



Markus Grimming, BSc

Untersuchungen zum Einfluss des Schleuderverfahrens auf die Gasdichtheit von UHPC

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag

Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Santner

Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

LKI

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Technische Universität Graz

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Vorwort und Danksagung

HYPERLOOP – ein noch unbeschriebenes Blatt könnte in naher Zukunft nicht mehr wegzudenken sein. Ich danke meinem Betreuer Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag für das Vertrauen und dass er mir ein derartiges Thema zur Bearbeitung bereitgestellt hat. Auch wenn diese Arbeit nur als winzig kleiner Teil zu einer neuen Technologie beitragen kann, motivieren aktuelle Berichte aus öffentlichen Medien wie Presse, Radio oder Internet, was sich letztlich im Fortschritt der Arbeit zeigte. Neben der Betreuung bedanke ich mich für den verfügbaren Arbeitsplatz direkt im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau – es war wohl das größte Büro am LKI - herzlichen Dank dafür! Großes Danke an Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Santner, mit dem das Fachsimpeln auch in der Muttersprache, auf „Lungauerisch“ möglich war. Allen weiteren Beteiligten dieser Arbeit, aufgelistet in alphabetischer Reihenfolge, gilt ebenso ein herzliches Vergelt's Gott:

Berti, Silvia	Linder, Josef, Oberrat Dipl.-Ing.
Fülöp, Uwe, Amtsdirektor Ing.	MABA Fertigteilindustrie GmbH
Hadl Philipp, Dipl.-Ing. Dr.techn.	Nguyen, Viet Tue, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.
Holzschuster, Reinhard, Oberkontrollor	Piller, Michael
Huß, Michael, Dipl.-Ing. BSc	Pucher, Philip
Juhart, Joachim, Dipl.-Ing. Dr.techn.	Rinnhofer, Gerhard, Dipl.-Ing. Dr.techn.
Kim, Huy Hoang, Dr.techn.	Sliskovic, Valentino, Dipl.-Ing. BSc
Koitz, Hannes	Sparowitz, Lutz, Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Krischey, Elke, Dipl.-Ing. Dr.mont.	Weiss, Robert, Fachoberinspektor

In diesem Rahmen möchte ich meinen Eltern, Maria und Paul, Danke sagen! Durch eure Unterstützung war der Weg von daheim, über die HTL in Hallein, zur Technischen Universität nach Graz, überhaupt möglich. Auch meinen Geschwistern Paul, Barbara und Eva-Maria sowie meiner Freundin Lisa danke ich für die Gemeinsamkeit. Dem Beton-Holzbau-Zeichensaal sei ein herzlicher Dank gewidmet, der in guten wie in schlechten Zeiten auf ein Bier einlud. Neben vielen anderen Freunden konnte ich mit Martin Happenhofer und Elias Buchmayer, vom ersten Tag an die Studienzeit genießen und freue mich auf schöne weitere, gemeinsame Stunden.

Kurzfassung

HYPERLOOP – ein Transportsystem von Personen und Güter, konzipiert nach dem panalen Prinzip der Rohrpost, verlangt ein möglichst gasdichtes und dauerhaftes Tunnelsystem. Ultrahochfester Beton UHPC bzw. UHPFRC – Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete, ein verhältnismäßig „junger Baustoff“, gilt mit Druckfestigkeiten jenseits von $>150 \text{ N/mm}^2$ als extrem beanspruchbares und dichtes Material. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass durch zusätzliches Verdichten unter Druck im Schleuderverfahren noch dichtere Gefügestrukturen von UHPC erreicht werden können. Im Gegensatz zur Optimierungen der Packungsdichte oder der Verbesserung durch chemische Zusätze, steht in der gegenwärtigen Arbeit die mechanische Komponente des Drucks im Vordergrund. Aus eigenen Schleuderversuchen geht hervor, dass herstellungsbedingte Parameter wie beispielsweise die Umdrehungszahl bzw. die Schleuderzeit, größeren Einfluss auf die geschleuderte Probe als rezepturbedingte Parameter wie z.B. Zuschlagskorngrößen haben können. Wegen des Grundsatzes eines homogenen Betongefüges müssen Entmischungseffekte während des Schleuderns vermieden werden, was sich als Herausforderung im gesamten Herstellungsprozess erwiesen hat. Messungen der Gaspermeabilität von geschleuderten Proben zeigten Permeabilitätskoeffizienten bis zu 10^{-20} m^2 , wobei hinsichtlich der Gasdichtheit keine herausragende Verbesserung zu ungeschleuderte Proben festgestellt werden konnte. Vielmehr resultierten aus Analysen wie die Quecksilberporosimetrie deutlich reduzierte Porositäten. Auch erhöhte Dichten sowie höhere Festigkeiten charakterisieren ein dichteres Gefüge von geschleudertem ultrahochfestem Beton im Vergleich zu herkömmlichen UHPC-Produkten. Mit dieser Arbeit werden materialtechnologische und messtechnische Grundlagen für weiterführende Forschungsarbeiten zur Entwicklung von besonders gasdichtem UHPC bereitgestellt.

Abstract

HYPERLOOP – a transport system for persons and goods, designed according to the simple principle of the pipe-post requires a gas-tight and permanent tunnel or tube system. The relatively „young building material“ so-called Ultra-High-Performance-Fiber-Reinforced-Concrete UHPFRC or UHPC for short, is characterized by high compressive strength beyond $>150 \text{ N/mm}^2$. Therefore, extremely durable and dense material properties are applied. Using chemical additions or optimizing the packing density suggest a possibility to obtain higher material properties. However, this thesis shows that even more dense structure of UHPC can be achieved by additional pressure due to the centrifugal process of the well-known spun concrete technique for normal concrete. Based on own centrifugal tests the huge influence on the final properties of the samples is pointed out. Producing parameters for instance the number of revolutions could modify the properties even more than the centrifugal time and parameters of mixture such as aggregate grain sizes. Due to a homogeneous concrete structure, segregation effects must be prevented during spinning. This is the challenge of the entire manufacturing process. Measurements of the gas permeability of spun samples showed permeability coefficients up to 10^{-20} m^2 . However, no significant improvements regarding the gas tightness of non-centrifugal specimens had been established so far. With further analyses such as mercury porosimetry, significantly reduced porosities had been achieved. Compared to conventional UHPC-products increasing densities as well as higher strengths characterize a denser structure of centrifugal ultra-high-strength-concrete. This thesis provides fundamental knowledge in material technology and measuring methods for further research in developing a highly gas-tight UHPC.

Inhaltsverzeichnis

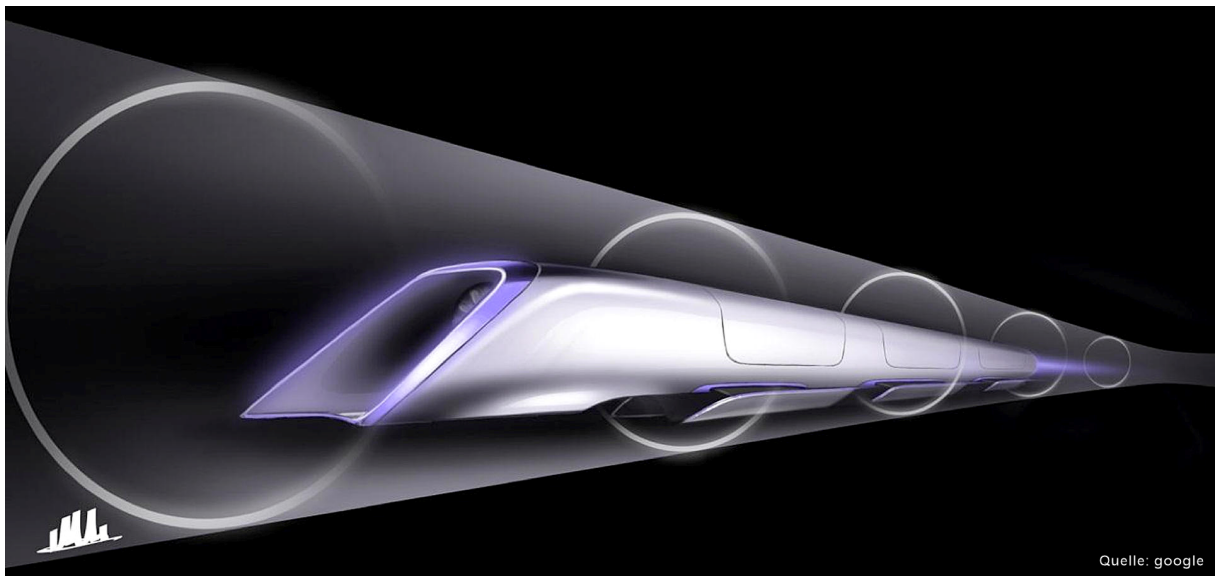
Vorwort und Danksagung	5
Kurzfassung	7
Abstract	9
1. Einleitung	15
1.1. Projektdarstellung und Motivation	17
1.2. Zielsetzung und Abgrenzung	19
1.3. Zur Gliederung der Arbeit	20
2. Transport von Gasen durch Feststoffe	21
2.1. Grundsatz und Anwendungen der Vakuumtechnik	21
2.2. Gase - Zustand und Menge	23
2.3. Allgemeiner Transport von Gasen durch Feststoffe	24
2.3.1. Berechnung der Gasdurchlässigkeit	24
2.3.2. Gasdurchlässigkeit von Metall	25
2.3.3. Gasdurchlässigkeit von Glas und Keramik	26
2.3.4. Gasdurchlässigkeit von Kunststoffen	26
2.3.5. Vergleich der Gasdurchlässigkeit unterschiedl. Materialien	26
3. Transport von Gasen durch zementgebundene Baustoffe	29
3.1. Strukturentwicklung von zementgebundenen Baustoffen - Hydratation und Verdichtung	29
3.1.1. Hydratation	29
3.1.2. Verdichtung unter Druck	31
3.1.3. Verdichtung unter Vibration	35
3.1.4. Selbstverdichtend	36
3.2. Poren im Beton - Arten, Dimension und Messmethoden	36
3.2.1. Allgemein	36

3.2.2.	Klassifizierung des Porensystems	38
3.2.3.	Durchlässigkeit des Porengefüges	42
3.3.	Transportmechanismen von Fluiden in porösen Stoffen	43
3.3.1.	Grundsätzliches zum Transport in porösen Stoffen	43
3.3.2.	Charakterisierung von Gasströmungen	43
3.3.3.	Permeabilität	45
3.3.4.	Kapillare Wasseraufnahme	46
3.3.5.	Diffusion	46
3.3.6.	Effusion	47
3.3.7.	Einfluss der Baustofffeuchte auf den Transportmechanismus	47
3.3.8.	Korrelation von Durchlässigkeit zu Festigkeit	48
4.	Technologie von UHPC - Ultra High Performance Concrete	51
4.1.	Grundsatz	51
4.2.	Prinzipien zur Erhöhung des Leistungsspektrums von Normalbeton zu UHPC	52
4.2.1.	Verbesserung der Homogenität	52
4.2.2.	Optimierung des Korngemisches (Packungsdichte)	53
4.2.3.	Nachbehandlung von UHPC	54
4.3.	Stoffkomponenten	55
4.3.1.	Zement	56
4.3.2.	Silikastaub - reaktiver Zusatzstoff	56
4.3.3.	Inerte Zusatzstoffe	56
4.3.4.	Zusatzmittel	58
4.4.	Anwendungen	62
4.5.	UHPC als Schleuderbeton - Problemstellung und Herausforderung	63
4.5.1.	Mechanische Parameter im Schleuderprozess	63
4.5.2.	Anforderungen an die Konsistenz	64
4.5.3.	Herkömmlicher UHPC vs. geschleuderter UHPC	67
5.	Eigenes Versuchsprogramm	71
5.1.	Vorgehensweise und Versuchsprogramm	71
5.1.1.	Erstuntersuchung der Probe	72
5.2.	Probenherstellung	74
5.2.1.	Schalungsbau	74
5.2.2.	Rezeptur	77
5.2.3.	Mischvorgang	77
5.2.4.	Schleuderprozess	78

5.3. Ergebnisse	80
5.3.1. Probe 1	80
5.3.2. Probe 2	83
5.3.3. Probe 3	88
5.3.4. Probe 4	91
5.3.5. Probe 5	93
5.3.6. Probe 6	94
5.3.7. Probe 7	96
5.3.8. Probe 8	96
5.3.9. Probe 9	96
5.3.10. Probe 10	98
6. Analysemethoden zur Gasdurchlässigkeit	101
6.1. Durchgeführte Messungen	101
6.1.1. Permeabilitätsmessung	102
6.1.2. Bestimmung von Porenradienverteilung und spezifischer Oberfläche	111
6.1.3. Dichtebestimmung	113
6.1.4. Bestimmung des E-Moduls und der Druckfestigkeit	114
6.2. Ausblick weiterer Messungen	115
6.2.1. Röntgendiffraktometrie - Mineralphasenanalyse	116
6.2.2. Rasterelektronenmikroskopie REM	116
7. Messergebnisse	117
7.1. Ergebnisse zur stationären Permeabilität der Proben	117
7.2. Ergebnisse zur instationären Permeabilität der Probe 2	119
7.3. Ergebnisse zur Gasadsorptionsmethode der Probe 2	120
7.4. Ergebnisse zur Quecksilberporosimetrie der Probe 2	122
7.5. Ergebnisse zur Dichtebestimmung der Proben	124
7.6. Ergebnisse zur Bestimmung des E-Moduls der Proben	125
7.7. Ergebnisse zur Bestimmung der Druckfestigkeit der Proben	125
8. Versuchsanalyse	127
8.1. Analyse zur Gaspermeabilität	127
8.1.1. Stationären Gaspermeabilität	127
8.1.2. Vergleich der stationären und instationären Gaspermeabilität von Probe 2	129
8.1.3. Vergleich der Gaspermeabilität von geschleudertem UHPC zu anderen Betonen	130

8.2. Analyse zur Bestimmung der Porenradienverteilung	131
8.2.1. Zur Gasadsorptionsmethode BET	131
8.2.2. Zur Quecksilberporosimetrie	133
8.3. Korrelation von Permeabilität, Dichte, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul . .	135
8.4. Unterschied zwischen herkömmlichem und geschleudertem UHPC	137
9. Resümee und Ausblick	139
10. Zusammenfassung	143
Abbildungsverzeichnis	153
Tabellenverzeichnis	155
A. Anhang - 1	157
B. Anhang - 2	163
C. Anhang - 3	167

1. Einleitung



I'm interested in things that change the world or that affect the future and wondrous, new technology where you see it, and you're like, 'Wow, how did that even happen? How is that possible?'

Zitat von Elon Musk,
globaler Unternehmer und Investor,
Erfinder von *HYPERLOOP*

1.1. Projektdarstellung und Motivation

In der Art des Zitats von Elon Musk konnte mich mein Betreuer mit der neuen Technologie von *HYPERLOOP* begeistern. Dabei handelt es sich um eine Erfindung von Elon Musk, welche im August 2013 vorgestellt wurde.¹ Bereits in den Jahren zwischen 1994 – 1998 wurden ähnliche Studien im Auftrag der Swissmetro AG aus Bern durchgeführt – allerdings wurde die Swissmetro AG im Jahr 2009 liquidiert.²

HYPERLOOP ist ein Konzept eines Transportsystems für Personen und Güter und baut auf dem Prinzip einer Rohrpost auf. Elektrisch angetriebene Transportkapseln sollen schwebend, auf einem Luftkissen, mit Geschwindigkeiten bis zu 1100 km/h durch evakuierte Röhren (im Teilvakuum) gleiten. Die dazu benötigte elektrische Energie sollte gänzlich aus Photovoltaikanlagen über den beiden Röhren (am Dach) gewonnen werden. In einer vorerst oberirdischen Hyperlooptrasse auf Stützen mit zwei Röhren sollen mehrere Transportkapseln in jeweils unterschiedliche Richtungen verkehren - siehe dazu Abb. 1.1. Laut *MUSK* sei es möglich, billiger als mit der Bahn und schneller als mit dem Flugzeug zu reisen. Beispielsweise könnten New York und Washington innerhalb von 29 Minuten, anstatt der 5 Stunden im Auto verbunden werden. Neben den USA kommt auch großes Interesse aus dem arabischen Raum, aber auch Europa ist daran sehr interessiert und plant eine Teststrecke in der französischen Stadt Toulouse.³



Abbildung 1.1.: *Hyperlooptrasse mit zwei Röhren auf Stützen (links), Transportkapsel (rechts) [Hyperloop.2017]*

Grundsätzlich sind die Stahlröhren mit Durchmesser von ca. 3 m auf Stahlbetonstützen in einem lichten Abstand von ca. 60 m gelagert. Die Stahlrohre sind der Witterung frei ausgesetzt, wobei hier auf längerfristige Sicht hohe Anforderungen an den Korrosionsschutz der Rohre gestellt

¹<http://de.wikipedia.org/wiki/Hyperloop>, 23.08.2017

²<http://de.wikipedia.org/wiki/Swissmetro>, 30.08.2017

³<http://de.wikipedia.org/wiki/Hyperloop>, 23.08.2017

werden. Dazu muss mit einer entsprechenden Instandhaltung viel Geld investiert werden, um die Dauerhaftigkeit langfristig gewährleisten zu können. Diesen Grundsatz einer hohen Dauerhaftigkeit lässt sich mit dem verhältnismäßig noch „sehr jungen Baustoff“, dem sogenannten ultrahochfesten Beton UHPC bzw. UHPFRC - Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete - sicherstellen. Dieser Baustoff zeichnet sich neben der gegebenen Dauerhaftigkeit auch durch ein hohes Maß an Baustofffestigkeiten aus und könnte den Stahl ersetzen. Eine mögliche Querschnittsausbildung mit UHPC-Röhren einer solchen Hyperloop-Trasse ist in Abb. 1.3 dargestellt.

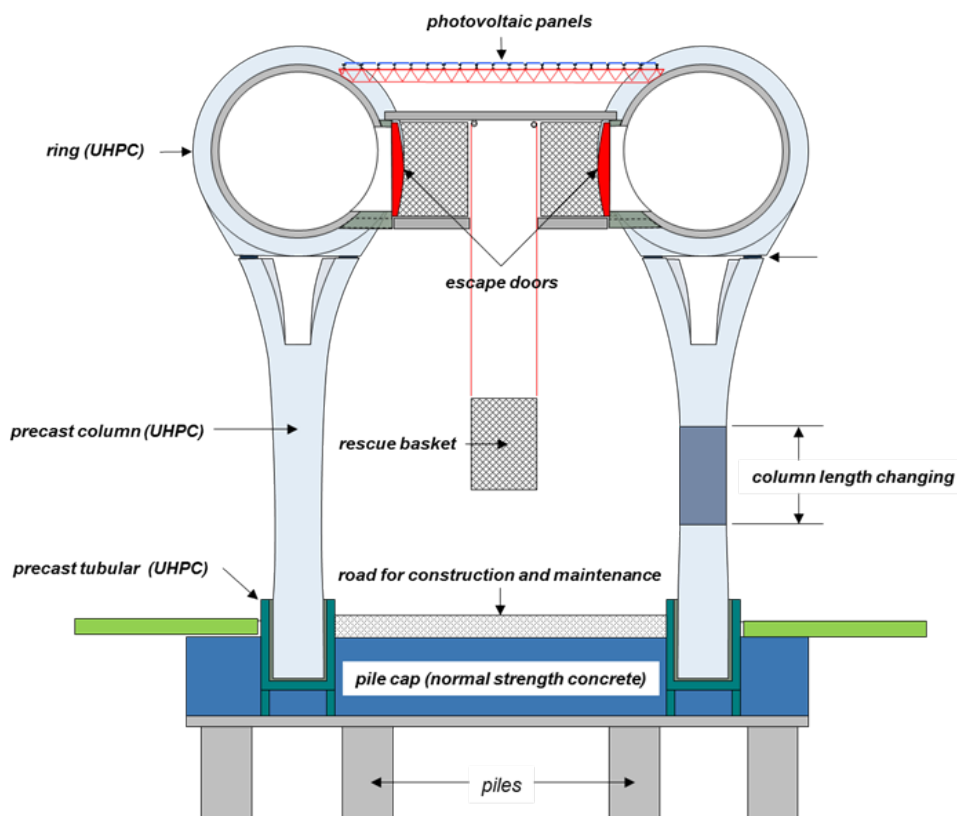


Abbildung 1.2.: möglicher Querschnitt einer Trassenführung [Sparowitz.2017]

Es gibt unterschiedliche Herstellungskonzepte: das Vertikale oder Horizontale Gleiten sowie das Schleudern von UHPC. Diese Arbeit beschränkt sich auf eine Herstellung im Schleuderverfahren, wodurch eine positive Wirkung auf die Gasdichtheit erzielt werden kann. Aufgrund des geforderten konstanten Innendruckes in den Röhren von ca. 1 hPa, wird im Speziellen auf die Gasdichtheit von ultrahochfesten Beton eingegangen und nach Möglichkeit diese auch zu verbessern.

1.2. Zielsetzung und Abgrenzung

In der Projektübersicht aus Kapitel 1 und der Hinleitung zum konkreten Thema dieser Arbeit – *Untersuchungen zum Einfluss des Schleuderverfahrens auf die Gasdichtheit von UHPC* – werden folgende Ziele der vorliegenden Masterarbeit zugrunde gelegt:

1. Untersuchung der Gasdichtheit von geschleuderten ultrahochfesten Beton (UHPC)

In dieser Arbeit soll primär herausgefunden werden, wie die Gasdichtheit von UHPC quantitativ durch das Schleudern verbessert werden kann. Ausgehend von einer herkömmlichen UHPC-Referenzrezeptur sollen eigene Versuche durchgeführt und die Gaspermeabilität der Proben bestimmt werden. In den Versuchen sollen die mechanische Wirkung des Drucks sowie herstellungstechnische Parameter bedacht werden, wobei hier nicht das Ziel einer optimalen Rezeptur für geschleuderten UHPC verfolgt wird.

2. Beurteilung von Messverfahren und Materialkennwerte zur Gasdichtheit

Neben der Permeabilitätsmessung sollten andererseits weitere Untersuchungen wie z.B. eine Dichtebestimmung und Untersuchungen hinsichtlich der Poren im Betongefüge durchgeführt werden. Auch Festigkeitskenngrößen sind dabei interessant. Durch Korrelieren der gewonnenen Kenngrößen der Proben, soll eine abschließende Analyse die Messverfahren, welche sich am besten zur Bestimmung der Gaspermeabilität und letztendlich der Dichtheit von ultrahochfesten Betonen eignen, zeigen.

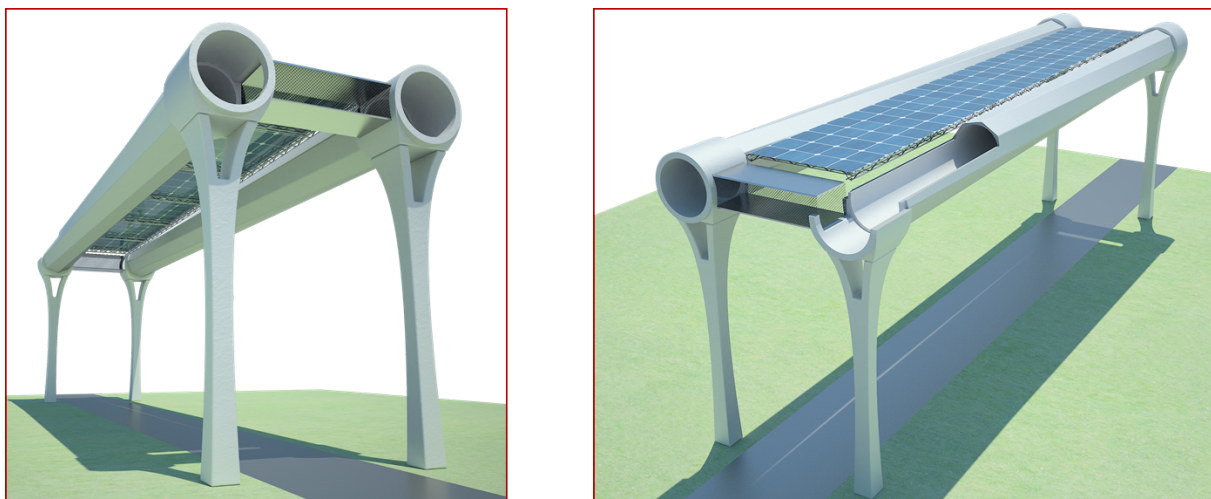


Abbildung 1.3.: 3D-Visualisierungen [Sparowitz.2017]

1.3. Zur Gliederung der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit Basics der Vakuumtechnik und dem prinzipiellen Transport von Gasen durch Feststoffe. Unterschiedliche Materialien haben unterschiedliche Durchlässigkeiten was auch für zementgebundene Baustoffe zutrifft. Dazu werden im Kapitel 2 die unterschiedlichen Transportmechanismen genannt und auf wichtige Backgrounds zur Gasdichtheit von Beton hingewiesen. Eine Beschreibung von ultrahochfestem Beton im Kapitel 4 leitet auf das eigene Versuchsprogramm in Kapitel 5 über. Die aus den Versuchen gewonnenen Proben werden unter gezielten Methoden in Kapitel 8 begutachtet, verschiedene Materialkenngrößen geprüft und die Ergebnisse im Kapitel 7 präsentiert. Nach einer umfassende Versuchsanalyse aus Kapitel 8 werden abschließend im Zuge eines Resümees, alle gewonnen Erkenntnisse wiedergegeben. Eine Zusammenfassung in Kapitel 10 gibt einen Gesamtüberblick der Arbeit.

2. Transport von Gasen durch Feststoffe

2.1. Grundsatz und Anwendungen der Vakuumtechnik

Grundsätzliches

Unter Vakuum versteht man einen weitgehend luftleeren Raum. In der Vakuumtechnik befasst man sich mit der Erzeugung, der Aufrechterhaltung und der Messung eines Vakuums mit dem Grundsatz der technischen Anwendbarkeit. Um ein Vakuum zu erzeugen, müssen Gasteilchen aus einem zuvor gasgefülltem Volumen entfernt werden. Dazu werden sogenannte Vakuumpumpen eingesetzt, die sich für folgende Druckbereiche unterscheiden¹:

- Grobvakuum: 1013 hPa bis 1 hPa
- Feinvakuum: 1 hPa bis 10^{-3} hPa
- Hochvakuum: 10^{-3} hPa bis 10^{-7} hPa
- Ultrahochvakuum: unter 10^{-7} hPa


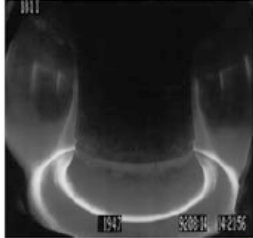
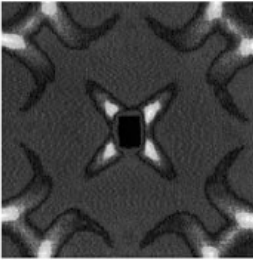
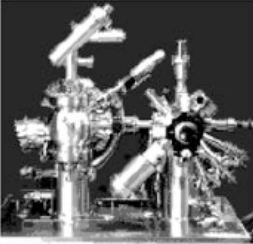
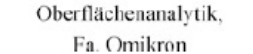
Bezogen auf das zukunftssträchtige Einsatzgebiet von *HYPERLOOP*, bewegt man sich für das geforderte Teilvakuum von ca. 1 hPa in der Größenordnung zwischen Grob- und Feinvakuum.

Vakuumtechnik in der Forschung

Bereits seit dem 17. Jahrhundert setzt sich die Menschheit mit dem Vakuum auseinander und ist in gegenwärtiger Zeit nicht mehr wegzudenken. Grund für diese stetige Weiterentwicklung des Vakuums ist die Schaffung eines möglichst „leeren“ Raumes, frei von jeglichen, ungewollten Einflüssen wie beispielsweise chemischen Reaktionen o.Ä. von außen. Die Anwendungen der

¹<https://de.wikipedia.org/wiki/Vakuumtechnik>, 25.06.2017

Vakuumtechnik in der Industrie und Forschung sind sehr umfangreich. Neben alltäglichen Anwendungen aus der Industrie wie z.B. Lebensmittelverpackung, Röntgengeräte und Solarzellen zeigt Abb. 2.1 eine Übersicht von Untersuchungsmethoden in der Forschung, welche im Vakuum durchgeführt werden.

Biotechnologie	10^{-8} Pa ... 10^5 Pa	
Elementarteilchenphysik	10^{-9} Pa ... 10^{-6} Pa	
Gravitationswellendetektoren	10^{-8} Pa ... 10^{-6} Pa	
Herstellung dünner Schichten	10^{-6} Pa ... 1 Pa	
Molekularstrahlepitaxie (MBE)	10^{-10} Pa ... 10^{-8} Pa	
Kernfusion	10^{-6} Pa ... 10^{-1} Pa	
Massenspektrometer	10^{-8} Pa ... 10^{-3} Pa	
Materialforschung Neutronenbeugung	10^{-4} Pa ... 10^{-1} Pa	
Metrologie Massenbestimmung Radiometrie	10^{-8} Pa ... 10^{-1} Pa	
Nanotechnologie (STM, AFM)	10^{-8} Pa ... 10^5 Pa	
Oberflächenanalytik SIMS SEM, TEM ESCA/XPS, UPS AES, LEED Ionenquellen	10^{-9} Pa ... 10^{-1} Pa	
Plasmaforschung	10^{-7} Pa ... 10^3 Pa	
Synchrotronstrahlung Weiche bis harte Röntgenstrahlung	10^{-8} Pa ... 10^{-5} Pa	
Tieftemperaturforschung	10^{-6} Pa ... 10^{-1} Pa	
Weltraumsimulation	10^{-5} Pa ... 10^{-3} Pa	

CERN Beschleuniger SPS

Fusionsforschung im ASDEX, IPP

Neutronenstreuung an Silizium

Oberflächenanalytik,
Fa. Omikron

Abbildung 2.1.: *Physikalische Untersuchungsmethoden im Vakuum [Jousten.2013]*

Materialien für Vakuumanwendungen

Typische Materialien in der Vakuumtechnik sind dichte Stoffe wie Metalle, Gläser oder Keramiken. Auch Kunststoffe wie z.B. Elastomere finden Anwendung, vor allem für Dichtungszwecke. Während früher Glas in der Vakuumtechnik am meisten eingesetzt wurde, ist Glas in heutiger Zeit nur mehr bei Spezialanwendungen relevant. Neben der hohen Dichtigkeit von Glas, spricht auch die ausgezeichnete chemische Beständigkeit für diesen Werkstoff. Auch hinsichtlich der Festigkeit ist Glas ein denkbarer Baustoff. Allerdings haben sich in der baupraktischen Anwendung wie beispielsweise Druckrohrleitungen aus Stahl, vor allem aus Gründen der Herstellung, Verbindungstechnik und letzten Endes auch der Kosten etabliert. Die Schwachstelle von normalem Stahl ist jedoch die Korrosion. Mit entsprechenden Beschichtungen und regelmäßiger Wartung kann die Korrosionsbeständigkeit erhalten bleiben. Hochwertige Metalle wie Edelstahl bringen für Anwendungen in der Vakuumtechnik viele Vorteile mit sich, sorgen jedoch für erhöhte Kosten.[LKI.2017] Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und letztendlich der Verfügbarkeit ist neben Rohstoffen wie Eisen bzw. Stahl ein Umdenken auf potentiell gleichwertige Materialien angesagt und durchaus denkbar.

2.2. Gase - Zustand und Menge

Der Zustand des „absoluten Vakuums“, sprich ein leerer Raum ist in die Praxis nicht umsetzbar. Je nach Klassifizierung nach Druckbereichen im Vakuum, sind unterschiedlich viele Gasteilchen im Vakuum zu finden. Feste und flüssige Stoffe stehen im molekularen Verbund und besitzen ein bestimmtes Volumen, welches wenig von den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck usw.) abhängt und sich hauptsächlich auf die Stoffmenge beschränkt. Wird hingegen ein Gas z.B. in einen Behälter gebracht, so breitet sich das Gas homogen im Inneren des Behälters aus und das Volumen des Gases gleicht jenem des Behälters. Die Menge eines Gases kann über die Masse, die Teilchenanzahl und über die Stoffmenge angegeben werden. Die Angabe der Masse eines Gases ist häufig unzweckmäßig, da diese sehr gering ist. Die Teilchenanzahl hingegen ist sehr groß und deshalb als Angabe sehr unpraktisch. Viel praktischer ist die Mengenangabe in der Stoffmenge ν . Dabei erfolgt eine Normierung zur Bezugsmenge N_A ($N_A = 6,022142 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) eines bestimmten Stoffes, welche im Internationalen Einheitensystem (SI) als das Mol anerkannt ist. [Jousten.2013]

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad (2.1)$$

mit: ν Stoffmenge
 N Teilchenanzahl an Atomen oder Molekülen
 N_A normierte Bezugsmenge eines Stoffes

2.3. Allgemeiner Transport von Gasen durch Feststoffe

Der Gesamtvorgang der Gasdurchlässigkeit zwischen abgeschlossenen Bereichen wird als Permeation bezeichnet. Dieser setzt sich beispielsweise zwischen zwei Räumen aus der Adsorption an die Wandoberfläche, der Diffusion durch die Wand und der Desorption von der Wandoberfläche zusammen. Die sogenannte Permeationsfähigkeit beschreibt hier die Gasdurchlässigkeit einer Wand. Hingegen eine Vakuumkammer oder -röhre von *HYPERLOOP* wird über den möglichen aufzubringenden Enddruck definiert, welcher im Wesentlichen von der Gasdurchlässigkeit der Umhüllung, der Gasabgabe im Kammerinneren sowie vom Gasdurchgang durch Poren, Kapillaren und eventuell vorhandener Lecks abhängig ist. [Jousten.2013]

2.3.1. Berechnung der Gasdurchlässigkeit

Zur Berechnung der Gasdurchlässigkeit werden in der Literatur verschiedene Herangehensweisen mehrerer Autoren angegeben. Folgende Autoren können dabei namentlich erwähnt werden: [Santner.2016]

- Darcy: Durchflussrate in m^3/s bei definiertem Messdruck
- Barrer: Durchflussrate in m^3/s bei Normaldruck oder Verlustleistung in $\text{Pa m}^3/\text{s}$
- Wutz: Permeationsstrom in $\text{Pa m}^3/\text{s}$
- Schäfer: Molenstrom in m/s

Prinzipiell sind die Formelwerke, mit Ausnahme nach *WUTZ*, ähnlich der verbreiteten Methode

zur Durchströmung poröser Materialien (Filterdurchströmung) nach *DARCY* aufgebaut. Die in *WUTZ* beschriebene Permeation beruht nicht auf einer Durchströmung wie nach *DARCY*, sondern auf Diffusion eines Gases durch ein Material. Die Berechnung erfolgt jedoch quasi analog zu *DARCY* oder *BARRER*. Auch der Molenstrom kann nach *WUTZ* sehr einfach in einen Permeationsstrom umgerechnet werden ($1 \text{ mol/s} = 2437,4 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$). [Jousten.2013]

Die in den nachfolgenden Kapiteln 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 zitierte Permeationsleitfähigkeit \bar{q}_{perm} nach *WUTZ*, wurde aus der in Gl. 2.2 angegebenen Formel berechnet. [Jousten.2013]

$$q_{pV} = \bar{q}_{perm} \times (p_1 - p_2) \times \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

mit:	q_{pV}	Permeationsstrom $\left[\frac{\text{Pa} \times \text{m}^3}{\text{s}}\right]$
	\bar{q}_{perm}	Permeationsleitfähigkeit $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$
	A	durchströmte Fläche $[\text{m}^2]$
	p_1, p_2	Außendruck, Innendruck $[\text{Pa}]$
	d	Dicke je durchströmte Länge $[\text{m}]$

Bei der Verwendung von Permeabilitätskennwerten ist es wichtig zu wissen, wofür diese verwendet werden bzw. welche Einflussgrößen in der Berechnung berücksichtigt werden. Jene Methode nach *DARCY* für poröse Materialien nach Gl. 3.7, bildet auch die Basis zur Permeabilitätsmessung des eigenen Versuchsprogramms in Kap. 5.

