

DIPLOMARBEIT MASTER THESIS

Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**

und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Adrian Kainrath**

E220

Institut für Geotechnik

Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Paul Rohm, BSc.

0725361

Beatrixgasse 19a/3, 1030 Wien

Wien, im Jänner 2014

Vorwort / Danksagung

Diese Arbeit entstand an der Technischen Universität Wien am Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik in Zusammenarbeit mit der Firma Züblin Spezialtiefbau GmbH.

Zu allererst möchte ich mich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit am Institut für Geotechnik zu verfassen, bedanken. Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Univ.Ass. Dipl.-Ing. Adrian Kainrath für die Betreuung und die Unterstützung bei der Umsetzung dieser Arbeit. Nicht unerwähnt bleiben dürfen die anderen Assistenten des Institutes für Geotechnik, die mich in Abwesenheit meines Betreuers tatkräftig unterstützt haben.

Für die Unterstützung bei der im Zuge der Versuche anfallenden Arbeit möchte ich mich beim gesamten Laborpersonal des Institutes für Geotechnik bedanken.

Die anregenden und konstruktiven Gespräche mit den Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Krenn, Ing. Martin Schmidt und Walter Trojer waren sehr hilfreich für die Erstellung dieser Arbeit. Weiters möchte ich mich bei Herrn Heinz Wiesmayr der Firma Rohrdorfer für die Beratung und Bereitstellung der Zemente bedanken.

Besonderer Dank gilt auch meiner Familie und meinen Freunden, die mich während meines gesamten Studiums und dem Verfassen der Diplomarbeit mental unterstützt haben.

Kurzfassung

Niederdruckinjektionen sind ein ressourcenschonendes Bauverfahren, das zum Zweck der Abdichtung oder Verfestigung von Hohl- und Porenräumen des Untergrundes eingesetzt wird. Eines der größten Probleme der Niederdruckinjektionen ist, dass es kaum Kenntnisse über erreichbaren Festigkeiten an in situ Injektionskörpern gibt. Am Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, an der TU Wien wird aus diesem Grund ein Forschungsprojekt durchgeführt, das sich mit der Entwicklung von wissenschaftlichen Grundlagen zur Prüfung von Injektionsgut und der Bestimmung der bodenmechanischen Eigenschaften von injiziertem Boden beschäftigt. Diese Diplomarbeit wurde im Zuge dieses Forschungsprojektes ausgeführt und dient zur grundlegenden Identifizierung der Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit an im Labor hergestellten Injektionskörperproben.

Um die Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit besser verstehen zu können, wurden in einer umfangreichen Literaturrecherche der Hydratationsprozess und die Einflüsse der Zementbestandteile aufgearbeitet. Der Kenntnis über die Zusammensetzung und die Wirkweise der unterschiedlichen Zementbestandteile spielen, speziell im Bereich der Injektionstechnik, wo mit Wasser-Zementwerte weit abseits der Normvorgaben bzw. der üblichen Einsatzgebiete der Zemente gearbeitet wird, eine große Rolle. Daher kommt der richtigen Wahl des Zementes als Injektionsmaterial speziell bei Niederdruckinjektionen große Bedeutung hinsichtlich der erreichbaren Festigkeiten zu. Zusätzlich wurden in dieser Arbeit die gängigen Injektionskriterien zur Beurteilung der Injizierbarkeit von Lockergesteinsböden aufgearbeitet und die unterschiedlichen Kriterien verglichen.

Um generelle Aussagen über die Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben treffen zu können, werden in dieser Arbeit Probekörper im Labor unter Variation der Randbedingungen hergestellt.

Dabei wurden zu Beginn der Laborarbeiten Grundsatzversuche an Zylinder- und Würfelproben durchgeführt und die den Versuchen zugrunde liegenden Normen miteinander verglichen. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Prüfung an Zylinder mit einem H/D-Verhältnis von 2,0 und gemäß Grundbaunorm ÖNORM B 4415 die repräsentativsten Ergebnisse für den Anwendungsbereich der Niederdruckinjektionen liefern.

Der Hauptteil der Arbeit besteht aus einaxialen Druckversuchen an reinen Suspensionsproben als auch an im Labor hergestellten Injektionskörperproben. Bei der Herstellung der Injektionskörperproben wurden einerseits der zu injizierende Boden und andererseits der W/Z-Wert variiert. Am Injektionsmaterial wurden die Fließeingenschaften durch Ein-Punkt-Versuche mit Hilfe der Kugelharfe und dem Marsh-Trichter ermittelt. In weiterer Folge wurde die Viskosität der Suspensionen mit einem Rotationsviskosimeter ermittelt. Zusätzlich wurde die Suspensiondichte und das Wasserabsetzmaß bestimmt. Die Ermittlung der Fließgrenze und des Erstarrungsbeginns wurde mittels Viskosimeter und Flügelsonde durchgeführt. Ein Vergleich der ermittelten Fließeingenschaften zeigt, dass die in der Baupraxis herangezogene Kugelharfe sehr ungenau ist und für eine genaue Bestimmung der rheologischen Eigenschaften nur bedingt geeignet ist. An den einaxialen Druckversuchen hat sich gezeigt, dass bei der Prüfung jedes Injektionskörpers auch das Injektionsmaterial untersucht werden muss. Über den Vergleich der beiden Festigkeiten können Rückschlüsse auf die zu erwartenden in-situ-Festigkeiten gezogen werden. Die Randbedingungen wie beispielsweise die Probeform, die Dimensionen und die Lagerungsbedingungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die einaxiale Druckfestigkeit der Probekörper. Um speziell im Bereich der Injektionstechnik, die seit Anbeginn größtenteils auf empirischen Erkenntnissen und Erfahrungswerten basiert, einen den heutigen Anforderungen entsprechenden Wissensstand zu erreichen, sind weitere Untersuchungen hinsichtlich Festigkeit erforderlich. Um den Wissensstand für Planer und Bauherren im Bereich der Injektionstechnik zu erhöhen und Unsicherheiten zu beseitigen, sollten Regelwerke mit genau definierten und standardisierten Vorgaben zur Prüfung von Injektionsgut und Injektionskörperproben erstellt werden.

Abstract

Low pressure grouting is a resource friendly construction method, which is used for sealing and compacting cavities and porosities. A major problem of low pressure grouting is that there is little knowledge of dimension and strength of grouted bodies. For this purpose a research project at the Institute of Geotechnics, Center of Ground Engineering, Soil and Rock Mechanics, at the Vienna University of Technology is carried out, which deals with the development of scientific basis for testing grout and grouted soil. This Master Thesis was carried out in the course of this research project and is used for basic identification of parameters influencing the unconfined compressive strength of grouting specimens produced in the laboratory.

In a comprehensive literature research the hydration process and the influence of cement components were processed in order to understand better the factors influencing the unconfined compressive strength. The knowledge of configuration and mode of operation of cement and the additives is of major importance, especially in grouting technique, where water-cement ratios far beyond the standard specifications are used. Therefore the right choice of cement as grouting material especially in low pressure grouting with regard of the achievable compressive strength is important. Additionally in this thesis the current grouting criteria for assessments of groutability of soil were processed and compared the different criteria.

To make general statements about factors influencing the unconfined compressive strength of grouting samples specimens were produced in the laboratory by varying the boundary conditions.

In the beginning of the laboratory work basic tests on cylindrical and cubic samples were performed and technical provisions were compared. It has been shown that tests on cylindrical specimens with a ratio height/diameter of 2.0 and according to geotechnical standard ÖNORM B 4415 provide the most representative results for the application of low pressure grouting.

The main part of the thesis consists of unconfined compressive tests of pure suspension specimens as well as grouting specimens. In the production of grouting specimens both the grouted soil and the water-cement-ratio were varied. The flow characteristics of the grouting material were determined with the Marsh cone and the ball harp, while

the viscosity of the suspensions was measured by a rotational viscometer. In addition suspension density and bleeding was identified. A vane shear test was used to determine yield strength and initial set. The comparison of the determined flow characteristics shows that the ball harp, which is used for on-site tests, is not appropriate for an accurate determination of rheological properties.

The unconfined compressive tests have shown that the examination of each grouting specimen requires an examination of the grouting material. By comparing their respective strengths conclusions may be drawn as to the expected on-site strengths of grouted bodies. Basic conditions such as specimen type, dimensions and storage conditions have a major influence on the unconfined compressive strength of specimens. To achieve an appropriate level of knowledge to today's requirements especially in the area of low pressure grouting, which is based mainly on empirical knowledge and experiences a further research of strength is necessary. To increase the level of knowledge for designers and construction companies and to eliminate uncertainties rules and standards should be created with accurately defined and standardized specifications for the testing of grouting material and grouted bodies.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung	2
2. Grundlagen der Injektionstechnik	3
2.1. Allgemeines	3
2.2. Geschichtliche Entwicklung	4
2.3. Einteilung der Injektionen	5
2.4. Grenzen der Injizierbarkeit	6
2.4.1. Kornverteilung	7
2.4.2. Durchlässigkeit	9
2.4.3. Porenengstelle	10
2.5. Injektionsmittel	12
2.5.1. Hydraulische Bindemittel und Zemente	13
2.5.2. Anforderungen an Suspensionen auf Zementbasis	19
3. Abbindeverhalten der Zemente	23
3.1. Hydratationsreaktionen	24
3.1.1. Abbindeverhalten der silikatischen Klinkerbestandteile	24
3.1.2. Abbindeverhalten der aluminatischen Klinkerbestandteile	25
3.1.3. Abbindeverhalten des freien Kalkes und Magnesiumoxides	26
3.1.4. Abbindeverhalten der latent-hydraulischen und puzzolanischen Bestandteile	27
3.2. Ablauf des Hydratationsprozesses	28
3.3. Einflussfaktoren auf den Hydratationsprozess	30
3.3.1. Zusammensetzung des Zementes	30
3.3.2. Mahlfeinheit des Zementes	31
3.3.3. Zusatzmittel	31
3.3.4. Druck	32
3.3.5. Temperatur	32
3.3.6. Wasser-Zement-Wert	33

INHALTSVERZEICHNIS

3.4.	Festigkeitsentwicklung und Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit	33
3.4.1.	Festigkeitsentwicklung	34
3.4.2.	Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben	37
4.	Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit	38
4.1.	Verwendete Materialien	39
4.1.1.	Zement	39
4.1.2.	Bentonit	41
4.1.3.	Bodenproben	42
4.1.4.	Normsand	43
4.2.	Suspensionsherstellung und -prüfung	44
4.2.1.	Suspensionsherstellung	44
4.2.2.	Suspensionsprüfungen	45
4.3.	Herstellung der Prüfkörper der Grundsatzversuche	59
4.4.	Herstellung der Prüfkörper aus reiner Suspension	60
4.5.	Herstellung der Injektionskörperproben	60
4.5.1.	Versuchsübersicht	60
4.5.2.	Versuchsschema	62
4.5.3.	Versuchsdurchführung	63
4.5.4.	Erkenntnisse aus der Versuchsdurchführung	64
4.6.	Ermittlung der Masse des chemisch gebundenen Wassers als Indikator für den Zementgehalt	66
4.6.1.	Ermittlung der Masse des chemisch gebundenen Wassers	67
4.6.2.	Vergleich der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben	70
4.7.	Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit	71
4.7.1.	Versuchsrandbedingungen	72
4.7.2.	Versuchsdurchführung	73
4.7.3.	Versuchsergebnisse	75
5.	Zusammenfassung	92
6.	Schlussfolgerung und Ausblick	94
	Literaturverzeichnis	96
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	102

INHALTSVERZEICHNIS

Anhang	104
A. Produktdatenblätter	105
B. Korngrößenverteilung	117
C. Übersicht der untersuchten Proben	126
D. Prüfprotokolle: Einaxialer Druckversuch	129
E. Prüfprotokolle: Ermittlung des Glühverlustes	160

1. Einleitung

Die Injektionstechnik zählt zu den klassischen Disziplinen des Spezialtiefbaus und beinhaltet drei verschiedene Injektionsverfahren. Diese Injektionsverfahren sind die Niederdruckinjektionen, das Düsenstrahlverfahren und das Soil-frac-Verfahren. Während sowohl das Düsenstrahlverfahren als auch das Soil-frac-Verfahren einen hohen Energiebedarf aufweisen, sind die Niederdruckinjektionen ressourcenschonend. Bei Niederdruckinjektionen werden die Hohlräume im Untergrund verfüllt, wodurch das Gefüge des anstehenden Untergrundes weder verändert noch zerstört wird. Dadurch entstehen im Gegensatz zum Düsenstrahlverfahren geringere Kosten, da keinerlei deponierbare Abfälle anfallen.

1.1. Problemstellung

Eines der größten Probleme der Niederdruckinjektionen besteht darin, dass es kaum Kenntnisse über die hergestellten Injektionskörper gibt. Da es sich bei den Injektionskörpern um schwer zugängliche Körper handelt (sofern keine Baugrubensicherung durch Injektionen hergestellt wird), ist die Gewinnung von Proben zur Bestimmung der in-situ Kennwerte nur sehr schwer möglich. Zur Probengewinnung aus injizierten kiesfreien Sanden ist noch am ehesten die Kernbohrung geeignet, wobei dadurch sowohl Bodengefüge als auch Injektionskörper starken Belastungen ausgesetzt sind. Es genügt bereits ein einzelnes Kieskorn, das durch die Kernbohrkrone aus dem Verband gelöst wird, um beim Weiterbohren den Kern zu beschädigen. Das Hauptkriterium bei einer Kernbohrung ist die Festigkeit des Injektionskörpers.

Diese Festigkeiten sind stark abhängig vom injizierten Boden, dem verwendeten Zement und dem erreichten Verfüllgrad des Porengerüsts. Da die Gewinnung im Feld derzeit kaum möglich ist, gewinnen Versuche an in Labor hergestellten Injektionskörpern an Bedeutung. Jedoch fehlt es an normativen Grundlagen und Festlegungen für die Herstellung der Injektionskörper, den Umfang und die Durchführung der Versuche an den Injektionskörpern. Weiters fehlen vergleichbare Untersuchungen, um grundlegende Aussagen über die einaxiale Druckfestigkeit von im Labor hergestellten Injektionskörpern in Abhängigkeit des injizierten Bodens, des verwendeten Zementes, des Wasser-Zement-Wertes oder der Lagerungsdichte treffen zu können.

1. EINLEITUNG

1.2. Zielsetzung

Dieser Arbeit geht eine Recherche der aktuell angewandten Injektionskriterien voraus. In dieser Arbeit wird ausschließlich auf zementbasierte Suspensionen eingegangen. Es ist wichtig, einen Überblick über die einzelnen Zementbestandteile zu erlangen, um Aussagen über deren Einfluss auf die einaxiale Druckfestigkeit machen zu können. Um einen Einblick in die Festigkeitsentwicklung der mit Zementsuspension verfestigten Lockerböden zu erhalten, werden die Abbindeprozesse der einzelnen Bestandteile beschrieben.

Diese Arbeit soll eine Grundlage für die Ermittlung der Einflussparameter auf die einaxiale Druckfestigkeit für weitere Arbeiten liefern, um schlussendlich Vorgaben zur Herstellung und Prüfung von im Labor hergestellten Injektionsproben ableiten zu können. Hierfür werden Proben mit unterschiedlicher Zusammensetzung, wie beispielsweise variabler Mengenanteil des Zuschlagstoffes Boden, verschiedene Wasser-Zement-Werte, unterschiedliche Körnungslinien sowie unterschiedlicher Lagerungsdichte, untersucht. Die einaxiale Druckfestigkeit wird in Abhängigkeit dieser Faktoren an den Injektionskörperproben ermittelt. Diese Festigkeiten werden im Anschluss mit den Festigkeiten des Injektionsmittels verglichen.

2. Grundlagen der Injektionstechnik

2.1. Allgemeines [2], [3], [4], [45]

Injektionen werden zum Zweck der Abdichtung oder Verfestigung von Hohlräumen und Poren des Untergrundes eingebracht. Dies erfolgt durch Einpressen eines Injektionsmittels (z.B.: Zement-Bentonit-Suspension) in den Boden. Der durch die Injektion veränderte Baugrund wird Injektionskörper genannt.

Mit Hilfe einer Injektion wird eine Baugrundverbesserung erreicht. Diese kann durch folgende Maßnahmen bewirkt werden:

- Veränderung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften (mechanisches Verhalten) oder
- Veränderung der Durchlässigkeitseigenschaften (hydraulisches Verhalten).

Den Injektionsarbeiten liegen in Österreich folgende Normen zu Grunde:

- EN 12715 : 2000 - Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezial-tiefbau) - Injektionen,
- DIN 4093 : 2012 - Bemessung von verfestigten Bodenkörpern - Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren und
- ÖNORM B 4454 : 2001 - Erd- und Grundbau - Injektionen in Fest- und Lockergestein - Prüfungen.

Das öfter angewendete Düsenstrahlverfahren (DSV) wird aufgrund eines teilweisen Bodenaustausches während des Einpressvorganges nicht als Injektionsverfahren angesehen.

Weitere Anwendungsgebiete der Injektionstechnik sind die Abdichtung und Verfestigung von schadhaftem Beton und Mauerwerk, die Abdichtung von Rissen unter Betonstaumauern sowie als Abdichtungsmaßnahmen im Tunnelbau.

2.2. Geschichtliche Entwicklung [18], [20], [32]

Obwohl die erste Injektion bereits 1802 stattfand, wurde erst 30 Jahre später über das Verfahren berichtet. Erfinder war der Franzose CHALES BÉRIGNY, der eine Suspension aus Wasser und Puzzolan-Zement in den Untergrund einbrachte, um Auskolkungen im Untergrund unter einer Schleuse zu verfüllen. Bérigny nannte sein Verfahren „procédé d'injection“, was übersetzt „Injektionsverfahren“ bedeutet.

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden Injektionen vorrangig im Wasserbau eingesetzt. Mit der Entwicklung hochhydraulischer Kalke und der Erfindung des Portlandzements 1821 verlagerte sich das Anwendungsgebiet der Injektionen in den Berg- und Tunnelbau. Begünstigt durch die Industrialisierung und die dadurch notwendig gewordenen Investitionen in den Kohlebergbau ergab sich ein großer Bedarf an Injektionsarbeiten.

Die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts war geprägt durch den Berg- und Tunnelbau. Zu dieser Zeit kamen Injektionen bereits in mehreren Ländern zur Anwendung. So fanden die ersten Arbeiten in England, Ägypten und den Vereinigten Staaten von Amerika statt. Der Engländer KINIPPLE prägte den Begriff „grouting“, der sich innerhalb kürzester Zeit im anglo-sächsischen Sprachgebrauch einbürgerte.

Die ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts standen im Zeichen der Weiterentwicklung der Injektionstechnik durch Verbesserungen an Maschinen und Geräten. Zunächst wurde mit handbetriebenen Pumpen gearbeitet, die später von druckluft- oder dampfbetriebenen Hochdruckpumpen abgelöst wurden.

Bereits im Jahre 1909 wurde eine reine Chemikalinjektion entwickelt. Der Franzose E. LEMAIR und der Belgier A. DUMONT brachten eine Lösung aus verdünntem Wasserglas und verdünnter Säure in den Boden ein.

Den größten Aufschwung erfuhr die Injektionstechnik in den Jahren 1920 - 1930. Im Zuge von Staudambauten wurden Injektionen zur Verhinderung der Durchströmung unter dem Bauwerk eingesetzt. Sehr großen Anteil an dieser Entwicklung hatte Prof. LUGEON, der als Vorreiter für die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Felsinjektion galt.

Im Jahre 1926 erfuhr die Injektionstechnik einen sprunghaften Fortschritt durch die Entwicklung einer Chemikalinjektion auf der Basis reiner Lösungen durch den Holländer H. JOOSTEN. Bei der Anwendung des Joosten-Verfahrens werden nacheinander hochkonzentriertes Wasserglas und Chlorcalcium in den Boden injiziert. Als Produkt der Reaktion der beiden Komponenten entsteht ein Kieselsäuregel, das das injizierte Lockergestein in ein sandsteinähnliches Gefüge verfestigt und die Durchlässigkeit verringert.

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

Neben Lugeon prägte der Ingenieur LEFRANC die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes. Während der Lugeon-Test zur Bestimmung der Durchlässigkeit im Fels (Einpressversuch) verwendet wird, wird der Lefranc-Test für die Bestimmung der Durchlässigkeit im Lockergestein (Versickerungsversuch) herangezogen.

In den Jahren 1950 - 1955 wurde ein chemisches Einkomponenten-Verfahren zur Injektion von Lockergesteinsböden entwickelt. Zur gleichen Zeit wurde in Frankreich ein Ventilrohr („tube á manchette“) entwickelt. Diese Ventilrohre ermöglichen die Herstellung gezielter geometrisch vorgegebener Injektionskörper und sind die Grundlage der bis heute verwendeten Manschettenrohre.

In Österreich wurde 1950 erstmals Bentonit als Stabilisator in Zementsuspensionen im Zuge von umfangreichen Injektionsarbeiten bei großen Wasserkraftbauwerken eingesetzt.

Im Jahre 1968 erschien das erste wirklich umfassende Fachbuch über Injektionstechnik mit dem Titel „Bodeninjektionstechnik“ („Injection des sols“) von HENRI CAMBEFORT.

Seit 1980 werden Kunstharze und Polyurethanschäume für Injektionszwecke entwickelt. Ihre Hauptanwendungsgebiete sind die kraftschlüssige Injektion von Rissen in Stahlbetonbauwerken und die Abdichtung bei großen Wassereintritten. In Anwendung dieser neuen Entwicklung kommt es in Österreich zu umfangreichen Injektionsarbeiten im Kraftwerksbau.

Großen Einfluss auf die Injektionstechnik hatten die verstärkt aufkommenden Ansprüche des Umweltschutzes. Dadurch wurden die Chemicalverfahren gegenüber anderen Bauverfahren in den Hintergrund gerückt. Alternativ wurde versucht, Mikrozemente zu entwickeln, wobei diese auf Grund ihrer Kosten und der schwierigen Handhabung nur eine untergeordnete Rolle spielen.

2.3. Einteilung der Injektionen [3], [18]

Abbildung 2.1 zeigt eine Übersicht aller gängigen Injektionsverfahren und Prinzipien. Die Einteilung der Injektionen erfolgt nach Art der Baugrundverdrängung:

- Injektion ohne Baugrundverdrängung (verdrängungsfreie Injektion)
 - *Poreinjektionen* (Imprägnation durch Porenverfüllung) werden angewandt, um alle zugänglichen Zwischenräume zwischen den Körnern in durchlässigem Lockergestein zu verfüllen, ohne die ursprüngliche Lagerung des Baugrundes zu verändern. Dadurch werden Festigkeit und Dichte erhöht, während die Durchlässigkeit verringert wird.

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

- *Kluft- und Kontaktinjektionen* zielen auf die Verfüllung offener Klüfte, Risse und Spalten im Fels ohne Erzeugung neuer oder Aufweitung vorhandener Risse mit Injektionsgut ab.
- Die *Hohlraumverfüllung* wird zur Verfüllung von großen natürlichen oder künstlichen Öffnungen angewendet. Bei dieser Injektion erfolgt das Einbringen des Injektionsgutes drucklos oder unter geringem Druck.
- Injektion mit Baugrundverdrängung (Verdrängungsinjektion)
 - Die *Hydraulische Rissbildung* dient der Stabilisierung oder Verfestigung des Baugrundes, der Erzeugung von kontrollierten Hebungen von Bauwerken oder der Erzielung einer Abdichtungswirkung durch Herstellung von Abschottungen im Baugrund.
 - Als *Verdichtungsinjektion* wird das Einbringen von steifem (viskosem) Injektionsgut in den Untergrund verstanden. Dadurch wird eine Verdrängung und Verformung im Boden erzielt, ohne diesen aufzubrechen.

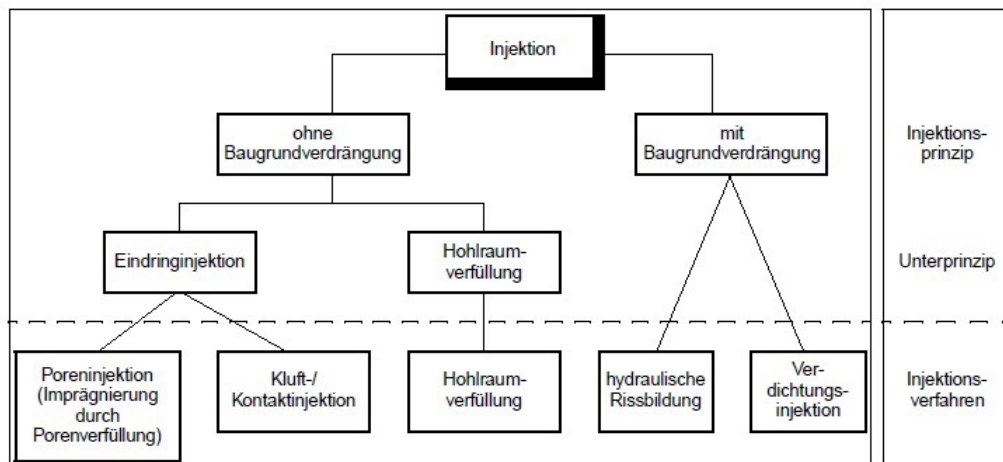


Abbildung 2.1.: Injektionsprinzipien und -verfahren aus: [3]

2.4. Grenzen der Injizierbarkeit [38]

Die Injizierbarkeit eines Lockergesteinbodens wird von verschiedenen Faktoren bestimmt. Zu diesen Faktoren zählen die Kornverteilung, der Ungleichkörnigkeitsgrad, die Lagerungsdichte, der Durchlässigkeitsbeiwert, der Porenanteil und der Porendurchmesser, sowie der Durchmesser der Porenengstellen.

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

2.4.1. Kornverteilung [31], [38], [42], [43]

Einen ersten Anhaltspunkt, ob ein Boden injizierbar ist, liefern die Grenzkornverteilungen (siehe Abbildung 2.2). Diese definieren die untere Einsatzgrenze des Injektionsmediums. Das heißt, dass der feinkörnigste noch injizierbare Erdstoff die Grenze der Injizierbarkeit darstellt.

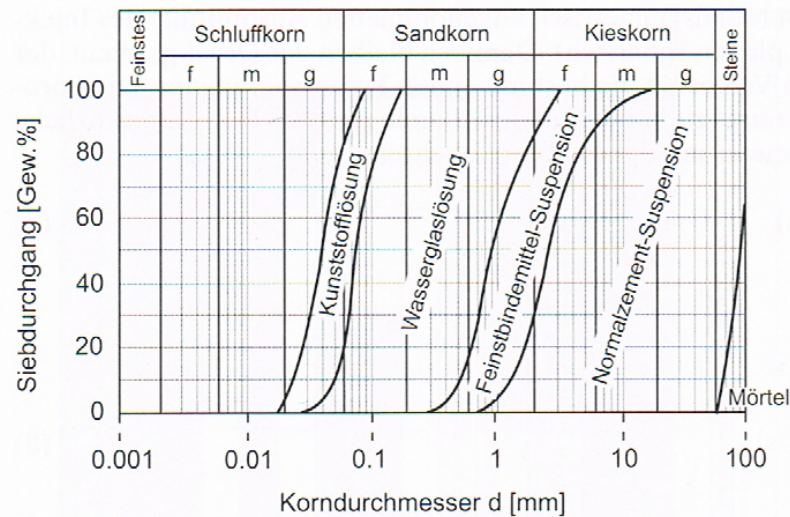


Abbildung 2.2.: Anwendungsgrenzen von Injektionsmitteln aus: [37]

Diese Grenzkornverteilungen basieren auf den Ergebnissen aus Versuchsreihen mit unterschiedlichen Erdstoffen. Dieses Kriterium gilt jedoch nur unter Berücksichtigung der gesetzten Randbedingungen. Weicht die Lagerungsdichte und die Ungleichförmigkeit des zu injizierenden Bodens von der im Labor untersuchten Probe ab, kann seine Injizierbarkeit nicht mehr anhand der Grenzkornverteilungen abgeleitet werden.

Neben diesem experimentell ermittelten Injektionskriterium gibt es ein, auf dem Filterkriterium basierendes, empirisch ermitteltes Injektionskriterium. Für einen einigermaßen gleichkörnigen Boden wird das Verhältnis zwischen dem Korndurchmesser D_{15} des zu injizierenden Bodens zu dem Korndurchmesser d_{85} des Injektionsmaterials ermittelt (siehe Gleichung (2.1)). Ein Boden gilt dann als injizierbar, wenn dieser Quotient einen Grenzwert überschreitet.

Die Kennwerte der Injektionssuspension werden sowohl vom Wasser/Feststoff-Verhältnis als auch vom Dispersierungsgrad der Suspensionsfeststoffe beeinflusst. Auf die Kennwerte des zu injizierenden Bodens haben sowohl die Ungleichförmigkeit der Kornverteilung als auch die Lagerungsdichte Einfluss.

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

$$N = \frac{D_{15}}{d_{85}} \quad (2.1)$$

Da diese Beurteilung auf Erfahrungswerten und Laborversuchen basiert, kommen verschiedene Autoren zu unterschiedlichen Grenzwerten. Während MITCHELL [35] die Injizierbarkeit bei $N > 24$ als gegeben sieht, setzt NONVEILLER [36] die Grenze der gegebenen Injizierbarkeit bei $N > 20$ an. Nach KUTZNER [32] ist die Injizierbarkeit sogar erst bei $N \geq 40$ gegeben. Nicht nur bei den Grenzen zur gegebenen Injizierbarkeit herrschen bei den Autoren unterschiedliche Ansätze, sondern auch bei den Grenzen der nicht gegebenen Injizierbarkeit. MITCHELL geht von einer Grenze bei $N < 11$ aus, während NONVEILLER diese Grenze bereits bei $N < 9$ sieht. Liegt der Quotient zwischen den Werten der gegebenen und nicht gegebenen Injizierbarkeit, muss für jedes Injektionsprojekt separat entschieden werden [18].

In Tabelle 2.1 wird ein Überblick über die vorhandenen N-Kriterien und den zu Ermittlung dieser Werte untersuchten Bodens gegeben.

Tabelle 2.1.: Übersicht über die N-Kriterien

Kriterium	D_{15}/d_{85}			
Quelle	KUTZNER [32]	MITCHELL [35]	KING/BUSCH [29]	KRAVETZ [30]
möglich	≥ 40	> 24	≥ 16	$> 5 - 20$
nicht möglich	-	< 11	-	-
untersuchter Boden	enggestufte Kiese	k.A.	k.A.	k.A.

Kriterium	D_{15}/d_{85}	D_{10}/d_{95}	D_{10}/d_{90}	D_{10}/d_{100}
Quelle	NONVEILLER [36]	KING/BUSCH [29]	DONEL [21]	BELL [16]
möglich	> 20	> 8	> 10	> 10
nicht möglich	< 9	-	-	-
untersuchter Boden	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

2.4.2. Durchlässigkeit [32], [42], [43]

Die Injizierbarkeit eines Mediums wurde seit dem Beginn der wissenschaftlichen Untersuchungen mit der Durchlässigkeit nach *Darcy* in Verbindung gebracht. Abbildung 2.3 zeigt die Anwendungsgrenzen der Injektionsmittel in Abhängigkeit der mittleren Korngröße über die Durchlässigkeit des Untergrundes.

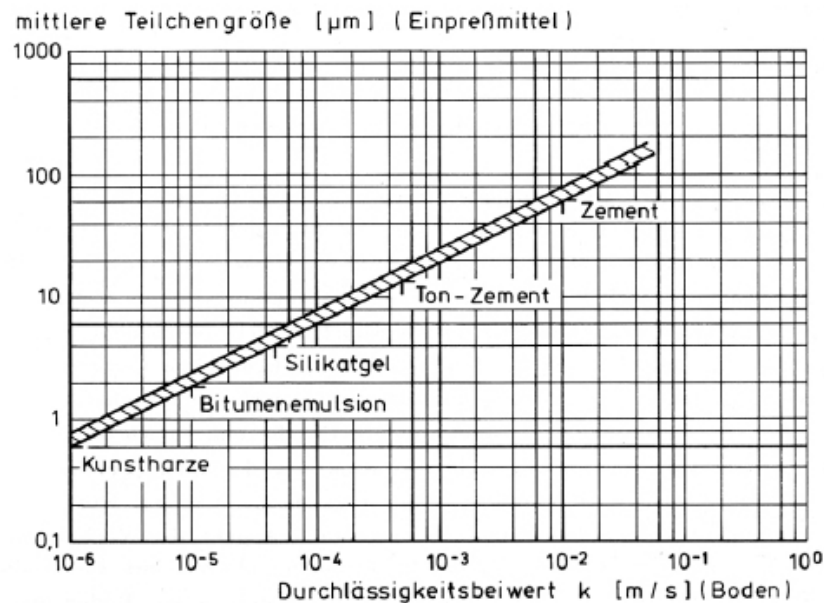


Abbildung 2.3.: Grenzen der Eindringfähigkeit der Injektionsmaterialien in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Untergrundes aus: [20]

Dieses Kriterium basiert auf den tatsächlich physikalischen Vorgängen der Penetration von Injektionssuspensionen im Porenraum. Die Durchlässigkeit eines Bodens hängt direkt von der vorherrschenden Porenstruktur ab. Daher kann sie als geeigneter Parameter zur Beschreibung der Penetrierbarkeit herangezogen werden. Als Nachteil muss genannt werden, dass die Ergebnisse von Durchlässigkeitsversuchen, die im Labor durchgeführt wurden, stark von denen in-situ abweichen. Daher führen nur letztgenannte Untersuchungen zu sinnvollen Ergebnissen.

Weiters muss berücksichtigt werden, dass die Abschätzung der Injizierbarkeit nur für Injektionsmassen zulässig ist, die ein ähnliches Fließverhalten wie Wasser aufweisen (NEWTON'sches Fluid). Zusätzlich dürfen die Eigenschaften der Injektionsmassen nicht durch die Strömung durch das Korngerüst beeinflusst werden. Diese Charakteristika treffen vornehmlich auf chemische Injektionslösungen zu (z.B.: Silikatgele). Da es sich bei Injektionssuspensionen um BINGHAM'sche Fluide handelt, können Aussagen über

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

den Injektionserfolg unter Heranziehen der Durchlässigkeit nur sehr schwer getroffen werden.

2.4.3. Porenengstelle [43], [45]

Ein zu injizierender Boden muss so beschaffen sein, dass ausreichend Fließwege vorhanden sind. Dadurch wird gewährleistet, dass ein Eindringen der Suspensionspartikel in den Hohlraum möglich ist. Sowohl SCHULZE [43] als auch SCHULER und BRAUNS [42] legen für die Beurteilung der Injizierbarkeit die sogenannte Porenengstellenverteilung (PEV) zu Grunde.

Eine Porenengstelle ist als Zwischenraum von drei sich berührenden, unterschiedlich großen, kugelförmig angenommenen Körnern mit den Radien r_1 , r_2 und r_3 definiert (siehe Abbildung 2.4). Gemäß dieser Abbildung wird die Porenengstelle mit einem eingeschriebenen Kreis mit dem Radius r_p definiert.

Dadurch ergibt sich der Durchmesser der Porenengstelle zu:

$$d_p = 2 \cdot r_p [m]. \quad (2.2)$$

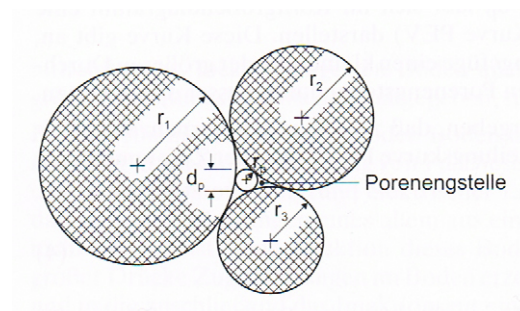


Abbildung 2.4.: Ebener Schnitt durch eine Porenengstelle aus: [43]

Die Ermittlung der unterschiedlichen Größen der Porenengstellen kann mit Hilfe der Korngrößenverteilung erfolgen (Abbildung 2.5, Kurve MV). Unter Annahme gleicher Wichten und einer Kugelform der Körner lässt sich die Kornanzahlverteilungskurve ermitteln. Diese ist in Abbildung 2.5 durch die Kurve AV dargestellt. Im nächsten Schritt wird die Kornanzahlverteilungskurve in beliebig viele Klassen mit einem maßgebenden Korndurchmesser d_i unterteilt. Die Anzahl der Klassen kann zwischen 5 und 10 variieren. Danach werden alle möglichen Kombinationen von drei sich berührenden Körnern und den dazugehörigen Durchmessern d_p ermittelt. Jede Gruppe wird mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit P versehen. Anschließend werden die Werte nach steigendem d_p

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

geordnet und die dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten addiert. Dadurch lässt sich eine Porenengstellenverteilungskurve (Abbildung 2.5, Kurve PEV) darstellen. Anhand dieser Kurve kann abgelesen werden, wieviel Prozent der Porenengstellen in einem Korngefüge einen kleineren oder größeren Durchmesser auf den jeweils betrachteten Durchmesser d_p haben.

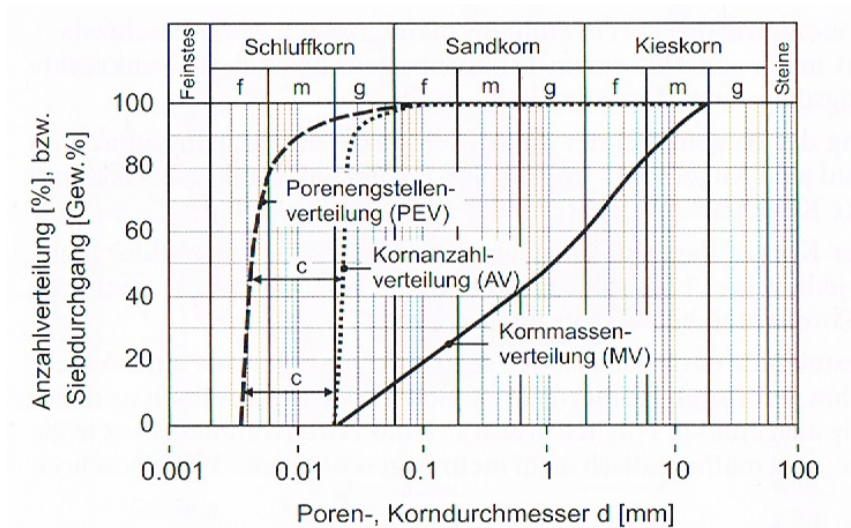


Abbildung 2.5.: Ermittlung der Porenengstellenverteilung aus der Korngrößenverteilung aus: [43]

Zwischen der Kornanzahlverteilungskurve AV und der zugehörigen Porenengstellenverteilungskurve PEV ermittelte SCHULZE [43] die in Gleichung (2.3) dargestellte vereinfachte Beziehung. Der in dieser Gleichung vorkommende Proportionalitätsfaktor c liegt zwischen 5,5 (für ungleichförmige Böden) und 6,5 (für gleichförmige Böden). Diese Beziehung ist in Abbildung 2.5 ersichtlich.

$$d_{p(PEV)} = \frac{1}{c} \cdot d_{(AV)}[m] \quad (2.3)$$

Abbildung 2.4 zeigt, dass eine Penetration stattfinden kann, wenn der größte Partikel des Injektionsgutes mit dem Durchmesser $d_{100,Sus}$ kleiner ist als der kleinste zur Verfügung stehenden Hohlraum mit dem Durchmesser $d_{0,P}$. Daraus leitet sich folgendes Kriterium ab.

$$N_i = \frac{d_{0,P}}{d_{100,Sus}} \quad (2.4)$$

In dieser Gleichung steht N_i für die Injektionskennzahl. Sobald diese den Wert 1 übersteigt, findet eine Penetration des Bodengefüges statt.

2.5. Injektionsmittel [3], [21]

Die zementbasierten Injektionsmitteln werden in Suspensionen sowie in Mörtel und Pasten eingeteilt. Tabelle 2.2 enthält die jeweilige Begriffsbestimmung, Zusammensetzung sowie Anwendungsbereiche.

Tabelle 2.2.: Injektionsmittel aus: [41]

Art	Mörtel und Pasten	Suspensionen
Begriffsbestimmung	Suspension mit sehr hohem Feststoffanteil	Feine Verteilung eines nicht gelösten Stoffes in einer Trägerflüssigkeit
Zusammensetzung	Mischung aus: Wasser, Zement, Sand und ggf. speziellen Zusätzen, W/Z-Wert i.a. kleiner 1	Mischungen aus: Wasser, Zement oder Feinstbindemittel und ggf. Bentonit, Flugasche o.ä. Stoffen W/Z-Wert i.a. größer 1
Anwendung	Verfüllen von Hohlräumen und Spalten	Abdichten und Verfestigung von Kies- und Sandböden, Klüften und Spalten im Fels

Bei der Wahl des Injektionsmaterials sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Zweck der Injektion,
- Rheologie (Viskosität, Fließgrenze usw.),
- Abbindedauer und Stabilität,
- Partikelgröße,
- Festigkeit und Dauerhaftigkeit sowie
- Toxizität.

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

2.5.1. Hydraulische Bindemittel und Zemente [3], [11], [22]

Zu den hydraulischen Bindemitteln gehören alle Zemente und ähnliche Stoffe, die durch eine chemische Reaktion mit dem Anmachwasser erhärten. Das Wasser-Zement-Gemisch wird als Zementleim bezeichnet. Über den Prozess der Hydratation erstarrt der Zementleim und es entsteht Zementstein. Diese Reaktion findet sowohl unter Wasser als auch bei Luftlagerung statt.

2.5.1.1. Einteilung der Zemente [11], [44]

Hauptarten	Bezeichnung der 27 Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung (Massenanteile in Prozent ^a)										Nebenbestandteile	
			Hauptbestandteile											
			Klinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolan		Flugasche		Ge-brannter Schiefer	Kalkstein			
						natürlich	natürlich getempert	kiesel-säurereich	kalk-reich		L	LL		
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portlandzement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silicastaubzement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-puzzolanzement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-flugaschezement	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	Portland-schieferzement	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	Portland-schieferzement	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
Portland-kalksteinzement	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
	CEM III/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
Portlandkompositzement ^c	CEM II/A-M	80-88	12-20										0-5	
	CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzzolan-zement ^c	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Komposit-zement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49			-	-	-	-	0-5	

^a Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.
^b Der Anteil an Silicastaub ist auf 10 % begrenzt.
^c In den Portlandkompositzementen CEM II/A-M und CEM II/B-M, in den Puzzolanzementen CEM IV/A und CEM IV/B und in den Kompositzementen CEM V/A und CEM V/B müssen die Hauptbestandteile außer Klinker durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden (Beispiele: siehe Abschnitt 8).

Abbildung 2.6.: Die 27 Produkte der Familie der Normalzemente aus: [11]

Zemente werden sowohl nach ihrer Zusammensetzung, als auch nach ihrer Korngrößenverteilung unterschieden. Für die Unterscheidung anhand der Korngrößenverteilung wird

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

die Korngröße bei 95% Siebdurchgang ermittelt. Demnach ergibt sich die Unterscheidung nach [44] zu:

- Feinstbindemittel $d_{95} \leq 20 \mu m$,
- Feinbindemittel $20 \mu m < d_{95} \leq 40 \mu m$ und
- Standardbindemittel (Normalzement) $d_{95} > 40 \mu m$

Die Familie der Normalzemente wird gemäß ÖNORM EN 197-1 [11] in fünf Hauptzementarten eingeteilt:

- CEM I - Portlandzement,
- CEM II - Portlandkompositzement,
- CEM III - Hochofenzement,
- CEM IV - Puzzolanzement sowie
- CEM V - Kompositzement.

Diese Zementarten unterscheiden sich nach ihrer Zusammensetzung. Ihre Zusammensetzung ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

2.5.1.2. Hauptbestandteile [22]

Gemäß ÖNORM EN 197-1 [11] zählen Portlandzementklinker (K), Hüttensand (S), natürliche Puzzolane (P), thermisch behandelte Puzzolane (Q), kieselsäurereiche Flugasche (V), kalkreiche Flugasche (W), gebrannter Schiefer (T), Kalkstein (L, LL) und Silicastaub (D) zu den Hauptbestandteilen der Zemente. Diese Stoffe werden entweder getrennt oder mit dem Klinker zusammen gemahlen.

Tabelle 2.3.: Partikelgrößen und Mengenanteile der Hauptbestandteile nach: [40]

Bestandteil	(K)	(S)	(P, Q)	(V, W)	(T)	(L, LL)	(D)
Partikelgröße [μm]	1 – 80	1 – 200	-	0,1 – 40	-	≤ 8	$< 0,01 - 1$
Mittlerer DM [μm]	15	10 – 20	-	20	-	-	0,1
K ... Portlandzementklinker; S... Hüttensand; P... natürliche Puzzolane Q... künstliche Puzzolane; V... kieselsäurereiche Flugasche W... kalkreiche Flugasche; T... gebrannter Schiefer D... Silicastaub; L, LL... gemahlener Kalkstein							

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

In Tabelle 2.3 sind die üblichen Partikelgrößenbereiche und die mittleren Durchmesser der Hauptbestandteile dargestellt. Abbildung 2.7 zeigt die Partikelgrößenbereiche von Flugasche und Hüttsand nach [40].

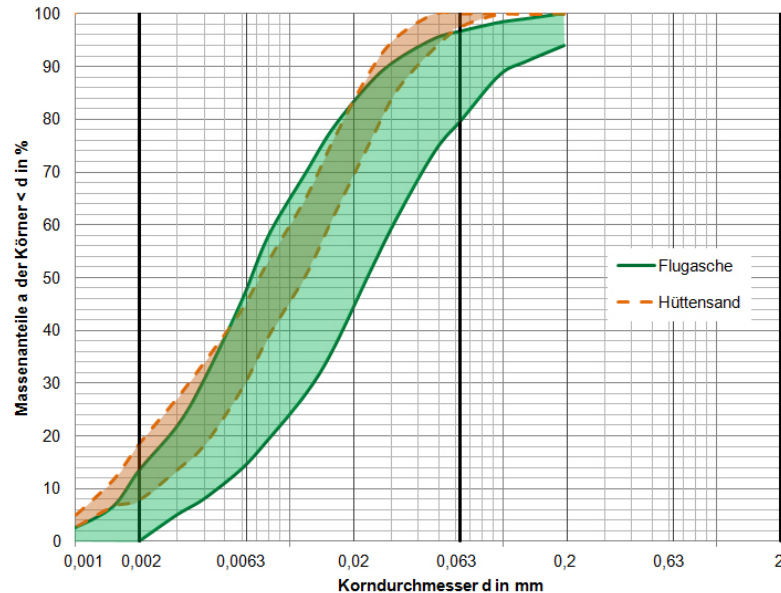


Abbildung 2.7.: Korngrößenverteilung von Zuschlagstoffen nach: [40]

Portlandzementklinker (K) [33], [39], [40]

Den Ausgangsstoff für den Portlandzementklinker bildet eine Mischung aus Kalkstein und Ton, die unter Zugabe von Korrekturstoffen (z.B. Quarzsand) im Drehofen bis auf etwa 1450°C erhitzt wird, sodass durch das sogenannte „Sintern“ die Klinkerphasen Tricalciumsilikat $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (kurz C_3S), Dicalciumsilikat $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (kurz C_2S), Tricalciumaluminat $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (kurz C_3A) und Calciumaluminatferrit $4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (kurz C_4AF) entstehen. Neben diesen Klinkerphasen können noch Freikalk (CaO_{frei}) und Periklas (MgO_{frei}) im gemahlene Produkt enthalten sein.

Bei Normalzementen variiert die spezifische Oberfläche nach Blaine zwischen 2.500 und $6.000 \text{ cm}^2/\text{g}$, die einen sehr großen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit hat. Die Hydratation und die Festigkeitsentwicklung laufen umso schneller ab, je größer die Mahlfineinheit, und dadurch die spezifische Oberfläche, ist.

Die einzelnen Hauptklinkerphasen beeinflussen die Eigenschaften des Zements wesentlich. Durch geeignete Rohstoffauswahl können die Anteile der Hauptklinkerphasen variiert werden, was eine zielgerichtete Veränderung der Eigenschaften des Portlandzements ermöglicht. Während das Tricalciumsilikat C_3S sehr schnell erhärtet und eine hohe

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

Anfangsfestigkeit aufweist, erhärtet das Dicalciumsilikat C_2S nur langsam, aber stetig. Die beiden anderen Phasen (C_4AF und C_3A) haben nur einen sehr geringen Einfluss auf die Endfestigkeit. Da das Tricalciumaluminat C_3A sehr schnell mit Wasser reagiert, kann es einen wesentlichen Einfluss auf die Frühfestigkeit besitzen.

Weitere Unterschiede in den Eigenschaften der Klinkerminerale sind die Hydratationsgeschwindigkeit und die während der Hydratation freigesetzte Wärmeenergie. Beim Tricalciumaluminat C_3A ist die freigesetzte Wärme am größten, während sie beim Dicalciumsilikat C_2S und dem Calciumaluminatferrit C_4AF im mittleren Bereich liegt. Den geringsten Betrag an Wärmefreisetzung weist das Dicalciumsilikat C_2S auf.

Hüttensand (S) [33], [39]

Hüttensand fällt als Nebenprodukt der Eisenerzverhüttung an. Er entsteht nach dem Abziehen der Hochofenschlacke und sofortigem Ablöschen mit Wasser. Danach liegt eine glasig erstarrte Kalk-Tonerde-Silikat Verbindung vor. Diese besteht hauptsächlich aus Calciumoxid CaO (etwa 30 - 50%) und Siliciumdioxid SiO_2 (etwa 25 - 40%) sowie in geringem Umfang aus Aluminiumoxid Al_2O_3 (etwa 5 - 15%) und Magnesiumoxid MgO (1 - 10%). Die chemische Zusammensetzung hängt von der Zusammensetzung des Erzes und Art und Menge der Zuschläge ab.

Bei Hüttensand handelt es sich um einen latent-hydraulischen Stoff. Diese Stoffe brauchen aufgrund ihres sehr langsamen Erhärungsvermögens einen Anreger, damit eine hinreichende Festigkeitsentwicklung stattfinden kann. Vom Hüttensand als Zuschlagstoff wird erwartet, dass er möglichst schnell chemisch mit dem Anmachwasser reagiert und eine ausreichende Menge an Reaktionsprodukten liefert. Diese Reaktionsprodukte bilden ein festes und dichtes Gefüge, da sie in die mit Wasser gefüllten Zwischenräume zwischen den Zuschlägen eindringen können. Der Hydratationsvorgang von Hüttensand setzt wenig Wärme frei, wodurch die Wärmeentwicklung des hergestellten Zementes herabgesetzt werden kann.

Gemäß ÖNORM EN 197-1 [11] muss der Hüttensand zu mindestens zwei Drittel aus CaO , MgO und SiO_2 bestehen. Ebenfalls muss das Masseverhältnis $\frac{CaO+MgO}{SiO_2}$ größer als 1,0 sein.

Puzzolane (P, Q) [11], [33], [39]

Puzzolane können entweder natürlichen Ursprungs sein (P), oder technisch hergestellt werden (Q). Puzzolane haben kein eigenes Abbindeverhalten, sondern sie reagieren in Gegenwart von Wasser mit dem gelösten Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$). Dieses wird

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

während des Hydratationsvorganges des Portlandzementklinkers freigesetzt und dient als Anreger der Puzzolane. Dadurch entstehen festigkeitsbildende Calciumaluminat- und Calciumsilikatverbindungen. Die Puzzolane bestehen größtenteils aus reaktionsfähigem Siliciumdioxid und Aluminiumoxid. Weiters finden sich noch Spuren von Eisen(III)-oxid und anderen Oxiden. Der Massenanteil an reaktionsfähigem Siliciumdioxid muss nach ÖNORM EN 197-1 [11] mindestens 25% betragen.

Natürliche Puzzolane (P) sind Stoffe vulkanischen Ursprungs (Traß, Lava), die entweder eine kieselsäurehaltige Zusammensetzung, eine alumo-silikatische Zusammensetzung oder eine Kombination der beiden haben. Beim Traß handelt es sich um einen feingemahlene, sauren Tuffstein, der aus etwa 50 bis 70% reaktionsfähigem SiO_2 besteht. Lavamehl enthält demgegenüber weniger SiO_2 , dafür aber mehr CaO und MgO .

Die künstlichen Puzzolane (Q) erhalten ihre Reaktionsfähigkeit durch einen technischen Prozess. Die Stoffe, die sich hierfür eignen, werden thermisch aktiviert.

Gebannter Schiefer (T) [11], [33], [39]

Der gebrannte Schiefer hat ausgeprägte hydraulische Eigenschaften, die denen des Portlandzementklinkers ähnlich sind. Neben den hydraulischen Eigenschaften verfügt der gebrannte Schiefer auch über puzzolanische Eigenschaften. Diese sind auf den Gehalt an Dicalciumsilikat, Calciumaluminat und Siliciumdioxid zurückzuführen.

Gebannter Schiefer darf dann eingesetzt werden, wenn ein Prüfkörper, der nur aus feingemahlene gebranntem Schiefer besteht, eine Druckfestigkeit von 25 MPa nach 28 Tagen aufweisen kann. Weiters darf das Dehnungsmaß von gebranntem Schiefer, unter Verwendung einer Mischung aus 30% Schiefer und 70% Zement, 10 mm nicht überschreiten.

Flugasche (V, W) [11], [33], [39]

Flugaschen sind staubfeine Partikel und werden aus Rauchgasabscheideanlagen von Kohlekraftwerken, die mit fein gemahlener Kohle (Kohlestaub) betrieben werden, gewonnen. Flugaschen anderer Verbrennungsverfahren dürfen als Zuschlagstoff nicht verwendet werden. Die Zusammensetzung der Flugaschen ist abhängig von der Herkunft der Kohle. Es wird zwischen kieselsäurereichen Flugaschen (V) und kalkreichen Flugaschen (W) unterschieden.

Die spezifische Oberfläche von Flugaschen variiert zwischen 2.000 und 7.500 cm^2/g nach Blaine. Diese große spezifische Oberfläche der Flugaschen hat den Effekt, dass der Wasserrückhalt verbessert und die Neigung zum Bluten des Betons verringert wird.

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

Für die Verwendung als Zuschlagstoff für den Zement ist der Feinstkornanteil von 8 – 10 μm von großer Bedeutung. Durch die Beimischung von Flugaschen kann ein höherer Hydratationsgrad erzielt und eine Steuerung der Wärmeentwicklung ohne Verminderung der Festigkeiten während des Hydratationsprozesses ermöglicht werden.

Kieselsäurereiche Flugaschen (V) werden aus Abscheideanlagen von Steinkohlekraftwerken gewonnen. Hierbei handelt es sich um einen feinkörnigen Staub, der hauptsächlich aus kugelförmigen Partikeln besteht, und puzzolanische Eigenschaften aufweist. Bestandteile dieser Flugaschen sind hauptsächlich Siliciumdioxid und Aluminiumoxid. Weitere Bestandteile sind Eisen(III)-oxid und Calciumoxid. Gemäß ÖNORM EN 197-1 [11] muss der Anteil von reaktionsfähigem CaO unter 10% liegen. Weiters darf der Anteil an freiem Calciumoxid 1% nicht überschreiten und der Anteil von reaktionsfähigem SiO_2 muss mindestens 25% betragen.

Kalkreiche Flugaschen (W) stammen aus Abscheideanlagen von Braunkohlekraftwerken. Dieser feinkörnige Staub weist hydraulische und puzzolanische Eigenschaften vor. Der Hauptbestandteil dieser Flugaschen sind das reaktionsfähige Calciumoxid (bis zu 50%), das reaktionsfähige Siliciumdioxid sowie das Aluminiumoxid. Weitere Bestandteile sind das Eisen(III)-oxid und das freie Calciumoxid. Gemäß ÖNORM EN 197-1 [11] darf der Anteil an CaO nicht kleiner als 10% sein. Liegt der Anteil des reaktionsfähigen CaO zwischen 10 und 15%, muss der Anteil des reaktionsfähigen SiO_2 mindestens 15% betragen. Falls der Gehalt an freiem CaO zu hoch wird, neigen kalkreiche Flugaschen beim Abbinden zum Treiben.

Kalkstein (L, LL) [11], [33], [39]

Bei gemahlenem Kalkstein handelt es sich um einen inerten Füller, der auf Grund seiner Zusammensetzung besondere Anforderungen erfüllen muss. Der Kalkstein besteht größtenteils aus Calciumcarbonat CaCO_3 , sowie in geringem Umfang aus Ton und organischem Kohlenstoff. Gemäß ÖNORM EN 197-1 [11] muss der CaCO_3 -Gehalt mindestens 75% betragen. Der Tongehalt darf den Anteil von 1,2%, gemessen nach dem Methylenblaufverfahren, nicht überschreiten. Ist der Anteil des organischen Kohlenstoffes $\leq 0,5\%$, wird der Kalkstein mit dem Buchstaben L versehen. Liegt der Anteil des organischen Kohlenstoffes $\leq 0,2\%$, wird der Kalkstein mit LL bezeichnet.

Gemahlener Kalkstein verbessert die Korngrößenverteilung des Zements im feinen Bereich, da der Kalkstein leichter zu mahlen ist, als der Zementklinker. Dadurch füllt der Kalkstein die Zwischenräume zwischen den Zementklinkerpartikeln aus. Wesentliche Eigenschaft des Kalkstein ist die Verminderung des Wasseranspruches.

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

Silicastaub (D) [11], [33], [39]

Bei der Herstellung von Silicium oder Silicumlegierungen entsteht bei der Reduktion von Quarz und Kohle Silicastaub. Dieser besteht aus sehr feinen, amorphen kugeligen Partikeln und muss einen Anteil von mindestens 85% Siliciumdioxid SiO_2 enthalten. Silicastaub verbessert die Kornstruktur des Zements im feinsten Bereich. Mit dem bei der Hydratation entstehenden Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ bildet der Silicastaub eine festigkeitsbildende Phase. Dies geschieht durch eine sehr schnelle Reaktion unter Bildung von Calciumsilikathydrat CSH . Die spezifische Oberfläche des Silicastaubs variiert zwischen 33.000 und 77.000 cm^2/g nach Blaine. Diese hohe spezifische Oberfläche hat den Nachteil, dass der Silicastaub einen sehr hohen Wasseranspruch hat, sodass der maximale Anteil von Silicastaub 10% des Zementgehaltes nicht überschreiten darf.

2.5.1.3. Nebenbestandteile [11]

Als Nebenbestandteile des Zements werden natürliche anorganische mineralische Stoffe, anorganische mineralische Stoffe, die bei der Klinkerherstellung entstehen oder alle als Hauptbestandteil zulässigen Stoffe, sofern diese im Zement nicht als Hauptbestandteil eingesetzt sind, verwendet. Sie verbessern aufgrund ihrer Kornverteilung die physikalischen Eigenschaften des Zements. Es werden Stoffe verwendet, die sowohl inert sind, als auch schwach ausgeprägte hydraulische, latent hydraulische oder puzzolanische Eigenschaften aufweisen. Der Anteil der Nebenbestandteile muss, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, $\leq 5\%$ sein.

Die dem Zement zugegebenen Erstarrungsregler (Gips, Anhydrit u.a.) zählen nicht zu den Nebenbestandteilen.

2.5.2. Anforderungen an Suspensionen auf Zementbasis [32]

Als Injektionszemente kommen Zemente der Hauptarten CEM I (Portlandzemente), CEM II (Portlandkompositzemente) und CEM III (Hochofenzemente) zur Anwendung. Die den Injektionserfolg bestimmenden Merkmale sind die Mahlfeinheit und die Korngrößenverteilung im oberen Bereich. Die Mahlfeinheit beeinflusst sowohl die Fließ- und Sedimentationseigenschaften, als auch die Festigkeitsentwicklung. Weitere wesentliche Anforderungen an die Suspensionen sind die Durchlässigkeit und die Dauerhaftigkeit.

Nach KUTZNER [32] lauten die Mindestanforderungen für Injektionszemente:

- Spezifische Oberfläche von mindestens 3.000 cm^2/g ,
- Größtkorn maximal 0,1 mm,

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

- mindestens 90% der Zementkörner kleiner als 0,05 mm.

2.5.2.1. Fließeigenschaften und Sedimentationsverhalten [18], [32]

Suspensionen, die aus Wasser und Zement bestehen, können vereinfacht als BINGHAM'sche Fluide angesehen werden. Das bedeutet, dass sie über ihre Viskosität η und ihre Fließgrenze τ_f definiert werden. Die Viskosität kann im Labor mittels Rotationsviskosimeter ermittelt werden. Auf der Baustelle können mit dem MARSH-Trichter Rückschlüsse auf die Viskosität getroffen werden. Hierfür wird die Zeit gemessen, die die Suspension benötigt, um aus dem Marsh-Trichter auszufließen.

Die Erhöhung des Wassergehaltes und die damit einhergehende Abnahme des Feststoffgehaltes der Suspensionen bewirken eine Verringerung der Viskosität und der Fließgrenze. Die Fließeigenschaften der Suspensionen können ab einem Wasser-Zement-Wert von etwa 2,0 nicht mehr verbessert werden (siehe Abbildung 2.8). Die Abbildung zeigt ebenso, dass Suspensionen, die W/Z-Werte von 1,0 bis 1,5 aufweisen, in Bezug auf Viskosität und Sedimentation in einem besonders günstigen Bereich liegen.

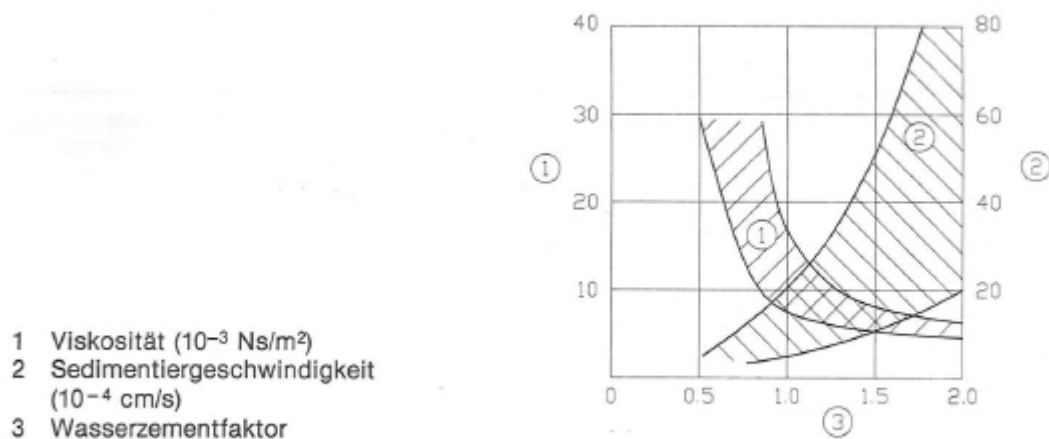


Abbildung 2.8.: Viskosität und Sedimentiergeschwindigkeit von Zementsuspensionen aus: [32]

Für die Verarbeitbarkeit von Suspensionen ist das sogenannte Absetzmaß von großer Bedeutung. Die Feststoffpartikel setzen sich in einer Suspension ab, sobald diese nicht mehr in Bewegung ist. Ein höherer W/Z-Wert bedeutet, neben einer Verringerung der Viskosität und der Fließgrenze, eine Vergrößerung des Wasserabsetzmaßes (siehe Abbildung 2.8). In der Injektionstechnik wird zwischen stabilen und instabilen Suspensionen differenziert. Gemäß EN 12715 [3] werden stabile Suspensionen wie folgt definiert: „Stabile Suspensionen zeigen in 2 Stunden bei einer Temperatur von 20°C im oberen Bereich eines

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

1000-ml-Messzylinders mit 60 mm Innendurchmesser weniger als 5% Klarwasser-Abgabe.“ Alle Suspensionen, die ein höheres Absetzmaß haben, werden als instabil bezeichnet.

