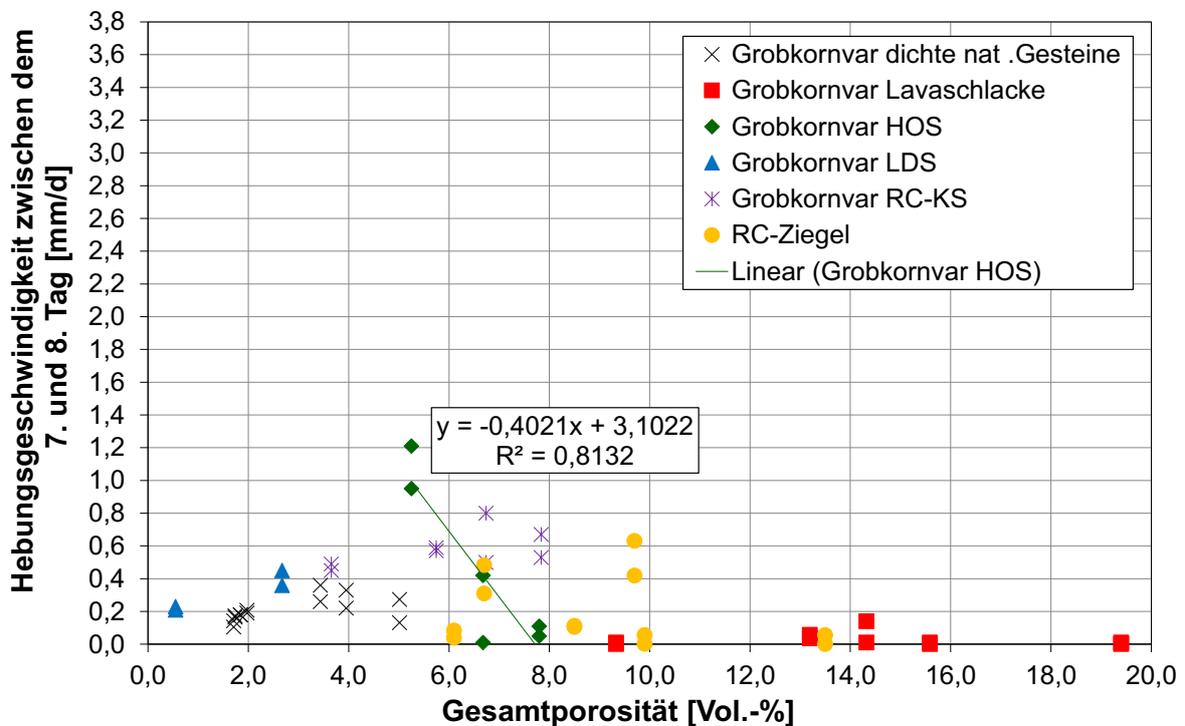


Abbildung 169: Gegenüberstellung Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag und Gesamtporosität

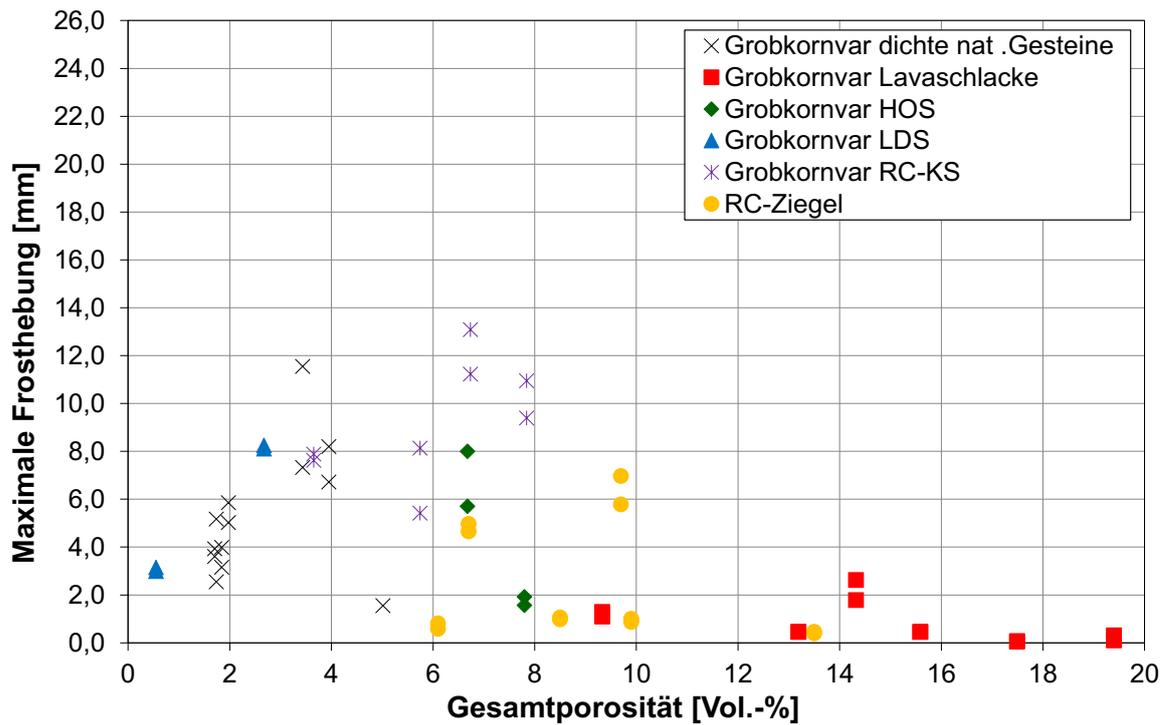


Abbildung 170: Gegenüberstellung Maximale Frosthebung und Gesamtporosität

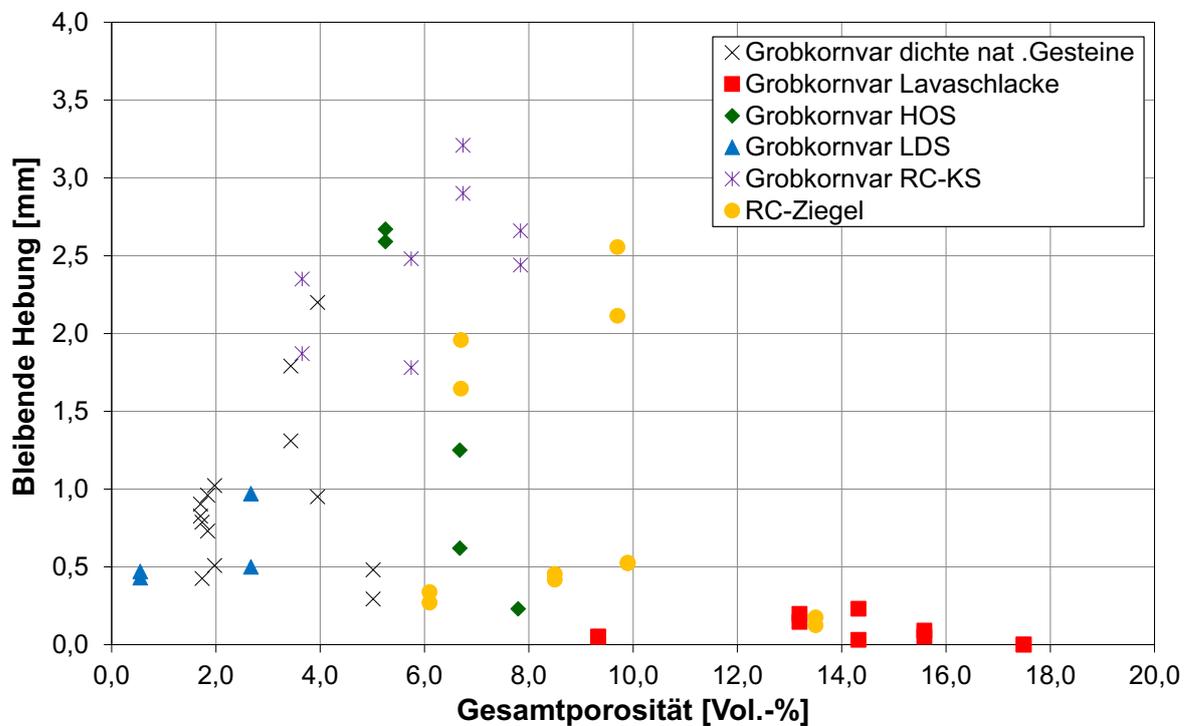


Abbildung 171: Gegenüberstellung Bleibender Hebung und Gesamtporosität

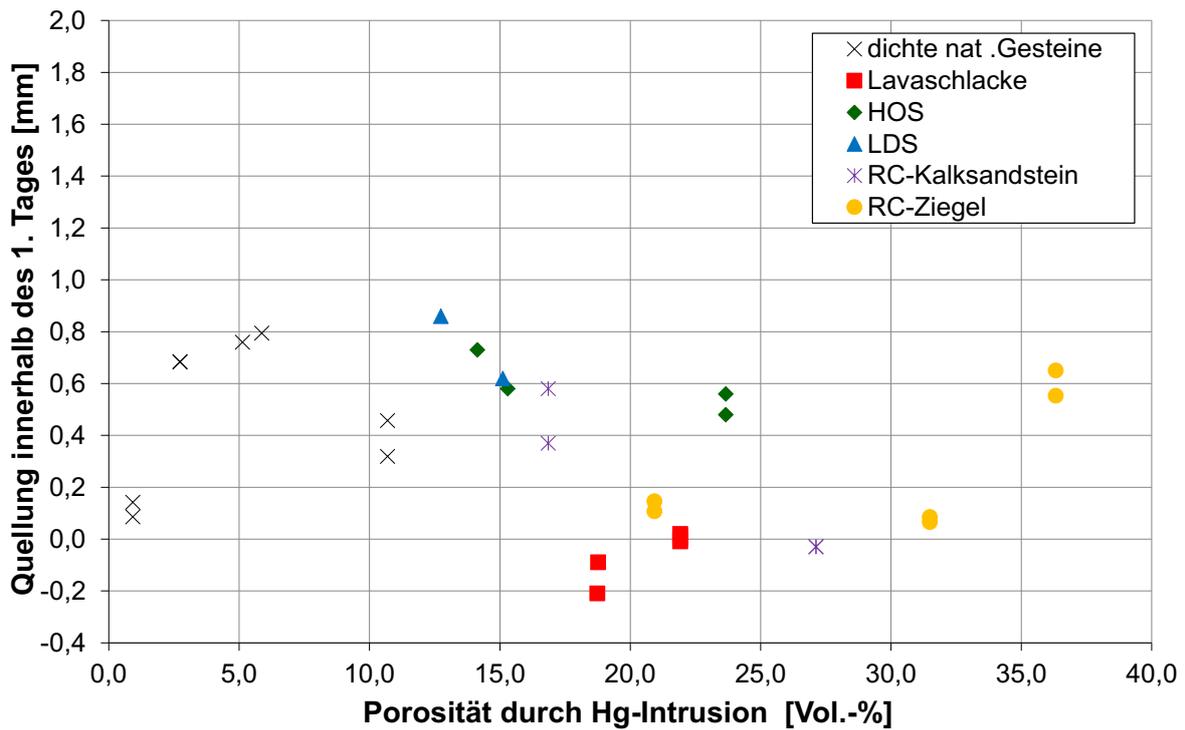


Abbildung 172: Gegenüberstellung von Quellung innerhalb des 1. Tages und Porosität aus Hg-Intrusion