2.3.2. Gasdurchlässigkeit von Metall

Die Gasdurchlässigkeit von Metallen ist stark von der vorherrschenden Temperatur abhängig. Nimmt diese zu, kommt es zu Dehnungen im Metall, was letztendlich zu höheren Gasdurchlässigkeiten führt. Das Palladium-Wasserstoff-System (Pd-H_2) stellt für die Gasdurchströmung den geringsten Widerstand dar. Hinsichtlich der Durchströmung von Gasen, durchdringt Wasserstoff Metalle am leichtesten. Dementsprechend ist die Permeationsleitfähigkeit \bar{q}_{perm} nach *WUTZ* von Wasserstoff durch Palladium am größten. Edelstahl besitzt eine geringere Wasserstoffdurchlässigkeit als Normalstahl. Silber ist für Sauerstoff gut durchlässig und somit ein Sonderfall unter den Metallen. [Jousten.2013]

2.3.3. Gasdurchlässigkeit von Glas und Keramik

Die Gasdurchlässigkeit von Quarzglas ist bereits bei Zimmertemperatur für Helium und zum Teil für Wasserstoff gegeben, wobei diese über Diffusion durch „kleine Löcher“ (Poren) in der Glasstruktur begründet werden kann. Bei abnehmendem SiO_2 -Gehalt sinkt die Durchlässigkeit für Helium. Daraus folgend weisen Weichgläser eine niedrigere Permeationsleitfähigkeit als Hartgläser auf. Für Keramiken sind in der Literatur keine vergleichbaren Messungen zu finden. [Jousten.2013]

2.3.4. Gasdurchlässigkeit von Kunststoffen

Besonders bei Kunststoffen, die als abdichtendes Medium wie z.B. als O-Ringdichtung eingesetzt werden, spielt die Gasdurchlässigkeit eine wichtige Rolle. Viton, Perbunan und Silikongummi sind für Helium durchlässig und werden beispielsweise in der Lecksuche verwendet. Dazu werden hauptsächlich Druckabfalls- bzw. Druckanstiegsmessungen durchgeführt. [Jousten.2013]

2.3.5. Vergleich der Gasdurchlässigkeit unterschiedl. Materialien

Im Handbuch nach *WUTZ* [Jousten.2013] werden Gasdurchlässigkeiten mehrere Gase durch verschiedene Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen aufgelistet. In der nachstehenden Abb. 2.2 sind Permeationsströme nach *WUTZ* bei einer Wandtemperatur von 20 °C durch zuvor erwähnte Materialien wie Metallen (Palladium, Stahl, Eisen, Kupfer), Glas (Quarzglas) und Kunststoffen (Silikongummi) aufgelistet. Als Gasmedium diente dabei Stickstoff H_2 mit Ausnahme von Kunststoffen - hier gab es nur eine Angabe mit Helium He. Vergleichsweise wurde eine Permeationsleitfähigkeit (entspricht einem Permeabilitätskoeffizienten $K=1E-23 m^2$) von ultrahochfestem Beton angegeben.

SANTNER [Santner.2016] zeigt in einem Beitrag, dass die Vergleichbarkeit der verschiedenen Materialien gegeben ist. Zumindest können die Berechnungsvarianten auf eine gleiche Größe gebracht werden und die Permeation unabhängig von der Ursache (wie z.B. Strömung, Diffusion, ...) verglichen werden. Vor allem beruht die Berechnung nach *DARCY*, welche in der fortlaufenden Arbeit noch genauer erläutert wird, auf der Ursache einer Strömung durch poröse Materialien und lässt andere Effekte wie Diffusion usw. außer Acht.

2.3. Allgemeiner Transport von Gasen durch Feststoffe

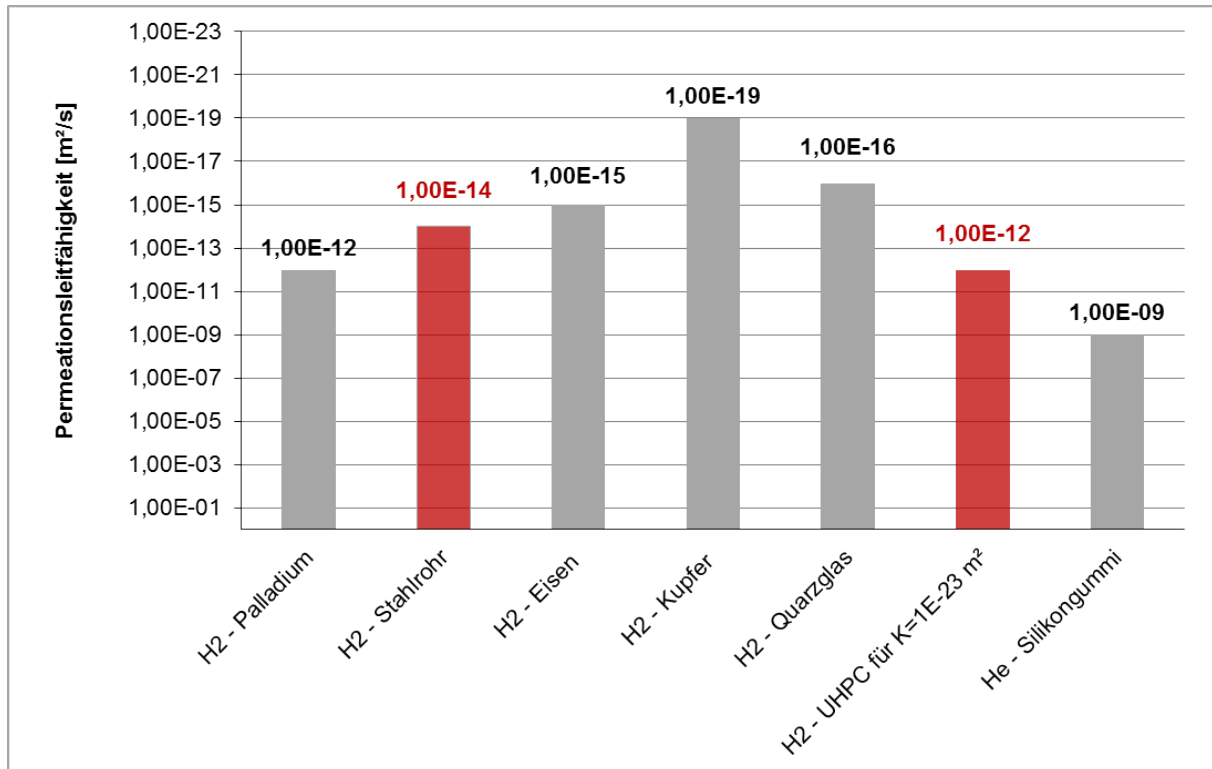


Abbildung 2.2.: Permeationsleitfähigkeit \bar{q}_{perm} von Stickstoff H₂ bzw. Helium He durch verschiedene Materialien bei 20°C nach Anlehnung an WUTZ [Jousten.2013]

3. Transport von Gasen durch zementgebundene Baustoffe

3.1. Strukturentwicklung von zementgebundenen Baustoffen - Hydratation und Verdichtung

Diese Arbeit zielt auf die Gasdichtigkeit von ultrahochfestem Beton, welcher den zementgebundenen Baustoffen zuzuordnen ist, ab. Konventionelle Baustoffe wie z.B. Normalbeton werden weitestgehend als poröse, inhomogene Produkte klassifiziert, während Metalle als homogene Baustoffe angesehen werden. Ein klassischer Normalbeton wird in der Regel als heterogenes 3-Phasen-Gemisch definiert und setzt sich aus Zement (Bindemittel), Wasser und Gesteinskörnung zusammen. Das Masseverhältnis von Wasser zu Zement wird als Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert) bezeichnet. Die Struktur des erhärteten Zementleims bestimmt die physikalischen Eigenschaften und Festigkeiten des Endprodukts.[Wolf.2016] Die Struktur von zementgebundenen Baustoffen ist vor allem vom Hydratationsprozess sowie von der Verdichtung des Betons abhängig.

3.1.1. Hydratation

Das Erstarren und Aushärten von Zementleim basiert auf der Reaktion von Zement mit Anmachwasser. Dieser Aushärtungsvorgang wird als Zementhydratation bezeichnet und läuft in drei zeitlich getrennten, aufeinander folgenden Hauptphasen, den Hydratationsphasen ab, welche letztlich zur Bildung des wasserbeständigen Zementsteins führen.[Gruebl.2001]

Bauaufsichtlich zugelassene Zemente in Europa werden in der ÖN EN 197-1:2011-11 geregelt. Grundsätzlich wird die Zusammensetzung in Haupt- und Nebenbestandteile unterschieden. Innerhalb der Zemente kann jedoch der stoffliche Aufbau beider Gruppen stark variieren. Den

Hauptbestandteilen werden die festigkeitsbildenden Eigenschaften und den Nebenbestandteilen die Eigenschaftsoptimierenden, wie Erstarrungsbeginn, Verarbeitbarkeit, Ansteifverhalten udgl., zugeschrieben. Der Portlandzement CEM I besteht zu 95-100% aus gemahlenem und gebranntem Portlandzementklinker und nimmt damit eine Sonderstellung in der Zementfamilie ein. In anderen Zementarten ist der Portlandzementanteil mit 65-95% etwas geringer und trägt maßgeblich zur gewünschten Festigkeit der Betone bei. Portlandzementklinker setzt sich aus vier Hauptphasen zusammen:[Wolf.2016]

- Tricalciumsilicat (Alit - C_3S)
- Dicalciumsilicat (Belit - C_2S)
- Tricalciumaluminat (Aluminat bzw. Celite - C_3A)
- Calciumaluminatferrit (Ferrit C_2A,F)

Wenn silikatische Klinkerphasen (Alite C_3S oder Belite C_2S) mit Wasser in Kontakt kommen, reagieren diese zu amorphen Calciumsilikathydraten, den sogenannten C-S-H Pasen und zu Calciumhydroxid bzw. als Portlandit bekannt. Mit zunehmendem Hydratationsfortschritt lagern sich die wasserhaltigen Kristallfaser-Verbindungen (kurz: C-S-H) zu leisten- und blättchenförmigen Strukturen aneinander, welche 60 Vol.-% aller Hydratationsprodukte einnehmen und für die maßgeblichen Festigkeiten des Zementseins verantwortlich sind. Das ausfallende Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ nimmt ca. 22 Vol.-% der Hydratationsprodukte ein und hat aufgrund der kleinen spezifischen Oberfläche wenig Einfluss auf die Festigkeitsbildung.[Ma.2010] Die Hydratationsprodukte aus C_3A und C_4AF tragen auch nur wenig zur Festigkeitsentwicklung in der Zementmatrix bei.[Wolf.2016] Tabelle 3.1 zeigt die Reaktionen typischer Portlandzemente:

Tricalciumsilicat + Wasser	: $2C_3S + 10,6 H$	\longrightarrow	$C_{3,4}S_2H_8 + 2,6 CH$: C-S-H + Calciumhydroxid
Dicalciumsilicat + Wasser	: $2C_2S + 8,6 H$	\longrightarrow	$C_{3,4}S_2H_8 + 0,6 CH$: C-S-H + Calciumhydroxid
Tricalciumaluminat + Wasser	: $C_3A + 3CsH_2 + 26H$	\longrightarrow	$C_6As_3H_{32}$: Trisulfat bzw. Ettringit
Tricalciumaluminat + Trisulfat + Wasser	: $2C_3A + C_6As_3H_{32} + 4H$	\longrightarrow	$3C_4AsH_{12}$: Monosulfat
Tricalciumaluminat + Calciumhydroxid + Wasser	: $C_3A + CH + 12H$	\longrightarrow	C_4AH_{13}	: Tetracalciumaluminathydrat
Calciumaluminatferrit + Calciumhydroxid + Wasser	: $C_2AF + 2CH + 10H$	\longrightarrow	$2C_3(A,F)H_6$: Hydrogarnat bzw. Aft- und Afm-Phasen

Tabelle 3.1.: *Stöchiometrie der Reaktionen typischer Portlandzemente in Verbindung mit Wasser [Tennis.2000]*

Nachstehende Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung der Hydratationsbildung und den Gefügebautbau der vier Hydratationsstadien:

3.1. Strukturentwicklung von zementgebundenen Baustoffen - Hydratation und Verdichtung

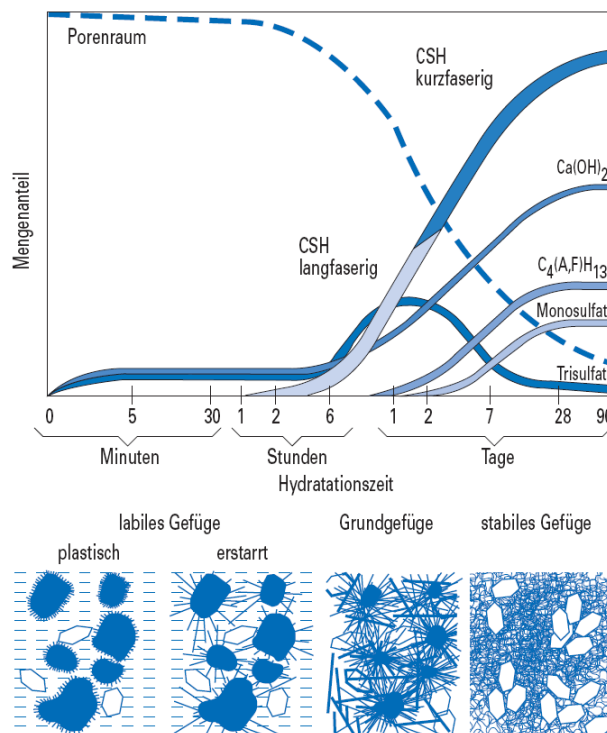


Abbildung 3.1.: Schematische Darstellung der Hydratationsphasen des Zements mit Gefügeentwicklung [ZementHB.2002]

3.1.2. Verdichtung unter Druck

3.1.2.1. Schleuderbeton - Entwicklung, Prozess und Anwendung

Entwicklung

Bereits im Jahre 1896, kurz nach der Erfindung des Eisenbetons, wurden in Frankreich Maste, Säulen und Pfähle aus Eisenbeton hergestellt. Nach dem Bestreben einer Gewichtsverminderung wurden einerseits Querschnitte in Längsrippen aufgelöst, andererseits die Idee zur Gewichtseinsparung über Hohlquerschnitte, geboren. Als aufgelöste Querschnitte sind hauptsächlich I-Querschnitte oder T-Querschnitte zu sehen, die aufgrund der geringen Festigkeit und Dichte frühzeitige Korrosionsschäden aufwiesen. Die Herstellung von Hohlquerschnitten im Schleuderverfahren ruft neben der Gewichtsreduzierung auch einen höheren Verdichtungsgrad der Bauteile hervor.[Basca.1981]

Im Jahre 1907 kommt es zur Anmeldung des ersten Patents für Schleuderbeton der Baufirma Otto & Schlosser in Meisen (eh. DDR), welche auch die erste Schleuderbeton-Mastfabrik er-

richtet. Dabei wird ein Bewehrungskorb in eine teilbare und relativ leichte Außenform aus Holz mit innenliegendem Stahlblech eingesetzt und anschließend wird der Beton eingefüllt. Danach wird die Form in die Lauftrommel der Schleudermaschine eingeschoben, fixiert und in Rotation versetzt. Unter Verwendung des Prinzips der Zentrifugalkraft verteilt und verdichtet sich der Beton entlang der Form und umhüllt gleichzeitig die Bewehrung. Diese Schleudermaschine, auch bekannt als Schlosser-Maschine, kommt auch heutzutage noch in vielen verschiedenen Ländern und Werken zum Einsatz. Damit können Produkte bis zu einem Maximaldurchmesser von 630 mm hergestellt werden und eignen sich besonders für kleine und mittlere Maste. Bis zur Einführung der maschinellen Vibrationsverdichtung in den 40er Jahren, um hochwertigen Beton herzustellen, war das Schleuderverfahren für die Praxis sehr bedeutend. [Basca.1981]

Zwischen den Jahren 1925 und 1935 wird auch in England, Österreich und Spanien mit der Entwicklung von Schleuderbetonmaste begonnen. Der von Hume aus England stammende Rollenbank-Typ hat sich bis heute bewährt und wird weltweit bei allen Anlagen im weiterentwickeltem System verwendet. Dieser Maschinentyp ist durch seine relativ schweren Stahlformen mit Laufringe, welche auf angetriebene Laufrollen aufliegen, gekennzeichnet. Nachstehende Abbildungen 3.2 und 3.3 zeigen den Rollenbank-Typ von Hume, England. [Basca.1981]

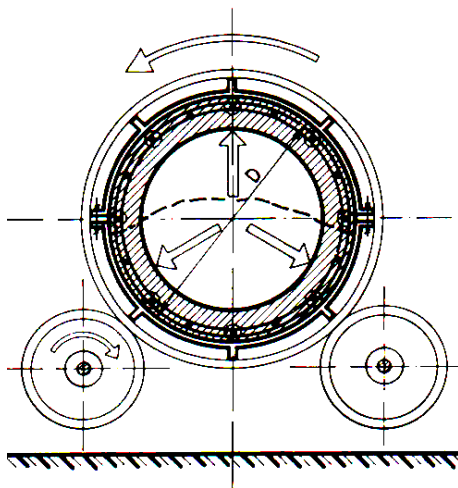


Abbildung 3.2.: *Prinzipskizze einer Rollenbank* [Basca.1981]

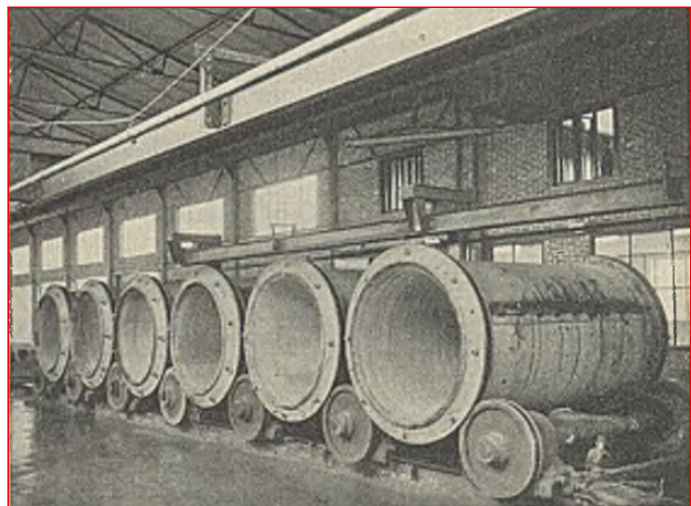


Abbildung 3.3.: *Rollenbank* [Marquardt.1930]

Mech. Grundlagen im Schleuderprozess

Das physikalische Prinzip der Zentrifugalkraft wird in der Rotationsbewegung der Lauftrommel zunutze gemacht und kann wie folgt angeschrieben werden:

3.1. Strukturentwicklung von zementgebundenen Baustoffen - Hydratation und Verdichtung

$$S = \frac{\omega^2}{g} \times \gamma \times V \times r \quad (3.1)$$

wobei als S Schleuderkraft [kg]
 ω Winkelgeschwindigkeit [$\frac{1}{s^2}$]
g Erdbeschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
 γ spez. Gewicht [$\frac{kg}{m^3}$]
V Volumen [m^3]
r Radius [m] gekennzeichnet sind.

Im Schleudervorgang wird der Beton nach außen gedrückt und durch den entstehenden Druck verdichtet sich der Beton. Die Schleuderkraft wirkt in der Rotationsbewegung einmal gegen das Eigengewicht der Schleudermasse senkrecht nach oben und im anderen Fall mit der Erdbeschleunigung nach unten. Um den Beton stets in Bewegung zu halten muss dazu die Erdbeschleunigung in der Aufwärtsbewegung überwunden werden und kann wie folgt angeschrieben werden: [Marquardt.1930]

$$n = \frac{30}{\sqrt{r}} \quad (3.2)$$

wobei als n Anzahl der Mindestumdrehungen [$\frac{U}{min}$]
r Radius [m] gekennzeichnet sind.

Damit sich die Betonmasse über den Umfang gut verteilen kann und es zu keinen ungleichmäßigen Wandstärken der Rohre kommt, muss die Umdrehungszahl von $n=30$ mehrfach erhöht werden sodass die Wirkung der Erdbeschleunigung vernachlässigbar klein wird.

Anwendungen

- Rohre für Trink-, Nutz- und Abwasser:
Vor allem im Bereich großer Ver- und Entsorgungsleitungen mit Durchmesser bis über 300 cm und Längen von 5 m aufwärts, werden Schleuderbetonrohre im schlaffen, bewehrten oder vorgespannten Zustand eingesetzt. Ist eine Produktion am Stück aus Fabrikations- bzw. Transportgründen nicht möglich, besteht die Möglichkeit via Längsvorspannung kürzere Rohre zu verbinden. [Basca.1981]
- Pfähle und Stützen im Hochbau:
Kleinpfähle mit Längen von 4-12 m sowie 30-45 cm im Durchmesser erreichen Tragfä-

higkeiten von 0,3-1,0 MN und werden in den Boden gerammt. Anhand mechanischer Kupplungen sowohl durch Schweißen als auch Kleben mit Kunstharzmörtel, können Rammpfähle gegebenenfalls verlängert werden und somit an die vorherrschenden Bodenverhältnisse angepasst werden. Stützen aus Schleuderbeton werden oft aus Gründen der Ästhetik und der hohen Brandsicherheit im mehrgeschossigem Hochbau und Hallenbau verwendet.[Basca.1981]



Abbildung 3.4.: Hochbewehrte Schleuderbetonstützen, UKH-Linz [Rinnhofer.2003]

- Pfähle und Pfeiler im Brückenbau:
Pfähle aus Schleuderbeton bieten hohen Widerstand für Gründungen im freien Wasser und können sehr elegant ausgebildet werden, wenn der Durchmesser von Brückenpfeiler und Pfahl aufeinander abgestimmt sind.[Basca.1981]
- Pfähle im Hafengebäude
- Lichtsäulen und Lichtmaste
- Fahrleitungsmaste der Eisenbahn
- Tragstützen bei Seilbahnen

Aus Gründen der Vollständigkeit werden in den folgenden Unterkapiteln weitere Verdichtungsmöglichkeiten von Beton genannt.

3.1.2.2. Stampf- und Walzverdichtung

Der durch Stampfen oder Walzen aufgebrachte Druck komprimiert den Beton und sorgt für ein dichteres Gefüge. Diese Art der Verdichtung kommt ausschließlich bei Betonen mit untergeordneten Festigkeiten (Mager- und Füllbeton) zum Einsatz und wird z.B. zur Verdichtung von Sauberkeitsschichten angewendet.[Transportbeton.Luzern]

3.1.3. Verdichtung unter Vibration

3.1.3.1. Innenrüttler

Unter Innenrüttler werden hauptsächlich Rüttelfalschen verstanden. Der in der Rüttelflasche eingebaute Excenter wird rotiert (ca. 12.000 U/min) und erzeugt Schwingungen. Je nach Bauart und Wirkungsgrad dieser hochfrequenten Rüttler (auch als Vibriernadeln bezeichnet) sind bestimmte Abstände beim Absenken der Rüttelflasche einzuhalten.[Transportbeton.Luzern]

3.1.3.2. Aussenrüttler

Bei Aussenrüttlern wird zwischen Schalungs- und Oberflächenrüttlern unterschieden:

- Schalungsrüttler: Wie der Name verrät, wird unter Verwendung des Schalungsrüttlers die Schalung in Schwingung versetzt, wobei die Verdichtung verglichen zum Innenrüttler als weniger effektiv angesehen wird. Deswegen werden diese nur dann eingesetzt, wenn Innenrüttler nicht verwendet werden können wie z.B. bei Betonagen im bergmännischen Tunnelbau.[Transportbeton.Luzern]
- Oberflächenrüttler: Bei diesem Verfahren wird ein sogenannter Abzugsbalken bei Bodenplatten oder Betondecken bzw. ein sogenannter Oberflächenfertiger im Betonstraßenbau eingesetzt. Da die Tiefenwirkung nur ca. 5-10 cm beträgt, wird der Abzugsbalken oft kombiniert mit Innenrüttlern eingesetzt. Um die Dichtigkeit und Festigkeit der Betonoberfläche zu erhöhen, kann eine Vakuumbehandlung, welche das überschüssige Wasser an der Betonoberfläche abführt, vorgenommen werden.[Transportbeton.Luzern]

3.1.4. Selbstverdichtend

Das Grundprinzip vom selbstverdichtenden Beton liegt darin, dass zur Verdichtung keine Energie zugeführt werden muss. Neben der Verdichtung, entlüftet und nivelliert sich der Beton von selbst. Betreffend der Rezeptur weist der selbstverdichtende Beton im Vergleich zum Normalbeton einen erhöhten Bindemittelanspruch sowie einen erhöhten Anteil an Verflüssigern auf. Bei der Einbringung des selbstverdichtenden Betons ist die Zeit, dass sich der Beton ausreichend entlüften kann, sehr relevant. Beispielsweise ist herkömmlicher ultrahochfester Beton UHPC selbstverdichtend.

3.2. Poren im Beton - Arten, Dimension und Messmethoden

3.2.1. Allgemein

Als Poren können alle Einschlüsse, Vertiefungen, Zwischenräume und Kanäle in Feststoffen bezeichnet werden. Die Güteklasse von Festbeton wird über deren Festigkeit und Dauerhaftigkeit festgelegt, welche wiederum unmittelbar mit der Betonstruktur zusammenhängt und letztendlich über die Art, Anzahl und Dimension der Poren definiert wird. Poren im Festbeton können mit Luft, Wasser oder anderen Flüssigkeiten bzw. Gasen gefüllt sein und können teilweise fluide wechseln, sprich aufnehmen oder abgeben. Allgemein kann gesagt werden, dass nahezu alle Festbetoneigenschaften, mit Ausnahme der Dämmwirkung sowie einer Frost-Tau-Beanspruchung, mit zunehmendem Porenraum verschlechtert werden. Ein abnehmender W/Z-Wert reduziert den Porenraum in der Zementmatrix. Bleibt der W/Z-Wert unverändert, kann auch bei fortschreitender Hydratation ein geringerer Zementporengehalt festgestellt werden, was auf einen höheren Hydratationsgrad zurückzuführen ist. Der Hydratationsgrad ist direkt an die Gesamtporosität gekoppelt und wirkt sich bei fortgeschrittener Hydratation in einer geringeren Gesamtporosität aus als zu Beginn der Hydratation, was Abb. 3.5 zeigt. Neben der Tatsache einer steigenden Festigkeit mit zunehmendem Betonalter, ist in Abb. 3.6 sehr gut ersichtlich, dass der Anteil der feinen Poren im Alter zunimmt, während die Gesamtporosität abnimmt.[Gruebl.2001][Macht.2007]

3.2. Poren im Beton - Arten, Dimension und Messmethoden

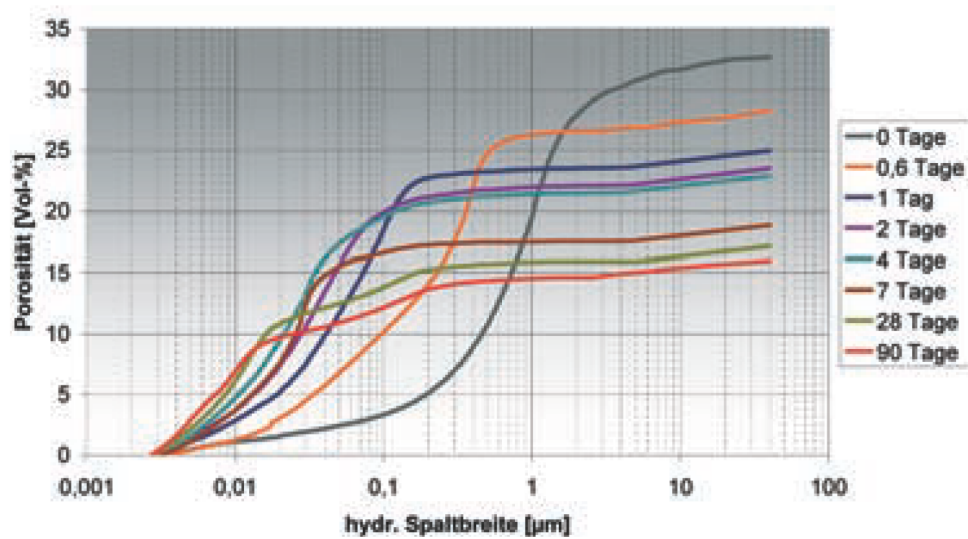


Abbildung 3.5.: Porengrößenverteilung und Gesamtporosität nach Betonalter [Macht.2007]

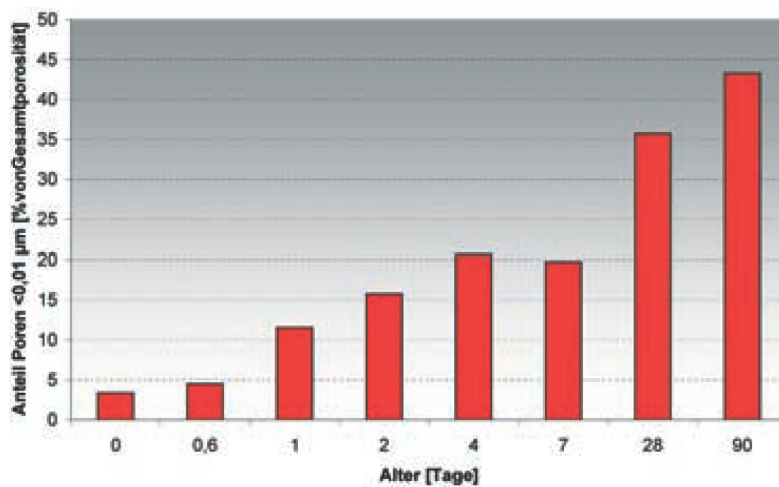


Abbildung 3.6.: Poren <0.01 µm der Gesamtporosität nach Betonalter [Macht.2007]

Poren im Beton prägen dessen Struktur und beeinflussen damit die Dichtigkeit vom Beton. Je weniger Poren im Betongefüge vorhanden sind, desto höher ist die Packungsdichte und daraus folgend kann eine hohe Dichtigkeit bzw. geringe Permeabilität erzielt werden - eine dementsprechende Dichtigkeit der Rezeptkomponenten wie Zuschläge udgl. wird hier vorausgesetzt. Zur Analyse der Betonstruktur werden die Poren nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt, wobei in der Literatur verschiedene Klassifikationen von Poren auffindbar sind. Da Poren im Beton hinsichtlich der Gasdichtigkeit besonders entscheidend sind, wird in weiterer Folge näher darauf eingegangen.