Im Bereich der Niederdruckinjektionen werden ausschließlich stabile Suspensionen auf Zementbasis verwendet. Da bereits bei einem W/Z-Wert von 1,0 die Bedingung für stabile Suspensionen nicht mehr gegeben ist, müssen die Suspensionen mit Hilfe eines Zusatzstoffes stabilisiert werden (siehe Abbildung 2.8). Hierfür wird der Suspension i.d.R. Bentonit beigemischt. Charakteristisch für Bentonit ist ein großes Wasserbindevermögen und eine sehr feine Körngrößenverteilung. Bereits ein Zusatz von 1 bis 4%, bezogen auf das Zementgewicht, bewirkt eine Abnahme des Absetzmaßes. Die Zugabe von Bentonit ist jedoch begrenzt. So zeigt sich bereits bei kleinen Beimengungen eine Erhöhung der Viskosität und der Fließgrenze. Ab einer Bentonitzugabe von 6% nehmen die Festigkeiten der erhärteten Suspensionen ab.

2.5.2.2. Durchlässigkeit [32]

Suspensionen auf Zementbasis haben eine für Abdichtungszwecke ausreichend geringe Durchlässigkeit. Die Durchlässigkeit des Zements vor dem Abbinden liegt im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-7} m/s. Durch die hohe Durchlässigkeit wird das Auspressen von Überschusswasser der teilkonsolidierten, abgesetzten Suspensionen ermöglicht. Die Durchlässigkeit der abgebundenen Suspensionen ist abhängig von der Menge des Überschusswassers und dem Prozentsatz des gesättigten Porenraumes. Ein großer Nachteil des Überschusswassers besteht darin, dass es den Zementstein poröser und durchlässiger macht.

Die Durchlässigkeit nimmt mit dem fortschreitenden Abbindeprozess ab. Maßgebend für die Durchlässigkeit eines Injektionskörpers ist der Grad der Porenfüllung. Die Durchlässigkeit eines verpressten Körpers nimmt mit steigendem Grad der Porenfüllung ab.

2.5.2.3. Festigkeit und Festigkeitsentwicklung [32]

Suspensionen auf Zementbasis entwickeln eine für Verfestigungszwecke ausreichende Festigkeit. Die erreichbaren Festigkeiten hängen von der Normfestigkeit des verwendeten Zementes ab. Die Druckfestigkeit von Suspensionen ist jedoch geringer als die Normfestigkeit des Zementes. Abbildung 2.9 stellt den Verlauf der Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Wasser-Zement-Werte, bezogen auf 100% Druckfestigkeit bei einem W/Z-Wert von 0,4, dar. Solange der Anteil des Überschusswassers nicht zu groß wird, entwickeln die Suspensionen ausreichende Festigkeit. Von großer Bedeutung für eine Vielzahl von Injektionsmaßnahmen ist die zeitliche Festigkeitsentwicklung, vor allem, wenn der Einpresskörper schon nach kurzer Zeit belastet wird. Hierfür sind vorab Laborversuche notwendig, um eine ausreichende Frühfestigkeit gewährleisten zu können.

2. GRUNDLAGEN DER INJEKTIONSTECHNIK

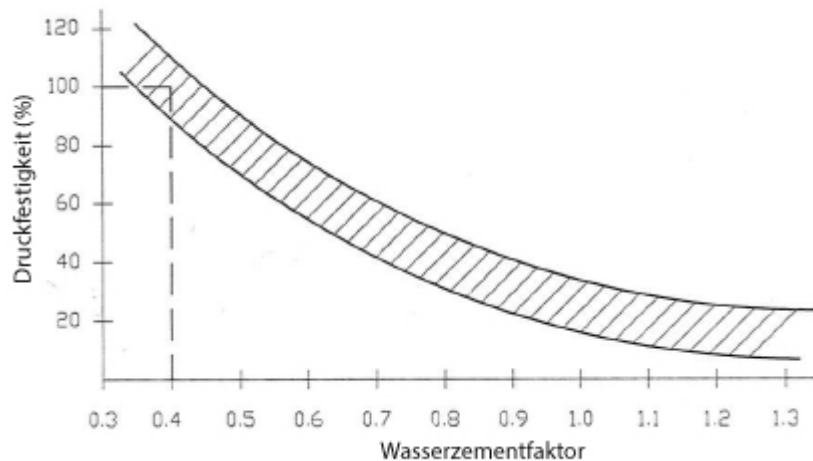


Abbildung 2.9.: Druckfestigkeit von Zementsuspensionen nach 28 Tagen, bezogen auf einen W/Z-Wert von 0,4 aus: [32]

2.5.2.4. Dauerhaftigkeit und Erosionsstabilität [32]

Die Dauerhaftigkeit und die Erosionsstabilität sind unmittelbar an die Durchlässigkeit und die Festigkeit des abgebundenen Injektionsmittels geknüpft. Der Grad der Kluft- oder Porenfüllung des injizierten Mediums spielt ebenfalls eine wesentliche Rolle. Aus dem Zusammenhang von Durchlässigkeit und Festigkeit geht hervor, dass das Auspressen von Überschusswasser eine wesentliche Voraussetzung für die Dauerbeständigkeit und die Erosionsstabilität darstellt. Je weniger Überschusswasser vorhanden ist, umso besser wird die Anforderung an die Wasserabsonderung erfüllt. Demnach sollten nur stabilisierte Zementsuspensionen eingesetzt werden. Gemäß KUTZNER [32] haben nur jene Zementsuspensionen, die einen W/Z-Wert von $\leq 2,0$ aufweisen, eine Dauerbeständigkeit und Erosionsstabilität.

3. Abbindeverhalten der Zemente [33], [40]

Die Festigkeitseigenschaften eines injizierten Lockergesteins hängen von der Festigkeitsentwicklung des verwendeten Zementes ab. Um einen besseren Einblick in die festigkeitsbildenden Eigenschaften der Zemente zu bekommen, wird der Hydratationsprozess und das Abbindeverhalten der einzelnen Zementbestandteile im folgenden Kapitel erläutert.

Die Struktur des Zementsteines entsteht durch die bei der Reaktion von Klinkermineralien und Zuschlagstoffen mit dem Anmachwasser gebildeten wasserunlöslichen Hydratationsprodukte. Die Hydratation ist ein komplexer Vorgang, der die Reaktion des Zementes mit Wasser, die Wasserbindung und die Erhärtung beinhaltet. Sind die Wasserbindung und Volumenentwicklung der Hydrate sowie die Porosität bekannt, ist eine Prognose über das grundsätzliche Verhalten bei mechanischen Beanspruchungen und chemischen Einwirkungen möglich. Der Hydratationsprozess setzt Wärme, die sogenannte Hydratationswärme, frei. Maßgebend für die Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Zementsteines ist das Gefüge, das durch die Hydratationsprodukte des Zements gebildet wird.

Im folgenden Kapitel werden die in Tabelle 3.1 dargestellten Abkürzungen für die Klinkermineralien verwendet.

Tabelle 3.1.: Kurzschreibweise der Klinkermineralien

$C^1 \dots CaO$	$S^1 \dots SiO_2$
$A^1 \dots Al_2O_3$	$F^1 \dots Fe_2O_3$
$H^1 \dots H_2O$	$C_3S^1 \dots 3 CaO SiO_2$
$C_2S^1 \dots 2 CaO SiO_2$	$Cs^1 \dots CaSO_4$
$CH^1 \dots Ca(OH)_2$	$C_3A^1 \dots 3 CaO Al_2O_3$
$C_4AF^1 \dots 4 CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$	

¹C ... Calciumoxid; S ... Siliciumdioxid; A ... Aluminiumoxid; F ... Eisen(III)-oxid; H ... Wasser; C₃S ... Tricalciumsilikat; C₂S ... Dicalciumsilikat; Cs ... Calciumsulfat; CH ... Calciumhydroxid; C₃A ... Tricalciumaluminat; C₄AF ... Calciumaluminatferrit

3.1. Hydratationsreaktionen [40]

Die chemischen Vorgänge, die während der Hydratation ablaufen, werden in der Biontechnologie durch Standardreaktionen vereinfacht dargestellt. Zu Beginn der Hydratation des Zementklinkers reagieren die einzelnen mineralogischen Bestandteile an der Oberfläche der Zementpartikel unterschiedlich. Danach verlaufen die Reaktionen aufgrund der Verteilung der einzelnen Klinkerphasen und der Wechselwirkungen weitgehend gleichmäßig. Die latent-hydraulischen und puzzolanischen Bestandteile des Zementes werden durch die Porenlösung aktiviert.

Damit der Hydratationsvorgang beschrieben werden kann, muss vereinfacht angenommen werden, dass die einzelnen Zementpartikel jeweils nur eine mineralogische Zusammensetzung haben, die wechselseitige Beeinflussung der Hydratation der Klinkerphasen unabhängig von der Konzentration der Stoffe erfolgt und Hydrate definierter chemischer Zusammensetzung entstehen.

3.1.1. Abbindeverhalten der silikatischen Klinkerbestandteile [33], [40]

Die silikatischen Klinkerphasen Tricalciumsilikat C_3S und Dicalciumsilikat C_2S dominieren den Reaktionsablauf und die Strukturbildung, da ihre Hydrate nach der vollständigen Umsetzung einen Anteil von rund 70% des Gesamtvolumens des Zementsteines besitzen. Diese Hydratationsprodukte weisen eine besondere Struktur und Festigkeit auf und haben maßgeblichen Einfluss auf die bautechnischen Eigenschaften des Zementes. Die Hydrate der Klinkermineralien C_3S und C_2S werden als C-S-H-Phase oder als C-S-H-Gel bezeichnet.

Unmittelbar nach Wasserzugabe reagieren die silikatischen Klinkermineralien. Es finden sowohl Prozesse der Hydrolyse als auch topochemische Reaktionen² statt. Aufgrund der in Lösung gehenden Ionen kommt es zu einer Übersättigung des Anmachwassers mit Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ und damit innerhalb weniger Minuten zu einem starken Anstieg des pH-Wertes. Neben Prozessen der Hydrolyse und topochemischen Reaktionen finden parallel laufende Oberflächenreaktionen statt. Durch die Trisulfatbildung entsteht eine dünne, dichte Schicht aus feinstrukturiertem Calciumsilikathydrat (C-S-H). Diese schließt die Oberfläche ab und unterbindet die weitere Reaktion. Nachdem diese Ruheperiode überwunden wurde, findet eine verstärkte Bildung von C-S-H statt.

Die ersten 24 Stunden sind gekennzeichnet durch die Entstehung von Calciumsilikathydraten in Form von langen Fasern. Diese überbrücken die wassergefüllten Zwischenräume

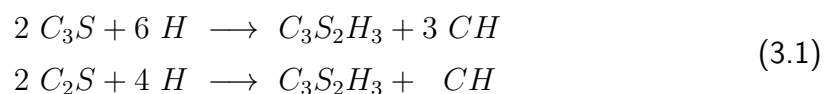
²Topochemische Reaktionen sind Reaktionen, die an oder in festen Stoffen ablaufen.

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

und verbinden die Zementpartikel untereinander. Dadurch entsteht ein erstes Gefüge, welches das Grundgerüst für den späteren Zementstein darstellt. Die langfasrigen C-S-H weisen eine hohe Festigkeit und eine hohe Porosität auf und sind CaO -reich. In den Zwischenräumen entstehen in der nächsten Hydratationsstufe kurzfasrige C-S-H, die eine geringere Festigkeit besitzen.

Der Erhärtungsvorgang der silikatischen Klinkermineralien ist abhängig von der Lagerungstemperatur. Bei niedrigen Temperaturen wird der Vorgang verzögert, wodurch die zweite Hydratationsstufe länger andauert und die Menge an langfasrigen Hydraten zunimmt. Dadurch ist die Endfestigkeit gegenüber einer Erhärtung bei Normaltemperatur größer. Findet der Erhärtungsvorgang bei höheren Temperaturen statt, bilden sich hauptsächlich kurzfasrige C-S-H. Dies resultiert zwar in einer kürzeren Erhärtungszeit, der entstehende Zementstein weist jedoch eine höhere Porosität und geringere Endfestigkeit auf.

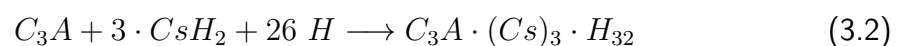
Selbst bei Gemischen mit üblichen Wassergehalten entstehen bei der Hydratation von C_3S und C_2S Calciumsilikathydrate mit unterschiedlicher Zusammensetzung. Der Grund dafür sind die Auswirkungen der Reaktionsbedingungen, wie Mahlfineinheit, Zusammensetzung des Zementes, Temperatur u.a. sowie der Reaktionsgrad. Das Ca/Si -Verhältnis variiert bei erhärtetem Zement zwischen 1, 2 und 2, 3. Als Mittelwert für das Ca/Si -Verhältnis wird der Wert 1, 5 angenommen. Dadurch ergeben sich folgende Gleichungen:



Die im Gefüge vorkommenden Calciumaluminathydrate und das Calciumhydroxid verdichten die Struktur und verbessern die Festigkeitsentwicklung. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die Festigkeit parallel laufend zum steigenden Hydratationsgrad zu.

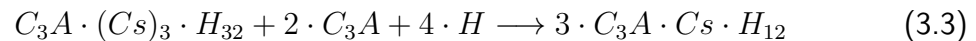
3.1.2. Abbindeverhalten der aluminatischen Klinkerbestandteile [33], [40]

Kurz nach der Zugabe des Anmachwassers reagiert das C_3A sehr heftig mit dem ungebundenem Wasser und dem darin gelöstem Anhydrit (Calciumsulfat Cs). Anhydrit besitzt eine erstarrungsregulierende Wirkung, die bei Raumtemperatur ungefähr eine Stunde anhält. Es entsteht das sulfatreiche Hydratationsprodukt $C_3A(Cs)_3H_{32}$ (= Trisulfat oder Ettringit), das die Oberfläche der Zementkörner mit einer feinkristallinen, nadelförmigen Struktur bedeckt und dadurch die weitere Reaktion verhindert.



3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

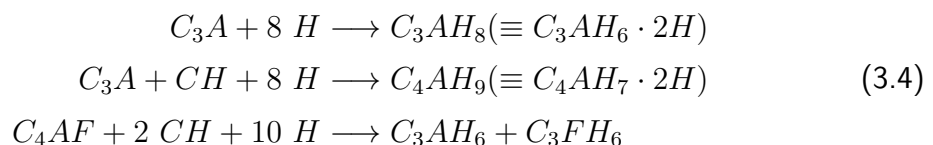
Die entstandenen Reaktionsprodukte behindern die Bewegung der Zementkörner nur unwesentlich, wodurch die Konsistenz nur geringfügig steifer wird. Die Bildung von Trisulfat aus dem C_3A findet so lange statt, bis der im Anmachwasser gelöste Anhydrit verbraucht ist. Danach wandelt sich das gebildete Trisulfat durch Reaktion mit den in Lösung gehenden restlichen aluminatischen Bestandteilen zu Monosulfat um. Diese Umwandlung setzt ungefähr nach dem 1. Tag ein.



Das zugesetzte Calciumsulfat (Gips, Anhydrit) sollte nach 12 Stunden aufgebraucht sein, da sonst Mono- und Trisulfat im bereits erhärteten Zementstein gebildet wird. Dies würde aufgrund des aus der Volumenvergrößerung resultierenden Kristallisationsdruckes zu Schäden in der Mikrostruktur des Zementsteines führen und eine Reduktion der Festigkeiten nach sich ziehen.

Ist das Calciumsulfat verbraucht, bilden sich bei der Hydratation der aluminatischen Klinkerbestandteile (C_3A und C_4AF), in Anwesenheit von Calciumhydroxid CH , Calciumaluminathydrate $C-A-H$ und $C-(A,F)-H$. Anfänglich und bei Aufrechterhaltung des großen Wasserangebotes bilden sich in Anwesenheit von Calciumhydroxid wasserreiche Produkte mit unterschiedlich fester Bindung der Wassermoleküle ($C_3AH_{12} \equiv C_3AH_6 \cdot 6H$). Bei abnehmendem Wassergehalt und Fortschreiten der Hydratation entstehen wasserärmere Hydrate aus der Lösung, als deren Endstufe C_3AH_6 bzw. C_4AH_7 anzusehen sind.

Bei der Hydratation bei Normaltemperatur und bei hinreichendem Wasserangebot bilden sich die in Gleichung (3.4) dargestellten Hydrate.



3.1.3. Abbindeverhalten des freien Kalkes und Magnesiumoxides [40]

Die Hydratation des freien Kalks CaO_{frei} im Zement kann zum sogenannten „Kalktreiben“ führen. Der freie Kalk, der während des Brennens der Klinkermineralien nicht an SiO_2 , Al_2O_3 oder Fe_2O_3 gebunden worden ist, reagiert äußerst träge. Die Reaktion zu CH erfolgt erst nachdem die Erhärtung des Zementsteines abgeschlossen ist. Auslöser für diese Reaktion ist von außen eindringende Feuchte. Die durch die Umsetzung bedingte Volumenvergrößerung um das 1,7-fache resultiert in einer Zerstörung der Struktur des

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

Zementsteingefüges. Um diese Reaktion zu verhindern, darf der Masseanteil an freiem Kalk den Wert von 2% nicht übersteigen.

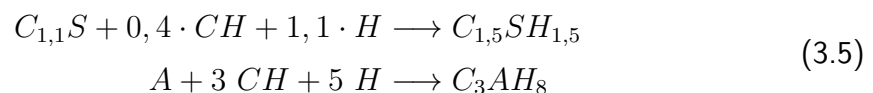
Die Hydratation von Magnesiumoxid MgO findet unter Einwirkung von Wasser nur sehr langsam statt. Das Resultat dieser Reaktion ist das Magnesiumhydroxid $Mg(OH)_2$. Während dieser Reaktion kommt es zu einer Volumenvergrößerung um das 2,2-fache und sie bewirkt das sogenannte „Magnesiatreiben“.

3.1.4. Abbindeverhalten der latent-hydraulischen und puzzolanischen Bestandteile [33], [40]

Das Abbindeverhalten dieser beiden Stoffgruppen bestimmt das SiO_2 , das erst hydraulisch wirksam ist, wenn es eine amorphe Konstitution und vor allem bei Hüttensand und Flugasche eine glasige Struktur aufweist. Die entstehenden Hydratationsprodukte sind dem C-S-H sehr ähnlich und sie verdichten das Gefüge des Zementsteines. Die Reaktivität ist sowohl abhängig von der weiteren Zusammensetzung der Porenlösung als auch von der Granulometrie (Korngrößenverteilung, Kornform, Topologie).

Die Stoffgruppe der latent-hydraulischen Stoffe, zu denen Hüttensand zählt, erhärten nach Feinmahlen und Wasserzugabe selbstständig hydraulisch. Sie bilden kalkhaltige Hydratationsprodukte. Die Reaktion der latent-hydraulischen Stoffe verläuft sehr langsam und benötigt eine Aktivierung durch einen Anreger. Bei den Portlandkompositzementen (CEM II) erfolgt die Aktivierung durch das freigesetzte Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$, das bei der Umsetzung des Klinkers entsteht. Ein weiterer Anreger ist das vorhandene Calciumsulfat $CaSO_4$.

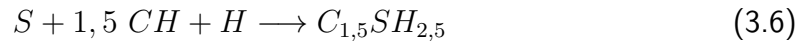
Bei der gemeinsamen Hydratation von Hüttensand und Klinker entstehen C-S-H Verbindungen, die ein Ca/Si -Verhältnis aufweisen, das zwischen den Werten einer getrennten Hydratation von Hüttensand und Klinker liegt. Bei der Hydratation von Portlandzementklinker variiert das Ca/Si -Verhältnis zwischen 1,5 und 1,8, während bei der Hydratation von Hüttensand ein Ca/Si -Verhältnis von 1,0 bis 1,1 vorherrscht. Bei einem Hüttensandanteil von 50% kann ein C/S -Wert von 1,5 angenommen werden.



Die Stoffgruppe der puzzolanischen Stoffe besitzen nur einen geringen Kalkanteil. Daher benötigen sie als Anreger Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$, um C-S-H ähnliche Hydrate bilden zu können. Dieses CH entsteht bei der gemeinsamen Reaktion der puzzolanischen

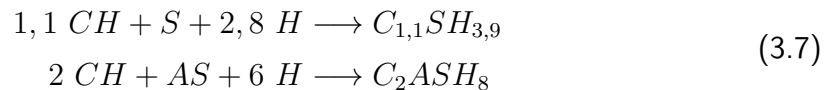
3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

Stoffe mit dem Portlandzementklinker. In Gleichung (3.6) ist der Vorgang schematisch dargestellt.



Die Reaktion der Flugaschen mit dem Calciumhydroxid beginnt erst ab einem pH-Wert von $> 13,1$. Ab diesem Wert können die Flugaschen merklich gelöst werden. Dieser Grenzwert wird etwa nach dem ersten Tag durch die bei der Hydratation des Zementklinkers freigesetzten Alkalien erreicht. Der endgültige pH-Wert von etwa $13,6$ stellt sich erst nach einigen Tagen oder auch Wochen ein. Danach findet die Reaktion der puzzolanischen Stoffe verstärkt statt.

Neben der Flugasche gehören auch die Silikazusätze zur puzzolanischen Stoffgruppe. Diese Zusätze besitzen neben der puzzolanischen Wirkung auch einen Füllereffekt. Mikro- und Nanosilika (Korndurchmesser zwischen $0,1$ und $0,015 \mu m$) füllen die Zwischenräume zwischen den Zementpartikeln aus. Daraus resultiert eine höhere Packungsdichte der Zementsteinmatrix. Die anschließend stattfindende puzzolanische Reaktion verdichtet die Struktur weiterhin. Dadurch werden hohe Festigkeiten, die aus der Reduktion des CH resultieren, erzielt. In Gleichung (3.7) sind die Reaktionen aus Silika und Aluminosilikat vereinfacht dargestellt.



3.2. Ablauf des Hydratationsprozesses [33], [40]

Der Ablauf des Hydratationsprozesses ist abhängig von vielfältigen Stoff- und Zustandsgrößen (z.B. Zusammensetzung des Zementes, Mahlfineinheit des Zementes, chemische Zusatzmittel, Temperatur und Druck) sowie von weiteren Randbedingungen (z.B. Wasser-Zement-Wert). Diese Faktoren sind für den Verlauf der Umsetzung des Zementes und für die Struktur und Zusammensetzung der Hydrate verantwortlich und werden in Kapitel 3.3 näher beschrieben.

Die erste Reaktion an der Oberfläche der Zementpartikel erfolgt unmittelbar nach der Zugabe des Anmachwassers. Diese erste Reaktion ist kurz, aber intensiv und wird durch eine hohe Wärmeentwicklungsrate charakterisiert (Prä-Induktionsphase, siehe Abbildung 3.1). Es reagiert hauptsächlich C_3A unter Mithilfe eines Sulfatträgers (Abbinderegler z.B. Anyhrit) zu Ettringit (siehe 3.1.2). In geringem Umfang ist auch C_3S beteiligt, wobei

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

CH freigesetzt wird. Dabei bleiben die Zementpartikel von einer dünnen Wasserschicht umhüllt.

Die bei der Umsetzung der beiden Klinkerminerale entstehenden Hydrate bilden eine membranartige Schicht auf der Partikeloberfläche. Diese behindert den Stofftransport zwischen fester und flüssiger Phase stark und unterbindet dadurch eine weitere Reaktion. Dies geschieht nach etwa 0,5 bis 2 Stunden. Danach wird eine Ruheperiode mit geringer Hydratationsaktivität eingeleitet (Dormante Periode, Abbildung 3.1). In dieser Phase entstehen die ersten Calciumsilikathydrate und der Erstarrungsbeginn (EB) setzt ein.

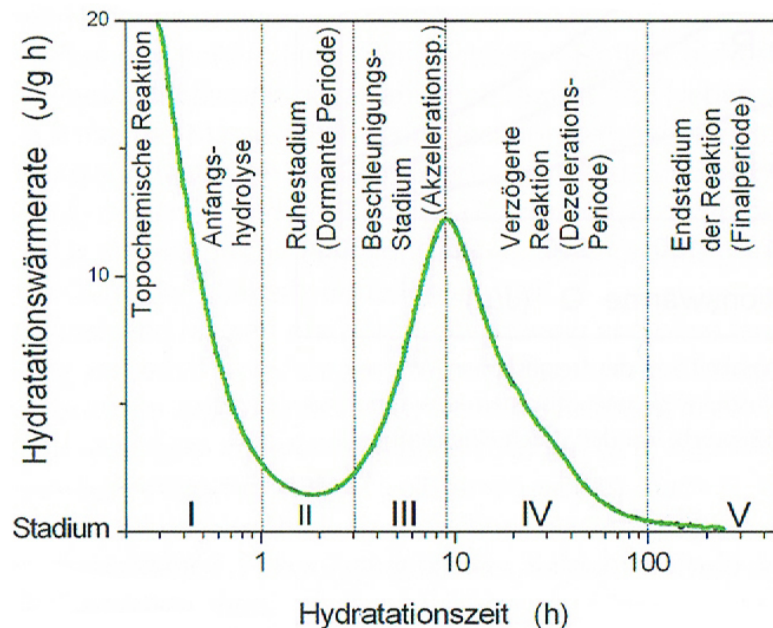


Abbildung 3.1.: Hydratationsstufen und Reaktionskinetik der Klinkerphase C_3S aus: [40]

Die Umkristallisation der Hydrate an der Oberfläche und das Aufbrechen der Randschicht infolge des ständig steigenden osmotischen Druckes ermöglicht den Zugang für das Anmachwasser und stellt die Reaktivität der Zementkornoberfläche erneut her. Die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt ständig zu (Akzelerationsperiode, Abbildung 3.1) und durchläuft ein Maximum, das den Wendepunkt im Verlauf der Hydratation charakterisiert. Die Akzelerationsperiode, in der längere C-S-H-Fasern und dünnplattige Portlanditkristalle entstehen, wird durch eine Hydratbildung in größerem Umfang gekennzeichnet.

Nachdem die Reaktion zunächst nur oberflächennah stattfindet, dringt die Reaktionsfront mit Hilfe von Hydrolyse- und Hydratationsvorgängen in das Innere der Partikel vor. Durch das Ansteigen der Dicke der Hydratationsprodukte wird die Hydratationsgeschwindigkeit immer stärker gebremst. Die Ursache dieser Reaktionsverlangsamung sind die immer länger werdenden Diffusionswege. Nach Erreichen der maximalen Hydratationsgeschwindigkeit

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

bestimmen die diffusionskontrollierten Reaktionen den weiteren Ablauf der Hydratation. Dadurch wird der gesamte Vorgang verlangsamt (Dezelerationsperiode, Abbildung 3.1). Es entstehen kontinuierlich C-S-H-Faserbündel und Portlanditkristalle, die miteinander verwachsen. Die Ettringitkristalle, die zu Beginn der Reaktion entstanden sind, werden zum großen Teil in Monosulfat umgewandelt. Die C-S-H-Fasern werden in weiterer Folge immer länger, wodurch eine ständige Verdichtung des Zementsteingefüges stattfindet. In der Finalperiode (Abbildung 3.1) klingt die Reaktion asymptotisch aus.

3.3. Einflussfaktoren auf den Hydratationsprozess [33], [40]

Der Hydratationsprozess und die Bildung der Hydrate ist abhängig von Stoff- und Zustandsgrößen sowie weiteren Randbedingungen. Zu den Stoff- und Zustandgrößen zählen die Zusammensetzung des Zementes (Haupt- und Nebenbestandteile), die Mahlfineinheit des Zementes, chemische Zusatzmittel sowie Druck und Temperatur. Die Randbedingung mit dem größten Einfluss auf den Ablauf des Hydratationsprozesses ist der Wasser-Zement-Wert.

3.3.1. Zusammensetzung des Zementes [33], [40]

Die chemische Zusammensetzung des Zementes spielt eine große Rolle während des Hydratationsprozesses. Der Zement erhärtet schneller, wenn ein größerer Anteil C_3S enthalten ist. Dadurch besitzt er auch einen höheren Anteil an CaO . Besteht der Zement vorwiegend aus C_2S , reagiert er langsamer, erreicht aber eine höhere Festigkeit. Die Reaktionsgeschwindigkeit von C_2S ist äußerst gering, wird aber durch C_3S merklich angehoben. Das C_3A zeichnet eine hohe Anfangsreaktionsgeschwindigkeit aus, welche durch den Sulfatträger (Anhydrit, Gips) gebremst wird.

Zementzumahlstoffe, die der puzzolanischen oder latent-hydraulischen Stoffgruppe angehören, zeigen eine deutlich verminderte Hydratationsgeschwindigkeit. Sie verändern auch das Reaktionsverhalten der Klinkermineralien. Ihre Reaktivität wird von der Aufmahlung bestimmt. Durch Zugabe von Hüttensand können sehr breit gefächerte Hydratationsgeschwindigkeiten entstehen. Diese resultieren aus der unterschiedlichen Reaktivität der Hüttensande (oxidische Zusammensetzung, Mahlfineinheit, Glasgehalt) und den Erhärtungsbedingungen (pH-Wert). Die Reaktionsgeschwindigkeit der Hüttensande ist mit jener von C_2S vergleichbar, liegt aber deutlich unter der von C_3S .

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

Bei Zugabe von Flugaschen und Silikastaub ist die zeitliche Entwicklung des Hydratationsgrades abhängig von der Zugabemenge. Sobald die vorhandenen Sulfate gelöst werden, setzt die Reaktion der Flugaschen ein und beschleunigt die Umsetzung des Klinkers, solange ein kritisches Mengenverhältnis nicht überschritten wird. Der Hydratationsgrad des Klinkers ist durch die Zugabe von Flugasche höher, als bei einer getrennten Hydratation. Dies resultiert auch in einer höheren Wärmerate. Die Entwicklung des Hydratationsgrades von Silikastaub erfolgt sehr langsam und ist durch eine Abhängigkeit der Zugabemenge charakterisiert.

3.3.2. Mahlfineheit des Zementes [33], [40]

Neben der chemischen Zusammensetzung beeinflusst auch die Mahlfineheit des Zementes den gesamten Erhärtungsvorgang. Prinzipiell gilt, dass eine hohe Mahlfineheit, also sehr fein gemahlene Zementpartikel, eine große Oberfläche und dadurch ein großes Reaktionsvermögen nach sich zieht. Daraus ergibt sich eine höhere Anfangsfestigkeit. Diese ist darauf zurückzuführen, dass die Menge der Hydratationsprodukte, die sich zu Beginn des Vorganges bilden, von der mit dem Anmachwasser reagierenden Oberfläche abhängt. Sehr fein gemahlene Zementpartikel weisen zwar eine erhöhte Anfangsfestigkeit auf, jedoch ist der Einfluss der Mahlfineheit auf die Endfestigkeit sehr gering. Im Gegensatz dazu wirkt sich der Einfluss der Kornverteilung übereinstimmenden massebezogenen Oberflächen aus. Je enggestufter die Kornverteilung, desto höher sind die erzielbaren Festigkeiten. Nachteilig ist anzumerken, dass bei enggestuften Kornverteilungen der Wasserbedarf ansteigt.

Die verstärkte Aufmahlung von Hüttensand kann dazu führen, dass das Reaktionsverhalten von Hüttensand jenem des Portlandzementklinkers ähnlich wird. Die Hydratation des Hüttensandes tritt aber erst nach mehreren Tagen Lagerung ein.

3.3.3. Zusatzmittel [33], [40]

Mit chemischen Zusatzmitteln, dazu zählen sowohl Verzögerer als auch Beschleuniger, kann der Hydratationsprozess nachhaltig beeinflusst werden. Beispielsweise kann die Freisetzung der Hydratationswärme durch Zugabe von Zusatzmitteln gesteuert werden. Kommt ein Verzögerer zum Einsatz, so ist der Verlauf des Hydratationsprozesses weitgehend ident, jedoch sind sowohl das Ende der dormanten Periode (siehe Abbildung 3.1) als auch das Reaktionsmaximum deutlich verschoben. Die Ursache der verzögernden Wirkung ist die Verlängerung der Induktionsperiode.

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

3.3.4. Druck [40]

Wirkt während der Erstarrung und Erhärtung ein Druck auf den Zementstein ein, steigt die erzielbare Festigkeit an. Dadurch sind die Festigkeiten von Prüfkörpern, die unter Laborbedingungen erhärten, um 3 bis 18% geringer als jene, die aus einem Bauteil entnommen wurden. Durch den aufgebrauchten Druck wird die Hydratationsrate angehoben, die Dichte der Hydrate wird jedoch nur unwesentlich durch den Druck beeinflusst.

3.3.5. Temperatur [33], [40]

Die Temperatur, die während des Erhärtungsprozesses vorherrscht, hat großen Einfluss auf seinen Verlauf. Bei steigenden Temperaturen wird die Reaktion zwischen Zement und Wasser beschleunigt, die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt zu und das Reaktionsmaximum wird zu einem früheren Zeitpunkt erreicht. Diese Beschleunigung bewirkt eine schnellere Freisetzung der Hydratationswärme, wodurch die Festigkeitsentwicklung früher einsetzt. Bei höheren Temperaturen werden reaktionsträge Zuschlagstoffe (z.B.: Hüttensand) ange-regt, wodurch sie im größeren Umfang Verbindungen mit dem Anmachwasser eingehen und dadurch stärker zur Wärmebilanz und zur Festigkeitsentwicklung beitragen. Der größte Einfluss der Temperaturwirkung tritt am Maximum der Reaktionsgeschwindigkeit auf. Dieses Maximum charakterisiert den Übergang zur diffusionskontrollierten Reaktion. Nach dem Übergang zur diffusionskontrollierten Reaktion hat die Temperatur nur mehr geringen Einfluss auf die Prozessgeschwindigkeit.

Hohe Temperaturen während des Hydratationsprozesses beeinflussen die Morphologie der Hydrate. Die äußeren C-S-H sind dichter und die Calciumaluminatverbindungen werden kompakter, wodurch es zu einer Volumenverminderung kommt. Zementstein, der bei hohen Temperaturen entstanden ist, weist eine höhere Porosität (vor allem mit größeren Porendurchmessern) auf. Die Hydrate leisten nur einen geringen Beitrag zu seiner Strukturfestigkeit und treten nicht mehr gleichmäßig verteilt im Anmachwasserraum auf. Die Reaktionsprodukte lagern sich in der Nähe der Zementkornoberfläche an. In Verbindung mit der dichteren Struktur der Hydrate werden die Diffusionsprozesse behindert. Das Resultat ist ein frühzeitiges Erliegen des Hydratationsprozesses in Verbindung mit einem geringeren Hydratationsgrad. Mit steigender Temperatur kommt es vermehrt zu Mikrorissen in der Zementsteinmatrix. Daraus folgt eine Reduktion der erzielbaren Festigkeiten.

3.3.6. Wasser-Zement-Wert [40]

Die Reaktion des Zementes mit dem Anmachwasser verläuft umso schneller und länger, je höher der Wasser-Zement-Wert (W/Z-Wert) ist. Während der ersten 24 Stunden des Hydratationsprozesses hat der W/Z-Wert praktisch keinen Einfluss. Erst danach weist der Hydratationsablauf in Abhängigkeit vom W/Z-Wert immer stärkere Unterschiede auf. Die Ursache liegt darin, dass der Hydratationsprozess durch die abnehmende Feuchte im Zementstein erst später beeinflusst wird, je höher der W/Z-Wert ist. Die Folge einer Steigerung des W/Z-Wertes ist, neben der Anhebung der Hydratationsgeschwindigkeit, das Erreichen eines höheren Hydratationsgrades.

3.4. Festigkeitsentwicklung und Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben

Die Druckfestigkeit von abgebundenem Zementstein ist die wichtigste mechanische Kenngröße für viele seiner Anwendungsgebiete. Die Entwicklung der Zementsteinfestigkeit wird von den Eigenschaften des Zementes (vor allem seiner Mahlfineinheit), dem W/Z-Wert, der Erhärtungstemperatur und der Hydratationsdauer beeinflusst.

Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben werden von KUTZNER [32] und BONZEL & DAHMS [17] beschrieben. KUTZNER [32] nennt die Lagerungsdichte, die Kornform, die Ungleichförmigkeitszahl und das verbleibende Restporenvolumen bei gleichbleibendem W/Z-Wert als Einflussfaktoren auf die erzielbaren Festigkeiten. BONZEL & DAHMS [17] untersuchten die Auswirkungen einer Variation des W/Z-Wertes auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben.

Im folgenden Kapitel werden, nach einer Beschreibung der Einflussfaktoren auf die Festigkeitsentwicklung, die Richtwerte zur Abschätzung und die mathematische Beschreibung der Festigkeitsentwicklung in der Betontechnologie erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse aus der Ermittlung der Festigkeiten der Injektionskörperproben, die nach 7, 28 und 56 Tagen untersucht wurden, mit jenen aus der Betontechnologie verglichen. Abschließend werden die Ergebnisse aus den Versuchen von BONZEL & DAHMS beschrieben.

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

3.4.1. Festigkeitsentwicklung

3.4.1.1. Einflussfaktoren auf die Festigkeitsentwicklung [40]

Die Mahlfineinheit der Zemente bewirkt bei Verwendung des gleichen Portlandzementtyps unterschiedlicher Hersteller eine Verschiebung der Festigkeiten zu früheren oder späteren Zeitpunkten. Zur Steigerung der Frühfestigkeit werden deshalb Portlandzemente mit größerer Mahlfineinheit eingesetzt.

Der W/Z-Wert bestimmt neben der Festigkeitsentwicklung, vor allem in der Frühphase der Erhärtung, den Beginn des Festigkeitsanstieges, die Endfestigkeit und die Geschwindigkeit der Verfestigung. Da durch das W/Z-Verhältnis indirekt der Abstand der einzelnen Zementpartikel beschrieben wird, muss eine vom W/Z-Wert abhängige Menge an Hydratationsprodukten gebildet werden, bis eine Zementsteinstruktur entsteht, die eine Aufnahme von mechanischen Beanspruchungen zulässt. Mit steigendem W/Z-Wert nimmt die Geschwindigkeit der Hydratation etwas zu. Dennoch kann daraus kein Vorteil gezogen werden, da sich die parallellaufende Festigkeitsminderung nachhaltiger auswirkt.

3.4.1.2. Richtwerte zur Abschätzung der Festigkeitsentwicklung [40]

Zur Charakterisierung der Festigkeitsentwicklung existieren verallgemeinernde Richtwerte für Festigkeitsklassen und können Angaben aus experimentellen Untersuchungen herangezogen werden. Die zeitabhängigen Richtwerte (siehe Tabelle 3.2) sind nur in begrenztem Umfang bekannt, und reichen nicht aus, um eine detaillierte Aussage über die zeitabhängigen Festigkeitseigenschaften treffen zu können.

Tabelle 3.2.: Richtwerte zur Abschätzung der Festigkeitsentwicklung von Prüflörpern verschiedener Zemente bei einer ständigen Lagerung bei +20°C (adaptiert aus: [40])

Zementfestigkeitsklasse	Festigkeit in % der 28-Tage-Druckfestigkeit nach				
	3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	90 Tagen	180 Tagen
CEM 32,5 N	30 ... 40	50 ... 65	100	110 ... 125	115 ... 130
CEM 32,5 R	50 ... 60	65 ... 80	100	105 ... 115	110 ... 120
CEM 42,5 N	50 ... 60	65 ... 80	100	105 ... 115	110 ... 120
CEM 42,5 R	70 ... 80	80 ... 90	100	100 ... 105	105 ... 110
CEM 52,5 N	70 ... 80	80 ... 90	100	100 ... 105	105 ... 110
CEM 52,5 R	70 ... 80	80 ... 90	100	100 ... 105	105 ... 110

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

3.4.1.3. Mathematische Beschreibung der Festigkeitsentwicklung [40]

Der Faktor für die Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Festigkeitsentwicklung kann in Abhängigkeit von der Zementfestigkeitsklasse anhand der Gleichung (3.8) ermittelt werden.

$$f_{cm,t}/f_{cm,28} = A \cdot \exp\left(\frac{B}{t^C}\right) \quad [t \text{ in Tagen}] \quad (3.8)$$

$f_{cm,t}$... mittlere Zylinderdruckfestigkeit zum Zeitpunkt t,

$f_{cm,28}$... mittlere Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen.

In dieser Gleichung steht der Faktor A für die Nacherhärtung, der Faktor B für die Frühfestigkeit des Zementes und der Faktor C für den Festigkeitsanstieg. Tabelle 3.3 enthält eine Darstellung der Wertebereiche der Faktoren sowie deren Mittelwerte für die Ermittlung der Festigkeitsentwicklung nach Gleichung (3.8). Wird die Gleichung (3.8) um den W/Z-Wert erweitert, kann das Verhältnis der zeitabhängigen Festigkeit zur 28-Tage-Druckfestigkeit mit Gleichung (3.9) beschrieben werden.

$$\beta_t/\beta_{28} = a^{w/z} \cdot \exp\left(\frac{b \cdot w/z}{t^c}\right) \quad (3.9)$$

β_t/β_{28} ... Verhältnis der Druckfestigkeit zum Zeitpunkt t bezogen auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

Tabelle 3.3.: Koeffizienten zur mathematischen Beschreibung der Festigkeitsentwicklung (adaptiert aus: [40])

Zementfestigkeitsklasse	A	a	B	b	C
CEM 32,5 N	1,35 ... 1,50 (1,42)	2,10	-1,88 ... -2,53 (2,25)	-4,40	0,55
CEM 32,5 R CEM 42,5 N	1,20 ... 1,30 (1,25)	1,60	-1,14 ... -1,64 (1,39)	-2,80	0,55
CEM 42,5 R CEM 52,5 N u. R	1,10 ... 1,15 (1,12)	1,30	-0,60 ... -0,87 (0,73)	-1,80	0,55

Die Werte für die Koeffizienten a und b können ebenfalls Tabelle 3.3 entnommen werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Zunahme des W/Z-Wertes die relative

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

Festigkeitsentwicklung verringert. Die Auswirkungen sind laut RÖHLING [40] aber nur bei höheren Zementfestigkeitsklassen ($\geq 42,5$ R) feststellbar.

3.4.1.4. Vergleich eigener Versuchsergebnisse mit der mathematischen Beschreibung

Abbildung 3.2 zeigt den Vergleich des zeitlichen Verlaufes der gemessenen Druckfestigkeiten eines injizierten Probekörpers mit den errechneten Druckfestigkeitsverläufen gemäß Gleichung (3.8) und (3.9). Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass nach 7 Tagen bereits ca. 93% der 28-Tage-Druckfestigkeit erreicht wird. Aus der Richtwerttabelle 3.2 kann für den verwendeten Zement CEM 42,5 R entnommen werden, dass die Prüfkörper nach 7 Tagen 80 bis 90% der 28-Tage-Druckfestigkeit aufweisen sollen. Die 7-Tage-Druckfestigkeit in Abbildung 3.2 wurde anhand der Gleichungen (3.8) und (3.9) ermittelt. Der errechnete Wert gemäß Gleichung (3.8) ist $3,91 \text{ N/mm}^2$. Gemäß Gleichung (3.9) ergibt sich ein Wert von $3,14 \text{ N/mm}^2$.

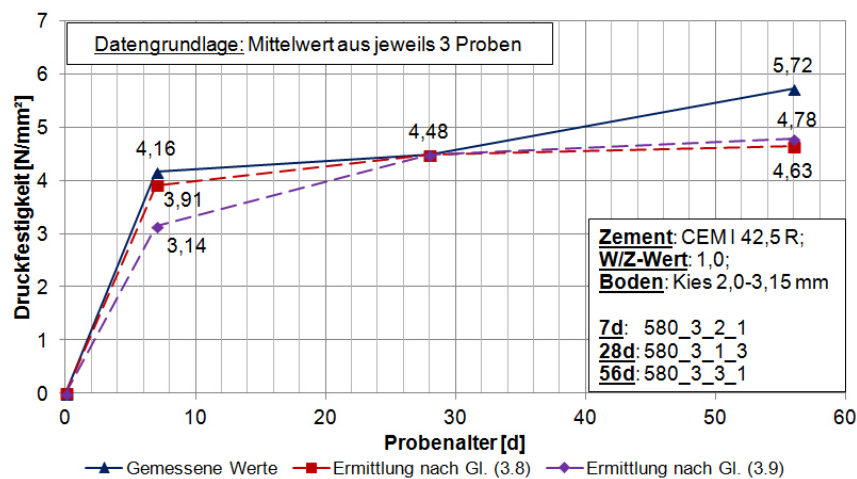


Abbildung 3.2.: Vergleich der gemessenen Werte mit den errechneten Ergebnissen

Für den verwendeten Zement CEM I 42,5 R hat der Koeffizient A den Wert 1,12, B den Wert $-0,73$ und C den Wert 0,55. Werden diese Koeffizienten für die Ermittlung der 56-Tage-Druckfestigkeit in Gleichung (3.8) eingesetzt, ergibt sich der Faktor zu 1,034. Wird die 28-Tage-Druckfestigkeit mit diesem Faktor multipliziert, errechnet sich die theoretische 56-Tage-Druckfestigkeit zu $4,63 \text{ N/mm}^2$. Wird für die Ermittlung der Festigkeitsentwicklung der W/Z-Wert berücksichtigt, muss Gleichung (3.9) herangezogen werden. In diesem Fall hat der Koeffizient a einen Wert von 1,30 und b den Wert $-1,80$. Mit diesen Werten errechnet sich die 56-Tage-Druckfestigkeit zu $4,78 \text{ N/mm}^2$. Die Unterschiede zwischen den theoretischen Werten und den Messergebnissen lassen sich durch

3. ABBINDEVERHALTEN DER ZEMENTE

die natürliche Streuung der Versuche erklären. Die Kennwerte der Injektionskörperproben sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4.: Kennwerte der Injektionskörperproben nach 7, 28 und 56 Tagen Lagerung

Alter	n_m	D_m	$\rho_{f,m}$	$\rho_{d,m}$
7d	0,4087	0,31 - mitteldicht	2,16 g/cm ³	1,92 g/cm ³
28d	0,4132	0,29 - locker	2,16 g/cm ³	1,91 g/cm ³
56d	0,4006	0,35 - mitteldicht	2,19 g/cm ³	1,94 g/cm ³

3.4.2. Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben

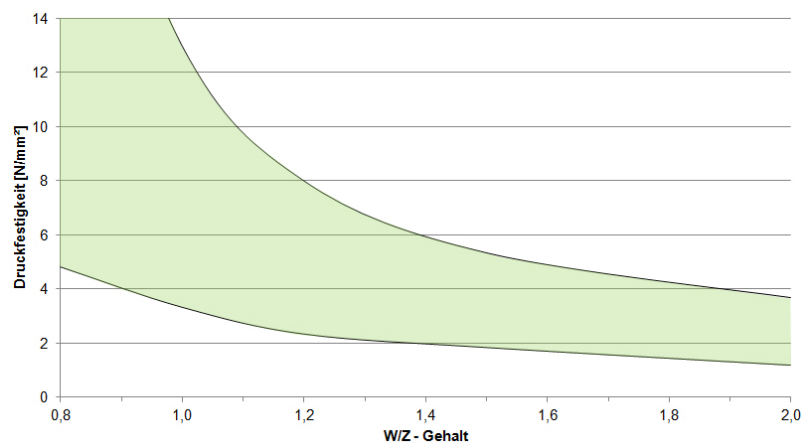


Abbildung 3.3.: Druckfestigkeit von enggestuften Sanden nach 28 Tagen (adaptiert aus: [17])

BONZEL & DAHMS [17] untersuchten neben der Injizierbarkeit enggestufter Sande (Natursande 1/2 mm) mit unterschiedlichen Zementen auch die Abhängigkeit der Druckfestigkeit der injizierten Proben vom W/Z-Wert. Aus der Vielzahl der von BONZEL & DAHMS durchgeführten Versuche kann ein Bereich, für die einaxialen Druckfestigkeiten von injizierten, enggestuften Sanden, abgeleitet werden. Dieser Bereich ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

KUTZNER [32] beschreibt die Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit von injizierten Probekörpern, die mit derselben Suspension hergestellt wurden, mit der Lagerungsdichte, der Kornform, der Ungleichförmigkeitszahl und dem verbleibenden Restporenvolumen.

4. Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit von im Labor hergestellten Injektionskörperproben

Die Prüfmethode für Proben, die aus einem Injektionskörper gewonnen werden, sind abhängig vom Zweck der Injektionsmaßnahme. Bei Abdichtungsinjektionen werden vor allem die Durchlässigkeit, die Erosionsbeständigkeit und das Schwindmaß des verpressten Bereichs untersucht, während bei Verfestigungsinjektionen die Ermittlung der Festigkeit und der Maßhaltigkeit, sowie die Kraftschlüssigkeit bei Unterfangungen im Fokus stehen.

Die Gewinnung von prüfbaren Probekörpern von Verfestigungsinjektionen ist in der Praxis mit Schwierigkeiten behaftet. Diese liegen hauptsächlich in den geringen Festigkeiten des verfestigten Bodens. Je geringer die Festigkeit und je größer der Grobkornanteil, desto schwieriger ist es Proben zu gewinnen. Die einzige Möglichkeit, um einen Prüfkörper ohne partielles Freilegen erhalten zu können, ist eine Kernbohrung. Die Kernbohrung ist dabei äußerst problematisch, und in den seltensten Fällen können damit prüfbare Kerne gewonnen werden, da der verfestigte Boden extremen Belastungen ausgesetzt wird. Laut KUTZNER [32] ist die Gewinnung von ungestörten Bohrkernen dann möglich, wenn der Boden aus kiesfreiem Sand besteht, der Boden eine Mindestdruckfestigkeit von etwa $4,0 \text{ N/mm}^2$ aufweist und der Kern einen Mindestdurchmesser von 80 mm hat.

Die Herstellung von Prüfkörpern im Labor zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit von Injektionskörperproben gewinnt an Bedeutung, da dadurch Kenn- und Rechenwerte zur Bemessung von injizierten Lockerböden abgeleitet werden können. Voraussetzung dafür ist, dass die im Labor hergestellten Probekörper dieselben bodenmechanischen Kenngrößen aufweisen, die im Feld auch angetroffen werden.

Im Zuge dieser Arbeit wurden zusätzlich Grundsatzversuche durchgeführt, um den Einfluss der Probenform auf die einaxiale Druckfestigkeit untersuchen zu können. Die den Versuchen zugrunde liegenden Normen wurden miteinander verglichen und der Normsandanteil variiert, um den Einfluss des Anteils an Zuschlagstoffen ermitteln zu können. Im Anschluss

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

daran wurden die einaxialen Druckfestigkeiten von Injektionskörperproben, die sowohl in Abhängigkeit einer Variation des W/Z-Wertes, als auch von Variationen des Bodens hergestellt wurden, ermittelt. Um die Festigkeiten der Injektionskörperproben beurteilen zu können, müssen die einaxialen Druckfestigkeiten der Injektionsmaterialien untersucht werden. Hierfür müssen die Proben den selben Lagerungs- und Herstellungsbedingungen unterliegen.

Im folgenden Kapitel wird nach einer Beschreibung der verwendeten Materialien die Herstellung der Suspensionen und die durchgeführten Suspensionsprüfungen erläutert. Danach wird sowohl auf die Herstellung der Prüfkörper für die Grundsatzversuche als auch auf die Herstellung der Prüfkörper aus reiner Suspension eingegangen, bevor im Detail die Herstellung der Injektionskörperproben beschrieben wird. Abschließend werden die Versuche zur Bestimmung der Masse des chemisch gebundenen Wassers sowie die Versuche zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit als auch erläutert.

4.1. Verwendete Materialien

4.1.1. Zement

Der für die Versuche verwendete Zement wurde von der Firma ROHRDORFER, Zementwerk Hatschek (Gmunden), zur Verfügung gestellt. Es kamen ausschließlich Portlandzemente zum Einsatz, die sich in ihrer Zusammensetzung, der Mahlfineinheit und der Normfestigkeiten unterscheiden. Die Korngrößenverteilungen der zur Verfügung gestellten Zemente sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

Für die Herstellung der Prüfkörper für die Grundsatzversuche wurde der Zement CEM I 52,5R verwendet. Die Injektionskörperproben wurden mit dem Zement CEM I 42,5R SR 0 WT 33 hergestellt. Der Zement CEM I 32,5R SR 0 WT 27 kam nicht zum Einsatz.

Gemäß ÖNORM EN 197-1 [11] weisen die Zemente CEM I 42,5R und CEM I 32,5R einen hohen Sulfatwiderstand auf und der C_3A -Gehalt des Klinkers muss 0 % betragen. Diese beiden Zemente dürfen nur eine begrenzte frühzeitige Wärmeentwicklung aufweisen. Laut ÖNORM B 3327-1 [5] darf der Zement CEM I 42,5R eine Wärmeentwicklung von 260 J/g in den ersten 15 Stunden nicht überschreiten, während der Zement CEM I 32,5R 210 J/g nicht überschreiten darf.

Die Eigenschaften der zum Einsatz gekommenen Zemente, welche aus den im Anhang befindlichen Produktdatenblättern entnommen wurden, sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Die Ermittlung der Eigenschaften basiert auf folgenden Normen:

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

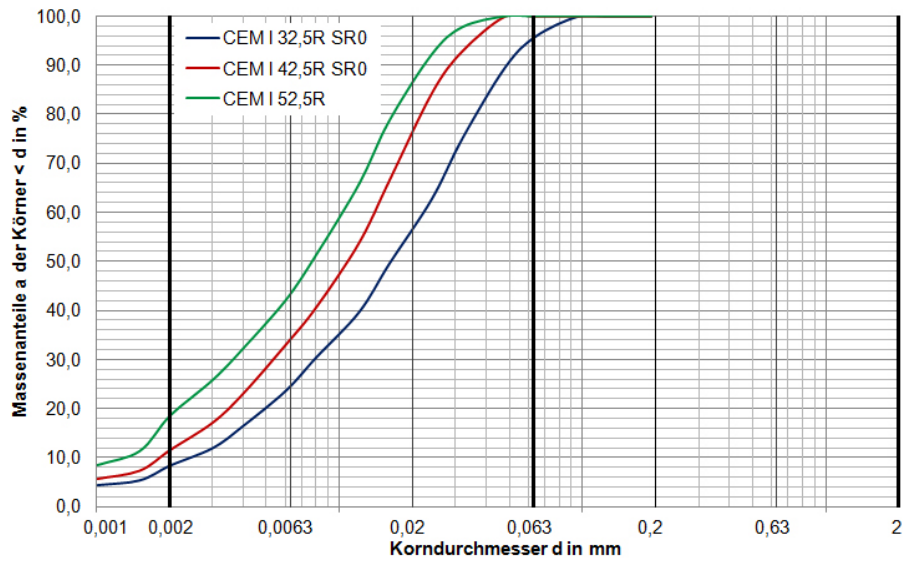


Abbildung 4.1.: Korngrößenverteilung der verwendeten Zemente

Tabelle 4.1.: Eigenschaften der eingesetzten Zemente

	CEM I 52,5R	CEM I 42,5R SR0	CEM I 32,5R SR0
Anfangsfestigkeit [MPa]	$\geq 30,0$	$\geq 20,0$	$\geq 10,0$
Normfestigkeit [MPa]	$\geq 52,5$	$\geq 42,5; \leq 62,5$	$\geq 32,5; \leq 52,5$
spez. Oberfläche [cm^2/g]	5350	4050	2920
Erstarrungsbeginn [min]	≥ 45	≥ 60	≥ 75
Raubeständigkeit [mm]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Glühverlust [M-%]	$\leq 5,0$	$\leq 5,0$	$\leq 5,0$

- ÖNORM EN 196-1: Prüfverfahren für Zemente - Teil 1: Bestimmung der Festigkeiten [6]
- ÖNORM EN 196-2: Prüfverfahren für Zemente - Teil 2: Chemische Analyse von Zement [12]
- ÖNORM EN 196-3: Prüfverfahren für Zemente - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit [8]
- ÖNORM EN 196-6: Prüfverfahren für Zemente - Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit [10]
- ÖNORM EN 197-1: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement [11]

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

4.1.2. Bentonit [23], [25]

Bentonit ist ein Zusatzstoff, der aus einer Mischung von mehreren Tonmineralien besteht. Der Hauptbestandteil des Bentonites ist Montmorillonit (etwa 60 bis 80%), ein Tonmineral der Smektitgruppe. Weitere Bestandteile sind Quarz, Cristobalit, Feldspat, Glimmer, Calcit, Pyrit, Eisenoxid, Kaolinit, Zeolithe und Illit. Bentonite treten aufgrund ihrer Kationenaustauschfähigkeit mit verschiedenen Kationenbelegungen auf. Bei fluviatilen Bentoniten, die durch Verwitterung basischer Gesteine (z.B. Basalt) entstehen, sind die Kationen mit Ca^{2+} belegt. Marine Bentonite, deren Kationen mit Na^+ belegt sind, entstehen durch syngedimentäre submarine Umwandlung vulkanischer Aschen.

Die Eigenschaften des Bentonites werden durch jene des Montmorillonites geprägt. Es ist dies ein dioktaedrisches Dreischichtenmineral (Strukturformel: T-O-T), das sich aufgrund seines hohen Ionenaustauschvermögens bei Wasserzugabe um ein Vielfaches (ca. 700%) ausdehnt. Dieses Quellverhalten ist vor allem auf das Natriummontmorillonit zurückzuführen. Weiters werden durch das Montmorillonit die thixotropischen Eigenschaften des Bentonites bestimmt.

Das Natriumbentonit wird aufgrund seiner Eigenschaften für eine Vielzahl an Bauvorhaben verwendet. Die natürlichen Natriumbentonite kommen jedoch nur in sehr wenigen Lagerstätten vor. Daher ist es notwendig, andere Bentonite nach dem Abbau zu aktivieren, um jene Eigenschaften, die dem Natriumbentonit ähneln, zu erhalten. Die Aktivierung der Bentonite bewirkt einen Austausch der Kationen in den Zwischenschichträumen. Diese Aktivierung kann durch Soda ($Na_2CO_3 \cdot 10 H_2O$), Säure (z.B. HCl) oder Alkylammoniumverbindungen erfolgen. Das einzige für die Bauindustrie relevante aktivierte Bentonit wird durch Zugabe von Soda aktiviert.

Bei dem für die Herstellung der Prüfkörper verwendeten Bentonit handelt es sich um das Aktiv-Bentonit IBECO BP/HR. Dieses wird vor allem in der Bohrspülung bei Horizontalbohrungen, sowie bei Anwendungen, die hohe rheologische Eigenschaften erfordern, eingesetzt. Die Eigenschaften des verwendeten Bentonites sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Grundlage dieser Tabelle ist das Produktdatenblatt der Firma Ibeco, das dem Anhang zu entnehmen ist.

Tabelle 4.2.: Eigenschaften des IBECO BP/HR gemäß Produktdatenblatt

w	Wassergehalt	10 ± 2	%
ρ_s	Korndichte	ca. 2,63	g/cm^3
	Schüttdichte	ca. 800	g/l

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

4.1.3. Bodenproben

Bei den verwendeten Bodenproben handelt es sich um Quarzsand und Quarzkies, die aufgrund ihrer Zusammensetzung über einen vernachlässigbaren Glühverlust verfügen und dadurch eine Ermittlung des Zementgehaltes der injizierten Probe erlauben. Weiters wurden für die Herstellung der Prüfkörper ein Grob- und Dachriesel sowie ein sandiger Kies verwendet. Bei letzteren Ausgangsmaterialien ist ein Rückschluss auf den Zementgehalt (siehe Kapitel 4.6) nur bedingt möglich, da sie einen hohen Anteil an kalkhaltigem Material besitzen. Weiters wurden auch Probekörper aus einer Mischung von drei verschiedenen Bodenproben angefertigt. Diese Mischung bestand aus Quarzsand 1,4 - 2,2 mm, Quarzkies 2,0 - 3,15 mm und Quarzkies 3,15 - 5,6 mm und wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Mischung 1 bezeichnet.

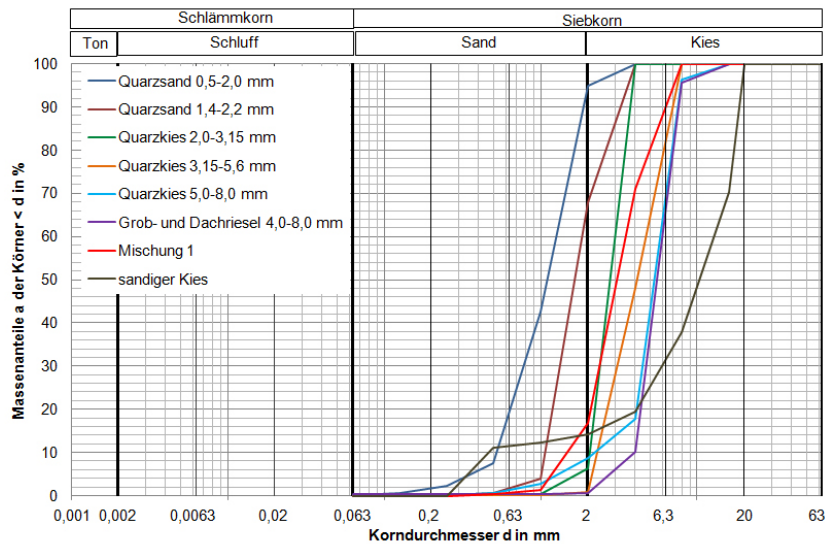


Abbildung 4.2.: Korngrößenverteilung der Bodenproben

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde an den einzelnen Bodenproben eine Siebanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse sowohl in Abbildung 4.2 als auch in Tabelle 4.3 dargestellt sind. Die Bodenbezeichnungen in Tabelle 4.3 basieren auf den Bezeichnungen gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2 [13].

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Tabelle 4.3.: Bodenkennzahlen der Bodenproben und deren Bezeichnung gemäß [13]

Bodenprobe	C_u	C_c	Bezeichnung
Quarzsand 0,5 - 2,0 mm	2,4	0,919	enggestuft
Quarzsand 1,4 - 2,2 mm	1,7	0,897	enggestuft
Quarzkies 2,0 - 3,15 mm	1,4	0,929	enggestuft
Quarzkies 3,15 - 5,6 mm	2,0	0,877	enggestuft
Quarzkies 5,0 - 8,0 mm	2,7	1,559	enggestuft ³
Grob- und Dachriesel 4,0 - 8,0 mm	1,5	0,937	enggestuft
Mischung 1	2,0	1,175	enggestuft
sandiger Kies	22,4	3,884	intermittierend gestuft

4.1.4. Normsand

Der Normsand dient der normgemäßen Ermittlung der Festigkeiten von Zement. Die Zementprüfnorm ÖNORM EN 196-1 [6] gibt für den Normsand folgende Kriterien vor:

- natürlich, gerundeten, quarzreichen Sand und
- Kornverteilung gemäß Siebanalyse (siehe Abbildung 4.3).

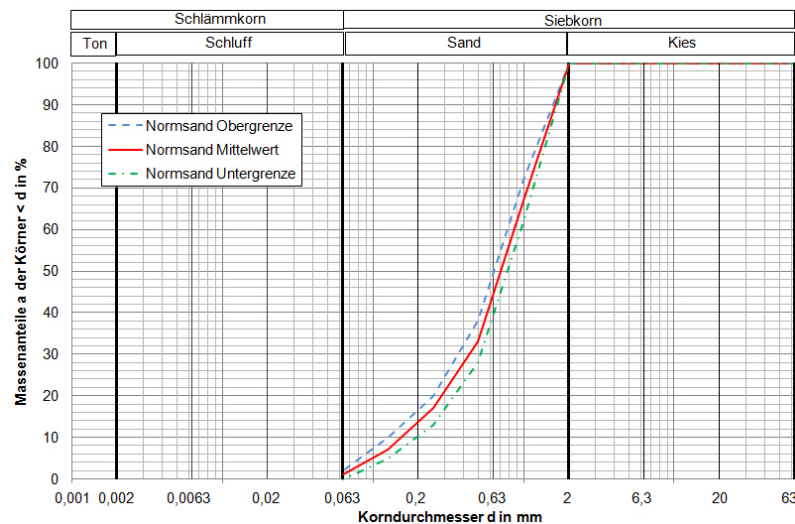


Abbildung 4.3.: Kriterium der Korngrößenverteilung von Normsand

Für die Herstellung der Prüfkörper der Grundsatzversuche wurde der Anteil der Normsandbeimengung variiert (siehe Kapitel 4.3).