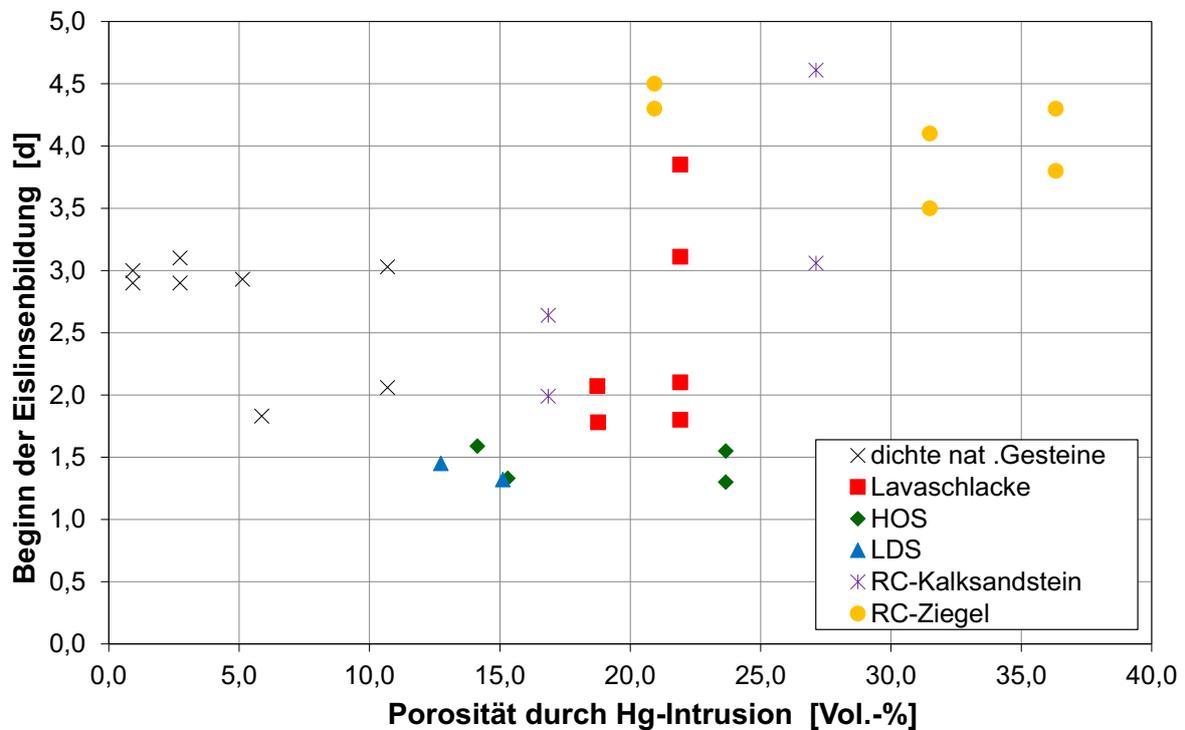


Abbildung 173: Gegenüberstellung von Beginn der Eislinnenbildung und Porosität aus Hg-Intrusion

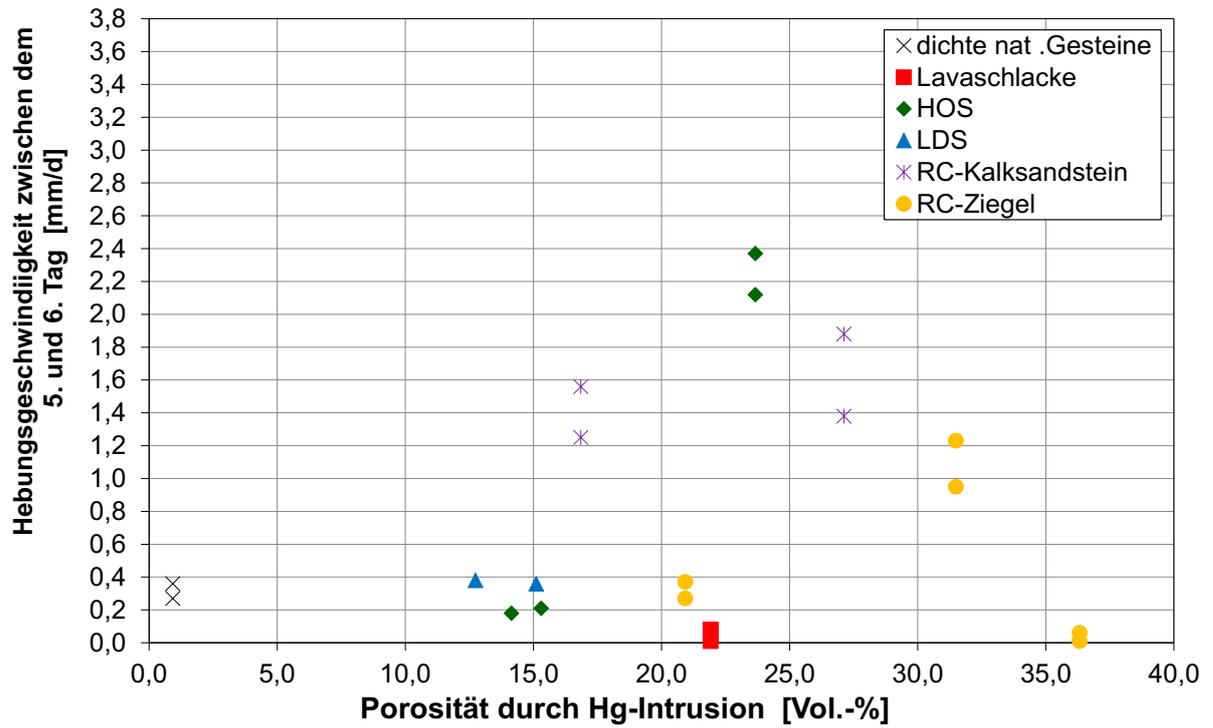


Abbildung 174: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zw. dem 5. und 6. Tag und Porosität aus Hg-Intrusion

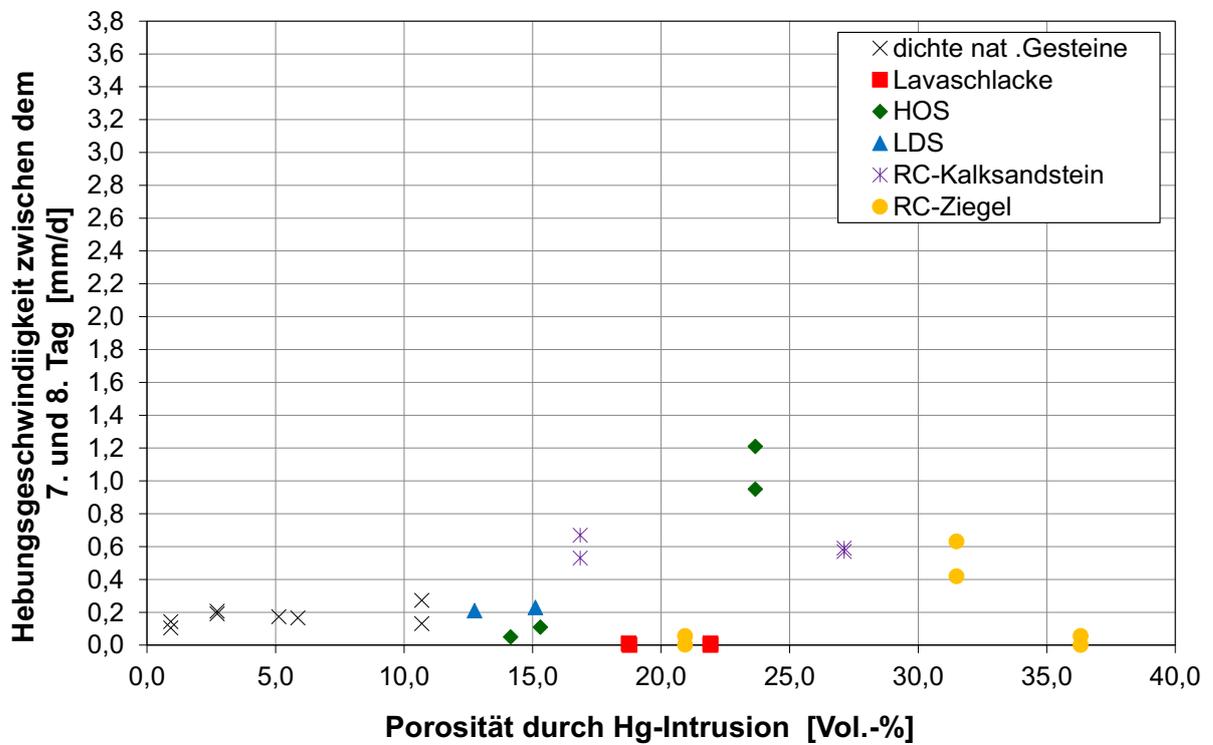


Abbildung 175: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zw. dem 7. und 8. Tag und Porosität aus Hg-Intrusion