3.2.2. Klassifizierung des Porensystems

Allgemein unterscheidet die Literatur zwischen Verdichtungs-poren, Luftporen (künstliche Poren durch Luftporenbildner) Kapillarporen und Gelporen. Abb. 3.7 gibt einen Überblick über den Größenbereich der Poren im Beton, wobei der Tabelle 3.2 eine genaue Aufschlüsselung der Poren und deren Untersuchungsmethoden entommen werden kann. Dabei können Verdichtungs-

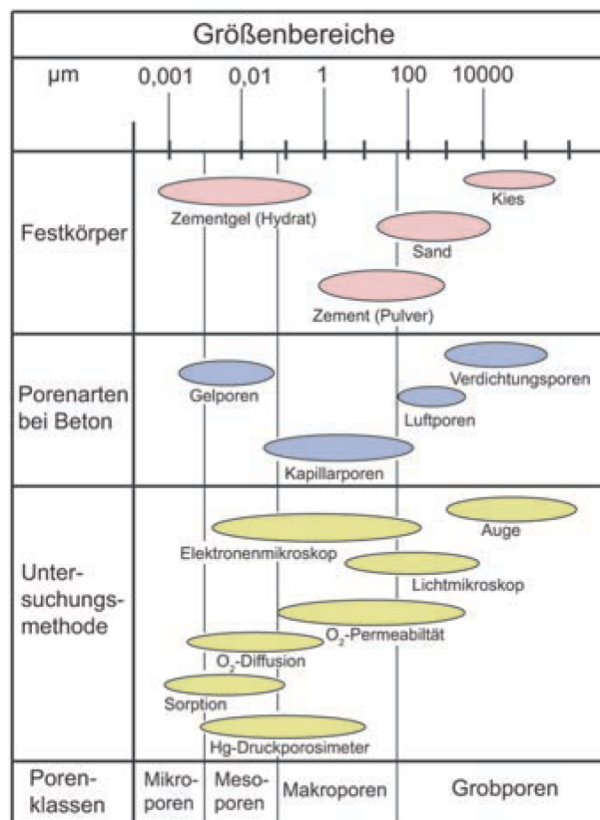


Abbildung 3.7.: Übersicht - Größenbereiche im Beton und deren Messmethoden [Macht.2007]

und Luftporen mit freiem Auge oder zumindest unter einem Lichtmikroskop wahrgenommen werden. Für Kapillar- und Gelporen muss auf andere, aufwändigere Untersuchungsverfahren wie beispielsweise die Quecksilberporosimetrie - siehe Kapitel 6.1.2.2 - zurückgegriffen werden. WOLF *et al.* fasst die Poren nach Entstehung, geometrischer Form und Größe bzw. hydraulischem Radius mehrerer Autoren zusammen, wobei hier auf die namentliche Erwähnung der jeweiligen Autoren aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet wird und auf die Dissertation von WOLF [Wolf.2016] verwiesen wird. Um poröse Systeme zu beschreiben müssen Kennwerte definiert werden. Zwei wichtige Kennwerte werden in weiterer Folge kurz beschrieben.

Poren nach geometrischer Form und Zugang

Hinsichtlich der geometrischen Form und dem Zugang zur Pore, können Poren ursprünglich aus dem Verfahren der Quecksilberporosimetrie, der Heliumpyknometrie und der Stick- oder Sauerstoffsorption unterschieden werden. Da die benannten Verfahren alle auf einer druckbeaufschlagten Injektion beruhen, lassen sich Unterschiede während der Messung nur unter der Annahme von unterschiedlichen Porengeometrien erklären. Vereinfachte Porenformen bzw. -zugänge nach Abb. 3.8 und 3.9 können durch unterschiedliche Strömungsvorgänge innerhalb eines Porensystems auf die unterschiedlichen hydraulischen Radien, differenziert werden.[Wolf.2016] Der hydraulische Radius bzw. Durchmesser stellt dabei eine theoretische Größe zur Abweichung eines kreisrunden Querschnitts dar und kann nach Gl. 3.3 angegeben werden.¹

$$d_h = \frac{4 \times A}{U} \quad (3.3)$$

mit: d_h hydraulischer Radius [m]
 A Querschnittsfläche [m²]
 U Umfang [m]

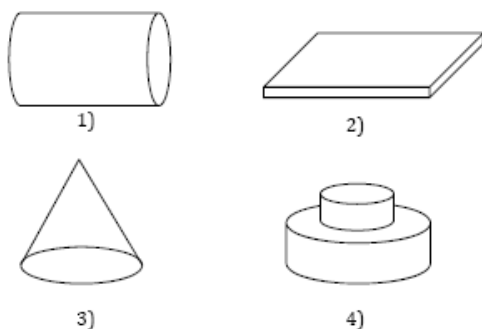


Abbildung 3.8.: Einteilung nach Porengeometrie [Wolf.2016]

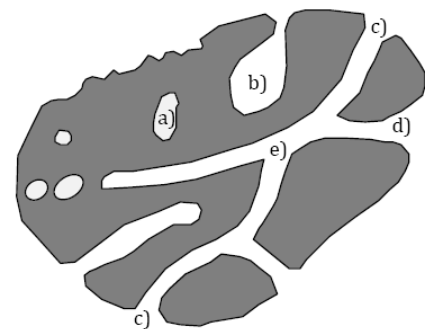


Abbildung 3.9.: Einteilung nach Zugänglichkeit [Wolf.2016]

Die in Abb. 3.8 dargestellten Geometrien (1=Zylinder, 2=Quader, 3=Kegel, 4=„Ink Bottle“(tintenflaschenförmig) - kleinerer Eingangsdurchmesser als Hauptporenraum) sind einfache Einheitsstrukturen. Hingegen lassen sich Strukturen höherer Ordnung wie beispielsweise eine Kugel oder netzwerkartige

¹https://de.wikipedia.org/wiki/Hydraulischer_Durchmesser, 07.08.2017

Strukturen grundsätzlich in ein-, zwei- oder dreidimensionale Poren einteilen. Weiters können Poren nach Abb. 3.9 hinsichtlich ihrer Zugänglichkeit wie folgt klassifiziert werden:[Wolf.2016]

- Offene Poren (Poren haben mind. zwei Öffnungen nach außen - c,d,e)
- Blinde Poren (Poren haben nach außen nur eine Öffnung - b)
- Isolierte bzw. geschlossene Poren (Poren haben nach außen keine Öffnung - a)

Poren nach Entstehung und Größe

Zur Klassifizierung von Poren nach Entstehung und Größe sind zwei verschiedene Modellvorstellungen zu erwähnen. Ersteres Modell unterscheidet in Entstehungsart und Größenverteilung, wobei im zweiten Modell nur auf die Größenverteilung, basierend auf den Ergebnissen aus Porosimetrie und Sorptionsmessung eingegangen wird.[Wolf.2016]

1. Modell - Poren nach Entstehung

- Verdichtungsporen - luftgefüllte Poren, welche sich bereits im Mischvorgang und anschließend im Einbau des Frischbetons bilden, aber im Verdichtungsprozess nicht ausgetrieben werden können. Dies kann einerseits auf eine hohe Oberflächenspannung der Pore und andererseits auf eine zu geringe Verdichtungsenergie zurückgeführt werden.
- künstliche Luftporen - durch chem. Zusätze eingebrachte Luftporen (Frost-Tau-Beanspruchung)
- Kapillarporen - durch Verdunsten von überschüssigem Wasser entstehende Poren
- Gelporen - Zwischenräume innerhalb der CSH-Kristalle (siehe Tab.3.2 - Interpartikulärer Raum) - Gelporen entstehen während der Hydratation, da das Volumen der Ausgangsstoffe größer ist als jenes der Hydratationsprodukte. Diese Volumendifferenz zuzüglich jener aus Schwinden, entspricht dem Anteil an Gelporen.

2. Modell - Poren nach Größe

In Tab. 3.2 ist das Porenmodell von *JENNINGS et al* und *SETZER* dargestellt. Neben den Porengrößen sind auch Messmethoden, Angaben zur Beschaffenheit des Wassers sowie die Einflüsse auf den Beton enthalten. Wie bereits erwähnt, gibt es in der Literatur keine einheitliche Klassifizierung nach der Porengröße. Abb. 3.10 von Scheydt [Scheydt.2014] zeigt verschiedene Klassifizierungen mehrerer Autoren. Darin schlägt *IUPAC* eine Porengrößenverteilung basierend auf Ergebnissen aus Porosimetrie- und Sorptionsmessungen nach hydraulischem Radius wie folgt vor:[Wolf.2016]

3.2. Poren im Beton - Arten, Dimension und Messmethoden

Porentyp	Beschreibung	Durchmesser	Technik zur Bestimmung	Einfluss und Beschaffenheit des Wassers ¹	Einfluss auf den Beton
Interpartikulärer Raum zwischen den C-S-H Lagen	strukturell	bis zu 0,5 nm	adsorption/thermisch	nicht- <i>evaporierbares</i> , strukturiertes Wasser kovalente Bindung, kein Kapillarmeniskus	Schwinden und kriechen bei allen r.F. < 11%
Gelporen	Mikroporen	0,5 nm bis 2,5 nm	adsorption/ MIP ² / IS ³	nicht- <i>evaporierbares</i> , stark adsorbiertes Wasser, intermolekulare Interaktionen kein Kapillarmeniskus	Schwinden und kriechen bei allen r.F. zwischen 11-35%
	klein	2,5 nm bis 10 nm	adsorption/ MIP / IS	<i>evaporierbares</i> , vorstrukturiertes Wasser, starke Oberflächenspannung, starker Kapillarmeniskus	Schwinden bis 50% r.F.
Kapillarporen	medium	10 nm bis 50 nm	SEM ⁴	<i>evaporierbares</i> , makroskopisches Wasser, moderate Oberflächenspannung, mittelmäßig starker Kapillarmeniskus	Druckfestigkeit, Permeabilität, Schwinden bei r.F. > 80%
	groß	50 nm bis 10 µm	SEM / OM ⁵	<i>evaporierbares</i> , makroskopisches Wasser	Druckfestigkeit, Permeabilität
Andere Poren	ITZ ⁶	20 µm bis 50 µm	SEM / OM	Verhält sich wie makroskopisches Wasser	Druckfestigkeit, Permeabilität
	Mikroriss	50 nm bis 200 µm	SEM / OM	Verhält sich wie makroskopisches Wasser	Druckfestigkeit, Permeabilität

¹ Angaben gemäß der von SETZER, 1977 erarbeiteten Informationen zum Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften von Beton

² MIP: Mercury Intrusion Porosimetry - Quecksilberdruckporosimetrie

³ IS: Impedance Spectroscopy - Impedanzspektroskopie

⁴ SEM: Scanning Electron Microscopy - Rasterelektronenmikroskop (REM)

⁵ OM: Optical Microscopy - Lichtmikroskopie

⁶ ITZ: Interfacial Transition Zone - Übergangsbereich der Grenzflächen (Zementgel & Inerte Gesteinskörnung)

Tabelle 3.2.: Porenmodell von JENNINGS et al und SETZER - Einteilung nach Größe und Zugänglichkeit von fluidalen Medien [Wolf.2016]

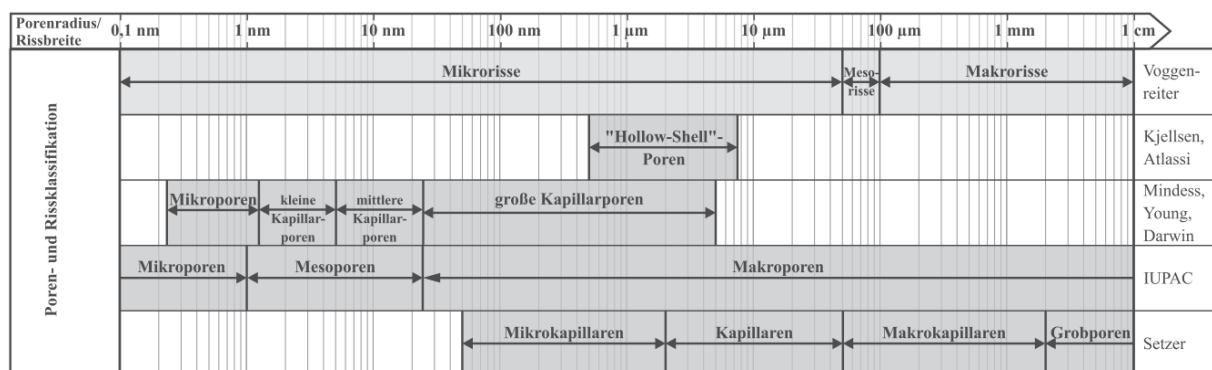


Abbildung 3.10.: Klassifikationen nach Porengröße aus der Literatur nach SCHEYDT [Scheydt.2014]

- Makroporen - Poren mit hydraulischem Durchmesser $d_h > 50 \text{ nm}$
- Mesoporen - Poren mit hydr. Durchmesser zw. $d_h = 1 \text{ nm}$ und 50 nm
- Mikroporen - Poren mit hydr. Durchmesser $d_h < 2 \text{ nm}$ entstehende Poren

An dieser Stelle ist anzumerken, dass anhand der Druckporosimetrie- und Sorptionsmessung ausschließlich das offene Porensystem untersucht werden kann und damit die Porengrößenradialverteilung nach *IUPAC* nur für ein offenes Porensystem, was in weiterer Folge auf für das eigene Versuchsprogramm gilt.

3.2.3. Durchlässigkeit des Porengefüges

Die Durchlässigkeit eines Porengefüges wird hauptsächlich durch dessen Konnektivität und Tortuosität sowie der Porosität bestimmt. Dabei steht die Konnektivität für den Vernetzungsgrad der Poren untereinander. Um die Konnektivität bzw. dieses zusammenhängende Porensystem zu minimieren, gilt es vor allem Kapillarporen zu minimieren. Aufgrund der Tatsache, dass geschlossene Poren beispielsweise vereinzelte Verdichtungsporen im Beton (im Gegensatz zu offenen Poren) keine Vernetzung mit anderen Poren aufweisen, beeinflussen diese Poren auch nicht die Durchlässigkeit des Betongefüges. In hochfestem bzw. ultrahochfestem Beton wird davon ausgegangen, dass ohnehin kein vernetztes Kapillarporensystem existiert und lediglich der Gelporenraum für den Transport von Flüssigkeiten und Gasen zur Verfügung steht. Hingegen beschreibt die Tortuosität nach Abb. 3.11 das Verhältnis einer Strecke l eines Ions bzw. Atoms oder Moleküls (Fluid) zwischen zwei Punkten im Porensystem über die direkten Verbindung der Länge l_0 . [Scheydt.2014]

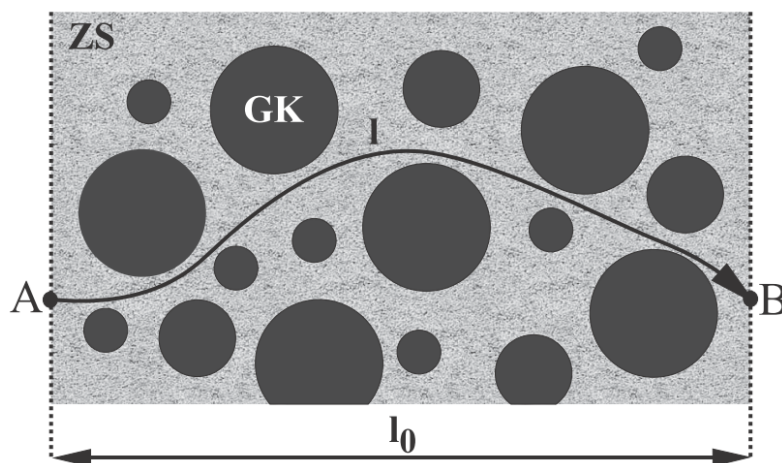


Abbildung 3.11.: Weg eines Ions, Moleküls oder Atoms (Fluid) durch den Beton [Scheydt.2014]

3.3. Transportmechanismen von Fluiden in porösen Stoffen

3.3.1. Grundsätzliches zum Transport in porösen Stoffen

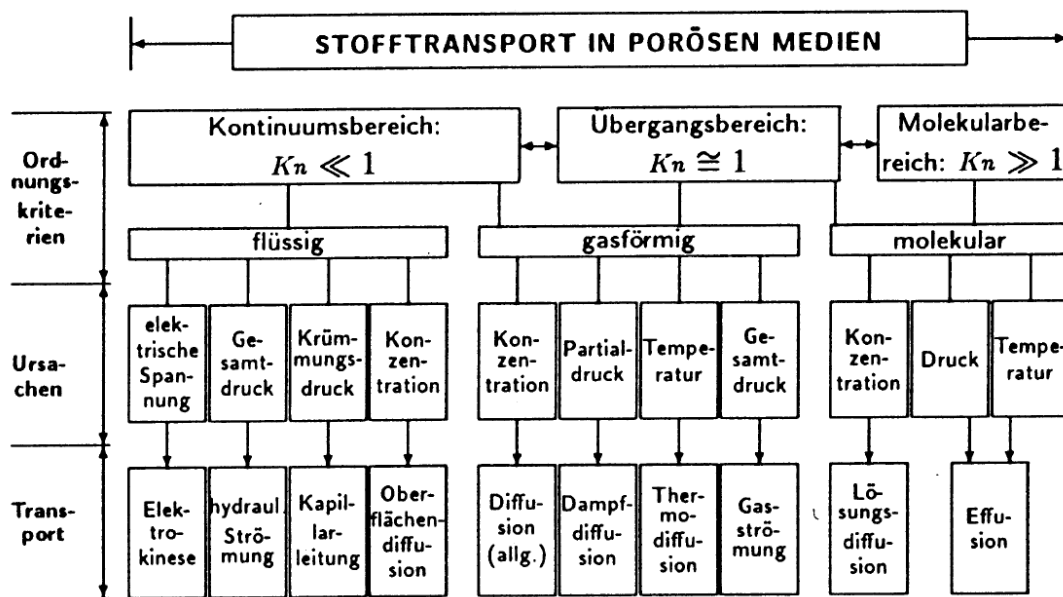


Abbildung 3.12.: Transportphänomene in porösen Baustoffen - Übersicht [Kießl.1987]

Der Stofftransport in porösen Medien (z.B. Beton) ist sehr komplex und kann in flüssigen und dampfförmigen Phasen erfolgen. Er hängt von Faktoren wie der Porosität, der Porenstruktur, vom Aggregatzustand des Fluids sowie von antreibenden Potentialen, wie Konzentrations- und Druckunterschieden, ab. Eine Übersicht über den Stofftransport in porösen Medien gibt Abb. 3.12. [Jooss.2001]

3.3.2. Charakterisierung von Gasströmungen

Die wichtigste Kennzahl um die Transportvorgänge poröser Stoffe zu beschreiben, ist die Knudsen-Zahl, basierend auf der freien Weglänge $\bar{\lambda}$. Die mittlere freie Weglänge $\bar{\lambda}$ ist definiert als die durchschnittliche Weglänge eines Teilchens (Atoms, Moleküls oder Elektrons udgl.) ohne Zusammenstoß mit anderen Teilchen oder anderwertigen Kollisionen (z.B. mit der Wandung) in einem gegebenen Material.² Nach LUTZ *et al.* ist diese von der Temperatur und vom Gesamt-

²https://de.wikipedia.org/wiki/Mittlere_freie_Wegl, 07.08.2017

druck abhängig.[Lutz.1994] Die Knudsen-Zahl nach Gl. 3.4 dient als dimensionslose Kennzahl zur Abschätzung des Strömungsverhaltens einer Gasströmung.³

$$Kn = \frac{\bar{\lambda}}{2 \times r} \tag{3.4}$$

- mit: Kn Strömungsgeschwindigkeit [-]
 $\bar{\lambda}$ Kapillarradius [m]
 r Querausdehnung des Strömungskanals ($2 \times r$ - kreisförmiger Querschnitt) [m]

In der Literatur werden zwei verschiedene Arten der Molekularbewegung [Lutz.1994; Oberbeck.1995], welche an die Knudsen-Zahl gekoppelt sind, dargestellt. Die Knudsenzahl verläuft zum Druck umgekehrt proportional. Bei kleinen Druck ist die Knudsenzahl groß und es liegt eine molekulare Strömung vor, hingegen bei großem Druck ist die Knudsenzahl klein und viskose Strömung liegt vor. Der Übergangsbereich zwischen den zwei Strömungsarten ist fließend und man spricht von einer Änderung im Gasstrom wenn ca. 90% dieser Änderung erreicht wurden.[Jousten.2013]

- $Kn < 1$ Kontinuumsbereich - viskose Strömung
- $Kn \cong 1$ Übergangsbereich
- $Kn > 1$ Effusions- bzw. Molekularbereich - molekulare Strömung

Das zweite Kriterium zur Strömungsart stellt die Strömungsgeschwindigkeit v dar. Darunter versteht man die mittlere Geschwindigkeit in Ausbreitrichtung, welche üblicherweise gemittelt über den Leitungsquerschnitt angegeben wird. Abb. 3.13 zeigt die molekulare Strömung in a, wobei b-d der viskosen Gasströmung zuzuordnen sind (b-gasdynamisch (Einlaufströmung), c-laminar, d-turbulent). Zur Bestimmung der Strömungsart wird die Reynoldszahl nach Gl. 3.5 herangezogen.[Jousten.2013]

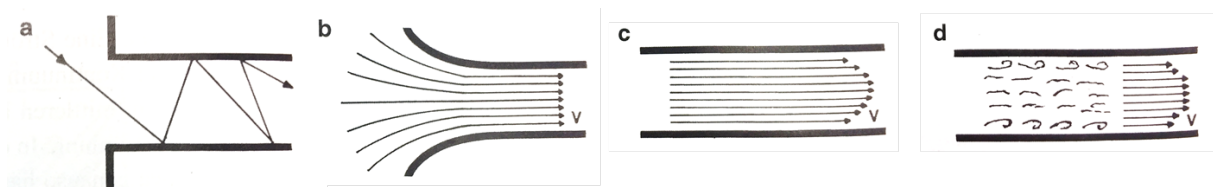


Abbildung 3.13.: Formen der Gasströmung

$$Re = \frac{v \times r}{\nu} \tag{3.5}$$

³<https://de.wikipedia.org/wiki/Knudsen-Zahl>, 07.08.2017

3.3. Transportmechanismen von Fluiden in porösen Stoffen

mit: v Strömungsgeschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$
 r Kapillarradius $[m]$
 ν kinematische Viskosität des Fluids $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Grundsätzlich spricht man nach Eibl et al. [Eibl.1989] von einer laminaren Strömung, wenn die Reynoldszahl in einem geraden Rohr mit kreisrundem Querschnitt $Re < 2300$ ist. In porösen Medien wie Beton ist die Strömung aufgrund der veränderlichen Kapillarradien bis zu $Re < 4$ laminar und wird auch selten überschritten. Somit liegt in porösen Stoffen fast ausschließlich laminare Strömung vor. [Gertis.1976] Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Strömungsart für den jeweiligen Transportmechanismus eines Fluids - siehe dazu Abb. 3.12 - sehr entscheidend ist.

In den nun folgenden Unterkapiteln werden typische, in zementgebundenen Baustoffen ablaufende Transportmechanismen von Fluiden angeführt, welche mit der Grundgleichung nach 3.6 beschrieben werden können.[Gertis.1976]

$$\text{Massenstrom} = \text{Koeffizient} \times \text{Druckgradient} \quad (3.6)$$

3.3.3. Permeabilität

Die Permeation, sprich die Gasdurchlässigkeit kommt aufgrund eines Druckgefälles zustande.[Ehrenberg.1996] Bei Durchströmung eines Körpers ist die Knudsenzahl $Kn \leq 1$ und liegt nach Abb. 3.12 im Kontinuums- bzw. im Übergangsbereich. Die allgemeine Darcy'sche Filtergleichung beschreibt eine stationäre, eindimensionale, laminare Strömung von Flüssigkeiten und Gasen durch ein poröses Medium und kann nach Gl. 3.7 angeschrieben werden.

$$Q = \frac{k \times A \times \Delta p}{\eta \times l} \quad (3.7)$$

mit:	Q	Volumenstrom $[\frac{m^3}{s}]$
	k	Permeabilitätskoeffizient $[m^2]$
	A	durchströmte Querschnittsfläche $[m^2]$
	Δp	Druckdifferenz $[Pa]$
	η	Viskosität des durchströmten Gases $[Pas]$
	l	durchströmte Länge (Dicke einer Schicht) $[m]$

3.3.4. Kapillare Wasseraufnahme

Wenn ein trockenes Porensystem mit einer benetzenden Flüssigkeit wie Wasser in Berührung kommt, wird diese von den Poren in den Festkörper hineingesaugt. Der Druckgradient ist hier der Kapillardruck, welcher für den Wassertransport verantwortlich ist. In Abhängigkeit der Viskosität, der Dichte, der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, der Porenstruktur und der Oberflächenenergie des Festkörpers, setzt sich der Kapillardruck in Gl. 3.8 wie folgt zusammen: [Ehrenberg.1996]

$$p_A = \frac{2 \times \sigma \times \cos \nu}{r} \quad (3.8)$$

mit:	p_A	Kapillardruck $[Pa]$
	σ	Oberflächenspannung $[\frac{N}{m}]$
	ν	Kontaktwinkel $[^\circ]$
	r	Porenradius $[m]$

Im Gegensatz zur Permeabilität und zur Diffusion ist der für den Transport verantwortliche Druckgradient von der Porenstruktur abhängig.[Ehrenberg.1996]

3.3.5. Diffusion

Die Diffusion beschreibt ein Partialdruckgefälle (bzw. Konzentrationsgefälle), das über den Transport von Flüssigkeiten, Gasen oder Ionen zu einem Konzentrationsaustausch führt.[Ehrenberg.1996] Sie überwiegt in trockenen Baustoffen, wenn die Kapillarleitung unbedeutend ist und keine Strömungen aufgrund des geringen Gesamtdruckunterschiedes auftreten können.[Jooss.2001] Die

3.3. Transportmechanismen von Fluiden in porösen Stoffen

thermische Eigenbewegung (Brown'sche Molekularbewegung) von Atomen, Molekülen oder Ionen ist der Auslöser für die Diffusion. Makroskopisch kann man sich einen gerichteten Massenstrom von hoher zu geringer Konzentration der jeweiligen Regionen vorstellen, obwohl die theoretische Bewegungsrichtung in alle Richtungen gleich groß ist.[Ehrenberg.1996]

Nach KLOPFER [Klopfer.1974] sind folgende Diffusionsarten in porösen Festkörpern bedeutend:

- Wasserdampfdiffusion
- Oberflächendiffusion

Als Wasserdampfdiffusion ist ein Diffundieren der gasförmigen Wassermoleküle durch die luftgefüllten Poren zu verstehen. Hingegen ist die Oberflächendiffusion Die Bewegung der Wassermoleküle durch eine Adsorptionsschicht.[Ehrenberg.1996]

3.3.6. Effusion

Bei diffundierenden Wassermolekülen gleicht der zurückgelegte Weg einem, wie in Abb. 3.14 (links) dargestellten, geknickten Linienzug. Dabei treten in den Knickpunkten Zusammenstößen, entweder mit anderen Molekularteilchen oder mit der Porenwandung auf. Der Weg zwischen den Zusammenstößen ist wie in Kapitel 3.3.2 als freie Weglänge λ definiert. Ist der Porendurchmesser sehr klein, wie im mittleren Bild in Abb. 3.14, wird der zurückgelegte Weg der Moleküle primär durch die Porenwandung bestimmt und man spricht dabei von Effusion. Eine Unterscheidung von Effusion und Diffusion kann durch die in Gleichung 3.4 angeschriebene Knudsenzahl ausgedrückt werden. Zwischen Partialdruckgefälle und Gesamtdruckgefälle kann in diesem Bereich nicht mehr unterschieden werden. Eine experimentelle Abgrenzung beider Transportarten (Effusion zu Diffusion) ist problematisch, da diese Transportgesetze sehr nah verwandt sind. Aus diesem Grunde wird der Effusion ein kleiner Anteil der Gasdiffusion zugeschrieben.[Ehrenberg.1996; Jooss.2001]

3.3.7. Einfluss der Baustofffeuchte auf den Transportmechanismus

Nach Philipp, de Vries und Krischer [Philip.1957; Krischer.1978] sinkt mit zunehmender Baustofffeuchte der Dampfdiffusionswiderstand. Neben der steigender Diffusion zeigen neuere Untersuchungen, dass dieses Phänomen vielmehr dem Effekt von Wasserinseln, einem Flüssig-

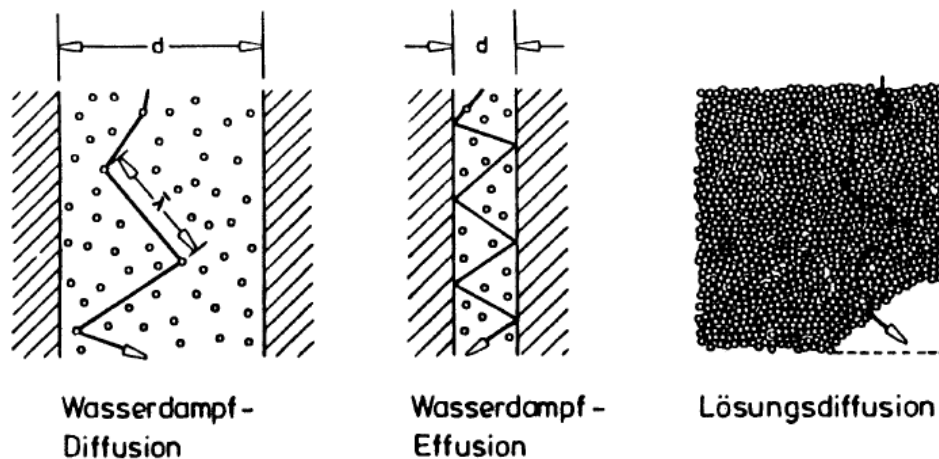


Abbildung 3.14.: Mittlere freie Weglänge $\bar{\lambda}$ bei Wasserdampfdiffusion, Wasserdampfeffusion und Lösungsmitteldiffusion [Lutz.1994]

keitstransport, zuzuschreiben ist. In Poren bilden sich bei steigender Feuchte durch Kapillarkondensation sogenannte Wasserinseln, in denen sich die Wassermoleküle sehr leicht weiterbewegen können und somit ein widerstandsfreier Bereich für den Transport entsteht.[Jooss.2001]

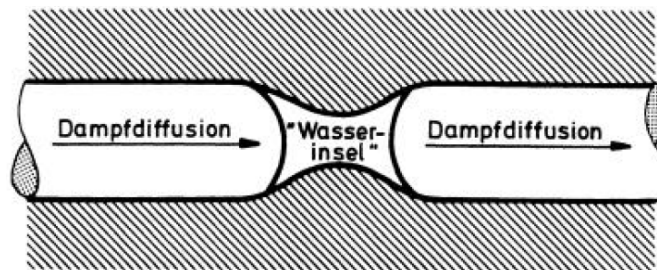


Abbildung 3.15.: Wasserinsel in Poren [Philip.1957]

3.3.8. Korrelation von Durchlässigkeit zu Festigkeit

Es ist unbestritten, dass mit zunehmender Festigkeit auch eine dichtere Struktur und letztendlich auch ein höherer Durchlässigkeitswiderstand erzielt werden kann. Diese Korrelation von Beton gilt nur für die Permeabilität und kann nach Gl. 3.9 aus [EuroInternationalCommitteeforConcrete.1993] angeschrieben werden.

$$\log\left(\frac{k_w}{k_{w0}}\right) = -0,7 \times \frac{f_{ck}}{f_{k0}} \quad (3.9)$$

3.3. Transportmechanismen von Fluiden in porösen Stoffen

mit:	k_w	Durchlässigkeitswert $\left[\frac{m}{s}\right]$
	k_{w0}	Referenzdurchlässigkeit $\left[10 \frac{m}{s}\right]$
	f_{ck}	Druckfestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
	f_{ck0}	Referenzdruckfestigkeit $\left[10 \frac{N}{mm^2}\right]$

Für Betonfestigkeiten von C 12 bis C 50 ergeben sich Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen 2×10^{-11} und 3×10^{-14} m/s. Dieser Durchlässigkeitsbeiwert k_w , Proportionalitätsfaktor des Darcy-Gesetzes kann über den Permeabilitätskoeffizienten K nach Gl. 3.10 errechnet werden.⁴ Für höherfeste Betone sind die Durchlässigkeiten dementsprechend geringer.

$$k_w = K \times \frac{\rho_W}{\eta_W} \times g \quad (3.10)$$

mit:	k_w	Durchlässigkeitswert $\left[\frac{m}{s}\right]$
	K	Permeabilitätskoeffizient $[m^2]$
	ρ_W	Dichte $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
	η_W	dynamische Viskosität $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$
	g	Erdbeschleunigung $\left[9,81 \frac{m}{s^2}\right]$

⁴<https://de.wikipedia.org/wiki/Darcy-Gesetz>, 31.08.2017

4. Technologie von UHPC - Ultra High Performance Concrete

4.1. Grundsatz

Zementgebundene Baustoffe wurden in den letzten Jahren stets weiterentwickelt, sodass die letzte Steigerung der ultrahochfeste Beton einnimmt [Schneider.2001]. Schon in den 30er Jahren zeigte *FREYSSINET* deutliche Festigkeitssteigerungen im Beton, wenn während der Erhärtungsphase ein Druck aufgebracht wird [Richard.1995]. Durch die Entwicklung von Hochleistungsbetonen in den späten 80er Jahren in Frankreich und Deutschland konnten extrem hohe Festigkeiten und verbesserte Dauerhaftigkeitseigenschaften erreicht werden [Schneider.2001]. Aufgrund des beschränkten Größtkorndurchmessers hat sich aus dem französischen Béton de Poudres Reactives (BPR) bzw. Reactive Powder Concrete (RPC) im deutschsprachigen Raum die Bezeichnung des ultrahochfesten Betones bzw. Ultra High Performance Concrete (UHPC) durchgesetzt [Koenig.2001]. Bild 4.1 demonstriert die Entwicklungsreihe unterschiedlicher Betone und deren Zusammenhang von Druckfestigkeit zu W/Z-Wert.