³Bei diesem Kies wurde das Unterkorn ($\leq 4,0$ mm) abgesiebt. Dadurch verringert sich die Krümmungszahl auf einen Wert ≤ 1 , wodurch die Bezeichnung normgemäß ist.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

4.2. Suspensionsherstellung und -prüfung

Für die Herstellung der Injektionskörperproben wurden ausschließlich Ton-Zement-Suspensionen verwendet. Je nach W/Z-Gehalt wurde durch Erhöhung der Bentonitbeimengung eine stabile Suspension hergestellt. Die Prüfkörper für die Grundsatzversuche wurden gemäß ÖNORM EN 196-1 [6] angemischt. Zusätzlich dazu wurden Prüfkörper aus reinen Zement-Suspensionen hergestellt.

4.2.1. Suspensionsherstellung

Für das Anmischen der Suspensionen kam der Ultra-Turrax T50 der Firma LEUTERT zum Einsatz (siehe 4.4-links). Dieser Mischer ist ein hochtouriger Dispergierer, der eine stufenlose Regulierung der Drehzahlen im Bereich von 3.000 bis 10.000 Umdrehungen pro Minute (U/min) zulässt. Das Mischwerkzeug ist ein Mischstab, der einen Außendurchmesser von 7,3 cm und einen Durchmesser von 3,5 cm aufweist (siehe 4.4-rechts).



Abbildung 4.4.: Links: Mischer Ultra-Turrex T50; Rechts: Mischwerkzeug

Bei der Herstellung der Suspensionen muss zwischen reinen Zement-Suspensionen und Suspensionen mit Bentonitbeimischung unterschieden werden. Während die reinen Zement-Suspensionen eine Mischzeit von 5,0 Minuten bei 5.000 Umdrehungen pro Minute hatten,

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

musste bei Suspensionen mit Bentonit eine Vorquellzeit beachtet werden. Diese Vorquellzeit betrug zwischen 12 und 24 Stunden. Aufgrund der Vorquellzeit wurde ein Teil des benötigten Wassers am Vortag der Probenherstellung mit dem Bentonit vermischt und über Nacht abgedeckt stehen gelassen. Am Tag der Probenherstellung wurde das Restwasser hinzugefügt und das Wasser-Bentonit-Gemisch 4 Minuten durchmischt. Im Anschluss daran war eine Aktivierungszeit (Quellzeit) von einer Minute notwendig. Abschließend wurde der Zement dem Gemisch beigemischt und dieses weitere 5 Minuten bei 5.000 Umdrehungen pro Minute im Mischer belassen. Ein Überblick über die Mischzeiten der verschiedenen Suspensionsarten zeigt Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4.: Übersicht über die Mischzeiten

	Umdrehungen [U/min]	Mischzeit [min]	Quellzeit [min]	Gesamtmischzeit [min]
Zement- Suspension:				
Zement	5.000	5,0	-	5,0
Suspension mit Bentonit:				
Bentonit	5.000	4,0	1,0	10,0
Zement	5.000	5,0	-	

4.2.2. Suspensionsprüfungen

Gemäß der für die Injektionen aktuell gültigen Norm EN 12715 : 2000 [3] sind bei der Auswahl des Injektionsgutes folgende materialspezifische Eigenschaften zu berücksichtigen:

- Rheologie (Viskosität, Fließgrenze usw.); Abbindedauer, Stabilität,
- Partikelgröße,
- Festigkeit und Dauerhaftigkeit (Beständigkeit) und
- Toxizität.

Die Norm schreibt vor, dass sowohl von den Bestandteilen einer Injektionsmischung als auch von der Mischung selbst in regelmäßigen Abständen Proben entnommen werden müssen, um die Übereinstimmung mit den geplanten Anforderungen nachweisen zu können. Diese Nachweise sind laut Norm wie folgt zu führen: „*Es sind genormte Versuchsverfahren (Prüfgeräte, Randbedingungen, Analysen) anzuwenden, um einen Vergleich der Kennwerte von Produkten unterschiedlicher Hersteller zu ermöglichen.*“

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Tabelle 4.5.: Messung von Injektionsparametern (adaptiert aus: [3])

Paramter	Einheit	Messgeräte/Messverfahren	siehe
Ausfließzeit (Trichterviskosität)	s	Marsh-Trichter (Durchmesser = 4,75 mm)	1
Viskosität (dynamische oder scheinbare)	kPa · s	Koaxiales Viskosimeter Rheometer	2
Dichte	kg/m ³	Pyknometer, Becherglas, Baroidwaage	
Kohäsion, Fließgrenze, Scherfestigkeit	Pa	Koaxiales Viskosimeter, Rheometer, Tauchplattengerät, Kasumeter	3
Bluten, Sedimentation	% über 2 h	Messzylinder	4
Abbindedauer	s	Gekipptes Becherglas, Vicat-Nadel	5
Aushärtungszeit	s	Flügelsondenversuch, Scherbox, einaxialer Druckversuch	6
Erhärten, Verformung, Endfestigkeit		Einaxialer Druckversuch mit Spannungs- Dehnungs-Aufzeichnung, Traixialversuch	7
<p>1... Lufttemperatur, Temperatur des Injektionsgutes, Abmessungen des Fließtrichters, Füllhöhe und Ausfließvolumen sind anzugeben.</p> <p>2... Lufttemperatur und Temperatur des Injektionsgutes sind anzugeben.</p> <p>3... Bei der Planung sind die anzuwendenden Prüfgeräte und die zu erreichenden Werte festzulegen</p> <p>4... Die Ausblutrate (Sedimentation) ist mit Hilfe eines 1.000-ml Messzylinders mit einem Innendurchmesser von 60 mm zu bestimmen.</p> <p>5... Die Abbindedauer ist temperatur- und volumenabhängig. Das anzuwendende Prüfgerät und die zu erreichenden Werte sind in der Planung anzugeben.</p> <p>6... Die Aushärtungszeit muss im Bezug auf einen Bemessungswert für die Festigkeit festgelegt werden.</p> <p>7... In der Planung sind die Abmessungen der zu untersuchenden Proben und die Prüfbedingungen festzulegen (Belastungsgeschwindigkeit usw.)</p>			

Weiters gibt die Norm an, dass bei Suspensionen folgende Kennwerte zu kontrollieren sind:

- Dichte,
- Marsh-Viskosität,
- Abbindedauer und
- Bluten bzw. Sedimentation.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

In Tabelle 4.5 sind die derzeit wichtigsten Messverfahren für Suspensionen auf Zementbasis dargestellt. Hinsichtlich der Versuchsdurchführung werden von der Norm EN 12715 [3] keine genauen Angaben gemacht. Das einzige Prüfverfahren, das die Norm beschreibt, ist die Bestimmung des Wasserabsetzmaßes.

Mit Ausnahme der Abbindedauer wurden an den Ton-Zement-Suspensionen alle in Tabelle 4.5 dargestellten Prüfparameter untersucht. Zusätzlich wurde die Filtratwasserabgabe gemäß DIN 4126 [1] ermittelt.

Im Folgenden werden die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messverfahren näher erklärt und die Ergebnisse genannt.

4.2.2.1. Ausfließzeit (Marshzeit) [1]

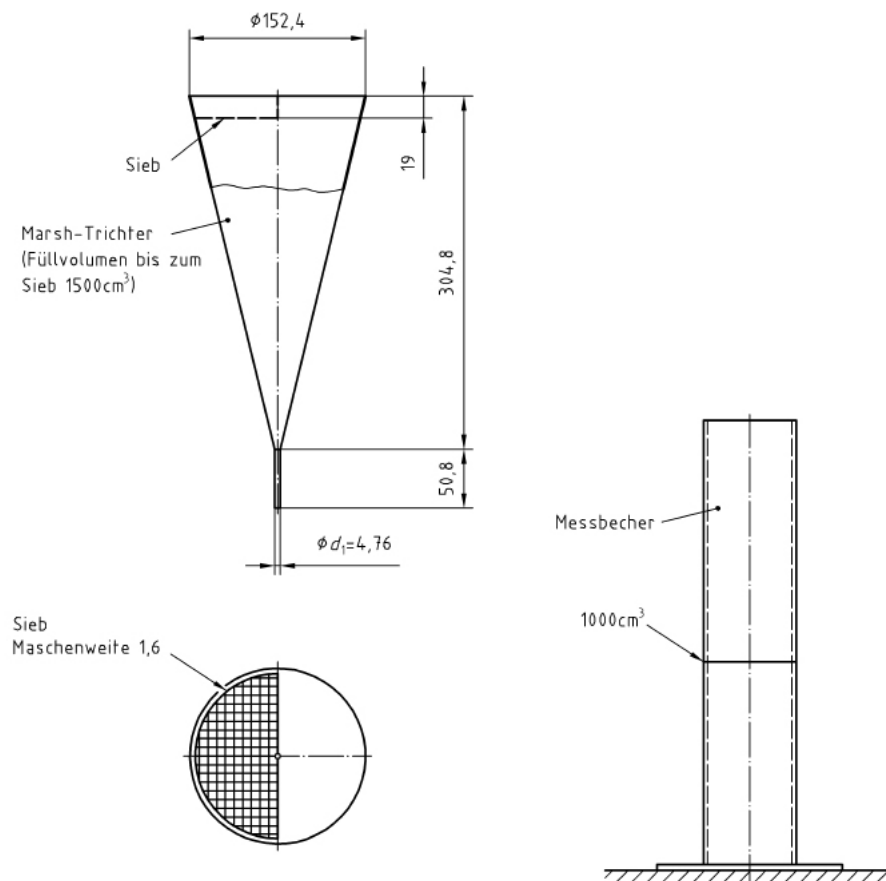


Abbildung 4.5.: Maße des Marsh-Trichters aus: [1]

Die Prüfung mit dem Marsh-Trichter (siehe Abbildung 4.5) ist eine schnelle und einfache Überprüfung der rheologischen Eigenschaften von Suspensionen. Die Marsh-Zeit ist die

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Zeit, gemessen in Sekunden, die ein vorgegebenes Volumen der Suspension benötigt, um aus dem Trichter auszulaufen. Die für die Prüfung der Ausfließzeit verwendete Norm ist die DIN 4126 [1]. Die Norm lässt aus den Auslaufzeiten verschiedener Volumina derselben Flüssigkeit grobe Rückschlüsse auf ihre Fließfunktion zu.

Im Zuge der Versuche wurde die Auslaufzeit von 1.000 cm^3 (lt. Norm t_M) der einzelnen Suspensionen aus einem Trichter mit einem Volumen von 1.500 cm^3 gemessen, wobei für die Gültigkeit der Versuche die Auslaufzeiten jedenfalls größer als die von Wasser ($t_M = 28,0 \text{ s}$) sein muss. Für die Versuchsdurchführung wurde ein Stativ zur Halterung des Marsh-Trichters, ein Messbecher, eine Stoppuhr und ein Thermometer verwendet.

In Tabelle 4.6 sind die Ergebnisse des Prüfverfahrens dargestellt. Mit Ausnahme der kursiv dargestellten Suspensionen wurden alle Suspensionen für die Herstellung der Injektionsprobekörper verwendet. Ausschlusskriterien waren bei Suspensionen mit einem W/Z-Wert von 0,8 ihre hohe Viskosität, und dadurch erschwerte Verarbeitbarkeit, bzw. bei Suspensionen mit einem W/Z-Wert von 3,0 und Zugabe von 5% Bentonit ihre aufgrund ihres Absetzmaßes (siehe Tabelle 4.7) mangelnde Stabilität.

Tabelle 4.6.: Übersicht über die gemessenen Marshzeiten und Dichten bei unterschiedlichen W/Z-Werten

W/Z-Wert	Bentonit [% von Zement]	Marsh-Zeit [s]	Dichte [g/cm^3]	Anmerkung
<i>0,8</i>	<i>2,0</i>	<i>46,7</i>	<i>1,58</i>	nicht im Versuchsprogramm
1,0	2,0	38,0	1,49	
1,2	3,6	37,5	1,43	
1,5	4,0	35,9	1,36	
2,0	5,0	40,0	1,28	
<i>3,0</i>	<i>5,0</i>	<i>30,0</i>	<i>1,20</i>	instabil
3,0	8,0	32,5	1,20	

4.2.2.2. Suspensionsdichte

Die Suspensionsdichte wurde mit Hilfe eines Messglases und einer Waage bestimmt. Die Suspensionsdichte ist abhängig vom W/Z-Wert. Gemäß SCHULZE [44] hat die Bestimmung der Suspensionsdichte sofort nach dem Anmischen zu erfolgen. Zur Dichtebestimmung wurde 250 ml Suspension in einem Messzylinder gewogen und die Dichte in g/cm^3 angegeben (siehe Tabelle 4.6).

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

4.2.2.3. Sedimentation [3]

Die Messung der Sedimentation (oder Absetzmaß) wird in der Norm EN 12715 [3] wie folgt geregelt: Die Prüfung ist in einem 1.000-ml Messzylinder mit einem Innendurchmesser von 60 mm bei einer Raumtemperatur von 20°C durchzuführen. Nach einer Zeit von 2 Stunden wird die Höhe des freien Wassers über der sedimentierten Suspension gemessen und als Prozentsatz bezogen auf die Gesamthöhe angegeben.

In dieser Arbeit wurden neben dem Wasserabsetzmaß nach 2 Stunden auch jenes nach 6 und 24 Stunden ermittelt, um einen Einblick in den zeitlichen Verlauf der Sedimentation zu gewinnen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 4.7 dargestellt. In Abbildung 4.6 werden die instabile Suspension (1.Reihe) und die stabile Suspension (2.Reihe), die jeweils einen W/Z-Wert von 3,0 aufweisen, gegenübergestellt.

Tabelle 4.7.: Überblick über die Sedimentation in Abhängigkeit des W/Z-Wertes

W/Z-Wert	Bentonit [% von Zement]	$\Delta H/H$ [%]			Stabil gemäß [3]
		2 h	6 h	24 h	
1,0	2,0	1,9	2,2	2,5	JA
1,2	3,6	1,9	3,3	3,9	JA
1,5	4,0	2,0	2,4	3,3	JA
2,0	5,0	1,7	3,1	3,4	JA
3,0	5,0	6,9	15,9	15,9	NEIN
3,0	8,0	1,9	4,7	5,0	JA

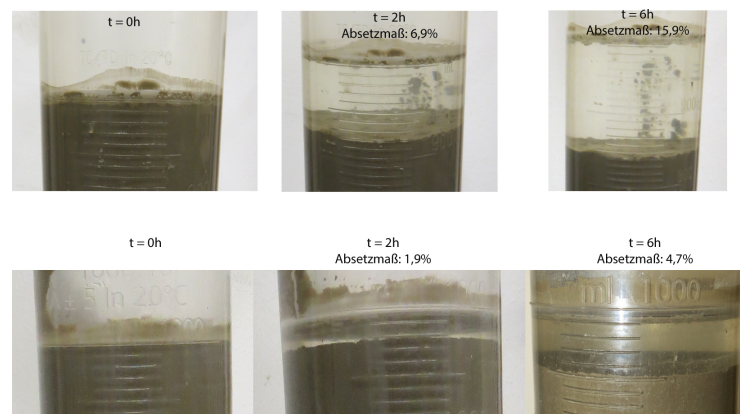


Abbildung 4.6.: Vergleich des Absetzmaßes einer instabilen und einer stabilen Suspension mit einem W/Z-Wert von 3,0

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

4.2.2.4. Filtratwasserabgabe [1], [19]



Abbildung 4.7.: Filterpresse

Für die Ermittlung der Filtratwasserabgabe wurde eine Filterpresse (siehe Abbildung 4.7) verwendet. Gemäß DIN 4126 [1] muss der für die Aufnahme der Suspension bestimmte Zylinder einen Innendurchmesser von 72,6 mm, eine Höhe von $\geq 63,5$ mm und eine freie Filterfläche von 45,1 cm² aufweisen. Der Zylinder ist bis etwa 10 mm unter den oberen Rand zu füllen und wird durch einen mit Dichtungsringen versehenen Deckel verschlossen. Für das Auspressen des Filtratwassers muss der Zylinder mit einem Druck von $7 \pm 0,35$ bar beaufschlagt werden. Zu diesem Zweck weist der Deckel eine Öffnung für den Eintritt des Druckgases, das über eine Patrone (Druckluft, Stickstoff oder Kohlenstoff) eingebracht wird, auf. Innerhalb der ersten 30 Sekunden muss ein Druck von $7 \pm 0,35$ bar aufgebracht werden und weitere 7 Minuten konstant gehalten werden. Aus der Masse des ausgepressten Filtratwassers und seiner temperaturabhängigen Dichte wurde das Volumen des Filtratwassers f in cm³ ermittelt.

BRUCE [19] gibt für den Vergleich der Filtratwasserabgabe einen Koeffizienten an. Der Koeffizient kann mit der Filterpresse ermittelt werden. Für die Durchführung des Tests werden 400 ml der zu prüfenden Suspension in den Zylinder geschüttet und mit einem Druck von 7 bar beaufschlagt. Der Druck wird so lange konstant gehalten, bis das gesamte Wasser aus der Probe gedrückt worden ist. Der Koeffizient für die Filtratwasserabgabe errechnet sich gemäß Gleichung (4.1).

$$K_{pf} = \frac{V_f \cdot 1}{V_S \cdot t^{1/2}} \quad (4.1)$$

In dieser Gleichung stellt V_f das Volumen des ausgepressten Filtratwassers in cm³, V_S das Volumen der Suspensionsprobe in cm³ und t die Zeit in Minuten dar. Damit der

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Koeffizient dimensionslos ist, muss V_f mit dem Faktor 1 (Einheit in Minuten) multipliziert werden.

Tabelle 4.8 zeigt die ermittelten Volumina des ausgepressten Filtratwassers gemäß DIN 4126 [1] und die ermittelten Filtratwasserkoeffizienten gemäß BRUCE [19] der untersuchten Suspensionen.

Tabelle 4.8.: Filtratwasserkoeffizient und Filtratwasservolumen der untersuchten Suspensionen

W/Z-Wert	Bentonit [% von Zement]	Filtratwasservolumen V_f [cm ³]	Filtratwasserkoeffizient K_{pf} [%]
0,8	2,0	102,13	10,62
1,0	2,0	164,84	17,14
1,2	3,6	90,41	9,40
1,5	4,0	155,85	16,21
2,0	5,0	81,28	8,18
3,0	5,0	149,84	15,09
3,0	8,0	126,42	13,15

4.2.2.5. Viskosität [28], [34]

In Kapitel 2.5.2 wurde bereits erwähnt, dass Suspensionen eine Viskosität und eine Fließgrenze besitzen. Die Viskosität ist das Maß für die Zähigkeit eines Stoffes. Kommt es zum Fließen eines Mediums, werden die Moleküle gegeneinander verschoben und es treten Reibungskräfte zwischen ihnen auf. Mit Hilfe des „Platten-Modells“ (siehe Abbildung 4.8) können die grundlegenden rheologischen Parameter erklärt werden.

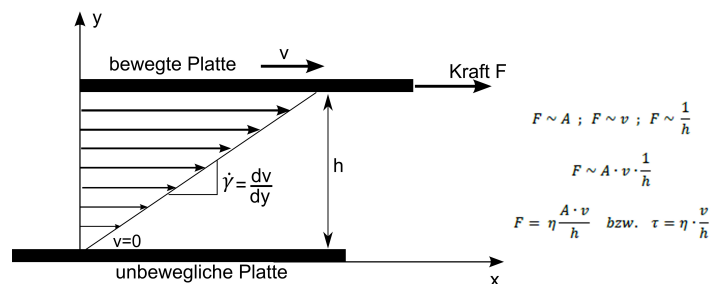


Abbildung 4.8.: Definition der Viskosität anhand des Platten Modells aus: [28]

Zwei parallel angeordnete Platten mit einem zwischenliegenden Flüssigkeitsfilm sind im Abstand h voneinander entfernt. Während die untere der beiden Platten unbeweglich ist,

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

wird die obere Platte durch die Kraft F parallel zur unteren Platte bewegt. Aufgrund der Wandhaftung an den Platten stellt sich in der Flüssigkeit eine, im einfachsten Fall, lineare Geschwindigkeitsverteilung ein, deren Gradient als Schergefälle γ bezeichnet wird. Unter der Voraussetzung von laminarem Fließen zeigt sich, dass die Kraft F proportional zur Fläche A der Platte und der Geschwindigkeit v sowie verkehrt proportional zum Plattenabstand h ist. Somit kann der Proportionalitätsfaktor η eingeführt werden. Dieser Proportionalitätsfaktor wird als dynamische Viskosität bezeichnet. Ist die dynamische Viskosität nicht von der Geschwindigkeit v abhängig, so spricht man von NEWTON'schen Fluiden. Bei diesen Fluiden ist die Viskosität unabhängig von der mechanischen Belastung.

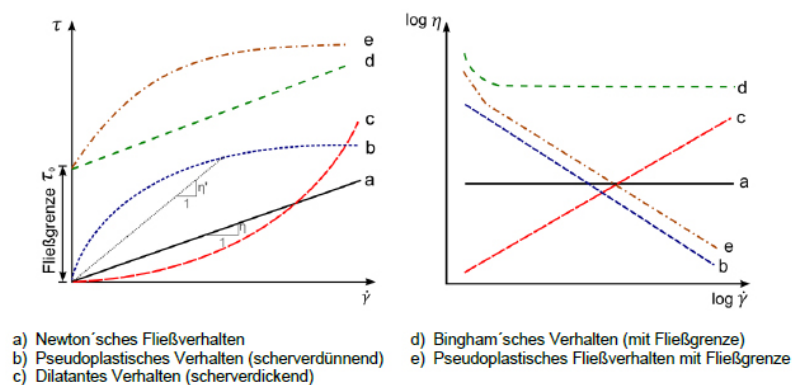


Abbildung 4.9.: Typische Fließkurven aus: [28]

Die in der Injektionstechnik eingesetzten Zement- und Ton-Zement-Suspensionen sind durch das Vorhandensein einer Fließgrenze und pseudoplastischem (scherverdünnendes) Verhalten charakterisiert. Das bedeutet, dass sich die Viskosität mit der mechanischen Beanspruchung dieser Fluide verändert. Demzufolge sinkt oder steigt die Viskosität mit zunehmendem Schergefälle stark an. Diese Viskosität wird als scheinbare Viskosität η' bezeichnet. In Abbildung 4.9 sind die unterschiedlichen Fließverhalten von Fluiden dargestellt.

In der Injektionstechnik spielt die Viskosität von Suspensionen eine wesentliche Rolle. Sie entscheidet über die Eindringfähigkeit und folglich über die Eignung des Injektionsgutes für den Boden bzw. das Kluftsystem. Für die Messung der dynamischen Viskosität wird i.d.R. ein Rotationsviskosimeter verwendet. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden die rheologischen Untersuchungen mit dem Viscotester 550 der Firma HAAKE durchgeführt (siehe Abbildung 4.10-links). Das Grundprinzip dieser Messmethode besteht darin, dass ein Messkörper bei vorgegebener Drehzahl in der zu messenden Suspension rotiert und das benötigte Drehmoment gemessen wird. Für die Messung wurden koaxiale Zylindersysteme herangezogen, welche die Ermittlung von messsystemunabhängigen Absolutwerten

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

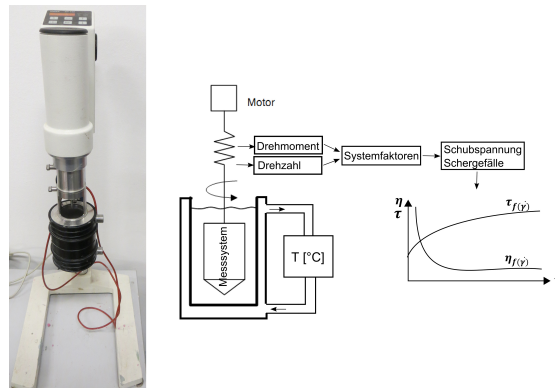


Abbildung 4.10.: Links: Rotationsviskosimeter; Rechts: Messprinzip Rotationsviskosimeter aus: [28]

ermöglichen. Die zu messende Suspension wurde dabei im Ringspalt zwischen beiden Zylindern durch Rotation des inneren Zylinders einer definierten Scherung ausgesetzt (siehe Abbildung 4.10-rechts). Dabei dienen das Schergefälle, das über die Umdrehungsgeschwindigkeit vorgegeben ist, und das benötigte Drehmoment als Eingangsmesswerte zur Bestimmung der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit des Schergefalles.

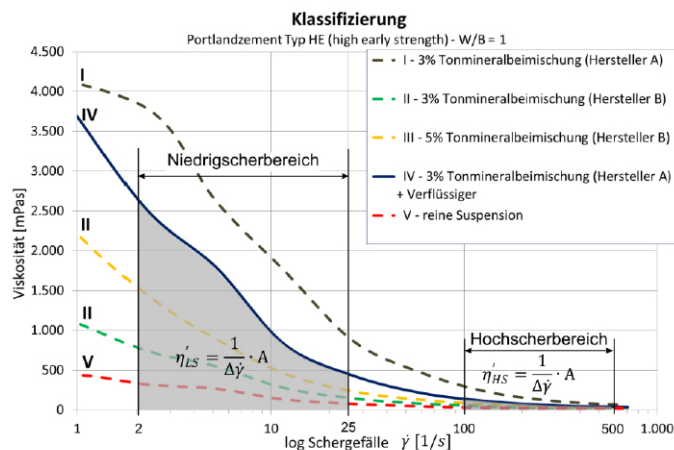


Abbildung 4.11.: Konzept der repräsentativen Viskosität aus: [28]

Alle Suspensionen, die für die Herstellung der Injektionskörperproben verpresst wurden, wurden mit Hilfe des Rotationsviskosimeters untersucht. Aus der Fläche unter der aufgezeichneten Viskositätskurve dividiert durch den Bereich des Schergefalles lassen sich „repräsentative Viskositätswerte“ errechnen, die nach [28] einen einfachen und genauen Vergleich der verwendeten Suspensionen ermöglichen. In Abbildung 4.11 ist der Ansatz zur Bestimmung dieser Viskositätswerte exemplarisch dargestellt.

Die Niedrigscherviskosität η'_{LS} stellt die Viskosität im Bereich geringer Scherbeanspru-

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

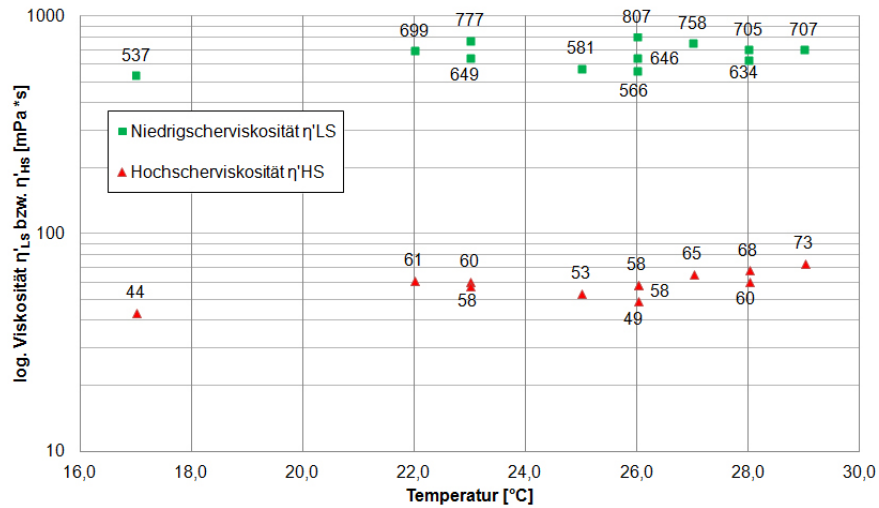


Abbildung 4.12.: Einfluss der Temperatur auf die Viskosität von Suspensionen mit einem W/Z-Wert von 1,0

chung ($\dot{\gamma} = 2-25 \text{ 1/s}$) dar. Die Kenntnis dieser Viskosität ist ein guter Indikator für die Höhe der Fließgrenze und dient somit als Abschätzung des Eindringvermögens bzw. für die Reichweite im Kluftsystem. Die Hochschervviskosität η'_{HS} entspricht der Bingham'schen Viskosität. Vorteile der Messung der „repräsentativen Viskositätswerte“ sind die Einfachheit des Systemes, ihre Genauigkeit und dass Aussagen sowohl über die Fließgrenze als auch über die Viskosität mit nur einem relativ einfachen Versuch getroffen werden können. Zudem sind die erhaltenen Werte messsystemunabhängig.

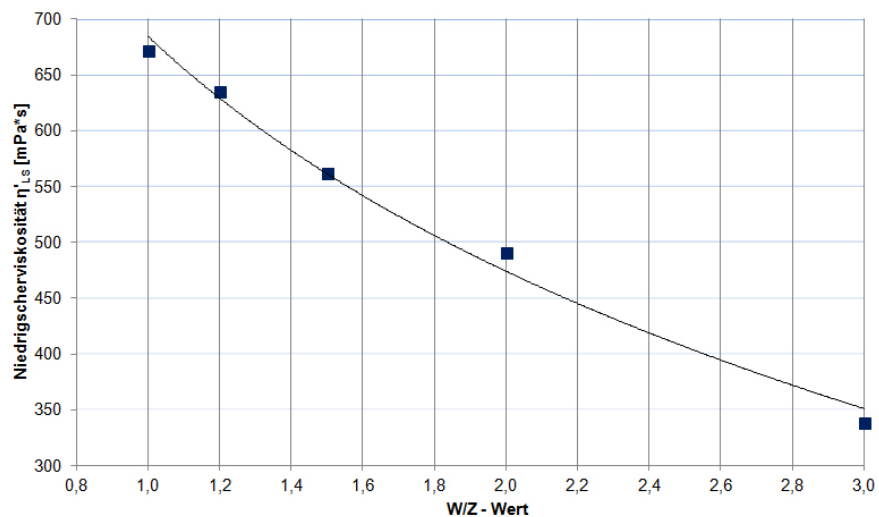


Abbildung 4.13.: Verlauf der Niedrigschervviskosität über den W/Z-Wert

Die Ergebnisse der Viskositätsmessungen von den Suspensionen mit einem W/Z-Wert

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

von 1,0 verdeutlichen die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur. In Abbildung 4.12 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Ein weiterer Faktor, der die Ergebnisse beeinflusst ist die Zeit zwischen Anmischen und Beginn der Messung. Dieser zeitliche Einfluss konnte dadurch minimiert werden, dass alle Untersuchungen spätestens nach 2,5 Minuten nach dem Anmischen gestartet wurden.

Durch eine Erhöhung des W/Z-Wertes, und der damit verbundenen Abnahme des Feststoffanteils, sinkt die Viskosität. Der Zusammenhang zwischen Niedrigscherviskosität und dem W/Z-Wert kann Abbildung 4.13 entnommen werden.

4.2.2.6. Fließgrenze [1], [14], [15], [27], [28]

Die Fließgrenze⁴ ist ein wesentliches Kriterium für die Eignung, das Eindringverhalten und somit die Reichweite von Injektionsmitteln. Suspensionen beginnen erst dann zu fließen, wenn ihre momentane Schubspannung größer ist, als ihre Fließgrenze.



Abbildung 4.14.: Links: Kugelharfe; Rechts: Flügelsonde

Für die Ermittlung der Fließgrenze auf der Baustelle hat sich die Kugelharfe (siehe Abbildung 4.14-links) durchgesetzt. Die Bestimmung der Fließgrenze anhand der Kugelharfe basiert auf der DIN 4126 [1]. Die Kugelharfe besteht aus mehreren Glas- und Stahlkugeln mit unterschiedlichem Durchmesser. Diese werden gleichzeitig in die zu überprüfende Suspension getaucht. Jeder dieser Kugeln kann bei gegebener Dichte eine kritische Fließgrenze zugeordnet werden. Wird diese kritische Fließgrenze nicht unterschritten, so schwimmen sie auf der Suspension auf. Kugeln, deren kritische Fließgrenze kleiner als die der zu untersuchenden Suspension ist, tauchen in die Suspension ein. Daraus folgt, dass

⁴Bis zu einer bestimmten Belastung (der Fließgrenze) bleibt ein Stoff elastisch und nimmt seine ursprüngliche Form wieder an, wenn er entlastet wird. Ist die Spannung aufgrund der Belastung jedoch höher als die Fließgrenze, so beginnt sich der Stoff bleibend zu verformen.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

die kritische Fließgrenze der Suspension zwischen der kritischen Fließgrenze der ersten Kugel, die aufschwimmt, und der letzten Kugel, die eingetaucht ist, liegt.

Die Ermittlung der Fließgrenze mit der Kugelharfe ist nur für dickflüssige Stützsuspensionen geeignet, da die einzelnen Kugelsätze die Bestimmung einer minimalen Fließgrenze von 5 N/m^2 zulassen. Bei dünnflüssigen Injektionssuspensionen liegt die Fließgrenze jedoch meist unter diesem Grenzwert.

Eine wesentlich genauere Untersuchungsmethode stellt das Messverfahren mittels Viskosimeter und Flügelsonde nach [27], [28] dar. Dabei handelt es sich um einen aus der Lebensmitteltechnologie abgeleiteten Ansatz, bei dem ein Messflügel mit 6 Flügeln, der durch ein Gestänge mit dem Rotationsviskosimeter verbunden ist, verwendet wird (siehe Abbildung 4.14-rechts). Die Abmessungen des Messflügels können aus Abbildung 4.17 entnommen werden. Dieser Messflügel wird in die zu prüfende Suspension getaucht und mit konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit bewegt. Das dafür benötigte Drehmoment wird über die Zeit gemessen. Mit Hilfe der Geometrie des Messflügels kann über das Drehmoment die Schubspannung in der Scherfuge ermittelt werden. Die maximal gemessene Schubspannung stellt die Fließgrenze dar. BARNES [14] empfiehlt eine mindestens 4-flügelige Messsonde für die Ermittlung von Flüssigkeitskennwerten. Gemäß BARNES und NGUYEN [15] entstehen bei 8-flügeligen Messsonden Abweichungen der Messergebnisse, die auf die Flügeldicke zurückzuführen sind. Die Vorteile der Verwendung eines Viskosimeters im Gegensatz zu einer Laborflügelsonde ist die bessere Steuerung, die höhere Genauigkeit und die einfachere Datenaufzeichnung.

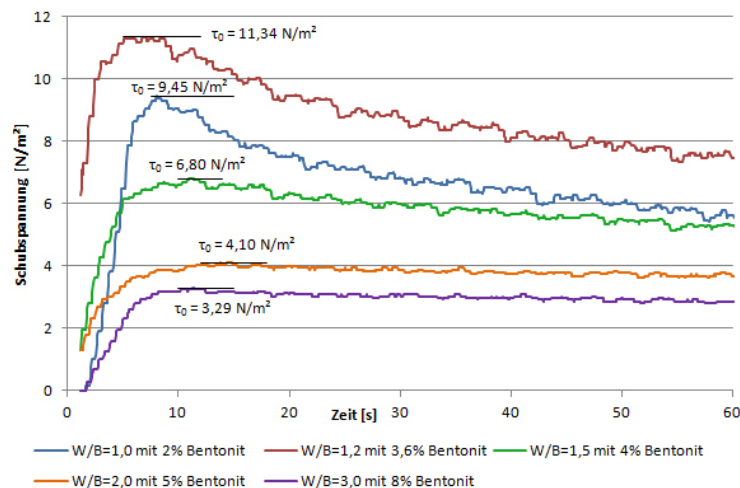


Abbildung 4.15.: Bestimmung der Fließgrenze mittels Viskosimeter und Messflügel

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden Fließgrenze und Erstarrungsbeginn in einer Versuchsanordnung ermittelt, wobei die Fließgrenze im ersten Teil des Versuches ermittelt wurde.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Abbildung 4.15 zeigt die Bestimmung der Fließgrenze der verwendeten Suspensionen mittels Viskosimeter und Flügelsonde.

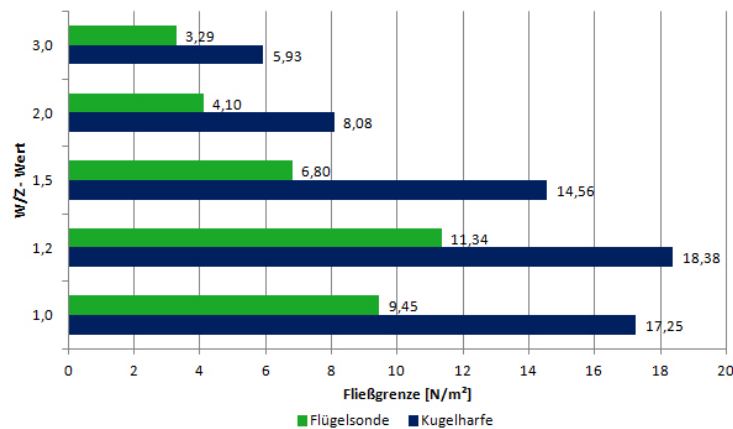


Abbildung 4.16.: Vergleich der Fließgrenzen gemessen mit der Kugelharfe und der Flügelsonde

In Abbildung 4.16 sind die Ergebnisse aus der Ermittlung der Fließgrenze mit der Kugelharfe und mit der Flügelsonde gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass die Fließgrenzen, die mit der Kugelharfe gemessen wurden, etwas größer sind, als jene, die aus der Ermittlung mit der Flügelsonde stammen. Ursache dieser Abweichung ist vermutlich die Eichung der Kugelsätze auf dickflüssigere Bentonitsuspensionen.

4.2.2.7. Erstarrungsbeginn [28], [46]

Der Erstarrungsbeginn von zementbasierten Suspensionen stellt einen wichtigen Parameter in der Injektionstechnik dar. Durch eine Steuerung des Erstarrungsbeginns kann Einfluss auf die Verarbeitbarkeit von Suspensionen genommen werden. Suspensionen sollen ausreichend verarbeitbar sein, aber hinreichend schnell erhärten. In Kapitel 3.1 wurden bereits die Einflüsse der Zementzusammensetzung auf die Festigkeitsentwicklung erläutert. Die Entwicklung der Festigkeiten ist weiters von der Temperatur und dem W/Z-Wert abhängig.

Die Ermittlung des Erstarrungsbeginns erfolgt in der Betontechnologie gemäß EN 196-3 [8] mit Hilfe der Vicat-Nadel. Hierbei handelt es sich um einen Eindringversuch, in dem der Zeitpunkt des Erstarrens über eine definierte Normsteife eines Referenzmörtels bestimmt wird.

In der Injektionstechnik kommen meist Suspensionen zur Anwendung, die einen W/Z-Wert von $\geq 1,0$ besitzen. Für die Bestimmung des Erstarrungsbeginns dieser Suspensionen ist die Messmethode mit der Vicat-Nadel kaum anwendbar. Die Ermittlung erfolgte

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

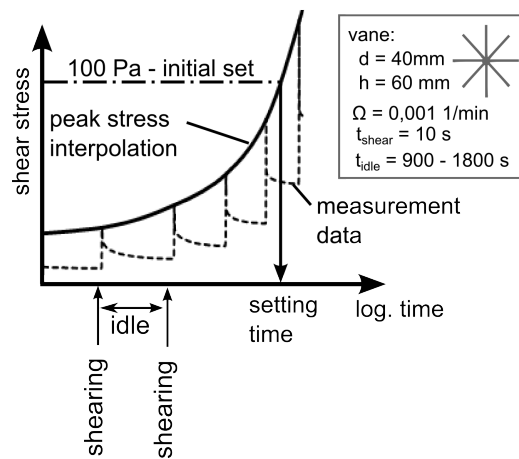


Abbildung 4.17.: Prinzip der Ermittlung des Erstarrungsbeginns aus: [27]

stattdessen über einen an einem Viskosimeter befestigten Messflügel. Dieser rotiert in vorgegebenen Zeitintervallen mit einer äußerst kleinen Umdrehungsgeschwindigkeit und misst dabei den Schubspannungszuwachs. Die langen Ruhephasen zwischen den Rotationen bewirken, dass die Struktur der Suspension nicht gestört wird.

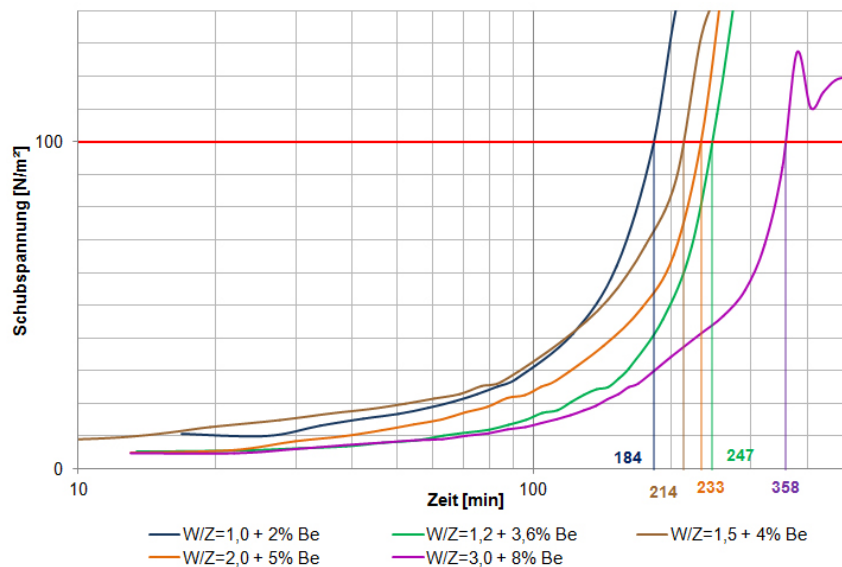


Abbildung 4.18.: Ermittlung des Erstarrungsbeginns bei unterschiedlichen W/Z-Werten

Für die Ermittlung des Erstarrungsbeginns ist die maximale Schubspannung je Umdrehung maßgebend. Der Erstarrungsbeginn für Suspensionen wird im Allgemeinen bei einer gemessenen Schubspannung von 100 Pa angenommen [46]. Das Erstarrungsende ist mit dem Erreichen einer Schubspannung von 1.000 Pa festgelegt. Abbildung 4.17 zeigt das Prinzip der Ermittlung des Erstarrungsbeginns. Der Verlauf der Schubspannungen über

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

die Zeit ist strichliert dargestellt. Für die Ermittlung des Erstarrungsbeginns muss der Verlauf zwischen den Spannungsspitzen interpoliert werden.

Abbildung 4.18 zeigt die Ermittlung des Erstarrungsbeginns der für die Prüfkörperherstellung verwendeten Suspensionen. Wesentlichen Einfluss auf den Erstarrungsbeginn hat die Menge des zugemischten Bentonits. Auf Grund dessen setzt der Erstarrungsbeginn bei den untersuchten Suspensionen (siehe Abbildung 4.18) bei einem W/Z-Wert von 1,5 und 2,0 früher ein, als der Erstarrungsbeginn der Suspension mit einem W/Z-Wert von 1,2. In Tabelle 4.9 ist der Erstarrungsbeginn der Suspensionen aufgelistet.

Tabelle 4.9.: Übersicht über den Erstarrungsbeginn der eingesetzten Suspensionen

Lab-Nr.	W/Z-Wert	Bentonit [% von Zement]	Erstarrungsbeginn [min]
580_4_1_21	1,0	2,0	184
580_4_2_11	1,2	3,6	247
580_4_2_21	1,5	4,0	214
580_4_2_31	2,0	5,0	233
580_4_3_21	3,0	8,0	358

4.3. Herstellung der Prüfkörper der Grundsatzversuche

Die Herstellung der Prüfkörper für die Grundsatzversuche unterscheidet sich wesentlich von der Herstellung der Injektionsprobekörper. Gemäß ÖNORM EN 196-1 [6] sind die Prüfkörper mit einem Teil Zement, drei Teilen CEN-Normsand und einem halben Teil Wasser herzustellen. Für die Herstellung der Prüfkörper für die Grundsatzversuche wurde der Zement CEM I 52,5R verwendet. Der daraus entstehende Mörtel hat einen W/Z-Gehalt von 0,5 und ist im hochtourigen Dispergierer nicht mehr herstellbar. Für die Durchmischung wurde deshalb ein niedertouriger Mischer verwendet. Der hergestellte Mörtel wurde in würfelförmige Probeformen mit einer Kantenlänge von 150 mm, die vom Institut für Tragkonstruktionen - Forschungsbereich für Stahlbeton- und Massivbau zur Verfügung gestellt wurden, gefüllt. Die Verdichtung des Mörtels erfolgte gemäß ÖNORM EN 196-1 [6]. Für die Herstellung der zylindrischen Proben wurde der Mörtel in zylindrische Stahlformen mit einem Durchmesser von 84 mm und einer Höhe von 250 mm gefüllt.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Neben den normgemäßen Prüfkörpern für die Grundsatzversuche wurden Prüfkörper mit variierendem Normsandanteil hergestellt. Weiters wurden Grundsatzversuche an Prüfkörpern aus reiner Suspension durchgeführt. Während für die Variation des Anteils von Normsand ausschließlich zylindrische Prüfkörper untersucht wurden, kamen für die Prüfkörper aus reiner Suspension sowohl zylindrische als auch würfelförmige Probestellen zum Einsatz.

4.4. Herstellung der Prüfkörper aus reiner Suspension

Für die Herstellung der Prüfkörper aus reiner Suspension wurde der Ultra-Turrax T50 der Firma LEUTERT verwendet. Die angemischte Suspension wurde anschließend ohne Verdichtung in zylindrische Stahlformen gegossen. Die Stahlformen hatten einen Durchmesser von 84 mm und eine Höhe von 250 mm. Es wurden mit jeder Suspension, die auch für die Herstellung der Injektionskörperproben verwendet wurde, drei Prüfkörper hergestellt, um Kenntnis über die Festigkeit der reinen Suspension zu erlangen.

4.5. Herstellung der Injektionskörperproben

Die Herstellung der Injektionskörperproben orientiert sich einerseits an den aus der Geotechnik bekannten Durchlässigkeitsversuchen und andererseits an den Einpressversuchen an kleinen Probekörpern von BONZEL & DAHMS [17]. Dies gewährleistet eine vollständige Wassersättigung der Bodenproben vor Versuchsbeginn und eine größtmögliche Penetration mit dem Injektionsgut.

4.5.1. Versuchsübersicht

Tabelle 4.10 zeigt einen Überblick über im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Versuche. Die genaue Auflistung aller Ergebnisse ist den Tabellen in Anhang C zu entnehmen.

Die Variation des W/Z-Wertes der Suspensionen fand ausschließlich am Sand 1,4-2,2 mm statt. Weiters wurden die reinen Suspensionen mit den selben W/Z-Werten untersucht. Suspensionen mit einem W/Z-Wert von 1,0 wurden in sämtliche Bodenproben verpresst. Die Festigkeitsentwicklung wurde lediglich für Kies 2,0-3,15 mm untersucht.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Tabelle 4.10.: Auflistung der durchgeführten Versuche (siehe Anhang C)

Versuchsreihe 0 - Grundsatzversuche					
Zement: CEM I 52, 5R					
Lab-Nr: 580	1_1_1	1_1_2	1_2_1	1_2_2	2_1_1
Form	Würfel	Zylinder	Würfel	Zylinder	Zylinder
W/Z-Wert	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
Bentonit	0%				
Lab-Nr: 580	2_2_1	2_3_1			
Form	Zylinder	Zylinder			
W/Z-Wert	0,5	0,5			
Bentonit	0%				
Versuchsreihe 1 - Variation W/Z-Wert					
Injektionskörperprobe mit Bodenprobe 581_2, Sand 1,4-2,2 mm					
Lab-Nr: 580	3_1_1	5_1_1	5_1_2	5_1_3	5_1_4
W/Z-Wert	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0
Bentonit	2%	3,6%	4%	5%	8%
Zement	CEM I 42, 5R				
Versuchsreihe 2 - Variation W/Z-Wert					
Reine Suspensionsproben mit CEM I 42, 5R					
Lab-Nr: 580	4_2_4	4_1_2	4_2_1	4_2_2	4_2_3
W/Z-Wert	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0
Bentonit	2%	2%	3,6%	4%	5%
Lab-Nr: 580	4_3_1	4_3_2			
W/Z-Wert	3,0	3,0			
Bentonit	5%	8%			
Versuchsreihe 3 - Variation Bodenprobe					
Suspension: W/Z-Wert = 1,0 + 2% Bentonit mit CEM I 42, 5R					
Lab-Nr: 580	3_1_1	3_1_2	3_1_3	3_1_4	3_1_5
Bodenprobe	581_2	581_4	581_3	581_5	581_5
	Sand 1,4-2,2 mm	Kies 3,15-5,6 mm	Kies 2,0-3,15 mm	Kies 5,0-8,0 mm	Kies 5,0-8,0 mm
Lab-Nr: 580	3_1_7	3_1_8	3_1_9		
Bodenprobe	581_6	581_9	581_12		
	Grob- & Dachriesel	Mischung 1	sandiger Kies		
Versuchsreihe 4 - Festigkeitsentwicklung					
Bodenprobe: Kies 2,0-3,15 mm; Suspension: W/Z=1,0 + 2% Bentonit					
Probenalter	7 Tage	28 Tage	56 Tage		
Labor-Nr.	580_3_2_1	580_3_1_3	580_3_3_1		

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

4.5.2. Versuchsschema

Abbildung 4.19 zeigt den schematisch den Aufbau der Prüfkörperherstellung.

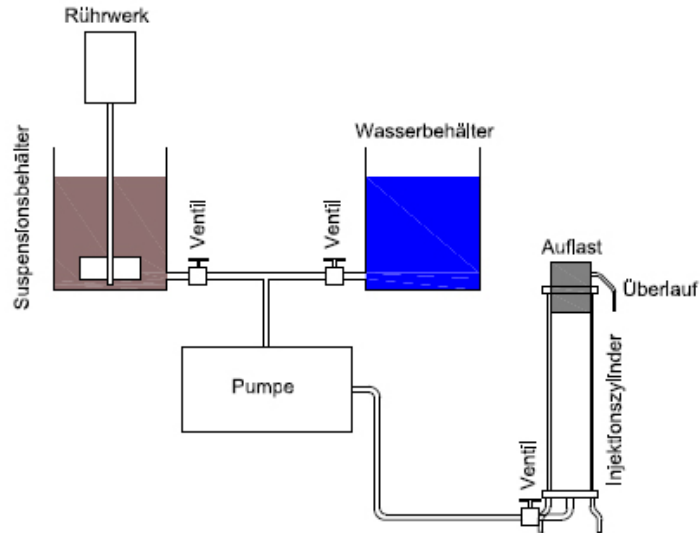


Abbildung 4.19.: Versuchsschema der Prüfkörperherstellung

Bei der Pumpe handelt es sich um eine Kolbenmembranpumpe der Firma VERDER, deren technische Daten in Tabelle 4.11 dargestellt sind. Als Rührwerk wird der RW 2DZW der Firma JANKE & KUNKEL, der eine stufenlose Regulierung der Umdrehungsgeschwindigkeiten zwischen 60 und 2.000 Umdrehungen pro Minute zulässt, verwendet. Die Rohrleitungen und Schläuche, die sowohl das Wasser als auch die Suspension über die Pumpe zum Injektionszylinder transportieren, haben einen Durchmesser von 25 mm (1"). Als Injektionszylinder werden zwei verschiedene Kunststoffrohre verwendet. Beide haben einen Außendurchmesser von 103 mm. Bei einem der beiden handelt es sich um ein ca. ein Meter langes, geschlitztes, durchsichtiges PVC-Rohr, das für die Herstellung der Prüfkörper mit Silikon und Klebeband abgedichtet werden muss. Als zweites Rohr wird ein ca. 50 cm langes PVC-Rohr ungeschlitzt eingesetzt. Beide Rohre werden zwischen Fuß und Kopfplatte mit drei Gewindestangen eingespannt. Der Übergang von Fußplatte und Rohr wird mit Hilfe eines Dichtungsringes abgedichtet. Um ein Aufschwimmen der Bodenproben zu vermeiden, wird die zu injizierende Bodenprobe mit einem Auflaststempel verschlossen. Dieser ist mit zwei Abdichtungen versehen, damit weder Wasser noch Suspension zwischen Rohr und Auflaststempel aufsteigen kann. Der Stempel hat eine Überlaufvorrichtung.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Tabelle 4.11.: Technische Daten der Kolbenmembranpumpe gemäß Produktdatenblatt (siehe Anhang)

max. Fördermenge	237 l/h
max. Ausgangsdruck	70 bar
max. Viskosität	1.000 mPa·s

4.5.3. Versuchsdurchführung

Der geschlitzte Injektionszylinder wird zwischen Fuß- und Kopfplatte eingebaut und mit den Gewindestangen eingespannt. Danach werden in Abständen von etwa 20 cm Rohrklemmen fixiert, die dafür sorgen, dass der Zylinder dem Innendruck standhält (siehe Abbildung 4.20-links). Vor Einbau der ersten Filterschicht wird ein Filternetz mit einer Maschenweite von 2 mm auf die Fußplatte aufgebracht, um ein Eindringen von Körnern aus der Filterschicht in die Rohrleitung aus der Fußplatte zu verhindern. Nach Einbringen der in etwa 2 cm starken Filterschicht aus einem Mittelkies wird diese mit einem Netz abgeschlossen, um einer Durchmischung der Filterschicht mit dem zu injizierenden Boden entgegenzuwirken. Die zuvor im Trocknungsofen 24 Stunden getrocknete Bodenprobe wird lagenweise eingebaut und mittels eines Proctorfallgewichtes mit konstanter Schlaganzahl verdichtet. Die bis zu 22 cm hohen Probekörper werden mit Netzen voneinander getrennt. Der vierte und letzte Probekörper wird mit einem Netz abgeschlossen, auf das eine zweite Filterschicht aufgebracht wird. Ein weiteres Netz auf der Filterschicht bildet den Abschluss zum Auflaststempel. Dieses letzte Netz ist notwendig, damit keine Partikel der Filterschicht in den Schaft des Auflaststempels eindringen können.

Bei Verwendung des geschlossenen Injektionszylinders unterscheidet sich der Einbau dadurch, dass die Rohrklemmen weggelassen und keine Netze zwischen den Probekörpern angeordnet werden (siehe Abbildung 4.20-rechts). Je Injektionszylinder werden nur zwei Probekörper eingebaut. Der geschlossenen Injektionszylinder kommt vor allem bei der Injektion der Quarzsande zur Anwendung.

Nach dem Einbau der Probekörper wird der Injektionszylinder an die Pumpe angeschlossen, eine Auflast auf den Auflaststempel aufgebracht und eine Wassersättigung hergestellt. Die Wassersättigung ist notwendig, um die Luft aus den Hohlräumen der Probekörper zu verdrängen. Danach wird die Ton-Zement-Suspension in den Injektionszylinder gepumpt. Das in den Hohlräumen befindliche Wasser wird durch die Suspension verdrängt und dadurch eine annähernd vollständige Penetration mit der Suspension hergestellt. Sind die Proben durchinjiziert, tritt über den Überlauf Suspension aus. Danach wird das Ventil am Fuß des Injektionszylinders geschlossen, der Schlauch vom Injektionsfuß abmontiert und die Pumpe mit Wasser durchgespült.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT



Abbildung 4.20.: Links: geschlitzter Injektionszylinder; rechts: geschlossener Injektionszylinder

Der Ausbau der Probekörper aus den geschlitzten Injektionszylindern erfolgt zwei Tage nach der Injektion. Der Zylinder wird von der Fußplatte getrennt, der Auflaststempel abmontiert und das Klebeband aufgeschnitten. Durch Aufkeilen des Schlitzes entsteht ein Spalt zwischen Injektionsprobekörper und Injektionszylinder. Die Probekörper werden vorsichtig aus dem Zylinder herausgedrückt und danach ins Wasserbad gelegt. Das Abgleichen der Probekörper für den Druckversuch erfolgt etwa einen Tag vor dem Versuch.

Die Injektionsprobekörper aus dem geschlossenen Injektionszylinder werden bereits am Tag nach der Injektion ausgebaut. Hierfür wird der Zylinder von der Fußplatte getrennt und der Auflaststempel abgenommen. Die Probekörper werden eine Woche lang in einem Wasserbad im Zylinder belassen, bis sie geschnitten werden. Danach verbleiben sie bis zum Druckversuch im geschnittenen Rohr im Wasserbad. Erst kurz vor der einaxialen Druckprüfung werden die Probekörper aus dem Rohr ausgebaut.

4.5.4. Erkenntnisse aus der Versuchsdurchführung

Während der Herstellung der Injektionsprobekörper traten vereinzelt Probleme auf, die eine Gewinnung von für Druckversuche brauchbaren Proben nicht zuließen. Unter anderem musste zur Kenntnis genommen werden, dass die feinsten zu injizierenden Bodenproben (die Quarzsande) einer besonderen Herangehensweise bedürfen. Bei den ersten Versuchen,

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Probekörper aus Quarzsand im geschlitzten Injektionszylinder herzustellen, kam es zu Undichtigkeiten entlang des Schlitzes, da der Innendruck während des Injektionsvorganges so groß wurde, dass das Klebeband im unteren Bereich des Zylinders aufriss. Der Injektionserfolg beschränkte sich auf etwa die Hälfte des Injektionszylinders (siehe Abbildung 4.21). Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden in weiterer Folge geschlossene Injektionszylinder für die Herstellung von Injektionskörperproben mit Quarzsanden verwendet. Durch eine Reduzierung der Zylinderhöhe konnte sichergestellt werden, dass der Druck im Zylinder nicht zu groß und eine gute Penetration erreicht werden konnte.

Ein weiteres Problem, das im Zuge der Herstellung mit dem geschlitzten Injektionszylinder entstand, war der Probenausbau. Trotz Aufkeilen des Schlitzes und des dadurch entstehenden Spaltes zwischen Probe und Zylinder, war sehr viel Kraft und Geschick notwendig, um eine Zerstörung der Proben im Injektionszylinder zu verhindern. Mehrfach sind Proben beim Ausbau gebrochen und die Injektion musste daher wiederholt werden. Dieses Problem wurde durch Einsprühen des Injektionszylinders mit Schalöl vor dem Einbau der Bodenproben behoben.



Abbildung 4.21.: Fehlgeschlagene Injektion von Quarzsand

Bei der Herstellung der Injektionsprobekörper aus Quarzsand im geschlossenen Injektionszylinder kam es zum Auspressen des Wassers aus der Suspension. Dadurch bildete sich in der Filterschicht eine Schicht aus ausfiltriertem Zementmörtel, wodurch die Injektion abgebrochen werden musste. Die Ursache dieses Problems war eine Querschnittverjüngung in den Rohrleitungen der Pumpe, die auf die Ablagerung von Zementpartikeln zurückzuführen war. Dadurch erhöhte sich bei konstanter Durchflussmenge der Druck und das Überschusswasser wurde ausgepresst. Durch eine vermehrt durchgeführte Reinigung

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

der Rohrleitungen konnte dieses Problem behoben werden.



Abbildung 4.22.: Ungleichmäßige Penetration der Injektionskörperproben

Trotz Verwendung der geschlossenen Injektionszylinder konnten keine Prüfkörper aus Quarzsand 0,5 - 2,0 mm hergestellt werden. Die Herstellung der Injektionskörperproben mit Quarzsand 1,4 - 2,2 mm war zwar mit den geschlossenen Injektionszylindern möglich, jedoch zeigte sich beim Ausschalen, dass nicht alle Prüfkörper eine gleichmäßige Penetration aufwiesen. Abbildung 4.22 zeigt Injektionskörperproben, bei denen eine ungleichmäßige Penetration auftrat.

4.6. Ermittlung der Masse des chemisch gebundenen Wassers als Indikator für den Zementgehalt

Der Verfüllgrad der Hohlräume eines injizierten Bodens ist ein wesentlicher Einflussfaktor auf die einaxiale Druckfestigkeit. Der zu injizierende Boden setzt sich aus einer festen Masse und Hohlräumen zusammen. Die Hohlräume können sowohl wasser- als auch luftgefüllt sein. Dadurch lässt sich der Boden als „Dreiphasenmodell“ darstellen. Durch das Einpressen von Ton-Zement-Suspensionen werden die Hohlräume mit Zement verfüllt. Der eingepresste Zement bindet Wasser chemisch in seiner Kristallstruktur. Während des Abbindeprozesses entsteht Überschusswasser, das in den Hohlräumen verbleibt. Da eine vollständige Penetration nicht immer gelingt, verbleiben im Boden auch noch luftgefüllte Hohlräume.

Daraus kann ein Injektionskörper mit einem 5-Phasen Modell (siehe Abbildung 4.23) idealisiert werden. Dieses 5-Phasen-Modell ist die Grundlage für die Ermittlung des Verfüllgrades. Es gilt die Annahme, dass die Hydratation bei gleichbleibendem Zementgehalt und gleichbleibenden Lagerungsrandbedingungen immer gleich verläuft. Deshalb kann über die Masse des chemisch gebundenen Wassers bei gegebenen Prüfzeitpunkten eine relative Aussage über den Zementgehalt getroffen werden.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

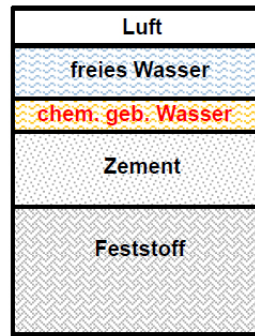


Abbildung 4.23.: 5-Phasen Modell eines Injektionskörpers aus: [26]

Bei einer gleichmäßigen Verfüllung der Hohlräume muss die Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Probenvolumen gleich sein. Variiert die Masse des chemisch gebundenen Wassers der Probestücke der selben Charge, sind die Hohlräume scheinbar nicht gleichmäßig verfüllt. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf den im Hohlraum vorhandenen Zement ziehen. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis über den Glühverlust des injizierten Bodens, da dieser durch organische Bestandteile und Kalkanteile beeinflusst wird.

4.6.1. Ermittlung der Masse des chemisch gebundenen Wassers

Die Ermittlung der Masse des chemisch gebundenen Wassers wurde auf zwei Arten durchgeführt. Einerseits wurde ein Probestück aus den Überschnitten der Injektionskörperproben verwendet und andererseits wurden aus den im Ofen getrockneten Probekörpern der einaxialen Druckversuche je drei Probestücke entnommen. Mit Hilfe der Überschnitte konnte die Ermittlung der Masse des chemisch gebundenen Wassers über die Zeit vorgenommen werden. Die Überschnitte wurden hierfür über den gesamten Prüfzeitraum in einem Wasserbad gelagert. Die Masse des chemisch gebundenen Wassers wurde nach 28, 56, 112 und 224 Tagen ermittelt.

Der Versuchsablauf an Überschnittteilstücken war wie folgt: Zuerst wurde an dem Probestück eine Tauchwägung zur Bestimmung des Volumens und der Dichte durchgeführt. Danach wurde das Probestück in einen Glühtiegel gelegt, gewogen und für mindestens 72 Stunden im Trocknungsofen bei 105°C getrocknet. Durch die Lagerung bei 105°C verdampft das in den Proben physikalisch gebundene Wasser („freies Wasser“). Nach erfolgter Trocknung wurden die Glühtiegel in einem Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt, gewogen und fotografiert. Im Anschluss daran wurden die Probestücke in einen Muffelofen gestellt und innerhalb von 2 Stunden auf 1010°C erhitzt. Diese Temperatur wurde für weitere 8 Stunden konstant gehalten. Bei 1010°C verdampft das vom Zement

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

chemisch gebundene Wasser. Nach der Lagerung über 8 Stunden bei 1010°C gelagert wurden, kühlen die Proben langsam im Muffelofen auf ca. 100°C ab. Danach wurden die Proben im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt, gewogen und fotografiert. Die Ermittlung der Masse des chemisch gebundenen Wassers erfolgt nach Gleichung (4.2). Abbildung 4.24 zeigt eine Auswahl an Probekörpern vor und nach der Bestimmung der Masse des chemisch gebundenen Wassers.