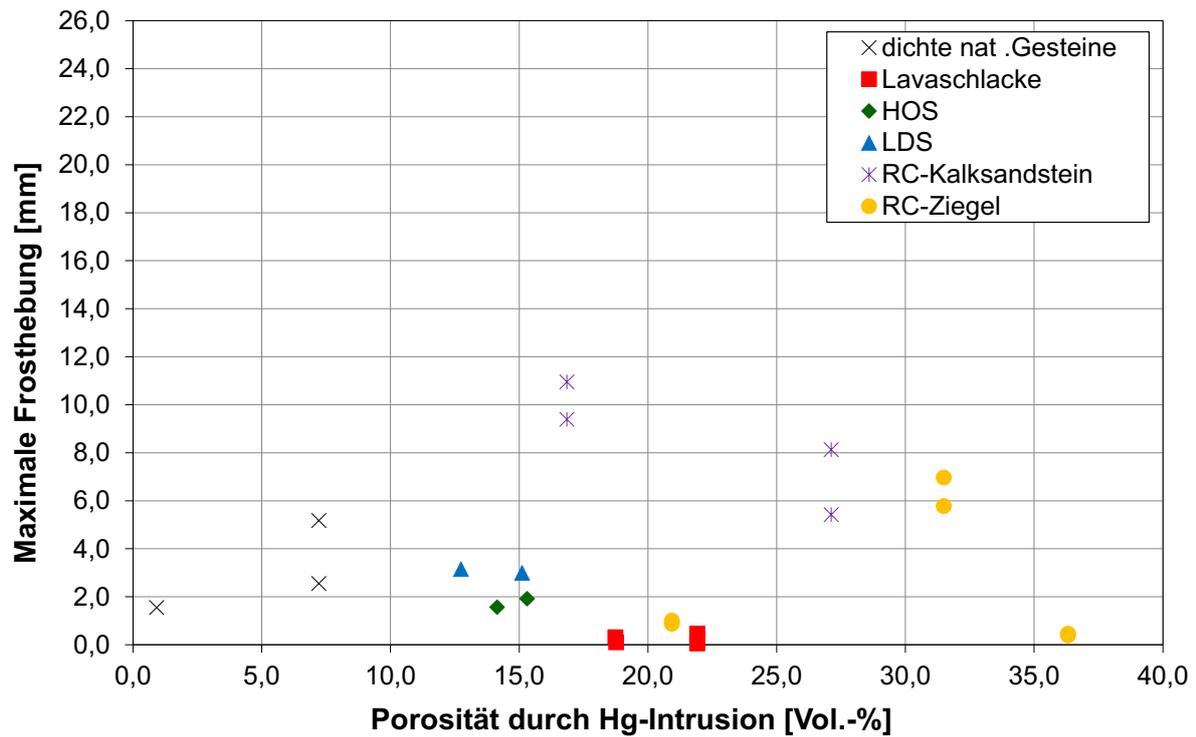


Abbildung 176: Gegenüberstellung von Maximaler Frosthebung und Porosität aus Hg-Intrusion

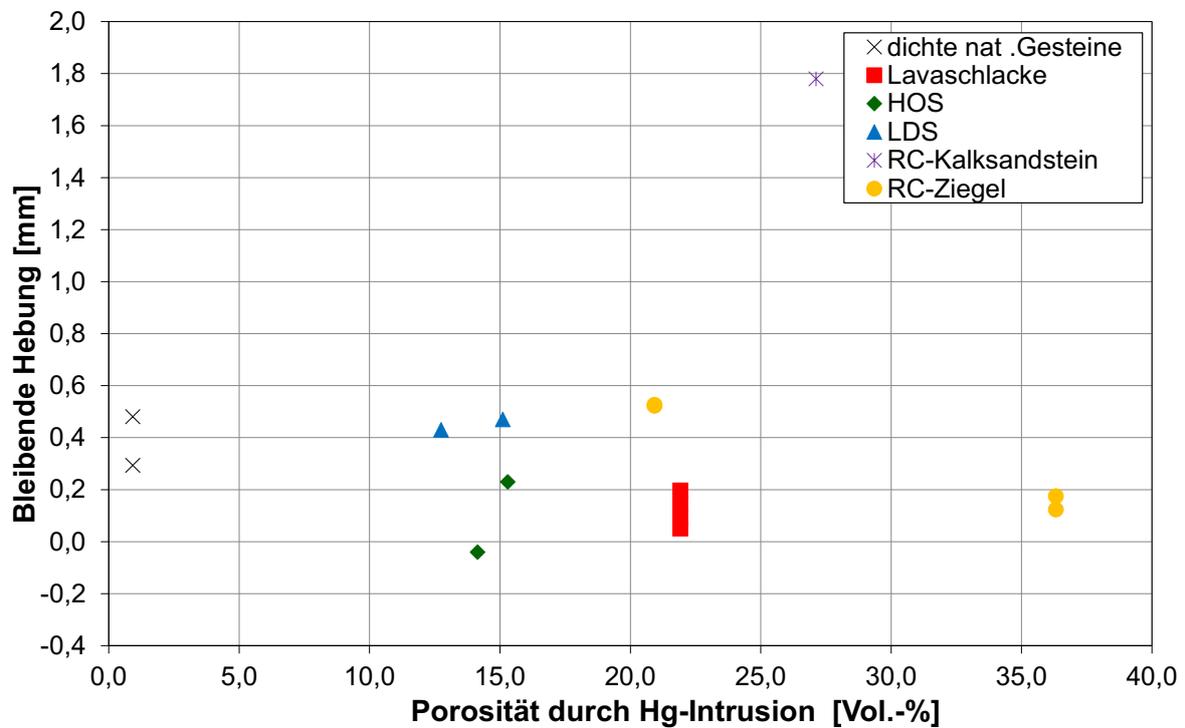


Abbildung 177: Gegenüberstellung von Bleibender Hebung und Porosität aus Hg-Intrusion

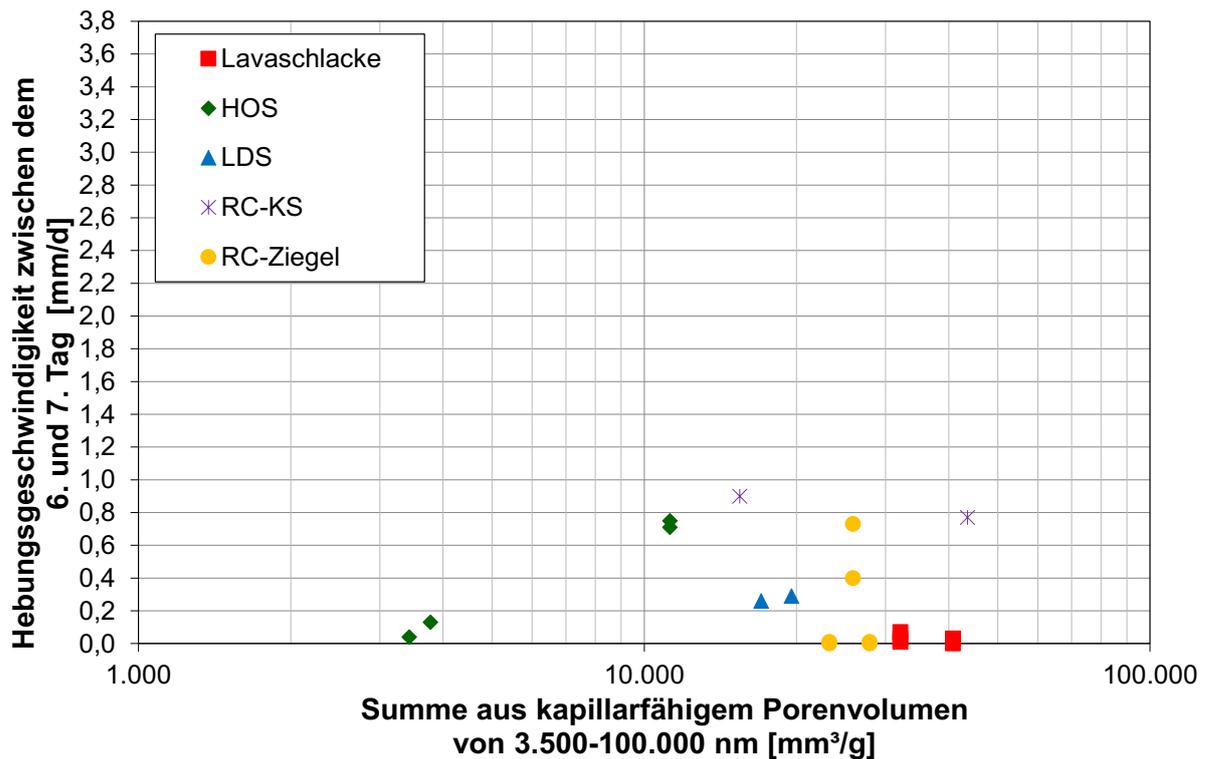


Abbildung 178: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und kapillarfähigem Porenvolumen von 3.500 bis 100.000 nm

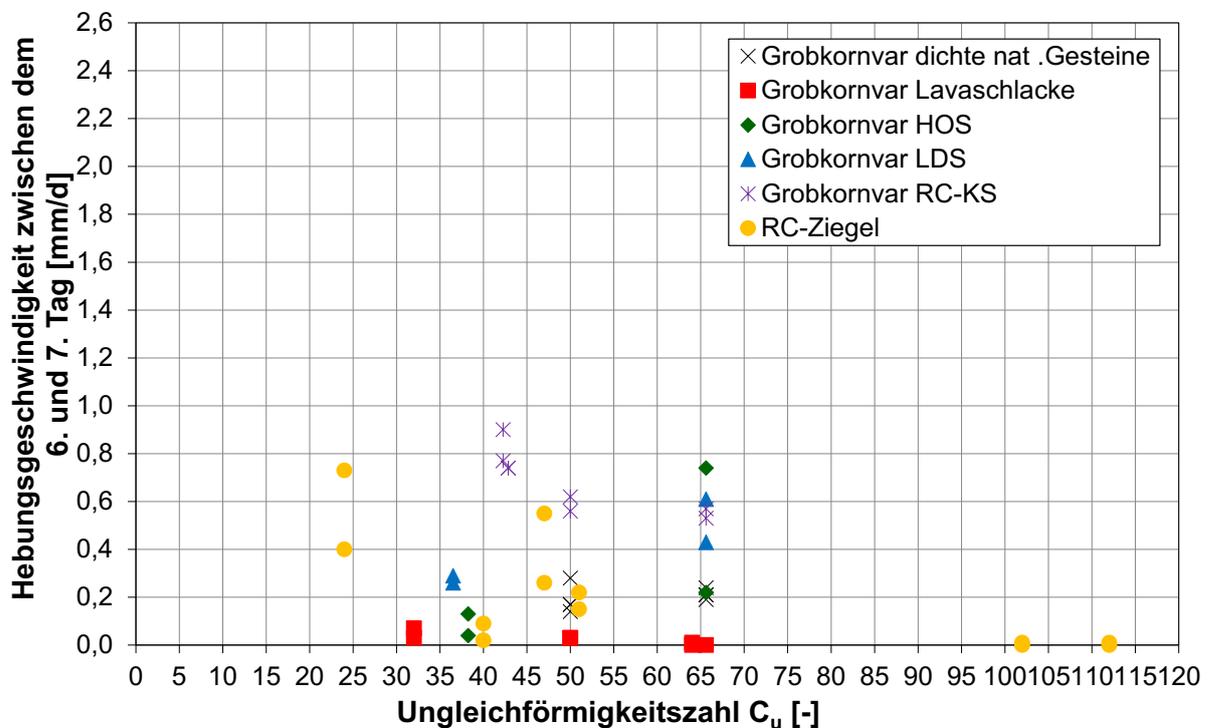


Abbildung 179: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zw. dem 6. und 7. Tag und Ungleichförmigkeitszahl