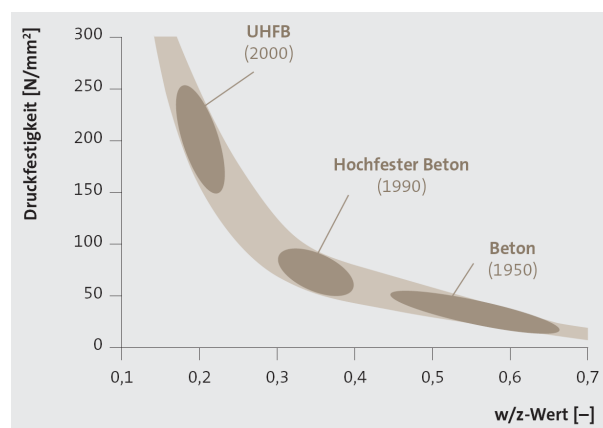


Abbildung 4.1.: Entwicklung der Betone in Abhängigkeit von W/Z-Wert zur Druckfestigkeit [Holcim.2011]

4.2. Prinzipien zur Erhöhung des Leistungsspektrums von Normalbeton zu UHPC

Basierend auf dem mechanisch begründeten Grundprinzip müssen bei der Herstellung von ultrahochfestem Beton Gefügestörungen minimiert werden. Konkret spricht man von Poren und Mikrorissen, die durch die richtige Wahl der Ausgangsstoffe und einer entsprechenden Verarbeitung samt Nachbehandlung reduziert werden können. Das Betongefüge muss über die Abstimmung der Materialkomponenten homogenisiert werden und zielt auf ein sehr dichtes Werkstoffgefüge ab. Erhöhte Werte für Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit lassen sich durch steigende Homogenität und sinkendes Porenvolumen sicherstellen. Folgende Forderungen konkretisieren dieses Grundprinzip: [Richard.1995]

- W/B-Wert reduzieren
- Verbesserung der Homogenität
- Verbesserung der Packungsdichte
- Verbesserung der Mikrostruktur mittels Wärmebehandlung
- Verbesserung der Zähigkeit durch feine Stahlfasern

4.2.1. Verbesserung der Homogenität

Konventionelle Betone weisen aufgrund physikalischer und chemischer Ursachen ein heterogenes Gefüge auf. Zu den Physikalischen zählt unter anderem der unterschiedliche E-Modul sowie unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Komponenten (Matrix, Zuschlag). Als chemische Ursache ist das autogene Schwinden des Zementleims zu nennen. Folgende vier Gründe vermeiden diese Inhomogenitäten: [Koenig.2001]

- **Elimination von Grobzuschlägen:** Dies führt zu einer deutlichen Reduktion von Mikrorissen. *Richard* und *Cheyrezy* [Richard.1995] geben hierbei einen Größtkorndurchmesser der Zuschläge von 0,8 mm an.
- **Angleichung der Steifigkeiten von Zementstein und Zuschlag:** Unterschiedliche Steifigkeiten verursachen Spannungsspitzen im Kontaktbereich von Zuschlag und Zementsteinmatrix des belasteten Betons.
- **Verbesserung der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementsteinmatrix**
- **Volumsverhältnis zwischen Matrix und Zuschlag wird hinaufgesetzt**

4.2. Prinzipien zur Erhöhung des Leistungsspektrums von Normalbeton zu UHPC

Die Grundlage zur Herstellung ultrahochfesten Betons bildet die Homogenität im Betongefüge. Mittels Druck- oder Wärmebehandlung können verbesserte Werkstoffeigenschaften erzielt werden. [Schneider.2001]

4.2.2. Optimierung des Korngemisches (Packungsdichte)

Die Optimierung des Korngemisches kann nach *De Larrard* und *Sedran* [Larrard.1994] z.B. mit sogenannten Packungsmodellen vollzogen werden. Neben anderen Packungsmodellen wird nach *RICHARD* und *CHEYREZY* der Wasserbedarf als Hauptparameter für ein optimales Korngemisch herangezogen. Dabei ist die minimale Wassermenge zur Verflüssigung des Mehlkorns entscheidend und wird mit 0,08 angegeben. Der optimale Wassergehalt kann mittels einem globales Modells, wobei den Hauptparameter die relative Dichte k_{rel} bildet, ermittelt werden. Dabei gilt k_{rel} nach Gl. 4.1.

$$k_{rel} = \frac{\rho_0}{\rho_s} \quad (4.1)$$

mit: k_{rel} Relative Dichte
 ρ_0 Rohdichte
 ρ_s Reindichte

Das Packungsmodell nach *RICHARD* und *CHEYREZY* wird hier als plakatives Beispiel in der anfänglichen Entwicklung von UHPC angegeben. Der optimale W/B-Wert liegt in diesem Modell zwischen 0,13 und 0,15.

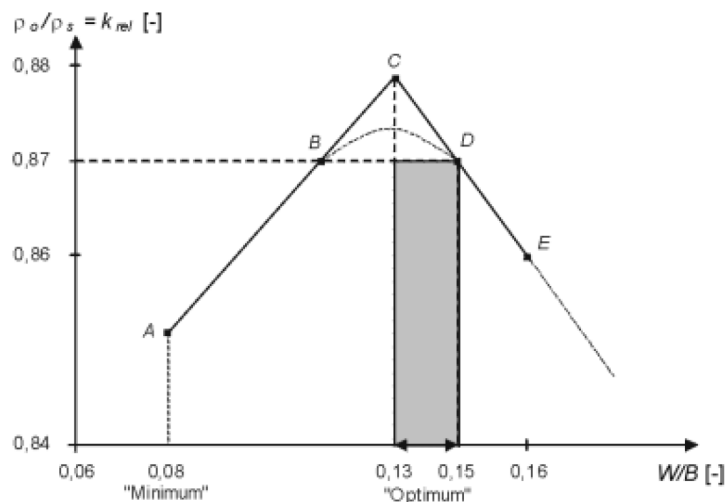


Abbildung 4.2.: Korrelation der Relative Dichte k_{rel} zum W/B-Wert [Richard.1995]

4.2.3. Nachbehandlung von UHPC

Seit geraumer Zeit sind die Vorteile von Nachbehandlungsmethoden zur Erhöhung der Festigkeitswerte bekannt. Neben den klassischen Nachbehandlungsmethoden von Normalbeton wie ausreichend Befeuchten bzw. Abdecken aufgrund Temperatureinflüsse, stehen die Behandlungsmethoden mit Druck, Wärme und Dampf zur Verfügung. Letztendlich führen höhere Dichten zu höheren Festigkeiten. Weitestgehend lässt sich damit eine höhere Dauerhaftigkeit erzielen.[Koenig.2001]

4.2.3.1. Nachbehandlung mit Druck

Um die Dichte von Frischbeton reduzieren zu können, ist das Aufbringen eines Druckes ein möglicher Weg. In Versuchen von *RICHARD* wird angegeben, dass nach einer 30-minütigen Druckeinwirkung (500 bar) ca. 20 bis 25 % des während des Mischen hinzugefügten Wassers wieder ausgepresst wurden. Wird dieser Druck über einen längeren Zeitraum - z.B. 6 bis 12 Stunden - hinweg angehalten, können Porositäten aus autogenem Schwinden verhindert werden. Mittels Druckbehandlung kann die relative Dichte k_{rel} um mehr als 2 % erhöht werden. [Koenig.2001]

4.2.3.2. Nachbehandlung mit Wärme

Zur Nachbehandlung mit Wärme wird grundsätzlich zwischen trockener und feuchter Wärmebehandlung unterschieden. Diese erfolgt meist bei normalem Druck nachdem der Beton ausgehärtet ist. Die Temperaturbeaufschlagung erfolgt über mehrere Tage bei 50 bis 70 °C. Wird ein zusätzlicher Druck beaufschlagt, so spricht man von einer sogenannten Autoklavierung. In der Literatur wird als optimale Wärmebehandlung eine Temperatur von 90 °C angegeben. Darüber wird die puzzolanische Reaktion von Mikrosilika (siehe Kap. 4.3.2) grundsätzlich beschleunigt. Bei Temperaturen zwischen 250 und 400 °C bilden sich kristalline Hydrate in Form von Xonotlite C_6S_6H und einem Dehydratisieren der CSH-Phasen. Ständiges Befeuchten der zu behandelnden Proben ist wichtig und aufgrund der hohen Diffusionsdichte von UHPC kann es zu einer Art „Selbstautoklavierungseffekt“ kommen. Eine derartige Behandlung ist nur für faserbewehrten UHPC möglich.[Koenig.2001] In dieser Masterarbeit wird keine klassische Wärmebehandlung zur Dichtheitssteigerung eingesetzt. Jedoch spielt die Hydratationswärme möglicherweise eine Rolle, wobei in der fortlaufenden Arbeit noch näher darauf eingegangen wird.

4.3. Stoffkomponenten

Im vorliegenden Kapitel wird prinzipiell auf die allgemeinen Ausgangsstoffe von ultrahochfestem Beton eingegangen. Zusammenfassend werden zur Herstellung von ultrahochfestem Beton UHPC nachfolgende Ausgangsstoffe verwendet:

- feine und „grobe“ Gesteinskörnung
- Gesteinsmehle
- Wasser
- Zement
- Silikastaub bzw. Mikrosilika
- Fließmittel
- Fasern
- andere Zusatzmittel wie z.B. Beschleuniger

Es können auch weitere Zusatzstoffe wie z.B. Flugasche, Metakaolin oder Hüttensand verwendet werden.[Schmidt.2008] Beispielsweise wird aus ökologischen Gründen bei Normalbeton auf derartige Stoffe zurückgegriffen, wobei hier auf die Arbeiten von *JUHART* - TU Graz - ¹ verwiesen wird. Abb. 4.3 gibt einen groben Überblick über die Mischungszusammensetzung von Normalbeton und hochfesten Beton zu ultrahochfesten Betonen.

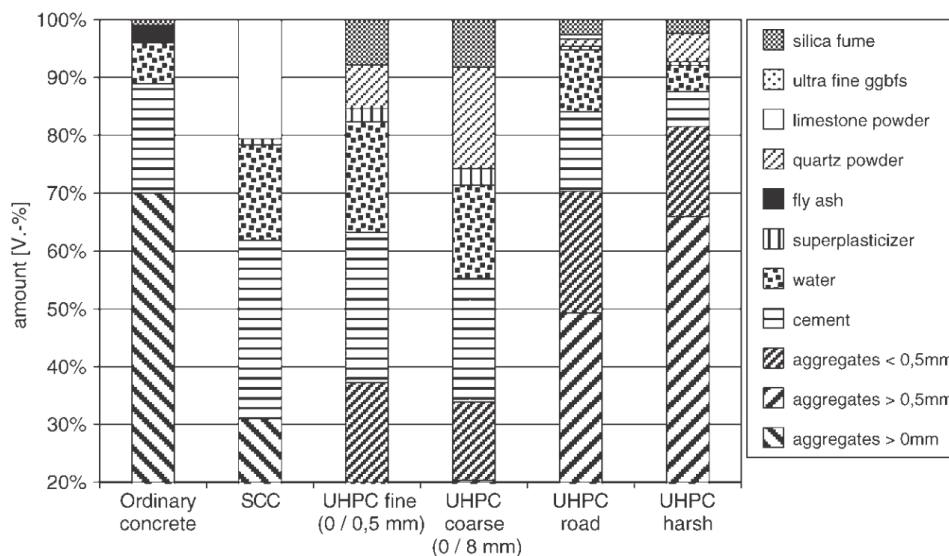


Abbildung 4.3.: Überblick zu den verschiedenen Mischungszusammensetzungen von normalfesten, hochfesten und ultrahochfesten Betonen [Bergmeister.2014]

¹<http://tugraz.at/tu-graz/services/news-stories/planet-research/einzelansicht/article/aus-grau-mach-gruen-1/>, 26.06.2017

4.3.1. Zement

Zur Herstellung von UHPC sind in der Regel alkaliarme Portlandzemente CEM I nach DIN EN 196 von 42,5 R und 52,5 R, bevorzugt mit hohem Sulfatwiderstand und niedriger Hydratationswärmeentwicklung zu verwenden. Trotz des hohen Zementgehaltes (700 bis 850 kg) von ultrahochfestem Beton wird mit diesen Zementen der Wasseranspruch sowie das chemische Schwinden begrenzt und eine mögliche Alkali-Silika-Reaktion weitestgehend ausgeschlossen. Dennoch ist der individuelle Wasseranspruch ein wichtiger Parameter und sollte bei der Wahl des Zementes bedacht werden, da dieser auch unmittelbar an die notwendige Fließmittelmenge bzw. dem Fließverhalten des Frischbetons gekoppelt ist. Für UHPC-Bauteile mit erhöhter Gefahr für Temperatur- und Schwindrissbildung wie dünne Betonfahrbahnen im Straßenbau oder für Bauteile mit chemischer Beanspruchung wie z.B. Abwasserrohre, werden Hochofenzemente der Güte CEM III/A verwendet.[Bergmeister.2014]

4.3.2. Silikastaub - reaktiver Zusatzstoff

Silikastäube bzw. auch Mikrosilika genannt sind feindisperse Kieselsäurestäube. Diese werden für UHPC am häufigsten eingesetzt. Zum einen wird die Packungsdichte der Feinstoffmatrix verbessert und zum anderen werden zusätzliche, gefügedichte C-S-H-Phasen über die Reaktion mit Calciumhydroxid im Zement gebildet. Man spricht dabei von einer puzzolanischen Abbaureaktion von Calciumhydroxid.[Schmidt.2008] Wegen der hohen spezifischen Oberfläche (ca. $100.000 \text{ cm}^2/\text{g}$) ist Silikastaub ca. 20-mal feiner als Zement und wesentlich für den Wasser- bzw. Fließmittelanspruch und letztendlich für die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons verantwortlich.[Bergmeister.2014]

4.3.3. Inerte Zusatzstoffe

4.3.3.1. Gesteinskörnung

Die Auswahl der Gesteinskörnungen bezüglich Kornform und Kornverteilung, mechanischer und mineralogischer Eigenschaften sowie die Interaktion zwischen Zementstein und Gesteinskörnung spielen bei steigender Betondruckfestigkeit eine wesentliche Rolle. Bezüglich der Kornform werden für UHPC meist ungebrochene Sande verwendet, da diese einen geringeren

4.3. Stoffkomponenten

Wasseranspruch aufweisen als Brechsand. Hinsichtlich der Zuschlagsstoffe wird nach folgenden Parametern ausgewählt: [Koenig.2001]

- mineralogische Zusammensetzung
- mittlerer Korndurchmesser
- Bandbreite des Korngemisches von d_{\min} bis d_{\max}
- Massenanteil des Zuschlages im Beton

4.3.3.2. Gesteinsmehle

In der Regel werden für die packungsoptimale Kornzusammensetzung unterschiedlich feine Quarzmehle verwendet. Quarzmehle besitzen eine hohe Kornfestigkeit und zudem ist die Auswahl der üblichen Handelsware sehr groß und in unterschiedlich feinen Körnungen erhältlich. Kalkstein eignet sich aufgrund der geringeren Festigkeit weniger gut und macht den UHPC noch klebriger und zäher.[Bergmeister.2014]

4.3.3.3. Fasern

Bezüglich der Faserwahl haben sich für ultrahochfeste Betone Stahlfasern bewährt. Diese werden in das feinkörnige homogene UHPC-Gefüge sehr dicht und fest eingebunden. Neben der Übertragbarkeit hoher Verbundspannungen zwischen Beton und Stahl stellen die Stahlfasern die nötige Duktilität sicher und verhindern ein Spröbruchversagen. Im Fall einer Rissbildung wird ohne ein Versagen in den Fasern die Haftreibung zwischen Matrix und Fasern überwunden. Die Schlankheit der Faser - das Verhältnis von Länge zu Durchmesser - sollte mindestens 65 betragen, da darunter die Wirksamkeit der Faser verloren geht. Hinsichtlich der Schlankheit gibt es aber auch obere Grenzen, da bei Überbeanspruchungen die Fasern ausgezogen werden sollen und ein Abreißen verhindert werden muss. Für statisch weniger beanspruchte Bauteile können für ein duktileres Verhalten auch korrosionsfreie, hochfeste Kunststofffasern z.B. aus Polyvinylalkohol (PVA) eingesetzt werden.[Bergmeister.2014] Der Fasergehalt wird als wirtschaftliches Optimum zwischen 2 und 3 Vol.-% angegeben. Hauptsächlich wurden in den eigenen Versuchen 9 mm lange und 0,15 mm dicke Stahlfasern verwendet. Die Schlankheit liegt dabei bei 60 und somit unter der minimalen Schlankheit aus der Literatur. Weiters kamen auch strukturierte Stahlfasern (12 mm lang, 0,115 mm dick) mit einer Schlankheit von ca. 100 zur Anwendung.

4.3.4. Zusatzmittel

4.3.4.1. Fließmittel

Fließmittel sind nicht nur für die Herstellung von ultrahochfesten Betonen erforderlich, da nur mit diesen eine entsprechende Verarbeitbarkeit des Frischbetons möglich wird. Die Konsistenz des Frischbetons ist ein Indikator der Verarbeitbarkeit und wird über die rheologischen Parameter, wie nachfolgend beschrieben, gesteuert. Wie in Kapitel 3.2.1 erwähnt, hängen die Betoneigenschaften wie die Druckfestigkeit wesentlich von der Porosität des Zementsteins ab und sind unmittelbar an den W/Z-Wert gebunden. Die Verarbeitbarkeit von Beton mit kapillarporenenarmen Zementstein ($W/Z < 0,4$) kann nur durch ausreichend wirksame Verflüssiger bzw. Fließmittel erreicht werden.[Schmidt.2008] Für Normalbeton werden Fließmittel basierend auf Polykondensation wie z.B. Melamin oder Naphthalin verwendet. Zwischenzeitlich haben jedoch Polycarboxylat-basierte Produkte (PCE) einen großen Marktanteil erobert. Polykondensat-Fließmittel sind für UHPC aufgrund der zu geringen Leistungsfähigkeit nicht verwendbar, während sich PCE-Fließmittel prinzipiell zur Verflüssigung sehr gut eignen.[Schmidt.2014]

Rheologie von Frischbeton

Anhand der zwei rheologischen Parametern, der plastischen Viskosität und der Fließgrenze, lässt sich die Konsistenz von Frischbeton beschreiben. Dabei beschreibt die plastische Viskosität den Widerstand im Frischbeton gegen eine Scherverformung und kann der Fließgeschwindigkeit des Betons zugeschrieben werden. Die Fließgrenze hingegen, steht für die innere Reibung des Frischbetons, unter der sich dieser wie ein Festkörper verhält. Weiters bestimmt die Fließgrenze auch wie leicht und weit der Frischbeton fließt. Diese beiden Parameter sind für das Fließverhalten von Beton sehr relevant und in Abb. 4.4 dargestellt.[Schmidt.2015] Da die Frischbetoneigenschaften besonders für Schleuderbeton relevant sind, wird nachfolgend ausführlich auf die Wirkungsweise von Fließmitteln näher eingegangen.

Allgemeine Wirkungsweise von Fließmitteln

In der Anfangshydratation werden auf den Zementpartikeln positive und negative Ladungen ausgebildet, was zu einer gegenseitigen Anziehung, auch als agglomerieren bezeichnet, der Partikel führt. Es wird eine Art Flockenstruktur gebildet. Eingesetzte Fließmittel lösen nun die

4.3. Stoffkomponenten

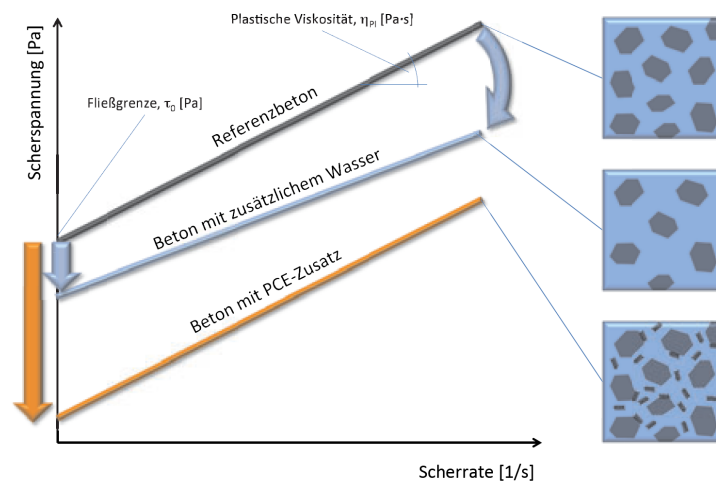


Abbildung 4.4.: Einfluss der Fließparameter auf Beton [Schmidt.2015]

gebildeten Agglomerate auf und stabilisieren die dispergierenden Partikel, was Abb. 4.5 (links) zeigt.

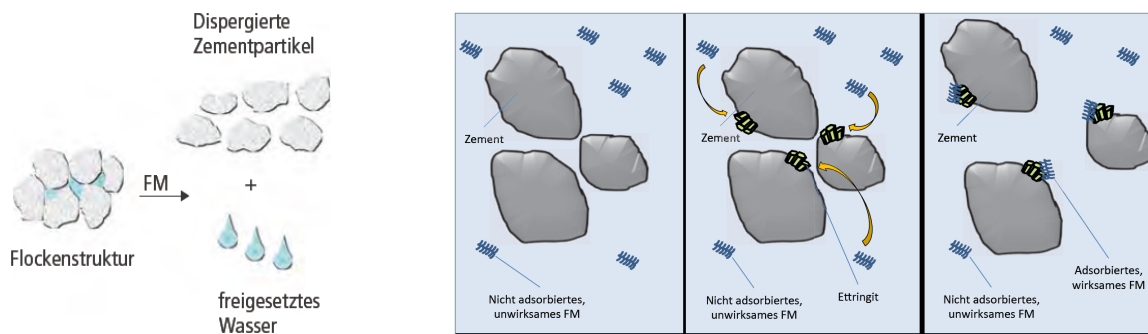


Abbildung 4.5.: Grundsätzliche Wirkung von Fließmitteln [DeutscheBauchemie.2007] (links), Fließmittelladsorption in der frühen Hydratationsphase [Schmidt.2014] (rechts)

Unmittelbar nach Beigabe von Wasser, wird wenig Fließmittel adsorbiert. Nur durch die Bildung von Ettringit kann Fließmittel an den Zementpartikeln adsorbiert werden. Nicht adsorbiertes Fließmittel ist unwirksam, kann aber über die Zeit der Ettringitbildung wirksam werden. Je nach Art des Fließmittels werden die einzelnen Partikel entweder elektrostatisch oder durch eine Kombination aus sterisch-elektrostatischer Wirkung getrennt.[Schmidt.2015]

Wirkungsweise von Polykondensaten

Die klassischen Polykondensat-Fließmittel auf Naphthalin- oder Melaminbasis bestehen aus einer organischen, negativ geladenen Hauptkette. Durch die Adsorption dieser geladenen Polymere entstehen Zementpartikeln mit gleicher Ladung, was letztendlich zu einer elektrostatischen Abstoßung der Partikel führt.[Kordts.2005]

Wirkungsweise von Polycarboxylatethern PCE

Polycarboxylatether (PCE) sind hochwirksame Dispergierungsmittel und bestehen aus einer Hauptkette sowie mehreren Seitenketten. Im Unterschied zu den Polykondensaten, kann bei den PCEs gezielt nach dem Längenverhältnis von Haupt- zu Seitenketten bzw. durch unterschiedliche Ladungsdichten variiert werden, was Abb. 4.6 verdeutlicht. [Kordts.2005]

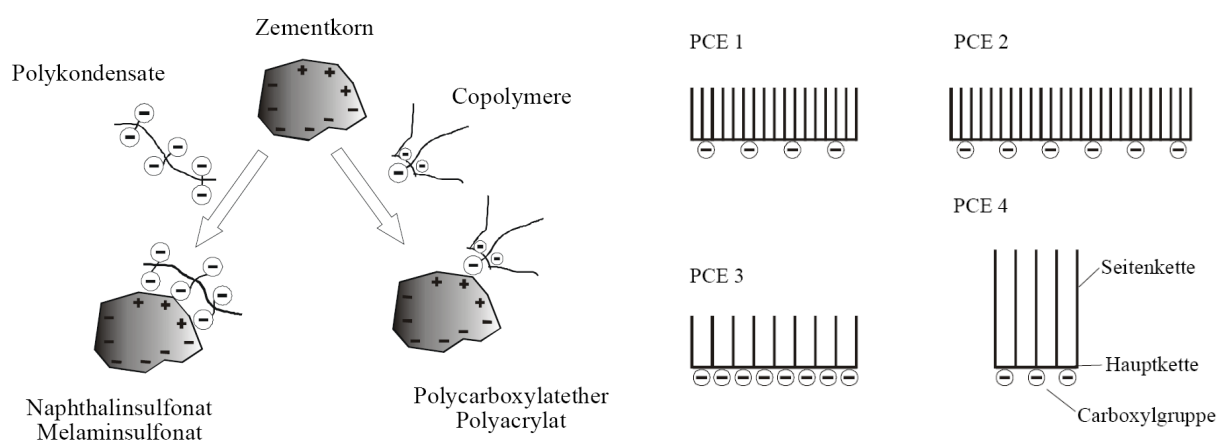


Abbildung 4.6.: Wirkungsweise verschiedener Fließmittel (links), Darstellung verschiedener PCE-Moleküle (rechts) [Kordts.2005]

Im Gegensatz zu den Polykondensaten haben die PCEs mit deren kombinierten sterisch-elektrostatischen Dispergierung folgende Vorteile: [Kordts.2005]

- Die Belegung der Zementkornoberflächen von PCE ist geringer und somit die fortschreitende Zementhydratation weniger blockiert wird und die Frühfestigkeitsentwicklung schneller vorangetrieben wird.
- Aufgrund der sterischen (räumlichen) Trennung der Zementpartikel können die Hydrationsprodukte wachsen, ohne dass die Verarbeitbarkeit des Betons eingeschränkt wird.
- Durch Variieren des Haupt- und Seitenkettenverhältnisses können bestimmte Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons erzielt werden.
- Mit stärkerer Ladungsdichte auf den Hauptketten kann beispielsweise die Langzeitverarbeitbarkeit für Transportbeton erhöht werden.
- Hingegen eignen sich Hauptketten mit geringer Ladungsdichte und langen Seitenketten für Anwendungen in der Betonfertigteilproduktion.

Wirkungsweise von Fließmitteln nach dem Einbringen

Neben dem verarbeitungstechnischen Aspekt von Fließmitteln, bleibt dieses auch nach Betonieren im System, was auch den weiteren Hydratationsverlauf beeinflusst. Dabei sind die Begriffe der Konsistenzhaltung und Abbindeverzögerung zu unterscheiden. PCEs bewirken neben der Konsistenzhaltung auch eine Abbindeverzögerung, was einen unerwünschten Effekt, vor allem in der Betonfertigteilindustrie, darstellt. Alle Effekte, die eine Konsistenzhaltung unterstützen, haben in der Regel auch eine Verzögerung in der Zementhydratation zur Folge. Damit erfolgt durch Steigerung der Wassermenge und auch der PCEs eine Abbindeverzögerung. Während Wasser überwiegend das Abbindeverhalten und nur in geringem Maße die Konsistenzhaltung beeinflusst, ist die Wirkung von PCEs genau entgegengesetzt. Deswegen ist eine Anpassung des PCE-Gehaltes zur Wassermenge sehr wichtig und trägt erheblich zu optimierten Betoneigenschaften verschiedener Prozessspezifikationen bei. Abb. 4.7 gibt einen Überblick der Dosierung von Wasser zu Polycarboxylatether.

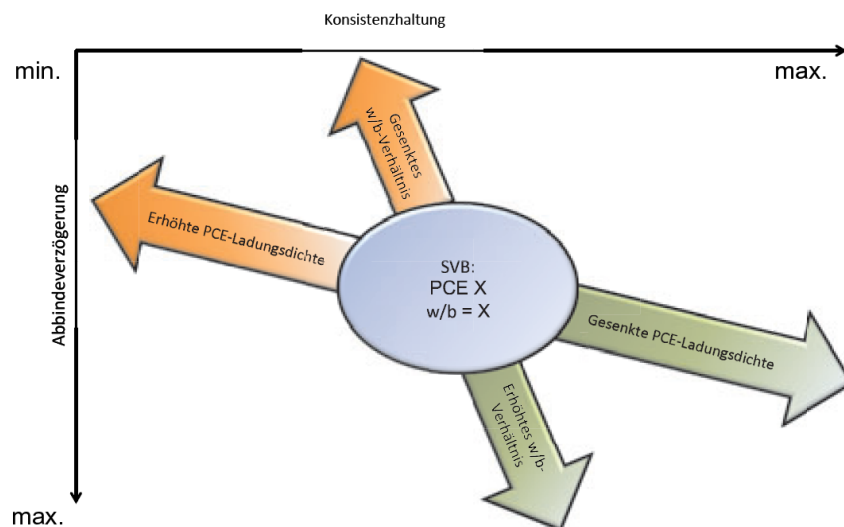


Abbildung 4.7.: Qualitative Folgen bei Änderungen von Wasser- zu PCE-Gehalt bezogen auf Konsistenz- und Abbindeverhalten des Frischbetons [Schmidt.2015]

4.3.4.2. Beschleuniger

Neben vielen anderen Zusatzmitteln bewirkt ein sogenannter Beschleuniger ein schnelleres Abbinden des Betons und wird vor allem in den Wintermonaten sehr häufig eingesetzt.

4.4. Anwendungen

Es gibt viele bereits bestehenden Anwendungen aus ultrahochfestem Beton in Kanada, Frankreich, Asien und Deutschland. An dieser Stelle werden zwei Beispiele aus Österreich erwähnt. Bis dato wird UHPC hauptsächlich im Fertigteilbau eingesetzt.

1. Fußgängerbrücke in Lienz



Abbildung 4.8.: Fußgänger- und Radfahrbrücke in Lienz - Österreich [Freytag.2014]

2. Wildbrücke in Völkermarkt

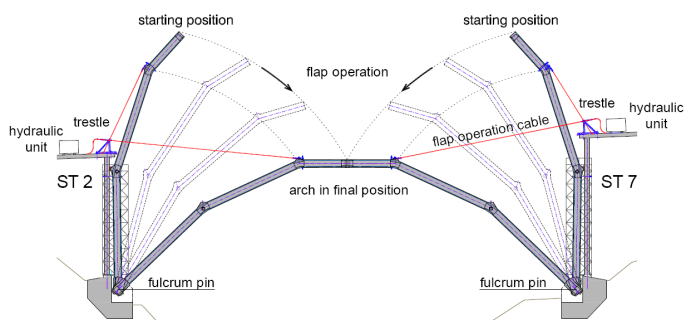


Abbildung 4.9.: Segmentklappverfahren (links), Wildbrücke nach Fertigstellung (rechts) [Freytag.2014]

4.5. UHPC als Schleuderbeton - Problemstellung und Herausforderung

4.5.1. Mechanische Parameter im Schleuderprozess

Um die Funktionsweise zur Schleuderthematik zu verstehen, sowie Problemstellen und Herausforderungen zu erkennen und zuordnen zu können, wird im gegenwärtigen Kapitel auf die mechanischen Parameter im Schleuderprozess eingegangen. Während des Schleudervorgangs ist die gleichmäßige Verteilung der Mixtur, die Umdrehungszahl, welche unmittelbar den Druck in der Zentrifuge bestimmt und die Dauer des Schleuderprozesses relevant. Abgesehen von den chemischen Zusätzen in der Rezeptur bzw. der Konsistenz des Betons, bestimmen diese Schleuderparameter das Endprodukt. Dazu ist es absolut wichtig, deren Wirkung zu kennen.

4.5.1.1. Verteilung des Betons im Schleuderanlaufvorgang

Zu Beginn des Schleudervorgangs wird die Schleudermaschine angelaufen und der Beton gleichermaßen bei gleichbleibender Umdrehungszahl über die innere Oberfläche der Schalung verteilt. Der Beton wird lediglich verteilt und noch nicht verdichtet. Dieser Verteilungsvorgang dauert ca. ein bis zwei Minuten mit einer Umdrehungszahl von ca. $\frac{1}{10}$ jener im Verdichtungsprozess. Nach dem Verteilungsvorgang wird die Umdrehungszahl erhöht und der Beton beginnt sich zu verdichten. Die zeitliche Abfolge eines möglichen Ablaufes ist in Abb. 4.10 dargestellt.

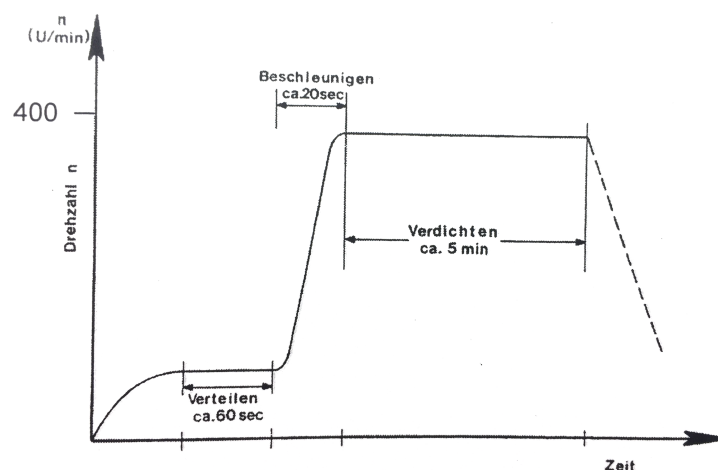


Abbildung 4.10.: Zeitliche Abfolge im Schleudervorgang [Rinnhofer.2001]

4.5.1.2. Umdrehungszahl

Mit einer definierten Umdrehungszahl zu einem bestimmten Radius wird nach Gl. 3.1 die Schleuderkraft bzw. in weiterer Folge der vorherrschende Druck und die Beschleunigung errechnet. In einem deutschen Forschungsprojekt (ZIM Forschungsvorhaben zw. TU Braunschweig und Eurocoles GmbH Co. KG) zur Herstellung von Schleuderbetonstützen aus ultrahochfesten Beton werden Geschwindigkeiten von 600 Umdrehungen pro Minute angegeben. Durch die radial induzierten Beschleunigungskräfte, die in etwa dem 20-fachen der Erdbeschleunigung entsprechen, wird der Beton extrem verdichtet.[Mueller.2012] Auch in der herkömmlichen Schleuderbetonproduktion mit Normalbeton werden derartige Beschleunigungen angewendet. Im Forschungsprojekt von KAUFMANN [Kaufmann.2007] werden sogar Beschleunigungen von bis zu 45 g unter Laborbedingungen und bis zu 38 g für die tatsächliche Produktion angegeben. Geringere Beschleunigungen bzw. Beschleunigungsgradienten führen nicht zu signifikant schlechteren Werten der Druckfestigkeit bzw. der Biegefestigkeit, so KAUFMANN.[Kaufmann.2007]

4.5.1.3. Schleuderzeit

Hinsichtlich der Schleuderzeit gibt es für UHPC keine Angaben in der untersuchten Literatur. In der derzeitigen Schleuderbetonproduktion mit Normalbeton beträgt die Schleuderdauer zwischen 10 und 15 Minuten. Diese ist vielmehr eine wirtschaftliche Komponente, wobei hier der Aspekt der vorhandenen Grünstandfestigkeit - siehe dazu Kapitel 4.5.2 - mehr zu tragen kommt und lediglich eine Anforderung der Chemie darstellt, um die Schleuderdauer zu reduzieren.