Abbildung 4.24.: Probekörper vor (oben) und nach (unten) Bestimmung der Masse des chemisch gebundenen Wassers

Die Ermittlung der Masse des chemisch gebundenen Wassers mit Hilfe der Teilstücke aus den Injektionskörperproben erfolgte wie folgt: Nach Trocknung der Injektionskörperproben über 72 Stunden, wurden sie gewogen. Danach wurden aus jedem Probekörper jeweils drei Probekörper entnommen. Jedes dieser Probekörper stammte aus einem anderen Bereich des Prüfkörpers (oberer, mittlerer und unterer Bereich). Die weitere Versuchsanordnung ist mit jener der Überschnitte ident.

$$m_{w,i}^{geb} = m_i^{105^\circ C} - m_i^{1010^\circ C} \quad (4.2)$$
$$V_{d,i} = \frac{m_i^{105^\circ C}}{\rho_d}$$

Abbildung 4.25 zeigt den Verlauf der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der Injektionskörperproben in Abhängigkeit des Probenalters. Nicht dargestellt sind die Injektionskörperproben mit sandigem Kies und Grob- und Dachriesel, da diese einen hohen Kalkanteil besitzen. Ein hoher Kalkgehalt im Ausgangsmaterial verfälscht durch den Eigenglühverlust des Kalksteins die Ergebnisse. Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Masse des chemisch gebundenen Wassers erfolgte mit Hilfe von Probekörpern aus den Überschnitten der Injektionskörperproben. Theoretisch ergibt sich eine Zunahme der Masse des chemisch gebundenen Wassers mit fortschreitender Hydratation. Die Abnahme bei 224 Tagen der Masse des chemisch gebundenen Wassers beruht vermutlich auf der natürlichen Streuung bei der Versuchsdurchführung.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

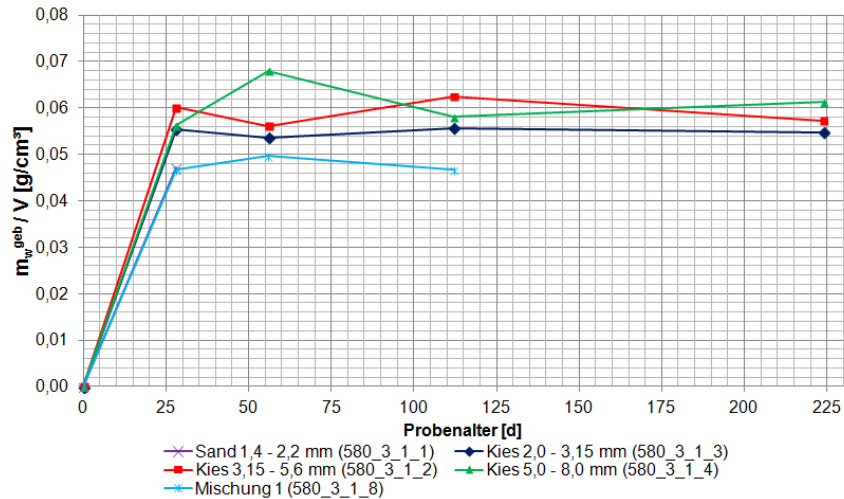


Abbildung 4.25.: Zeitlicher Verlauf der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der Injektionskörperproben

In Abbildung 4.26 ist der zeitliche Verlauf der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der reinen Suspensionsproben dargestellt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass je größer der W/Z-Wert, desto geringer die Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Probenvolumen ist. Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Masse des chemisch gebundenen Wassers erfolgte mit Hilfe von Probestücken aus den Überschnitten der Suspensionsproben.

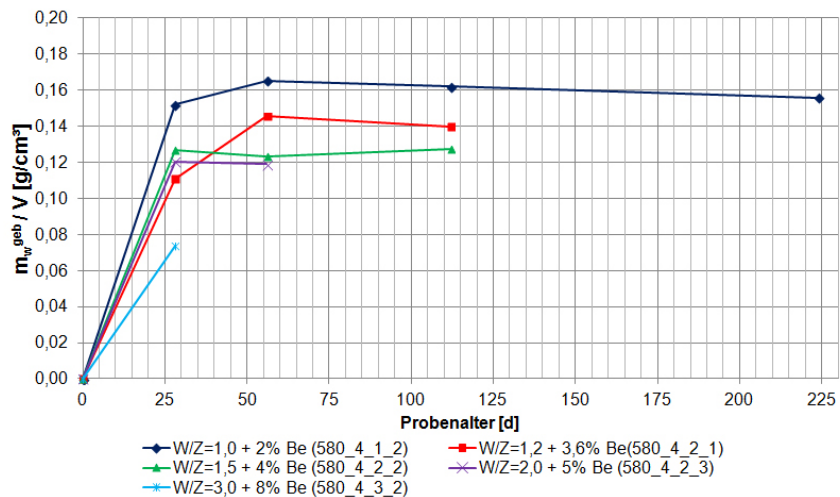


Abbildung 4.26.: Zeitlicher Verlauf der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der reinen Suspensionsproben

Abbildung 4.27 zeigt die Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der Injektionskörperproben, die mit Variation des W/Z-Wertes hergestellt

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

wurden, nach 28 Tagen. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem W/Z-Wert die Masse des chemisch gebundenen Wassers kleiner wird. Daraus kann geschlossen werden, dass weniger Zementpartikel in den verpressten Suspensionen vorhanden waren.

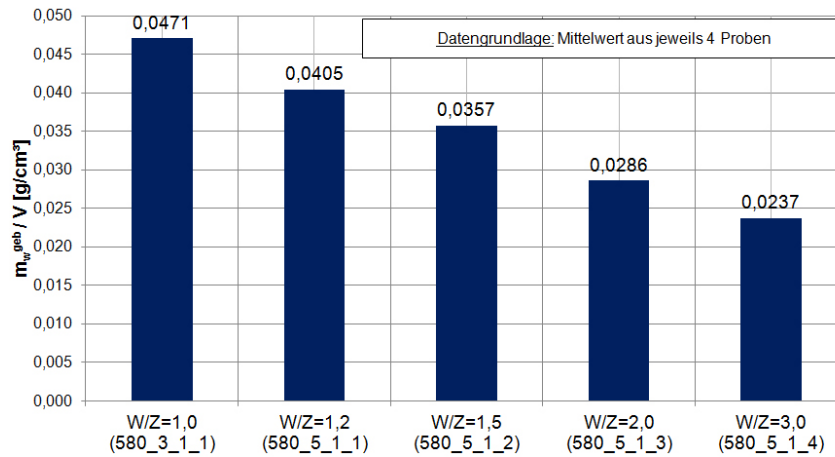


Abbildung 4.27.: Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der Injektionskörperproben mit variablen W/Z-Wert nach 28 Tagen

4.6.2. Vergleich der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben

Werden die Werte nach 28 Tagen aus den Abbildungen 4.26 und 4.27 miteinander verglichen, ist ersichtlich, dass die injizierten Proben eine deutlich geringere Masse an chemisch gebundenen Wasser aufweisen. Das Verhältnis dieser Werte, das sich nach Gleichung (4.3) errechnet, ist in Abbildung 4.28 dargestellt. Der Faktor $f_{m_w^{\text{geb}}}$ ist abhängig vom Porenanteil n , da bei Injektionskörpern im Gegensatz zu reinen Suspensionen nur diese Hohlräume gefüllt werden können.

$$f_{m_w^{\text{geb}}} = \frac{m_{w,m,\text{Injekt}}^{\text{geb}}}{m_{w,m,\text{Susp}}^{\text{geb}}} \quad (4.3)$$

Abbildung 4.28 stellt die Gegenüberstellung der Masse des chemisch gebundenen Wassers der Injektionskörperproben, die mit unterschiedlichen W/Z-Werten hergestellt wurden, mit der Masse des chemisch gebundenen Wassers der dazugehörigen reinen Suspensionsproben dar. Werden die Abbildungen 4.53 und 4.28 miteinander verglichen, ist ersichtlich, dass bei den Proben, deren Druckfestigkeiten im Vergleich zu jener der Suspensionsprobe gering ist, auch das Verhältnis der Masse des chemisch gebundenen Wassers deutlich niedriger ist.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

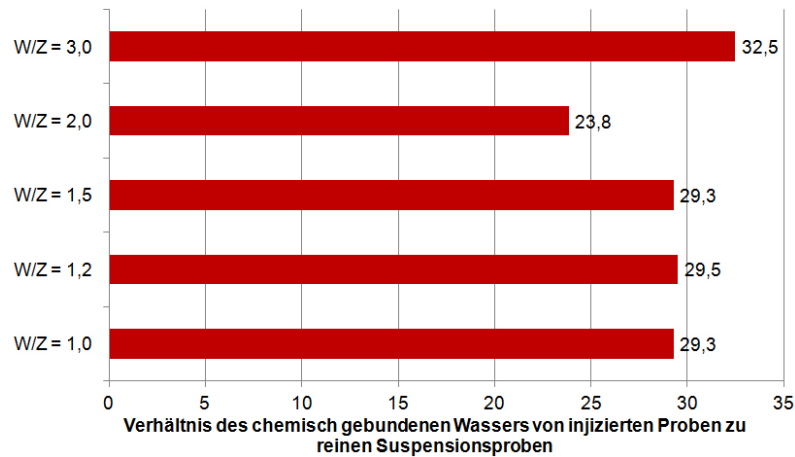


Abbildung 4.28.: Verhältnis der Masse des chemisch gebundenen Wassers der Injektionskörperproben zu den reinen Suspensionsproben mit variablen W/Z-Werten

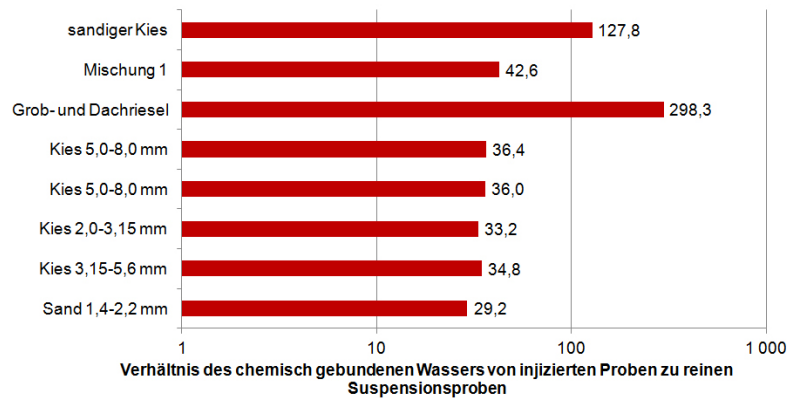


Abbildung 4.29.: Vergleich der Masse des chemisch gebundenen Wassers der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben

Abbildung 4.29 zeigt den Vergleich der Masse des chemisch gebundenen Wassers der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben mit einem W/Z-Wert von 1,0. Mit Ausnahme des sandigen Kieses und des Grob- und Dachriesels variiert das Verhältnis bei allen Proben zwischen 28 und 45%. Dieses Verhältnis gibt Aufschluss über die Menge des in die Hohlräume eingepressten Zementes.

4.7. Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit ist gemäß EN 12715 : 2000 [3] folgendermaßen definiert: „Last je Flächeneinheit, bei der eine seitlich nicht gestützte prismatische oder zylindrische

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Probe (Höhe = 2×Breite) aus dem zu untersuchenden Material bei einem einfachen Druckversuch versagt.“ Die Versuchsrandbedingungen und die Versuchsdurchführung werden in der EN 12715 [3] nicht spezifisch festgelegt.

Für die einaxialen Druckversuche wurde je nach Probengeometrie die ÖNORM B 4415 : 2010 [9] oder die ÖNORM EN 196-1 : 2005 [6] zu grunde gelegt.

Die Grundsatzversuche wurden durchgeführt, um einerseits den Einfluss der Probengeometrie auf die Festigkeit abschätzen und andererseits einen Vergleich der den Versuchen zugrunde liegenden Normen anstellen zu können. Weiters wurde der Einfluss des Anteils an Zuschlagstoffen auf die Festigkeit durch Variation des Normsandanteils ermittelt.

Die Ermittlung der Druckfestigkeit der Injektionskörperproben erfolgte sowohl in Abhängigkeit einer Variation des W/Z-Gehaltes, als auch von Variationen des Bodens bei einem W/Z-Gehalt von 1,0. Um über die Festigkeiten der Injektionskörper Aussagen treffen zu können, müssen die einaxialen Druckfestigkeiten der verwendeten reinen Suspensionen, unter den selben Lagerungs- und Herstellungsbedingungen, ermittelt werden.

4.7.1. Versuchsrandbedingungen

Nach dem Ausbau der hergestellten Proben wurden die Probekörper in einem Wasserbad bis zur Druckprüfung gelagert. Die Umgebungstemperatur während der Lagerung betrug zwischen 20 und 25°C. Knapp vor dem Versuch wurden die Proben auf ein H/D-Verhältnis von $\geq 1,73$ (gemäß [24]) geschnitten.

Die Würfelproben wurden gemäß ÖNORM EN 196-1 : 2005 [6] geprüft. Diese schreibt eine Prüftoleranz bei 28 Tagen von $\pm 8h$ vor. Während der gesamten Belastungsdauer ist die Last mit einer gleichmäßigen Laststeigerung von 2.400 ± 200 N/s bis zum Bruch zu erhöhen. Die Druckfestigkeit lässt sich nach Gleichung (4.4) berechnen. Dabei ist R_c die Druckfestigkeit in Megapascal, F_c die Höchstlast im Bruchzustand in Newton und A die Fläche der Probe in Quadratmillimeter.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (4.4)$$

Die Zylinderproben wurden gemäß ÖNORM B 4415 [9] geprüft. Diese schreibt bei zylindrischen Probekörpern ein Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von 1,8 bis 2,5 vor. Die Druckkraft wird während der gesamten Belastungsdauer mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit aufgebracht. Bei verkitteten oder stabilisierten Proben, deren Bruchstauchung zu weniger als 4% erwartet wird, ist die Vorschubgeschwindigkeit mit 0,2% der Anfangshöhe festgelegt. Bei allen anderen Proben beträgt die Vorschubgeschwindigkeit 1% der Anfangshöhe. Die einaxiale Druckspannung errechnet sich gemäß Gleichung (4.5).

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\Delta H}{H_i} \\ \sigma_1 &= \frac{P(1 - \varepsilon)}{A_i} \cdot 1000\end{aligned}\quad (4.5)$$

Dabei bedeutet ΔH die vertikale Zusammendrückung des Probekörpers in mm, H_i die Anfangshöhe des Probekörpers in mm, P die vertikale Belastung des Probekörpers in Newton und A_i die Anfangsquerschnittsfläche des Probekörpers in mm².

Wird eine vertikale Stauchung von 15% erreicht, ohne dass der Probekörper bricht, kann der einaxiale Druckversuch abgebrochen werden. Die einaxiale Druckspannung ist in diesem Fall bei einer Stauchung von 15% als einaxiale Druckfestigkeit definiert.

4.7.2. Versuchsdurchführung

Die einaxialen Druckversuche wurden mit einer hydraulischen Prüfpresse durchgeführt. Zur Anwendung kamen zwei verschiedene Kraftmessdosen (siehe Abbildung 4.30). Sowohl die Grundsatzversuche, als auch die Druckversuche der Injektionskörperproben mit einem W/Z-Wert von 1,0 wurden mit der 1.500 kN Kraftmessdose durchgeführt. Bei den Injektionskörperproben, die einen W/Z-Wert von $\geq 1,2$ aufwiesen, kam die Kraftmessdose mit 250 kN aufgrund der höheren Messgenauigkeit zur Anwendung. Geringfügige Schiefstellungen der Probekörper konnten über die Kalottenfassung des Kraftstempels ausgeglichen werden. Für die Versuchsdurchführung muss der Probendurchmesser und die Probenhöhe in mm eingegeben werden. Bei Würfelproben wird ein äquivalenter Probendurchmesser gemäß Gleichung (4.6) ermittelt. Der Druckversuch kann sowohl kraft- als auch weggesteuert durchgeführt werden.



Abbildung 4.30.: Hydraulische Prüfpresse mit 1.500 kN (links) und 250 kN Kraftmessdose (rechts)

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

4.7.2.1. Grundsatzversuche

Die Probekörper wurden am Tag der Druckprüfung aus dem Wasserbad genommen, oberflächlich abgetrocknet und danach vermessen, gewogen und fotografiert. Für die Ermittlung der Abmessungen wurde von den Würfelproben der Mittelwert von je vier Messungen der Kantenlänge und der Höhe ermittelt. Da die Prüfpresse als Eingangsdaten einen Durchmesser der Proben benötigt, wurde die Kantenlänge der Würfel unter Anwendung der Gleichung (4.6) in einen äquivalenten Probendurchmesser umgerechnet. Bei den zylindrischen Proben wurden die Probenabmessungen aus den Mittelwerten von vier Messungen (für den Durchmesser) bzw. zwei Messungen (für die Höhe) ermittelt. Die Ermittlung der Feuchtdichte ρ_f erfolgte durch Division der Masse der Probe vor dem Versuch mit dem Probenvolumen.

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4 \cdot a^2}{\pi}} \quad (4.6)$$

Die Würfelproben wurden mit einer konstanten Laststeigerung von 2.400 N/s bis zum Bruch belastet. Die Auswertung der Druckspannung erfolgte gemäß der Gleichung (4.4). Die Zylinderproben wurden mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,2% der Anfangsprobenhöhe bis zum Bruch belastet. Die Bruchspannung wurde gemäß Gleichung 4.5 ermittelt. Nach dem Versuch wurden die Proben in der Prüfpresse fotografiert, danach gewogen und das Bruchbild dokumentiert. Für die Ermittlung der Trockendichte ρ_d und des Wassergehaltes w wurden die Proben anschließend für mindestens 72 Stunden im Trocknungsöfen bei 105°C getrocknet.

4.7.2.2. Versuche an reinen Suspensionskörperproben

Die zylindrischen Suspensionproben wurden am Tag vor den Druckversuchen auf ein H/D-Verhältnis von $> 1,8$ geschnitten und wieder in das Wasserbad gelegt. Am Tag der Druckprüfung wurden sie aus dem Wasserbad genommen, oberflächlich abgetrocknet, vermessen, gewogen und fotografiert. Der Probendurchmesser wurde über eine Mittelwertbildung aus vier Messungen, die Probenhöhe aus zwei Messungen ermittelt. Die Bestimmung der Feuchtdichte ρ_f erfolgte wie bei den Grundsatzversuchen.

Die zylindrischen Proben wurden mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,2% der Anfangsprobenhöhe bis zum Bruch belastet. Die Bruchspannung wurde gemäß Gleichung (4.5) berechnet. Nach dem Druckversuch wurden die Proben fotografiert, gewogen und das Bruchbild aufgezeichnet. Nach 72-stündiger Lagerung im Trocknungsöfen wurden die Trockendichte ρ_d und der Wassergehalt w ermittelt.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

4.7.2.3. Versuche an den Injektionskörperproben

Die Injektionskörperproben wurden am Tag vor den Druckversuchen auf ein H/D-Verhältnis von $> 1,8$ geschnitten und in das Wasserbad gelegt. Am Tag der Druckprüfung wurden sie aus dem Wasserbad genommen, das Oberflächenwasser abgetrocknet, vermessen, gewogen und fotografiert. Die Ermittlung des Probendurchmessers erfolgte über eine Mittelwertbildung von vier Messungen. Die Probenhöhe wurde aus dem Mittelwert aus zwei Messungen ermittelt. Die Ermittlung der Feuchtdichte ρ_f erfolgte durch Division der Masse der Probe vor dem Versuch mit dem Probevolumen.

Die Injektionskörperproben wurden mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,2% der Anfangsprobenhöhe bis zum Bruch belastet. Die Ermittlung der Bruchspannung erfolgte gemäß Gleichung (4.5). Nach dem Druckversuch wurden die Proben fotografiert, gewogen und das Bruchbild dokumentiert. Die Trockendichte ρ_d und der Wassergehalt w wurde nach einer 72-stündigen Lagerung im Trocknungssofen bestimmt.

4.7.3. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche werden aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzung und Versuchsdurchführung in drei Kategorien unterteilt:

- Grundsatzversuche (Versuchsreihe 0),
- Versuche an reinen Suspensionsproben (Versuchsreihe 2) und
- Versuche an Injektionskörperproben (Versuchsreihe 1, 3 und 4).

4.7.3.1. Ergebnisse der Grundsatzversuche (Versuchsreihe 0)

Tabelle 4.12.: Auflistung der Grundsatzversuche

Versuchsreihe 0 - Grundsatzversuche							
Zement: CEM I 52,5R							
Lab-Nr: 580	1_1_1	1_1_2	1_2_1	1_2_2	2_1_1	2_2_1	2_3_1
Form	Würfel	Zylinder	Würfel	Zylinder	Zylinder	Zylinder	Zylinder
W/Z-Wert	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Bentonit	0%						
Normsand-anteil	-	-	3 Teile	3 Teile	3 Teile	2 Teile	4 Teile

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Die Versuche der Versuchsreihe 0 (Grundsatzversuche) wurden durchgeführt, um einerseits den Einfluss der Probenform auf die einaxiale Druckfestigkeit untersuchen zu können und andererseits um die den Versuchen zugrunde liegenden Normen vergleichen zu können. In weiterer Folge wurde der Normsandanteil variiert, um den Einfluss des Anteils an Zuschlagstoffen ermitteln zu können. Tabelle 4.12 zeigt eine Auflistung der durchgeführten Grundsatzversuche.

Tabelle 4.13.: Kennwerte der Zylinder- und Würfelpförper

Form	Reine Suspension			3 Teile Normsand		
	Lab-Nr: 580	ρ_f [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	Lab-Nr: 580	ρ_f [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]
Zylinder	1_1_2	1,54	0,91	1_2_2	2,07	1,92
Würfel	1_1_1	1,57	0,97	1_2_1	2,08	1,93
W/Z-Wert:	1,0			0,5		
Bentonit:	0%			0%		
Zement:	CEM I 52,5R			CEM I 52,5R		

In der Zement- und Betontechnologie wird das Verhältnis zwischen Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [7] mit 75 bis 80% beschrieben. Ein würfelförmiger Probekörper hat demnach eine höhere Druckfestigkeit, als ein zylindrischer Probekörper. Die wichtigsten Kennwerte der Prüfkörper sind in Tabelle 4.13 dargestellt.

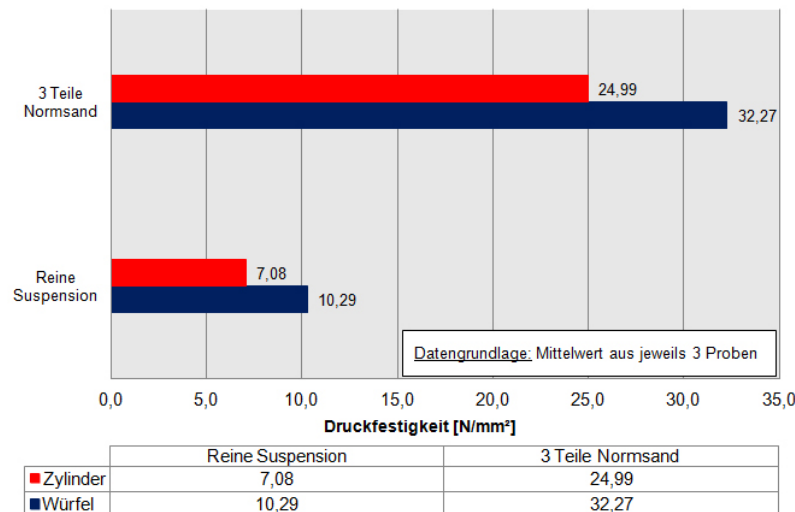


Abbildung 4.31.: Gegenüberstellung der Zylinder- und Würfeldruckfestigkeiten

Die Zylinder- und Würfeldruckfestigkeiten der Grundsatzversuche von jeweils drei Prüfkörpern sind in Abbildung 4.31 gegenübergestellt. Das Verhältnis zwischen Zylinder- und

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Würfeldruckfestigkeit der reinen Suspensionsproben liegt bei:

$$\frac{\text{Zylinder}}{\text{Würfel}} = \frac{7,08}{10,29} = 0,688 \sim 69\%. \quad (4.7)$$

Der Grund dafür, dass dieses Verhältnis nicht im Bereich der Norm liegt, ist in der unterschiedlichen Feuchtwichte begründet.

Das Verhältnis zwischen Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit der Probekörper, die mit drei Teilen Normsand hergestellt wurden, liegt bei:

$$\frac{\text{Zylinder}}{\text{Würfel}} = \frac{24,99}{32,27} = 0,774 \sim 77\% \quad (4.8)$$

und liegt damit im von der Norm vorgegebenen Bereich.

Anhand der Grundsatzversuche wurden die Normen für den einaxialen Druckversuch im Grundbau, ÖNORM B 4415 [9], und in der Zementtechnologie, ÖNORM EN 196-1 [6], verglichen. Die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgte gemäß den Gleichungen (4.4) und (4.5). Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.32 dargestellt.

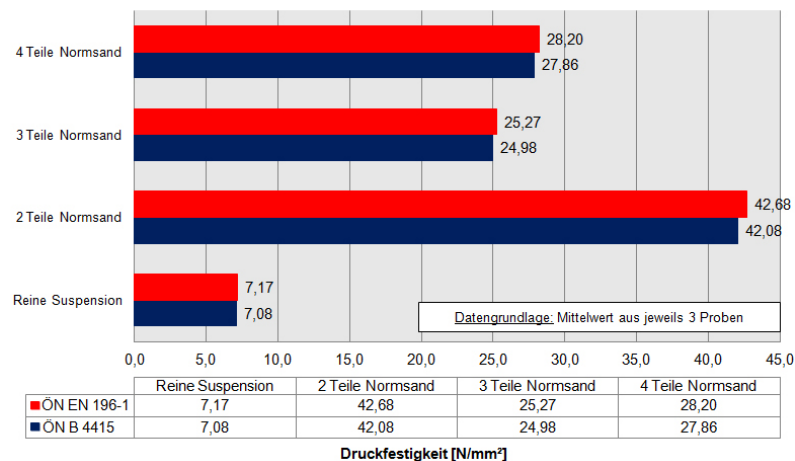


Abbildung 4.32.: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten gemäß ÖN B 4415 [9] und ÖN EN 196-1 [6]

In der Zement- und Betontechnologie werden Querdehnungen vernachlässigt, da Stauchungen in der Betontechnologie gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [7] auf 0,35% beschränkt sind. In der ÖNORM EN 196-1 [6] finden Querdehnungen überhaupt keine Erwähnung. Auswertungen gemäß ÖNORM EN 196-1 [6] ergeben aufgrund der Vernachlässigung der Querdehnung höhere Bruchspannungen. Der Unterschied zu den Druckfestigkeiten gemäß ÖNORM B 4415 [9] fällt aufgrund einer gemessenen maximalen Stauchung von 1,5% jedoch nur gering aus. Die Variation des Normsandanteils verdeutlicht, dass Proben, die gemäß ÖNORM EN 196-1 [6] hergestellt wurden (3 Teile Normsand), die geringste Druckfestigkeit aufweisen.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

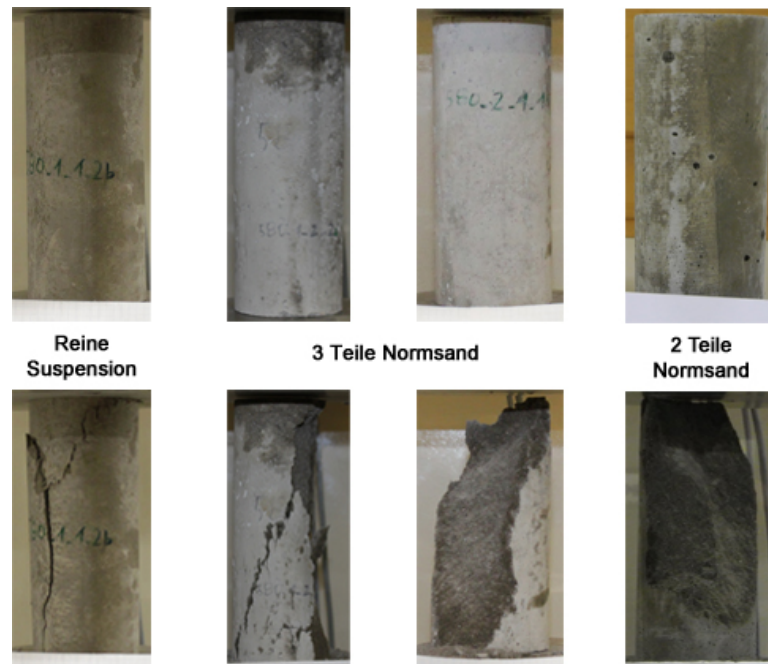


Abbildung 4.33.: Repräsentative Bruchbilder der Grundsatzversuche

In Abbildung 4.33 sind repräsentativ Bruchbilder der Proben aus den Grundsatzversuchen dargestellt. Die obere Reihe entspricht den Proben vor Versuchsbeginn, während die untere Reihe die Proben nach dem Bruch wiedergibt.

4.7.3.2. Ergebnisse der reinen Suspensionsproben (Versuchsreihe 2)

Die Kenntnis über die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus reinem Injektionsmaterial ist wichtig, um die Festigkeiten der Injektionskörper beurteilen zu können.

Tabelle 4.14.: Übersicht über die Versuchsreihe 2

Versuchsreihe 2 - Variation W/Z-Wert							
Reine Suspensionsproben mit CEM I 42,5R							
Lab-Nr: 580	4_2_4	4_1_2	4_2_1	4_2_2	4_2_3	4_3_1	4_3_2
W/Z-Wert	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0	3,0
Bentonit	2%	2%	3,6%	4%	5%	5%	8%

Abbildung 4.34 zeigt den Verlauf der Druckfestigkeiten der reinen Suspensionsproben in Abhängigkeit des W/Z-Gehaltes. Mit steigendem W/Z-Gehalt verringert sich die Druckfestigkeit der Suspensionsproben. Der Mittelwert der Druckfestigkeit der Suspensionsproben

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

mit einem W/Z-Gehalt von 0,8 ist aufgrund einer Probe, die einen Ausreißer nach unten darstellt, geringer als jener bei einem W/Z-Gehalt von 1,0.

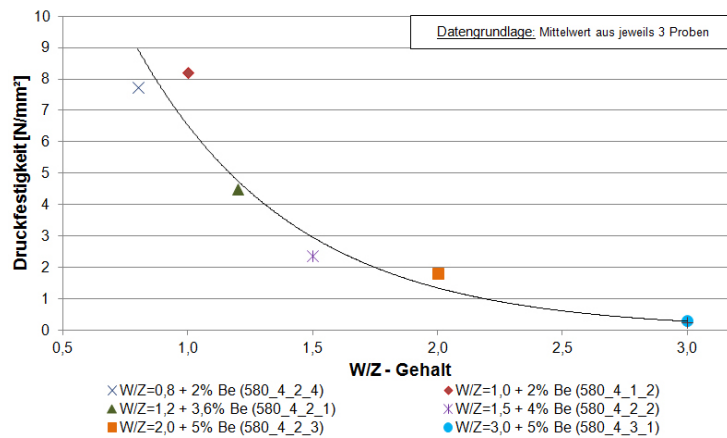


Abbildung 4.34.: Verlauf der Druckfestigkeiten der reinen Suspension in Abhängigkeit des W/Z-Gehaltes

DONEL [21] und CAMBEFORT [20] geben an, dass die Zugabe von Bentonit bis 4% des Zementgehaltes keinen Einfluss auf die Festigkeit hat. Ab einer Bentonitbeimengung von > 4% kann es zu wesentlichen Festigkeitsrückgängen im ausgehärteten Zementstein kommen. Laut KUTZNER [32] treten diese Festigkeitsrückgänge erst bei einer Zugabe von > 6% Bentonit, bezogen auf den Zement, auf.

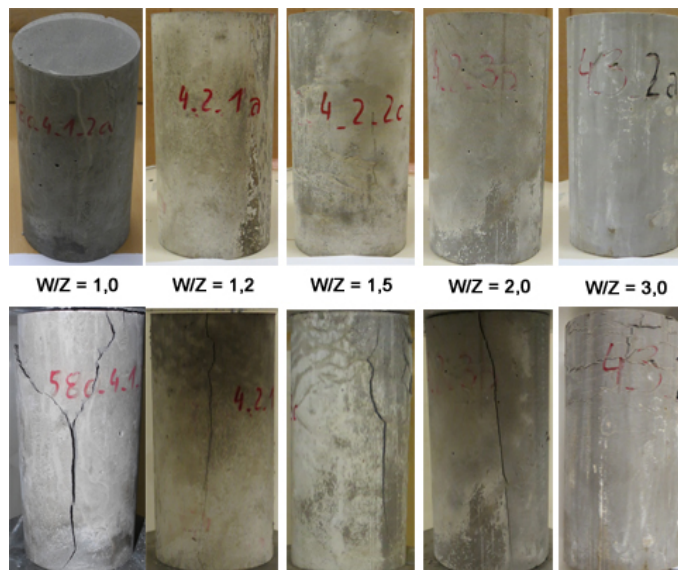


Abbildung 4.35.: Bruchbilder der reinen Suspensionsproben

Diese Thesen wurden mittels reinen Suspensionsproben mit einem W/Z-Gehalt von 3,0 untersucht. Eine der beiden Chargen wies eine Zugabe von 5% Bentonit auf, während

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

der anderen Charge 8% Bentonit beigemischt wurde. Während die Proben mit 5% Bentonitbeimischung eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 0,29 N/mm² aufweisen, hatten die anderen Proben eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 0,23 N/mm².

Abbildung 4.35 zeigt repräsentativ ein Bruchbild pro geprüfem Wasser-Zement-Wert. In der oberen Reihe sind die Proben vor Versuchsbeginn dargestellt, während die untere Reihe die Proben nach dem Bruch zeigt.

4.7.3.3. Ergebnisse der Injektionskörperproben (Versuchsreihe 1, 3 und 4)

Die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit von Injektionskörperproben erfolgte in Abhängigkeit sowohl einer Variation des W/Z-Wertes als auch von Variationen des Bodens. In Tabelle 4.14 sind alle Proben, an denen einaxiale Druckversuche durchgeführt wurden, aufgelistet.

Tabelle 4.15.: Auflistung der Versuche an den Injektionskörperproben

Versuchsreihe 1 - Variation W/Z-Wert					
Injektionskörperprobe mit Bodenprobe 581_2, Sand 1, 4-2, 2 mm					
Lab-Nr: 580	3_1_1	5_1_1	5_1_2	5_1_3	5_1_4
W/Z-Wert	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0
Bentonit	2%	3,6%	4%	5%	8%
Zement	CEM I 42,5R				
Versuchsreihe 3 - Variation Bodenprobe					
Suspension: W/Z-Wert = 1,0 + 2% Bentonit mit CEM I 42,5R					
Lab-Nr: 580	3_1_1	3_1_2	3_1_3	3_1_4	3_1_5
Bodenprobe	581_2	581_4	581_3	581_5	581_5
	Sand 1, 4-2, 2 mm	Kies 3, 15-5, 6 mm	Kies 2, 0-3, 15 mm	Kies 5, 0-8, 0 mm	Kies 5, 0-8, 0 mm
Lab-Nr: 580	3_1_7	3_1_8	3_1_9		
Bodenprobe	581_6	581_9	581_12		
	Grob- & Dachriesel	Mischung 1	sandiger Kies		
Versuchsreihe 4 - Festigkeitsentwicklung					
Bodenprobe: Kies 2, 0-3, 15 mm; Suspension: W/Z=1,0 + 2% Bentonit					
Probenalter	7 Tage	28 Tage	56 Tage		
Labor-Nr.	580_3_2_1	580_3_1_3	580_3_3_1		

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

In Abbildung 4.36 sind einige Bruchbilder der einaxialen Druckversuche an den Injektionskörperproben dargestellt. Während die obere Reihe die Proben vor den Versuchen zeigt, sind in der unteren Reihe die Proben nach dem Bruch abgebildet.

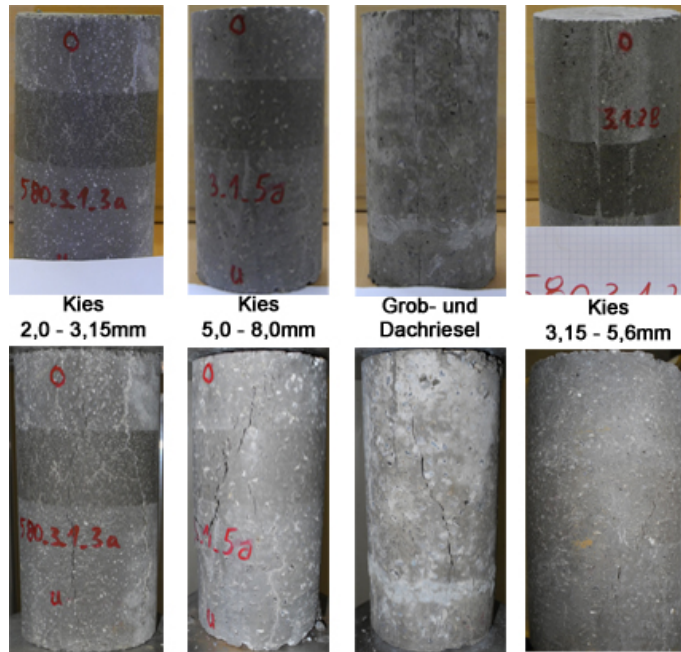


Abbildung 4.36.: Repräsentative Bruchbilder der Injektionskörperproben

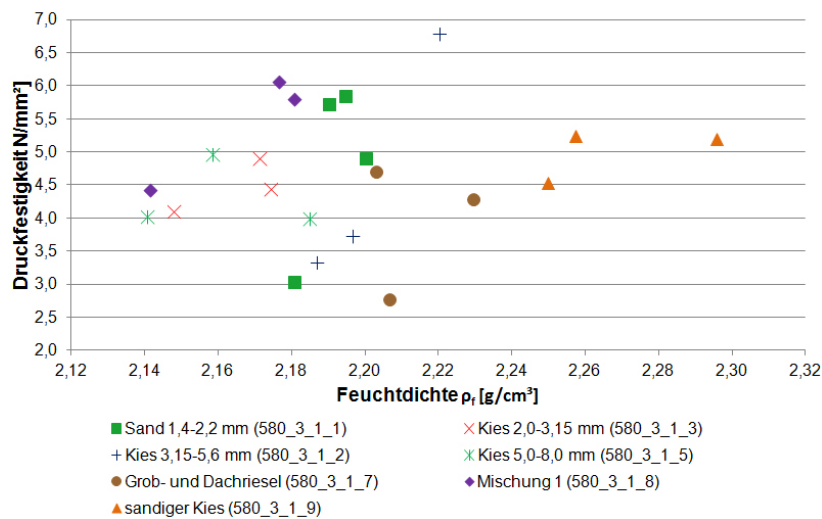


Abbildung 4.37.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Feuchtdichte ρ_f

Abbildung 4.37 zeigt die einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Feuchtdichte ρ_f der Injektionskörperproben. Aus dieser Abbildung zeigt sich tendenziell, dass die Probekörper bei größerer Feuchtdichte eine höhere Druckfestigkeit aufweisen. Diese

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Aussage trifft jedoch nicht auf alle Proben zu. Daher müssen neben der Feuchtdichte auch noch weitere Faktoren berücksichtigt werden.

Weitere Faktoren sind einerseits die Trockendichte ρ_d und andererseits die Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Probenvolumen, die Aufschluss darüber gibt, wieviel Zement in die vorhandenen Porenräume eindringen konnte. In den Abbildungen 4.38 bis 4.44 ist die einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Probenvolumen m_w^{geb}/V_d der injizierten Bodenproben dargestellt.

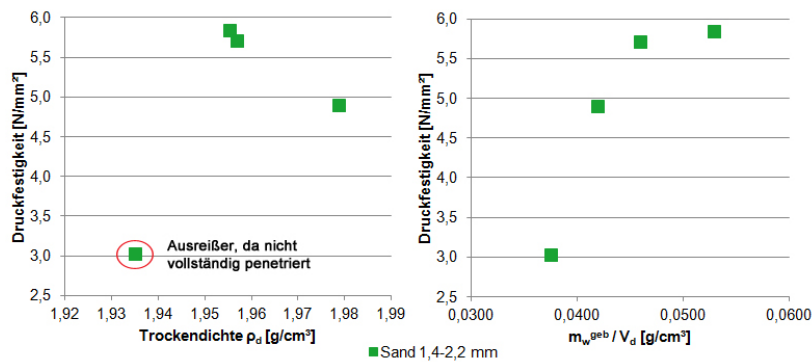


Abbildung 4.38.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Sandes 1, 4-2, 2 mm (580_3_1_1)

Abbildung 4.38 zeigt, dass eine der vier untersuchten Proben einen Ausreißer nach unten darstellt. Der rechten Abbildung kann entnommen werden, dass diese Probe eine geringere Masse an chemisch gebundenem Wasser aufweist, was darauf zurückzuführen ist, dass diese Probe nicht vollständig penetriert wurde.

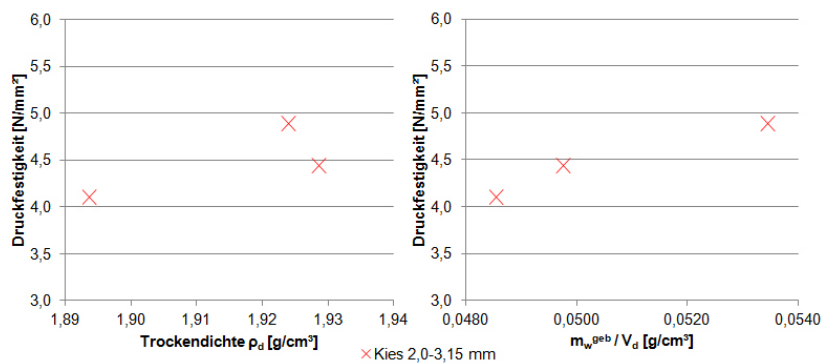


Abbildung 4.39.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Kieses 2, 0-3, 15 mm (580_3_1_3)

In Abbildung 4.39 ist zu sehen, dass die Probe mit der größten einaxialen Druckfestigkeit

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

eine größere Menge an chemisch gebundenem Wasser aufweist. Das bedeutet, dass die Hohlräume dieser Probe mit einer größeren Menge an Zement verfüllt wurden.

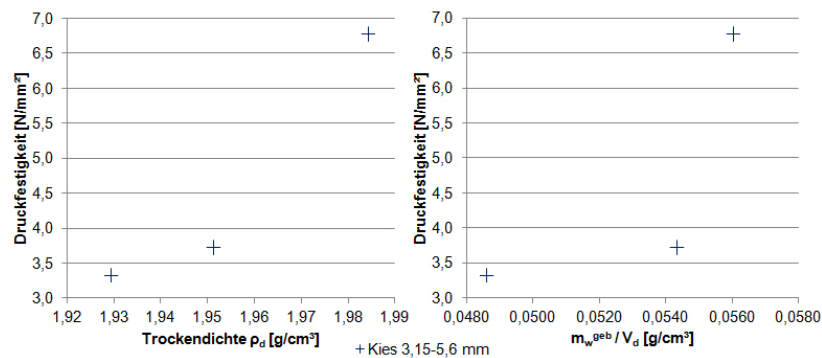


Abbildung 4.40.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Kieses 3, 15-5, 6 mm (580_3_1_2)

Abbildung 4.40 zeigt einen Ausreißer nach oben. Es ist zu erkennen, dass diese Probe eine größere, jedoch nicht deutlich größere, Menge an chemisch gebundenem Wasser aufweist, womit ein anderer Einflussfaktor eine wesentliche Rolle spielen muss. Aus Abbildung 4.45 geht hervor, dass diese Probe einen geringeren Porenanteil aufweist. Das bedeutet, dass diese Probe über weniger Hohlräume, die verpresst werden können, verfügt, diese aber mit einer größeren Menge an Zement verfüllt wurden. Eine mögliche Ursache dafür kann die Versuchsanordnung zur Probekörperherstellung sein. Bei dieser Probe handelte es sich nämlich um den direkt über der Fußplatte angeordneten Prüfkörper. Da dieser über den gesamten Herstellungsprozess mit Zement in Berührung stand, konnten sich scheinbar mehr Zementpartikel an den Bodenkörnern ablagern, wodurch ein kompakteres Gefüge entstand.

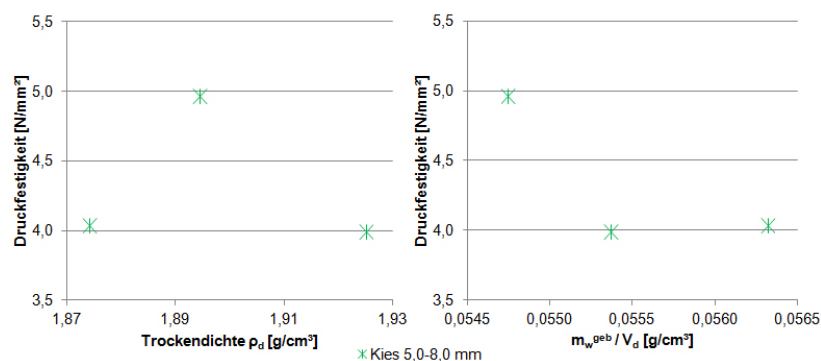


Abbildung 4.41.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Kieses 5, 0-8, 0 mm (580_3_1_5)

Aus Abbildung 4.41 geht hervor, dass alle Injektionskörperproben, die mit Kies 5, 0-

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

8,0mm hergestellt wurden, annähernd gleiche Werte bezogen auf die Druckfestigkeit und die Masse des chemisch gebundenen Wassers aufweisen. Die erhöhte Druckfestigkeit der Probe lässt sich auf den geringeren Porenanteil dieser Probe zurückführen (siehe Abbildung 4.45).

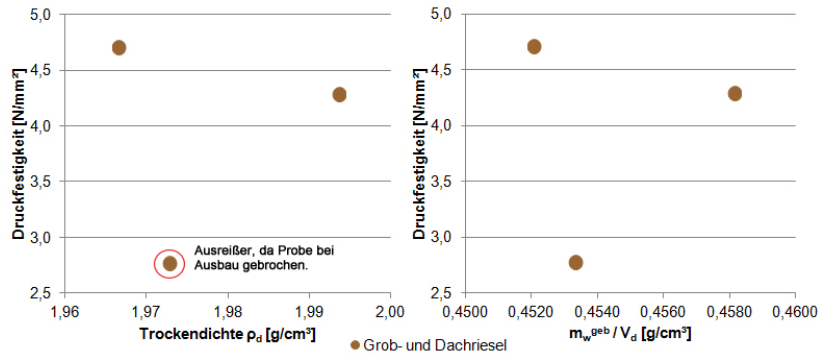


Abbildung 4.42.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Grob- und Dachriesels (580_3_1_7)

Aus Abbildung 4.42 sticht die markierte Probe hervor. Diese Probe brach während des Ausbaus aus dem geschlitzten Injektionszylinder. Aus der rechten Abbildung ist ersichtlich, dass die Masse des chemisch gebundenen Wassers im Vergleich mit den Quarzsanden und -kiesen deutlich höher ist. Dies ist auf den Kalkgehalt des Grob- und Dachriesels zurückzuführen. Der Kalk im Gestein wandelt sich während der Erhitzung der Probe auf 1010°C im Muffelofen bei 580°C unter Freigabe von Wasser in Calciumoxid CaO um, wodurch es zu einer Verfälschung der Ergebnisse kommt.

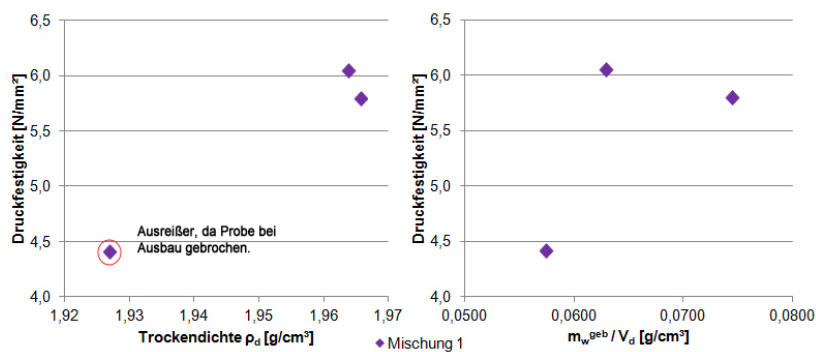


Abbildung 4.43.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers der injizierten Mischung (580_3_1_8)

Der in Abbildung 4.43 dargestellte Ausreißer kann dadurch erklärt werden, dass die Probe während des Ausbaus aus dem Injektionszylinder brach. Weiters ist ersichtlich, dass dieser Ausreißer weniger Wasser chemisch gebunden hat. Daraus kann auf den geringeren Anteil

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

an Zement in der Probe geschlossen werden. Zudem geht aus Abbildung 4.45 hervor, dass dieser Ausreißer einen höheren Porenanteil aufweist.

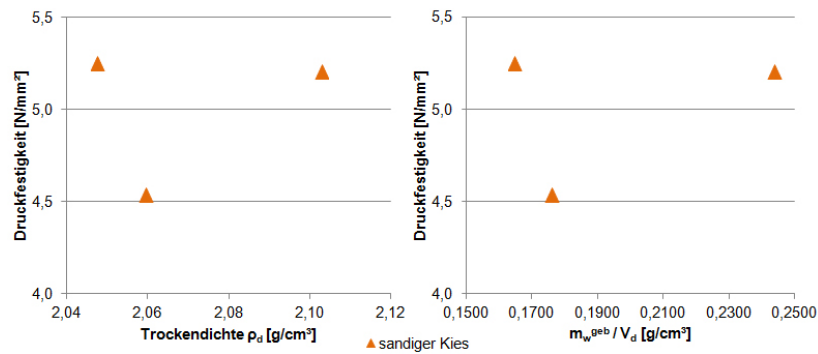


Abbildung 4.44.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten, sandigen Kieses (580_3_1_9)

Abbildung 4.44 zeigt, dass alle Injektionskörperproben, die durch Penetration eines sandigen Kieses hergestellt wurden, ähnliche Werte bezüglich der Druckfestigkeit aufweisen. Die Masse des chemisch gebundenen Wassers der einzelnen Prüfkörper variiert jedoch deutlich. Der Probekörper mit der größten Menge an gebundenem Wasser, weist einen höheren Verfüllgrad der Porenräume auf. Der injizierte Boden besitzt einen hohen Kalkanteil, wodurch die Masse des chemisch gebundenen Wassers im Vergleich mit dem Quarzsand und den Quarzkiesen deutlich größer ist.

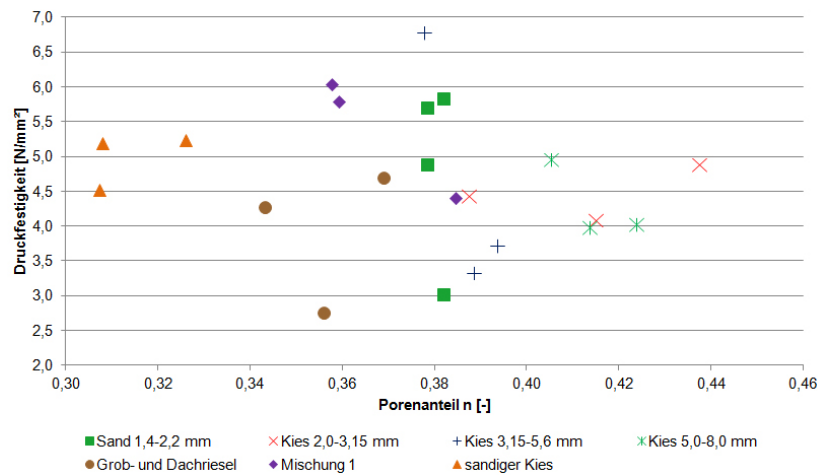


Abbildung 4.45.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Porenanteil n

In Abbildung 4.45 ist die einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Porenanteil n dargestellt. Der Porenanteil n , und die daraus resultierende Lagerungsdichte D , hat großen

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Einfluss auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben. Prinzipiell gilt: je kleiner der Porenanteil, desto kleiner sind die zu verfüllenden Hohlräume.

Der Porenanteil n gibt jedoch nur an, wieviele Hohlräume mit Injektionsmaterial verfüllt werden können. Je größer der Verfüllgrad der Hohlräume, desto höher sind die einaxialen Druckfestigkeiten. Der Verfüllgrad kann über die Masse des chemisch gebundenen Wassers abgeleitet werden (siehe Kapitel 4.6).

Einfluss der Probengeometrie

Ein weiterer Einflussfaktor auf die einaxiale Druckfestigkeit von Injektionskörperproben ist die Probengeometrie. Bei zylindrischen Proben ist das Verhältnis von Probenhöhe zu Probendurchmesser maßgebend. Abbildung 4.46 zeigt die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit der untersuchten Proben von deren H/D-Verhältnis. Gemäß ÖNORM B 4415 [9] ist ein H/D-Verhältnis von 1,8 noch zulässig für die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit. In Abbildung 4.46 ist der Bereich der nicht zulässigen Probenabmessungen grün hinterlegt. Die DIN 4093 [2] schreibt ein H/D-Verhältnis von 2,0 vor. Bei Zylindern mit einem H/D-Verhältnis von 1,0 ist die einaxiale Druckfestigkeit mit dem Faktor 0,8 abzumindern. Bei einem H/D-Verhältnis zwischen 1,0 und 2,0 darf linear interpoliert werden.

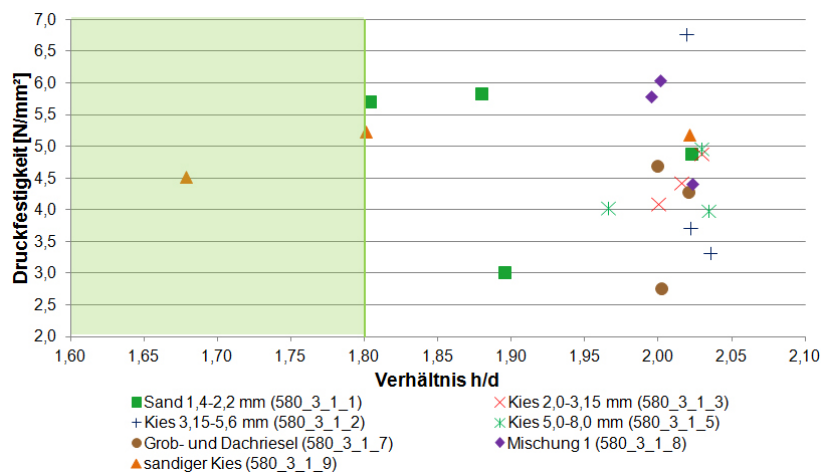


Abbildung 4.46.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom H/D-Verhältnis

Aus Abbildung 4.46 ist ersichtlich, dass mit Ausnahme einer Probe, die beim Ausbau aus dem Injektionszylinder brach, alle Proben ein H/D-Verhältnis von $\geq 1,8$ aufweisen. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass kein Einfluss des H/D-Verhältnisses auf die einaxiale Druckfestigkeit in dem von der Norm vorgegebenen Bereich ($H/D = 1,8-2,5$) existiert.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Variation des W/Z-Wertes

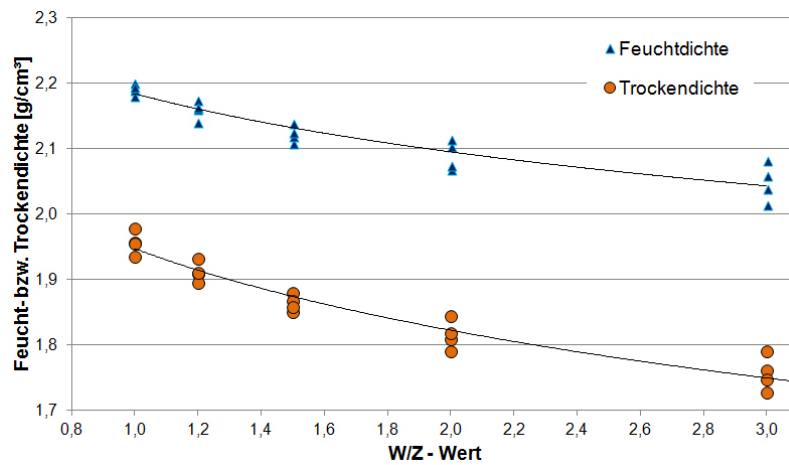


Abbildung 4.47.: Feucht- bzw. Trockendichte in Abhängigkeit des W/Z-Wertes

Für die Variation des W/Z-Wertes wurden die Injektionskörperproben ausschließlich mit Quarzsand 1,4-2,2 mm hergestellt. Abbildung 4.47 zeigt den Verlauf der Feucht- bzw. Trockendichte ρ_f bzw. ρ_d in Abhängigkeit des W/Z-Wertes. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass bei steigendem W/Z-Wert die Feuchtdichte und die Trockendichte geringer werden. Der Verlauf der Feucht- bzw. Trockendichte ist über eine logarithmische Trendlinie dargestellt. Ein Vergleich der beiden Verläufe zeigt, dass diese nicht ident sind. Daraus folgt, dass bei steigendem W/Z-Wert der Wassergehalt der Probekörper steigt.

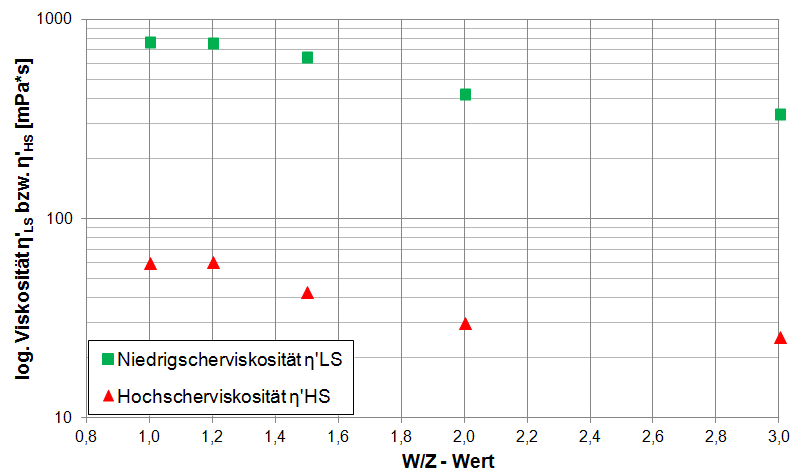


Abbildung 4.48.: Einfluss des steigenden W/Z-Wertes auf die Viskosität

In Abbildung 4.48 ist der Zusammenhang zwischen Niederscherv- bzw. Hochschervviskosität und dem W/Z-Wert dargestellt. Aus dieser Abbildung ist zu erkennen, dass je

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

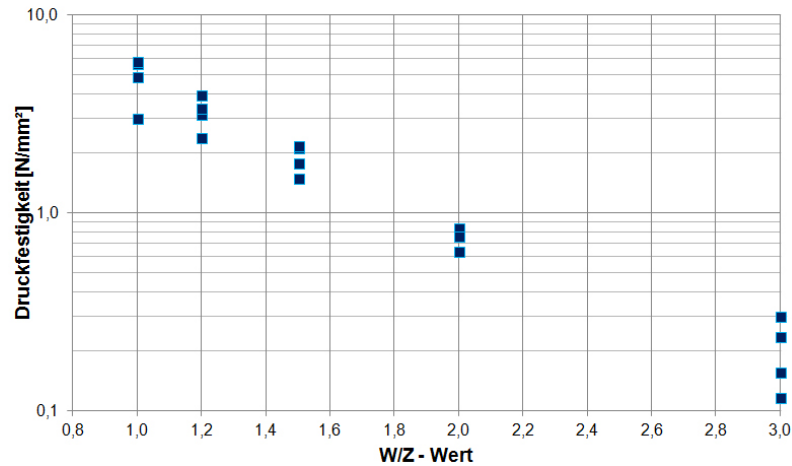


Abbildung 4.49.: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des W/Z-Wertes

größer der W/Z-Wert ist, desto geringer werden sowohl die Niedrigscher- als auch die Hochscherviskosität. Das bedeutet, dass der Abstand zwischen den Zementpartikel in der Suspension bei steigendem W/Z-Wert größer wird. Dadurch kann die Suspension auch besser in die vorhandenen Hohlräume des Bodengefüges eindringen.

Abbildung 4.49 stellt den logarithmischen Verlauf der einaxialen Druckfestigkeiten der Injektionskörperproben in Abhängigkeit des W/Z-Wertes dar. Es ist ersichtlich, dass die einaxialen Druckfestigkeiten bei steigendem W/Z-Wert kleiner werden.

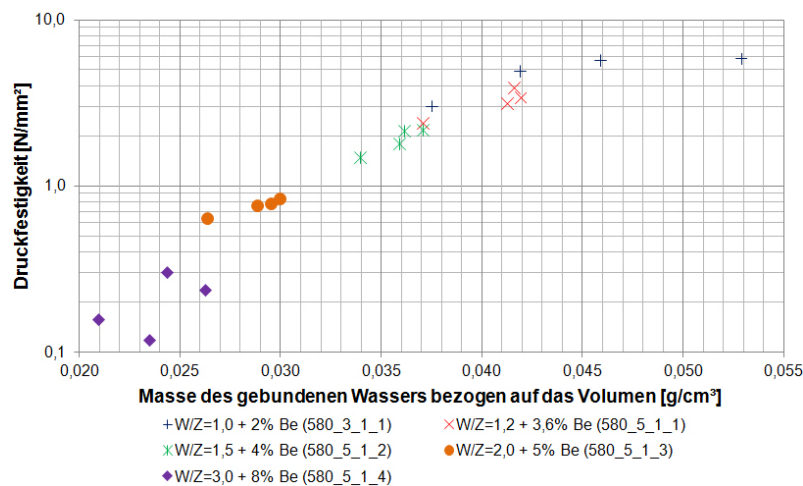


Abbildung 4.50.: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen bei Variation des W/Z-Wertes

Abbildung 4.50 zeigt die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen unter Variation des W/Z-Wertes.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Es zeigt sich, dass bei steigendem W/Z-Wert sowohl die Druckfestigkeit als auch die Masse des chemisch gebundenen Wassers abnimmt.

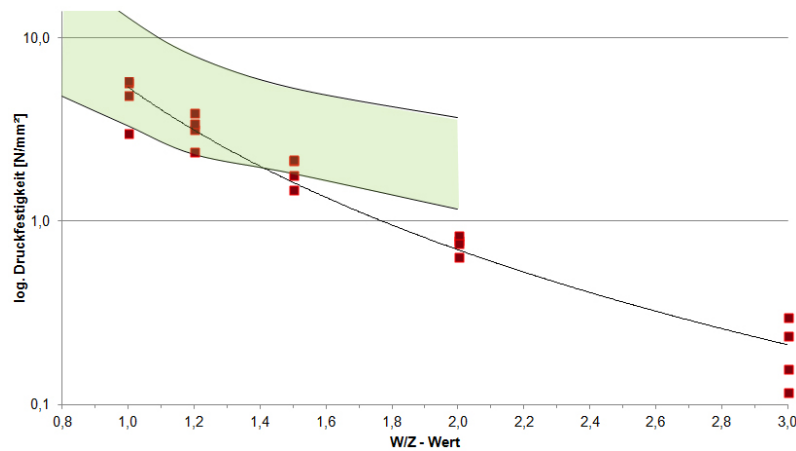


Abbildung 4.51.: Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten mit den Ergebnissen von BONZEL & DAHMS [17]

In Abbildung 4.51 sind die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeiten an den Injektionskörperproben mit variablen W/Z-Wert den Ergebnissen der Untersuchungen von BONZEL & DAHMS [17] gegenübergestellt. Der grün hinterlegte Bereich zeigt die erreichten Druckfestigkeiten an enggestuften Natursanden (1-2 mm) bei Variation der Zemente gemäß [17]. Dieser Vergleich ist aufgrund der ähnlichen Beschaffenheit des Bodens (Quarzsand 1,4-2,2 mm) zulässig. Die Abbildung zeigt, dass die untersuchten Injektionskörperproben bis zu einem W/Z-Wert von 1,5 in dem von BONZEL & DAHMS [17] ermittelten Bereich liegen.