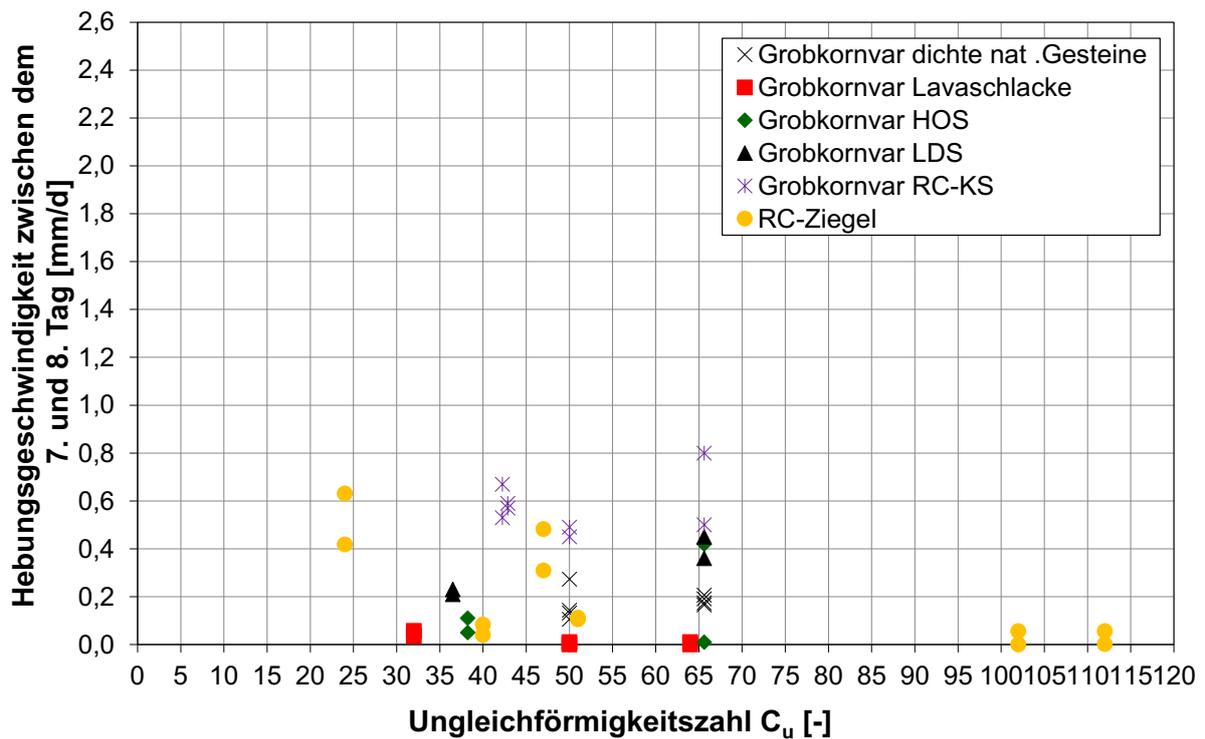


Abbildung 180: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zw. dem 7. und 8. Tag und Ungleichförmigkeitszahl

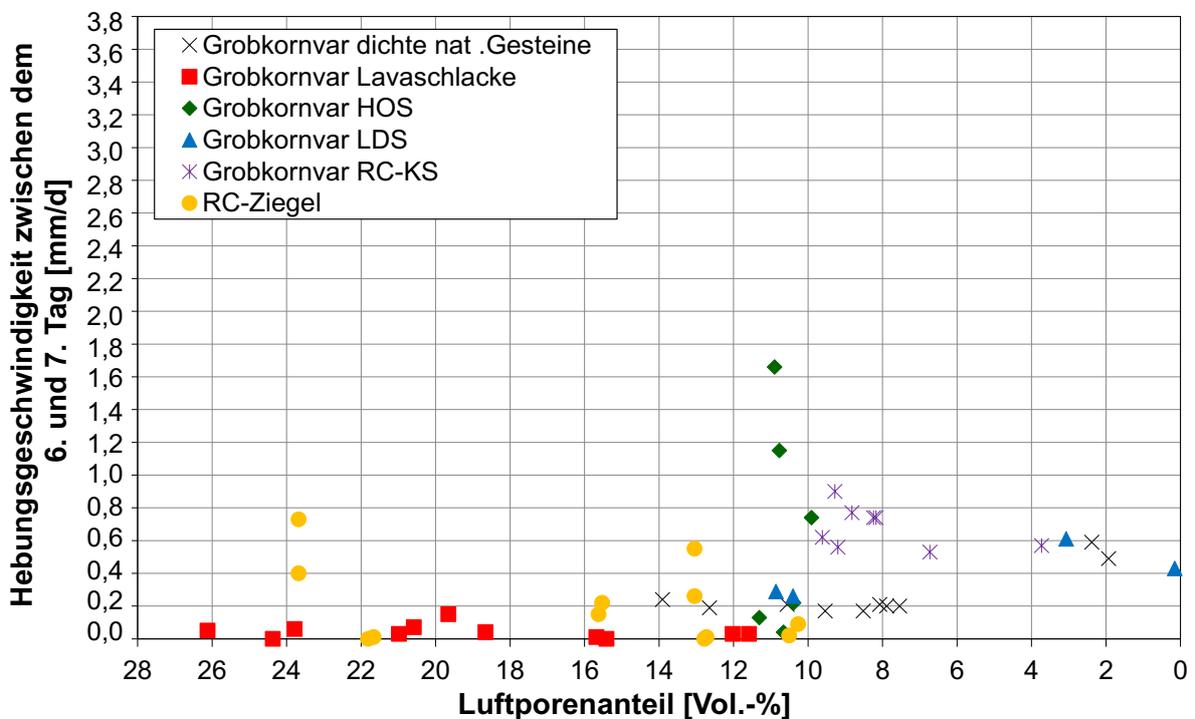


Abbildung 181: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag und Luftporenanteil

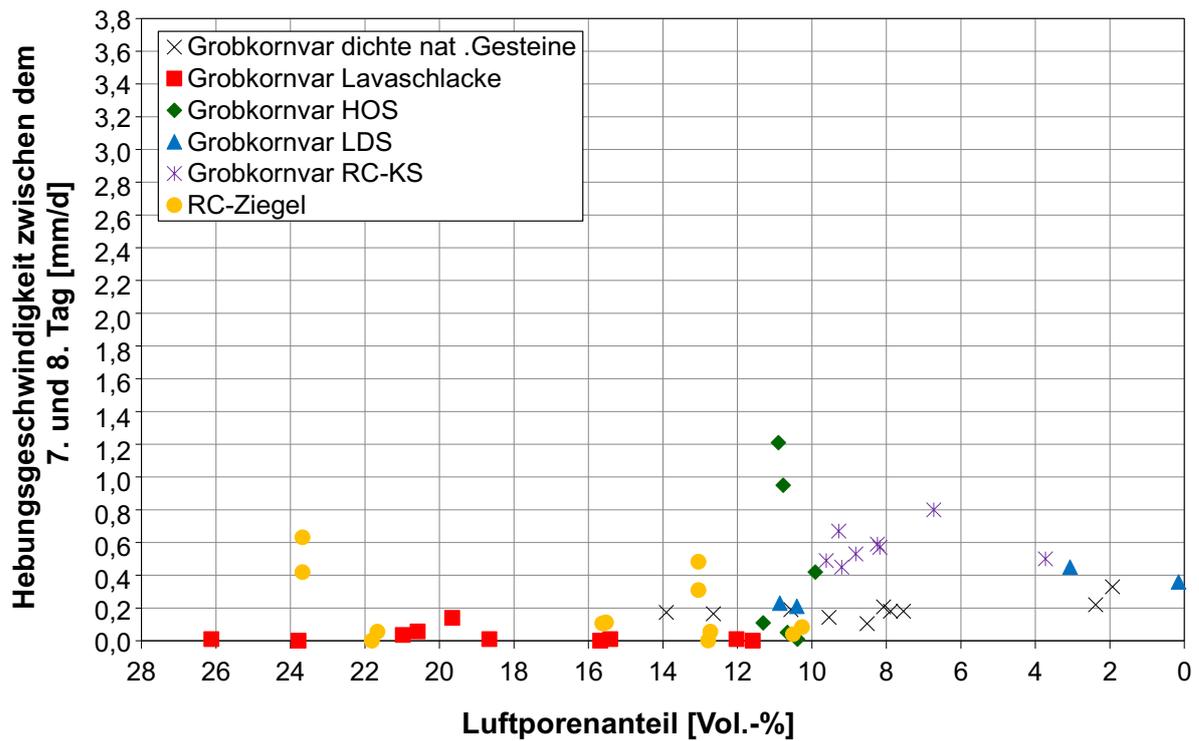


Abbildung 182: Gegenüberstellung von Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 7. und 8. Tag und Luftporenanteil

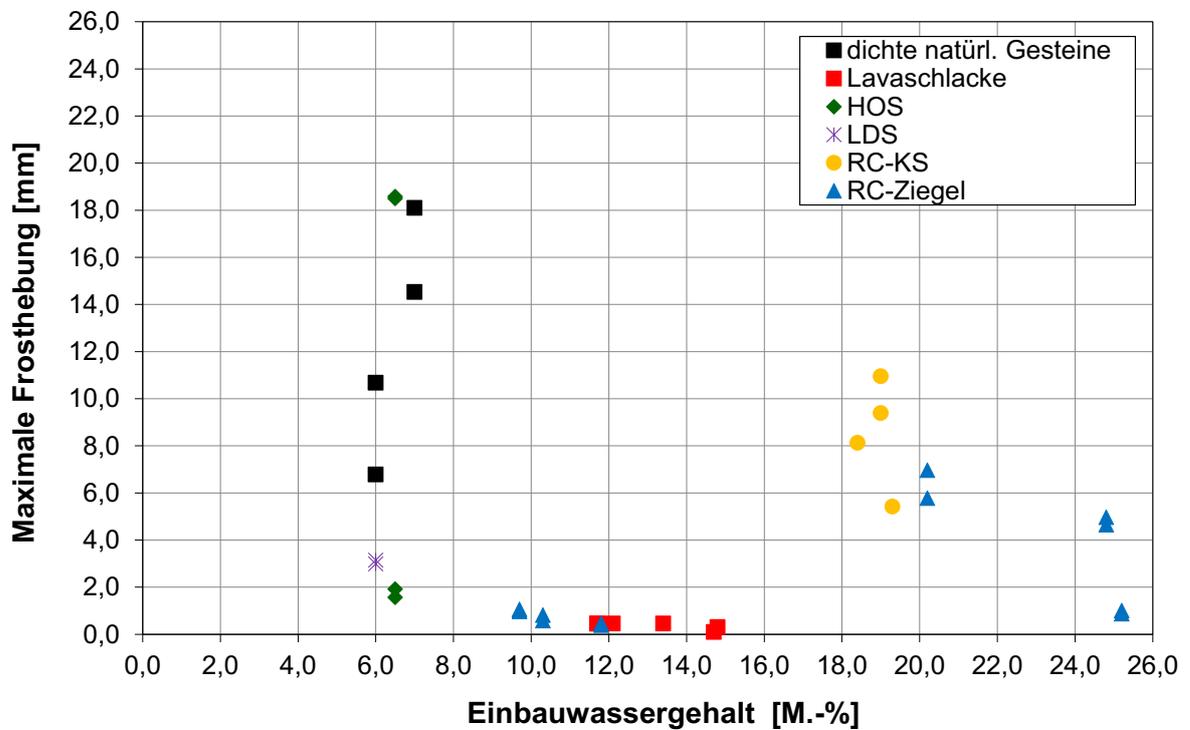


Abbildung 183: Gegenüberstellung von maximaler Frosthebung und Einbauwassergehalt