4.5.2. Anforderungen an die Konsistenz

Der im Vorhinein gemischte UHPC sollte für eine entsprechende Verarbeitbarkeit im Schleuderverfahren eine weiche Konsistenz, kein Fließen aber niedrigere Viskosität besitzen. Aus Gründen der Herstellung muss der Beton nach einer bestimmten Standzeit (ca. zwei Stunden nach RINNHOFFER Fa. Maba - zum Schließen der Stahlschalung) durch das Schleudern noch ausreichend verdichtbar sein. Dass der Beton nach dem Schleudervorgang in der entsprechenden Form bleibt, wird eine bestimmte Eigenstandfestigkeit bzw. auch Grünstandfestigkeit genannt, vorausgesetzt. Dabei werden sehr hohe Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften im Schleuderverfahren gestellt, welche nur durch entsprechende chemische Zusatzmittel erreicht werden können. In den Versuchen nach MÜLLER [Mueller.2012] konnten diese Eigen-

4.5. UHPC als Schleuderbeton - Problemstellung und Herausforderung

schaften aus der Kombination zweier Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether erzielt werden. Das erste Fließmittel sorgt für eine gute Anfangsverflüssigung und anhand des Zweiten wird die Konsistenzhaltung sichergestellt. Die verhältnismäßige Abstimmung beider Fließmittel wirkt sich sowohl auf die Zeitspanne der Verarbeitbarkeit, als auch auf die Betontemperatur aus.[Mueller.2012] Auch *KAUFMANN et al.* [Kaufmann.2007] sprechen von einem guten Fließen während des Schleudervorgangs, um eine homogene Verteilung des Materials zu erreichen. Um eine dementsprechende Grünstandfestigkeit zu erhalten ist ein thixotropes Materialverhalten vorteilhaft, so *KAUFMANN*. Im Schleuderprozess sorgen die Scherkräfte für eine geringe Viskosität und vereinfachen die Verteilung, während nach dem Schleudervorgang die Viskosität ansteigt und das Material in Lage hält.[Kaufmann.2007] Ein derartiges thixotropes Materialverhalten wird in Abb. 4.11 dargestellt, wobei die Scherphase für die Zeit des Schleudervorgangs steht und in der darauffolgenden Ruhephase eine entsprechende Grünstandfestigkeit vorliegen muss, um die Eigenstandsicherheit gewährleisten zu können.

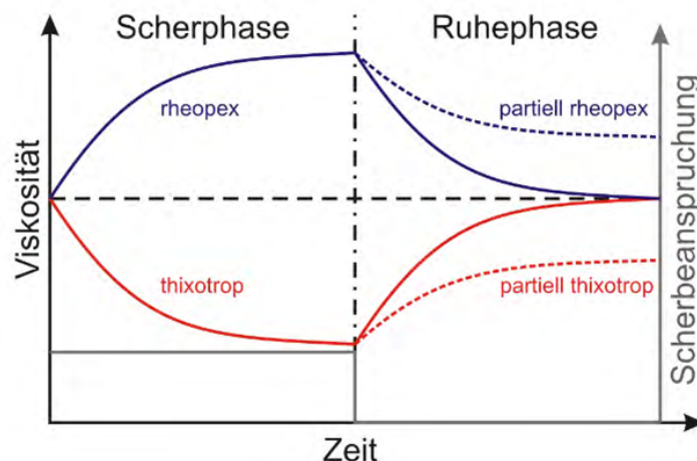


Abbildung 4.11.: *Thixotropes Materialverhalten* [Krueger.2016]

Da die Konsistenz von faserbewehrtem ultrahochfesten Beton mit Standardmethoden eher schwer zu beschreiben ist, zeigt *KAUFMANN* [Kaufmann.2007b] eine neue Methode, den sogenannten Cone-Consistency-Test, um die Verarbeitbarkeit besser analysieren zu können. Diese Methode wurde für ultrahochfeste Betone mit Carbon- sowie Polyvinylalkoholfasern (PVA-Fasern) angewendet. Nach *KAUFMANN* sind die Methoden zur Konsistenzprüfung in EN 1015-3 und EN-12350-3 zwar recht einfach zu handhaben, beschreiben jedoch nicht das rheologische Verhalten von UHPC. Beim Cone-Consistency-Test in Abb. 4.12, wird der pyramidenartige Kegel (Hohlraum) mit Beton gefüllt und anschließend das Gegenstück mit konstanter Geschwindigkeit eingedrückt. Daraus wird eine Kraft-Verschiebungskurve ermittelt. Im Zuge von Untersuchungen verschiedener Schleuderbetonrezepturen konnten Qualitätskriterien speziell für ein ausreichend gutes Zentrifugieren von UHPC gefunden werden. Verläuft die Kurve in Abb. 4.13 links vom

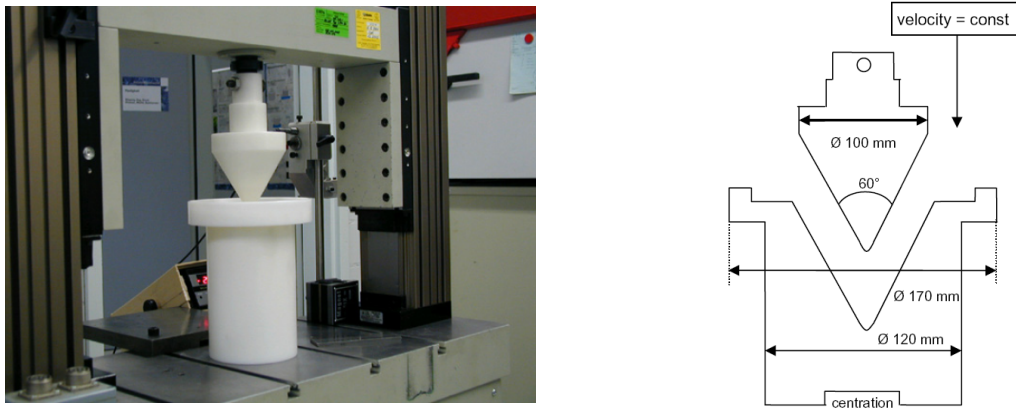


Abbildung 4.12.: Cone-Consistency-Test (links), Querschnitt (rechts) [Kaufmann.2007]

markierten Bereich - Kurve A - so ist die Konsistenz zu steif; verläuft die Kurve rechts vorbei
 - Kurve C - liegt eine zu flüssige Konsistenz vor. Der optimale Bereich wird durch Kurve B
 gezeigt und ist der markierte Bereich in den entsprechenden Grenzen. In Abb. 4.14 sind die
 Schleuderprodukte der jeweiligen Konsistenz nach Abb. 4.13 dargestellt.[Kaufmann.2007b]

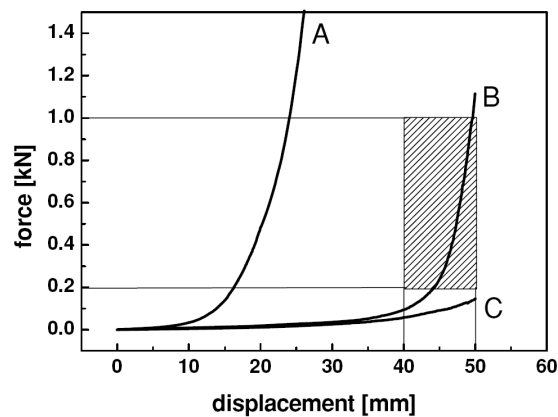


Abbildung 4.13.: Ergebnisse vom Cone-Consistency-Test und optimaler Bereich des Zentrifugierens [Kaufmann.2007b]

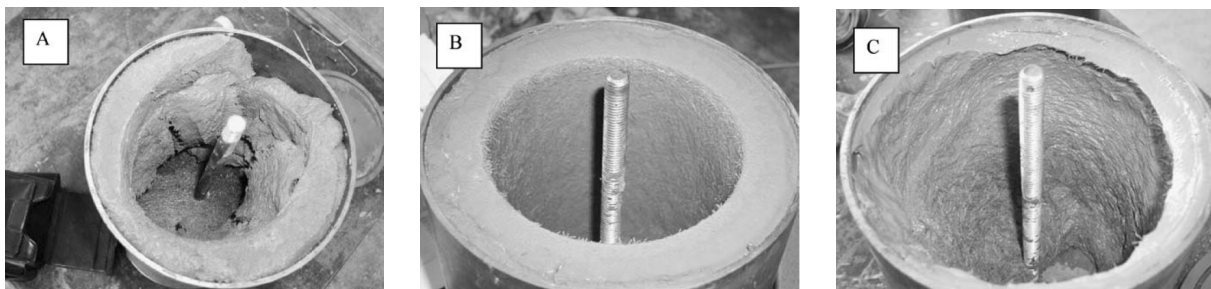


Abbildung 4.14.: Ergebnisse zu den Konsistenzkurven A-B-C [Kaufmann.2007b]

4.5.3. Herkömmlicher UHPC vs. geschleuderter UHPC

4.5.3.1. Allgemein

Aufgrund der Verdichtung durch Schleudern werden hohe Anforderungen an die Konsistenz des Frischbetons bzw. der generellen Mixtur gestellt. Die Rezeptur unterscheidet sich im niedrigeren Leimgehalt vom herkömmlichen UHPC und eine entsprechende Frühfestigkeit wird gefordert.[Adam.2012] Zementgebundene Materialien ohne Bewehrung können unter Zugbeanspruchungen nur geringe Festigkeit und Dehnungskapazität entwickeln und gelten als sehr spröde. Dazu werden in der herkömmlichen Schleuderbetonproduktion Bewehrungskörbe eingelegt, was in der Produktion sehr viel Zeit in Anspruch nimmt und sehr teuer ist. Weiters sind aus Gründen der Korrosionsvorbeugung Mindestabstände einzuhalten, welche zu erhöhten Bauteildicken führen. Wie es auch im herkömmlichen UHPC üblich ist, werden auch hier Fasern, eingesetzt um letztendlich schlanke und filigrane Bauteile hergestellt werden können.[Kaufmann.2007]

4.5.3.2. Zur Rezeptur

Nach *KAUFMANN* [Kaufmann.2007] eignen sich im Schleuderverfahren von UHPC bestimmte Ausgangsstoffe gut bzw. weniger gut. *KAUFMANN* spricht von einer zu dichten Matrix und sich eine effiziente, puzzolanische Reaktion während des Hydratationsphase nicht ausbilden kann. Anstatt Mikrosilica verwendet *KAUFMANN* mikrofeinen Zement und erzielt dabei, verglichen zu anderen Zusatzstoffen, bessere Ergebnisse in der Biegezugfestigkeit was Abb. 4.15 zeigt. In Abb. 4.16 ist der Größenunterschied zum Normalzement ersichtlich.

ADAM vom deutschen Hersteller Euro poles GmbH und Co. KG gibt wiederum an, dass Gesteinsmehle mit einem Blainewert von ca. $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ für geschleuderten UHPC besser sind als ultrafeine Zusätze. Weiters führt ein Anteil über 18 % an Mikrosilika, gemessen am Zementgehalt, zu keiner signifikanten Erhöhung der Druckfestigkeit. In der Arbeit von *ADAM* [Adam.2012] werden als Materialkomponenten Portlandzement CEM I 52,5 R, Silikastaub, Quarzmehl, Quarzsand und Basaltsplitt angegeben. In Vorversuchen wurde dabei Basaltsand mit einem Größtkorn bis 2 mm eingesetzt, wirkte sich aber negativ auf die Verarbeitbarkeit aus. Auf Grundlage dessen, wurde Basaltsplitt mit einem Größtkorn von 5 mm gewählt. Bei der prozentuellen Aufteilung zwischen Quarzsand und Basaltsplitt wird ein Verhältnis von 35/65 empfohlen. In den Versuchen von *ADAM* war der Leimanteil mit 380 l/m^3 um 10 % höher als der gesamte Luftgehalt im

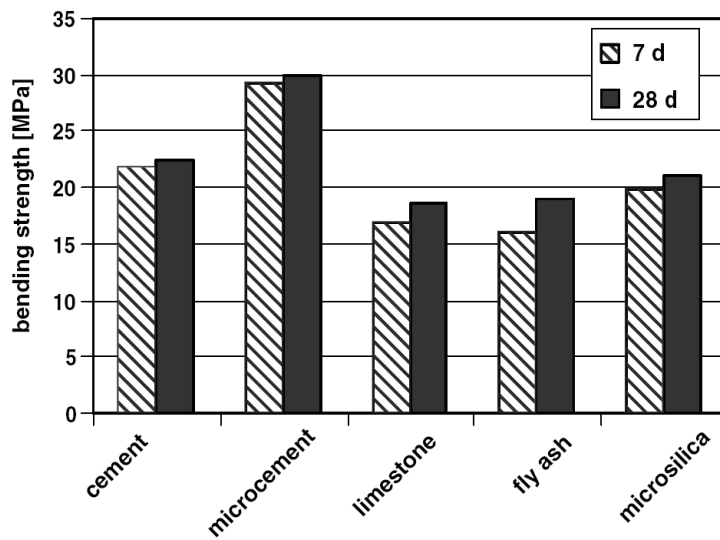


Abbildung 4.15.: Biegezugfestigkeit von UHPC mit Carbonfasern und verschiedener Zusätze [Kaufmann.2007]

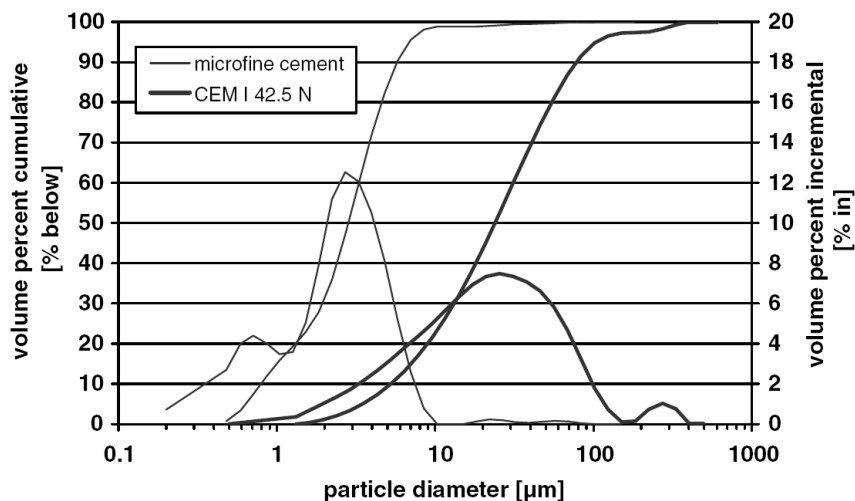


Abbildung 4.16.: Partikelgröße von Mikro- zu Normalzement [Kaufmann.2007]

Haufwerk. Wie bereits im Kapitel 4.5.2 erwähnt, ist das Fließmittel sehr wichtig. Fließmittel auf Basis von Naphthalinsulfonat sind unbrauchbar. PCEs wie im herkömmlichen UHPCs sind für geschleuderten ultrahochfesten Beton ebenso nicht geeignet, so ADAM. Auch dieser verwendet ein zweikomponentiges Fließmittel, womit sich einerseits eine optimale Verflüssigung und andererseits eine ausreichende Verarbeitbarkeit erzielen lässt.[Adam.2012] All diese Erfahrungen und Erkenntnisse konnten im eigenen Versuchprogramm mitberücksichtigt werden.

4.5.3.3. Entmischungseffekte

Aufgrund der unterschiedlichen Rohdichten der Ausgangsstoffe kommt es ab bestimmten Drücken zu Entmischungseffekten im Schleudervorgang. Zentrifugen wurden ursprünglich zur Trennung

4.5. UHPC als Schleuderbeton - Problemstellung und Herausforderung

verschiedener Flüssigkeiten eingesetzt. Dieser Effekt bewirkt für Schleuderbeton einerseits die gewünschte Verdichtung, indem die leichtere Luft nach innen entweichen kann. Andererseits werden auch leichtere Bestandteile der Mixtur von Schwereren nach innen verdrängt und Schwerere „setzen“ sich nach außen hin ab. Dieser Effekt ist prinzipiell nicht erwünscht, da die Homogenität verloren geht. Der signifikante Unterschied der Rohdichte zu anderen Bestandteilen der Rezeptur ist vor allem bei Stahlfasern gegeben. Nach KAUFMANN ist für geschleuderten UHPC die Verwendung von Stahlfasern nicht geeignet. Stattdessen werden Fasern aus Carbon bzw. aus Polyvinylalkohol (PVA) bevorzugt. Verändert man die Geometrie der Fasern indem z.B. die Schlankheit erhöht wird, können Entmischungseffekte reduziert werden. Weiters kann dieser Effekt auch durch eine steifere Konsistenz sowie durch Reduktion der Umdrehungsgeschwindigkeiten verringert werden. Um im Schleudervorgang gleichmäßige Wandstärken herzustellen, wird vor allem eine gute Verarbeitbarkeit vorausgesetzt. In den Versuchen von KAUFMANN wird eine Latex-Dispersion verwendet, die die Fasern an die Leimpartikel klebt. Die ungleichmäßige Anordnung der Fasern wirkt sich auf die Biegezugfestigkeit aus. Grundsätzlich ist die Biegezugfestigkeit (in alle Richtungen) von geschleudertem UHPC geringer als jene von normalen UHPC. Abb. 4.17 zeigt Entmischungserscheinungen von PVA- und Carbonfasern.[Kaufmann.2007]



Abbildung 4.17.: Faserentmischung - PVA-Fasern (links und Mitte), Carbonfasern (rechts) [Kaufmann.2007]

Werden Stahlfasern eingesetzt, können sich diese aufgrund der hohen Rohdichte entmischen und setzen sich im geschleuderten Querschnitt nach außen hin ab. Möglicherweise könnten chemische Zusätze diese Effekte verhindern. Andererseits wäre auch eine „räumliche Struktur“ im Betongefüge, die eine Entmischung verhindern, denkbar. Ein sogenannter Sperreffekt könnte mit einer Grobkörnung erreicht werden, so die Idee. Diese Grobkörnung wie beispielsweise Basaltsplitt soll ein standfähiges Korngerüst im Frischbeton sicherstellen und für ein Abstützen der Fasern sorgen. Wird eine Grobkörnung verwendet, muss der Leimgehalt abgeändert werden - zu viel Leim kann zur Entmischung von Leim zu Grobzuschlägen und Fasern führen, ist jedoch zu wenig Leim vorhanden, können die vorliegenden Hohlräume zwischen den Zuschlagskörnern nicht ausgefüllt werden und es verbleiben Lufteinschlüssen im Endprodukt.

Ein homogenes Gefüge stellt die Basis für ultrahochfesten Beton dar. Wird UHPC geschleudert, soll auch die Homogenität erhalten bleiben. Treten im Schleuderprozess Nebenerscheinungen wie Entmischungseffekte auf, wird der Grundsatz von UHPC nach 4.1 in Frage gestellt und diese Problemstellungen müssen beseitigt werden. In dieser Arbeit wird eine mögliche verbesserte Verdichtung von geschleuderten UHPC untersucht, mit dem Ziel eines gasdichteren Gefüges. Auf die gleichmäßige Verteilung im Schleudervorgang wird im eigenen Versuchprogramm nicht weiters eingegangen, da keine vollen Rohrquerschnitte, sondern lediglich einzelne Segmente hergestellt werden.

5. Eigenes Versuchsprogramm

Dieses Kapitel beschreibt die eigens durchgeführten Versuche. Dabei wurden verschiedene Mixturen hergestellt, geschleudert und anschließend mit unterschiedlichen Methoden hinsichtlich gasdichtheits-relevanter Eigenschaften bzw. Materialkenngrößen untersucht. Es wurde nicht das Ziel verfolgt, eine auf Gasdichtheit optimierte Rezeptur zu entwickeln.

5.1. Vorgehensweise und Versuchsprogramm

Wie bereits mehrmals erwähnt wurde von einer Referenzrezeptur für das vertikale Gleiten ausgegangen. Da ultrahochfester Beton als verhältnismäßig „junger“ Baustoff gilt, waren folgende Untersuchungen bezogen auf die Verdichtung durch Schleudern essentiell:

- Ist eine herkömmliche UHPC Rezeptur schleuderbar und wie sieht das Endprodukt aus?
- Welche herstellungstechnischen Parameter können während des Schleudervorgangs verändert werden und wie wirken sich diese auf das Endprodukt, hinsichtlich eines dichten, porenarmen Gefüges aus?

Zu den veränderbaren Schleuderparameter zählt primär die Schleuderumdrehungen pro Minute, die effektive Schleuderzeit im Verdichtungsprozess sowie die Zeit zwischen Mischvorgang und Schleuderbeginn.

Es wird nochmals hervorgehoben, dass eine schleuderbare Mischung die Basis für diese Arbeit darstellt, um eine Aussage über die Dichtheit durch das Schleudern von ultrahochfesten Beton treffen zu können, definitiv aber nicht das Ziel einer optimalen schleuderbaren Rezeptur ist. Da UHPC sehr stark von den zugesetzten chemischen Mitteln beeinflusst wird, bietet dieser Bereich ein breites Spektrum manipulierbarer Eigenschaften. Außer den chemischen Zusätzen laut Referenzrezeptur aus Tab. 5.2, werden diese in der vorliegenden Arbeit außer Acht gelassen

und stehen die mechanischen Aspekte im Vordergrund. Chem. Zusatzmittel werden von der Referenzrezeptur nicht abgeändert.

Es wurde so vorgegangen, dass nach Herstellung der jeder Probe, diese einerseits optisch mit freiem Auge und andererseits unter einem Digitalmikroskop begutachtet wurden und auf Grundlage dessen, Veränderungen an der nächsten Probe vorgenommen. Dieser Vorgang wiederholte sich und in Summe wurden 10 verschiedene Proben hergestellt. Um den Überblick stets zu bewahren, gibt Abb. 5.1 einen Überblick über das Versuchsprogramm.

Probe	Schleuderdatum	Anmerkung	ÄNDERUNGEN					
			herstellungsbedingt			rezepturbedingt		
			Umdreh./Minute	effektive Schleuderzeit [min]	Zeit zw. Mischende u. Schleuderb. [min]	Bindemittel-leim (Zement in kg) [l/m³]	Stahlfasern Länge/ Durchmesser/ Schlankheit [mm/mm/-]	Zuschlag (Anteil in %) QS-Quarzsand (Feinkorn) BS-Basaltsplitt (Grobkorn)
Probe 1	02.05.2017	Referenzrezeptur	233	30	10	756 (1000)	9/0,15/60	QS (100)
Probe 2	03.05.2017	Änd. rezepturbed.	233	30	10	491 (650)	9/0,15/60	QS (100)
Probe 3	05.05.2017	Änd. herstellungs.	167	30	10	491 (650)	9/0,15/60	QS (100)
Probe 4	09.05.2017	Änd. rezepturbed.	233	30	10	491 (650)	12/0,115/100	QS (100)
Probe 5	16.05.2017	Änd. herstellungs.	233	10	10	491 (650)	9/0,15/60	QS (100)
Probe 6	24.05.2017	Änd. herstellungs.	233	30	30	491 (650)	9/0,15/60	QS (100)
Probe 7	31.05.2017	ausgeschieden	233	30	10	keine Angabe	9/0,15/60	QS + BS
Probe 8	01.06.2017	ausgeschieden	233	30	10	keine Angabe	9/0,15/60	QS + BS
Probe 9	01.06.2017	Änd. rezepturbed.	233	30	10	476 (630)	9/0,15/60	QS (39)+BS(61)
Probe 10	11.06.2017	Änd. herstellungs.	233	420	10	491 (650)	9/0,15/60	QS (100)

Tabelle 5.1.: Versuchsüberblick

Alle geschleuderten Proben (mit Ausnahme der ausgeschiedenen Proben) werden in chronologischer Reihenfolge im Kapitel *Ergebnisse* 5.3 aufgelistet. Die Erstuntersuchung erfolgte für jede Probe nach der in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Vorgehensweise.

5.1.1. Erstuntersuchung der Probe

Nach dem Ausschalen wurde vom geschleuderten Probekörper eine Scheibe (ca. 1-2 cm stark) im Querschnitt heruntergeschnitten. Aufgrund dessen wurde die geschleuderte Probe optisch und unter einem digitalen Lichtmikroskop erstinspiziert und auf folgende Kriterien untersucht:

- Homogenität des Gefüges
- Entmischungen

5.1. Vorgehensweise und Versuchsprogramm

- Risse
- Verdichtungsporen - Größe und Verteilung
- Div. Einschlüsse (Fremdkörper, ...)

Damit die Querschnitte der einzelnen Proben gut abgebildet werden können, wurden die Oberfläche der Proben zuerst glatt geschliffen und anschließend mit einer Kamera mit dementsprechendem Objektiv und ausreichender Belichtung fotografiert. Dabei wurde das Fotosetup zur optischen Betrachtung der Faserorientierung nach der Diplomarbeit von *TRUMMER* [Trummer.2013] verwendet.

5.1.1.1. Optisch mit freiem Auge

Hauptsächlich konnte dadurch die Homogenität des Querschnitts beurteilt werden. Einerseits kann eine Entmischung der Stahlfasern vorliegen, andererseits von Gesteinskörnungen zu Bindemittelleim. Die Anzahl an Verdichtungsstellen sowie deren Größe und Lage kann ebenfalls mit freiem Auge wahrgenommen werden. Mikrorisse sind mit freiem Auge nicht erkennbar.

5.1.1.2. Digitalmikroskopie mit Bildverarbeitungssoftware

Dazu wurde ein digitales Lichtmikroskop mit Bildverarbeitungssoftware vom Typus Keyence VHX-5000 eingesetzt. Das in Abb. 5.1 dargestellte Mikroskop war mit zwei Objektiven mit 20 bis 200- und 250-2500-facher Vergrößerung ausgestattet. Die 20 bis 200-fache Vergrößerung war völlig ausreichend, da mit mehrfacher Vergrößerung nur kleinere Bereiche genauer analysiert werden können. Außerdem treten in der Lichtmikroskopie bereits bei gering variierenden Tiefenbereiche Unschärfen in der Auflösung auf. Kapillarporen, Poren kleiner Größe und Mineralphasen usw. können mit derartigen Geräten nicht untersucht werden, was mittels Elektronenmikroskopie durchaus denkbar wäre, aber in dieser Arbeit nicht eingesetzt wird. In Abb. 6.9 sind die genannten Messmethoden dem zu untersuchendem Größenbereich zugeordnet. Die digitale Lichtmikroskopie wurde in dieser Arbeit primär zur Beurteilung der Homogenität eingesetzt. Weiters wurden die Querschnitte auf Mikrorisse untersucht; es konnten jedoch keine gefunden werden. Bei Poren konnte festgestellt werden, ob diese aufgeschnittene Luftporen oder durch das Schneiden herausgebrochene Öffnungen sind.



Abbildung 5.1.: Dig. Lichtmikroskop vom Typus Keyence VHX-5000 - IMBT, TU Graz

5.2. Probenherstellung

Um die Schleuderversuche durchführen zu können, wurde ein für Testzwecke entwickeltes Schleudergerät der Fa. Maba aus Micheldorf in Oberösterreich, bereitgestellt. Als Schleuderequipment standen Schalungsrohre mit den Durchmessern 20, 40 und 60 cm zur Verfügung. Da die Schleuderkraft über den Rohrradius linear zunimmt, wurde aufgrund des höheren Drucks und der erwartungsgemäß besseren Verdichtung das Schalungsrohr mit 60 cm lichter Weite gewählt. Um die Betonmengen mit ca. 5-7 l je Versuch überschaubar und möglichst gering zu halten, war eine Abtrennung über den Umfang (Segment) erforderlich, wobei auch die Probenlänge vom Betonvolumen abhängig ist. Es wurde so vorgegangen, dass zu Beginn eine definierte Referenzrezeptur, entwickelt für das Herstellungsverfahren „vertikales Gleiten“ vom Betonbauinstitut der TU Graz, verwendet wurde. Hier geht es primär darum, zu sehen, ob bzw. inwieweit eine herkömmliche UHPC-Rezeptur schleuderbar ist. In weiterer Folge wurden neben der Konsistenz des Frischbetons bzw. bezogen auf die Rezeptur, Einflüsse verschiedener Schleuderparameter, beschrieben in Kapitel 4.5.1, untersucht. Anschließend wurden die Proben auf Besonderheiten in der Struktur und auf deren Kennwerte der Gasdurchlässigkeit sowie auf Festigkeitseigenschaften näher eingegangen und diese analysiert.

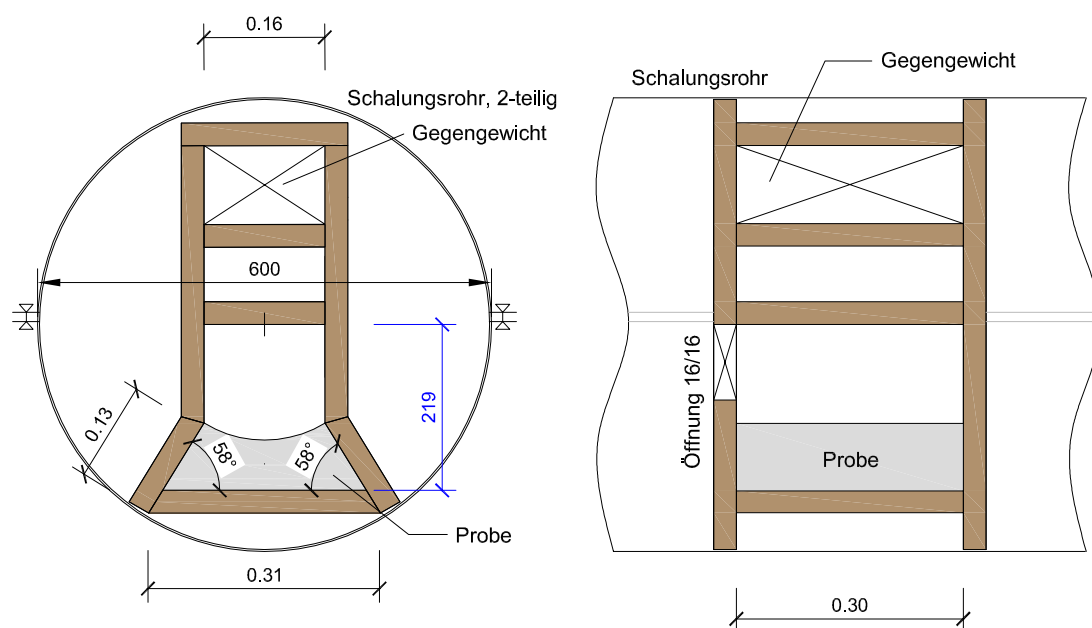
5.2.1. Schalungsbau

Wie bereits erwähnt wurde die Betonmenge je Probe auf ca. 5 l begrenzt. Daraus ergibt sich als Probe ein Kreissegment im Querschnitt bzw. der Frontansicht. Abb. 5.3 zeigt das Schalungselement. Aufgrund der höheren Schleuderkraft nach Gl. 3.1 wurde darauf geachtet, dass die geschleuderte Probe im Querschnitt betrachtet, soweit wie möglich außen zu liegen kommt.

5.2. Probenherstellung

Abbildung 5.2.: *Betonschleuder mit Schalungsrohren - Fa. Maba*

Dabei wird ein Außenradius von 21.9 cm erreicht. Die einzelnen Schalungsteile aus 3 cm starken Birkensperrholztäfel wurden über einfache Schraubverbindungen aneinander befestigt. Dabei werden die im Schleudervorgang entstehenden Kräfte auf die zwei kreisrunden Stirntafeln übertragen, die die Kräfte an die Stahlschalung weiterleiten und schlussendlich auf die Rollenbank nach Abb. 3.3 übertragen werden.