Die erreichten Druckfestigkeiten der mit Suspensionen mit hohem W/Z-Wert (2,0 & 3,0) verpressten Sandproben lassen eine Aussage über den Einfluss des Bentonites auf die Festigkeiten zu. Bei diesen beiden W/Z-Werten war die Bentonitzugabe $\geq 5\%$, wodurch es nach DONEL [21] und CAMBEFORT [20] zu wesentlichen Festigkeitsrückgängen kommen kann. Diese Bentonitzugabe war jedoch erforderlich, um die eingebrachten Suspensionen stabil zu halten.

4.7.3.4. Vergleich der Injektionskörperproben mit reinen Suspensionsproben

Für die Beurteilung der einaxialen Druckfestigkeit von Injektionskörperproben wurden einaxiale Druckversuche an reinen Suspensionsproben durchgeführt. Abbildung 4.52 zeigt den Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben mit einem W/Z-Wert von 1,0. Das Verhältnis der Mittelwerte der

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

Druckfestigkeit von den Injektionskörperproben und den Suspensionsproben errechnet sich zu:

$$f_{qu} = \frac{q_{u,m,Injekt}}{q_{u,m,Susp}} \cdot 100[\%]. \quad (4.9)$$

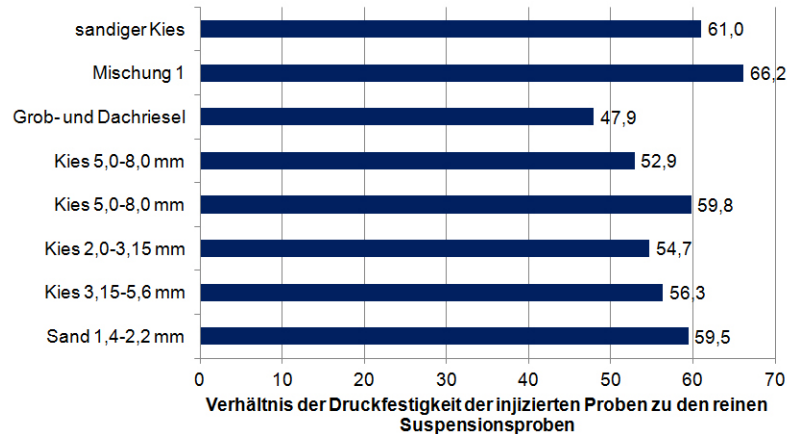


Abbildung 4.52.: Verhältnis der einaxialen Druckfestigkeiten der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben

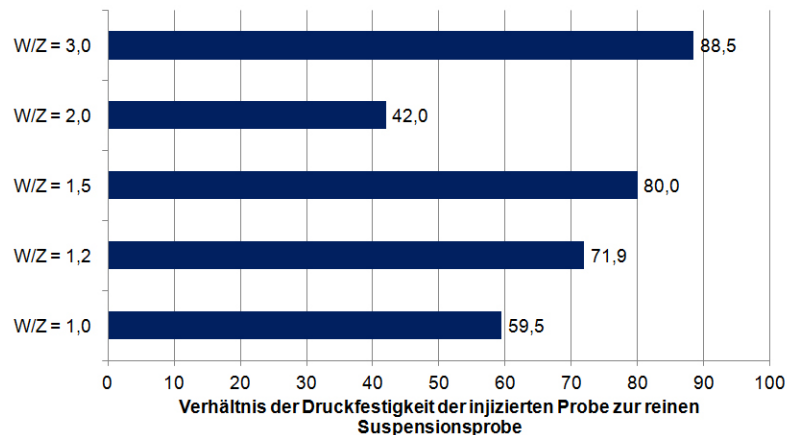


Abbildung 4.53.: Verhältnis der einaxialen Druckfestigkeit der Injektionskörperproben zu den reinen Suspensionsproben bei variablem W/Z-Wert

Es ist zu sehen, dass die Injektionskörperproben zwischen 45 und 70% der einaxialen Druckfestigkeit der reinen Suspensionsproben aufweisen. Der Grund dafür liegt im Verfüllgrad der Hohlräume der Injektionskörperprobe. Über einen Vergleich der Masse des chemisch gebundenen Wassers können Rückschlüsse auf den Verfüllgrad gezogen werden. Die Masse des chemisch gebundenen Wassers wird als Vergleichskriterium herangezogen, da sie eine relative Aussage über den Zementgehalt liefert.

4. PRÜFUNG DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT

In Abbildung 4.53 ist das Verhältnis der einaxialen Druckfestigkeit der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben unter Berücksichtigung der Variation des W/Z-Wertes dargestellt.

Aus Abbildung 4.53 geht hervor, dass sich das Verhältnis der einaxialen Druckfestigkeit zwischen Injektionskörperproben und reinen Suspensionsproben mit steigendem W/Z-Wert ändert. Während das Verhältnis der Druckfestigkeit zwischen Injektionskörperprobe und Suspensionsprobe bei einem W/Z-Wert von 1,0 zwischen 45 und 70% liegt, deckt das Verhältnis bei der Variation des W/Z-Wertes den Bereich zwischen 40 und 90% ab. Dieser Unterschied der Festigkeiten ist auf den Verfüllgrad der Hohlräume des injizierten Bodens zurückzuführen.

5. Zusammenfassung

Um Kenntnis über die Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit von mit Zementsuspensionen hergestellten Injektionskörpern zu erlangen, wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit Laborversuche durchgeführt. Hierfür wurden die injizierten Böden, der Wasser-Zement-Gehalt und die Lagerungsdichte der eingebauten Proben variiert. Weiters wurden die Suspensionskennwerte ermittelt und danach untersucht, inwieweit diese einen Einfluss auf die erzielbaren Festigkeiten haben.

Bedingt durch die gezielte Variation des Wasser-Zement-Gehaltes können folgende Ergebnisse festgehalten werden: mit steigendem Wasser-Zement-Gehalt (1 / 1,2 / 1,5 / 2 / 3) werden Feuchtdichte und erzielbare Festigkeiten reduziert, mit steigendem Bentonitanteil (2 / 3,6 / 4 / 5 / 8 M-% von Zement) wird das Absetzmaß, die Marsh-Zeit, die Fließgrenze und der Erstarrungsbeginn beeinflusst. Daraus folgt, dass speziell beim Einsatz von Ton-Zement-Suspensionen besonderes Augenmerk auf eine ausgewogene und detaillierte Prüfung der rheologischen Eigenschaften sowie der einaxialen Druckfestigkeit gelegt werden muss.

Wesentlichen Einfluss auf das Eindringverhalten von Suspensionen hat die Viskosität. Es hat sich im Zuge dieser Diplomarbeit gezeigt, dass Suspensionen mit steigendem W/Z-Wert eine geringere Viskosität aufweisen. Dies ist auf die Menge an in der Suspension gelöstem Zement und dadurch auf den Abstand zwischen den Zementpartikeln zurückzuführen. Die Viskosität der Suspensionen wird von der Umgebungstemperatur und von der Zeit zwischen Anmischende und Viskositätsprüfung bzw. Injektionsbeginn beeinflusst. Deshalb muss bei der Prüfung der Viskosität speziell auf eine genaue Versuchsdurchführung und Einhaltung konstanter Randbedingungen (Temperatur, Zeit) geachtet werden.

Der Einfluss der Probengeometrie auf die einaxiale Druckfestigkeit konnte mit Hilfe von Grundsatzversuchen und Injektionskörperproben, deren H/D-Verhältnis aufgrund des Probenausbaus kleiner als 1,8 war, ermittelt werden. Es hat sich gezeigt, dass bei Einhalten des H/D-Verhältnisses gemäß der Norm der Einfluss der der Probenabmessung auf die einaxiale Druckfestigkeit der Injektionskörperproben vernachlässigbar gering ist.

Durch die Variation der injizierten Böden stellte sich heraus, dass bei den großteils verwendeten Einkornböden der Einfluss der Lagerungsdichte auf die einaxiale Druck-

5. ZUSAMMENFASSUNG

festigkeit geringer ist, als bei den gemischtkörnigen Böden. Das liegt vor allem an der Verdichtbarkeit dieser Böden, da der Einbau aller Proben denselben Randbedingungen (Fallgewicht, Anzahl der Schläge) ausgesetzt war.

Die Ermittlung des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Probenvolumen lässt einen Rückschluss auf den im Hohlraum befindlichen Zement zu. Dafür muss die Masse des chemisch gebundenen Wassers der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben verglichen werden. Je mehr Wasser chemisch gebunden wird, desto größer muss die Menge an Zementpartikeln in den Hohlräumen sein. Dies bedingt wiederum eine höhere Druckfestigkeit, da das Zementsteingefüge kompakter ist.

Der Vergleich der Festigkeiten zwischen im Labor hergestellten Injektionskörperproben und den Suspensionsproben des Injektionsmaterials zeigt, dass die Injektionskörperproben etwa 40 bis 75% der einaxialen Druckfestigkeit der reinen Suspensionsproben erlangen können. Dies liegt vor allem am geringeren Zementanteil der Injektionskörperproben.

Um in Zukunft Aussagen über die erreichbaren Festigkeiten eines Injektionskörpers treffen zu können, sollten die Prüfmethode für Injektionsmaterialien und von im Labor hergestellten Injektionskörperproben einheitlich festgelegt werden. Hierzu zählen neben der Beschreibung des Umfangs und der Durchführung der Versuche an den Probekörpern auch die Beschreibung des Herstellungsprozesses im Labor. Dieses Ziel kann nur durch eine Zusammenarbeit der Normung, der Hersteller und der Anwender erreicht werden.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

Durch das Aufkommen des Düsenstrahlverfahrens verloren die Niederdruckinjektionen im Lockergestein an Bedeutung. In den letzten Jahren fand jedoch ein Umdenkprozess statt, der eine Trendumkehr in Richtung Niederdruckinjektionen bewirkt. Während die ausführenden Firmen bereits das Potential dieses ressourcenschonenden und kostengünstigen Bauverfahrens wiederentdeckt haben, werden noch ein Großteil der Bodenverbesserungen mit dem Düsenstrahlverfahren ausgeschrieben. Die Gründe dafür sind einerseits die Kenntnis der Form des DSV-Körpers und eine Überprüfbarkeit der erzielten Festigkeiten.

Auch bei Niederdruckinjektionen im Lockergestein ist die Kenntnis über die erzielbaren Festigkeiten und die Form des Injektionskörpers essenziell für den Erfolg des Injektionsvorhabens. Sehr großen Einfluss auf die erzielbaren Festigkeiten hat der verwendete Zement. Über seine Zusammensetzung und Kornverteilung können die erzielbaren Festigkeiten und die Form des Injektionskörpers beeinflusst werden. Je kleiner die Beschränkung des Größtkornes ist, desto besser kann eine Zementsuspension in kleinere Hohlräume eindringen.

Das größte Problem der Injektionstechnik stellt die Probengewinnung dar. Bei einem kiesfreien, sandigen Boden lassen sich mit Hilfe von Kernbohrungen Kerne ziehen. Sobald jedoch ein größeres Korn im Verband eingeschlossen wird, kommt es zum Auslösen des Kornes aus dem Verband und in weiterer Folge zur Zerstörung des Bohrkernes. Der Entwicklung eines Verfahrens zur Probengewinnung aus Injektionskörpern sollte daher in Zukunft große Bedeutung beigemessen werden.

Um Aussagen über die erzielbaren Festigkeiten eines injizierten Lockerbodens treffen zu können, müssen jedem Injektionsvorhaben umfangreiche Laborversuche vorausgehen. Hierbei soll es sich auch um Versuche an Injektionskörperproben handeln. Die Herstellung der Proben, die Versuchsanordnung und die Versuchsdurchführung sind nicht normativ festgelegt. Die derzeit gültigen Injektionsnormen verweisen auf andere Normen, wodurch die Durchführung und der Umfang der Versuche variieren kann. Normative Festlegungen für die Herstellung der Proben und den Umfang und die Durchführung der Versuche vor einem Injektionsvorhaben würden einen Vergleich der Ergebnisse von verschiedenen Labors zulassen.

6. SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der Versuche an den im Labor hergestellten Injektionskörperproben zeigte sich, dass die injizierten Proben nicht gleichmäßig penetriert werden. Der ungleichmäßige Verfüllgrad hat einen bedeutenden Einfluss auf die einaxiale Druckfestigkeit der Probekörper. Über die Masse des chemisch gebundenen Wassers kann abgeschätzt werden, wieviel Zement in die Hohlräume eindringen kann. Die Masse des chemisch gebundenen Wassers hängt jedoch vom Kalkgehalt des injizierten Bodens ab. Deshalb muss die Beziehung zwischen Zementgehalt, Masse des chemisch gebundenen Wassers und Glühverlust des Bodens erforscht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung, Berlin. *DIN 4126 - Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden*, August 2004.
- [2] Deutsches Institut für Normung, Berlin. *DIN 4093 - Bemessung von verfestigten Bodenkörpern - Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren*, August 2012.
- [3] Europäisches Komitee für Normung, Brüssel. *EN 12715 - Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Injektionen*, Oktober 2000.
- [4] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM B 4454 - Erd- und Grundbau - Injektionen in Fest- und Lockergestein - Prüfungen*, September 2001.
- [5] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM B 3327-1 - Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen - Teil 1: Zusätzliche Anforderungen*, Juli 2005.
- [6] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM EN 196-1 - Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeiten*, April 2005.
- [7] Österreichisches Normungsinstitut. *ÖNORM EN 1992-1-1 - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, November 2005.
- [8] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM EN 196-3 - Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit*, Februar 2009.
- [9] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM B 4415 - Geotechnik - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit unter Einbeziehung der VORNORM ÖNORM CEN ISO/TS 17892-7*, Jänner 2010.
- [10] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM EN 196-6 - Prüfverfahren für Zement - Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit*, März 2010.

LITERATURVERZEICHNIS

- [11] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM EN 197-1 - Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*, Oktober 2011.
- [12] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM EN 196-2 - Prüfverfahren für Zement - Teil 2: Chemische Analyse von Zement*, Oktober 2013.
- [13] Österreichisches Normungsinstitut, Wien. *ÖNORM EN ISO 14688-2 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierung*, November 2013.
- [14] BARNES, H. A., CARNALI, J. O. *The vane-in-cup as a novel rheometer geometry for shear thinning and thixotropic materials. Journal of Rheology*, 1990.
- [15] BARNES, H. A., NGUYEN, Q. D. *Rotating vane rheometry - a review. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2001.
- [16] BELL, L. A. *A Cutt-off in Rock and Alluvium at Asprokremmos Dam. In Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering. American Society of Civil Engineers*, 1982.
- [17] BONZEL, J., DAHMS, J. *Über den Einfluss des Zements und der Eigenschaften der Zementsuspensionen auf die Injizierbarkeit in Lockergesteinsböden. Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf*, 1972.
- [18] BREIT, K. *Studienblätter zur Vorlesung Baugrund und Injektion, Baugrund und Injektion - Teil 1: Theorie. Wien*, 2013.
- [19] BRUCE, D. A. et al. *Quality and quantification in rock drilling and grouting. GSP 136 - Innovations in Grouting and Soil Improvement*, 2005.
- [20] COMBEFORT, H. *Bodeninjektionstechnik. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin*, 1969.
- [21] DONEL, M. *Bodeninjektionstechnik. Verlag Glückauf GmbH, Essen*, 1991.
- [22] EICHLER, K. et al. *Spezialtiefbau. Expert Verlag*, 1999.
- [23] HEIM, D. *Tone und Tonminerale: Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. F. Enke*, 1990.
- [24] HIRHAGER R., MARTAK, L. *Injektionen im Untergrund - Grundwasserbeeinflussung und Festigkeitserfordernis. Der Aufbau Heft 10*, 1985.
- [25] JASMUND, K., LAGALY, G. *Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Dietrich Steinkopff*, 1993.

LITERATURVERZEICHNIS

- [26] KAINRATH, A. *Niederdruckinjektionen im Lockergestein*. 15. Geo - DACH Treffen, Zürich, 2013.
- [27] KAINRATH, A. *New Evaluation Methods for Grouts*. In *Proceedings of the 5th IYGEC*, Paris, 2013.
- [28] KAINRATH, A. et al. *Die Injektionstechnik auf dem Prüfstand*. In *2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik*, September 2012.
- [29] KING, J. C., BUSCH, E. G. W. *Symposium on Grouting of Granular Materials*. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1961.
- [30] KRAVETZ, G. A. *Cement and Clay Grouting of Foundations: the Use of Clay in Pressure Grouting*. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1958.
- [31] KUK, M. *Untersuchungen zur Beeinflussung der Feinstbindemittelausbreitung im Lockergestein durch Filtrationsmechanismen*. PhD thesis, Universität Hannover, 2004.
- [32] KUTZNER, C. *Injektionen im Baugrund*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1991.
- [33] LOCHER, F. W. *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Verlag Bau + Technik, 2000.
- [34] MEZGER, T. *Das Rheologie Handbuch - Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. Vinzentz Network, Hannover, 2006.
- [35] MITCHELL, J. K. *Soil Improvement - State-of-the Art Report*. A.A. Balkema, Rotterdam, 1982.
- [36] NONVEILLER, E. *Grouting, Theory and Practice*. Developments in geotechnical engineering. Elsevier, 1989.
- [37] PERBIX, W., TEICHERT, H.-D. *Feinstbindemittel für Injektionen in der Geotechnik und im Betonbau*. In *Taschenbuch Tunnelbau*, Essen, 1995. Verlag Glückauf GmbH.
- [38] PRINZ, H., STRAUSS, R. *Ingenieurgeologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2011.
- [39] RÖHLING, S. *Betonbau Band 1*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012.
- [40] RÖHLING, S. *Betonbau Band 2*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012.
- [41] SCHMIDT, H. G., SEITZ, J. *Grundbau*. In *Beton-Kalender 1998*, Berlin, 1998. Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH.

LITERATURVERZEICHNIS

- [42] SCHULER, U., BRAUNS, J. *Die effektive Porenöffnung körniger Erdstoffe - ein Kriterium für die Injizierbarkeit von Suspensionen*. GEOTECHNIK, 2000.
- [43] SCHULZE, B. *Neuere Untersuchungen über die Injizierbarkeit von Feinstbindemittel-Suspensionen*. In *Grouting in Rock and Concrete*. A.A. Balkema, 1993.
- [44] SCHULZE, B. *Merkblatt für Einpreßarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein (Teil 1)*. *Bautechnik* 79, Heft 8, 2002.
- [45] SMOLTCZYK, U. *Grundbau-Taschenbuch: Teil 2*. Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2001.
- [46] WEAVER, K. D., BRUCE, D. A. *Dam Foundation Grouting*. ASCE Press, 2007.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Injektionsprinzipien und -verfahren aus: [3]	6
2.2. Anwendungsgrenzen von Injektionsmitteln aus: [37]	7
2.3. Grenzen der Eindringfähigkeit der Injektionsmaterialien in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Untergrundes aus: [20]	9
2.4. Ebener Schnitt durch eine Porenengstelle aus: [43]	10
2.5. Ermittlung der Porenengstellenverteilung aus der Korngrößenverteilung aus: [43]	11
2.6. Die 27 Produkte der Familie der Normalzemente aus: [11]	13
2.7. Korngrößenverteilung von Zumahlstoffen nach: [40]	15
2.8. Viskosität und Sedimentiergeschwindigkeit von Zementsuspensionen aus: [32]	20
2.9. Druckfestigkeit von Zementsuspensionen nach 28 Tagen, bezogen auf einen W/Z-Wert von 0,4 aus: [32]	22
3.1. Hydratationsstufen und Reaktionskinetik der Klinkerphase C_3S aus: [40]	29
3.2. Vergleich der gemessenen Werte mit den errechneten Ergebnissen	36
3.3. Druckfestigkeit von enggestuften Sanden nach 28 Tagen (adaptiert aus: [17])	37
4.1. Korngrößenverteilung der verwendeten Zemente	40
4.2. Korngrößenverteilung der Bodenproben	42
4.3. Kriterium der Korngrößenverteilung von Normsand	43
4.4. Links: Mischer Ultra-Turrex T50; Rechts: Mischwerkzeug	44
4.5. Maße des Marsh-Trichters aus: [1]	47
4.6. Vergleich des Absetzmaßes einer instabilen und einer stabilen Suspension mit einem W/Z-Wert von 3,0	49
4.7. Filterpresse	50
4.8. Definition der Viskosität anhand des Platten Modells aus: [28]	51
4.9. Typische Fließkurven aus: [28]	52
4.10. Links: Rotationsviskosimeter; Rechts: Messprinzip Rotationsviskosimeter aus: [28]	53
4.11. Konzept der repräsentativen Viskosität aus: [28]	53

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

4.12. Einfluss der Temperatur auf die Viskosität von Suspensionen mit einem W/Z-Wert von 1,0	54
4.13. Verlauf der Niedrigscherviskosität über den W/Z-Wert	54
4.14. Links: Kugelharfe; Rechts: Flügelsonde	55
4.15. Bestimmung der Fließgrenze mittels Viskosimeter und Messflügel	56
4.16. Vergleich der Fließgrenzen gemessen mit der Kugelharfe und der Flügelsonde	57
4.17. Prinzip der Ermittlung des Erstarrungsbeginns aus: [27]	58
4.18. Ermittlung des Erstarrungsbeginns bei unterschiedlichen W/Z-Werten	58
4.19. Versuchsschema der Prüfkörperherstellung	62
4.20. Links: geschlitzter Injektionszylinder; rechts: geschlossener Injektionszylinder	64
4.21. Fehlgeschlagene Injektion von Quarzsand	65
4.22. Ungleichmäßige Penetration der Injektionskörperproben	66
4.23. 5-Phasen Modell eines Injektionskörpers aus: [26]	67
4.24. Probestücke vor (oben) und nach (unten) Bestimmung der Masse des chemisch gebundenen Wassers	68
4.25. Zeitlicher Verlauf der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der Injektionskörperproben	69
4.26. Zeitlicher Verlauf der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der reinen Suspensionsproben	69
4.27. Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen der Injektionskörperproben mit variablen W/Z-Wert nach 28 Tagen	70
4.28. Verhältnis der Masse des chemisch gebundenen Wassers der Injektionskörperproben zu den reinen Suspensionsproben mit variablen W/Z-Werten	71
4.29. Vergleich der Masse des chemisch gebundenen Wassers der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben	71
4.30. Hydraulische Prüfpresse mit 1.500 kN (links) und 250 kN Kraftmessdose (rechts)	73
4.31. Gegenüberstellung der Zylinder- und Würfeldruckfestigkeiten	76
4.32. Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten gemäß ÖN B 4415 [9] und ÖN EN 196-1 [6]	77
4.33. Repräsentative Bruchbilder der Grundsatzversuche	78
4.34. Verlauf der Druckfestigkeiten der reinen Suspension in Abhängigkeit des W/Z-Gehaltes	79
4.35. Bruchbilder der reinen Suspensionsproben	79
4.36. Repräsentative Bruchbilder der Injektionskörperproben	81
4.37. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Feuchtdichte ρ_f	81
4.38. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Sandes 1,4-2,2 mm (580_3_1_1)	82

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

4.39. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Kieses 2, 0-3, 15 mm (580_3_1_3)	82
4.40. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Kieses 3, 15-5, 6 mm (580_3_1_2)	83
4.41. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Kieses 5, 0-8, 0 mm (580_3_1_5)	83
4.42. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten Grob- und Dachriesels (580_3_1_7)	84
4.43. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers der injizierten Mischung (580_3_1_8)	84
4.44. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trockendichte ρ_d und der Masse des chemisch gebundenen Wassers des injizierten, sandigen Kieses (580_3_1_9)	85
4.45. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Porenanteil n	85
4.46. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom H/D-Verhältnis	86
4.47. Feucht- bzw. Trockendichte in Abhängigkeit des W/Z-Wertes	87
4.48. Einfluss des steigenden W/Z-Wertes auf die Viskosität	87
4.49. Druckfestigkeit in Abhängigkeit des W/Z-Wertes	88
4.50. Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Masse des chemisch gebundenen Wassers bezogen auf das Volumen bei Variation des W/Z-Wertes	88
4.51. Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten mit den Ergebnissen von BONZEL & DAHMS [17]	89
4.52. Verhältnis der einaxialen Druckfestigkeiten der Injektionskörperproben mit den reinen Suspensionsproben	90
4.53. Verhältnis der einaxialen Druckfestigkeit der Injektionskörperproben zu den reinen Suspensionsproben bei variablem W/Z-Wert	90

Tabellenverzeichnis

2.1. Übersicht über die N-Kriterien	8
2.2. Injektionsmittel aus: [41]	12
2.3. Partikelgrößen und Mengenanteile der Hauptbestandteile nach: [40]	14
3.1. Kurzschreibweise der Klinkermineralien	23
3.2. Richtwerte zur Abschätzung der Festigkeitsentwicklung von Prüflörpern verschiedener Zemente bei einer ständigen Lagerung bei +20°C (adaptiert aus: [40])	34
3.3. Koeffizienten zur mathematischen Beschreibung der Festigkeitsentwick- lung (adaptiert aus: [40])	35
3.4. Kennwerte der Injektionskörperproben nach 7, 28 und 56 Tagen Lagerung	37
4.1. Eigenschaften der eingesetzten Zemente	40
4.2. Eigenschaften des IBECO BP/HR gemäß Produktdatenblatt	41
4.3. Bodenkennzahlen der Bodenproben und deren Bezeichnung gemäß [13]	43
4.4. Übersicht über die Mischzeiten	45
4.5. Messung von Injektionsparametern (adaptiert aus: [3])	46
4.6. Übersicht über die gemessenen Marshzeiten und Dichten bei unterschied- lichen W/Z-Werten	48
4.7. Überblick über die Sedimentation in Abhängigkeit des W/Z-Wertes	49
4.8. Filtratwasserkoeffizient und Filtratwasservolumen der untersuchten Sus- pensionen	51
4.9. Übersicht über den Erstarrungsbeginn der eingesetzten Suspensionen	59
4.10. Auflistung der durchgeführten Versuche (siehe Anhang C)	61
4.11. Technische Daten der Kolbenmembranpumpe gemäß Produktdatenblatt (siehe Anhang)	63
4.12. Auflistung der Grundsatzversuche	75
4.13. Kennwerte der Zylinder- und Würfelprüfkörper	76
4.14. Übersicht über die Versuchsreihe 2	78
4.15. Auflistung der Versuche an den Injektionskörperproben	80

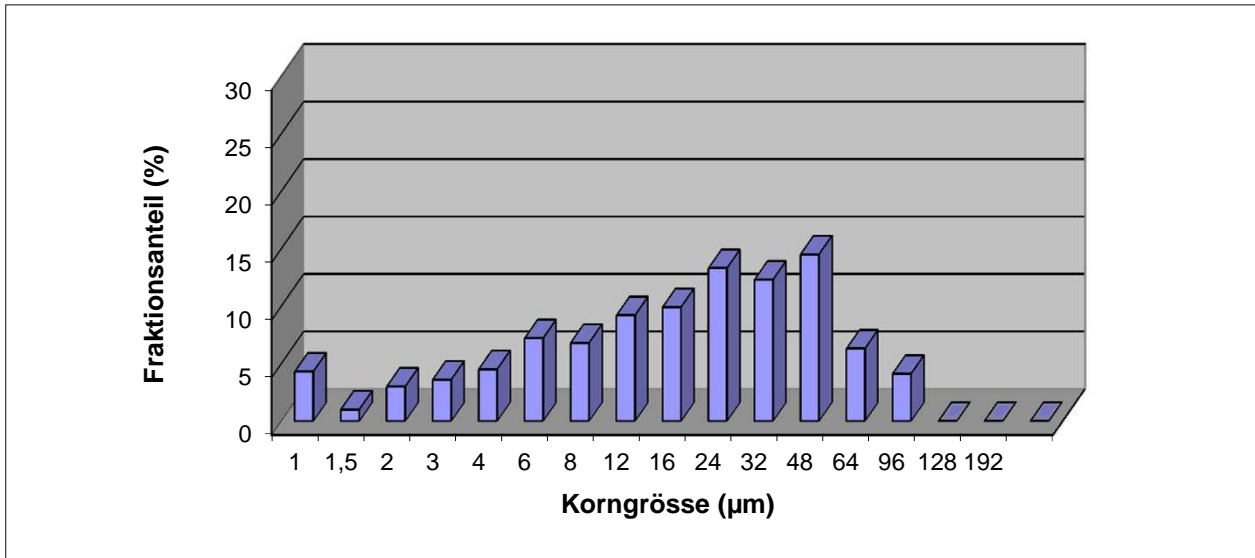
Anhang

Anhang A.

Produktdatenblätter

KORNGRÖSSENANALYSE CILAS 715

Stichprobe CEM I 32,5 R - SR 0 WT 27 C3A-frei v. 11.07.2013



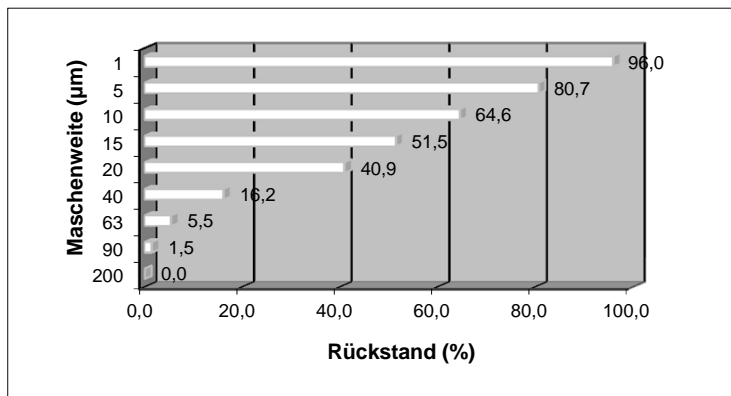
SPEZ. OBERFLÄCHE: 2920 cm²/g

REGRESSIONSANALYSE (RRS)

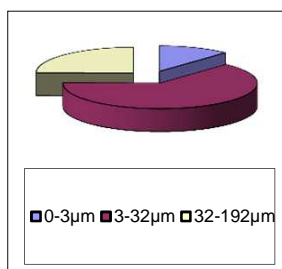
r = 0,999 d' (36,8 %) = 22,32
 d' (50,0 %) = 15,64

Rückstand (%)	Korngröße (µm)	Fraktionsanteil (%)
	0	4,3
95,7	1	1,0
94,7	1,5	3,0
91,7	2	3,6
88,1	3	4,5
83,6	4	7,2
76,4	6	6,8
69,6	8	9,2
60,4	12	9,9
50,5	16	13,3
37,2	24	12,3
24,9	32	14,5
10,4	48	6,3
4,1	64	4,1
0,0	96	0,0
0,0	128	0,0
0,0	192	0,0
	>192	

RÜCKSTAND FÜR NORMENSIEBE



KORNGRÖSSEN-CHARAKTERISTIK



Kornbereich (µm)	Fraktionsanteil (%)
0-3	11,9
3-32	63,2
32-192	24,9

Leistungserklärung

gemäß Construction Products Regulation (EU) No 305/2011 (CPR)

Produkt: Portlandzement EN 197-1 – CEM I 32,5 R – SR 0 WT 27 C₃A-frei

Version 1.0 [15.05.2013]

Ersatz für alle vorherigen Versionen

Druckdatum:.....



LEISTUNGSKLÄRUNG Nummer 0989-CPD-0001

- 1. Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:**
Portlandzement EN 197-1 – CEM I 32,5 R – SR 0 WT 27 C₃A-frei
- 2. Typen-, Chargen- oder Seriennummer oder ein anderes Kennzeichen für Identifikation des Bauprodukts gemäß Artikel 11 Absatz 4:**
Siehe 1.
- 3. Vom Hersteller vorgesehener Verwendungszweck oder vorgesehene Verwendungszwecke des Bauprodukts gemäß der anwendbaren harmonisierten technischen Spezifikation:**
Herstellung von Beton, Mörtel, Einpressmörtel etc.
- 4. Name, eingetragener Handelsname oder eingetragene Marke und Kontaktanschrift des Herstellers gemäß Artikel 11 Absatz 5:**
Zementwerk Hatschek GmbH, Hatschekstraße 25, A- 4810 Gmunden
- 5. Gegebenenfalls Name und Kontaktanschrift des Bevollmächtigten, der mit den Aufgaben gemäß Artikel 12 Absatz 2 beauftragt ist:**
Nicht zutreffend
- 6. System oder Systeme zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit des Bauprodukts gemäß Anhang V:**
System +1
- 7. Die Zertifizierungsstelle für Bauprodukte, QM-Systeme und Personen des Landes Oberösterreich BAUCERT (NB 0989) hat die Feststellung des Produkttyps anhand einer Typprüfung (einschließlich Probenahme), die Erstinspektion des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle, die laufende Überwachung, Bewertung und Evaluierung der werkseigenen Produktionskontrolle sowie die Stichprobenprüfung von vor dem Inverkehrbringen des Produkts entnommenen Proben nach dem System +1 vornehmen lassen und die Leistungsbeständigkeitsbescheinigung ausgestellt.**

Leistungserklärung

gemäß Construction Products Regulation (EU) No 305/2011 (CPR)

Produkt: Portlandzement EN 197-1 – CEM I 32,5 R – SR 0 WT 27 C₃A-frei

Version 1.0 [15.05.2013]

Ersatz für alle vorherigen Versionen

Druckdatum:.....

8. Erklärte Leistung

Wesentliche Merkmale	Leistung	Harmonisierte technische Spezifikation
Normalzement	CEM I 32,5 R – SR 0 WT 27 C ₃ A-frei	EN 197-1:2011
Druckfestigkeit (MPa)		
Anfangsfestigkeit (nach 2 Tagen)	≥ 10,0	
Normfestigkeit (nach 28 Tagen)	≥ 32,5 ≤ 52,5	
Erstarrungsbeginn (Minuten)	≥ 75	
Raumbeständigkeit (Dehnungsmaß) (mm)	≤ 10	
Glühverlust (Masse-%)	≤ 5,0	
Unlöslicher Rückstand (Masse-%)	≤ 5,0	
Sulfatgehalt (Masse-%)	≤ 3,0	
Chloridgehalt (Masse-%)	≤ 0,10	
C ₃ A im Klinker (Masse-%)	0	

9. Die Leistung des Produkts gemäß Nummer 1 und 2 entspricht der erklärten Leistung nach 8. Verantwortlich für die Erstellung dieser Leistungserklärung ist allein der Hersteller gemäß Nummer 4.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Schindlauer, Qualitätsüberwachung und Anwendungstechnik

(Name und Funktion)

15.05.2013

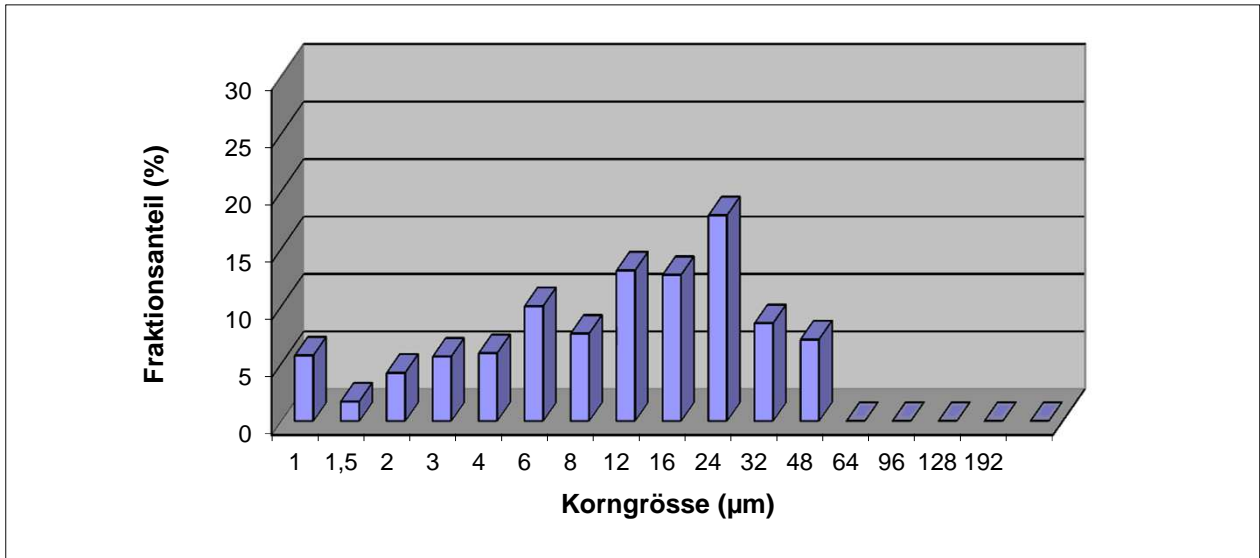
(Ort und Datum der Ausstellung)

B. Schindlauer

(Unterschrift)

KORNGRÖSSENANALYSE CILAS 715

Stichprobe CEM I 42,5 R - SR0 WT 33 C3A-frei v. 11.07.2013



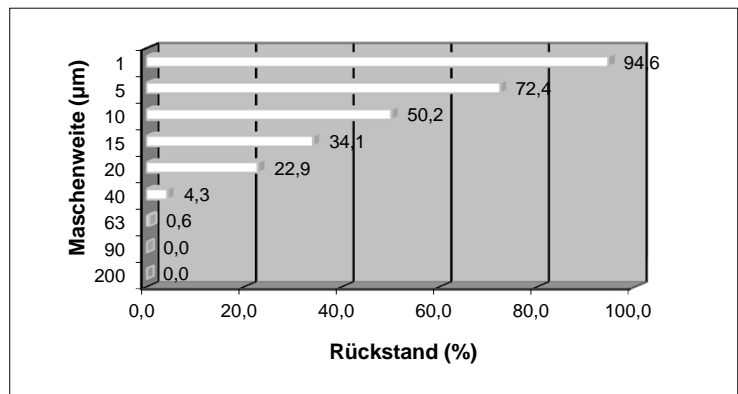
SPEZ. OBERFLÄCHE: 4050 cm²/g

REGRESSIONSANALYSE (RRS)

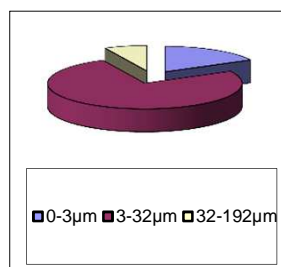
r = 0,999 d' (36,8 %) = 14,03
 d' (50,0 %) = 10,04

Rückstand (%)	Korngröße (µm)	Fraktionsanteil (%)
	0	5,7
94,3	1	1,7
92,6	1,5	4,2
88,4	2	5,6
82,8	3	5,9
76,9	4	10,0
66,9	6	7,6
59,3	8	13,1
46,2	12	12,7
33,5	16	17,9
15,6	24	8,5
7,1	32	7,1
0,0	48	0,0
0,0	64	0,0
0,0	96	0,0
0,0	128	0,0
0,0	192	0,0
	>192	

RÜCKSTAND FÜR NORMENSIEBE



KORNGRÖSSEN-CHARAKTERISTIK



Kornbereich (µm)	Fraktionsanteil (%)
0-3	17,2
3-32	75,7
32-192	7,1

Leistungserklärung

gemäß Construction Products Regulation (EU) No 305/2011 (CPR)

Produkt: Portlandzement EN 197-1 – CEM I 42,5 R – SR 0 WT 33 C₃A-frei

Version 1.0 [15.05.2013]

Ersatz für alle vorherigen Versionen

Druckdatum:.....



LEISTUNGSKLÄRUNG Nummer 0989-CPD-0002

1. Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:

Portlandzement EN 197-1 – CEM I 42,5 R – SR 0 WT 33 C₃A-frei

2. Typen-, Chargen- oder Seriennummer oder ein anderes Kennzeichen für Identifikation des Bauprodukts gemäß Artikel 11 Absatz 4:

Siehe 1.

3. Vom Hersteller vorgesehener Verwendungszweck oder vorgesehene Verwendungszwecke des Bauprodukts gemäß der anwendbaren harmonisierten technischen Spezifikation:

Herstellung von Beton, Mörtel, Einpressmörtel etc.

4. Name, eingetragener Handelsname oder eingetragene Marke und Kontaktanschrift des Herstellers gemäß Artikel 11 Absatz 5:

Zementwerk Hatschek GmbH, Hatschekstraße 25, A- 4810 Gmunden

5. Gegebenenfalls Name und Kontaktanschrift des Bevollmächtigten, der mit den Aufgaben gemäß Artikel 12 Absatz 2 beauftragt ist:

Nicht zutreffend

6. System oder Systeme zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit des Bauprodukts gemäß Anhang V:

System +1

7. Die Zertifizierungsstelle für Bauprodukte, QM-Systeme und Personen des Landes Oberösterreich BAUCERT (NB 0989) hat die Feststellung des Produkttyps anhand einer Typprüfung (einschließlich Probenahme), die Erstinspektion des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle, die laufende Überwachung, Bewertung und Evaluierung der werkseigenen Produktionskontrolle sowie die Stichprobenprüfung von vor dem Inverkehrbringen des Produkts entnommenen Proben nach dem System +1 vornehmen lassen und die Leistungsbeständigkeitsbescheinigung ausgestellt.

Leistungserklärung

gemäß Construction Products Regulation (EU) No 305/2011 (CPR)

Produkt: Portlandzement EN 197-1 – CEM I 42,5 R – SR 0 WT 33 C₃A-frei

Version 1.0 [15.05.2013]

Ersatz für alle vorherigen Versionen

Druckdatum:.....

8. Erklärte Leistung

Wesentliche Merkmale	Leistung	Harmonisierte technische Spezifikation
Normalzement	CEM I 42,5 R – SR 0 WT 33 C ₃ A-frei	EN 197-1:2011
Druckfestigkeit (MPa)		
Anfangsfestigkeit (nach 2 Tagen)	≥ 20,0	
Normfestigkeit (nach 28 Tagen)	≥ 42,5 ≤ 62,5	
Erstarrungsbeginn (Minuten)	≥ 60	
Raumbeständigkeit (Dehnungsmaß) (mm)	≤ 10	
Glühverlust (Masse-%)	≤ 5,0	
Unlöslicher Rückstand (Masse-%)	≤ 5,0	
Sulfatgehalt (Masse-%)	≤ 3,5	
Chloridgehalt (Masse-%)	≤ 0,10	
C ₃ A im Klinker (Masse-%)	0	

9. Die Leistung des Produkts gemäß Nummer 1 und 2 entspricht der erklärten Leistung nach 8. Verantwortlich für die Erstellung dieser Leistungserklärung ist allein der Hersteller gemäß Nummer 4.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Schindlauer, Qualitätsüberwachung und Anwendungstechnik

(Name und Funktion)

15.05.2013

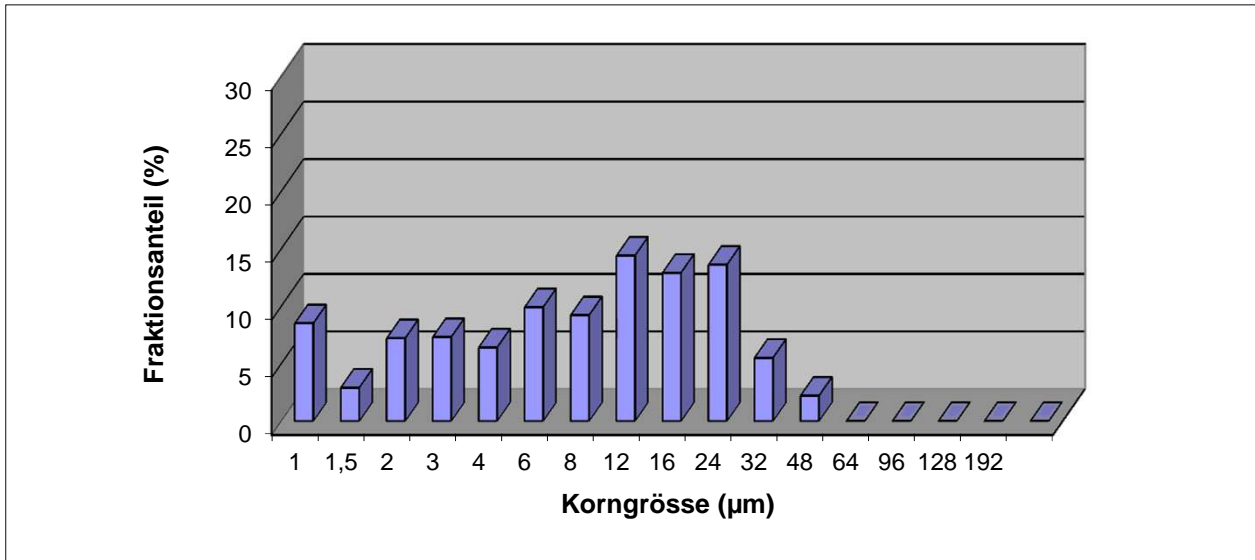
(Ort und Datum der Ausstellung)

B. Schindlauer

(Unterschrift)

KORNGRÖSSENANALYSE CILAS 715

Stichprobe CEM I 52,5 R vom 11.07.2013



SPEZ. OBERFLÄCHE: 5350 cm²/g

REGRESSIONSANALYSE (RRS)

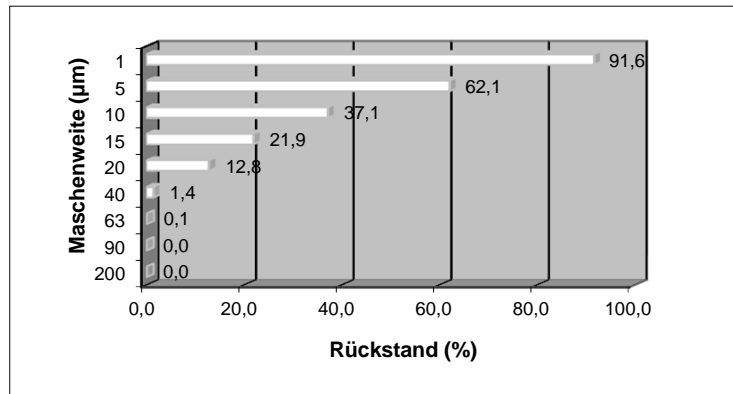
r = 0,998

d' (36,8 %) = 10,08

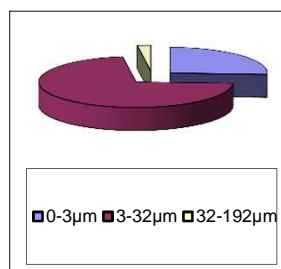
d' (50,0 %) = 7,13

Rückstand (%)	Korngröße (µm)	Fraktionsanteil (%)
	0	8,5
91,5	1	2,9
88,6	1,5	7,2
81,4	2	7,3
74,1	3	6,4
67,7	4	9,9
57,8	6	9,2
48,6	8	14,4
34,2	12	12,9
21,3	16	13,6
7,7	24	5,5
2,2	32	2,2
0,0	48	0,0
0,0	64	0,0
0,0	96	0,0
0,0	128	0,0
0,0	192	0,0
	>192	

RÜCKSTAND FÜR NORMENSIEBE



KORNGRÖSSEN-CHARAKTERISTIK



Kornbereich (µm)	Fraktionsanteil (%)
0-3	25,9
3-32	71,9
32-192	2,2

Leistungserklärung

gemäß Construction Products Regulation (EU) No 305/2011 (CPR)

Produkt: Portlandzement EN 197-1 – CEM I 52,5 R

Version 1.0 [15.05.2013]

Ersatz für alle vorherigen Versionen

Druckdatum:.....



LEISTUNGSERKLÄRUNG Nummer 0989-CPD-0004

- 1. Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:**
Portlandzement EN 197-1 – CEM I 52,5 R
- 2. Typen-, Chargen- oder Seriennummer oder ein anderes Kennzeichen für Identifikation des Bauprodukts gemäß Artikel 11 Absatz 4:**
Siehe 1.
- 3. Vom Hersteller vorgesehener Verwendungszweck oder vorgesehene Verwendungszwecke des Bauprodukts gemäß der anwendbaren harmonisierten technischen Spezifikation:**
Herstellung von Beton, Mörtel, Einpressmörtel etc.
- 4. Name, eingetragener Handelsname oder eingetragene Marke und Kontaktanschrift des Herstellers gemäß Artikel 11 Absatz 5:**
Zementwerk Hatschek GmbH, Hatschekstraße 25, A- 4810 Gmunden
- 5. Gegebenenfalls Name und Kontaktanschrift des Bevollmächtigten, der mit den Aufgaben gemäß Artikel 12 Absatz 2 beauftragt ist:**
Nicht zutreffend
- 6. System oder Systeme zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit des Bauprodukts gemäß Anhang V:**
System +1
- 7. Die Zertifizierungsstelle für Bauprodukte, QM-Systeme und Personen des Landes Oberösterreich BAUCERT (NB 0989) hat die Feststellung des Produkttyps anhand einer Typprüfung (einschließlich Probenahme), die Erstinspektion des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle, die laufende Überwachung, Bewertung und Evaluierung der werkseigenen Produktionskontrolle sowie die Stichprobenprüfung von vor dem Inverkehrbringen des Produkts entnommenen Proben nach dem System +1 vornehmen lassen und die Leistungsbeständigkeitsbescheinigung ausgestellt.**

Leistungserklärung

gemäß Construction Products Regulation (EU) No 305/2011 (CPR)

Produkt: Portlandzement EN 197-1 – CEM I 52,5 R

Version 1.0 [15.05.2013]

Ersatz für alle vorherigen Versionen

Druckdatum:.....

8. Erklärte Leistung

Wesentliche Merkmale	Leistung	Harmonisierte technische Spezifikation
Normalzement	CEM I 52,5 R	EN 197-1:2011
Druckfestigkeit (MPa)		
Anfangsfestigkeit (nach 2 Tagen)	≥ 30,0	
Normfestigkeit (nach 28 Tagen)	≥ 52,5	
Erstarrungsbeginn (Minuten)	≥ 45	
Raumbeständigkeit (Dehnungsmaß) (mm)	≤ 10	
Glühverlust (Masse-%)	≤ 5,0	
Unlöslicher Rückstand (Masse-%)	≤ 5,0	
Sulfatgehalt (Masse-%)	≤ 4,0	
Chloridgehalt (Masse-%)	≤ 0,10	

9. Die Leistung des Produkts gemäß Nummer 1 und 2 entspricht der erklärten Leistung nach 8. Verantwortlich für die Erstellung dieser Leistungserklärung ist allein der Hersteller gemäß Nummer 4.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Schindlauer, Qualitätsüberwachung und Anwendungstechnik

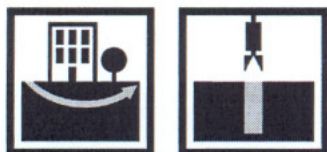
(Name und Funktion)

15.05.2013

(Ort und Datum der Ausstellung)

B. Schindlauer

(Unterschrift)



Aktiv-Bentonit IBECO BP/HR

Beschreibung	Description	Description
Aktiv-Bentonit mit Zusatz von organischem Additiv	Activated bentonite, an organic additive added.	Bentonite activée, une additive organique additionnel.

Anwendung	Application	Application
Als Bohrspülung bei Horizontalbohrungen sowie Einsatzgebiete, die hohe rheologische Eigenschaften erfordern.	As drilling mud for horizontal drillings as well as for task fields which demands high rheological properties.	Boues de forage pour forages horizontaux et pour mise au travail quelle demandes propriétés rhéologiques d'haute.

	Technische Durchschnittswerte	Technical values (average)	Valeur techniques (moyenne)		
w	Wassergehalt DIN 18121	Water content	Teneur d'eau	10 +/- 2	%
ρ_s	Korndichte DIN 18124	Specific density	Poids spécifique	ca. 2,63	g/cm ³
	Schüttdichte	Bulk density	Densité apparente tassée	ca. 800	g/l
	Mahlfeinheit d_w auf Sieb 0,090 mm DIN 53734	Dry screen residue on sieve 0,063 mm	Refus au tamis (voie sèche) 0,063 mm	max. 25	%

	Suspensionskennwerte nach DIN 4127	Rheological Properties acc. to DIN 4127	Caractéristiques Rhéologiques d'après DIN 4127		Tongehalt in kg/m ³ Dosage of bentonite in kg/m ³ Concentration de bentonite en kg/m ³		
					15	17,5	20
	Marshviskosität API RP 13 B	Marsh viscosity API RP 13 B	Viscosité marsh API RP 13 B	s/l	37	39	45
	Filtratwasserabgabe	Filtrate volume	Volume de filtrat	ml	10	9	8
τ_F	Fließgrenze (v.SOOS)	Liquid limit(v.SOOS)	Rigidité (v. SOOS)	N/m ²	< 6,9	< 6,9	10
	Fließgrenze (Fann)	Liquid limit (Fann)	Rigidité (Fann)	Pa			

Lieferform	Delivery	Livraison
<ul style="list-style-type: none"> • Lose per Silo-Lkw • In Säcken, auf Paletten, geschrumpft • In Big Bags 	<ul style="list-style-type: none"> • Bulk per road tanker • In bags on pallets, shrink wrapped • In Big Bags 	<ul style="list-style-type: none"> • Vrac en camion-silo • En sacs sur palette filmée • En Big Bags

Da wir auf die Verwendung unseres Produktes keinen Einfluss nehmen können, beschränkt sich unsere Haftung auf diese Produktinformation.	The values listed are indicative and are not to be construed as rigid specifications.	Les renseignements contenus dans cette fiche technique sont fournis à titre indicatif et ne peuvent engager notre responsabilité.
---	---	---

<p>S&B Industrial Minerals Kft - IBECO üzletág - 8523 Egyházaskesző, Bentonit u 1. Pf 1 Tel.: 89/555-555 Fax: 89/555-550 E-Mail bentonit@axelero.hu</p>
--

VERDERBAR Kolbenmembranpumpe P200 Metall

Beschreibung

Verderbar Dosierpumpen made by Wanner international sind das Resultat aktuellster Technologien und erzielen eine unerreichte Genauigkeit, Wiederholbarkeit und Linearität, bei gleichzeitig präziser, konstanter Dosierung. Sie erreicht und übertrifft die Leistungsstandards und Ansprüche der API 675.



Ihr Nutzen

- Geringere Stellfläche, dadurch größere Kosten- und Energieeffizienz
- Jedes Modell deckt einen großen Druck- und Fördermengenbereich ab
- Die einfache Konstruktion der Pumpe erlaubt vielseitige Anwendungen
- Die robuste Bauweise verringert die Ersatzteil- und Wartungskosten

Technische Daten

Anzahl Membranen	3
Durchflussregelung	über Frequenzumrichter
Max. Ausgangsdruck	70 bar
Maximaler Saugdruck	17 bar
Max. Temperatur	121 °C
Ansaugöffnung	1/2" BSPT
Ausgangsöffnung	3/8" BSPT
Gewicht (ohne Motor)	17,7 kg
Maße (ohne Motor)	395 x 311 x 205 mm (B x T x H)

Leistungsübersicht in l/h

l/h alle Pumpen		l/h Pumpen mit Metallkopf		Pumpe U/min	Verhältnis	Motor U/min
7 bar	17 bar	35 bar	70 bar			
4,95	4,57	3,84	2,00	14,5	100:1	1450
6,79	6,11	5,36	3,46	18,13	80:1	
9,07	8,67	7,89	5,89	24,17	60:1	
11,12	10,72	9,91	7,83	29	50:1	
14,21	13,79	12,95	10,75	36,25	40:1	
19,36	18,92	18,01	15,61	48,33	30:1	
23,48	23,02	22,06	19,50	58	25:1	
29,66	29,17	28,14	25,33	72,5	20:1	
39,96	39,42	38,27	35,06	96,67	15:1	
60,55	59,92	58,52	54,50	145	10:1	
81,15	80,41	78,78	73,95	193,33	7,5:1	
122,3	121,4	119,3	112,9	290	5:1	
157,8	156,7	154,2	146,4	373,3	7,5:1	
237,4	235,9	232,4	221,5	560	5:1	

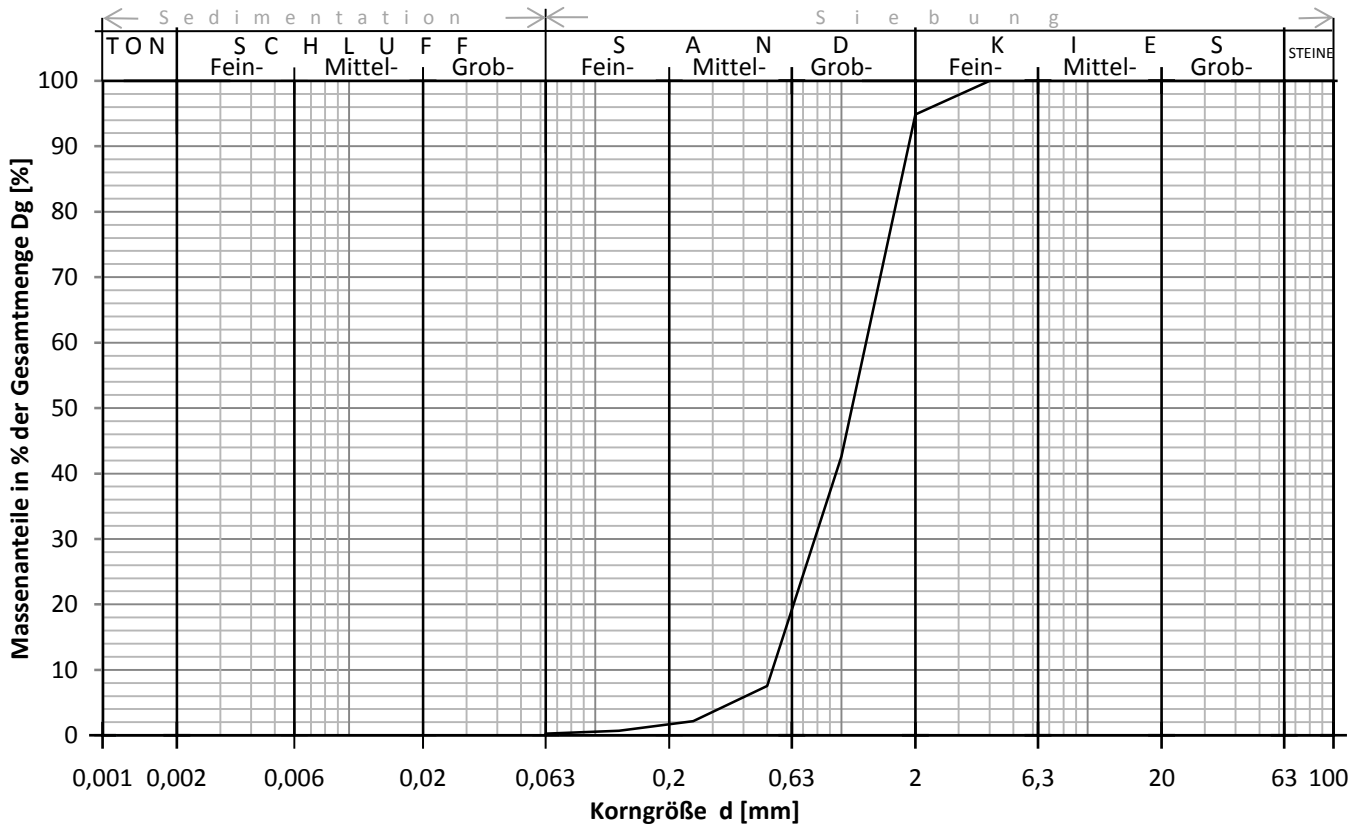
- 0,18 kW
- 0,37 kW
- 0,55 kW
- 0,75 kW

Anhang B.