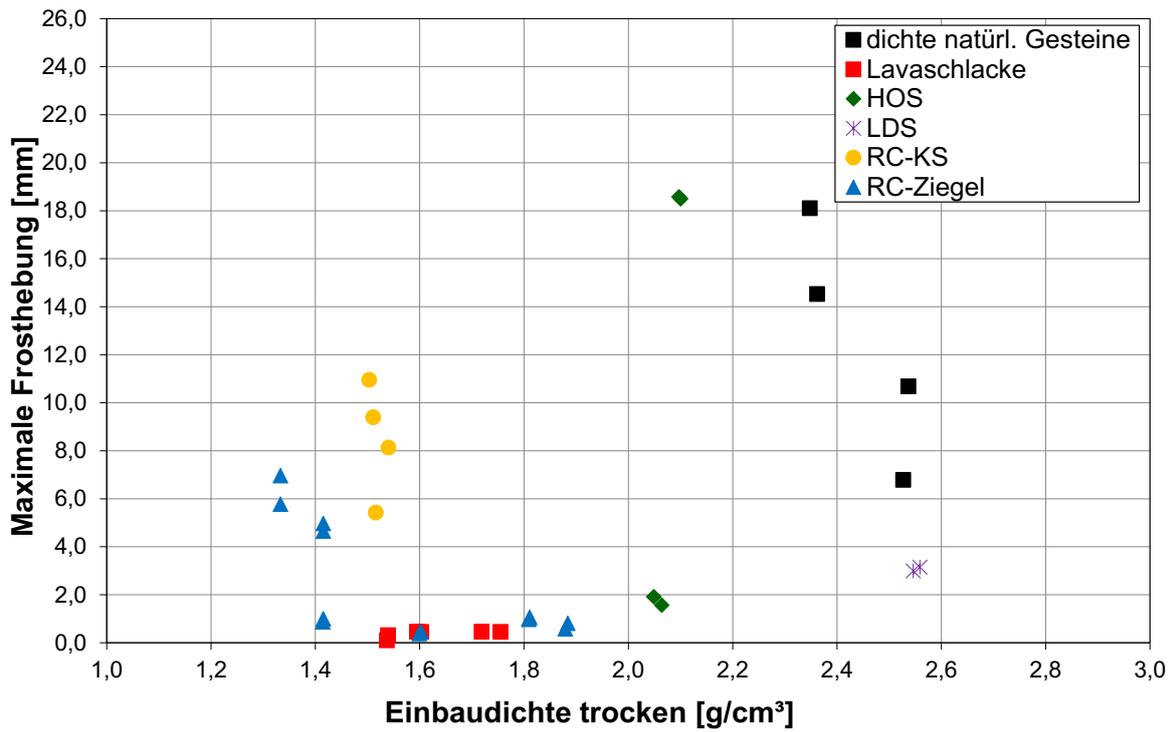


Abbildung 184: Gegenüberstellung von maximaler Frosthebung und Einbaudichte

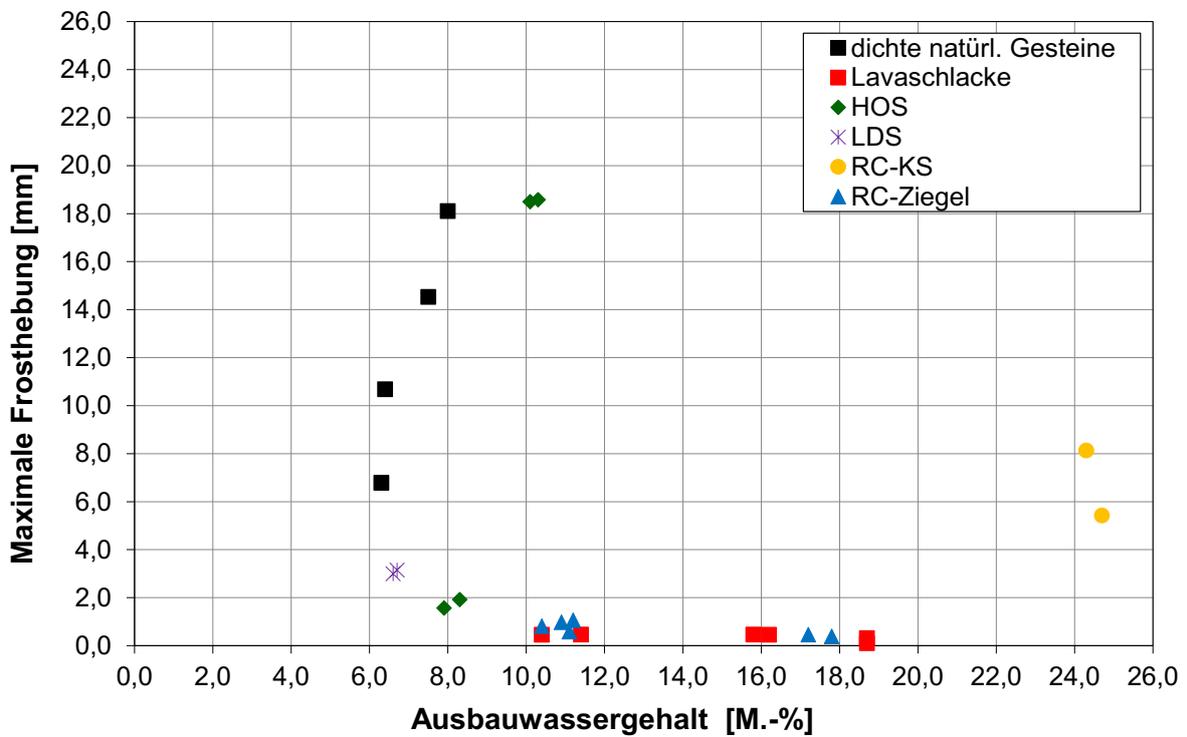


Abbildung 185: Gegenüberstellung von bleibender Frosthebung und Ausbauwassergehalt