Abbildung 5.3.: *Querschnitt (links) und Längsschnitt (rechts) des Schalungselements - M 1/10*

Aus Gründe einer einfachen weiteren Bearbeitung der Probe ist die äußere Form plan, hingegen kann sich an der Innenseite eine Ausrundung durch das Schleudern ausbilden. Das Kreissegment wurde links und rechts orthogonal zum Umfang abgeschalt, um die prinzipielle statische Wirkung vom Vollrohrquerschnitt zum Kreissegment sicherzustellen und einen Gleichgewichtszustand zu erzeugen, was in Abb. 5.4 ersichtlich ist. Um im Schleudervorgang

keine zusätzliche Unwuchtkraft auf die Rollen der Schleudermaschine zu erzeugen, wurde ein gegenüberliegendes Ausgleichgewicht zur Probe angeordnet - siehe Abb. 5.5. Das Gewicht entspricht natürlich jenem der Probe und wurde zu Beginn der Versuche hergestellt. Weiters

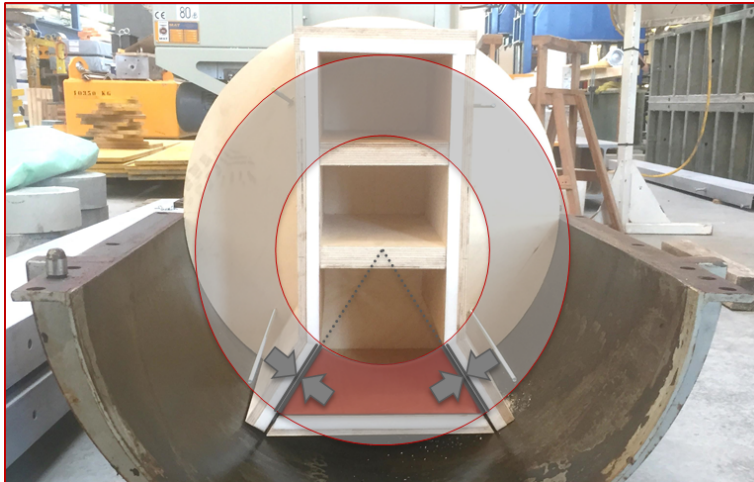


Abbildung 5.4.: Gleichgewichtszustand von Vollrohrquerschnitt zu Segmentquerschnitt



Abbildung 5.5.: Betonieren des Gegengewichtes

wurde an einer Stirnplatte eine Öffnung zum Befüllen des Betons vorgesehen, was zeitsparend ist und nicht wie im kommerziellen Schleuderbetrieb nach dem Einfüllen des Betons die zweite Schalungshälfte aufgesetzt werden muss. Damit ein rasches Ein- und Ausschalen gegeben ist, liegt die Schalungstafel an der Außenseite der Probe frei auf Polsterhölzern auf und die beiden Stirnplatten werden über 4 Gewindestangen zusammengespant. Über div. Dichtungen wird einerseits ein abgeschlossener Probenraum erzeugt, andererseits können Kräfte über die Reibwirkung an die Stirnplatte übertragen werden. Der Einschalvorgang sieht wie folgt aus:

- Einfetten der Oberfläche des gesamten Probenraumes - erleichtert das Ausschalen und die Reinigung der Schalung
- Äußere Schalungstafel der Probe einsetzen
- Stirnplatte mit Öffnung aufsetzen und über die Gewindestangen befestigen
- Einsetzen des gebauten Schalungselements in die Stahlschalungshälfte
- Aufsetzen des oberen Teils der Stahlschalung und Verschraubung der beiden Schalungshälften, wobei das gebaute Schalungselement zwischen den Stahlschalungshälften eingeklemmt wird.

5.2. Probenherstellung

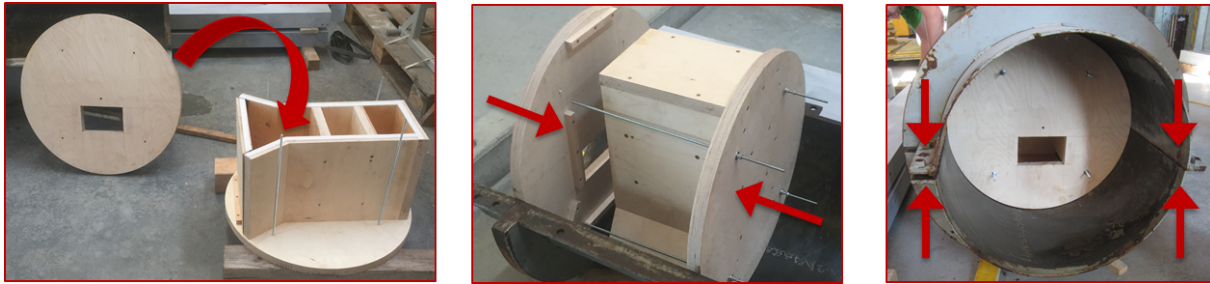


Abbildung 5.6.: Einschaltvorgang

5.2.2. Rezeptur

Hinsichtlich der Rezeptur wurden die in Kap. 4.3 beschriebenen Ausgangsstoffe verwendet. Wie bereits erwähnt, wurde zu Beginn der Versuche eine Referenzrezeptur nach Tab. 5.2 verwendet. Diese Arbeit zielt nicht auf eine Rezepturentwicklung für zu schleudernden UHPC hin, vielmehr geht es darum zu sehen, wie sich eine herkömmliche UHPC-Rezeptur im Schleuderprozess verhält bzw. welchen Einfluss das Schleudern auf die Dichtheit des ultrahochfesten Betons hat.

	Ausgangsstoffe		Vol.-%
Zusatzstoffe	Zement	CEM I 52.5 N	32,3
	Mikrosilika	RW Füller Q1	9,1
	Gesteinsmehl	Kalksteinmehl	3,8
		Quarzmehl	5,7
	Wasser		18,2
Zusatzmittel	Fließmittel		2,9
	Beschleuniger		3,6
Fasern	Stahlfasern	9/0.15	1,5
Zuschlag	Quarzsand	0,3-0,8 mm	22,9

Tabelle 5.2.: Referenzrezeptur

5.2.3. Mischvorgang

Die Herstellung des Betons erfolgte im Eirich-Labormischer, welcher in Abb. 5.7 und 5.10 ersichtlich ist. Der gesamte Mischprozess dauerte ca. 15 Minuten. Dabei wurde die Mischabfolge nach Tab. 5.3 eingehalten. In der angeordneten Mischpause sollten, wie in Kapitel 4.3.4.1 beschrieben, agglomerierte Zementpartikel aufgebrochen werden, um eingeschlossenes Wasser freizulassen. Die Stahlfasern wurden im letzten Schritt hinzugemischt, was bei steiferen Konsistenzen zur sogenannten Igelbildung der Fasern wegen erschwelter Durchmischung führen kann. Es wäre auch denkbar die Fasern zu Beginn im Trockengemisch beizumengen. Aufgrund eines einheitlichen Mischvorganges wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet und nach Tab. 5.3 vorgegangen.



Abbildung 5.7.: Eirich-Labormischer

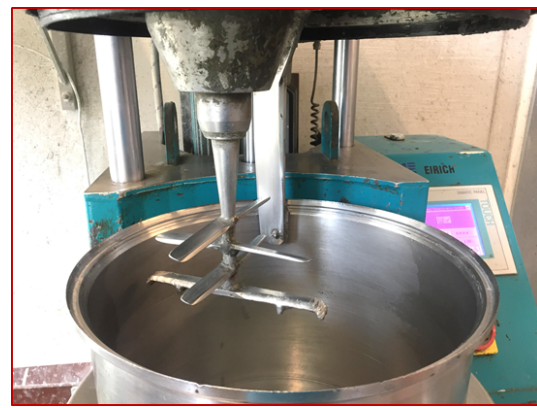


Abbildung 5.8.: Mischwerkzeug

Bezeichnung	Stoffzugabe	Wirbler [U/min]	Dauer [s]
Trockenmischen	Zement + Mikrosilika + Quarzmehl	150	30
Verflüssigung	Wasser + Beschleuniger	500	60
Verfl. + Leimmischen	Fließmittel	500	60
Mischpause			90
Zuschlagsstoffe	Quarzsand	200	180
Faserzugabe	Stahlfasern	200	240
Mischen Beton	UHPFRC	200	30

Tabelle 5.3.: Mischablauf

5.2.4. Schleuderprozess

Zum Schleudern der Proben wurde die in Abb. 5.2 dargestellte Betonschleuder der Fa. Maba verwendet. Anhand des Steuergerätes konnte die Umdrehungszahl pro Minute sowie die Schleuderrichtung variiert werden. Die Schleuderrichtung war für alle durchgeführten Proben dieselbe. Die max. Umdrehungszahl pro Minute war laut digitaler Anzeige des Steuergerätes mit 700 U/min limitiert, wobei aufgrund der Übersetzung zwischen Motor und Antriebsrollen der Schleuder nur 233 U/min des Schalungsrohres erreicht werden konnten. Wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben, bestimmt die Umdrehungszahl die erzeugte Schleuderkraft und damit auch den entstehenden Verdichtungsdruck im Frischbetongefüge. In der Praxis hat sich bewährt, die Umdrehungszahl bzw. die Schleuderkraft über ein Mehrfaches der Erdbeschleunigung anzugeben. Bei dieser Art der Angabe spielt der Rohrdurchmesser eine signifikante Rolle. In dieser Arbeit war der Radius aufgrund des verwendeten Schalungsrohres mit 21,9 cm begrenzt und kann Abb. 5.3 entnommen werden. Daraus resultieren je nach Umdrehungsgeschwindigkeit unterschiedliche Drücke, welche in Tab. 5.4 angegeben sind. Nach Angaben aus der Praxis werden in der herkömmlichen Schleuderbetonproduktion Beschleunigungen von ca. dem 20-fachen der Erdbeschleunigung gefahren. In dieser Arbeit war aus gerätetechnischen Gründen nur eine

5.2. Probenherstellung

13,35-fache Beschleunigung der Erdbeschleunigung möglich.

Umdreh./min	Geschw. [m/s]	Beschl. [m/s ²]	Schleuderkraft [kg]	Druck [bar]	Druck [kPa]
65	1,50	1,04 g	12,99	0,001	0,144
150	3,46	5,53 g	69,17	0,008	0,769
200	4,61	9,84 g	122,96	0,014	1,366
233	5,37	13,35 g	166,89	0,019	1,854
250	5,76	15,37 g	192,13	0,021	2,135
300	6,91	22,13 g	276,67	0,031	3,074
350	8,06	30,13 g	376,58	0,042	4,184
400	9,22	39,35 g	491,86	0,055	5,465
450	10,37	49,80 g	622,51	0,069	6,917
500	11,52	61,48 g	768,53	0,085	8,539
550	12,67	74,39 g	929,92	0,103	10,332
600	13,82	88,53 g	1106,68	0,123	12,296
650	14,97	103,91 g	1298,82	0,144	14,431
700	16,13	120,51 g	1506,32	0,167	16,737

probenspezifisch:			
Gewicht =	12,5 kg	Radius r =	0,219 m
Masse =	122,625 N		

Tabelle 5.4.: *Schleuderparameter*

Einfüllen des Betons

Wie bereits in Kapitel 5.2.4 beschrieben, wurde aus Gründen der einfacheren Handhabung das Schalungselement fertig zusammengebaut, sodass vor dem Schleuderprozess der Beton lediglich über eine vorgesehene Öffnung eingefüllt werden muss. Dies erfolgte über die Sirnseite des Schalungsrohrs und ist in Abb. 5.9 ersichtlich. Das Rohr wurde dabei mit einem Hallenkran geneigt, sodass der Beton eingegossen werden konnte. Dies war nur bei weichen Konsistenzen des Betons möglich; bei Steiferen wurde der UHPC mit einer Kelle in das Schalungselement eingeschöpft. Darauf folgend wurde die Öffnung verschlossen, das Rohr in die Rollenbank eingehoben und der Schleuderprozess gestartet.



Abbildung 5.9.: *Befüllungsvorgang*



Abbildung 5.10.: *Blick ins Innere des Schalungselementes des eingefüllten Betons*

Ausschalen der geschleuderten Proben

Beim Ausschalen wurde nach Abb. 5.6, nur in umgekehrter Reihenfolge vorgegangen. Nachdem die Stirnplatte mit der Einfüllöffnung abgenommen worden war, konnte das am Boden der Probe (gerade Fläche) befindliche Schalungsbrett gelöst werden - siehe Abb. 5.11 . Anschließend konnte die Probe leicht herausgenommen werden. Für folgende Schleudereinsätze musste das Schalungselement geputzt und neu eingefettet werden. Der Ausschalvorgang ging aufgrund des entwickelten Schalungskonzeptes rasch von statten.

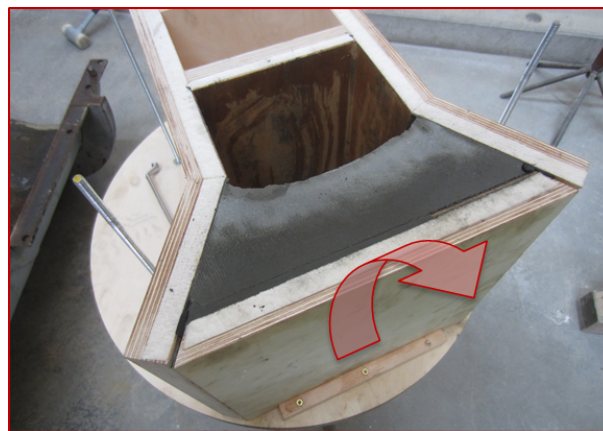


Abbildung 5.11.: Ausschalen der Probe

5.3. Ergebnisse

5.3.1. Probe 1

Spezifische Angaben zur Herstellung der Probe 1 können Tab. 5.5 entnommen werden. Die effektive Schleuderzeit stellt die Verdichtungszeit bei voller Umdrehungszahl dar. Angaben zur Referenzrezeptur zeigt Tab. 5.2. Die Konsistenz wurde nach dem Mischvorgang mittels Aus-

Herstellungsbeding	hergestellt am: 02.05.2017
Umdrehungen pro Minute	233 U/min
eff. Schleuderzeit	30 min
Zeit zw. Mischende und Schleuderbeginn	10 min
Rezepturbedingt	
siehe Referenzrezeptur	

Tabelle 5.5.: Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 1

5.3. Ergebnisse

breitfließmaß nach *HÄGERMANN* bestimmt. Dabei wurde ein Ausbreitmaß von durchschnittlich 23,5 cm in 2,0 min gemessen. Abb. 5.12 zeigt die Prüfung der Konsistenz mittels Hägermann-Konus. Bereits nach Schleuderende wurde das Endprodukt über die Einfüllöffnung begutachtet. Wie Abb. 5.13 zeigt, war der Beton zu weich bzw. flüssig und nivellierte sich wieder selbst.

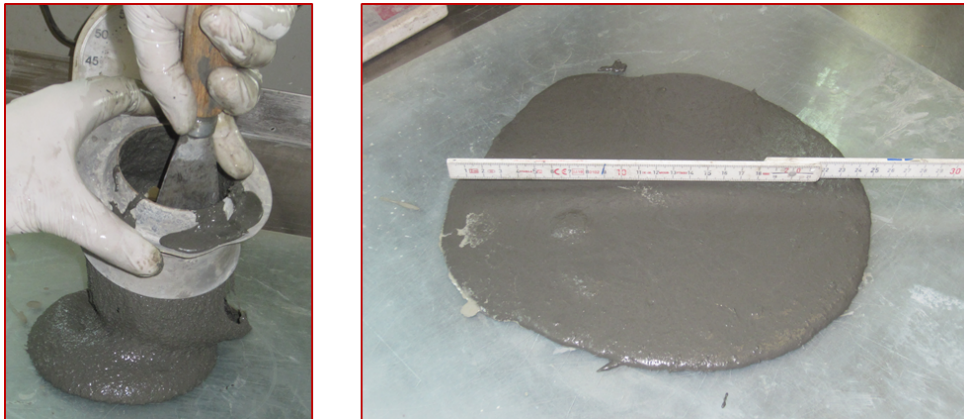


Abbildung 5.12.: Konsistenzprüfung mittels Hägermann-Konus - Probe 1

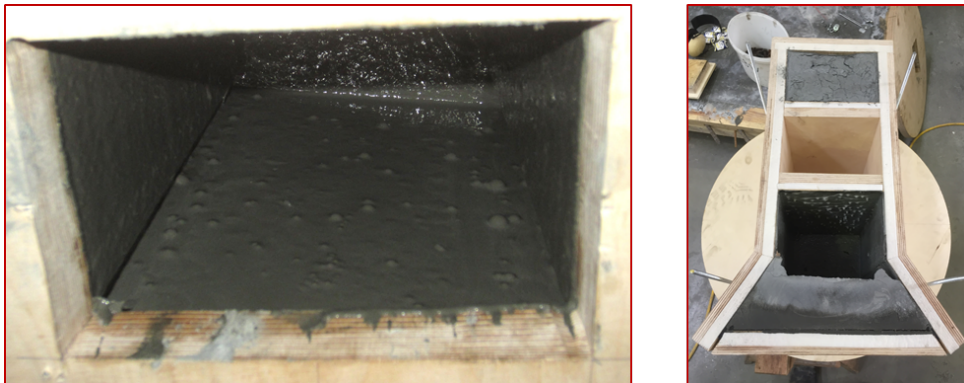


Abbildung 5.13.: Probe 1 nach vollendetem Schleudervorgang (links), Ausschalvorgang Probe 1 (rechts)

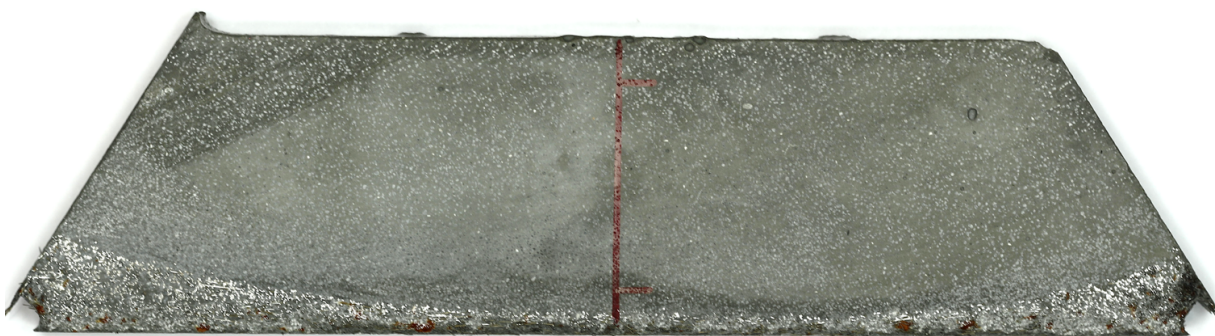


Abbildung 5.14.: Querschnitt Probe 1

Optisch mit freiem Auge

In Abb. 5.14 ist der Querschnitt der Probe 1 ersichtlich. Sehr auffallend ist die Anordnung der Stahlfasern am äußeren Rand, was eine klassische Entmischung des Betons ist. Da der Beton sehr fließfähig war und das Verhältnis der Rohdichten der Stahlfasern zu den restlichen UHPC-Ausgangsstoffen groß ist, war nach rheologischen Kenntnissen die Scherspannung des Betons, um die Stahlfasern nach dem Mischvorgang in der Ausgangslage halten zu können, zu gering. Die braunen Flecken am äußeren Rand sind lediglich der Korrosion der Stahlfasern zuzuordnen. Weiters sind am Querschnitt nur wenige Verdichtungsstellen erkennbar. Wie man in Abb. 5.13 an den aufsteigenden Luftblasen („Blubbern“ des Betons) sieht, entlüftet dieser auch nach dem Schleudern. Möglicherweise ist durch das langsame Stoppen der Schleuder erneut Luft in den Beton eingedrungen und entlüftet anschließend.

Lichtmikroskopie

Der rote Strich in der Mitte, sowie die beiden Markierungen (1,5 cm vom inneren und äußeren Rand entfernt) in Abb. 5.14, fixieren die Stellen an denen im Folgenden Flächenanteile diverser Ausgangsstoffe beschrieben wurden. Diese Markierungen sind auf allen Querschnitten zu finden und werden nicht weiter erläutert. Die über dem Querschnitt verteilten, hell weiß-grauen Körnung ist der Quarzsand 0,3-0,8 mm, welcher ebenfalls ungleichmäßig verteilt ist. In der äußeren Schichtung, vor Übergang auf die Stahlfasern, kann eine dichtere Anordnung an Quarzkörnern - siehe Abb. 5.13 - festgestellt werden, was auch bereits mit freiem Auge erkennbar ist. Um diese inhomogene Anordnung von Quarzzuschlag zu Leimanteil klassifizieren zu können, wurde in der Lichtmikroskopie über entsprechende Bildverarbeitung der flächenmäßige Anteil an Quarzkörnern im inneren zu äußeren Radius gemessen und ausgewertet. In Abb. 5.15 ist dieser Anteil an Quarzzuschlag in violett dargestellt. Laut Rezeptur soll der durchschnittliche Flächenanteil ca. 23% betragen. Die bildverarbeitende Software misst dabei am inneren Radius 18% und am Äußeren 32%. Der Durchschnitt errechnet sich auf ca. 25% an Quarzkörnung, wobei hier aufgrund von Ungenauigkeiten in der Erfassung der Quarzkörner eine Abweichung von 2% vorliegt. Diese Auswertung ist durchaus mit Ungenauigkeiten behaftet, bietet aber eine Möglichkeit eine objektive Aussage über die Entmischung treffen zu können. An dieser Stelle wird angemerkt, dass mit dieser Art der Mikroskopie keine Aussagen über Entmischungserscheinungen im Bindemittelleim getroffen werden können.

5.3. Ergebnisse

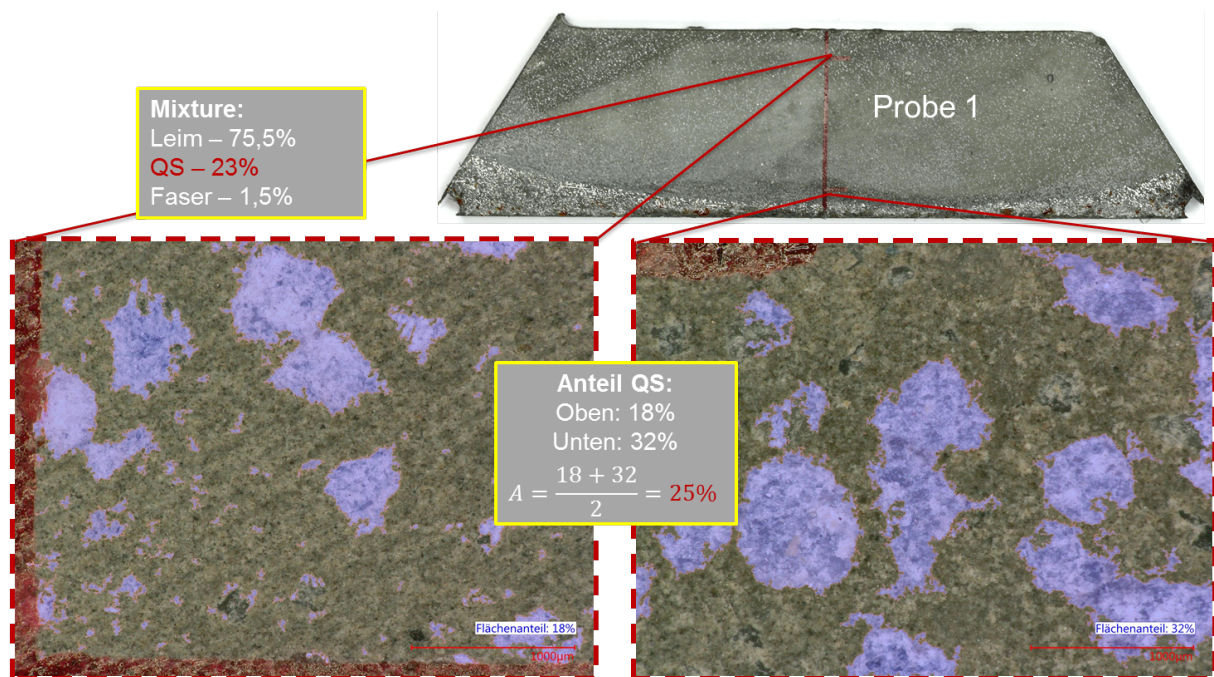


Abbildung 5.15.: Flächenanteil der Quarzkörnung am inneren (links) und äußeren (rechts) Radius der geschleuderten Probe 1

Resümee und weitere Vorgangsweise zur Erstuntersuchung von Probe 1

Aufgrund der Tatsache, dass die Mixtur nach dem Schleudervorgang nicht in Form verblieben ist, wäre eine sehr lange Schleuderzeit denkbar und der UHPC bereits im Schleuderprozess aushärten könnte. Das Gefüge ist sehr inhomogen und somit ist diese Rezeptur für geschleuderten UHPC nicht geeignet. Für ein dichtes Gefüge muss der geschleuderte Zustand erhalten bleiben um den Verdichtungseffekt unter Druck nutzen zu können. Aus diesem Grunde muss die Rezeptur, wie erwartet, abgeändert werden. Die unterschiedlichen Rohdichten der einzelnen Ausgangsstoffe sind teilweise sehr hoch. Um diese Entmischungstendenz zu senken, muss die Scherspannung zwischen den einzelnen Partikeln durch steifere Konsistenz erhöht werden, so die Überlegung. Dazu soll in einer weiteren Probe der Leimanteil gesenkt werden.

5.3.2. Probe 2

Aus den in Probe 1 gewonnenen Erkenntnissen, wird für die Probe 2 die Rezeptur nach Tab. 5.6 abgeändert. Nach dem Mischen wurde wiederum das Ausbreitfließmaß nach *HÄGERMANN* überprüft. Wie in Abb. 5.16 ersichtlich, bleibt der Betonkörper unverändert stehen wenn der Konus entfernt wird. Dies gilt auch für alle weiteren Proben. Beim Einfüllen in die Schalform fließt der Beton nicht mehr so reibungslos wie in Probe 1, sondern musste mittels Kelle eingefüllt

werden. Auch nach dem Schleudervorgang wird die Probe über die Einfüllöffnung begutachtet. Die geschleuderte Form ist nahezu vollständig erhalten geblieben, was Abb. 5.16 zeigt. Auch eine leichte Wölbung hat sich an der inneren (freien) Oberfläche ausgebildet. Der Querschnitt von Probe 2 ist der Abb. 5.18 zu entnehmen.

Herstellungsbeding	hergestellt am: 03.05.2017	
Umdrehungen pro Minute	233 U/min	
eff. Schleuderzeit	30 min	
Zeit zw. Mischende und Schleuderbeginn	10 min	
Rezepturbeding		
Änderung zur Referenzrezeptur:	ALT	NEU
Bindemittelleimgehalt	756 l/m ³	491 l/m ³
darin enthaltender Zement	1000 kg/m ³	650 kg/m ³

Tabelle 5.6.: Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 2



Abbildung 5.16.: Konsistenzprüfung mittels Hägermann-Konus (links), Probe vor Beginn des Schleudervorgangs (rechts) - Probe 2



Abbildung 5.17.: Probe 2 nach Schleuderende (links), Probe 2 beim Ausschalen (rechts)

5.3. Ergebnisse

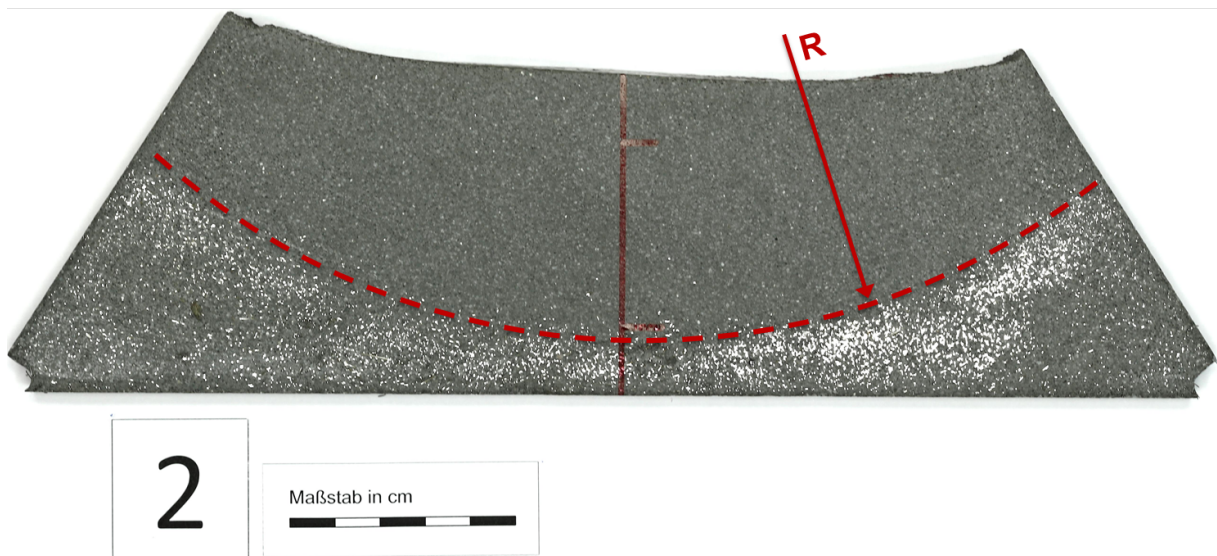


Abbildung 5.18.: Querschnitt Probe 2

Optisch mit freiem Auge

Aus Abb. 5.18 kann ein sehr dichtes Gefüge wahrgenommen werden. Es sind nur vereinzelt Verdichtungsporen zu finden. Die Luft konnte in den spitzen Ecken links und rechts der Probe nicht vollständig entweichen, weswegen an diesen Stellen vermehrt Verdichtungsporen anzutreffen sind. Hinsichtlich der Faserverteilung liegt verglichen zu Probe 1 eine homogenere Anordnung vor. Mit steiferer Konsistenz erhöhen sich die Scherspannungen im Frischbeton was zu einer geringeren Entmischung führt. Betrachtet man die Fasernanordnung etwas genauer, kann eine Ausrundung (entspricht dem zugehörigen Radius R in Abb. 5.18) ab der die Stahlfasern zu liegen kamen, festgestellt werden. Weiters kann auch eine dichtere Anordnung der Stahlfasern nach Abb. 5.19 näherungsweise als Ringfläche dargestellt werden. Über dem markierten Bereich in Abb. 5.19 (innerer Bereich) sind keine Fasern enthalten.

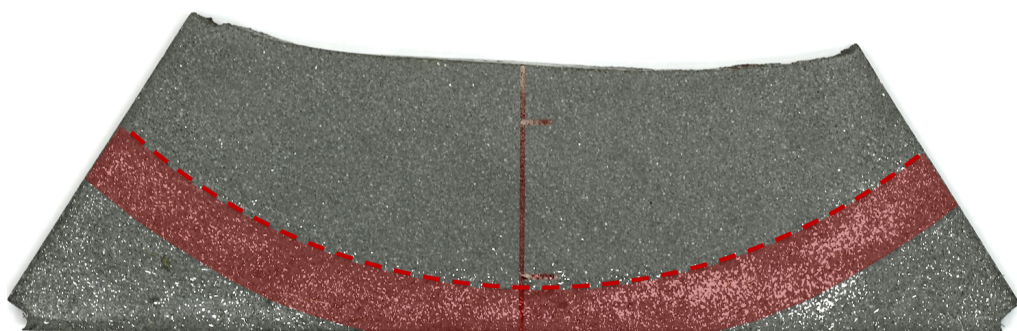


Abbildung 5.19.: Faseranordnung in Probe 2

Ein weiteres Vordringen der Fasern nach außen hin, war möglicherweise aufgrund der hohen Reibung an der Faseroberfläche während des Verdichtungsprozesses, nicht möglich. Auf der

rechten Seite dieser angesprochenen Ringfläche ist die Anordnung signifikant dichter, was wahrscheinlich auf die Drehrichtung im Schleudervorgang zurückzuführen ist. Nur vereinzelt sind Stahlfasern im inneren Bereich der Probe angeordnet.

Lichtmikroskopie

Zur Faserorientierung kann gesagt werden, dass sich diese im Schleuderprozess mehr oder weniger einheitlich orientieren. Abb. 5.20 (links) zeigt die willkürliche Orientierung nach dem Mischen. Durch das Schleudern ordnen sich die Stahlfasern hauptsächlich in Richtung der Schleuderachse, sprich orthogonal zum Radius an, was im rechten Bild gezeigt wird. Die Stirnfläche der Stahlfasern erscheint in Abb. 5.20 (rechtes Bild) nicht kreisrund, sondern wurde durch das Schneiden mit der Kreissäge und darauffolgendem Schleifen ausgefranst, sodass unterm Mikroskop die Oberfläche derart aussieht. Bereits mit freiem Auge bzw. noch besser unter



Abbildung 5.20.: Faseranordnung in Probe 2

dem dig. Lichtmikroskop, kann ein Bündeln der Fasern festgestellt werden. Darunter versteht man das parallele Aneinanderreihen der Stahlfasern. Da kein Platz für den Bindemittelleim bleibt, kann sich kein Verbund zwischen Faser und Beton ausbilden. In Abb. 5.20 (rechtes Bild) ist eine derartige Phänomen zu sehen. Auch in dieser Probe wurden die Unterschiede im Gefüge von Flächen kleinerem Radius (innen) zu Größerem (außen) analysiert. Mit Hilfe der Bildverarbeitung war es in den Abb. 5.21 nicht möglich eine aussagekräftige, flächenmäßige Erfassung von Quarzkörnung zu Bindemittelleim durchzuführen. Möglicherweise aufgrund der hohen farblichen Schwankungsbreite. Allerdings lässt sich an den Vergrößerungen in Abb. 5.21 eine augenscheinlich gleichmäßige Verteilung der Quarzkörnung 0,3-0,8 mm erkennen.