Korngrößenverteilung

KORNVERTEILUNGSLINIE

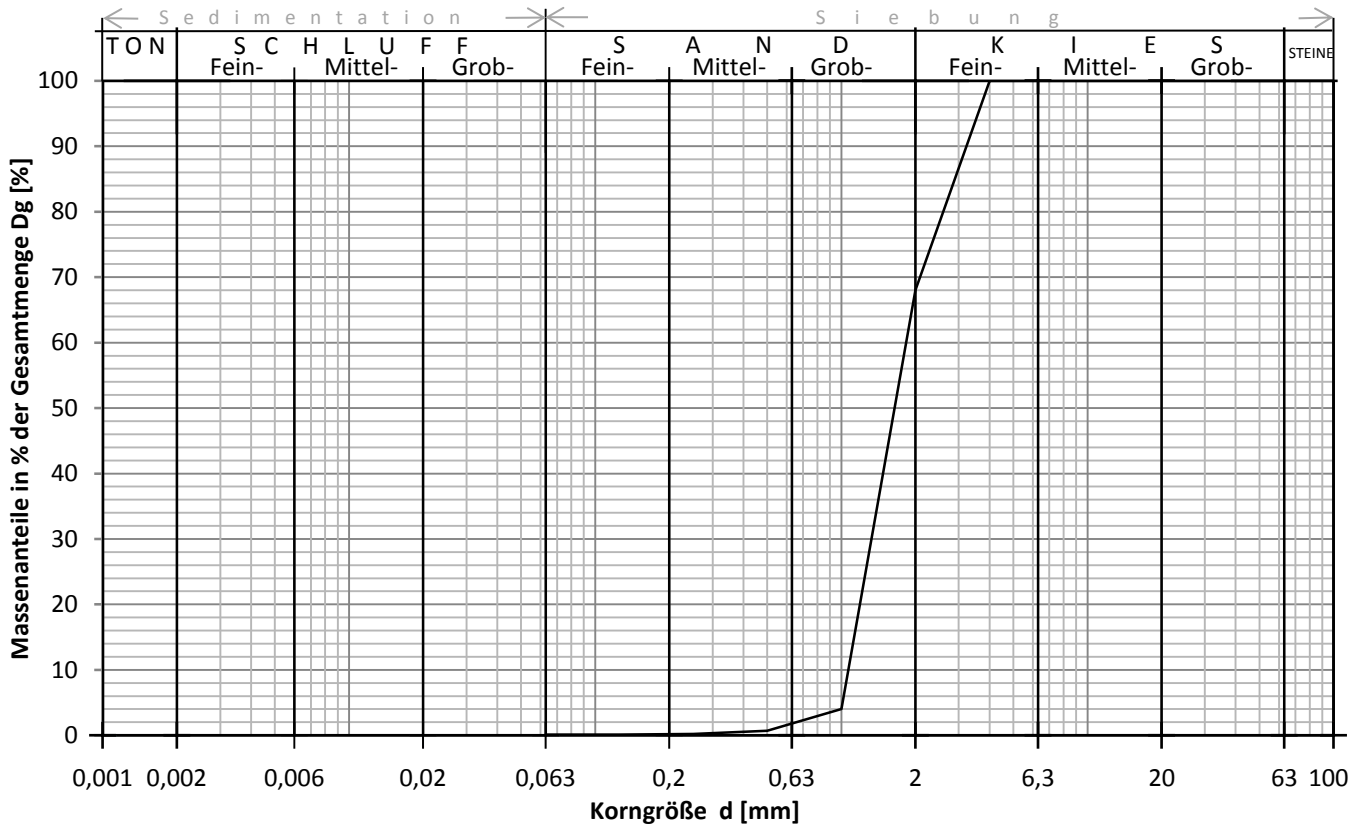
PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	581 Injekt	Probennummer	1
Projekttext 1	Forschungsprojekt	Entnahmestelle	Quarzsand 0,5 - 2,0 mm
Projekttext 2	Wasserdruckinjektionen im Lockergestein	Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 4,000$ mm	$D_{g63} = 100,0$ %	$C_U = 2,4$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 1,876$ mm	$D_{g31,5} = 100,0$ %	$C_C = 0,919$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 1,755$ mm	$D_{g20} = 100,0$ %	$G = 120,7$ cm ² Grobfaktor
$d_{80} = 1,643$ mm	$D_{g16} = 100,0$ %	Kornfraktionen
$d_{70} = 1,438$ mm	$D_{g6,3} = 100,0$ %	$C_o = 0,0$ % Steine
$d_{60} = 1,260$ mm	$D_{g2} = 94,8$ %	$Gr = 5,2$ % Kies
$d_{50} = 1,103$ mm	$D_{g0,63} = 19,2$ %	$Sa = 94,6$ % Sand
$d_{40} = 0,950$ mm	$D_{g0,2} = 1,7$ %	$Si+C = 0,2$ % Schluff+Ton
$d_{30} = 0,780$ mm	$D_{g0,063} = 0,2$ %	= % nicht bekannt
$d_{20} = 0,640$ mm	$D_{g0,02} = -$ %	Kornanteile
$d_{15} = 0,580$ mm	$D_{g0,006} = -$ %	$A_{>63} = 0,0$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} = 0,525$ mm	$D_{g0,002} = -$ %	$A_{>2,0} = 5,2$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,000$ mm	$D_{g0,001} = -$ %	$A_{<0,063} = 0,2$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

KORNVERTEILUNGSLINIE

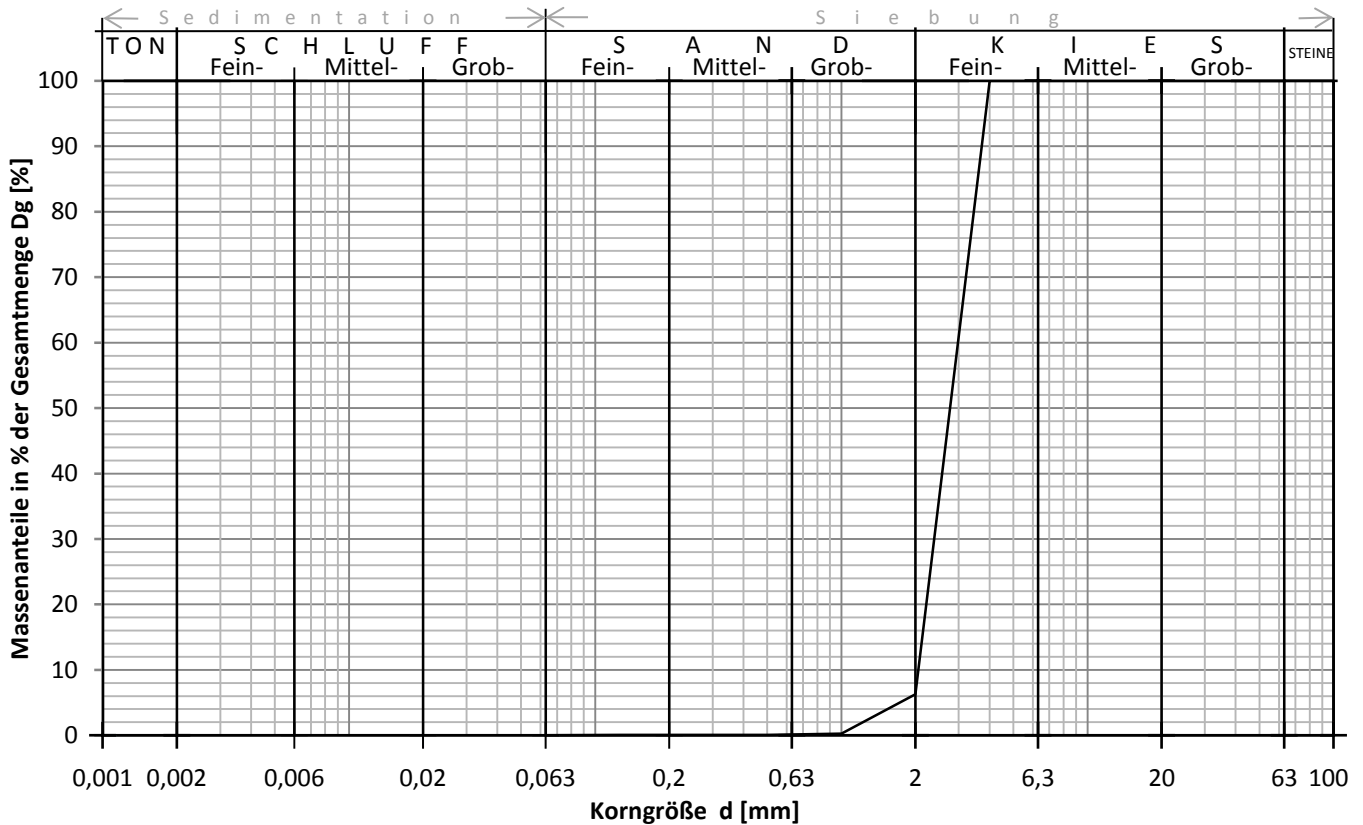
PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	581 Injekt	Probennummer	2
Projekttext 1	Forschungsprojekt	Entnahmestelle	Quarzsand 1,4 - 2,2 mm
Projekttext 2	Wasserdruckinjektionen im Lockergestein	Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 4,000$ mm	$Dg_{63} = 100,0$ %	$C_U = 1,7$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 3,221$ mm	$Dg_{31,5} = 100,0$ %	$C_C = 0,897$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 2,890$ mm	$Dg_{20} = 100,0$ %	$G = -$ cm ² Grobfaktor
$d_{80} = 2,594$ mm	$Dg_{16} = 100,0$ %	Kornfraktionen
$d_{70} = 2,089$ mm	$Dg_{6,3} = 100,0$ %	$C_o = 0,0$ % Steine
$d_{60} = 1,834$ mm	$Dg_2 = 68,0$ %	$G_r = 32,0$ % Kies
$d_{50} = 1,646$ mm	$Dg_{0,63} = 1,8$ %	$S_a = 67,9$ % Sand
$d_{40} = 1,477$ mm	$Dg_{0,2} = 0,2$ %	$S_{i+C} = 0,1$ % Schluff+Ton
$d_{30} = 1,325$ mm	$Dg_{0,063} = 0,1$ %	= % nicht bekannt
$d_{20} = 1,189$ mm	$Dg_{0,02} = -$ %	Kornanteile
$d_{15} = 1,126$ mm	$Dg_{0,006} = -$ %	$A_{>63} = 0,0$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} = 1,067$ mm	$Dg_{0,002} = -$ %	$A_{>2,0} = 32,0$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,000$ mm	$Dg_{0,001} = -$ %	$A_{<0,063} = 0,1$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

KORNVERTEILUNGSLINIE

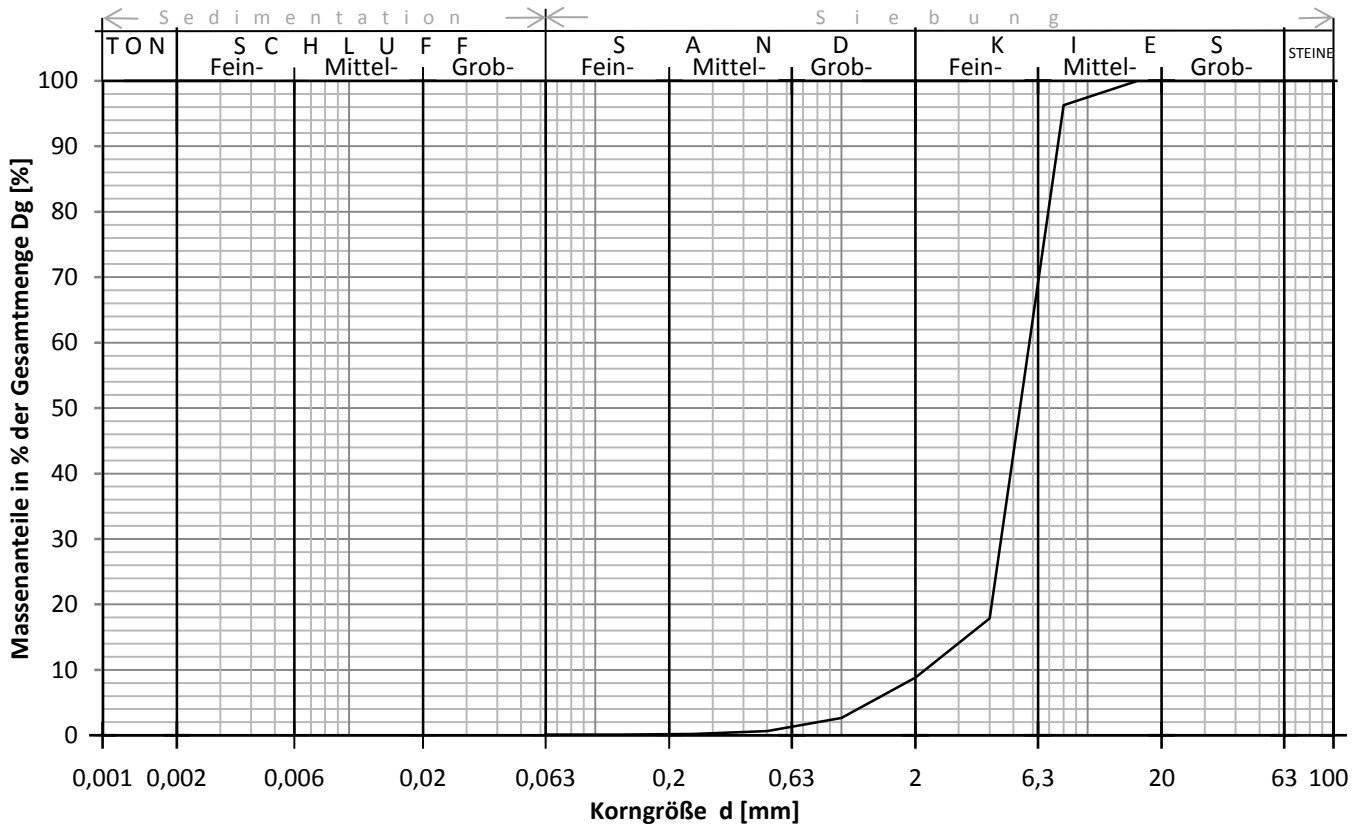
PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	581 Injekt	Probennummer	3
Projekttext 1	Forschungsprojekt	Entnahmestelle	Filterkies 2,0 - 3,15 mm
Projekttext 2	Druckinjektionen im Lockergest	Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 4,000$ mm	$Dg_{63} = 100,0$ %	$C_U = 1,4$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 3,715$ mm	$Dg_{31,5} = 100,0$ %	$C_C = 0,929$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 3,580$ mm	$Dg_{20} = 100,0$ %	$G = -$ cm ² Grobfaktor
$d_{80} = 3,450$ mm	$Dg_{16} = 100,0$ %	Kornfraktionen
$d_{70} = 3,204$ mm	$Dg_{6,3} = 100,0$ %	$C_o = 0,0$ % Steine
$d_{60} = 2,976$ mm	$Dg_2 = 6,2$ %	$Gr = 93,8$ % Kies
$d_{50} = 2,764$ mm	$Dg_{0,63} = 0,1$ %	$Sa = 6,2$ % Sand
$d_{40} = 2,567$ mm	$Dg_{0,2} = 0,0$ %	$Si+C = 0,0$ % Schluff+Ton
$d_{30} = 2,384$ mm	$Dg_{0,063} = 0,0$ %	= % nicht bekannt
$d_{20} = 2,214$ mm	$Dg_{0,02} = -$ %	Kornanteile
$d_{15} = 2,134$ mm	$Dg_{0,006} = -$ %	$A_{>63} = 0,0$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} = 2,056$ mm	$Dg_{0,002} = -$ %	$A_{>2,0} = 93,8$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,000$ mm	$Dg_{0,001} = -$ %	$A_{<0,063} = 0,0$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

KORNVERTEILUNGSLINIE

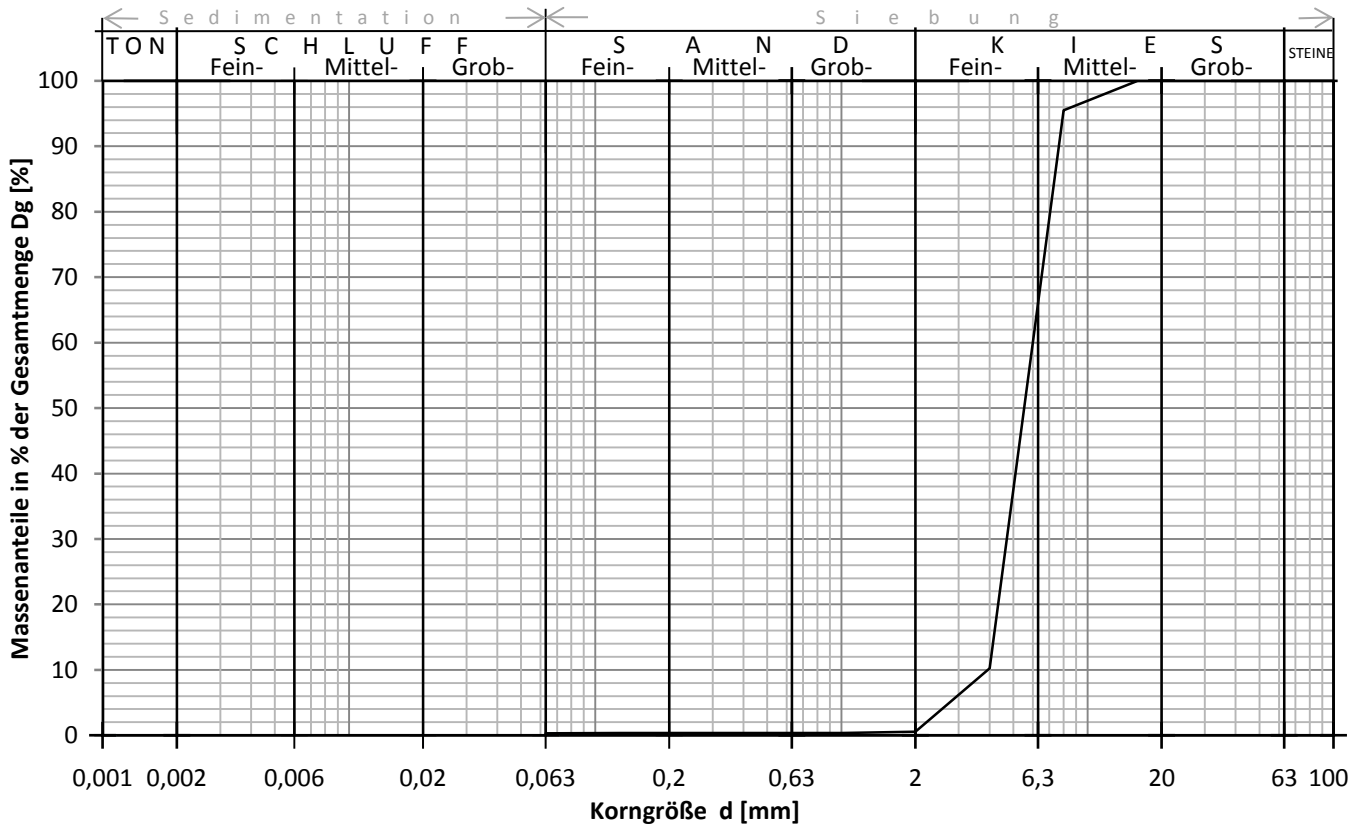
PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	581 Injekt	Probennummer	5
Projekttext 1	Forschungsprojekt	Entnahmestelle	Filterkies 5,0 - 8,0 mm
Projekttext 2	Wasserdruckinjektionen im Lockergest.	Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 16,000$ mm	$Dg_{63} = 100,0$ %	$C_U = 2,7$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 7,567$ mm	$Dg_{31,5} = 100,0$ %	$C_C = 1,559$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 7,239$ mm	$Dg_{20} = 100,0$ %	$G = -$ cm ² Grobfaktor
$d_{80} = 6,927$ mm	$Dg_{16} = 100,0$ %	Kornfraktionen
$d_{70} = 6,341$ mm	$Dg_{6,3} = 69,3$ %	$C_o = 0,0$ % Steine
$d_{60} = 5,804$ mm	$Dg_2 = 8,8$ %	$G_r = 91,2$ % Kies
$d_{50} = 5,313$ mm	$Dg_{0,63} = 1,3$ %	$S_a = 8,7$ % Sand
$d_{40} = 4,864$ mm	$Dg_{0,2} = 0,2$ %	$S_{i+C} = 0,1$ % Schluff+Ton
$d_{30} = 4,452$ mm	$Dg_{0,063} = 0,1$ %	= % nicht bekannt
$d_{20} = 4,076$ mm	$Dg_{0,02} = -$ %	Kornanteile
$d_{15} = 3,211$ mm	$Dg_{0,006} = -$ %	$A_{>63} = 0,0$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} = 2,190$ mm	$Dg_{0,002} = -$ %	$A_{>2,0} = 91,2$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,000$ mm	$Dg_{0,001} = -$ %	$A_{<0,063} = 0,1$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

KORNVERTEILUNGSLINIE

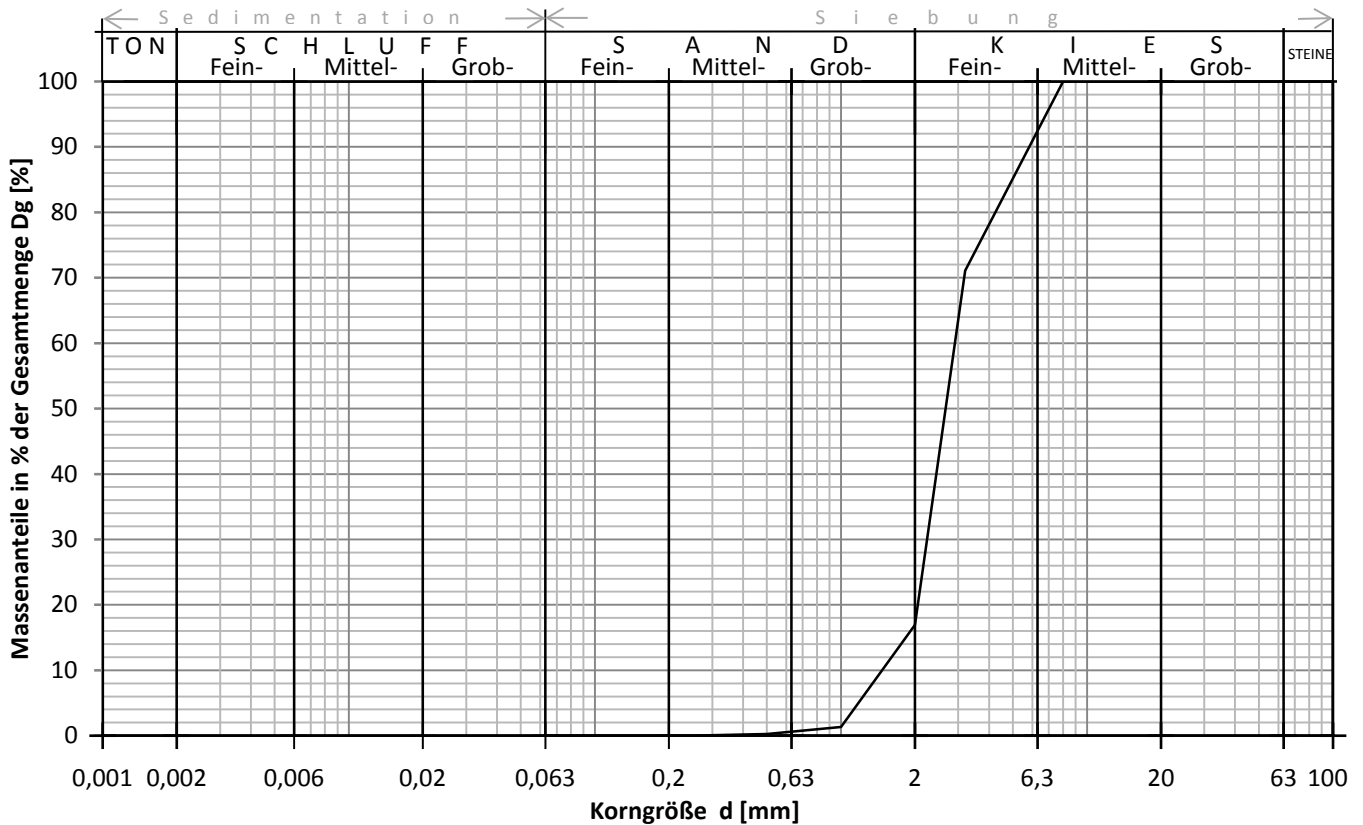
PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	581 Injekt	Probennummer	6
Projekttext 1	Forschungsprojekt	Entnahmestelle	Grob- u. Dachriesel 4,0 - 8,0 mm
Projekttext 2	Wasserdruckinjektionen im Lockergest.	Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 16,000$ mm	$Dg_{63} = 100,0$ %	$C_U = 1,5$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 7,650$ mm	$Dg_{31,5} = 100,0$ %	$C_C = 0,937$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 7,345$ mm	$Dg_{20} = 100,0$ %	$G = -$ cm ² Grobfaktor
$d_{80} = 7,053$ mm	$Dg_{16} = 100,0$ %	Kornfraktionen
$d_{70} = 6,502$ mm	$Dg_{6,3} = 66,1$ %	$C_o = 0,0$ % Steine
$d_{60} = 5,994$ mm	$Dg_2 = 0,5$ %	$G_r = 99,5$ % Kies
$d_{50} = 5,526$ mm	$Dg_{0,63} = 0,4$ %	$S_a = 0,2$ % Sand
$d_{40} = 5,094$ mm	$Dg_{0,2} = 0,3$ %	$S_{i+C} = 0,3$ % Schluff+Ton
$d_{30} = 4,697$ mm	$Dg_{0,063} = 0,3$ %	= % nicht bekannt
$d_{20} = 4,330$ mm	$Dg_{0,02} = -$ %	Kornanteile
$d_{15} = 4,157$ mm	$Dg_{0,006} = -$ %	$A_{>63} = 0,0$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} = 3,927$ mm	$Dg_{0,002} = -$ %	$A_{>2,0} = 99,5$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,000$ mm	$Dg_{0,001} = -$ %	$A_{<0,063} = 0,3$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

KORNVERTEILUNGSLINIE

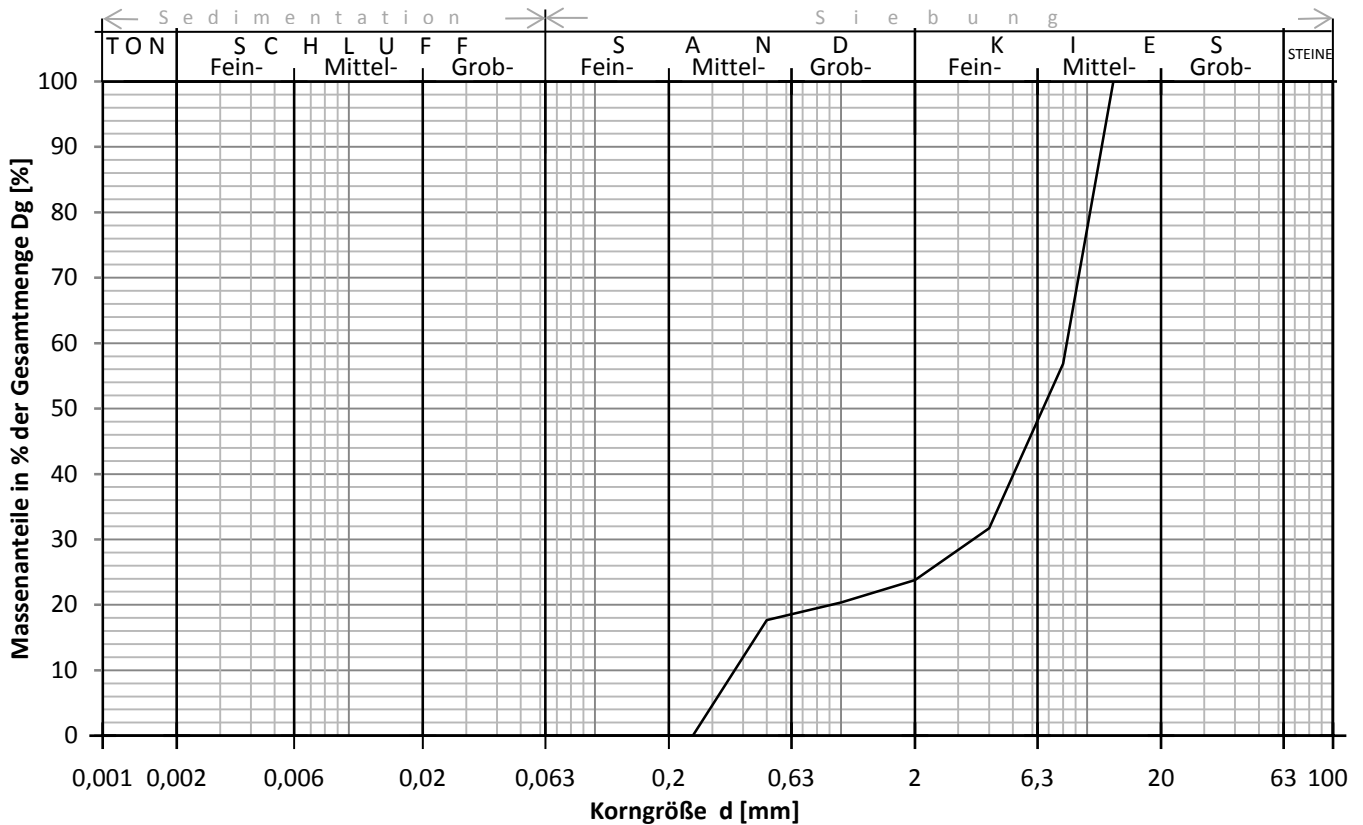
PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	581 Injekt	Probennummer	9
Projekttext 1	Forschungsprojekt	Entnahmestelle	Mischung 1
Projekttext 2	Druckinjektionen im Lockergest	Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	581_2 + 581_3 + 581_4



Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 8,000$ mm	$D_{g63} = 100,0$ %	$C_U = 2,0$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 5,828$ mm	$D_{g31,5} = 100,0$ %	$C_C = 1,175$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 4,975$ mm	$D_{g20} = 100,0$ %	$G = 164,33$ cm ² Grobfaktor
$d_{80} = 4,246$ mm	$D_{g16} = 100,0$ %	Kornfraktionen
$d_{70} = 3,171$ mm	$D_{g6,3} = 92,5$ %	$C_o = 0,0$ % Steine
$d_{60} = 2,907$ mm	$D_{g2} = 16,9$ %	$Gr = 83,1$ % Kies
$d_{50} = 2,665$ mm	$D_{g0,63} = 0,6$ %	$Sa = 16,9$ % Sand
$d_{40} = 2,443$ mm	$D_{g0,2} = 0,0$ %	$Si+Cl = 0,0$ % Schluff+Ton
$d_{30} = 2,240$ mm	$D_{g0,063} = 0,0$ %	$= 0,0$ % Ton
$d_{20} = 2,054$ mm	$D_{g0,02} = 0,0$ %	Kornanteile
$d_{15} = 1,835$ mm	$D_{g0,006} = 0,0$ %	$A_{>63} = 0,0$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} = 1,470$ mm	$D_{g0,002} = 0,0$ %	$A_{>2,0} = 83,1$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,250$ mm	$D_{g0,001} = 0,0$ %	$A_{<0,063} = 0,0$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	581 Injekt	Probennummer	12
Projekttext 1	Forschungsprojekt	Entnahmestelle	sandiger Kies
Projekttext 2	Wasserdruckinjektionen im Lockergest	Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 12,800 \text{ mm}$	$Dg_{63} = 100,0 \%$	$C_U = 22,4 \quad [-] \text{ Ungleichförmigkeitszahl}$
$d_{90} = 11,479 \text{ mm}$	$Dg_{31,5} = 100,0 \%$	$C_C = 3,884 \quad [-] \text{ Krümmungszahl}$
$d_{85} = 10,871 \text{ mm}$	$Dg_{20} = 100,0 \%$	$G = 178,08 \text{ cm}^2 \text{ Grobfaktor}$
$d_{80} = 10,294 \text{ mm}$	$Dg_{16} = 100,0 \%$	Kornfraktionen
$d_{70} = 9,232 \text{ mm}$	$Dg_{6,3} = 48,2 \%$	$C_o = 0,0 \%$ Steine
$d_{60} = 8,279 \text{ mm}$	$Dg_2 = 23,8 \%$	$G_r = 76,2 \%$ Kies
$d_{50} = 6,624 \text{ mm}$	$Dg_{0,63} = 18,6 \%$	$S_a = 23,8 \%$ Sand
$d_{40} = 5,029 \text{ mm}$	$Dg_{0,2} = 0,0 \%$	$S_{i+cl} = 0,0 \%$ Schluff+Ton
$d_{30} = 3,450 \text{ mm}$	$Dg_{0,063} = 0,0 \%$	$T = 0,0 \%$ Ton
$d_{20} = 0,913 \text{ mm}$	$Dg_{0,02} = 0,0 \%$	Kornanteile
$d_{15} = 0,451 \text{ mm}$	$Dg_{0,006} = 0,0 \%$	$A_{>63} = 0,0 \%$ Anteil mit $d > 63 \text{ mm}$
$d_{10} = 0,370 \text{ mm}$	$Dg_{0,002} = 0,0 \%$	$A_{>2,0} = 76,2 \%$ Anteil mit $d > 2,0 \text{ mm}$
$d_{min} = 0,250 \text{ mm}$	$Dg_{0,001} = 0,0 \%$	$A_{<0,063} = 0,0 \%$ Anteil mit $d < 0,063 \text{ mm}$

Anhang C.

Übersicht der untersuchten Proben

Lab.Nr.:	Korngruppe	Korngrößen	Zement	Herstelldatum	Prüfdatum	Alter [d]	W/Z	Probenabmessungen						Suspensionskennwerte					einaxialer Druckversuch						Glühverlust																		
								d [mm]	h ₀ [mm]	h/d [-]	V [cm³]	n [-]	D [-]	ρ _{susp} [g/cm³]	ρ _{susp} Mittel [g/cm³]	η _{LS} [mPa*s]	Temp [°C]	η _{HS} [mPa*s]	ρ _f [g/cm³]	ρ _f Mittel [g/cm³]	ρ _d [g/cm³]	ρ _d Mittel [g/cm³]	w [%]	w Mittel [%]	Vortriebs- geschwindig- keit [mm/min]	ε [%]	q _u [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	V _{gl} [%]	m _w ^{geb} [g]	V _d [cm³]	m _w ^{geb} /V _d [g/cm³]	V _{gl} [%]	m _w ^{geb} [g]									
580_1_1_1a	-	-	Rohrdorfer CEM I 52,5R HS	20.12.2012	17.01.2013	28	1,0	163,25	150,10	0,92	3141,94	-	-	1,46	1,46	-	-	1,56	1,57	0,95	0,97	63,80	61,96	0,00	2,35	9,80	721,12	-	-	-	-	-	-	-	-								
580_1_1_1b							1,0	157,18	150,00	0,95	2910,67	-	-	1,46				1,60		1,00		58,89		0,00	2,29	11,33	860,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
580_1_1_1c							1,0	163,14	150,40	0,92	3143,87	-	-	1,46				1,56		0,96		63,21		0,00	2,37	9,75	733,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
580_1_1_2a	-	-	Rohrdorfer CEM I 52,5R HS	20.12.2012	17.01.2013	28	1,0	83,48	200,80	2,41	1099,05	-	-	1,46	1,46	-	-	1,54	1,54	0,91	0,90	69,58	69,64	0,40	1,09	7,07	1 072,38	16,01	4,06	27,97	0,145	16,01	4,06	27,97	0,145								
580_1_1_2b							1,0	83,65	200,00	2,39	1099,14	-	-	1,46				1,53		0,90		70,53		0,40	1,16	6,78	961,21	16,01	4,06	27,97	0,145												
580_1_1_2c							1,0	83,48	199,10	2,39	1089,75	-	-	1,46				1,54		0,91		68,80		0,40	0,91	7,40	1 084,93	16,01	4,06	27,97	0,145												
580_1_2_1a	581_17	Normsand	Rohrdorfer CEM I 52,5R HS	17.12.2012	14.01.2013	28	0,5	169,82	151,10	0,89	3422,45	-	-	-	-	-	-	2,05	2,08	1,92	1,93	6,93	7,82	0,00	3,16	31,01	1 789,54	-	-	-	-	-	-	-	-								
580_1_2_1b							0,5	168,67	150,10	0,89	3353,87	-	-	-				2,13		1,96		8,75		0,00	3,49	39,46	2 605,21	-	-	-	-												
580_1_2_1c							0,5	169,07	150,70	0,89	3383,07	-	-	-				2,06		1,91		7,78		0,00	3,28	26,34	1 607,31	-	-	-	-												
580_1_2_2a	581_17	Normsand	Rohrdorfer CEM I 52,5R HS	17.12.2012	14.01.2013	28	0,5	83,20	223,65	2,69	1215,92	-	-	-	-	-	-	2,06	2,07	1,91	1,93	7,70	7,50	2,24	0,92	25,99	4 455,66	3,41	2,68	43,05	0,062	3,41	2,68	43,05	0,062								
580_1_2_2b							0,5	83,35	199,80	2,40	1090,18	-	-	-				2,08		1,93		7,26		0,40	1,37	25,69	3 340,01	3,41	2,68	43,05	0,062												
580_1_2_2c							0,5	83,15	200,00	2,41	1086,04	-	-	-				2,08		1,93		7,53		0,40	1,14	23,27	3 023,93	3,41	2,68	43,05	0,062												
580_2_1_1a	581_17	Normsand	Rohrdorfer CEM I 52,5R HS	17.12.2012	14.01.2013	28	0,5	83,23	200,00	2,40	1088,13	-	-	-	-	-	-	2,04	2,09	1,90	1,94	7,63	7,83	0,40	1,09	18,12	2 375,76	-	-	-	-	-	-	-	-								
580_2_1_1b							0,5	83,35	201,00	2,41	1096,72	-	-	-				2,16		1,99		8,42		0,40	1,02	29,60	4 874,87	-	-	-	-												
580_2_1_1c							0,5	83,23	201,00	2,41	1093,57	-	-	-				2,08		1,94		7,45		0,40	1,07	27,19	4 336,15	-	-	-	-												
580_2_2_1a	581_17	Normsand	Rohrdorfer CEM I 52,5R HS	10.01.2013	07.02.2013	28	0,5	83,20	202,00	2,43	1098,22	-	-	-	-	-	-	2,14	2,15	1,94	1,95	10,45	10,29	0,40	1,51	40,95	4 507,67	5,62	3,23	29,44	0,110	5,62	3,23	29,44	0,110								
580_2_2_1b							0,5	83,30	201,90	2,42	1100,31	-	-	-				2,15		1,95		10,37		0,40	1,33	42,33	5 791,36	5,62	3,23	29,44	0,110												
580_2_2_1c							0,5	83,00	200,80	2,42	1086,45	-	-	-				2,17		1,97		10,05		0,40	1,42	42,94	4 849,89	5,62	3,23	29,44	0,110												
580_2_3_1a	581_17	Normsand	Rohrdorfer CEM I 52,5R HS	10.01.2013	07.02.2013	28	0,5	83,30	202,10	2,43	1101,40	-	-	-	-	-	-	2,14	2,12	2,00	1,99	6,85	6,83	0,40	1,19	30,30	4 270,38	4,24	2,73	32,41	0,084	4,24	2,73	32,41	0,084								
580_2_3_1b							0,5	83,40	202,10	2,42	1104,05	-	-	-				2,12		1,98		6,88		0,40	1,26	28,71	3 694,33	4,24	2,73	32,41	0,084												
580_2_3_1c							0,5	83,30	200,70	2,41	1093,77	-	-	-				2,12		1,98		6,75		0,40	1,14	24,57	3 426,10	4,24	2,73	32,41	0,084												
580_3_1_1a	581_2	Quarzsand 1,4-2,2 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit	11.11.2013	09.12.2013	28	1,0	98,68	178,00	1,80	1361,21	0,3784	0,4498	1,50	1,50	776,74	23,0	60,13	2,19	2,19	1,96	1,96	11,94	11,79	0,36	0,71	5,72	1 389,90	2,35	2,54	55,276	0,046	2,28	2,59									
580_3_1_1b				1,0	98,73	199,70	2,02	1528,70	0,3784	0,4498	1,50	2,20	1,98	11,19					0,40		0,58		4,90		1 400,10	2,12	2,50	59,751	0,042														
580_3_1_1c				18.11.2013	16.12.2013	28	1,0	98,60	185,35	1,88	1415,26	0,3820	0,4332	1,49					2,19		1,96		12,24		1 538,87	2,70	3,31	62,608	0,053														
580_3_1_1d	1,0	98,60	186,90	1,90	1427,10	0,3820	0,4332	1,49	2,18	1,93	12,70	0,37	0,39	3,03	937,47	1,94	2,01	53,679	0,037																								
580_3_1_2a	581_4	Filterkies 3,15-5,6 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit	04.04.2013	02.05.2013	28	1,0	99,33	200,50	2,02	1553,54	0,3775	0,4539	1,48	1,48	536,96	17,0	43,53	2,22	2,20	1,98	1,95	11,90	12,61	0,40	0,66	6,79	1 526,57	2,82	3,000	53,576	0,056	3,08	1,05									
580_3_1_2b							1,0	99,23	200,60	2,02	1551,18	0,3935	0,3802	1,48					2,20		1,95		12,58		0,40	0,34	3,73	1 568,83	2,78	1,514	27,881	0,054											
580_3_1_2c							1,0	99,15	201,80	2,04	1558,10	0,3885	0,4032	1,48					2,19		1,93		13,35		0,40	0,34	3,33	1 479,50	2,52	1,832	37,734	0,049											
580_3_1_3a	581_3	Filterkies 2,0-3,15 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit	25.04.2013	23.05.2013	28	1,0	98,95	199,50	2,02	1534,14	0,3873	0,4088	1,48	1,48	645,65	26,0	58,48	2,17	2,16	1,93	1,92	12,73	13,00	0,40	0,55	4,44	1 084,55	2,58	1,936	38,932	0,050	2,90	0,67									
580_3_1_3b							1,0	98,80	200,50	2,03	1537,16	0,4373	0,1783	1,48					2,17		1,92		12,85		0,40	0,82	4,90	1 011,41	2,78	2,385	44,625	0,053											
580_3_1_3c							1,0	99,10	198,20	2,00	1528,77	0,4149	0,2816	1,48					2,15		1,89		13,42		0,40	0,58	4,11	940,19	2,56	2,071	42,667	0,049											
580_3_1_4a	581_5	Filterkies 5,0-8,0 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5 R SR0 + 2% Bentonit	11.04.2013	09.05.2013	28	1,0	98,95	201,10	2,03	1546,44	0,3869	0,4106	1,49	1,49	807,39	26,0	58,03	2,19	2,17	1,94	1,91	12,75	13,54	0,40	0,63	5,77	1 230,48	3,00	1,598	27,383	0,058	2,94	0,94									
580_3_1_4b							1,0	99,25	201,10	2,03	1555,83	0,4136	0,2876	1,49					2,16		1,90		13,73		0,40	0,72	5,25	937,94	3,02	1,237	21,624	0,057											
580_3_1_4c							1,0	98,85	197,50	2,00	1515,69	0,4109	0,3000	1,49					2,16		1,89		14,13		0,40	0,43	3,67	974,86	2,59	1,545	31,478	0,049											
580_3_1_5a	581_5	Filterkies 5,0-8,0 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5 R SR0 + 2% Bentonit	23.05.2013	20.06.2013	28	1,0	99,00	201,40	2,03	1550,31	0,4136	0,2876	1,49	1,49	649,13	23,0	57,75	2,18	2,16	1,92	1,90	13,49	13,88	0,40	0,80	3,99	945,49	2,88	1,776	32,083	0,055	3,52	0,83									
580_3_1_5b							1,0	99,15	201,20	2,03	1553,47	0,4053	0,3258	1,49					2,16		1,89		13,93		0,40	0,41	4,97	1 620,40	2,89	2,160	39,453	0,055											
580_3_1_5c							1,0	99,40	195,40	1,97	1516,31	0,4239	0,2401	1,49					2,14		1,87		14,21		0,39	0,47	4,04	1 111,62	3,00	1,491	26,480	0,056											
580_3_1_7a	581_6	Grob- und Dachriesel 4,0-8,0 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit	26.06.2013	24.07.2013	28	1,0	99,45	200,90	2,02	1560,56	0,3432	0,6120	1,50	1,50	634,35	28,0	59,95	2,23	2,21	1,99	1,98	11,83	11,89	0,40	0,40	4,29	1 726,25	22,98	29,000	63,299	0,458	28,89	3,32									
580_3_1_7b							1,0	99,50	199,20	2,00	1548,91	0,3560	0,5530	1,50					2,21		1,97		11,83		0,40	0,22	2,78	1 874,52	22,98	21,330	47,054	0,453											
580_3_1_7c							1,0	99,45	198,80	2,00	1544,24	0,3689	0,4935	1,50					2,20		1,97		12,01		0,40	0,61	4,71	1 059,48	22,99	28,150													

Lab.Nr.:	Korngruppe	Korngrößen	Zement	Herstelldatum	Prüfdatum	Alter [d]	W/Z	Probenabmessungen						Suspensionskennwerte					einaxialer Druckversuch						Glühverlust									
								d [mm]	h ₀ [mm]	h/d [-]	V [cm ³]	n [-]	D [-]	ρ _{susp} [g/cm ³]	ρ _{susp} Mittel [g/cm ³]	η [*] _{LS} [mPa*s]	Temp [°C]	η [*] _{HS} [mPa*s]	ρ _f [g/cm ³]	ρ _f Mittel [g/cm ³]	ρ _d [g/cm ³]	ρ _d Mittel [g/cm ³]	w [%]	w Mittel [%]	Vortriebs- geschwindig- keit [mm/mim]	ε [%]	q _u [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	V _{gl} [%]	m _w ^{geb} [g]	V _d [cm ³]	m _w ^{geb} /V _d [g/cm ³]	V _{gl} [%]	m _w ^{geb} [g]
580_3_2_1a	581_3	Filterkies 2,0-3,15 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit	31.05.2013	07.06.2013	7	1,0	99,70	200,40	2,01	1564,51	0,4108	0,3005	1,49	1,49	699,13	22,0	61,05	2,18	2,16	1,94	1,92	12,51	12,57	0,40	0,27	4,56	2 719,29	2,93	0,580	10,335	0,056	2,93	0,58
580_3_2_1b							1,0	99,45	200,60	2,02	1558,23	0,4182	0,2664	1,49					2,15		1,91		12,69		0,40	0,29	4,22	2 419,56	2,93	0,580	10,335	0,056		
580_3_2_1c							1,0	99,13	201,00	2,03	1551,14	0,3972	0,3631	1,49					2,14		1,90		12,50		0,40	0,32	3,68	2 086,46	2,93	0,580	10,335	0,056		
580_3_3_1a	581_3	Filterkies 2,0-3,15 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit	11.07.2013	05.09.2013	56	1,0	99,30	201,30	2,03	1558,95	0,4203	0,2567	1,49	1,49	706,52	29,0	73,05	2,20	2,19	1,94	1,94	13,28	12,87	0,40	0,27	6,10	3 642,91	2,87	0,751	13,462	0,056	2,78	0,41
580_3_3_1b							1,0	99,20	201,30	2,03	1555,81	0,3907	0,3931	1,49					2,19		1,95		12,55		0,40	0,34	7,79	4 014,15	2,81	0,903	16,477	0,055		
580_3_3_1c							1,0	99,35	201,30	2,03	1560,52	0,3908	0,3926	1,49					2,17		1,93		12,77		0,40	0,17	3,27	3 947,58	2,54	0,690	14,122	0,049		
580_4_1_1a	-	-	Rohrdorfer CEM I 42,5R HS + 2% Bentonit	30.04.2013	28.05.2013	28	1,0	83,25	160,30	1,93	872,55	-	-	1,48	1,48	566,09	26,0	49,23	1,56	1,55	0,92	0,92	69,07	69,11	0,32	1,11	8,65	1 151,60	16,57	2,700	17,776	0,152	16,57	2,70
580_4_1_1b							1,0	83,43	160,80	1,93	879,06	-	-	1,48					1,55		0,91		69,63		0,32	0,95	8,67	1 285,61	16,57	2,700	17,776	0,152		
580_4_1_1c							1,0	83,35	161,00	1,93	878,47	-	-	1,48					1,55		0,92		68,63		0,32	0,88	8,31	1 259,17	16,57	2,700	17,776	0,152		
580_4_1_2a	-	-	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit	30.04.2013	28.05.2013	28	1,0	83,20	160,20	1,93	870,96	-	-	1,48	1,48	580,87	25,0	53,23	1,56	1,57	0,93	0,93	68,48	68,68	0,32	1,01	8,37	1 164,08	16,38	2,395	15,719	0,152	16,38	2,39
580_4_1_2b							1,0	83,15	161,40	1,94	876,43	-	-	1,48					1,57		0,93		69,06		0,32	0,92	7,70	1 001,56	16,38	2,395	15,719	0,152		
580_4_1_2c							1,0	83,15	161,25	1,94	875,62	-	-	1,48					1,56		0,93		68,51		0,32	1,13	8,51	1 090,23	16,38	2,395	15,719	0,152		
580_4_2_1a	-	-	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 3,6% Bentonit	26.09.2013	24.10.2013	28	1,2	83,28	159,90	1,92	870,90	-	-	1,43	1,43	510,43	22,0	37,75	1,50	1,50	0,82	0,83	82,18	81,95	0,32	0,92	4,57	897,40	16,83	0,974	7,029	0,139	13,42	0,67
580_4_2_1b							1,2	83,73	161,00	1,92	886,39	-	-	1,43					1,51		0,83		81,64		0,32	0,72	4,38	777,33	16,36	1,130	8,299	0,136		
580_4_2_1c							1,2	83,50	156,80	1,88	858,64	-	-	1,43					1,50		0,82		82,03		0,31	0,85	4,54	925,77	16,60	1,037	7,577	0,137		
580_4_2_2a	-	-	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 4% Bentonit	26.09.2013	24.10.2013	28	1,5	83,58	161,50	1,93	885,96	-	-	1,36	1,36	475,65	22,0	36,43	1,44	1,44	0,72	0,72	99,69	99,21	0,32	0,78	2,35	527,57	16,93	0,914	7,474	0,122	17,51	0,94
580_4_2_2b							1,5	83,60	161,20	1,93	884,85	-	-	1,36					1,45		0,73		97,56		0,32	0,77	2,60	687,96	16,61	0,971	7,986	0,122		
580_4_2_2c							1,5	83,73	160,40	1,92	883,09	-	-	1,36					1,44		0,72		100,38		0,32	0,51	2,19	586,14	17,04	1,088	8,897	0,122		
580_4_2_3a	-	-	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 5% Bentonit	01.10.2013	29.10.2013	28	2,0	83,25	160,60	1,93	874,19	-	-	1,36	1,36	559,13	24,0	47,18	1,41	1,41	0,67	0,67	110,28	110,33	0,32	0,78	2,06	474,04	17,94	0,385	3,204	0,120	17,94	0,39
580_4_2_3b							2,0	83,38	161,00	1,93	879,00	-	-	1,36					1,41		0,67		110,26		0,32	0,61	1,40	483,82	17,94	0,385	3,204	0,120		
580_4_2_3c							2,0	83,40	160,30	1,92	875,70	-	-	1,36					1,41		0,67		110,46		0,32	0,65	1,96	451,15	17,94	0,385	3,204	0,120		
580_4_2_4a	-	-	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit	01.10.2013	29.10.2013	28	0,8	83,60	160,05	1,91	878,53	-	-	1,58	1,58	1060,00	24,0	112,28	1,65	1,65	1,06	1,07	55,64	55,32	0,32	0,67	7,96	1 544,09	16,37	1,401	8,045	0,174	16,37	1,40
580_4_2_4b							0,8	83,50	161,80	1,94	886,02	-	-	1,58					1,65		1,06		55,35		0,32	0,80	10,79	1 740,27	16,37	1,401	8,045	0,174		
580_4_2_4c							0,8	83,15	160,70	1,93	872,63	-	-	1,58					1,66		1,07		54,96		0,32	0,36	4,44	1 860,02	16,37	1,401	8,045	0,174		
580_4_3_1a	-	-	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 5% Bentonit	08.10.2013	05.11.2013	28	3,0	83,33	160,70	1,93	876,31	-	-	1,20	1,20	100,00	23,0	16,27	1,27	1,28	0,45	0,46	181,17	179,72	0,32	0,92	0,22	44,09	18,39	0,874	10,407	0,084	18,39	0,87
580_4_3_1b							3,0	83,15	159,25	1,92	864,76	-	-	1,20					1,29		0,47		175,35		0,32	0,91	0,37	50,43	18,39	0,874	10,407	0,084		
580_4_3_1c							3,0	83,63	159,85	1,91	877,96	-	-	1,20					1,27		0,45		182,63		0,32	0,71	0,29	49,34	18,39	0,874	10,407	0,084		
580_4_3_2a	-	-	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 8% Bentonit	08.10.2013	05.11.2013	28	3,0	83,25	159,90	1,92	870,38	-	-	1,21	1,21	342,74	23,0	25,38	1,25	1,24	0,41	0,41	201,23	204,04	0,32	1,35	0,21	167,66	18,04	0,680	9,269	0,073	18,04	0,68
580_4_3_2b							3,0	83,30	161,15	1,93	878,23	-	-	1,21					1,24		0,40		207,77		0,32	0,75	0,25	80,37	18,04	0,680	9,269	0,073		
580_4_3_2c							3,0	83,18	157,90	1,90	857,94	-	-	1,21					1,25		0,41		203,11		0,32	0,80	0,25	86,77	18,04	0,680	9,269	0,073		
580_5_1_1a	581_2	Quarzsand 1,4-2,2 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 3,6% Bentonit	12.11.2013	10.12.2013	28	1,2	98,68	200,60	2,03	1534,03	0,3713	0,4825	1,43	1,43	760,65	23,0	60,80	2,17	2,16	1,93	1,91	12,52	12,86	0,40	1,02	3,18	473,65	2,14	2,58	62,65	0,041	2,12	2,50
580_5_1_1b				1,2	98,85	163,60	1,66	1255,53	0,3713	0,4825	1,43	2,14	1,91	12,11					0,33		0,61		2,41		508,97	1,94	2,24	60,41	0,037					
580_5_1_1c				1,2	98,75	190,20	1,93	1456,72	0,3840	0,4240	1,44	2,16	1,90	13,94					0,38		0,35		3,94		1 378,03	2,19	2,78	66,92	0,042					
580_5_1_1d	581_2	Quarzsand 1,4-2,2 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 4% Bentonit	19.11.2013	17.12.2013	28	1,2	98,75	193,00	1,95	1478,16	0,3840	0,4240	1,44	1,36	648,70	23,5	42,86	2,16	2,12	1,91	1,87	13,26	13,69	0,39	0,46	3,41	1 229,74	2,19	2,38	56,71	0,042	1,92	2,03
580_5_1_2a				1,5	98,80	189,20	1,91	1450,52	0,3746	0,4673	1,36	2,11	1,85	13,87					0,38		0,40		2,15		1 237,80	1,95	1,35	37,46	0,036					
580_5_1_2b				1,5	98,73	191,50	1,94	1465,93	0,3746	0,4673	1,36	2,12	1,88	12,72					0,38		0,39		1,79		903,42	1,91	2,23	62,10	0,036					
580_5_1_2c	581_2	Quarzsand 1,4-2,2 mm	Rohrdorfer CEM I 42,5R SR0 + 5% Bentonit	20.11.2013	18.12.2013	28	1,5	98,65	198,35	2,01	1516,06	0,3880	0,4055	1,36	1,28	424,37	23,0	29,89	2,14	2,08	1,87	1,81	14,49	15,33	0,40	0,54	2,18	738,42	1,98	2,37	64,01	0,037	1,58	1,79
580_5_1_2d				1,5	98,73	200,35	2,03	1533,68	0,3880	0,4055	1,36	2,12	1,86	14,34					0,40		0,27		1,49		613,66	1,82	2,16	63,73	0,034					
580_5_1_3a				2,0	98,85	188,90	1,91	1449,69	0,3827	0,4300	1,28	2,07	1,79	15,52					0,38		0,50		0,79		257,85	1,65	1,77	60,16	0,029					
580_5_1_3b	581_2	Quarzsand 1,4-2,2 mm	Rohrdorfer C																															

Anhang D.

Prüfprotokolle: Einaxialer Druckversuch

Aufgrund der umfangreichen Versuchsanordnung und der daraus entstehenden Menge an Prüfprotokollen wird in diesem Abschnitt neben den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen der einaxialen Druckversuche ein Prüfprotokoll stellvertretend für alle dargestellt.

Rohrdorfer CEM I 42,5 R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_3_1_5a
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	20.06.2013

EINAXIALE DRUCKFESTIGKEIT

Prüfkörper vor Versuchsdurchführung (nach Abgleichen):

Probenalter [d] =	28	Herstelldatum =	23.05.2013
D [mm] =	99,00	A [cm ²] =	76,98
h ₀ [mm] =	201,40	V [cm ³] =	1 550,31
m _f + Tara [g] =	3 387,00	ρ _f [g/cm ³] =	2,18
Tara [g] =	0,00	ρ _{susp} [g/cm ³] =	1,49
W/B =	1,0	Korngruppe =	581_5
Durchmesser = Mittelwert aus 4 Messungen		Probenhöhe = Mittelwert aus 2 Messungen	

Einaxialer Druckveruch (gemäß ÖNORM B 4415):

Vorschubgeschw. [mm/min] =	0,40	Druckversuch-Diagramm:
Bruchspannung [N/mm ²] =	3,99	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Bruchstauchung [%] =	0,80	<input checked="" type="checkbox"/> siehe Anhang

Foto vor dem Versuch:

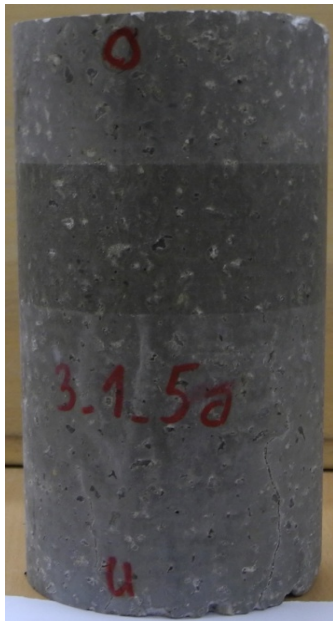
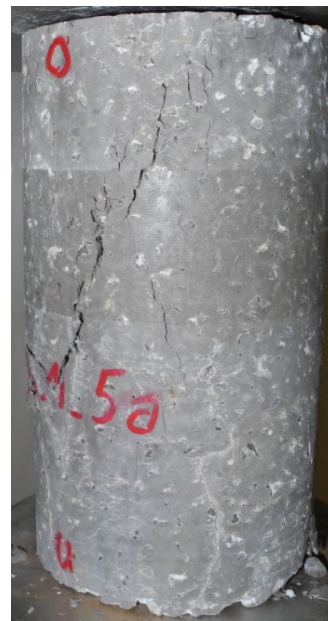


Foto nach dem Versuch:



Prüfkörper nach Versuchsdurchführung:

m _f + Tara [g] =	3 965,80	w [%] =	13,49
m _d + Tara [g] =	3 563,70	ρ _f [g/cm ³] =	2,18
Tara [g] =	584,00	ρ _d [g/cm ³] =	1,92

Rheologische Eigenschaften:

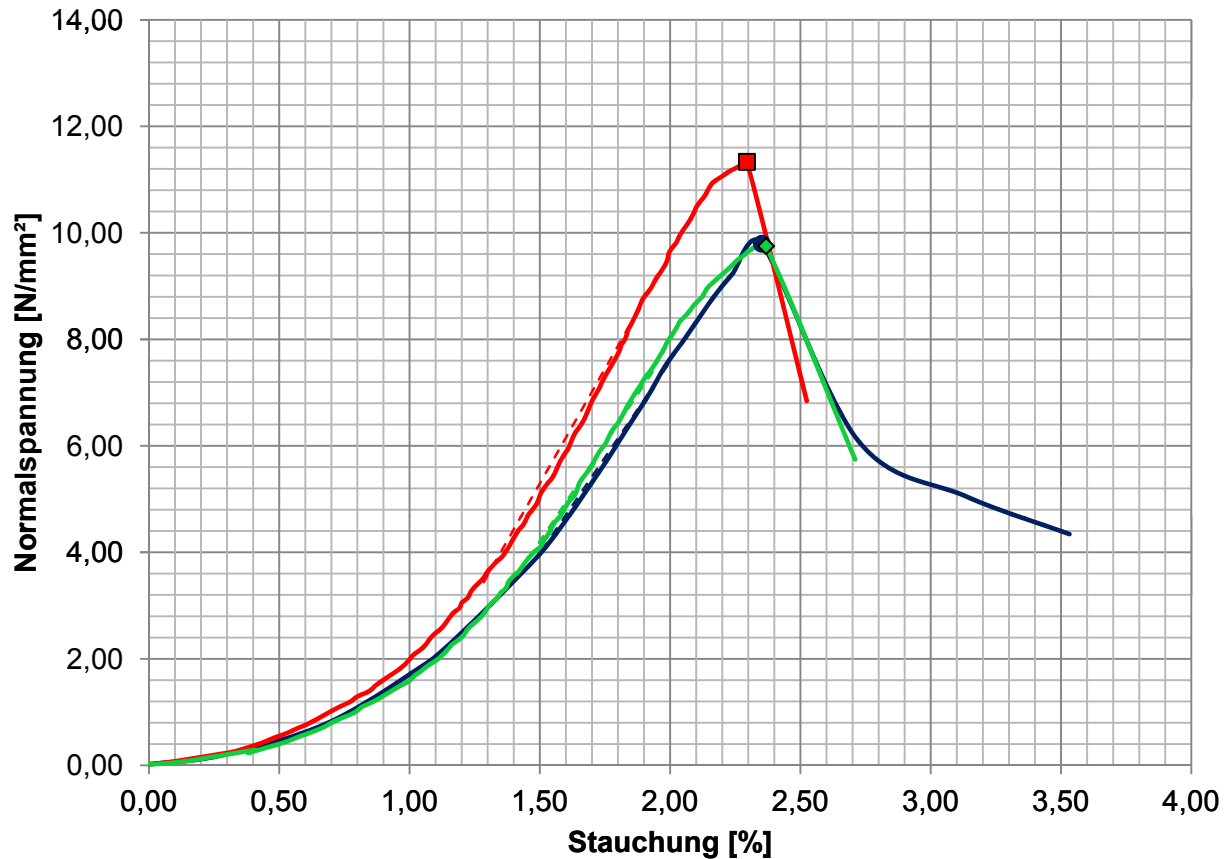
Beginn d. Viskositätsmessung =	Viskositäts-Diagramm:
2 Minuten nach Mischende	
	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	<input type="checkbox"/> siehe Anhang

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM EN 196-1

Probennummer: **580_1_1_1**

<i>Probenalter</i>	28 Tage	<i>Prüfdatum</i>	17.01.2013
<i>Bodenart</i>	-	<i>W/Z-Gehalt</i>	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

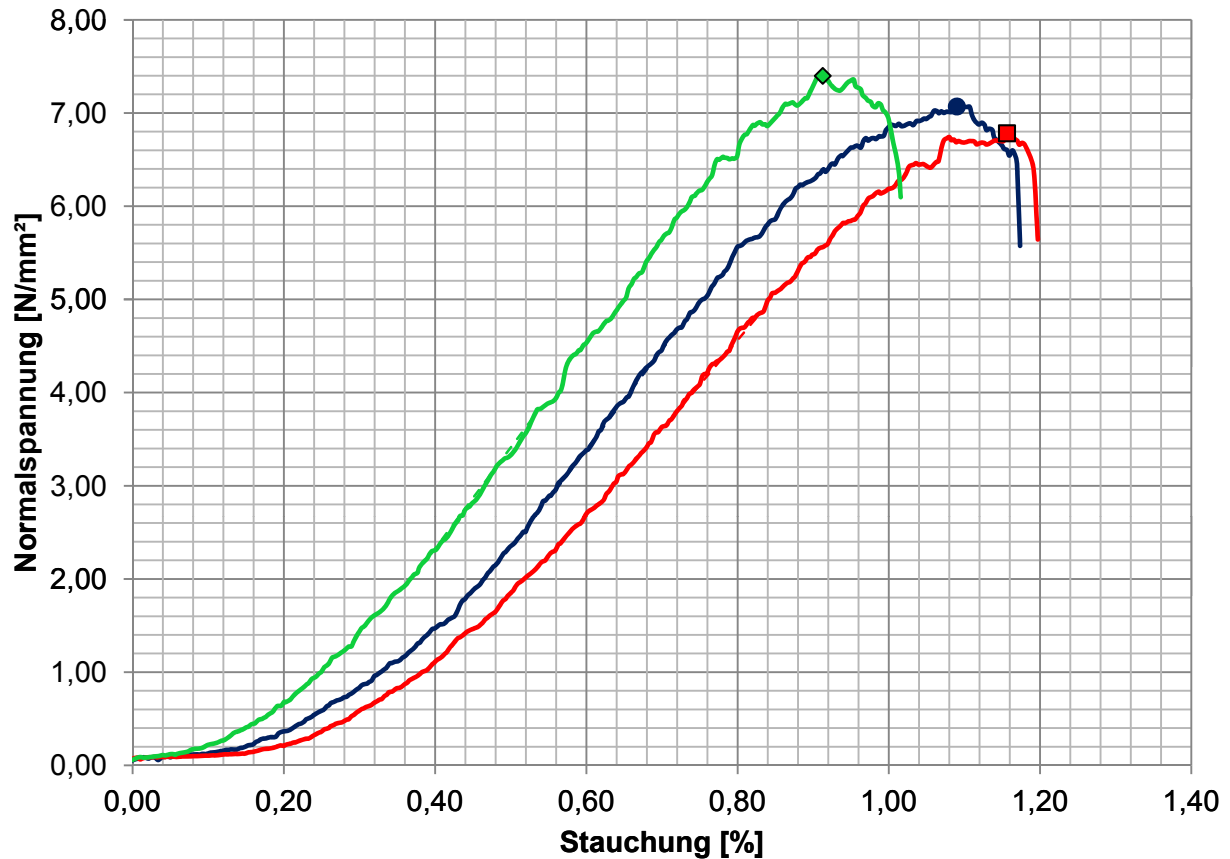
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	9,796	11,335	9,753
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	2,352	2,294	2,368
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	721,12	860,91	733,62

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_1_1_2**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	17.01.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

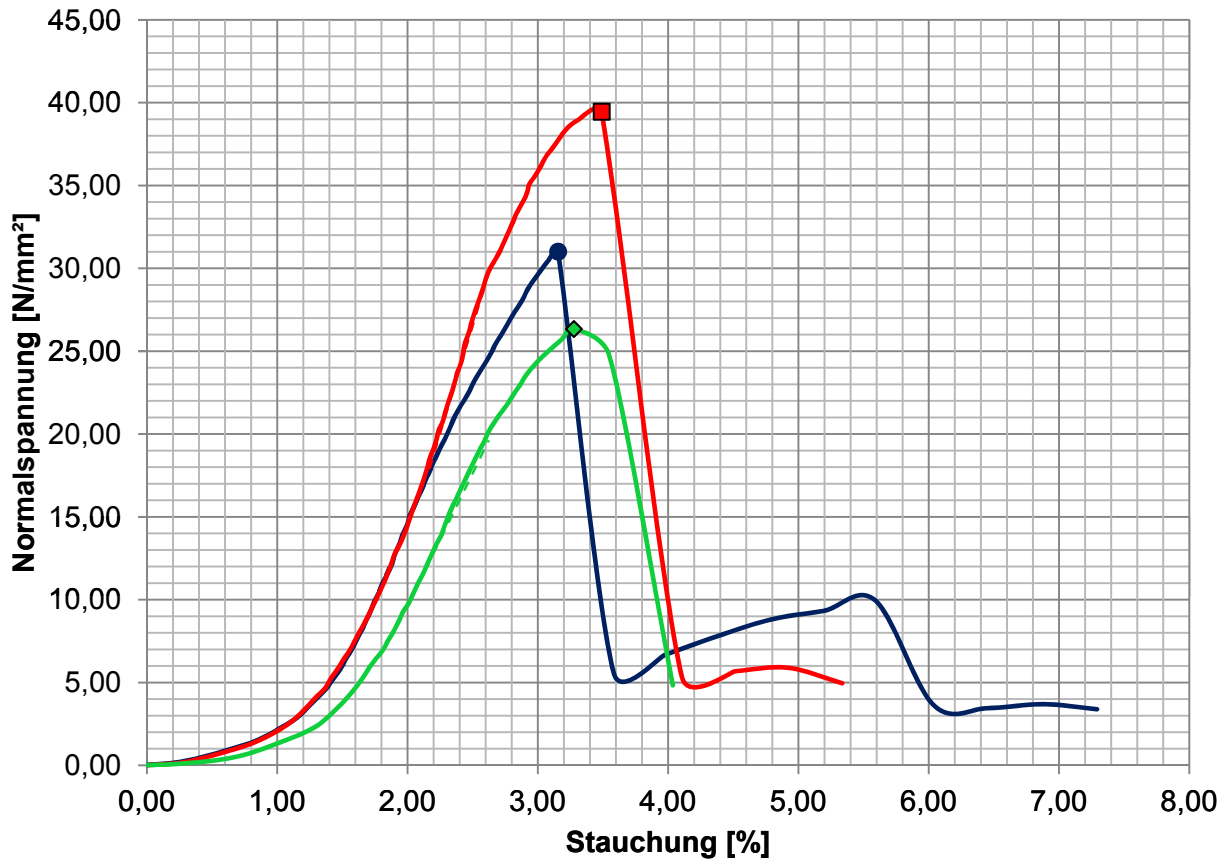
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	7,070	6,783	7,399
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	1,090	1,156	0,913
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 072,38	961,21	1 084,93