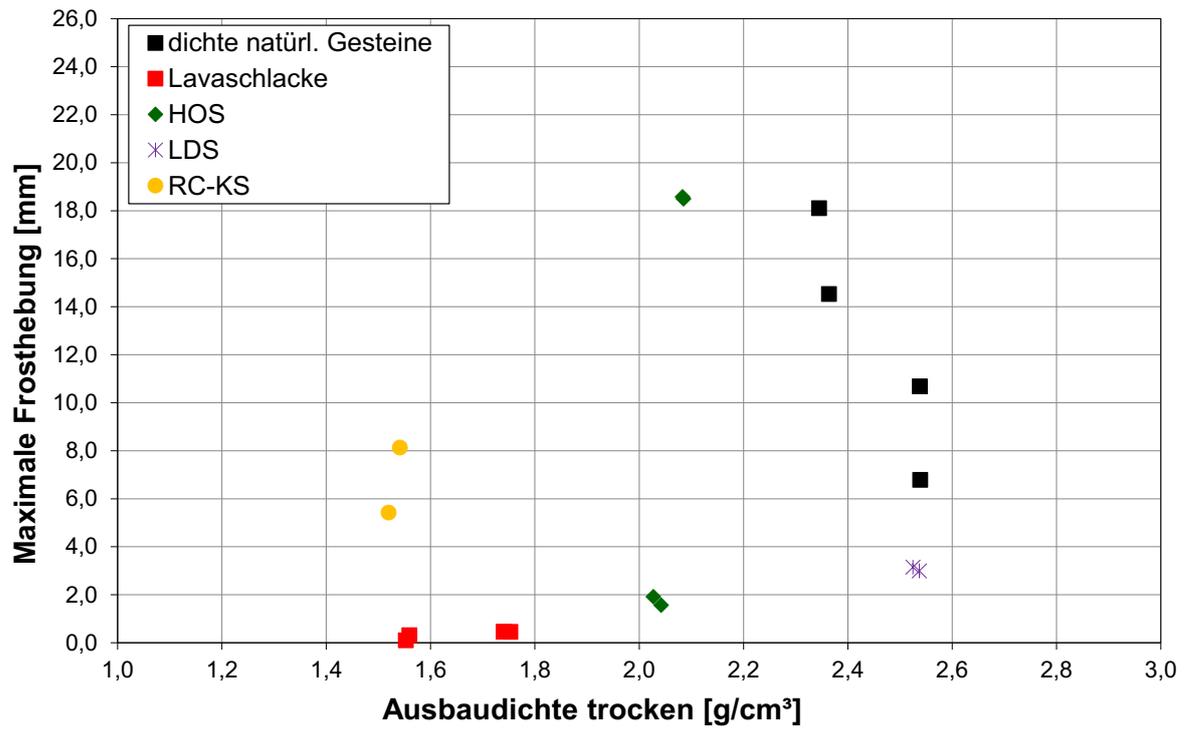


Abbildung 186: Gegenüberstellung von maximaler Frosthebung und Ausbaudichte

Anhang D

Bewertungsansatz A

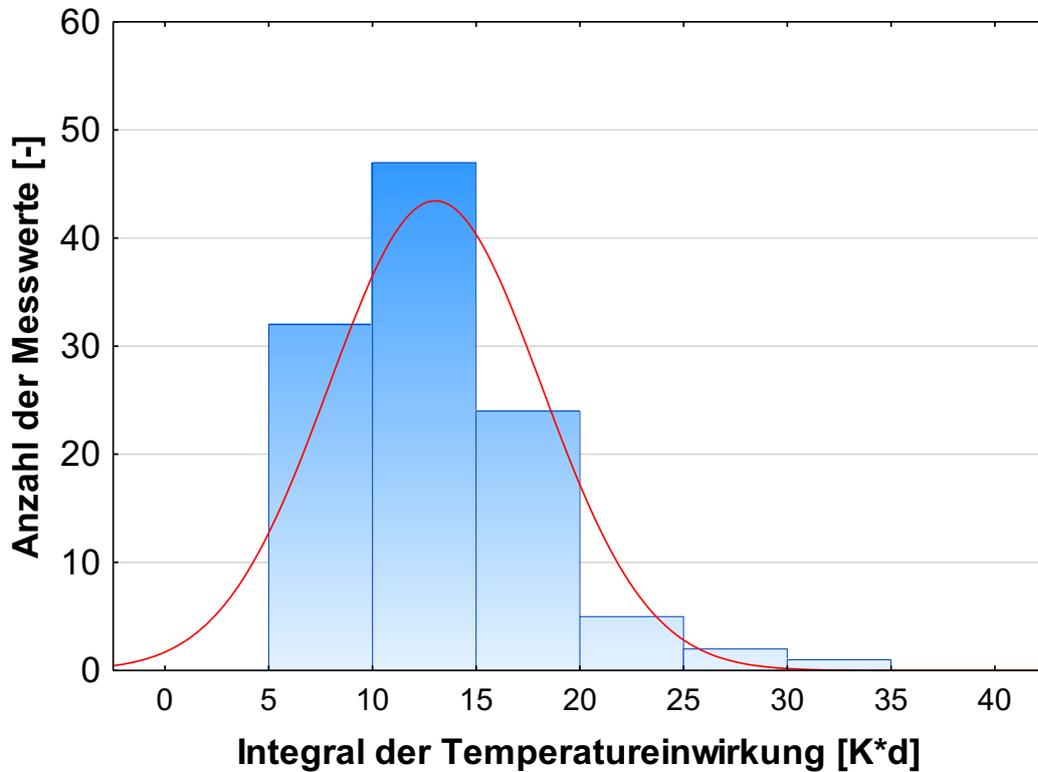


Abbildung 187: Histogramm zur Verteilung der Messwerte über das Integral der Temperatureinwirkung

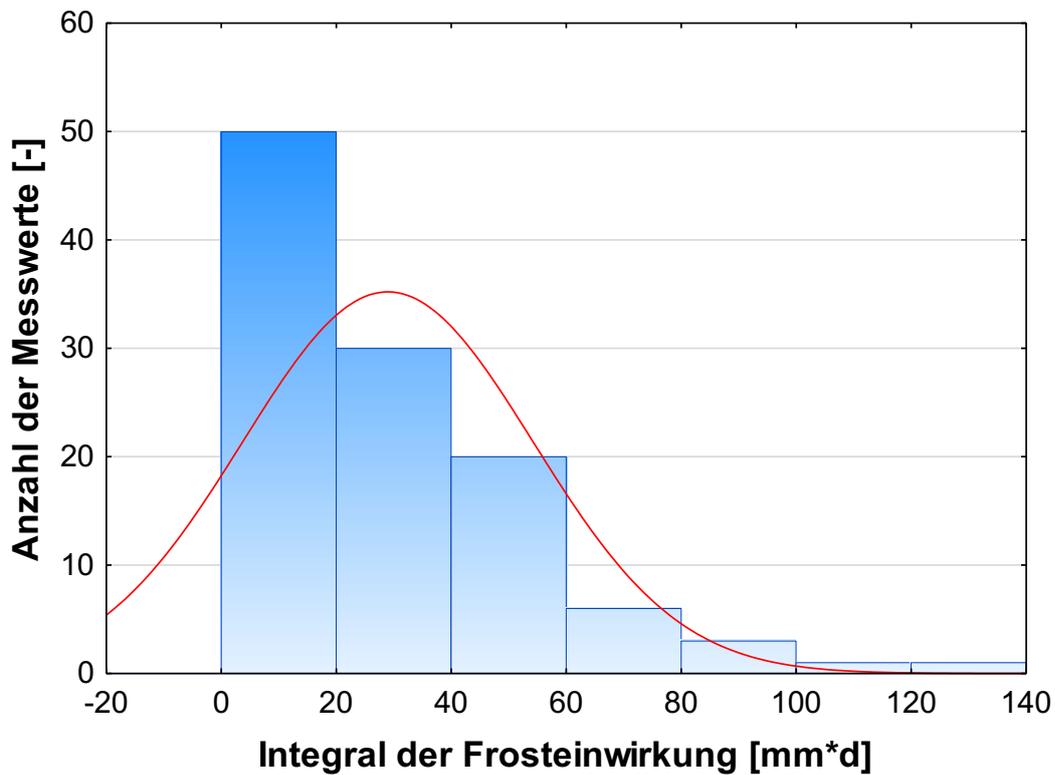


Abbildung 188: Histogramm zur Verteilung der Messwerte über das Integral der Frosthebung