5.3. Ergebnisse

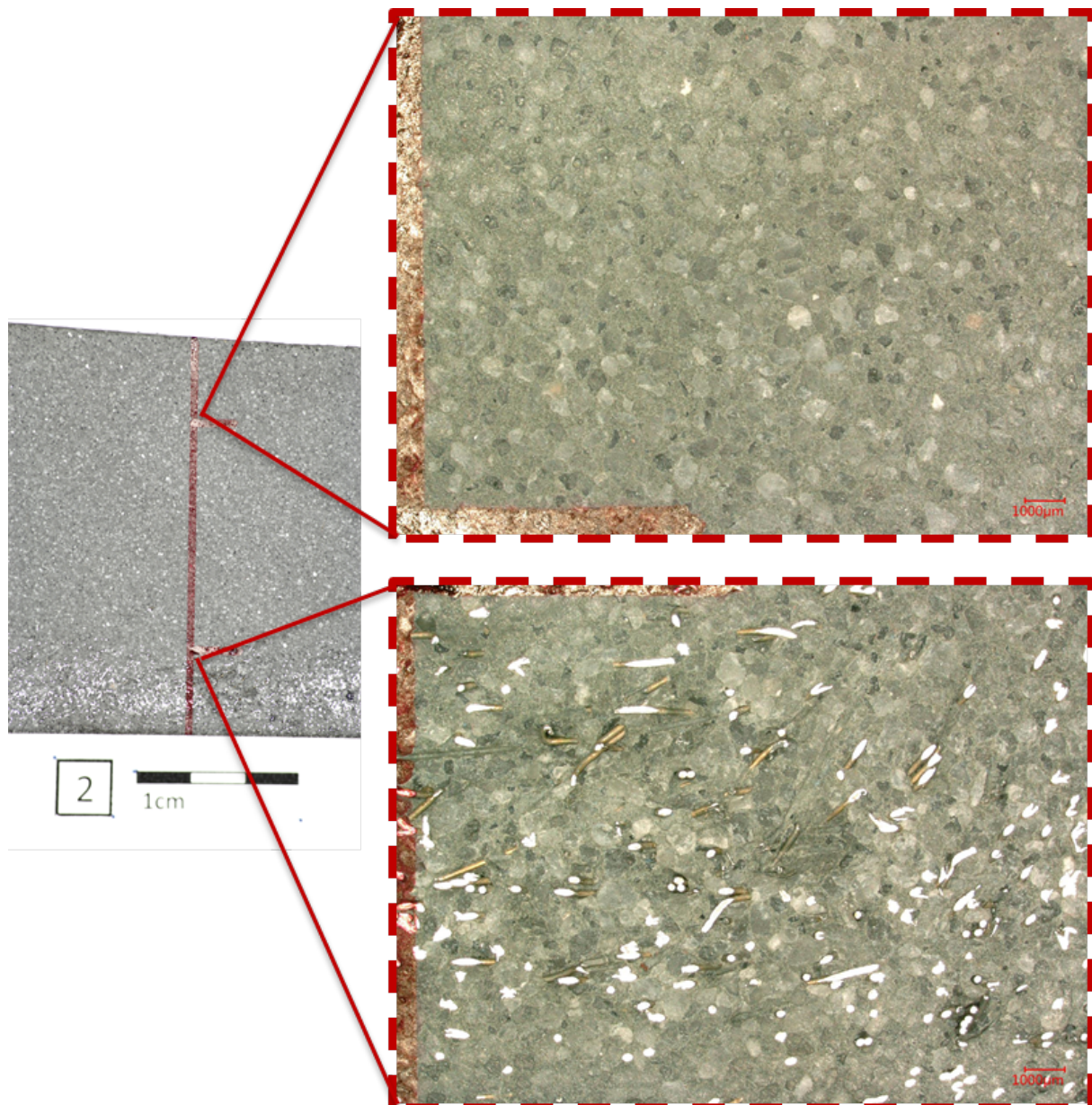


Abbildung 5.21.: Vergrößertes Gefüge der Probe 2

Resümee und weitere Vorgangsweise zur Erstuntersuchung von Probe 2

Das Ergebnis der Probe 2 hat bewiesen, dass für geschleuderten ultrahochfesten Beton eine steifere Konsistenz, verglichen zur herkömmlichen UHPC-Frischbeton, notwendig ist. Weiters kann an dieser Stelle gesagt werden, dass UHPC im Schleuderverfahren verdichtet werden kann (optisch mit freiem Auge sind nur wenige kleine Poren erkennbar), was das Ergebnis der Probe 2 bestätigt. Es konnte eine Verbesserung bzw. eine geringere Entmischung einerseits von Quarzzuschlag zu Bindemittelleim und andererseits von den Stahlfasern gezeigt werden. Durch höhere Scherspannungen im Frischbetongefüge kann dem Entmischungseffekt entgegengesetzt werden. Da diese Arbeit nicht auf eine Rezepturenwicklung für geschleuderten UHPC abzielt,

wurde diese erstmals in dieser Zusammensetzung belassen. Weiters sollte durch Variieren der Schleuderparameter - der Umdrehungszahl und Schleuderzeit - ein homogenes Gesamtgefüge erreicht werden. Ebenso wichtig war in nun folgenden Versuchen zu demonstrieren, welchen Einfluss die Änderung dieser Parameter auf das Ergebnis hat bzw. welcher dieser Parameter das Ergebnis am meisten beeinflussen kann.

5.3.3. Probe 3

Die Rezeptur dieser Probe ist dieselbe wie in Probe 2. Um die Einflüsse der Schleuderparameter zu beurteilen, wurde die Umdrehungszahl der Schleuder nach Tab. 5.7 verringert. Die Vorgehensweise basiert darauf, immer nur einen herstellungsbedingten Parameter abzuändern und somit deren Auswirkungen beurteilen zu können. Die Umdrehungszahl wurde nach digitaler Anzeige des Schleudergeräts von 700 U/min auf 500 U/min reduziert, was aufgrund der Übersetzung des Motors auf die Rollenbank den angeführten 167 U/min entspricht. Der Querschnitt der Probe 3 ist in Abb. 5.22 dargestellt.

Herstellungsbedingt		hergestellt am: 05.05.2017	
Änderung zur Umdrehungszahl:			
	ALT	NEU	
Umdrehungen pro Minute	233 U/min	167 U/min	
eff. Schleuderzeit		30 min	
Zeit zw. Mischende und Schleuderbeginn		10 min	
Rezepturbedingt			
Änderung zur Referenzrezeptur:			
	ALT	NEU	
Bindemittelleimgehalt	756 l/m ³	491 l/m ³	
darin enthaltender Zement	1000 kg/m ³	650 kg/m ³	

Tabelle 5.7.: Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 3



Abbildung 5.22.: Querschnitt Probe 3

Erstuntersuchung

Aufgrund derselben Rezeptur wie Probe 2 sind auch bestimmte Gegebenheiten im Ergebnis ähnlich bzw. nahezu gleich. Aus diesem Grunde werden ausschließlich neue Erkenntnisse der vorliegenden Probe erwähnt. Dies gilt auch für die weiteren Proben. In Abb. 5.23 ist der Unterschied in der Verteilung der Stahlfasern sehr deutlich erkennbar. Die geringere Umdrehungszahl führt zu einem niedrigeren Verdichtungsdruck und letztendlich zu einer geringeren Entmischung der Fasern. Trotzdem kann nicht von einem vollständig homogenen Gefüge gesprochen werden. Durch die strichlierte Linie in Abb. 5.23, sind im äußeren Bereich (unterer Rand) weniger Stahlfasern vorzufinden. Folgt man der Druckgradienten, so müssten am äußersten Rand die meisten Fasern zu liegen kommen, da dort der Druck am größten ist. Vorgeifend zeichnet sich dieses Phänomen bei allen Proben, außer bei Probe 1, gleich ab. Möglicherweise werden die untersten 5 mm im Schleudervorgang dermaßen komprimiert, sodass kein Austausch (Platzwechsel) trotz, höherer Dichte der Stahlfasern, zu tragen kommt. Auch ein Saugen der Holzschalung, sodass der UHPC im Randbereich steifer ist, stellt eine mögliche Ursache dar. Eine weitere Ursache dieses Phänomens könnte der direkte Kontakt zwischen Zuschlagskörner zur Schalung sein und ein seitliches Ausweichen aufgrund der Reibung verhindert werden.

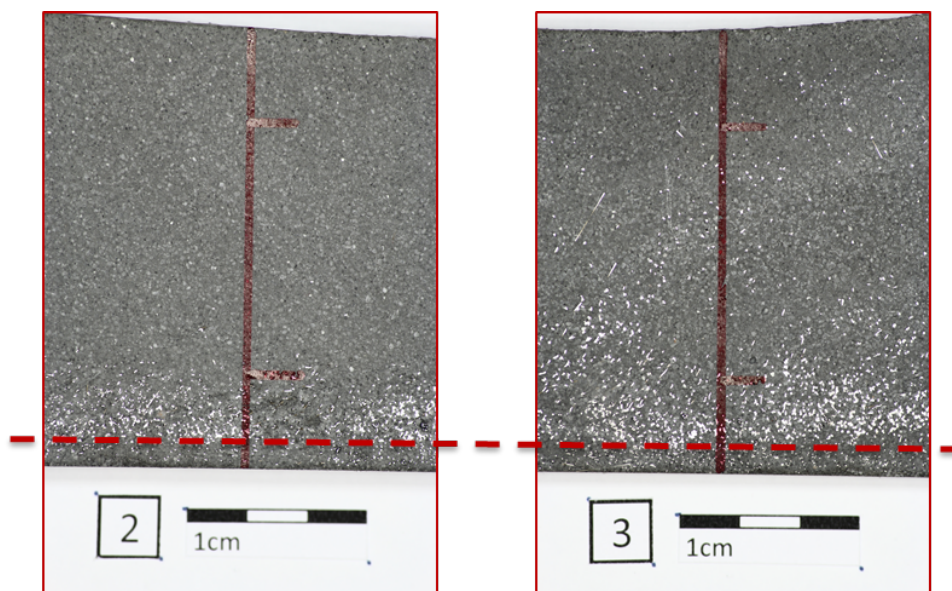


Abbildung 5.23.: Vergleich der Faserverteilung zwischen Probe 2 (links) und Probe 3 (rechts)

In der Abb. 5.24 wurden die Proben 2 und 3 hinsichtlich der Häufigkeit an Verdichtungsporen gegenübergestellt. Dazu wurde beim Fotografieren die Belichtung so gewählt, dass die Verdichtungsporen gut erkennbar sind. Auch hier ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen. In Probe 3 sind deutlich mehr Verdichtungsporen vorhanden und somit war im Schleudervorgang der Verdichtungsdruck, sprich die Fliehkraft, welche die Luftblase nach innen drückt, teilweise geringer

als die Oberflächenspannung der Luftblase, was zu einem Verbleiben im Frischbetongefüge führte und letztlich als Pore im UHPC-Gefüge verweilt.



Abbildung 5.24.: Vergleich von Probe 2 zu Probe 3 hinsichtlich der Verdichtungs-poren

Resümee und weitere Vorgangsweise zur Erstuntersuchung von Probe 3

Anhand der Probe 3 konnte gezeigt werden, dass bei reduzierter Umdrehungszahl deutlich mehr Verdichtungs-poren im Endprodukt entstehen. Obwohl der geringere Druck eine geringere Entmischung der Stahlfasern bewirkt, stellt primär ein dichtes Gefüge das Ziel dar. Für die nächste Probe war die Überlegung die Faserabmessungen und die Struktur abzuändern. Als Verhältnis von Länge zu Durchmesser der Faser kann die Schlankheit definiert werden. Die bis dato verwendete Fasergeometrie (Durchmesser 0.15 mm, Länge 9 mm → ergibt eine Schlankheit $\lambda = 60$) soll mit Ziel einer höheren Schlankheit verändert werden. Der in der Rezeptur berücksichtigte Fasergehalt wird jedoch nicht verändert.

5.3.4. Probe 4

Da die abgeänderte Rezeptur momentan so belassen wird und in der vorhergehenden Probe 3 eine Verbesserung in der Faserverteilung erzielt wurde, so soll in der vorliegenden Probe der Einfluss von Fasergeometrie und Faserstruktur untersucht werden. Der Fasergehalt bleibt unverändert. Wie Tab. 5.8 zeigt, wurden strukturierte Stahlfasern mit einer Länge von 12 mm und Durchmesser von 0,115 mm eingesetzt. Die Schlankheit λ konnte dadurch von 60 auf ca. 100 erhöht werden. Dabei vergrößert sich die Oberfläche der Stahlfaser drastisch, wodurch im Schleudervorgang höhere Reibungskräfte auf die Faser übertragen werden können und ein nach außen Wandern der Faser erschwert wird, so die Idee für diese Probe. Die verwendeten Fasern sind in Abb. 5.25 dargestellt.

Herstellungsbedingt	hergestellt am:	09.05.2017
Umdrehungen pro Minute		233 U/min
eff. Schleuderzeit		30 min
Zeit zw. Mischende und Schleuderbeginn		10 min
Rezepturbedingt		
Änderung zur Referenzrezeptur:	ALT	NEU
Stahlfasern - Länge [mm] / Durchmesser [mm] / Schlankheit	9/0,15/60	12/0,115/100
Bindemittelleimgehalt	756 l/m ³	491 l/m ³
darin enthaltender Zement	1000 kg/m ³	650 kg/m ³

Tabelle 5.8.: Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 4



Abbildung 5.25.: Strukturierte Stahlfasern - Schlankheit $\lambda \sim 100$

Das Ergebnis der Probe 4 gleicht jenem von Probe 2. Hinsichtlich der Faserverteilung kann durch die höhere Schlankheit eine geringere Entmischung festgestellt werden, was Abb. 5.27 zeigt. Auch im oberen Bereich der Probe 4 sind vereinzelt Fasern zu erkennen. Im unteren (äußeren) Bereich von Probe 2 und Probe 4 sind unterschiedliche Dichten in der Faserverteilung der Proben festzustellen (5.27 - rote Bereiche). Diese unterschiedliche Verteilungen resultieren möglicherweise aus der Umdrehungsrichtung der Schleuder - die gegengleiche Anordnung



Abbildung 5.26.: Querschnitt Probe 4

(links - rechts) dieser Bereiche kommt aufgrund unterschiedlicher Seitenansichten zustande (Vorder- und Hinterseite).

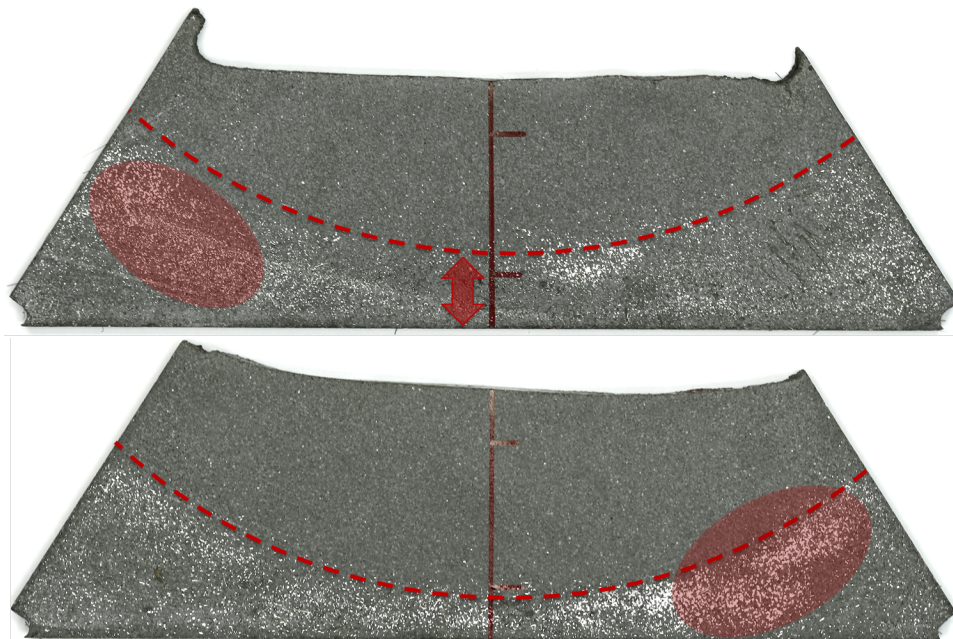


Abbildung 5.27.: Vergleich der Faserverteilung von Probe 2 (unten) zu Probe 4 (oben)

Resümee und weitere Vorgangsweise zur Erstuntersuchung von Probe 4

Mit strukturierten Fasern höherer Schlankheit konnten zwar eine verbesserte Faserverteilung erreicht werden, die Entmischung aber nicht vollständig verhindert werden. Auch eine gleichmäßige Faserverteilung stellt nicht das Ziel dieser Arbeit dar, obwohl möglicherweise das Ergebnis der Gasdichtheit dadurch beeinflusst werden kann. Letztendlich hat die Schlankheit der Fasern

5.3. Ergebnisse

keinen all zu großen Einfluss auf die geschleuderte Probe. Die weitere Vorgehensweise besteht darin, den Einfluss weiterer Schleuderparameter zu erkunden.

5.3.5. Probe 5

Da in der Probe 3 bereits die Umdrehungszahl als Schleuderparameter geändert wurde, wurde in der Probe 5 die Schleuderzeit reduziert. Laut Fa. Maba beläuft sich die effektive Schleuderzeit in der Praxis zwischen 10 und 15 Minuten, was einen erheblichen Kostenfaktor darstellt. In diesem Versuch wird die Schleuderzeit mit 10 Minuten angesetzt.

Herstellungsbedingt		hergestellt am:	16.05.2017
Änderung zur eff. Schleuderzeit:	ALT	NEU	
eff. Schleuderzeit	30 min	10 min	
Umdrehungen pro Minute		233 U/min	
Zeit zw. Mischende und Schleuderbeginn		10 min	
Rezepturbedingt			
Änderung zur Referenzrezeptur:	ALT	NEU	
Bindemittelleimgehalt	756 l/m ³	491 l/m ³	
darin enthaltender Zement	1000 kg/m ³	650 kg/m ³	

Tabelle 5.9.: Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 5

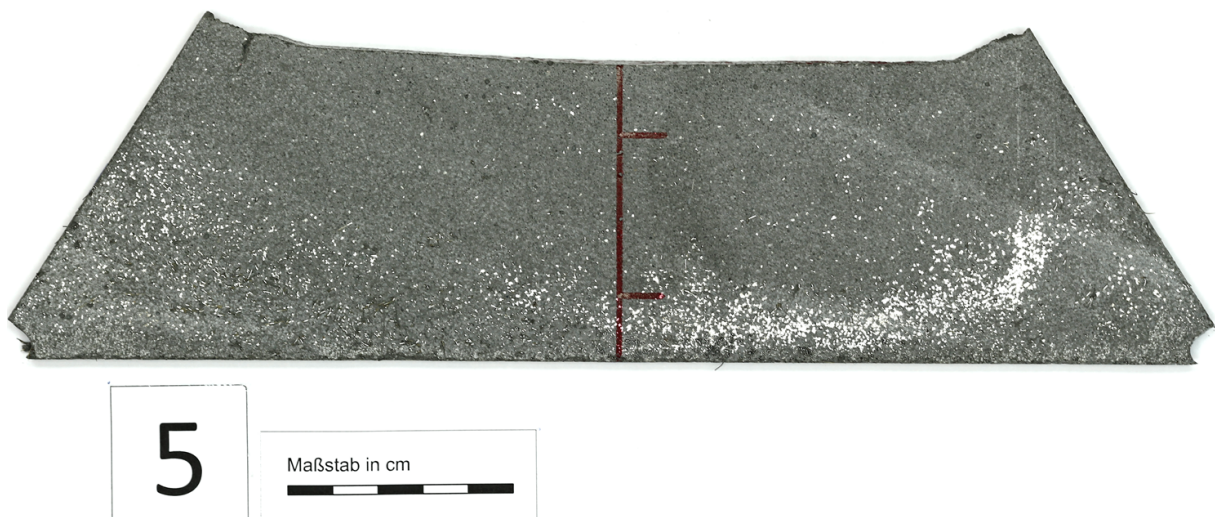


Abbildung 5.28.: Querschnitt Probe 5

Vergleicht man die Probe 5 zu Probe 2, kann einerseits festgehalten werden, dass aufgrund der reduzierten Schleuderzeit deutlich mehr Poren am Querschnitt zu sehen sind und andererseits eine Entmischung der Fasern wie in den anderen Proben vorliegt.

Resümee und weitere Vorgangsweise zur Erstuntersuchung von Probe 5

Damit kann gezeigt werden, dass die Luft im Frischbeton eine bestimmte Zeit benötigen um an die innere Oberfläche zu gelangen und sich der Beton vollständig entlüften kann. Die Schleuderzeit stellt einen maßgeblichen wirtschaftlichen Faktor dar. Für kommerzielle Zwecke könnte dieses Problem auf chemischer Basis durch Zusatzmittel gelöst werden. In der nächste Probe soll der letzte Schleuderparameter, die Zeit zwischen Mischende und Schleuderstart, geändert werden.

5.3.6. Probe 6

Für die Probe 6 sollte die Zeit zwischen dem Mischende und dem Schleuderstart verlängert werden. Der Frischbeton kann in dieser Zeit, angesetzt für 30 min, bereits ansteifen. Dieser Vorgang kann natürlich mit Zusatzmitteln gesteuert werden. Das Ziel hier war es jedoch zu sehen, inwiefern dieses vorzeitige Ansteifen sich auf die geschleuderte Probe auswirkt. Die Überlegung, ein homogenes Gefüge erreichen zu können, war gegeben. Der Frischbeton wurde wie gehabt nach dem Mischen in die Schalform eingefüllt. Nach dem anschließenden Ansteifen von 25 min, konnte ein bereits sehr ausgetrocknetes Haufwerk festgestellt werden. An der Oberfläche bildeten sich bereits „feste Betonklunker“ aus, sodass der Schleuderprozess nach 25 min bereits gestartet wurde. Nach dem Schleudern war der Beton erneut sehr weich. Ein

Herstellungsbedingt	hergestellt am:	24.05.2017
Änderung zur eff. Schleuderzeit:	ALT	NEU
Zeit zw. Mischende und Schleuderbeginn	10 min	25 min
Umdrehungen pro Minute		233 U/min
eff. Schleuderzeit		30 min
Rezepturbedingt		
Änderung zur Referenzrezeptur:	ALT	NEU
Bindemittelleimgehalt	756 l/m ³	491 l/m ³
darin enthaltender Zement	1000 kg/m ³	650 kg/m ³

Tabelle 5.10.: Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 6

Teil des Frischbetons der Probe 6 wurde nicht geschleudert, sondern in einer zylinderförmigen Schalung verdichtet. Da die Konsistenz, gleich wie bei den anderen Proben, steif war, musste die eingebrachte Verdichtungsenergie sehr hoch sein. Wie in Abb. 5.30 ersichtlich, wurde der Beton mittels Kelle in den Rohrstützen eingebracht und anschließend mit einem Flaschenrüttler verdichtet. Jedoch war die eingeführte Verdichtungsenergie dennoch zu gering, sodass beim Ziehen des Rüttlers ein Loch entstand. Aus diesem Grund wurde die Probe zusätzlich durch Stampfen verdichtet. Sinn dieser ungeschleuderten Probe war es, die Gasdurchlässigkeit einer

5.3. Ergebnisse

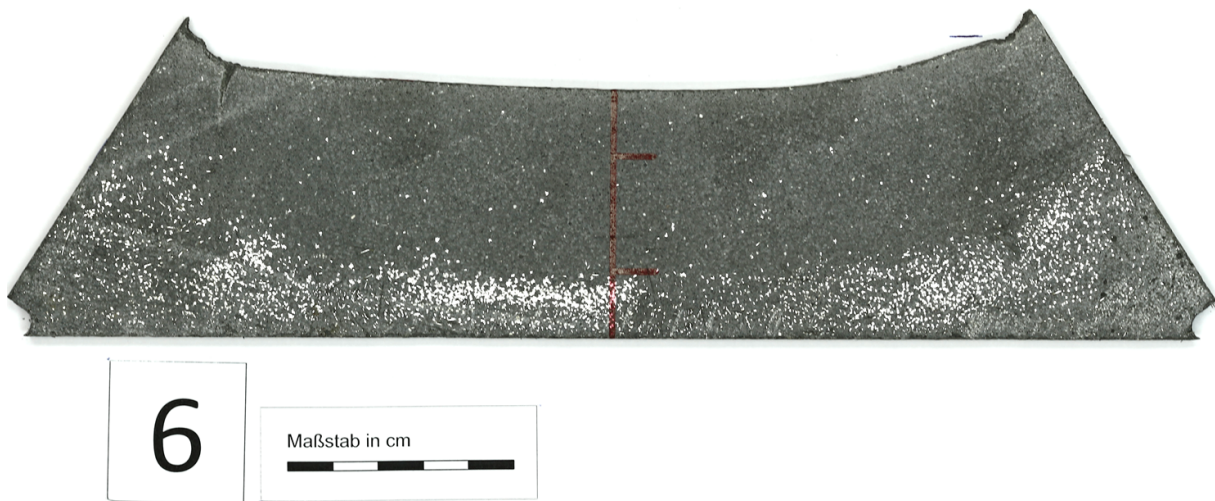


Abbildung 5.29.: Querschnitt Probe 6

ungeschleuderten Probe ebenfalls messen zu können. Ein praxisgerechter Vergleich zwischen geschleudertem und ungeschleudertem ultrahochfestem Beton kann damit aber nicht gemacht werden, da ein ungeschleudeter UHPC eine andere Konsistenz haben müsste und viel fließfähiger wäre.

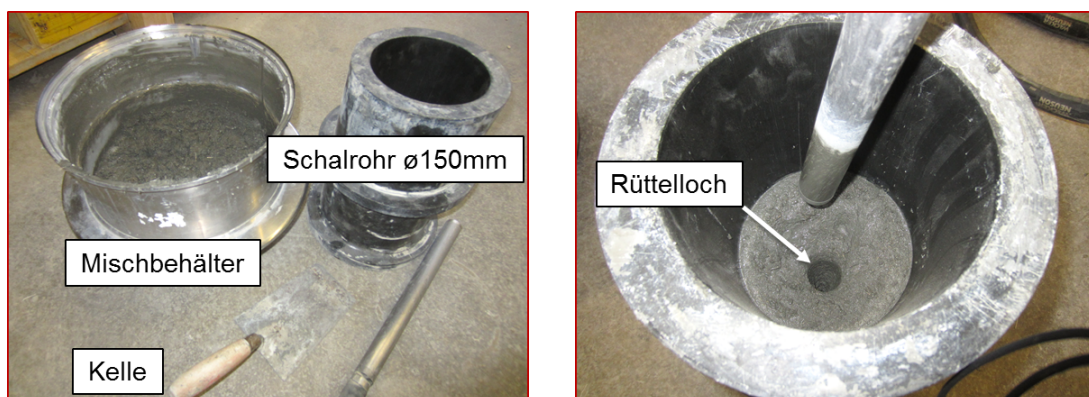


Abbildung 5.30.: Ungeschleuderte Probe 6

Da zwar vor Schleuderbeginn der Beton bereits angesteift war, aber nach dem Schleudervorgang ähnlich weich wie beispielsweise Probe 2 war, können hier keine Unterschiede zur Probe 2 in der Erstuntersuchung festgestellt werden.

Resümee und weitere Vorgangsweise zur Erstuntersuchung von Probe 6

Bei den bis dato durchgeführten Versuchen konnten viele neue Erkenntnisse gewonnen werden, wobei der Grundsatz von ultrahochfestem Beton mit Stahlfasern, eines homogenen Gefüges,

bis jetzt nicht erfüllt werden konnte. Ein stabiles, grobes Korngerüst sollte daher in der nächsten Mischung für ein Verzahnen der Stahlfasern sorgen und damit jegliche Entmischung einzuschränken.

5.3.7. Probe 7

In der Probe 7 wurde ein Teil (ca. 60 M-%) des Zuschlags an Quarzsand 0,3-0,8 mm durch Edelbasalt 2-4 mm ersetzt. Dabei wird weniger Bindemittelleim benötigt und es wurde ca. auf die Hälfte des in den vorhergehenden Proben angesetzten Bindemittelleims reduziert. Da das Verhältnis zwischen Leim und Gesteinskörnung schlecht abgestimmt war, ist diese Probe hinsichtlich der Dichtigkeit nicht aussagekräftig und wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter angewertet.

5.3.8. Probe 8

Nach dem Ergebnis der Probe 7 wurde der Anteil an Bindemittelleim auf 476 l/m³ (nach Absprache mit Fachleuten des IBBs der TU Graz) erhöht. Beim Mischen ist jedoch ein Fehler aufgetreten, sodass Wasser beigemischt werden musste. Aufgrund der Unklarheiten und zeitlichen Abweichungen im Mischprozess, wird auch diese Probe nicht ausgewertet.

5.3.9. Probe 9

Die Probe 9 wurde mit der in Tab. 5.11 angeführten Änderungen zur Referenzrezeptur hergestellt. Wie bereits erwähnt sollte ein grobes Korngerüst den Stahlfasern Stützwirkung verschaffen und ein homogenes Gefüge sicherstellen.

Herstellungsbedingt	hergestellt am: 02.06.2017	
Umdrehungen pro Minute	233 U/min	
eff. Schleuderzeit	30 min	
Zeit zw. Mischende und Schleuderbeginn	10 min	
Rezepturbedingt		
Änderung zur Referenzrezeptur:	ALT	NEU
Zuschlag - Verhältnis Quarzsand 0,3-0,8 mm / Edelbasalt 2-4 mm in [%]	100 / 0	39 / 61
Bindemittelleimgehalt	756 l/m ³	476 l/m ³
darin enthaltender Zement	1000 kg/m ³	630 kg/m ³

Tabelle 5.11.: Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 9

5.3. Ergebnisse



Abbildung 5.31.: Querschnitt Probe 9

Abb. 5.31 zeigt den Querschnitt der Probe 9. Auch hier kann man erkennen, dass kein homogener Querschnitt vorliegt. Bezüglich der Stahlfasern können am mittleren Radius der Probe dichtere Bereiche festgestellt werden. Darüber sind wenige Fasern zu finden und darunter ist die Verteilung eher gleichmäßig ausgeprägt. Prinzipiell können am vorliegenden Querschnitt drei verschiedene Bereiche definiert werden, was Abb. 5.32 demonstriert. Die oberste (innerste) Schicht besteht aus Bindemittelleim und Quarzsand 0,3-0,8 mm. In der mittleren Schichtung ist neben Leim und Quarzsand auch Edelbasaltspalt 2-4 mm zu finden. Die äußerste Schicht enthält Leim, Quarzsand, Edelbasaltspalt und Stahlfasern.

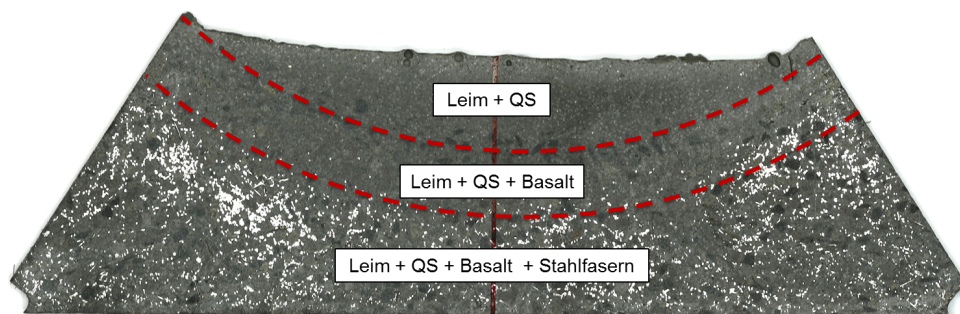


Abbildung 5.32.: Schichtungen - Querschnitt Probe 9

Resümee und weitere Vorgangsweise zur Erstuntersuchung von Probe 9

Diese Probe bestätigt, dass durch den größeren Zuschlag von Basaltspalt 2-4 mm die Stahlfasern gestützt werden können und somit geringere Entmischung nach außenhin auftritt. Da im obersten (innersten) Abschnitt ausschließlich Bindemittelleim und Quarzsand 0,3-0,8 mm enthalten ist, ist möglicherweise der Leimanteil noch zu hoch und könnte weiter reduziert werden.

Da diese Arbeit auch die zentrale Frage behandeln soll, was der Druck während der Hydratation verändert, wird in der letzten Probe über einen längeren Zeitraum geschleudert, sodass die Erhärtung nach Abb. 3.1 im Schleuderprozess erfolgt.

5.3.10. Probe 10

Wie erwähnt soll die Probe 10 den Einfluss einer länger andauernden Druckbeaufschlagung während der Hydratation wiedergeben. Dazu wurde für die effektive Schleuderzeit 7 Stunden angesetzt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde dieselbe Rezeptur wie in Probe 2 verwendet. Nach Schleuderende wurde die Öffnung, durch die der Frischbeton eingefüllt wurde entfernt und die Probe begutachtet. Durch den eingesetzten Hydratationsprozess und der abgeschlossenen Schalung, kam es im Inneren zu einer sehr starken Wärmeentwicklung, sodass damit auch eine Art Wärmebehandlung einherging.

Herstellungsbeding	hergestellt am:	11.06.2017
Änderung zur eff. Schleuderzeit:	ALT	NEU
eff. Schleuderzeit	30 min	7 Std
Umdrehungen pro Minute		233 U/min
Zeit zw. Mischende und Schleuderbeginn		10 min
Rezepturbeding		
Änderung zur Referenzrezeptur:	ALT	NEU
Bindemittelleimgehalt	756 l/m ³	491 l/m ³
darin enthaltender Zement	1000 kg/m ³	650 kg/m ³

Tabelle 5.12.: Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 10

Betrachtet man den Querschnitt in Abb. 5.33, ist die ausgebildete Rundung, sprich der innere Radius, besonders klar ausgebildet. Wie auch in Probe 2 sind die Stahlfasern am unteren, äußeren Rand angeordnet. Am Querschnitt der Probe 10 sind weder Verdichtungsporen, noch derartige Unterschiede hinsichtlich der Dichtheit zu Probe 2 erkennbar. Betrachtet man Probe 10 genauer, können am Querschnitt viele weiße Punkte, bestehend aus zusammengeklebten Quarzpartikeln, erkannt werden. Bei anderen Proben sind derartig ungebundene Quarzpartikel, trotz gleichen Mischablaufs, nicht erkennbar.