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM EN 196-1

Probennummer: **580_1_2_1**

<i>Probenalter</i>	28 Tage	<i>Prüfdatum</i>	14.01.2013
<i>Bodenart</i>	Normsand	<i>W/Z-Gehalt</i>	0,5



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

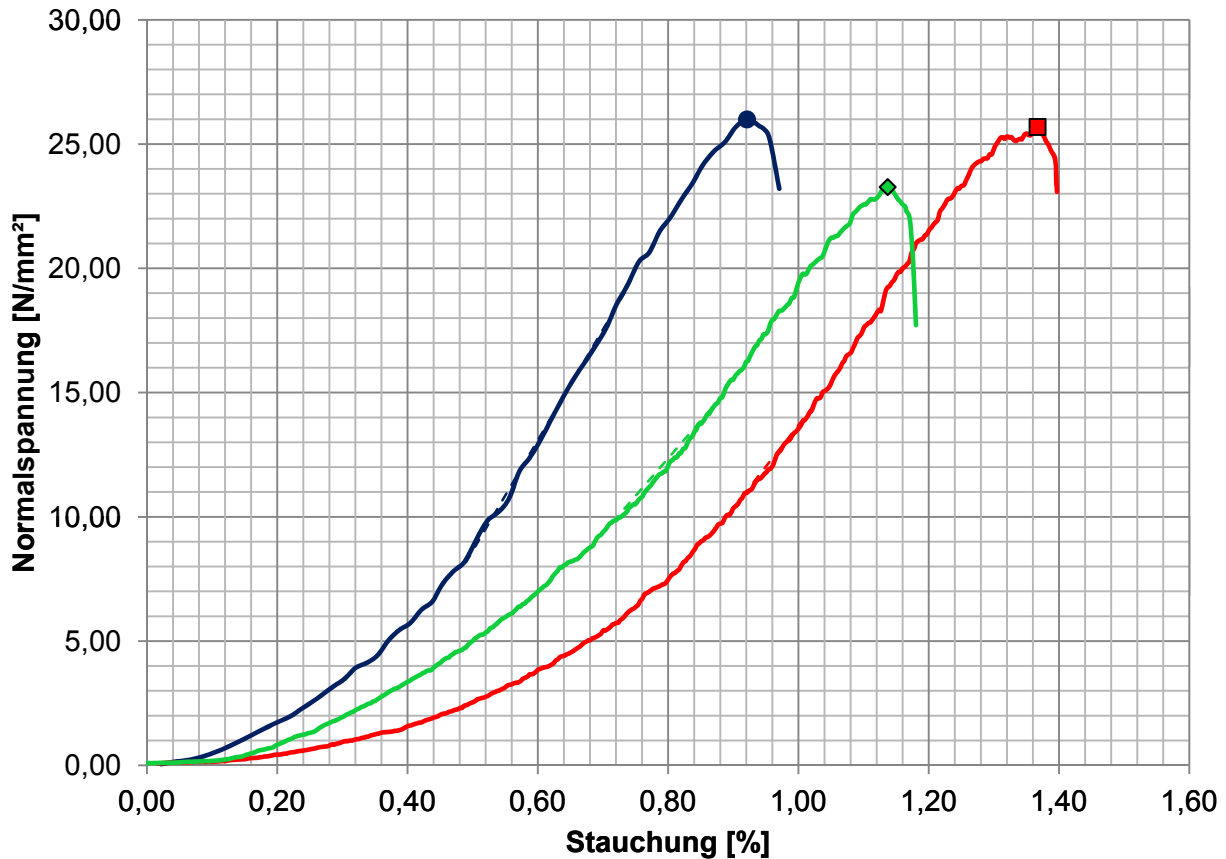
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	31,011	39,456	26,342
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	3,155	3,490	3,276
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 789,54	2 605,21	1 607,31

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_1_2_2**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	14.01.2013
Bodenart	Normsand	W/Z-Gehalt	0,5



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

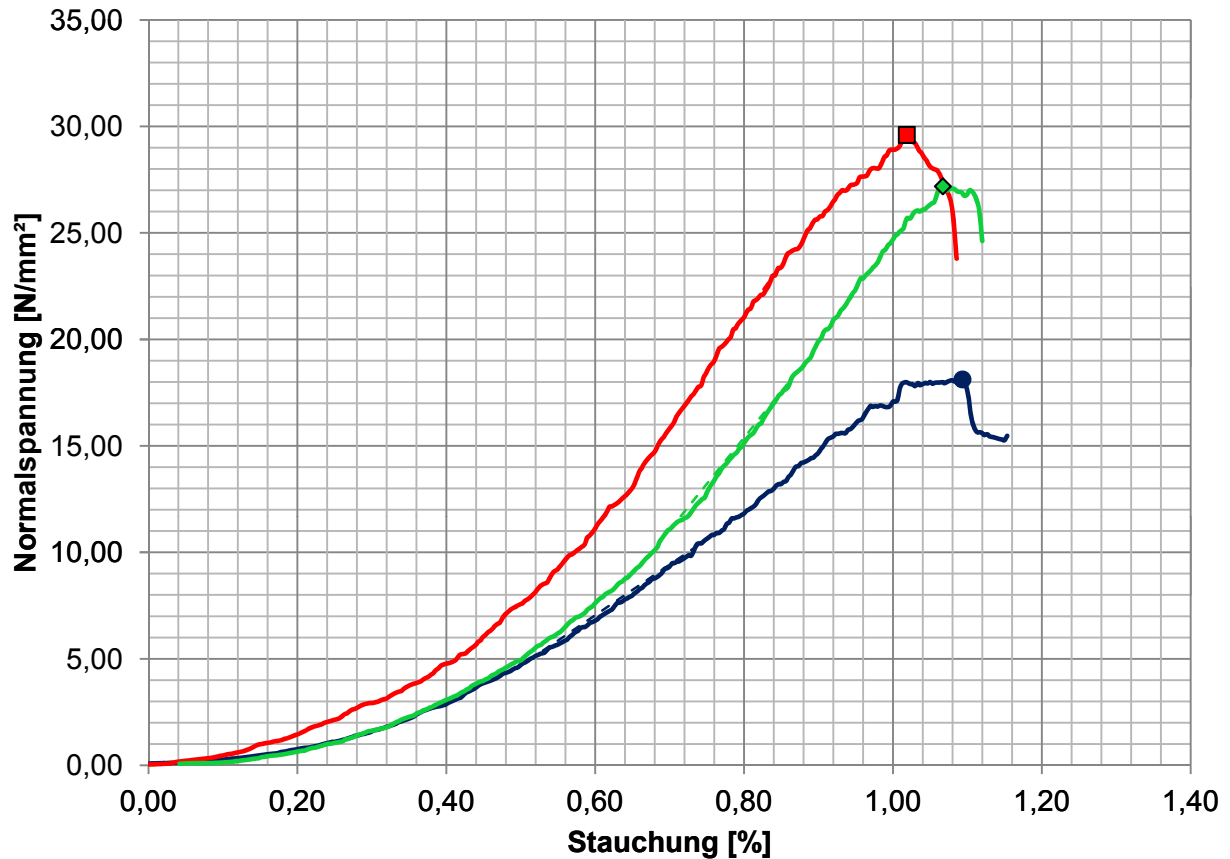
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	25,995	25,692	23,271
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,921	1,367	1,137
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	4 455,66	3 340,01	3 023,93

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_2_1_1**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	14.01.2013
Bodenart	Normsand	W/Z-Gehalt	0,5



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

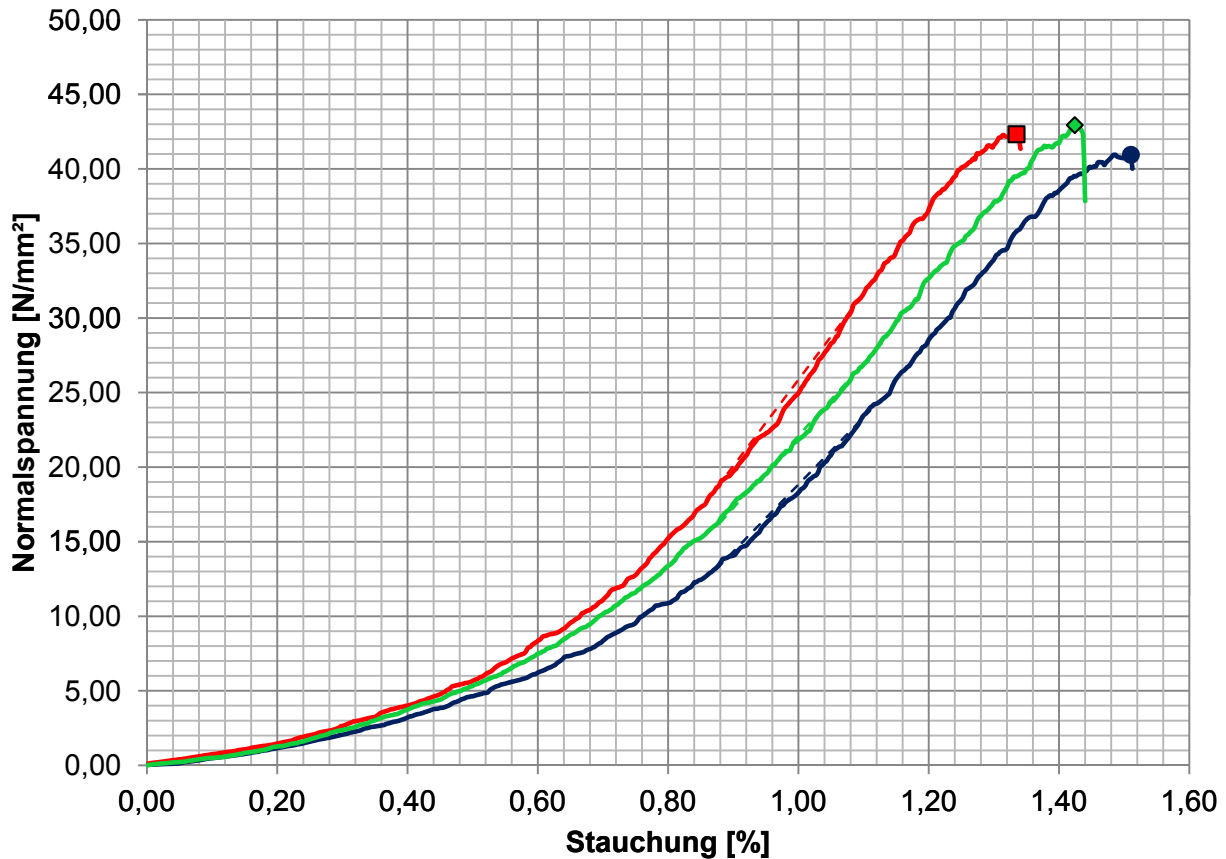
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	18,122	29,601	27,189
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	1,093	1,019	1,067
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	2 375,76	4 874,87	4 336,15

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_2_2_1**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	07.02.2013
Bodenart	Normsand	W/Z-Gehalt	0,5



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

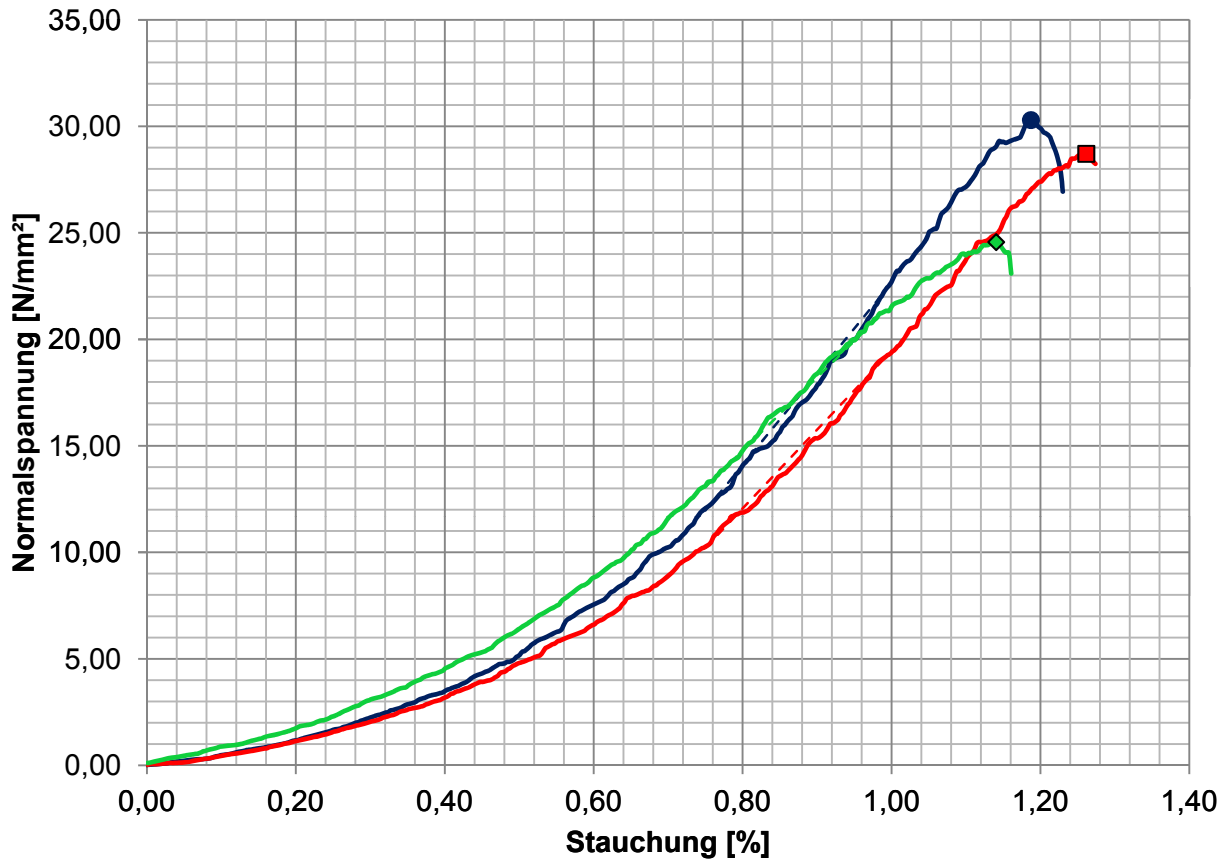
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	40,954	42,331	42,941
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	1,510	1,335	1,424
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	4 507,67	5 791,36	4 849,89

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_2_3_1**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	07.02.2013
Bodenart	Normsand	W/Z-Gehalt	0,5



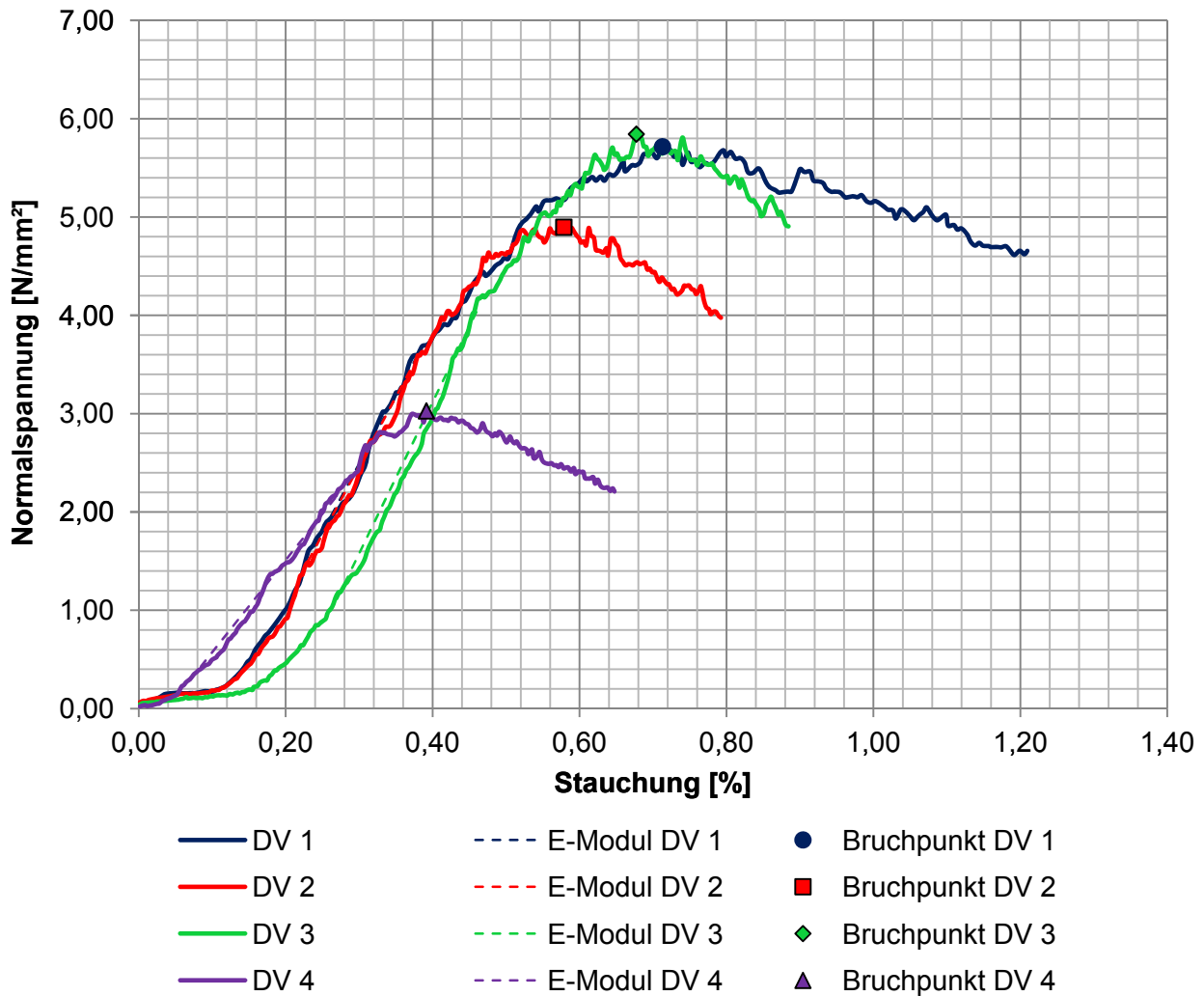
— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	30,295	28,711	24,569
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	1,187	1,261	1,141
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	4 270,38	3 694,33	3 426,10

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer:	580_3_1_1	Prüfdatum 1 + 2	09.12.2013
Probenalter	28 Tage	Prüfdatum 3 + 4	16.12.2013
Bodenart	Sand 1,4 - 2,2 mm	W/Z-Gehalt	1,0



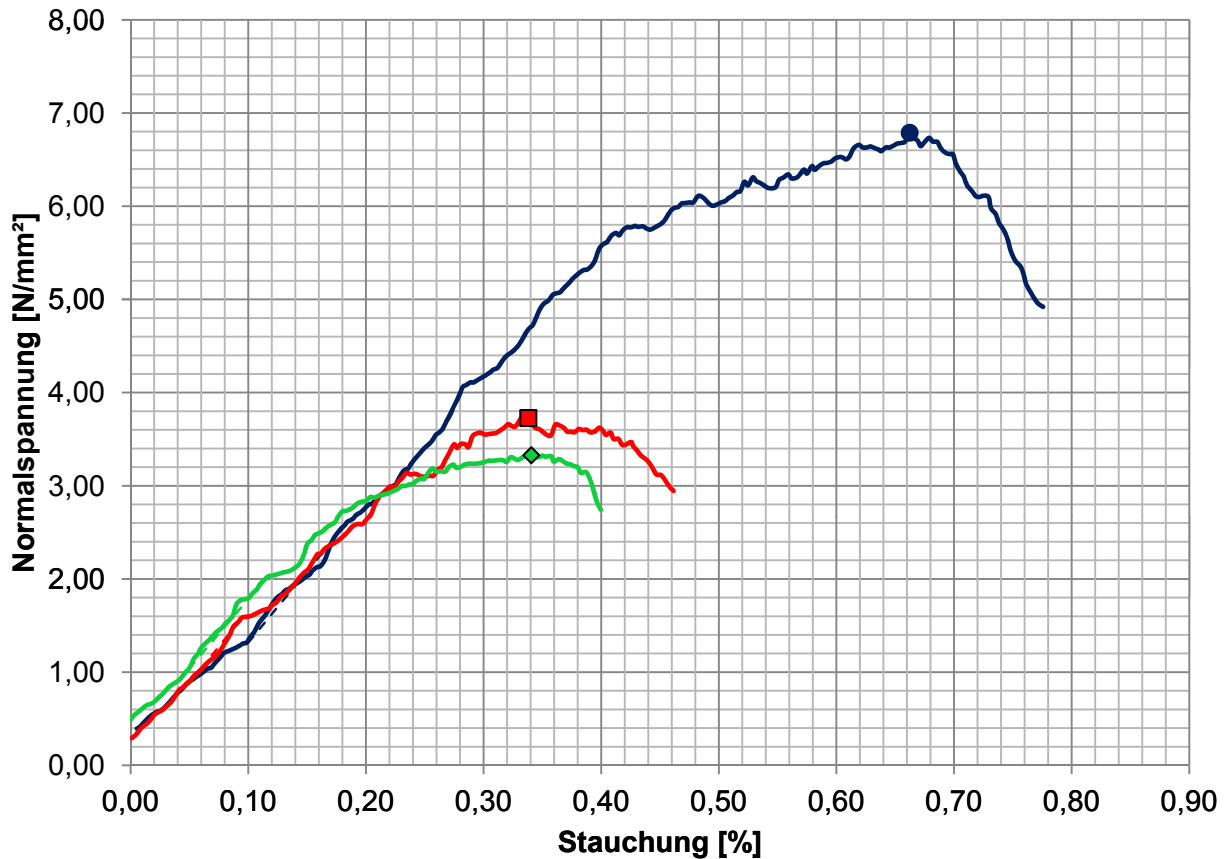
			DV 1	DV 2	DV 3	DV 4
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	5,716	4,897	5,844	3,029
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,713	0,578	0,677	0,391
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 389,90	1 400,10	1 538,87	937,47

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_1_2**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	02.05.2013
Bodenart	Kies 3,15 - 5,6 mm	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

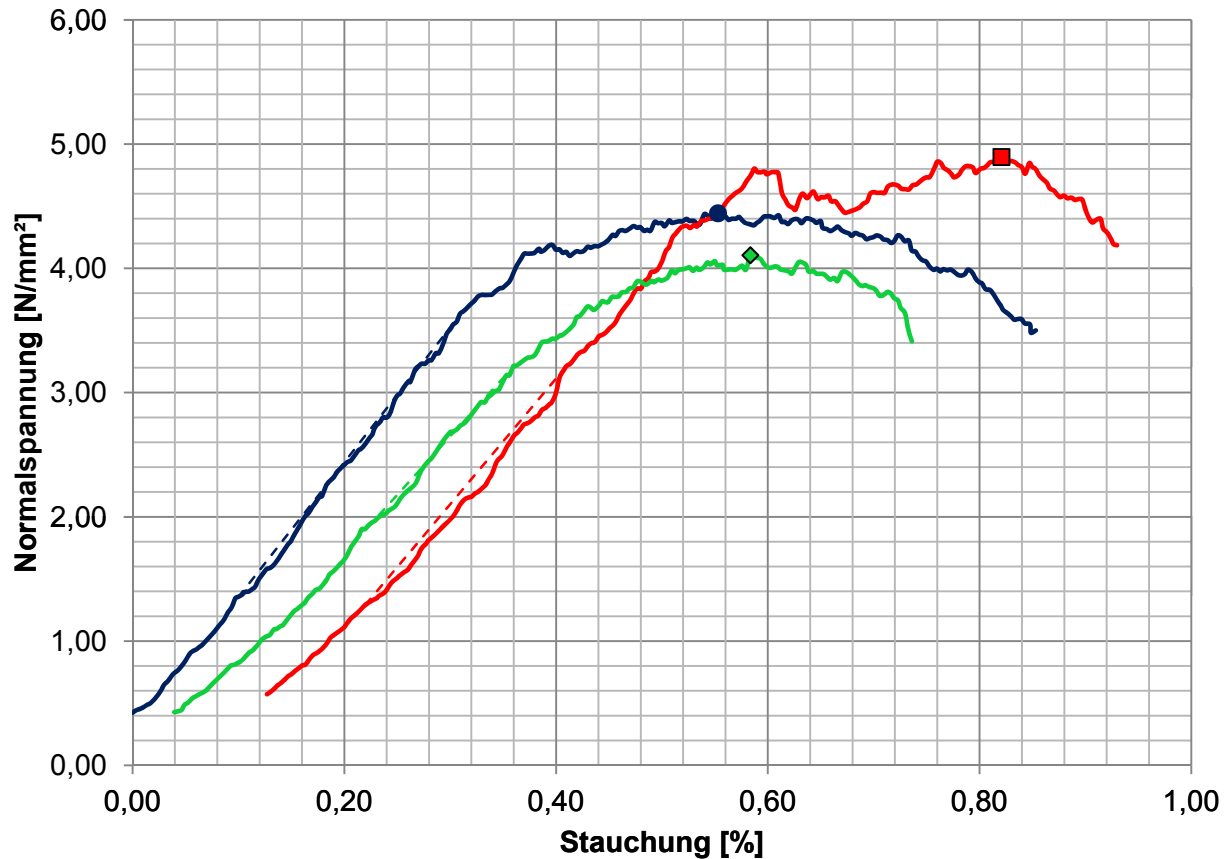
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	6,789	3,727	3,330
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,662	0,338	0,341
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 526,57	1 568,83	1 479,50

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_1_3**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	23.05.2013
Bodenart	Kies 2,0 - 3,15 mm	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

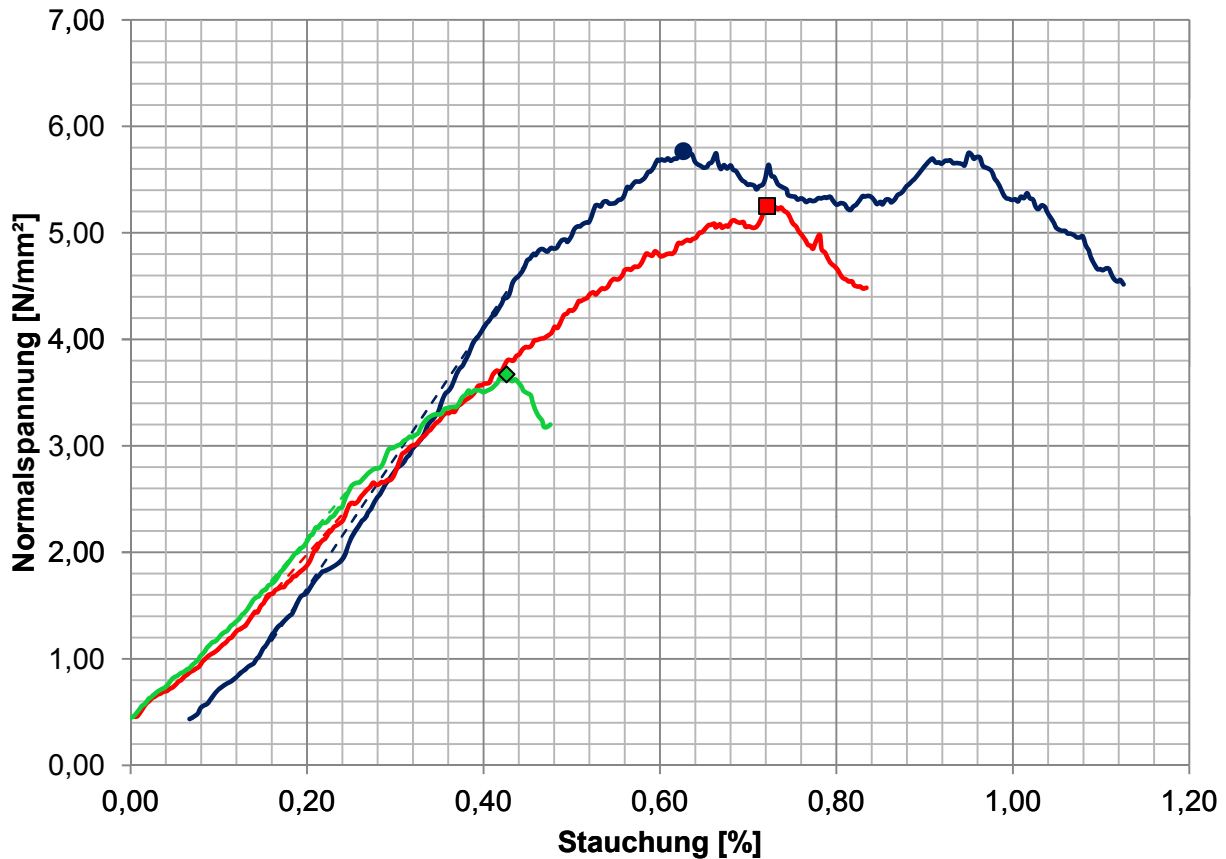
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	4,444	4,896	4,106
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,553	0,821	0,583
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 084,55	1 011,41	940,19

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_1_4**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	09.05.2013
Bodenart	Kies 5,0 - 8,0 mm	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

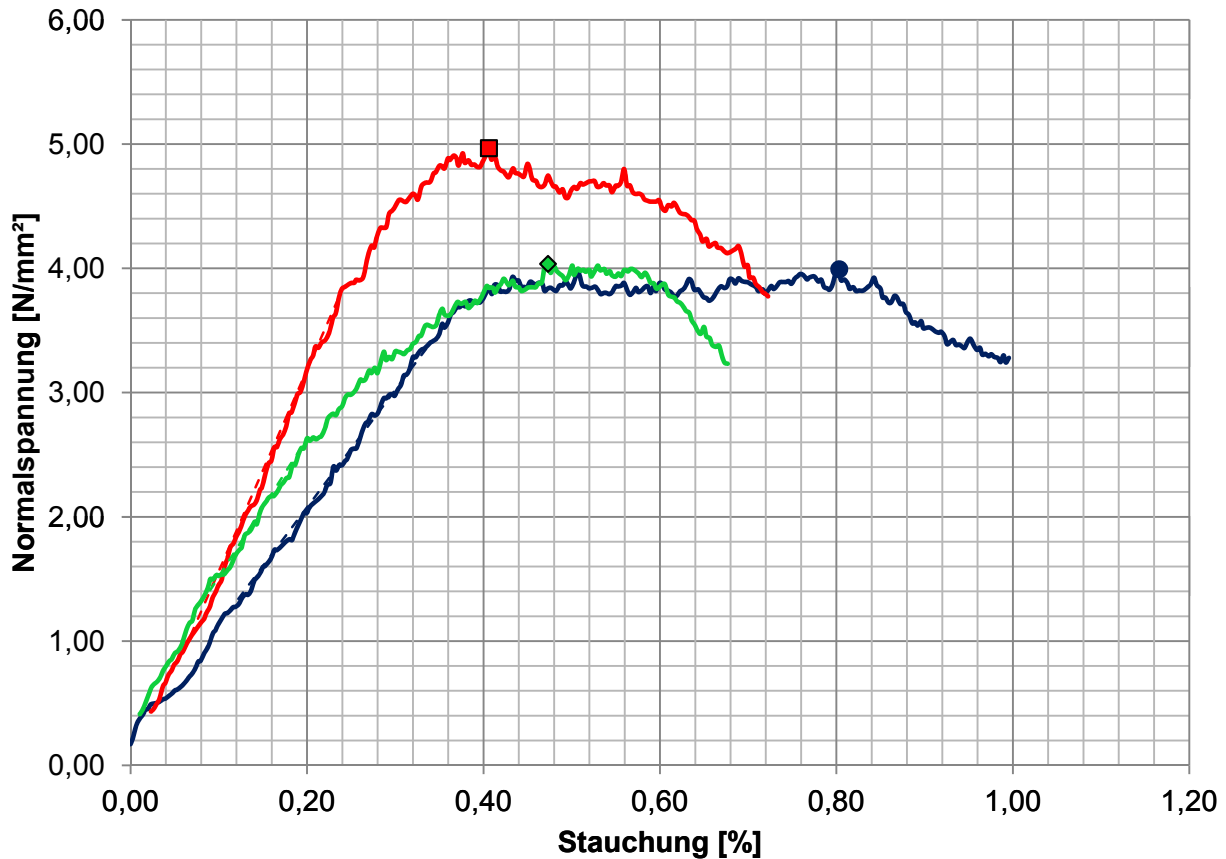
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	5,767	5,253	3,672
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,626	0,721	0,426
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 230,48	937,94	974,86

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_1_5**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	20.06.2013
Bodenart	Kies 5,0 - 8,0 mm	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

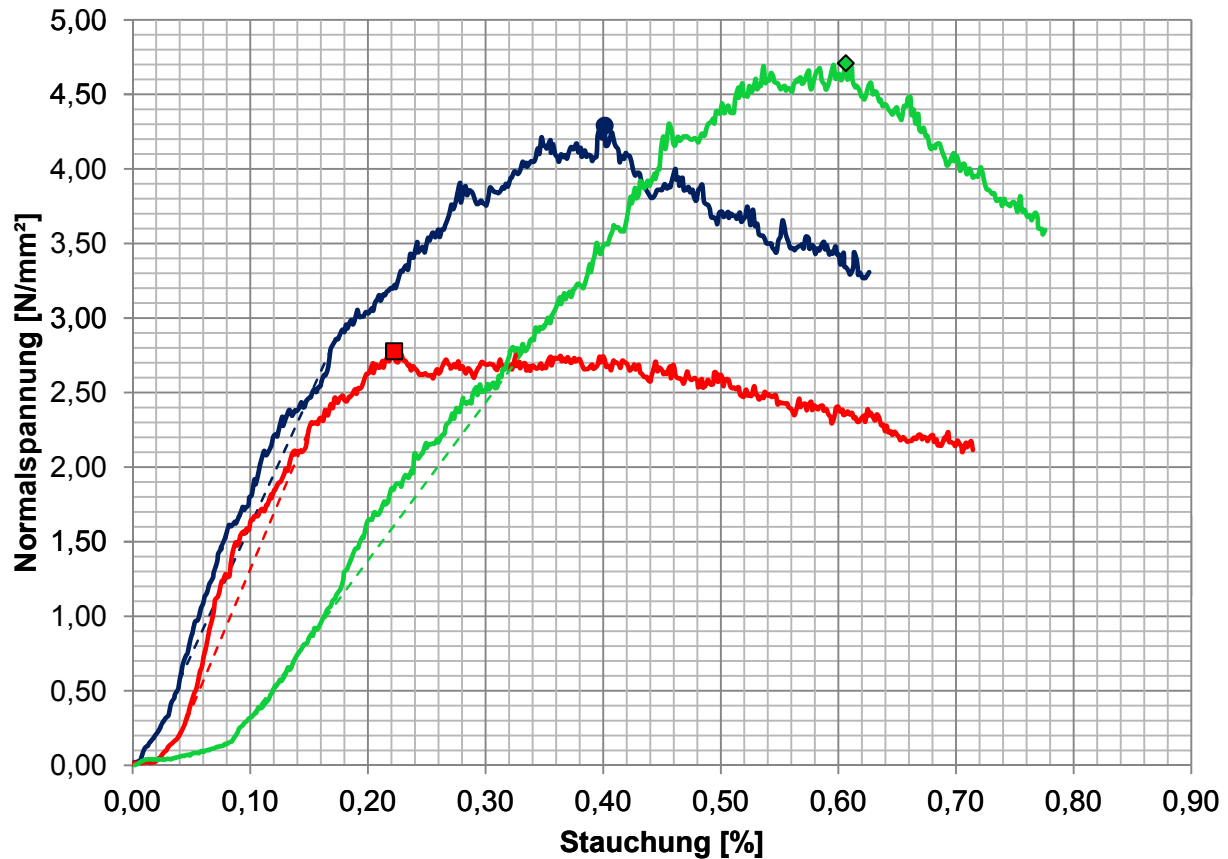
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	3,993	4,968	4,036
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,803	0,406	0,473
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	945,49	1 620,40	1 111,62

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_1_7**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	24.07.2013
Bodenart	Grob- & Dachriesel	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

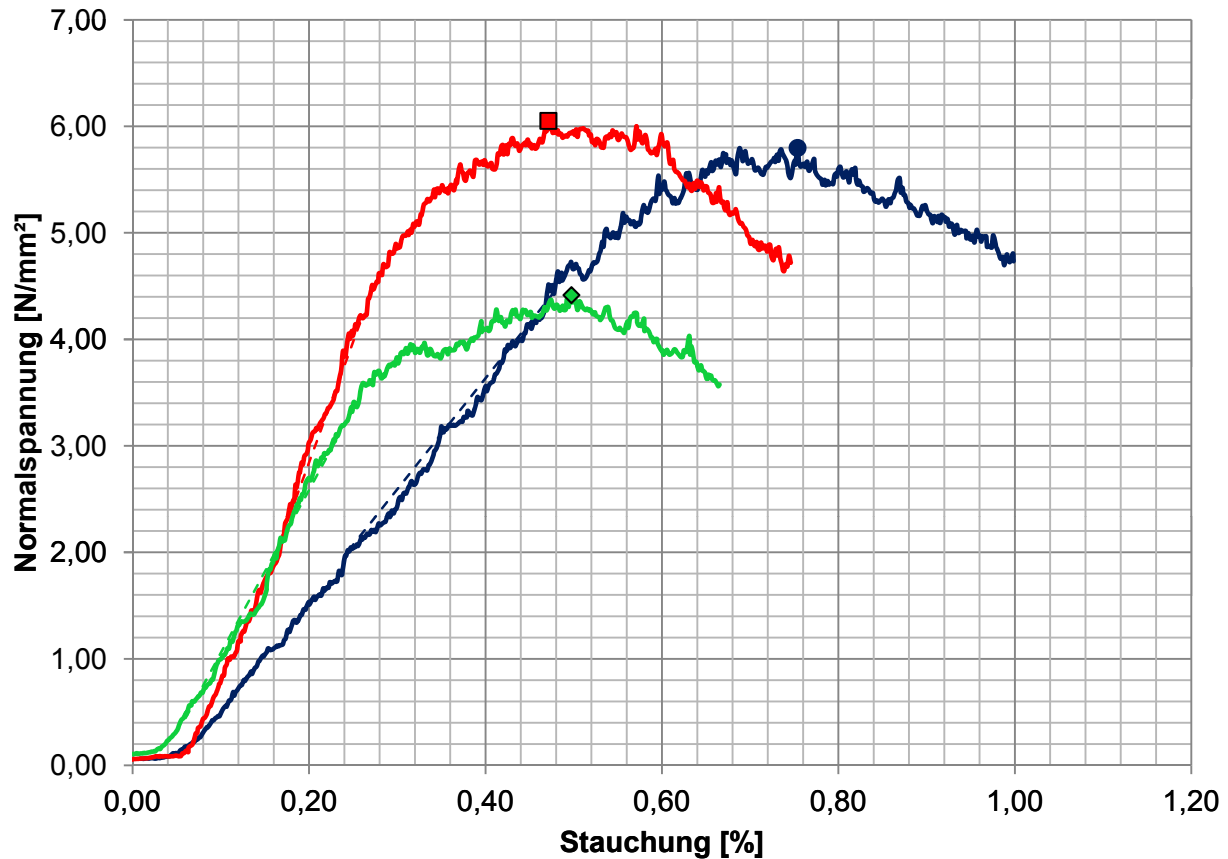
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	4,291	2,778	4,710
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,401	0,222	0,606
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 726,25	1 874,52	1 059,48

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_1_8**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	22.07.2013
Bodenart	Mischung 1	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

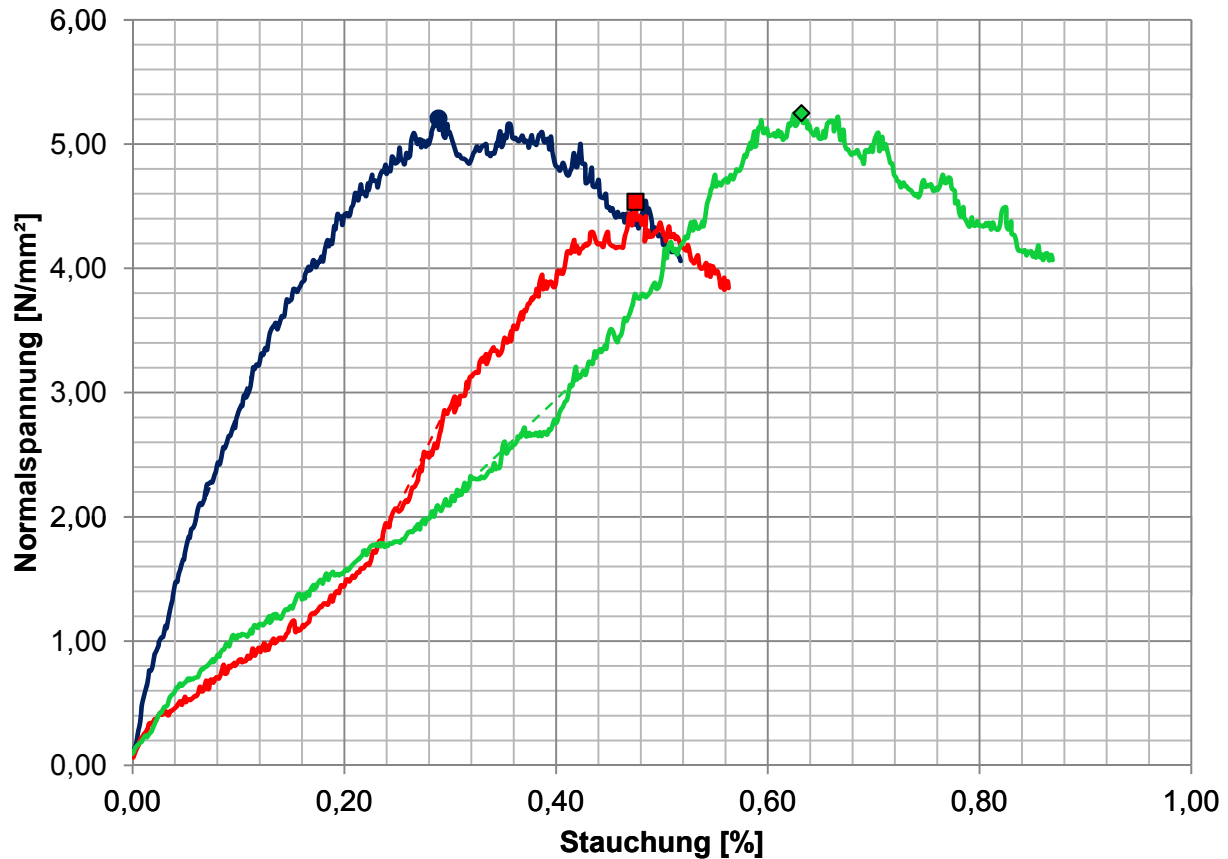
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	5,798	6,052	4,416
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,754	0,471	0,497
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 042,27	2 265,89	1 529,47

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_1_9**

<i>Probenalter</i>	28 Tage	<i>Prüfdatum</i>	25.07.2013
<i>Bodenart</i>	sandiger Kies	<i>W/Z-Gehalt</i>	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

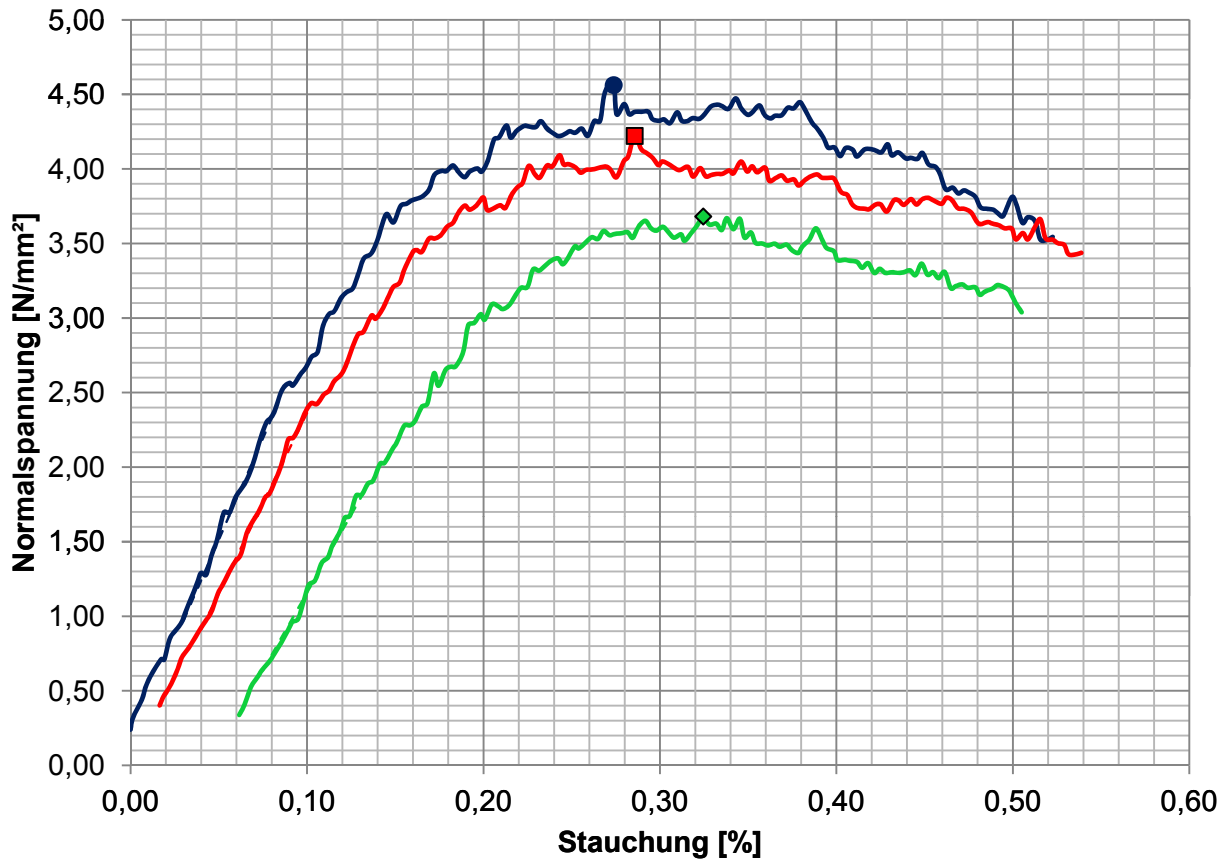
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	5,207	4,536	5,250
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,289	0,475	0,632
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	2 293,45	1 753,54	807,49

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_2_1**

Probenalter	7 Tage	Prüfdatum	07.06.2013
Bodenart	Kies 2,0 - 3,15 mm	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

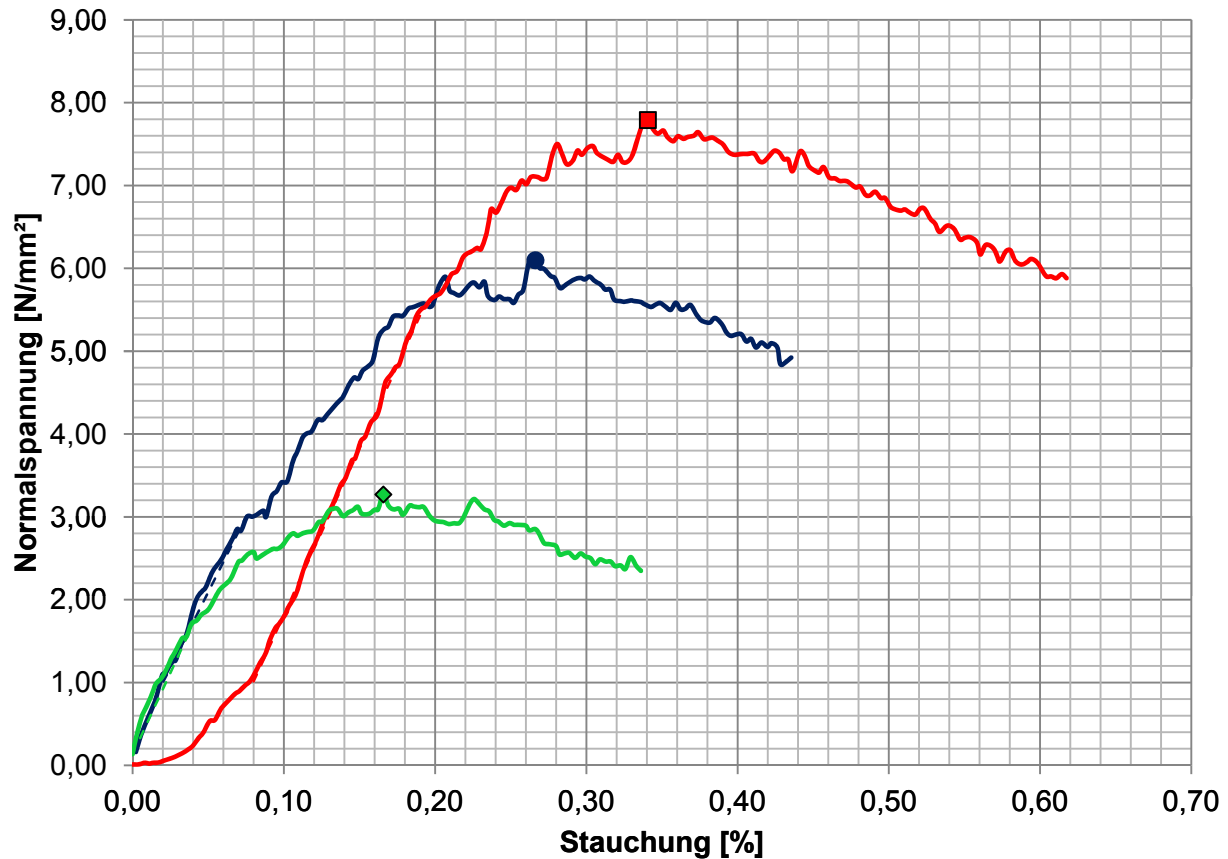
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	4,562	4,222	3,682
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,274	0,286	0,324
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	2 719,29	2 419,56	2 086,46

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_3_3_1**

Probenalter	56 Tage	Prüfdatum	05.09.2013
Bodenart	Kies 2,0 - 3,15 mm	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

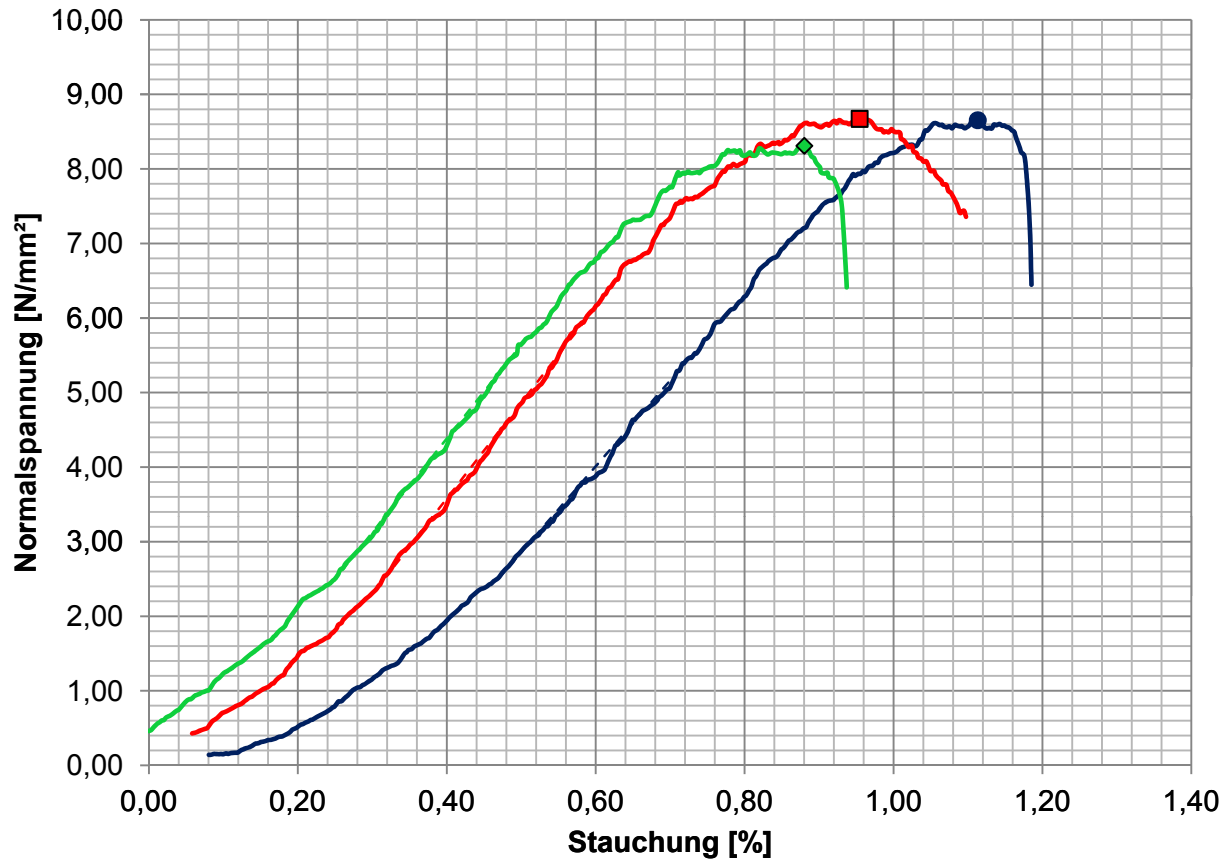
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	6,098	7,791	3,271
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,266	0,341	0,166
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	3 642,91	4 014,15	3 947,58

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_4_1_1**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	28.05.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

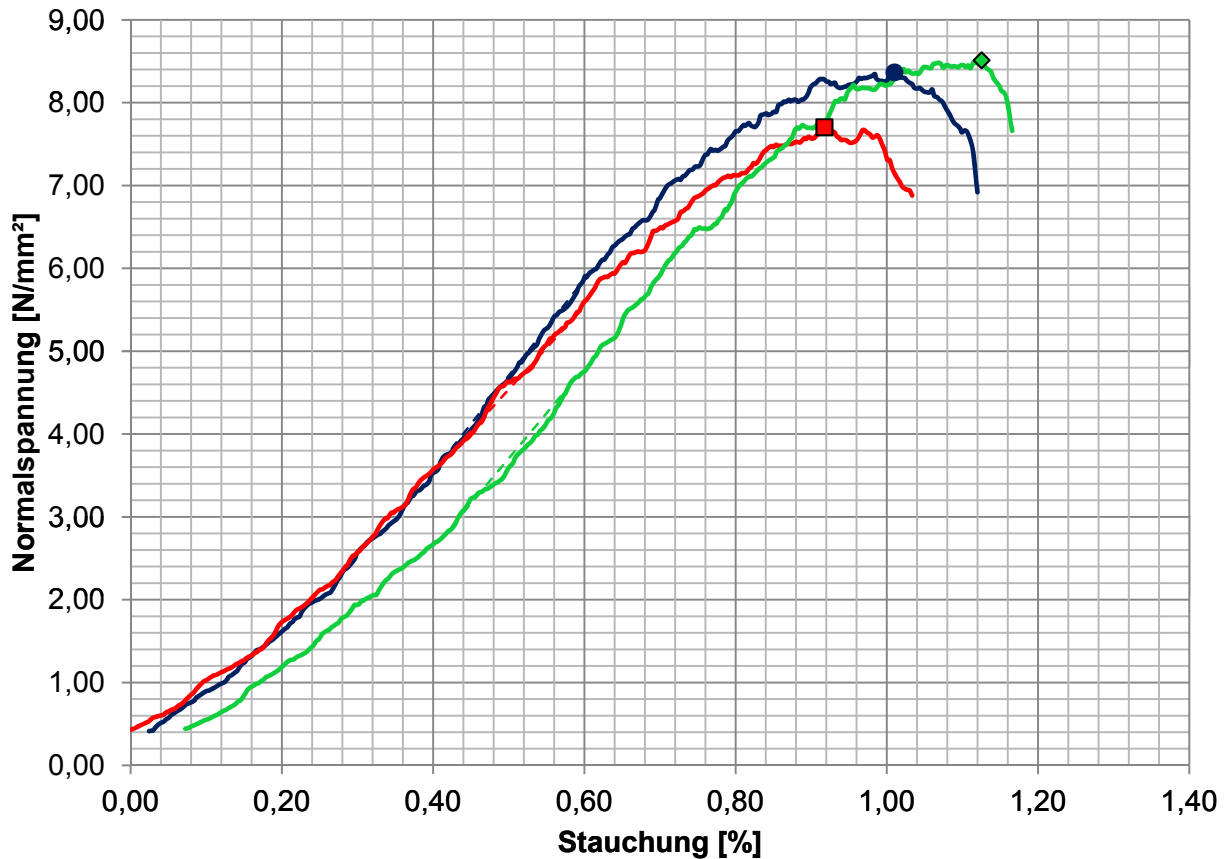
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	8,655	8,673	8,311
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	1,113	0,954	0,880
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 151,60	1 285,61	1 259,17

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_4_1_2**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	28.05.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	1,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

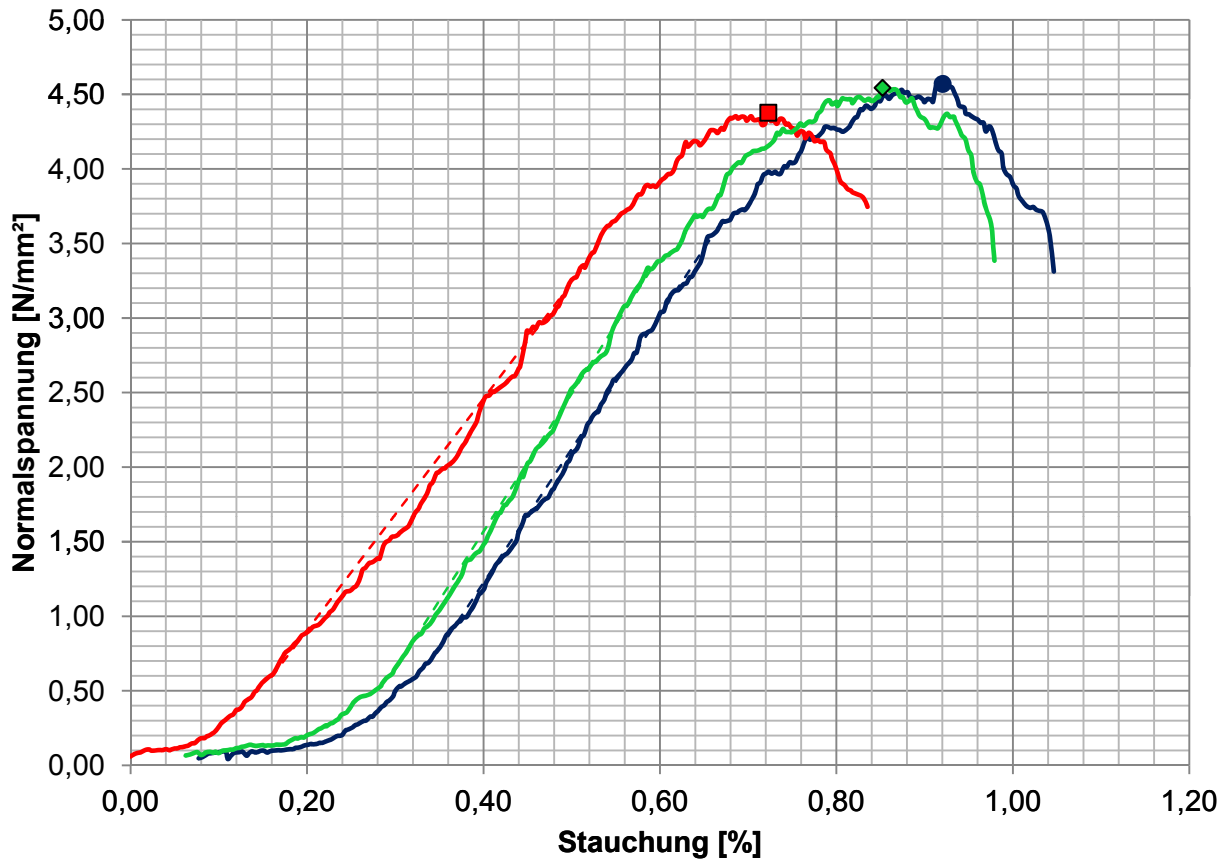
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	8,367	7,704	8,512
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	1,010	0,917	1,125
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 164,08	1 001,56	1 090,23

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_4_2_1**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	24.10.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	1,2



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

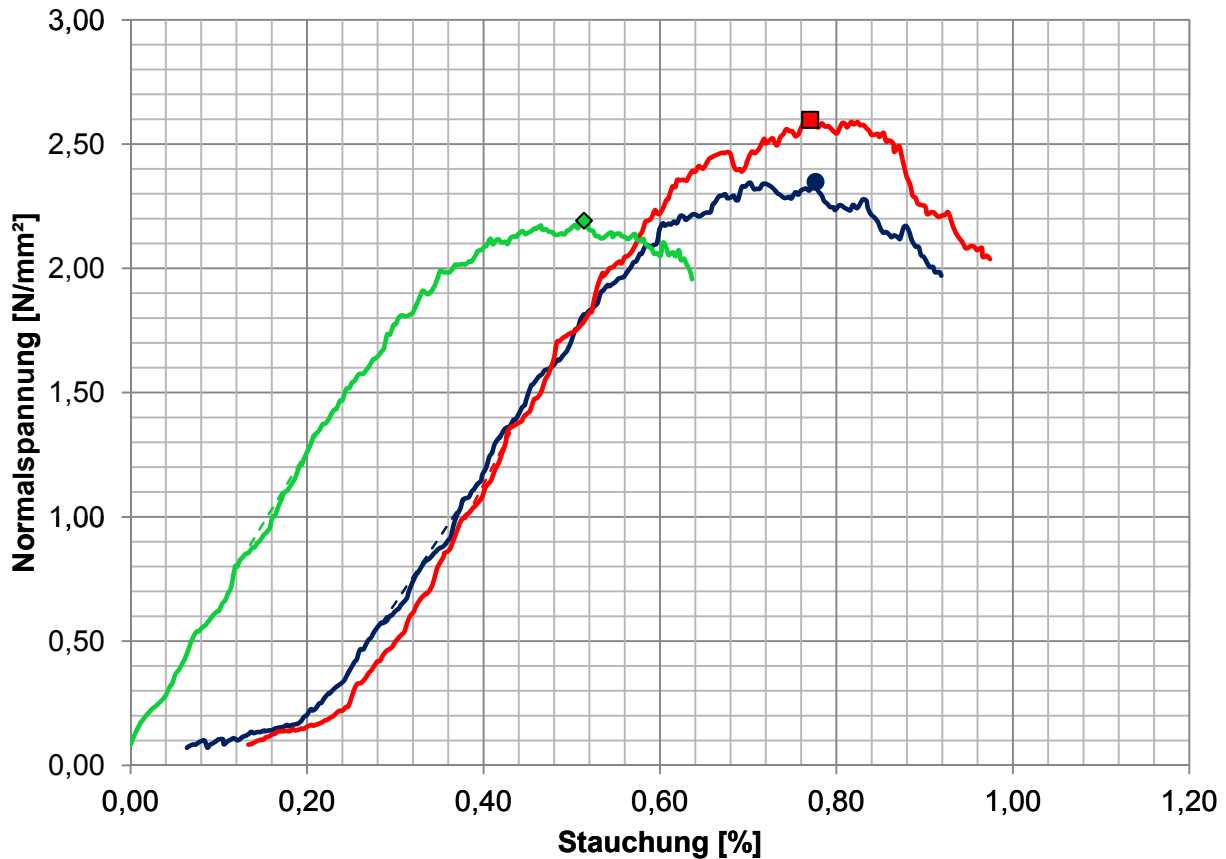
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	4,571	4,378	4,544
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,920	0,723	0,852
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	897,40	777,33	925,77