Bewertungsansatz B

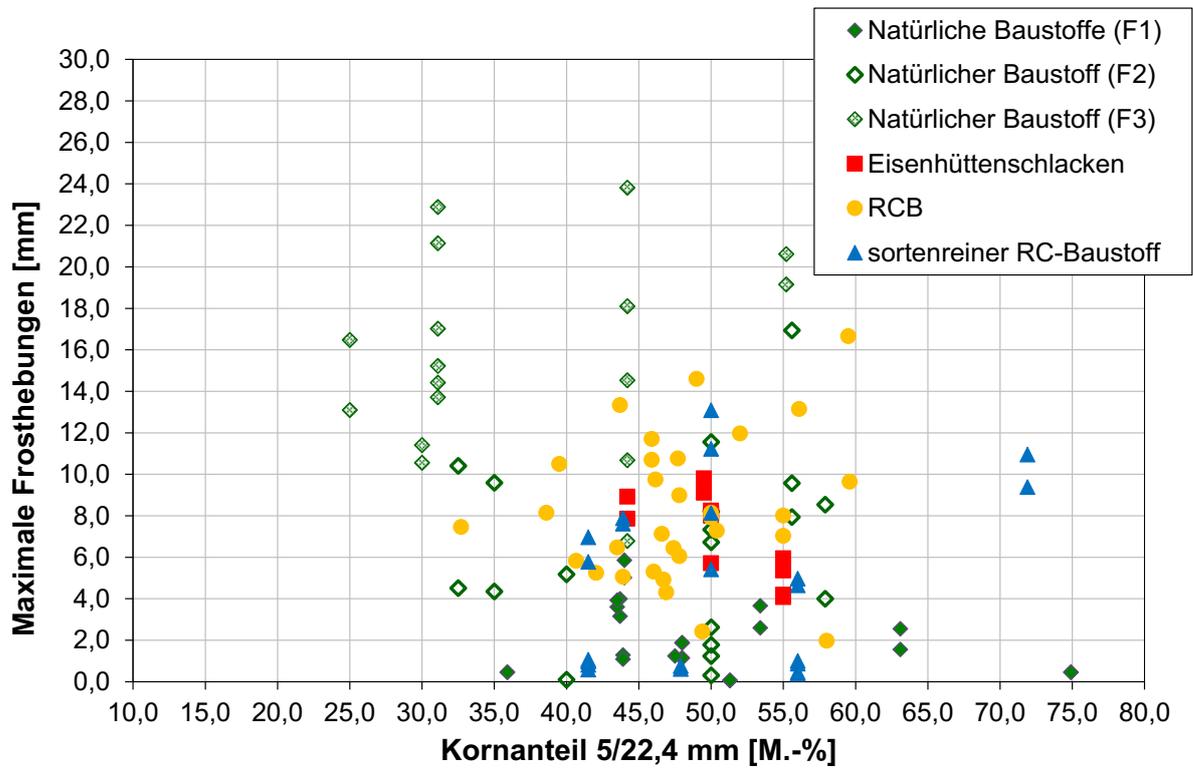


Abbildung 189: Gegenüberstellung Kornanteil 5/22,4 mm und Maximale Frosthebung

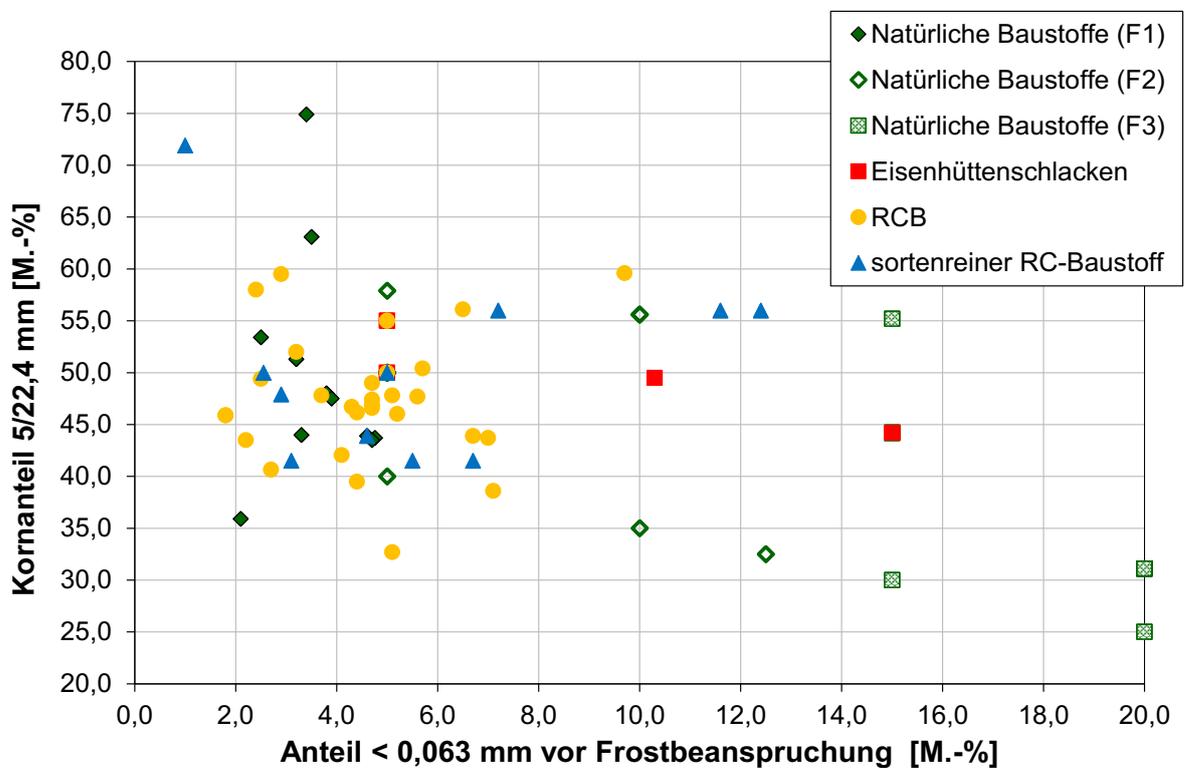


Abbildung 190: Gegenüberstellung Kornanteil 5/22,4 mm und Feinanteil

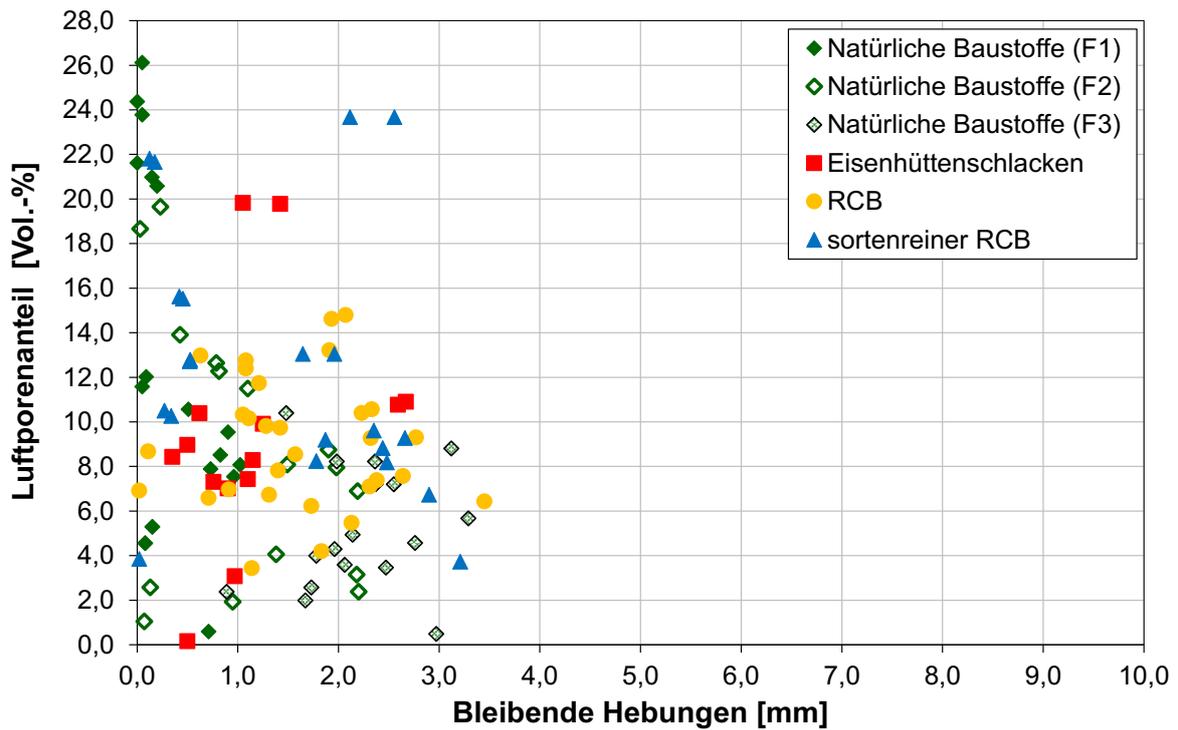


Abbildung 191: Gegenüberstellung bleibende Hebung und Luftporenanteil

Vergleich der Bewertungsansätze

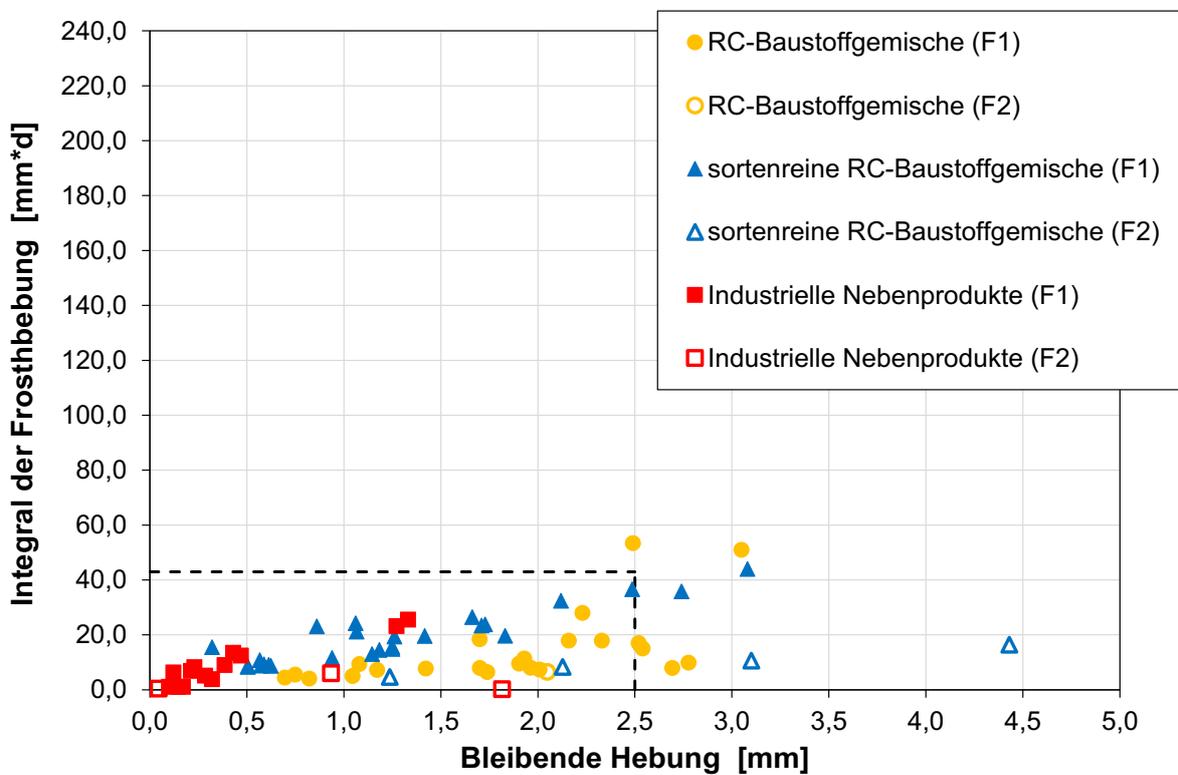


Abbildung 192: Vergleich der Bewertungsansatz A und B für den Kennwert Bleibende Hebung

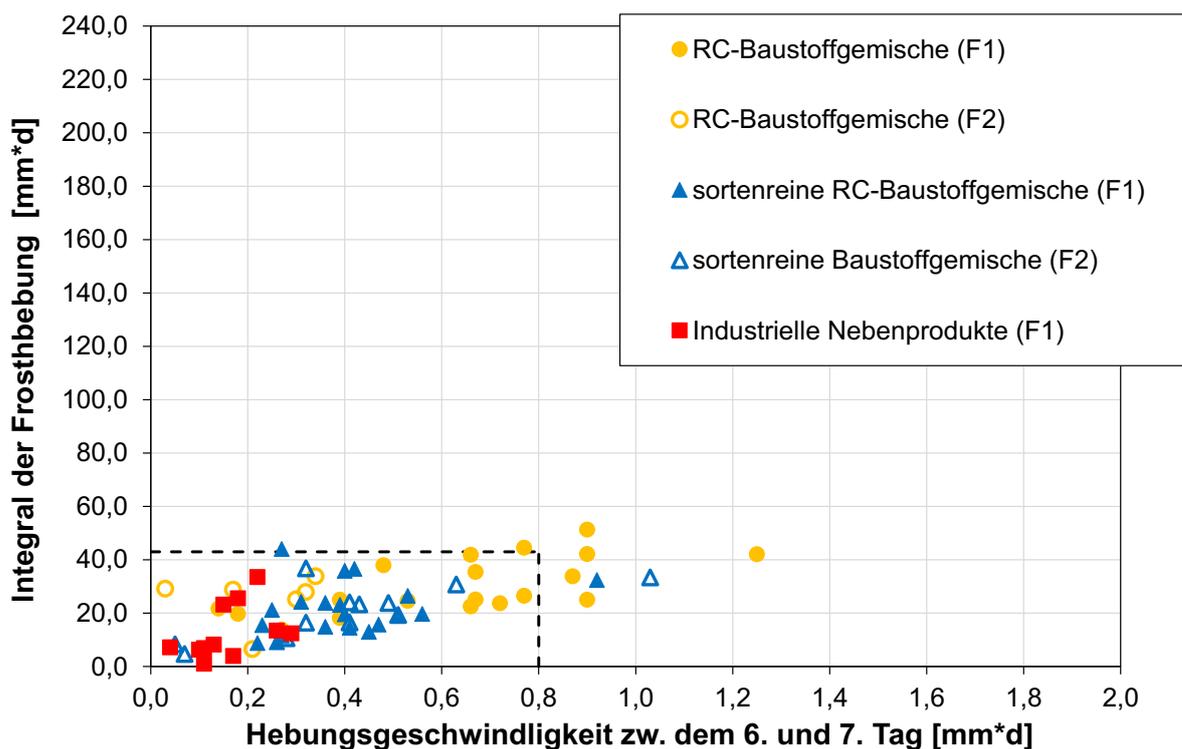


Abbildung 193: Vergleich der Bewertungsansatz A und B für den Kennwert Hebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Tag