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_4_2_2**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	24.10.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	1,5



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

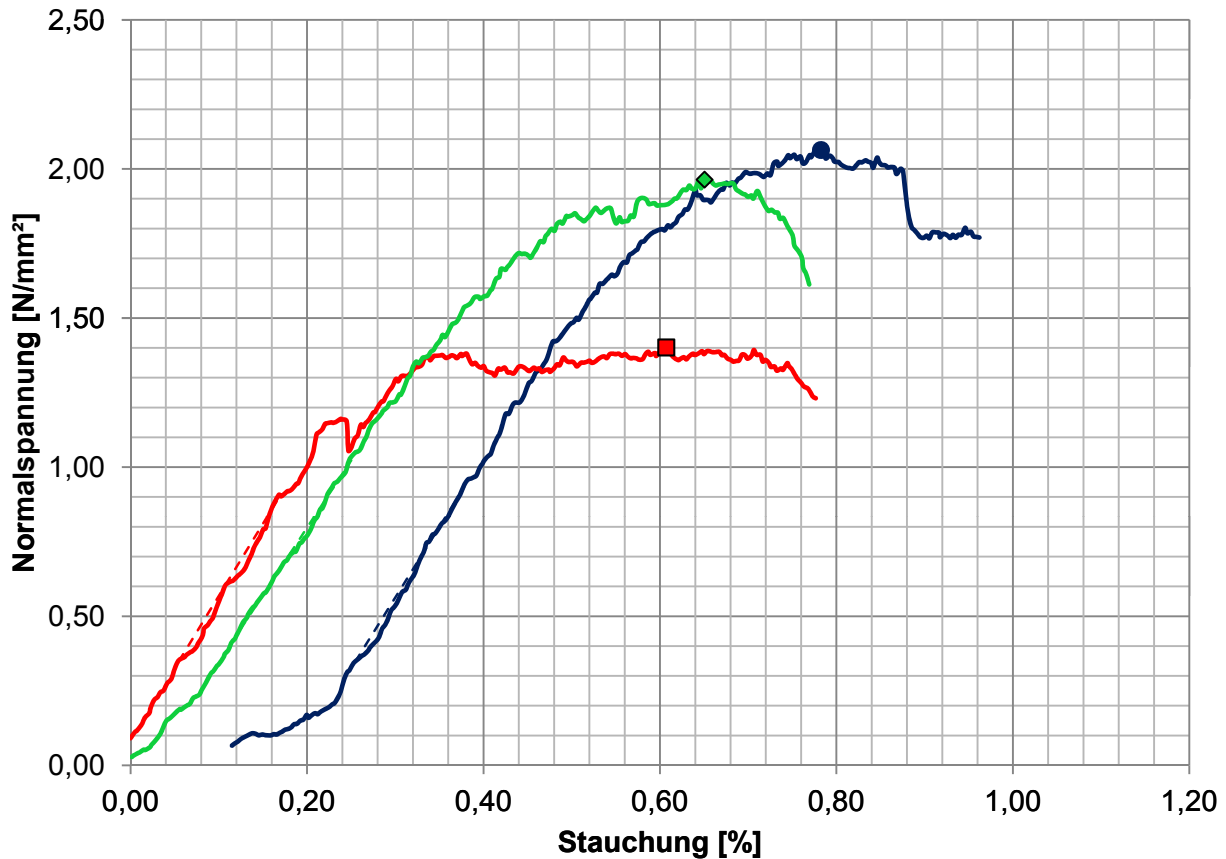
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	2,348	2,598	2,192
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,776	0,770	0,514
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	527,57	687,96	586,14

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_4_2_3**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	29.10.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	2,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

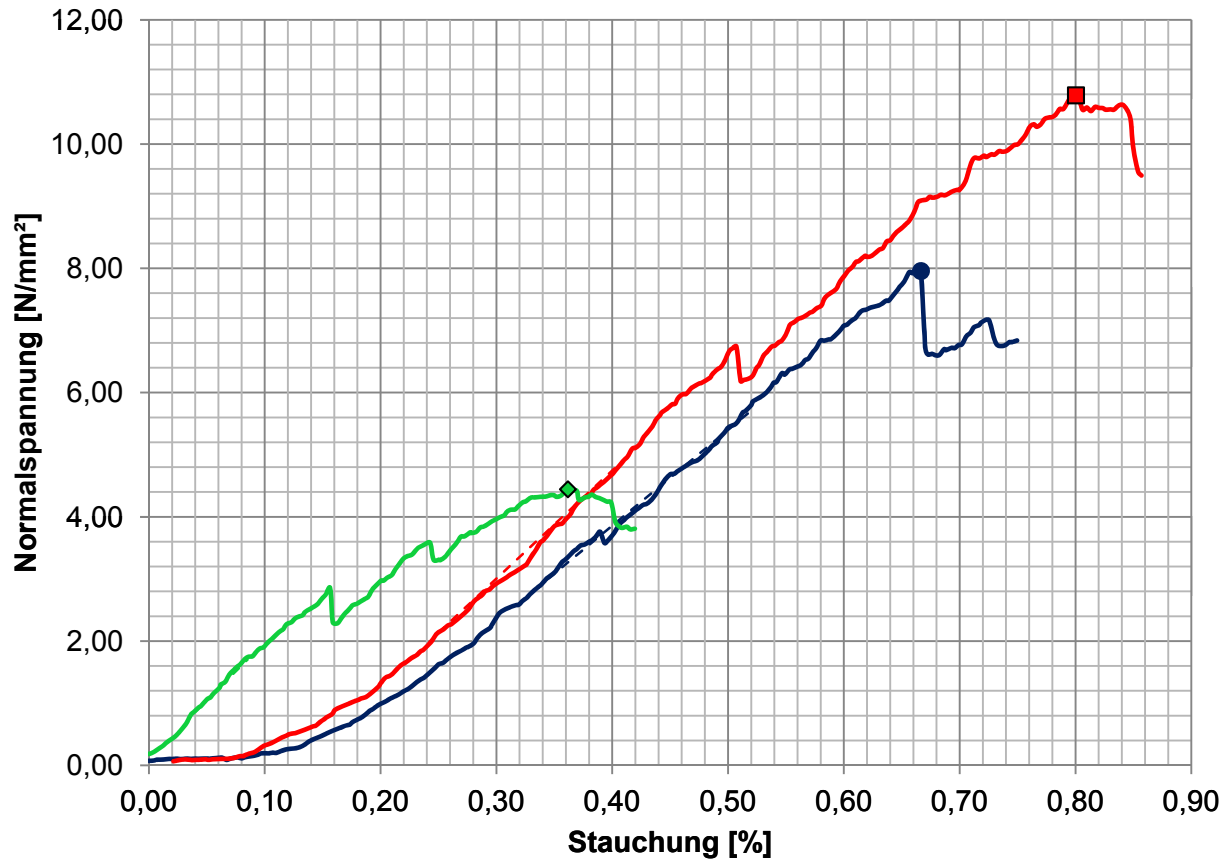
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	2,064	1,402	1,964
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,782	0,607	0,650
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	474,04	483,82	451,15

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_4_2_4**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	29.10.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	0,8



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

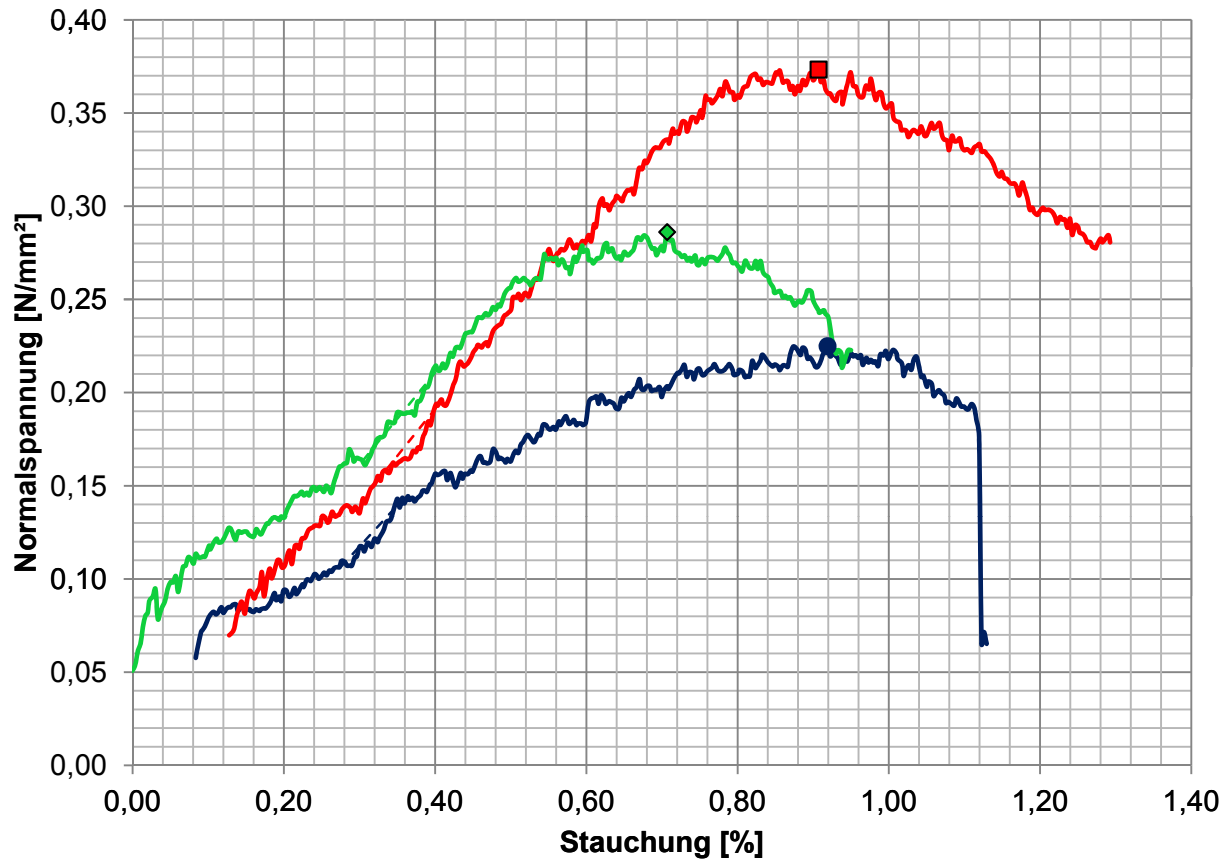
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	7,957	10,786	4,444
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,666	0,800	0,362
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 544,09	1 740,27	1 860,02

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_4_3_1**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	05.11.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	3,0



— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

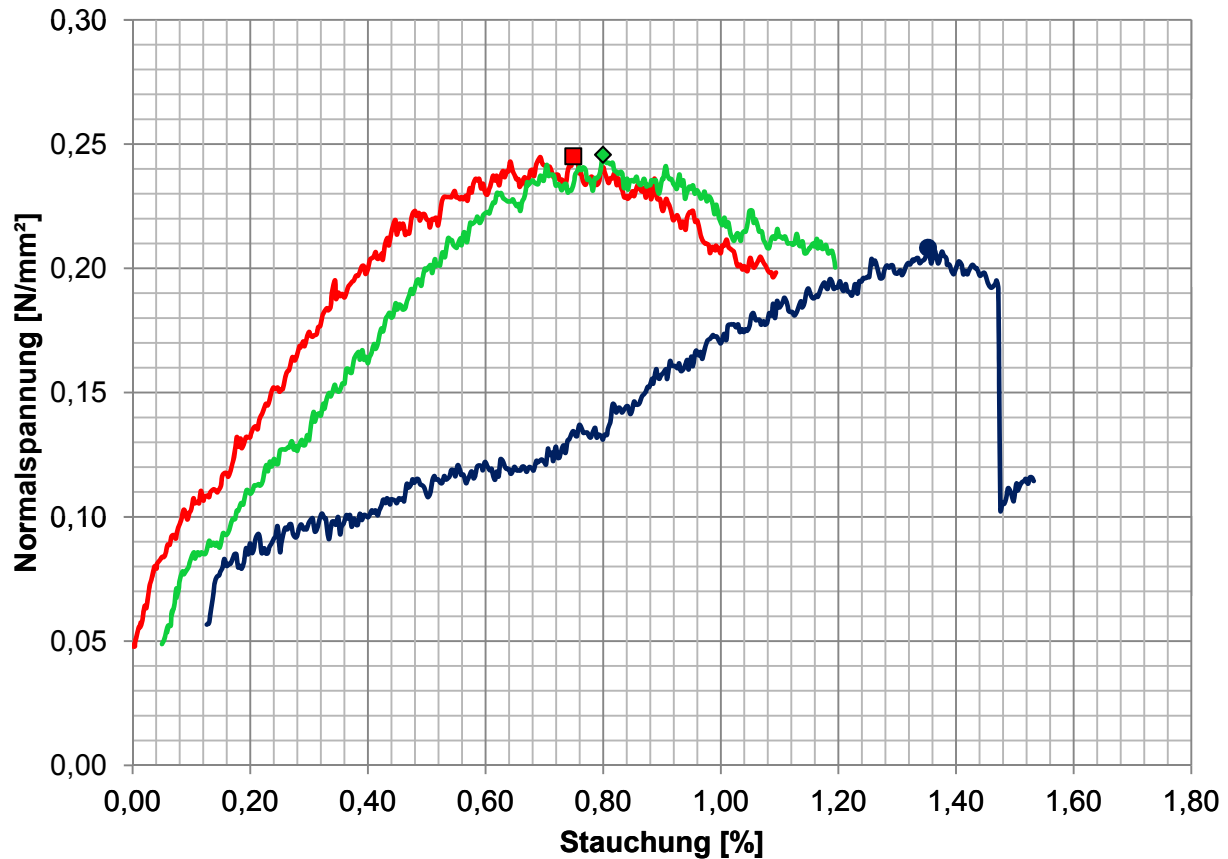
			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	0,225	0,373	0,286
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,919	0,907	0,707
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	44,09	50,43	49,34

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer: **580_4_3_2**

Probenalter	28 Tage	Prüfdatum	05.11.2013
Bodenart	-	W/Z-Gehalt	3,0



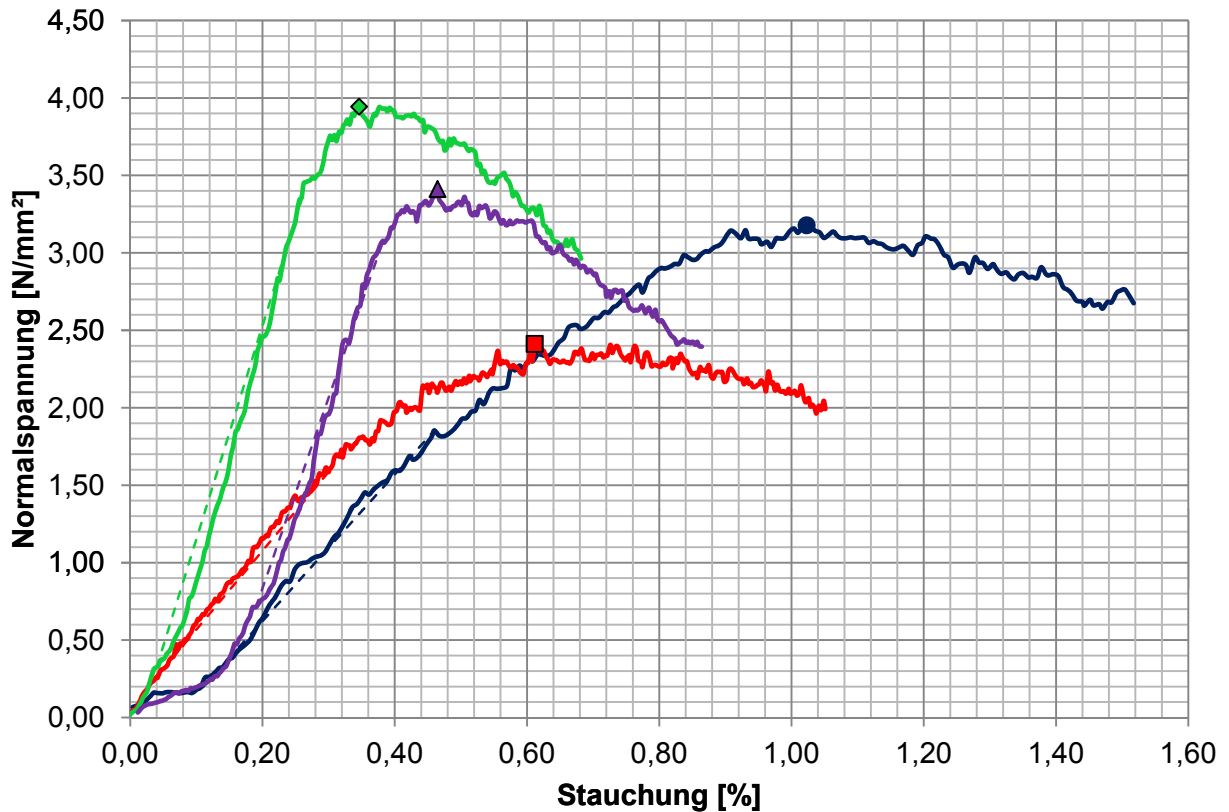
— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3

			DV 1	DV 2	DV 3
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	0,208	0,245	0,246
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	1,352	0,749	0,800
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	167,66	80,37	86,77

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer:	580_5_1_1	Prüfdatum 1 + 2	10.12.2013
Probenalter	28 Tage	Prüfdatum 3 + 4	17.12.2013
Bodenart	Sand 1,4 - 2,2 mm	W/Z-Gehalt	1,2



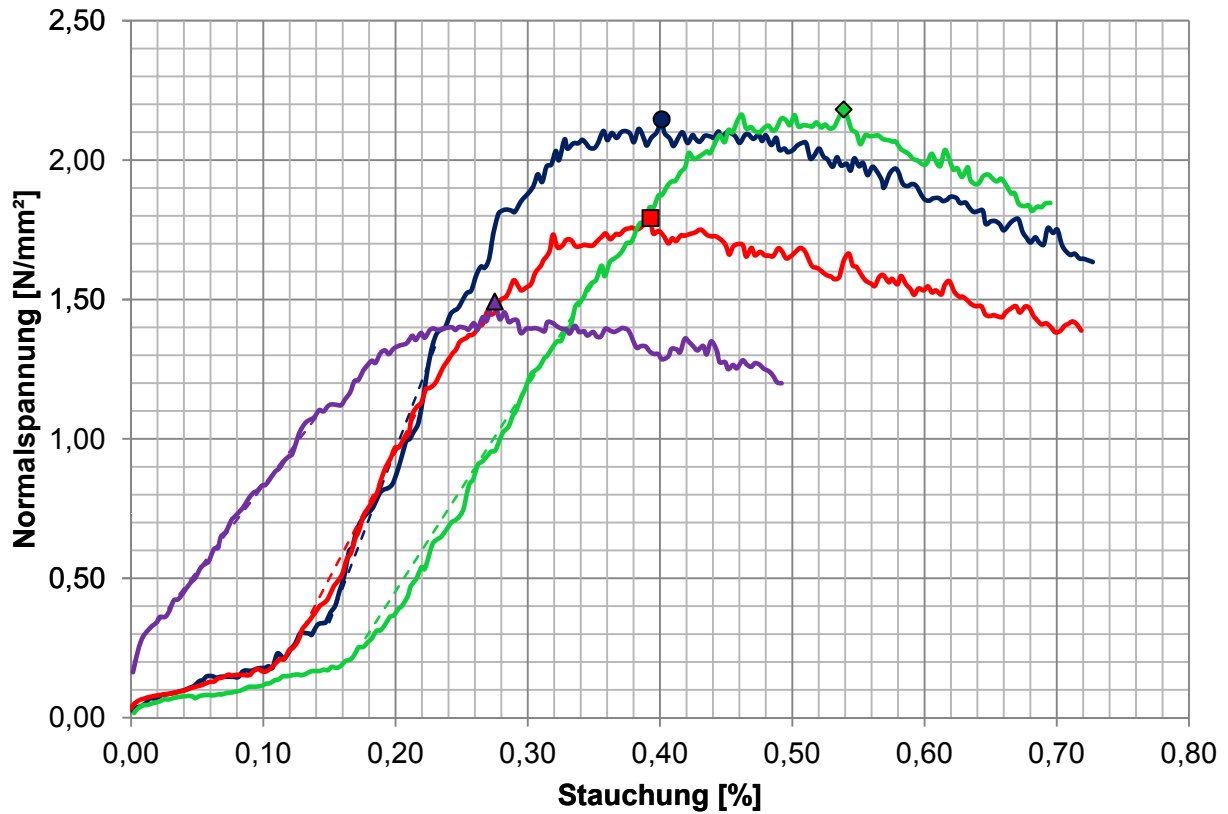
— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3
— DV 4	- - - E-Modul DV 4	▲ Bruchpunkt DV 4

			DV 1	DV 2	DV 3	DV 4
Einaxiale Druckfestigkeit	q _u	[N/mm ²]	3,179	2,413	3,944	3,413
Bruchstauchung	ε _{Bruch}	[%]	1,023	0,611	0,346	0,465
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	473,65	508,97	1 378,03	1 229,74

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer:	580_5_1_2	Prüfdatum 1 + 2	11.12.2013
Probenalter	28 Tage	Prüfdatum 3 + 4	18.12.2013
Bodenart	Sand 1,4 - 2,2 mm	W/Z-Gehalt	1,5



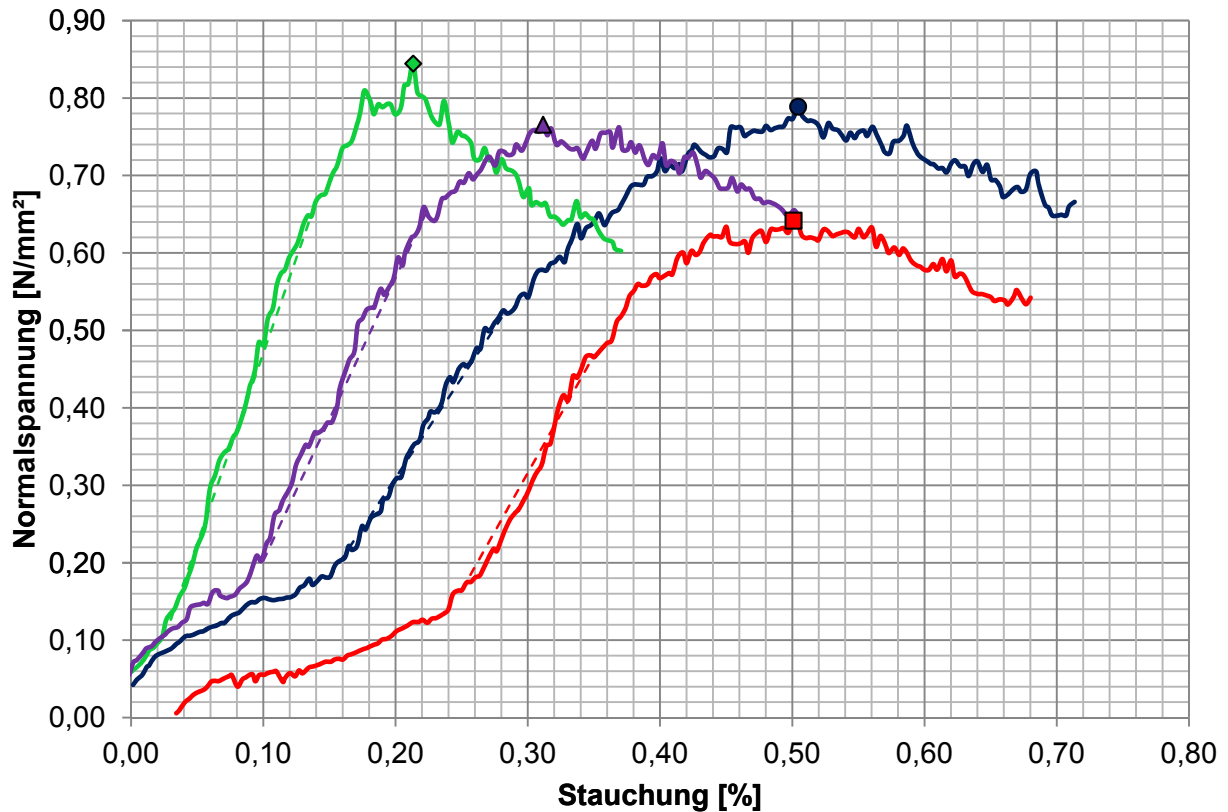
— DV 1	- - - E-Modul DV 1	● Bruchpunkt DV 1
— DV 2	- - - E-Modul DV 2	■ Bruchpunkt DV 2
— DV 3	- - - E-Modul DV 3	◆ Bruchpunkt DV 3
— DV 4	- - - E-Modul DV 4	▲ Bruchpunkt DV 4

			DV 1	DV 2	DV 3	DV 4
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	2,146	1,792	2,182	1,493
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,401	0,393	0,539	0,275
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	1 237,80	903,42	738,42	613,66

EINAXIALER DRUCKVERSUCH

28 Tage nach Probenherstellung
nach ÖNORM B 4415

Probennummer:	580_5_1_3	Prüfdatum 1 + 2	12.12.2013
Probenalter	28 Tage	Prüfdatum 3 + 4	19.12.2013
Bodenart	Sand 1,4 - 2,2 mm	W/Z-Gehalt	2,0



- | | | |
|--------|--------------------|-------------------|
| — DV 1 | - - - E-Modul DV 1 | ● Bruchpunkt DV 1 |
| — DV 2 | - - - E-Modul DV 2 | ■ Bruchpunkt DV 2 |
| — DV 3 | - - - E-Modul DV 3 | ◆ Bruchpunkt DV 3 |
| — DV 4 | - - - E-Modul DV 4 | ▲ Bruchpunkt DV 4 |

			DV 1	DV 2	DV 3	DV 4
Einaxiale Druckfestigkeit	q_u	[N/mm ²]	0,789	0,642	0,845	0,766
Bruchstauchung	ϵ_{Bruch}	[%]	0,504	0,501	0,213	0,312
Elastizitätsmodul	E	[N/mm ²]	257,85	303,54	491,16	365,25

Anhang E.

Prüfprotokolle: Ermittlung des Glühverlustes

CEM I 52,5R + 2% Bentonit		Lab.Nr.: 580_1_1_2		
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum: 17.01.2013		
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	44,0754	40,1468	36,2702	17,2894
m' [g] =	15,1316	14,8736	13,3205	6,3906
Temperatur [°] =	22,0	22,5	23,5	28,5
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9978	0,9977	0,9974	0,9961
Volumen [cm ³] =	29,0084	25,3325	23,0090	10,9415
ρ_f [g/cm ³] =	1,52	1,58	1,58	1,58
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	149,6022	143,9477	162,8624	36,5436
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	130,9000	127,7367	148,1097	29,5973
Tara [g] =	105,5379	103,8072	126,5529	19,3046
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	130,9000	127,7367	148,1097	29,5973
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	126,8400	123,7125	144,2072	27,7727
Tara [g] =	105,5379	103,8072	126,5529	19,3046
V_d [cm ³] =	27,9728	26,3927	23,7758	11,3522
m_w^{geb} [g] =	4,06	4,02	3,90	1,82
V_{gl} [%] =	16,01	16,82	18,10	17,73
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28			
m_{ganz} [g] =	128,430			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	232,270			
Tara [g] =	106,342			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	179,5200			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	179,5200			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	167,7800			
V_{gl} [%] =	16,04			

CEM I 52,5 R + 3 Teile Normsand		Lab.Nr.:	580_1_2_2	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	15.01.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	85,2538	54,2045	42,7010	23,3004
m' [g] =	44,3007	28,9474	23,0200	12,3139
Temperatur [°] =	21,5	22,5	21,5	28,5
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9979	0,9977	0,9979	0,9961
Volumen [cm ³] =	41,0399	25,3164	19,7227	11,0296
ρ_f [g/cm ³] =	2,08	2,14	2,17	2,11
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	192,3048	161,4841	173,5540	43,2314
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	185,6100	157,2546	169,9468	41,2967
Tara [g] =	107,1109	107,2702	130,8030	19,9500
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	185,6100	157,2546	169,9468	41,2967
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	182,9300	155,2474	168,3191	40,3208
Tara [g] =	107,1109	107,2702	130,8030	19,9500
V_d [cm ³] =	43,0533	27,4142	21,4687	11,7077
m_w^{geb} [g] =	2,68	2,01	1,63	0,98
V_{gl} [%] =	3,41	4,02	4,16	4,57
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28			
m_{ganz} [g] =	201,8910			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	323,5400			
Tara [g] =	119,6509			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	308,0100			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	308,0100			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	301,3300			
V_{gl} [%] =	3,55			

CEM I 52,5R + 2 Teile Normsand		Lab.Nr.:	580_2_2_1	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	07.02.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	64,2308	35,9418	19,4957	18,9850
m' [g] =	34,8545	19,5169	10,4931	10,3154
Temperatur [°] =	21,0	27,0	23,5	27,0
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9980	0,9965	0,9974	0,9965
Volumen [cm ³] =	29,4353	16,4823	9,0259	8,6999
ρ_f [g/cm ³] =	2,18	2,18	2,16	2,18
m_f + Tara [g] =	184,8300	133,2684	141,2821	39,4926
m_d + Tara [g] =	178,1000	129,4866	139,2044	37,7194
Tara [g] =	120,6000	97,3171	121,7852	20,5393
m^{105° + Tara [g] =	178,1000	129,4866	139,2044	37,7194
m^{1000° + Tara [g] =	174,8700	127,5911	138,0929	36,5600
Tara [g] =	120,6000	97,3171	121,7852	20,5393
V_d [cm ³] =	29,4374	16,4693	8,9178	8,7954
m_w^{geb} [g] =	3,23	1,90	1,11	1,16
V_{gl} [%] =	5,62	5,89	6,38	6,75
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28			
m_{ganz} [g] =	56,4900			
m_{zerkl} + Tara [g] =	185,4700			
Tara [g] =	126,2000			
m_d + Tara [g] =	179,7900			
m^{105° + Tara [g] =	179,7900			
m^{1000° + Tara [g] =	176,3900			
V_{gl} [%] =	6,34			

Versuchsreihe 4 Teile Normsand		Lab.Nr.:	580_2_3_1	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	07.02.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	69,3060	60,6486	55,0838	18,2112
m' [g] =	36,7434	32,2141	29,3244	9,7124
Temperatur [°] =	21,0	27,0	23,5	27,0
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9980	0,9965	0,9974	0,9965
Volumen [cm ³] =	32,6280	28,5339	25,8260	8,5285
ρ_f [g/cm ³] =	2,12	2,13	2,13	2,14
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	183,8112	141,7388	169,2588	35,5196
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	178,8900	135,9339	164,1801	33,9277
Tara [g] =	114,5088	80,8781	114,5134	17,3864
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	178,8900	135,9339	164,1801	33,9277
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	176,1600	133,5746	161,8846	33,1793
Tara [g] =	114,5088	80,8781	114,5134	17,3864
V_d [cm ³] =	32,4061	27,7122	24,9996	8,3260
m_w^{geb} [g] =	2,73	2,36	2,30	0,75
V_{gl} [%] =	4,24	4,29	4,62	4,52
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28			
m_{ganz} [g] =	82,2900			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	189,3800			
Tara [g] =	105,5000			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	183,6100			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	183,6100			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	180,1900			
V_{gl} [%] =	4,38			

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_3_1_2	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	02.05.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	39,4678	35,1695	11,8031	66,2066
m' [g] =	21,2430	19,0132	5,9318	36,2344
Temperatur [°] =	23,5	22,0	28,5	22,3
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9974	0,9978	0,9961	0,9977
Volumen [cm ³] =	18,2719	16,1924	5,8943	30,0411
ρ_f [g/cm ³] =	2,16	2,17	2,00	2,20
m_f + Tara [g] =	157,8336	124,1119	30,9016	127,3979
m_d + Tara [g] =	152,6421	119,5089	29,3242	119,7217
Tara [g] =	118,3555	88,9304	19,8614	61,1488
m^{105° + Tara [g] =	152,6421	119,5089	29,3242	79,7601
m^{1000° + Tara [g] =	151,5876	118,6313	29,0219	78,3560
Tara [g] =	118,3555	88,9304	19,8614	31,7874
V_d [cm ³] =	17,5411	15,6441	4,8412	24,5430
m_w^{geb}/V =	0,0601	0,0561	0,0624	0,0572
m_w^{geb} [g] =	1,05	0,88	0,30	1,40
V_{gl} [%] =	3,08	2,87	3,19	2,93
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Korngruppe: Kies 3,15 - 5,6 mm		
m_{ganz} [g] =	44,9662			
m_{zerkl} + Tara [g] =	177,3534			
Tara [g] =	130,9440			
m_d + Tara [g] =	171,8704			
m^{105° + Tara [g] =	171,8704			
m^{1000° + Tara [g] =	170,4032			
V_{gl} [%] =	3,58			
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_3_1_2a	580_3_1_2b	580_3_1_2c	
Tara [g] =	118,5000	124,3000	90,3000	
m_d + Tara [g] =	224,7900	178,6943	163,0916	
m^{1000° + Tara [g] =	221,7900	177,1803	161,2592	
V_d [cm ³] =	53,5759	27,8809	37,7342	
m_w^{geb} [g] =	3,00	1,51	1,83	
V_{gl} [%] =	2,82	2,78	2,52	
m_w^{geb}/V =	0,056	0,054	0,049	

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_3_1_3	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	23.05.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	26,5322	15,4758	14,3583	17,9081
m' [g] =	12,1705	8,4357	7,8449	9,7557
Temperatur [°] =	22,5	25,7	27,0	22,0
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9977	0,9969	0,9965	0,9978
Volumen [cm ³] =	14,3954	7,0622	6,5362	8,1706
ρ_f [g/cm ³] =	1,84	2,19	2,20	2,19
m_f + Tara [g] =	120,3044	47,2482	33,5866	47,7525
m_d + Tara [g] =	117,1220	45,3297	31,9476	45,6256
Tara [g] =	93,9473	31,7653	19,3082	29,9137
m^{105° + Tara [g] =	117,1220	45,3297	31,9476	45,6256
m^{1000° + Tara [g] =	116,4507	44,9498	31,5802	45,1763
Tara [g] =	93,9473	31,7653	19,3082	29,9137
V_d [cm ³] =	12,1000	7,0822	6,5993	8,2035
m_w^{geb}/V =	0,0555	0,0536	0,0557	0,0548
m_w^{geb} [g] =	0,67	0,38	0,37	0,45
V_{gl} [%] =	2,90	2,80	2,91	2,86
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Korngruppe: Kies 2,0 - 3,15 mm		
m_{ganz} + Tara [g] =	112,2334			
m_{zerkl} + Tara [g] =	112,3378			
Tara [g] =	88,9381			
m_d + Tara [g] =	109,5816			
m^{105° + Tara [g] =	109,5816			
m^{1000° + Tara [g] =	108,9501			
V_{gl} [%] =	3,06			
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_3_1_3a	580_3_1_3b	580_3_1_3c	
Tara [g] =	93,0810	97,7654	85,3683	
m_d + Tara [g] =	168,1614	183,6133	166,1621	
m^{1000° + Tara [g] =	166,2251	181,2285	164,0912	
V_d [cm ³] =	38,9322	44,6252	42,6673	
m_w^{geb} [g] =	1,94	2,38	2,07	
V_{gl} [%] =	2,58	2,78	2,56	
m_w^{geb}/V =	0,050	0,053	0,049	

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_3_1_4	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	09.05.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	36,3357	30,6840	20,1250	78,7643
m' [g] =	19,9438	16,5100	11,1298	42,8327
Temperatur [°] =	27,5	22,0	28,5	22,5
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9964	0,9978	0,9961	0,9977
Volumen [cm ³] =	16,4515	14,2056	9,0305	36,0159
ρ_f [g/cm ³] =	2,21	2,16	2,23	2,19
m_f + Tara [g] =	154,4668	124,4841	41,4401	176,2389
m_d + Tara [g] =	150,2581	120,4222	39,1021	166,1753
Tara [g] =	118,1858	92,8109	21,1717	97,3936
m^{105° + Tara [g] =	150,2581	120,4222	39,1021	166,1753
m^{1000° + Tara [g] =	149,3148	119,4399	38,5570	163,9720
Tara [g] =	118,1858	92,8109	21,1717	97,3936
V_d [cm ³] =	16,7775	14,4439	9,3796	35,9807
m_w^{geb}/V =	0,0562	0,0680	0,0581	0,0612
m_w^{geb} [g] =	0,94	0,98	0,55	2,20
V_{gl} [%] =	2,94	3,56	3,04	3,20
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Korngruppe: Kies 5,0 - 8,0 mm		
m_{ganz} [g] =	129,9799			
m_{zerkl} + Tara [g] =	243,6200			
Tara [g] =	114,5126			
m_d + Tara [g] =	228,5700			
m^{105° + Tara [g] =	228,5700			
m^{1000° + Tara [g] =	225,0700			
V_{gl} [%] =	3,07			
Glühverlust 28 Tage/Probe:				
	580_3_1_4a	580_3_1_4b	580_3_1_4c	
Tara [g] =	107,3114	124,2733	105,8740	
m_d + Tara [g] =	160,5567	165,2821	165,4931	
m^{1000° + Tara [g] =	158,9588	164,0455	163,9484	
V_d [cm ³] =	27,3833	21,6238	31,4783	
m_w^{geb} [g] =	1,60	1,24	1,54	
V_{gl} [%] =	3,00	3,02	2,59	
m_w^{geb}/V =	0,058	0,057	0,049	

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_3_1_5	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	20.06.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	27,1287	21,4783	13,7984	37,8073
m' [g] =	14,6583	11,5879	7,3837	20,4376
Temperatur [°] =	27,0	27,0	23,8	20,8
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9965	0,9965	0,9973	0,9980
Volumen [cm ³] =	12,5140	9,9250	6,4318	17,4038
ρ_f [g/cm ³] =	2,17	2,16	2,15	2,17
m_f + Tara [g] =	121,0982	52,4713	33,1177	69,6375
m_d + Tara [g] =	117,5791	49,6300	31,2750	64,6382
Tara [g] =	93,9598	31,0101	19,3081	31,7920
m^{105° + Tara [g] =	117,5791	49,6300	31,2750	64,6382
m^{1000° + Tara [g] =	116,7475	48,9086	30,8496	63,5726
Tara [g] =	93,9598	31,0101	19,3081	31,7920
V_d [cm ³] =	12,4454	9,8111	6,3055	17,3071
m_w^{geb}/V =	0,0668	0,0735	0,0675	3,7348
m_w^{geb} [g] =	0,83	0,72	0,43	64,64
V_{gl} [%] =	3,52	3,87	3,55	3,24
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Korngruppe: Kies 5,0 - 8,0 mm		
m_{ganz} + Tara [g] =	114,0564			
m_{zerkl} + Tara [g] =	114,1613			
Tara [g] =	85,3658			
m_d + Tara [g] =	110,3702			
m^{105° + Tara [g] =	110,3702			
m^{1000° + Tara [g] =	109,3359			
V_{gl} [%] =	4,14			
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_3_1_5a	580_3_1_5b	580_3_1_5c	
Tara [g] =	97,4133	80,5816	88,9523	
m_d + Tara [g] =	159,1712	155,3229	138,5788	
m^{1000° + Tara [g] =	157,3951	153,1632	137,0876	
V_d [cm ³] =	32,0828	39,4534	26,4797	
m_w^{geb} [g] =	1,78	2,16	1,49	
V_{gl} [%] =	2,88	2,89	3,00	
m_w^{geb}/V =	0,055	0,055	0,056	

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.: 580_3_1_7		
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum: 24.07.2013		
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	13,1736	23,8158	14,7207	
m' [g] =	7,1275	13,2552	8,2565	
Temperatur [°] =	26,0	27,0	22,0	
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9968	0,9965	0,9978	
Volumen [cm ³] =	6,0656	10,5975	6,4786	
ρ_f [g/cm ³] =	2,17	2,25	2,27	
m_f + Tara [g] =	33,2113	43,5356	33,9718	
m_d + Tara [g] =	31,5530	40,8969	32,4378	
Tara [g] =	20,0632	19,7154	19,5243	
m^{105° + Tara [g] =	31,5530	40,8969	32,4378	
m^{1000° + Tara [g] =	28,2340	36,1179	28,7209	
Tara [g] =	20,0632	19,7154	19,5243	
V_d [cm ³] =	5,8098	10,7103	6,5297	0,0000
m_w^{geb}/V =	0,5713	0,4462	0,5692	#DIV/0!
m_w^{geb} [g] =	3,32	4,78	3,72	
V_{gl} [%] =	28,89	22,56	28,78	
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Korngruppe: Grob- und Dachriesel		
m_{ganz} [g] =	14,0254			
m_{zerkl} + Tara [g] =	45,9827			
Tara [g] =	31,7701			
m_d + Tara [g] =	44,4567			
m^{105° + Tara [g] =	44,4567			
m^{1000° + Tara [g] =	41,5527			
V_{gl} [%] =	22,89			
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_3_1_7a	580_3_1_7b	580_3_1_7c	
Tara [g] =	119,6600	111,6800	108,8400	
m_d + Tara [g] =	245,8500	204,5100	231,3000	
m^{1000° + Tara [g] =	216,8500	183,1800	203,1500	
V_d [cm ³] =	63,2994	47,0539	62,2692	
m_w^{geb} [g] =	29,00	21,33	28,15	
V_{gl} [%] =	22,98	22,98	22,99	
m_w^{geb}/V =	0,458	0,453	0,452	

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.: 580_3_1_8		
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum: 22.07.2013		
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	10,8315	14,3192	16,6642	
m' [g] =	5,9017	7,8062	9,1775	
Temperatur [°] =	27,5	27,0	22,0	
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9964	0,9965	0,9978	
Volumen [cm ³] =	4,9477	6,5358	7,5034	
ρ_f [g/cm ³] =	2,19	2,19	2,22	
m_f + Tara [g] =	41,6825	33,0099	36,4550	
m_d + Tara [g] =	40,5884	31,5134	34,6710	
Tara [g] =	31,0101	18,7201	19,7776	
m^{105° + Tara [g] =	40,5884	31,5134	34,6710	
m^{1000° + Tara [g] =	40,3589	31,1883	34,3138	
Tara [g] =	31,0101	18,7201	19,7776	
V_d [cm ³] =	4,9067	6,5536	7,6295	0,0000
m_w^{geb}/V =	0,0468	0,0496	0,0468	#DIV/0!
m_w^{geb} [g] =	0,23	0,33	0,36	
V_{gl} [%] =	2,40	2,54	2,40	
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Korngruppe: Mischung 1		
m_{ganz} [g] =	22,5878			
m_{zerkl} + Tara [g] =	52,3152			
Tara [g] =	29,8885			
m_d + Tara [g] =	50,0227			
m^{105° + Tara [g] =	50,0227			
m^{1000° + Tara [g] =	49,4570			
V_{gl} [%] =	2,81			
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_3_1_8a	580_3_1_8b	580_3_1_8c	
Tara [g] =	111,7000	119,6000	108,8000	
m_d + Tara [g] =	172,7000	182,4000	240,0000	
m^{1000° + Tara [g] =	170,3900	180,3900	236,0900	
V_d [cm ³] =	31,0333	31,9809	68,0860	
m_w^{geb} [g] =	2,31	2,01	3,91	
V_{gl} [%] =	3,79	3,20	2,98	
m_w^{geb}/V =	0,074	0,063	0,057	

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.: 580_3_1_9		
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum: 25.07.2013		
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	12,2361	18,3093	20,0941	
m' [g] =	6,8528	10,0103	11,0666	
Temperatur [°] =	26,7	27,0	22,0	
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9966	0,9965	0,9978	
Volumen [cm ³] =	5,4017	8,3280	9,0476	
ρ_f [g/cm ³] =	2,27	2,20	2,22	
m_f + Tara [g] =	32,7987	38,1494	40,1709	
m_d + Tara [g] =	31,5352	36,0118	37,9054	
Tara [g] =	20,5312	19,8652	20,0682	
m^{105° + Tara [g] =	31,5352	36,0118	37,9054	
m^{1000° + Tara [g] =	30,5946	35,1204	37,2513	
Tara [g] =	20,5312	19,8652	20,0682	
V_d [cm ³] =	5,3167	7,8013	8,6182	0,0000
m_w^{geb}/V =	0,1769	0,1143	0,0759	#DIV/0!
m_w^{geb} [g] =	0,94	0,89	0,65	
V_{gl} [%] =	8,55	5,52	3,67	
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Korngruppe: sandiger Kies		
m_{ganz} [g] =	13,4909			
m_{zerkl} + Tara [g] =	33,5540			
Tara [g] =	19,9024			
m_d + Tara [g] =	32,1004			
m^{105° + Tara [g] =	32,1004			
m^{1000° + Tara [g] =	31,6848			
V_{gl} [%] =	3,41			
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_3_1_9a	580_3_1_9b	580_3_1_9c	
Tara [g] =	93,7400	97,3998	97,7934	
m_d + Tara [g] =	176,6100	199,0500	195,1000	
m^{1000° + Tara [g] =	167,0003	190,3687	187,2744	
V_d [cm ³] =	39,4132	49,3650	47,5270	
m_w^{geb} [g] =	9,61	8,68	7,83	
V_{gl} [%] =	11,60	8,54	8,04	
m_w^{geb}/V =	0,244	0,176	0,165	

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_3_2_1	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	07.06.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	22,3426	11,4896	19,7003	36,5057
m' [g] =	12,1802	6,2875	10,7720	19,9525
Temperatur [°] =	22,2	28,5	22,0	24,7
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9977	0,9961	0,9978	0,9971
Volumen [cm ³] =	10,1855	5,2225	8,9482	16,6009
ρ_f [g/cm ³] =	2,19	2,20	2,20	2,20
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	42,4557	30,7765	49,5971	67,5972
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	39,8714	29,4285	47,2280	63,3091
Tara [g] =	20,0620	19,2797	29,8935	31,0168
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	39,8714	29,4285	47,2280	63,3091
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	39,2918	29,1463	46,7421	62,4490
Tara [g] =	20,0620	19,2797	29,8935	31,0168
V_d [cm ³] =	10,3352	5,2949	9,0439	16,8479
m_w^{geb}/V =	0,0561	0,0533	0,0537	0,0511
m_w^{geb} [g] =	0,58	0,28	0,49	0,86
V_{gl} [%] =	2,93	2,78	2,80	2,66
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Korngruppe: Kies 3,15 - 5,6 mm DV nach 7 Tagen		
m_{ganz} [g] =	25,7664			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	57,9607			
Tara [g] =	31,0092			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	55,1302			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	55,1302			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	54,2808			
V_{gl} [%] =	3,52			

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_3_3_1
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	05.09.2013
Glühverlust ganz:			
Probenalter [d] =	56	112	224
m_f [g] =	16,5799	19,0546	
m' [g] =	9,1443	10,4177	
Temperatur [°] =	23,5	28,0	
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9974	0,9962	
Volumen [cm ³] =	7,4548	8,6695	
ρ_f [g/cm ³] =	2,22	2,20	
m_f + Tara [g] =	33,9561	36,2850	
m_d + Tara [g] =	32,1182	34,1011	
Tara [g] =	17,3851	17,3942	
m^{105° + Tara [g] =	32,1182	34,1011	
m^{1000° + Tara [g] =	31,7079	33,6365	
Tara [g] =	17,3851	17,3942	
V_d [cm ³] =	7,5976	8,6155	
m_w^{geb}/V =	0,0540	0,0539	
m_w^{geb} [g] =	0,41	0,46	
V_{gl} [%] =	2,78	2,78	
Glühverlust zerkleinert:			
Probenalter [d] =	56	Korngruppe: Kies 3,15 - 5,6 mm DV nach 56 Tagen	
m_{ganz} [g] =	16,9754		
m_{zerkl} + Tara [g] =	37,9060		
Tara [g] =	21,1694		
m_d + Tara [g] =	36,1814		
m^{105° + Tara [g] =	36,1814		
m^{1000° + Tara [g] =	35,7496		
V_{gl} [%] =	2,88		
Glühverlust 56 Tage/Probe:	580_3_3_1a	580_3_3_1b	580_3_3_1c
Tara [g] =	29,8864	31,7663	31,0082
m_d + Tara [g] =	56,0478	63,8727	58,2042
m^{1000° + Tara [g] =	55,2966	62,9693	57,5143
V_d [cm ³] =	13,4624	16,4775	14,1224
m_w^{geb} [g] =	0,75	0,90	0,69
V_{gl} [%] =	2,87	2,81	2,54
m_w^{geb}/V =	0,056	0,055	0,049

CEM I 42,5R HS + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_4_1_1	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	28.05.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	28,1859	10,4721	12,1049	33,7312
m' [g] =	9,7412	3,7394	4,2502	12,0597
Temperatur [°] =	22,0	26,0	27,0	22,0
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9978	0,9968	0,9965	0,9978
Volumen [cm ³] =	18,4859	6,7544	7,8822	21,7199
ρ_f [g/cm ³] =	1,52	1,55	1,54	1,55
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	108,8356	41,7823	31,4141	65,4849
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	96,8664	37,4253	26,2993	51,0706
Tara [g] =	80,5711	31,3055	19,2779	31,7824
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	96,8664	37,4253	26,2993	51,0706
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	94,1662	36,3405	25,0683	47,8180
Tara [g] =	80,5711	31,3055	19,2779	31,7824
V_d [cm ³] =	17,7760	6,6759	7,6594	21,0409
m_w^{geb} [g] =	2,70	1,08	1,23	3,25
V_{gl} [%] =	16,57	17,73	17,53	16,86
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Reine Suspension W/Z=1,0		
$m_{\text{ganz}} + \text{Tara}$ [g] =	148,9561			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	148,3453			
Tara [g] =	97,3927			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	127,2764			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	127,2764			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	122,4348			
V_{gl} [%] =	16,20			

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_4_1_2	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	28.05.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	25,0810	13,4211	14,4169	23,0121
m' [g] =	8,9097	4,7836	5,1758	8,0342
Temperatur [°] =	22,0	26,0	27,2	22,0
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9978	0,9968	0,9965	0,9978
Volumen [cm ³] =	16,2074	8,6654	9,2739	15,0113
ρ_f [g/cm ³] =	1,55	1,55	1,55	1,53
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	132,3037	43,3104	34,4901	54,9620
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	121,7289	37,7790	28,4908	44,9950
Tara [g] =	107,1106	29,8840	20,0704	31,9053
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	121,7289	37,7790	28,4908	44,9950
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	119,3341	36,3742	27,0199	42,7978
Tara [g] =	107,1106	29,8840	20,0704	31,9053
V_d [cm ³] =	15,7476	8,5049	9,0709	14,1009
m_w^{geb}/V =	0,1521	0,1652	0,1622	0,1558
m_w^{geb} [g] =	2,39	1,40	1,47	2,20
V_{gl} [%] =	16,38	17,79	17,47	16,79
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Reine Suspension W/Z=1,0		
$m_{\text{ganz}} + \text{Tara}$ [g] =	158,7252			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	157,6908			
Tara [g] =	90,3230			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	130,0220			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	130,0220			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	123,4711			
V_{gl} [%] =	16,50			

CEM I 42,5R SR0 + 3,6% Bentonit		Lab.Nr.:	580_4_2_1	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	24.10.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	9,1888	17,8508	13,2545	
m' [g] =	2,9403	5,7396	4,3892	
Temperatur [°] =	22,7	22,0	24,5	
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9976	0,9978	0,9972	
Volumen [cm ³] =	6,2635	12,1382	8,8904	-
ρ_f [g/cm ³] =	1,47	1,47	1,49	-
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	39,0936	111,8006	43,1192	
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	34,9075	103,4381	36,9137	
Tara [g] =	29,8943	93,9740	29,9135	
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	34,9075	103,4381	36,9137	0,0000
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	34,2345	101,7729	35,7294	
Tara [g] =	29,8943	93,9740	29,9135	0,0000
V_d [cm ³] =	6,0650	11,4497	8,4689	
m_w^{geb}/V =	0,1110	0,1454	0,1398	
m_w^{geb} [g] =	0,67	1,67	1,18	0,00
V_{gl} [%] =	13,42	17,59	16,92	-
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Reine Suspension W/Z=1,2		
m_{ganz} [g] =	15,6910			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	48,0203			
Tara [g] =	31,8864			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	41,2086			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	41,2086			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	39,4503			
V_{gl} [%] =	18,86			
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_4_2_1a	580_4_2_1b	580_4_2_1c	
Tara [g] =	20,0634	18,7210	19,9443	
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	25,8512	25,6276	26,1887	
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	24,8770	24,4978	25,1522	
V_d [cm ³] =	7,0292	8,2992	7,5768	
m_w^{geb} [g] =	0,97	1,13	1,04	
V_{gl} [%] =	16,83	16,36	16,60	
m_w^{geb}/V =	0,139	0,136	0,137	

CEM I 42,5R SR0 + 4% Bentonit		Lab.Nr.:	580_4_2_2	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	24.10.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	11,3681	16,0527	16,3477	
m' [g] =	3,2437	4,6052	4,7633	
Temperatur [°] =	22,9	22,0	24,7	
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9976	0,9978	0,9971	
Volumen [cm ³] =	8,1442	11,4731	11,6178	-
ρ_f [g/cm ³] =	1,40	1,40	1,41	-
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	43,0623	109,9418	48,2356	
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	37,1121	101,5432	39,5626	
Tara [g] =	31,7670	93,8660	31,9085	
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	37,1121	101,5432	39,5626	
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	36,1760	100,2360	38,2159	
Tara [g] =	31,7670	93,8660	31,9085	
V_d [cm ³] =	7,3816	10,6023	10,5704	
m_w^{geb}/V =	0,1268	0,1233	0,1274	
m_w^{geb} [g] =	0,94	1,31	1,35	0,00
V_{gl} [%] =	17,51	17,03	17,59	-
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Reine Suspension W/Z=1,5		
m_{ganz} [g] =	5,6760			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	25,0635			
Tara [g] =	19,9774			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	22,6217			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	22,6217			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	22,2249			
V_{gl} [%] =	15,01			
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_4_2_2a	580_4_2_2b	580_4_2_2c	
Tara [g] =	19,7364	21,1954	19,2800	
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	25,1372	27,0425	25,6642	
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	24,2229	26,0713	24,5764	
V_d [cm ³] =	7,4740	7,9856	8,8975	
m_w^{geb} [g] =	0,91	0,97	1,09	
V_{gl} [%] =	16,93	16,61	17,04	
m_w^{geb}/V =	0,122	0,122	0,122	

CEM I 42,5R SR0 + 5% Bentonit		Lab.Nr.:	580_4_2_3
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	29.10.2013
Glühverlust ganz:			
Probenalter [d] =	28	56	112
m_f [g] =	4,5695	15,6611	
m' [g] =	1,3268	4,4381	
Temperatur [°] =	28,0	22,0	
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9962	0,9978	
Volumen [cm ³] =	3,2550	11,2480	
ρ_f [g/cm ³] =	1,40	1,39	
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	23,8650	101,0380	
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	21,4565	92,5792	
Tara [g] =	19,3095	85,3553	
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	21,4565	92,5792	
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	21,0714	91,2984	
Tara [g] =	19,3095	85,3553	
V_d [cm ³] =	3,2005	10,7684	
m_w^{geb}/V =	0,1203	0,1189	
m_w^{geb} [g] =	0,39	1,28	
V_{gl} [%] =	17,94	17,73	
Glühverlust zerkleinert:			
Probenalter [d] =	28	Reine Suspension W/Z=2,0	
m_{ganz} [g] =	3,2068		
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	24,2535		
Tara [g] =	21,1761		
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	22,7305		
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	22,7305		
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	22,4456		
V_{gl} [%] =	18,33		

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit		Lab.Nr.:	580_4_2_4
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	29.10.2013
Glühverlust ganz:			
Probenalter [d] =	28	56	112
m_f [g] =	13,3818	12,1279	
m' [g] =	5,2371	4,7054	
Temperatur [°] =	27,5	22,0	
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9964	0,9978	
Volumen [cm ³] =	8,1743	7,4391	
ρ_f [g/cm ³] =	1,64	1,63	
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	33,9562	92,9007	
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	29,1475	88,4692	
Tara [g] =	20,5935	80,7713	
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	29,1475	88,4692	
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	27,7468	87,1802	
Tara [g] =	20,5935	80,7713	
V_d [cm ³] =	8,0448	7,2396	
m_w^{geb}/V =	0,1741	0,1780	
m_w^{geb} [g] =	1,40	1,29	
V_{gl} [%] =	16,37	16,74	
Glühverlust zerkleinert:			
Probenalter [d] =	28	Reine Suspension W/Z=0,8	
m_{ganz} [g] =	12,0157		
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	31,3900		
Tara [g] =	20,1018		
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	27,4013		
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	27,4013		
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	26,1879		
V_{gl} [%] =	16,62		

CEM I 42,5R SR0 + 5% Bentonit		Lab.Nr.:	580_4_3_1	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	05.11.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	15,0657			
m' [g] =	2,7814			
Temperatur [°] =	21,7			
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9978			
Volumen [cm ³] =	12,3109			
ρ_f [g/cm ³] =	1,22			
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	141,3040			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	131,0629			
Tara [g] =	126,2999			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	24,7563			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	23,8820			
Tara [g] =	20,0032			
V_d [cm ³] =	10,4075			
m_w^{geb} [g] =	0,87			
V_{gl} [%] =	18,39			
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Reine Suspension W/Z=3,0		
m_{ganz} [g] =	28,3859			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	134,0935			
Tara [g] =	31,8996			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	115,8532			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	40,5555			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	38,9770			
V_{gl} [%] =	18,24			

CEM I 42,5R SR0 + 8% Bentonit		Lab.Nr.:	580_4_3_2	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	05.11.2013	
Glühverlust ganz:				
Probenalter [d] =	28	56	112	224
m_f [g] =	11,9136			
m' [g] =	2,2473			
Temperatur [°] =	21,7			
Dichte Wasser [g/cm ³] =	0,9978			
Volumen [cm ³] =	9,6872			
ρ_f [g/cm ³] =	1,23			
$m_f + \text{Tara}$ [g] =	67,6424			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	59,5161			
Tara [g] =	55,8071			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	33,6799			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	33,0000			
Tara [g] =	29,9103			
V_d [cm ³] =	9,2126			
m_w^{geb}/V =	0,0738			
m_w^{geb} [g] =	0,68			
V_{gl} [%] =	18,04			
Glühverlust zerkleinert:				
Probenalter [d] =	28	Reine Suspension W/Z=3,0		
m_{ganz} [g] =	31,3228			
$m_{\text{zerkl}} + \text{Tara}$ [g] =	153,6395			
Tara [g] =	31,0106			
$m_d + \text{Tara}$ [g] =	132,6956			
$m^{105^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	38,6141			
$m^{1000^\circ} + \text{Tara}$ [g] =	37,2190			
V_{gl} [%] =	18,35			

CEM I 42,5R SR0 + 2% Bentonit				
W/Z=	1,0	Lab.Nr.:	580_3_1_1	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	16.12.2013	
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_3_1_1a	580_3_1_1b	580_3_1_1c	580_3_1_1d
Tara [g] =	93,9736	93,8600	93,9736	97,8260
$m_d + \text{Tara [g]} =$	202,1301	212,0826	216,3482	201,6893
$m^{1000^\circ} + \text{Tara [g]} =$	199,5937	209,5798	213,0383	199,6780
$V_d [\text{cm}^3] =$	49,3806	53,7366	62,5883	53,6786
$m_w^{\text{geb}} [\text{g}] =$	2,54	2,50	3,31	2,01
$V_{\text{gl}} [\%] =$	2,35	2,12	2,70	1,94
$m_w^{\text{geb}}/V =$	0,051	0,047	0,053	0,037

CEM I 42,5R SR0 + 3,6% Bentonit				
W/Z =	1,2	Lab.Nr.:	580_5_1_1	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	17.12.2013	
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_5_1_1a	580_5_1_1b	580_5_1_1c	580_5_1_1d
Tara [g] =	97,3938	97,8260	80,6812	88,9574
$m_d + \text{Tara [g]} =$	218,4308	213,2072	207,5682	197,3048
$m^{1000^\circ} + \text{Tara [g]} =$	215,8464	210,9693	204,7846	194,9286
$V_d [\text{cm}^3] =$	62,6466	60,4103	66,9161	56,7062
$m_w^{\text{geb}} [\text{g}] =$	2,58	2,24	2,78	2,38
$V_{\text{gl}} [\%] =$	2,14	1,94	2,19	2,19
$m_w^{\text{geb}}/V =$	0,041	0,037	0,042	0,042

CEM I 42,5R SR0 + 4% Bentonit				
W/Z =	1,5	Lab.Nr.:	580_5_1_2	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	18.12.2013	
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_5_1_2a	580_5_1_2b	580_5_1_2c	580_5_1_2d
Tara [g] =	88,9574	83,0869	93,8600	97,3938
$m_d + \text{Tara [g]} =$	158,3186	199,7988	213,4556	215,8284
$m^{1000^\circ} + \text{Tara [g]} =$	156,9658	197,5726	211,0845	213,6677
$V_d [\text{cm}^3] =$	37,4616	62,0953	64,0120	63,7263
$m_w^{\text{geb}} [\text{g}] =$	1,35	2,23	2,37	2,16
$V_{\text{gl}} [\%] =$	1,95	1,91	1,98	1,82
$m_w^{\text{geb}}/V =$	0,036	0,036	0,037	0,034

CEM I 42,5R SR0 + 5% Bentonit				
W/Z =	2,0	Lab.Nr.:	580_5_1_3	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	19.12.2013	
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_5_1_3a	580_5_1_3b	580_5_1_3c	580_5_1_3c
Tara [g] =	85,3568	80,6812	83,0869	86,6436
m_d + Tara [g] =	193,0956	180,3084	210,3501	206,0456
m^{1000° + Tara [g] =	191,3229	178,8592	208,2567	204,1820
V_d [cm ³] =	60,1584	55,0813	70,0098	64,7218
m_w^{geb} [g] =	1,77	1,45	2,09	1,86
V_{gl} [%] =	1,65	1,45	1,64	1,56
m_w^{geb}/V =	0,029	0,026	0,030	0,029

CEM I 42,5R SR0 + 8% Bentonit				
W/Z =	3,0	Lab.Nr.:	580_5_1_4	
Bearbeiter:	PR	Prüfdatum:	20.12.2013	
Glühverlust 28 Tage/Probe:	580_5_1_4a	580_5_1_4b	580_5_1_4c	580_5_1_4d
Tara [g] =	81,7435	80,1638	82,8545	88,9750
m_d + Tara [g] =	175,3576	193,1807	212,6822	210,6909
m^{1000° + Tara [g] =	174,0879	191,8395	210,8746	208,9081
V_d [cm ³] =	54,1905	64,1613	74,3100	67,9772
m_w^{geb} [g] =	1,27	1,34	1,81	1,78
V_{gl} [%] =	1,36	1,19	1,39	1,46
m_w^{geb}/V =	0,023	0,021	0,024	0,026