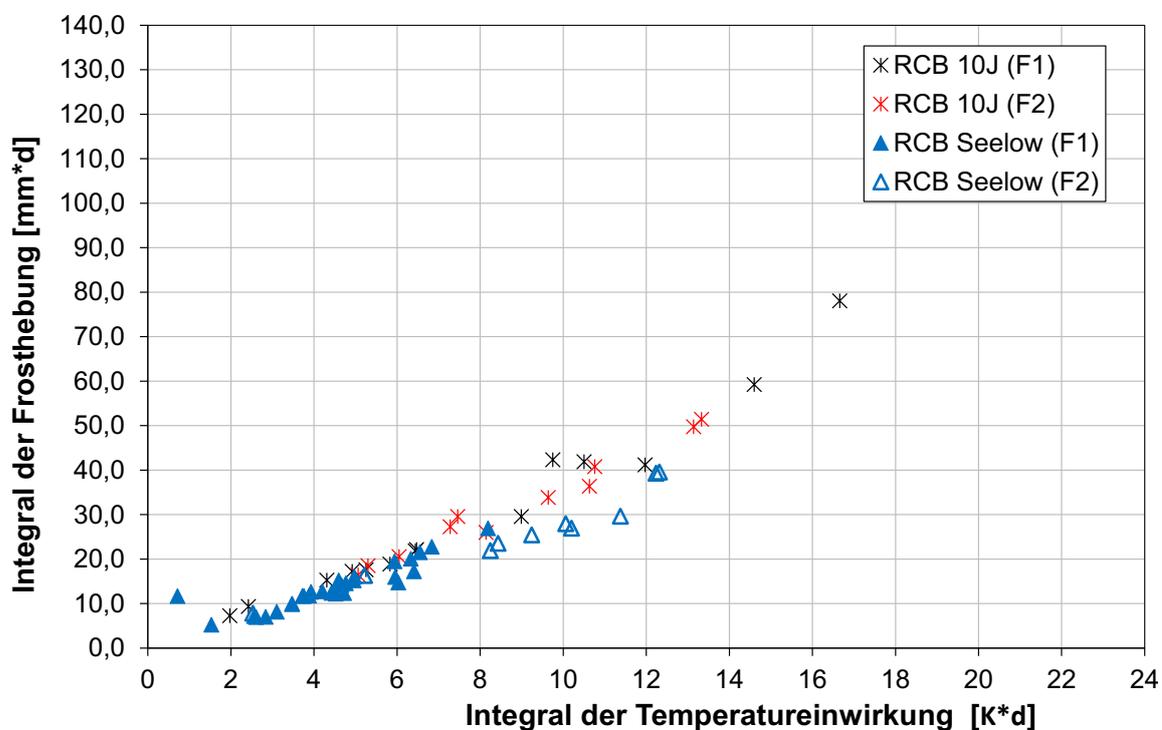


Abbildung 194: Integral der Frosthebung zu Maximaler Frosthebung der Materialien aus der Versuchsstrecke in Seelow und der 15 Strecken mit RC-Tragschichten

Anhang E

Einfluss der Wasserbadtemperatur

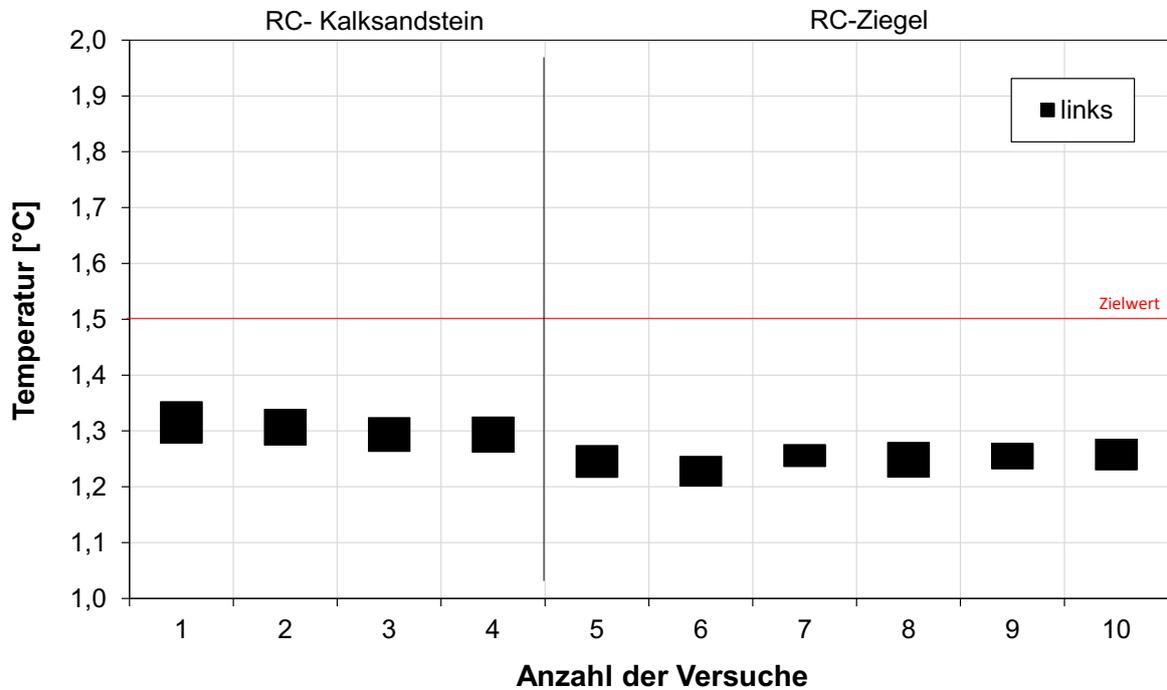


Abbildung 195: Temperaturspannweiten des linken Wasserbades bei ausgewählten Recycling-Kalksandstein- und Recycling-Ziegel-Gemischen

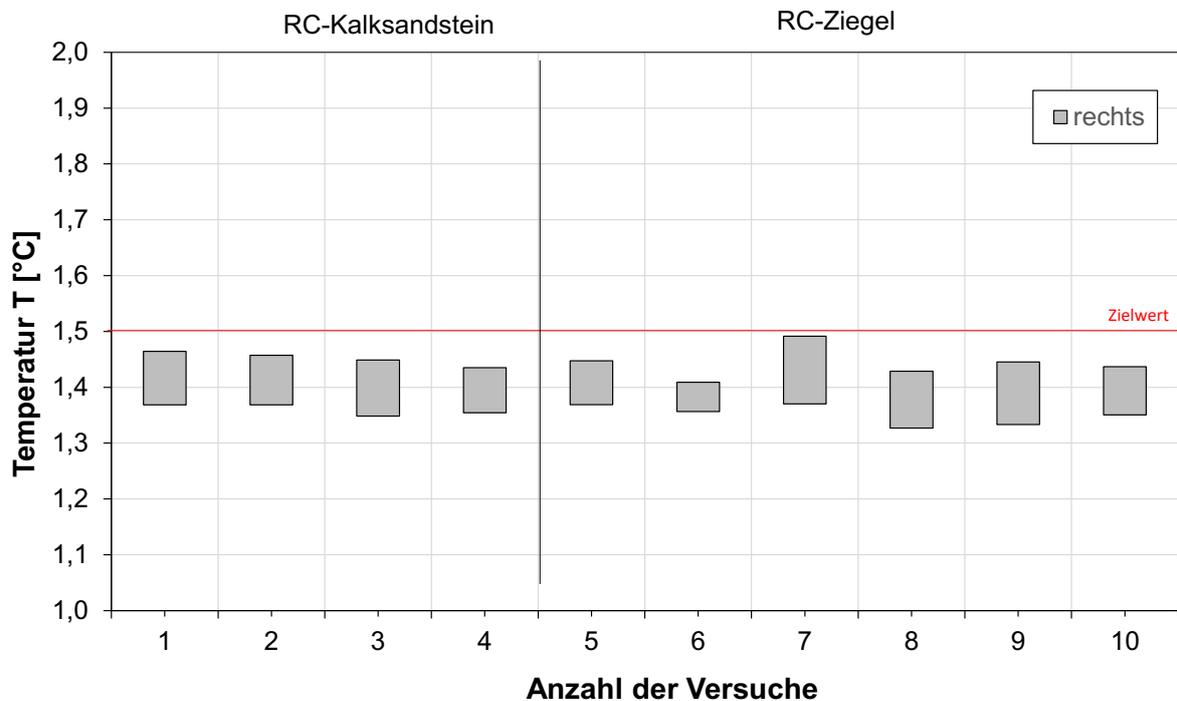


Abbildung 196: Temperaturspannweiten des rechten Wasserbades bei ausgewählten Recycling-Kalksandstein- und Recycling-Ziegel-Gemischen

Modifizierter Kühlkreislauf

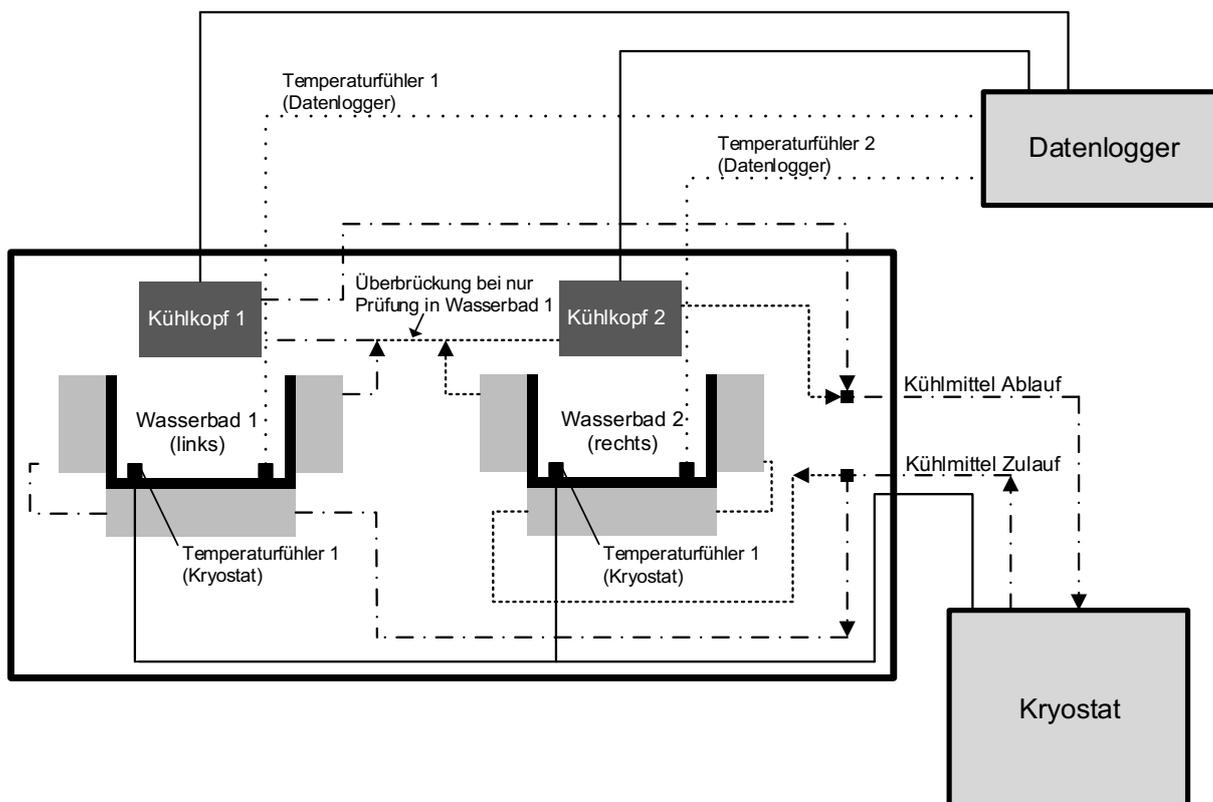


Abbildung 197: Schematische Darstellung des modifizierten Kühlkreislaufs