5.3. Ergebnisse

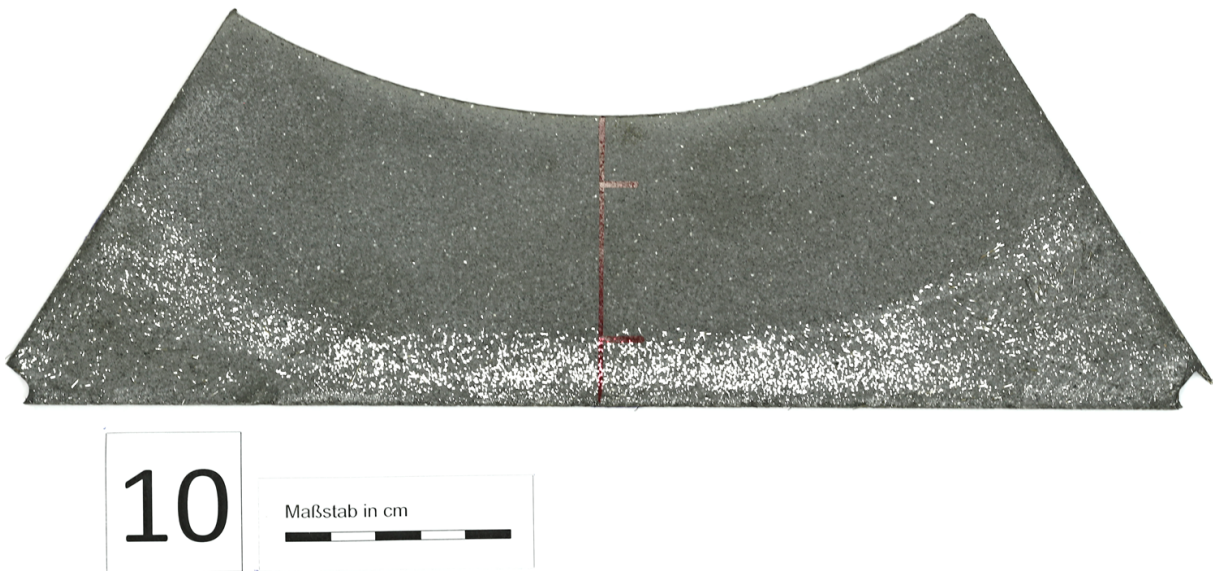


Abbildung 5.33.: Querschnitt Probe 10

6. Analysemethoden zur Gasdurchlässigkeit

6.1. Durchgeführte Messungen

Aufgrund der Abmessungen der geschleuderten Probe konnten nur eine begrenzte Anzahl an Analyseproben entnommen werden. Aufgrund von Material- bzw. Prüftoleranzen in der Analyse von Materialien, werden normalerweise die Prüfergebnisse mehrerer Chargen gemittelt und mit einer gegebenen Standardabweichung angegeben. Hier wurde aus Gründen des erhöhten Aufwands in der Herstellung lediglich nur eine geschleuderte Probe je Parametervariation hergestellt. Es gibt viele mögliche Prüfungskonfigurationen zur Bestimmung unterschiedlichster Materialkennwerte. Bezogen auf die Gasdichtheit von UHPC wurden in dieser Arbeit folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Permeabilitätsmessung
- Gasadsorptionsmethode (BET-Methode)
- Quecksilberporosimetrie
- Dichtebestimmung
- Druckfestigkeit und E-Modul

Das Hauptaugenmerk wurde auf die Permeabilitätsmessung gesetzt. Neben dem überschaubaren Probenvolumen von ca. 5,5l wurde die Schalungsform derartig ausgebildet, dass eine Bohrkernentnahme zur Bestimmung der Permeabilität möglich war. Desweiteren wurden zur Bestimmung des E-Moduls bzw. der Druckfestigkeit soweit möglich ein bis zwei Prismen mit den Abmessungen 4x4x16 cm von der geschleuderten Probe herausgeschnitten. Alle weiteren, kleineren Analyseproben wurden aus den Probenverschnitten gewonnen.

6.1.1. Permeabilitätsmessung

Die Permeabilität oder auch Durchlässigkeit genannt, stellt eine reine Stoffkonstante dar. Treten zwischen Porenwandung und dem durchströmten Medium keine Wechselwirkungen aus chemischer oder physikalischer Natur auf, so ist die Durchlässigkeit unabhängig vom gewählten Strömungsmedium und den Versuchsbedingungen. Wie in Kapitel 3.3.3 ist das beschriebene Gesetz nach *DARCY* nur dann gültig, wenn eine laminare Strömung vorliegt. Die Durchlässigkeit besitzt die Maßeinheit einer Fläche und wird üblicherweise in $[m^2]$ angegeben. Nicht zu verwechseln mit k_f , der sogenannte Durchlässigkeitsbeiwert, welcher in der Grundwasserhydraulik und Hydrogeologie zur Beschreibung der Durchlässigkeit von oberflächennahen und nichtmineralisierten Wässern verwendet wird. Dieser ist nur dann eine Stoffkonstante wenn die Dichte ρ sowie die dynamische Zähigkeit η des durchströmten Mediums konstant ist.[Haefner.2015]

Hinsichtlich der angewendeten Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit unterscheidet man zwischen stationäre und instationäre Messverfahren. Das Gesetz nach *DARCY* gilt bei einem konstanten Volumenstrom, welcher sich erst nach längerer Zeit einstellt. Daher werden Messungen auch bei veränderlichem Volumenstrom (instationär) durchgeführt. Bei den instationären Messverfahren wird nach *DARCY* abgewichen. Da diese Abweichungen, insbesondere der in weiterer Folge beschriebene Klinkenbergfaktor, in den späteren Messungen berücksichtigt werden muss, wird an dieser Stelle kurz darauf eingegangen.

6.1.1.1. Abweichungen vom Gesetz nach *DARCY*

Abweichungen vom Gesetz nach *DARCY* können physikalischen oder chemischen Ursprung haben. Zum chemischen Ursprung sollen Strömungsmedien verwendet werden, die zu keiner Reaktion mit dem Probenmaterial führen. Hingegen sind physikalische Ursachen zur Abweichung: [Haefner.2015]

- Gleiteffekt (Klinkenberg- Effekt)
- Turbulenz
- Reaktion mit der Porenwand

Gleiteffekt

Der Gleiteffekt (engl.: slip-effect) tritt auf bei Gasströmungen, bei denen die Größe der mittleren freien Weglänge jener des Porendurchmessers gleicht. Dabei „haftet“ das Gas nicht mehr an den Wänden der Porenkanäle, sondern es kommt zu einem Gleiteffekt. Dies führt zur Erhöhung des Massenstroms. Dieser Effekt wird nach *KLINKENBERG* in der scheinbaren Permeabilität k_K ausgedrückt und kann mathematisch nach Gl. 6.1 angeschrieben werden.[Haefner.2015]

$$k_K = k \times \left(1 + \frac{b}{p_m}\right) \quad (6.1)$$

- mit:
- k_K scheinbare Permeabilität [m^2]
 - k absolute Permeabilität [m^2]
 - p_m mittlerer absoluter Gasdruck in der Probe [Pa]
 - b Klinkenbergfaktor [Pa]

Dabei kann folgende Korrelation zunutze gemacht werden:

$$b = b_K \times \left[\frac{k_0}{k}\right]^{0.35} \quad (6.2)$$

- mit:
- b_K Korrelationsfaktor $b_K = 0.543$ nach gegenwärtigem Kenntnisstand
 - k_0 Referenzpermeabilität $k_0 = 1 \times 10^{-15} m^2$
 - k absolute Permeabilität [m^2]
 - b Klinkenbergfaktor [bar]

Aus Gl. 6.2 geht hervor, dass bei größeren Permeabilitäten als $10^{-12} m^2$ eine Korrektur nicht notwendig ist. Sind die Durchlässigkeiten jedoch geringer, ergeben sich ohne Berücksichtigung der Klinkenbergkorrektur Fehler im Ausmaß von mehr als einer Größenordnung.

Turbulenzeffekt

Dieser Effekt kann bei Gas- und Flüssigkeitsströmung auftreten und nimmt mit Porendurchmesser und Geschwindigkeit zu. Jedoch sind bei Durchlässigkeiten unter $10^{-9} m^2$ keine turbulenten Strömungen zu erwarten.[Haefner.2015] Im UHPC Sachstandbericht [Schmidt.2008] werden für herkömmlichen ultrahochfesten Beton Durchlässigkeiten deutlich kleiner als $10^{-17} m^2$ angegeben. Somit ist der Turbulenzeffekt für UHPC nicht zutreffend.

Abb. 6.1 gibt eine Größenordnung von scheinbarer Permeabilität zur Klinkenberg Permeabilität bzw. absoluter Permeabilität. In Vorversuchen (ungeschleudert) wurde (ebenso an der Universität Bergakademie in Freiberg) die Instationäre Permeabilität von UHPC-Probe aus ähnlichen Mixturen gemessen und mit bzw. ohne Klinkenbergkorrektur angegeben. Auf die logarithmische Darstellung der Permeabilität in Abb. 6.1 sollte geachtet werden.

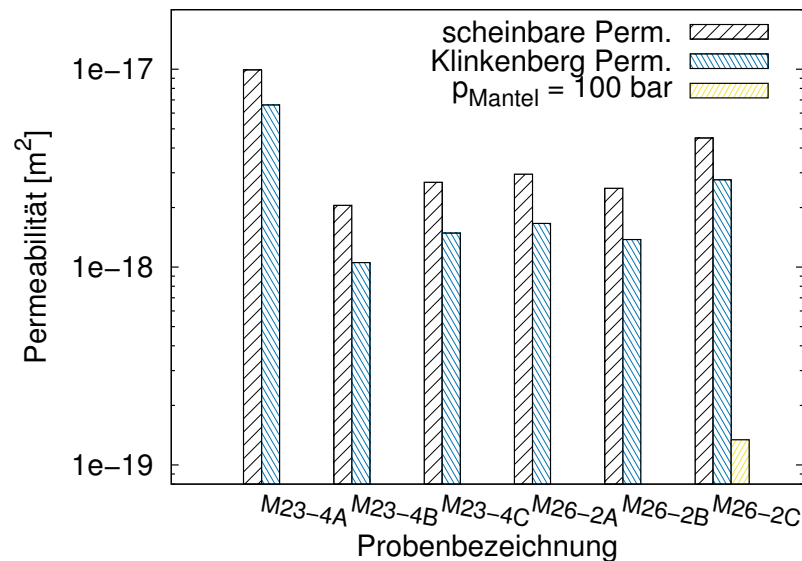


Abbildung 6.1.: Beispielhafter Vergleich von scheinbarer Permeabilität zu Klinkenberg Permeabilität (absolute Permeabilität) aus ungeschleuderten Vorversuchen [LKI.2017]

Reaktion mit der Porenwand

Bei polaren Flüssigkeiten wie Wasser oder Ehtanol kommt es zur Bildung elektrischer Doppelschichten an den Porenkanälen, wobei die Flüssigkeiten durch eine sogenannte Dipolbildung zurückgehalten werden, was zur Abweichung vom Gesetz nach *DARCY* führt.[Haefner.2015]

Prinzipiell lassen sich zwei Arten von Durchlässigkeiten, die Gas- und Flüssigkeitspermeation unterscheiden. Werden sehr geringe Permeabilitäten mit Flüssigkeiten als Prüfmedium gemessen, erscheint dies technisch am einfachsten, da kein Gleiteffekt auftreten kann. Allerdings ist die vollständige Sättigung der Probe sehr schwer möglich bzw. dauert sehr lange bei sehr dichten Materialien wie UHPC. In dieser Arbeit wird ausschließlich die Gasdurchlässigkeit behandelt und auf die Permeation von Flüssigkeiten nicht weiters eingegangen.[Haefner.2015]

6.1. Durchgeführte Messungen

6.1.1.2. Stationäres Messverfahren

Das stationäre Messverfahren zur Bestimmung der Gaspermeabilität poröser Stoffe wird in der Schriftenreihe des *Deutschen Ausschusses für Stahlbeton* im Heft 422 [DAfStb.1991] beschrieben und wird hier kurz wiedergegeben.

Gerät und Versuchsaufbau

Auf Basis der Methode nach *RILEM-CEMBUREAU* kann die Gasdurchlässigkeit, als Maß der offenen Porigkeit, im einachsigen Durchströmungszustand bestimmt werden. Der schematische Versuchsaufbau sowie das Messgerät sind in Abb. 6.2 dargestellt.

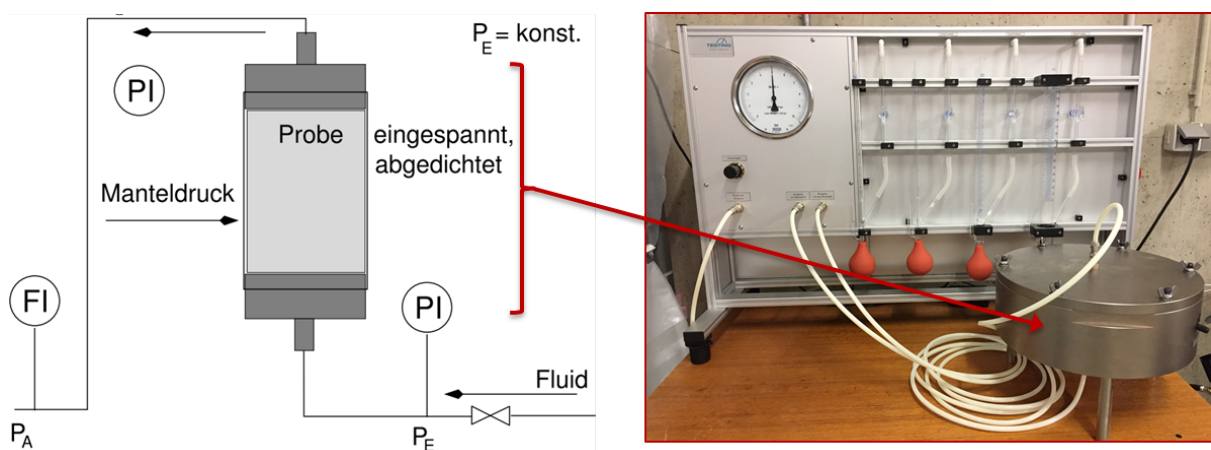


Abbildung 6.2.: Methode nach *RILEM-CEMBUREAU* - schematische Darstellung (links) [Haefner.2015] und Messgerät vom Institut für Betonbau, TU Graz (rechts)

Dabei wird ein einseitiger Überdruck auf die Probe aufgebracht. Die Prüfzelle besteht aus Aluminium und als Prüfgas wird vorwiegend komprimierte Luft, Sauerstoff, Stickstoff o.Ä. verwendet. Das eingesetzte Gas darf dabei nicht mit dem Beton reagieren bzw. deren Porigkeit verändern wie z.B. Kohlenstoffdioxid oder Wasserdampf. Das Prüfgas gelangt dabei durch eine Druckleitung zum Präzisionsdruckregler mit Manometer und weiter zum Prüfkörper vor. Durch eine profilierte Platte, siehe Abb. 6.3 (rechts), kann sich das Gas gleichmäßig über den Probenquerschnitt ausbreiten und durchdringt diesen. Über die Probenhöhe wird der Eingangsdruck des Gases zum vorherrschenden Luftdruck der anderen Seite abgebaut. Die durchströmte Luft wird wiederum über die profilierte Platte zur Schlauchleitung zusammengeführt und zu einem Messrohr aus Glas, dem sogenannten Blasenähler weitergeleitet.[DAfStb.1991]

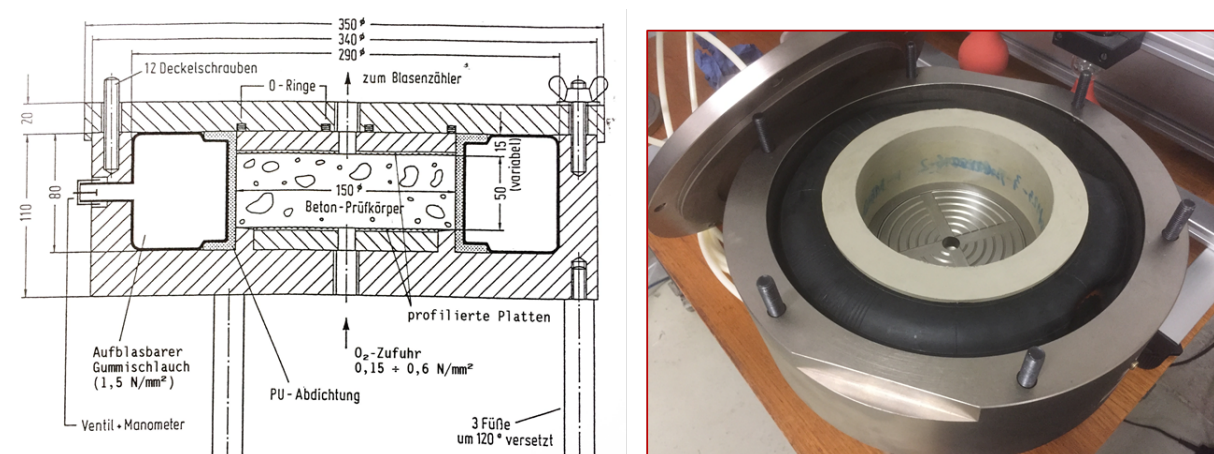


Abbildung 6.3.: Querschnitt der Prüfzelle des Messgerätes mit Probe (links)[DAfStb.1991], Prüfzelle ohne Probe - Institut für Betonbau, TU Graz (rechts)

Probekörper - Abmessungen und Lagerung

In der Literatur werden zylindrische Probenabmessungen von Durchmesser 150 mm und Höhe zwischen 45-50 mm für Normalbeton angegeben.[DAfStb.1991] Die Prüfzelle dieses Messgeräts ist auf diese Abmessungen ausgelegt. Zylinder dieser Dimension werden aus den geschleuderten Proben mittels Kernbohrgerät gezogen und anschließend auf die gegebenen Höhe geschnitten bzw. geschliffen. Für dichte Proben (z.B. Proben aus UHPC) soll das Verhältnis der durchströmten Querschnittsfläche zur durchströmten Länge möglichst groß sein, sodass das gemessene Gasvolumen größer wird. Zur Lagerung der Proben wird in der Literatur eine ca. sechswöchige Vorlagerung bei Normalklima 20/65 empfohlen.[DAfStb.1991] Werden die Proben unter zu hohen Temperaturen getrocknet, besteht die Gefahr das Mikrorisse entstehen, welche sich negativ auf die Gasdurchlässigkeit auswirken und für erhöhte Durchlässigkeit sorgen. Im eigenen Versuchsprogramm wurden die Proben vor der Prüfung zwischen 4-6 Wochen bei Normalklima vorgelagert. Eine genauere zeitlich abgestimmte Lagerung war nicht möglich, da weder die Proben gleichzeitig hergestellt werden konnten, noch die Gasdurchlässigkeit gleichzeitig gemessen werden kann. Die Vorlaufzeiten bis sich ein konstanter Volumenstrom einstellte variierten.

Einbau der Probe und Versuchsdurchführung

Beim Einbau wurde im ersten Schritt eine seitliche Gummimanschette - siehe Abb. 6.3 (links) PU-Abdichtung - über die Probe gestülpt. Die Stahlfasern der Probe wurden in der Kernbohrung teilweise ausgefranst und standen nach außen. Somit war beim Überziehen der Gummimanschette höchste Vorsicht geboten. Aus diesem Grund wurde der Probenumfang (Mantelfläche

6.1. Durchgeführte Messungen



Abbildung 6.4.: Bohren der Probekörper aus den geschleuderten UHPC-Proben

des Zylinders) im Voraus mit einem sehr dünnen Fettfilm versehen, damit ein dichter Übergang von Probe zur Gummimanschette gegeben war. Nachdem der leicht aufgepumpte Gummischlauch - siehe Abb. 6.3 (links) Aufblasbarer Gummischlauch - um die Gummimanschette geführt wurde, konnte die Probe in die Prüfzelle eingesetzt, die profilierte Platte daraufgesetzt und die Prüfzelle über den Deckel mittels 6 Schrauben dicht verschlossen werden. Nach dem Einbauen der Messprobe wurde der Gasdruck über den Druckregler aufgebracht. Der *Deutsche Ausschuss für Stahlbeton* empfiehlt dazu Drücke zwischen 1-4 bar. Um sicherzustellen, dass das Prüfgas ausschließlich durch den Prüfkörper strömt, wird die seitliche Abdichtung durch das Aufblasen eines Gummischlauchs an die Probe gedrückt - siehe Abb. 6.3 (rechts). Da UHPC ein sehr dichtes Gefüge aufweist, soll der aufgebrachte Anpressdruck des Prüfgesetzes möglichst groß sein um geringe Durchströmungszeit zu erreichen. In den eigenen Versuchen wurde der Anpressdruck des Prüfgesetzes mit 5 bar gewählt. Der seitliche Anpressdruck des Gummischlauchs sollte ein Vielfaches vom Druck des Prüfgesetzes sein.[DAfStb.1991] Der Gummischlauch wurde mit einem Luftkompressor auf einen max. möglichen Seitendruck von 9-10 bar aufgeblasen. Somit konnte das Druckverhältnis 1:2 von Seitendruck zu Anpressdruck des Prüfgesetzes erreicht werden. Um Streuungen und Fehlerquellen bzw. die Effekte nach *KLINKENBERG* in Kap. 6.1.1.1 einzubeziehen, muss auf mehreren verschiedenen Druckstufen des Anpressdruckes gemessen werden.[Amro.2012] Bei der Messung wird ein konstanter Volumenstrom vorausgesetzt. Um grundsätzlich einen Volumenstrom bei UHPC feststellen zu können, muss die kleinste am Gerät installierte Messröhre (siehe Abb. 6.5) mit einem Volumen von $1,5 \text{ cm}^3$ verwendet werden. Dabei wird über das Zusammendrücken des roten Luftballens aus einer kürzeren Röhre eine Seifenblase generiert, die über den Volumenstrom in der Messröhre angetrieben wird. Über die Zeit und der Volumenskala an der Messröhre, kann der Volumenstrom errechnet werden. Wenn dieser einen konstanten Wert erreichte, was bei den untersuchten Proben ca. 1 Woche dauerte, konnte daraus die Gasdurchlässigkeit errechnet werden. Der zeitliche Aspekt um einen konstanten Volumenstrom erreichen zu können, spielt bei sehr dichten Materialien wie ultrahochfester Beton eine wesentliche Rolle. Deshalb und aufgrund der Anzahl an Messproben

war es in dieser Arbeit nicht möglich auf mehreren Druckstufen zu messen. Die Seifenblase entweicht in die Umgebungsluft, wenn sie das max. Volumen der Messröhre erreicht hat. Für jede weitere Messung muss die Seifenblase erneut generiert werden. Dieser Vorgang wurde mehrmals wiederholt, bis sich ein möglichst konstanter Volumenstrom eingependelt hat, der dann zur Berechnung der Permeabilität herangezogen wurde.

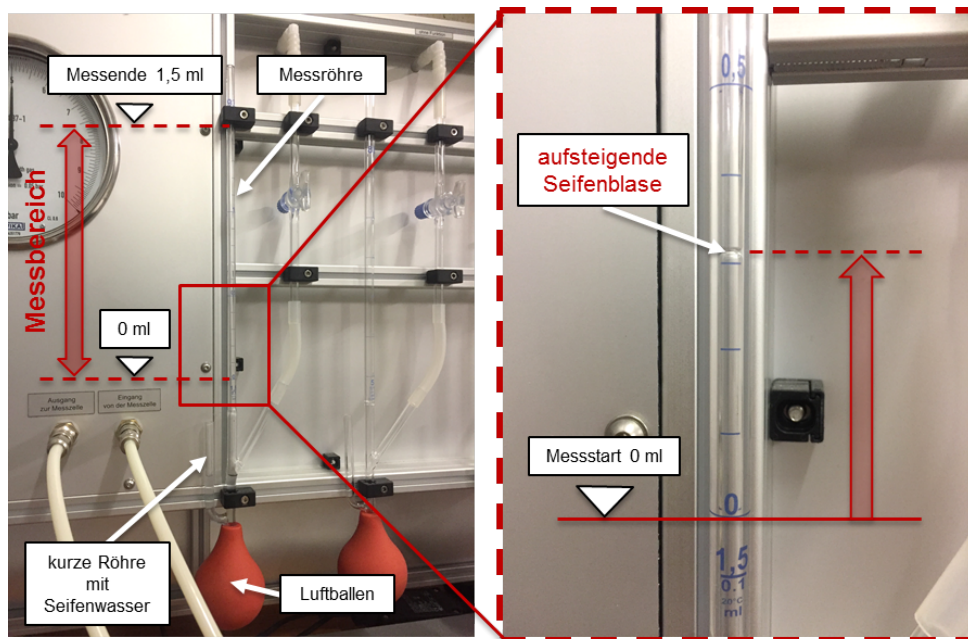


Abbildung 6.5.: Messröhre (links) und Messskala (rechts)

Versuchsauswertung

Mit den gemessenen Volumenströmen kann die Auswertung der Permeabilitätskoeffizienten K stattfinden. K errechnet sich für laminare Strömungen mit folgender Gleichung nach *DARCY* aus [Zagar.1955] *et al.*:

$$K = \eta \times \left(\frac{2 \times Q \times p_0 \times h}{A \times (p_E^2 - p_A^2)} \right) \quad (6.3)$$

- mit:
- K spezifischer Permeabilitätskoeffizient [m^2]
 - A durchströmte Querschnittsfläche des Prüfkörpers [m^2]
 - Q Durchflussrate des Sauerstoffgases [$\frac{m^3}{s}$]
 - h durchströmte Höhe des Probekörpers [m]
 - η dynamische Viskosität der Luft $\eta = 2.02 \times 10^{-5}$ bei 20°C [$\frac{N \times s}{m^2}$]
 - p_E Eingangsdruck, absolut [$\frac{N}{m^2}$]
 - p_A Ausgangsdruck = Atmosphärendruck [$\frac{N}{m^2}$]
 - p_0 Druck bei der Messung der Durchflussrate = Atmosphärendruck p_A [$\frac{N}{m^2}$]

6.1. Durchgeführte Messungen

Neben den berechneten Permeabilitätskoeffizienten K wird auch die zeitliche Entwicklung des Volumenstroms angegeben.

6.1.1.3. Instationäres Messverfahren

Nach *AMRO* [Amro.2012] stellt der stationäre Volumenstrom zwar ein Maß für die Permeabilität dar, aber aufgrund der geringen Mengen ist dieser sehr fehleranfällig und folgende Hürden sind gegeben:

- die Zeitdauer bis sich ein konstanter, stationärer Zustand einstellt ist sehr lang
- Messungen aufgrund langer Messdauer und von kleinen Fluidströmen sind stark fehlerbehaftet und oft schwer bis gar nicht mehr möglich

Der in Kap. 6.1.1.1 beschriebenen Klinkenbergfaktor kann im instationären Messverfahren berücksichtigt werden. Einerseits ist der beaufschlagte Druck im instationären Verfahren viel höher und andererseits kann sofort gemessen werden (keine konst. Volumenstrom), was die Messzeit verkürzt.

Als Vergleich zum stationären Verfahren, wurde der Permeabilitätskoeffizient einer geschleuderte Probe auch im instationären Messverfahren bestimmt. Dazu wurde die Probe zur Technischen Universität Bergakademie Freiberg nach Deutschland gesendet. Die Probe wurde dort vor Ort im folgenden Verfahren analysiert.

Versuchsaufbau und Messung

Im instationären Verfahren sind die Messgrößen zeitlich nicht konstant. Konkret verändert sich der Volumenstrom und die Druckdifferenz über die Zeit. Wie in Abb. 6.6 dargestellt, befindet sich die Probe zwischen zwei Druckkammern mit bestimmten Volumen. Vor der Messung wird die Eingangskammer mit Druck (p_E) beaufschlagt und nachdem das Ventil V_2 in Abb. 6.6 geöffnet wird, können sich die Drücke zwischen Eingangs- und Ausgangskammer über die dazwischenliegende Probe ausgleichen. Anhand der Druckverläufe in den einzelnen Kammern, dargestellt in Abb. 6.7, kann über ein numerisches Verfahren auf die Permeabilität der Probe zurückgerechnet werden. Neben der Permeabilität lässt sich durch die definierte Massebilanz der Volumina auch die Porosität der Probe errechnen.[Haefner.2015]

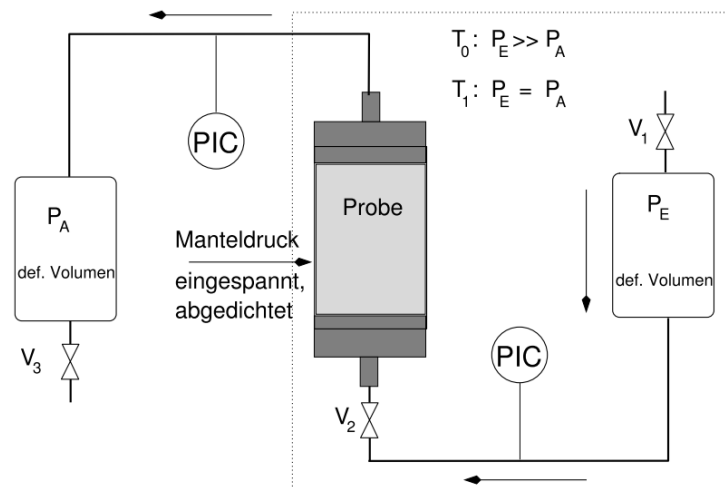


Abbildung 6.6.: Versuchsaufbau der instationären Permeabilitätsmessung [Haefner.2015]

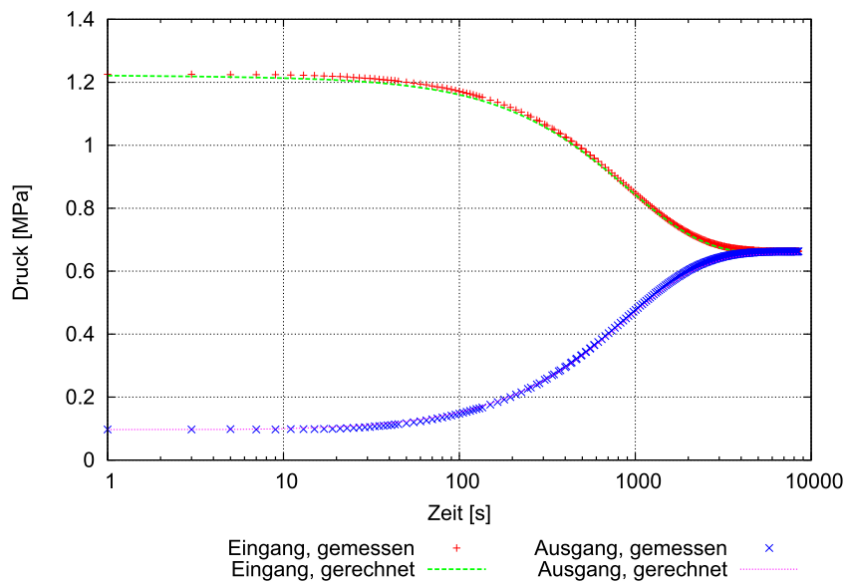


Abbildung 6.7.: Messgrößen der instationären Permeabilitätsmessung: Druckverlauf in Eingangs- und Ausgangskammer [Haefner.2015]

Probekörper

Das Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau der TU Bergakademie Freiberg befasst sich intensiv mit der Gasdurchlässigkeit verschiedenster Gesteine und besitzt auch ein dementsprechendes Equipment bezüglich der Abmessungen der Proben. Da die Bestimmung der Dichtheit von geschleuderten UHPC-Proben eine Schlüsselangabe dieser Arbeit darstellt, sind auch die unterschiedlichen Messmethoden und deren Korrelation von Bedeutung. Aus diesem Grunde wurde die Probe 2 sowohl im stationären, als auch im instationären Messverfahren geprüft. Dazu wurde eine Kernbohrung mit dem Durchmesser von 50 mm aus dem bereits vorhandenen Prüfcylinder $\varnothing 150$ mm herausgebohrt - siehe Abb. 6.8. Damit ist für die späteren Ergebnisse ein Vergleich dieser beiden Messverfahren möglich.

6.1. Durchgeführte Messungen



Abbildung 6.8.: Probekörper $\varnothing 50$ mm für die Instationäre Messung von Probe 2

Versuchsauswertung

Die Auswertung wurde ebenfalls von der TU Freiberg gemacht und erfolgte über eine Software, welche die Abweichungen der gemessenen und berechneten Druckverläufe minimiert und damit die Permeabilität und Porosität iterativ berechnet. In dieser Auswertung der Messdaten wird auch die Klinkenberg-Korrektur bestimmt, um auf die „wahre“ (absolute) Permeabilität rückzuschließen.[Haefner.2015]

6.1.2. Bestimmung von Porenradienverteilung und spezifischer Oberfläche

Das Grundprinzip zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche sowie der Porenradienverteilung liegt in der Adsorption innerer und äußerer Oberflächen einer Probe. In dieser Arbeit wurde die Gasadsorptionsmethode (sogenannte BET-Methode) und die Quecksilberdruckporosimetrie zur primären Messung der Porenradienverteilung einer geschleuderten UHPC-Probe angewendet. Die Größenordnung der zu messenden Porenradien bzw. deren Unterschiede von BET-Methode zu Quecksilberporosimetrie soll Abb. 6.9 auf Grundlage nach SCHEYDT [Scheydt.2014] verdeutlichen. Diese Abbildung ist eine Zusammenfassung von Messmethoden verschiedener Porengrößenverteilungen nach mehreren Autoren.

Da es im Zuge dieser Arbeit nicht möglich war, für alle geschleuderten Probe derartige Auswertungen zu machen, wurden diese beiden Methoden nur für die Probe 2 durchgeführt. Die Überlegung zu Beginn der Messungen war, den überlappenden Porengrößenbereich zu vergleichen bzw. wenn möglich auch mit ev. vorhandener Literatur.

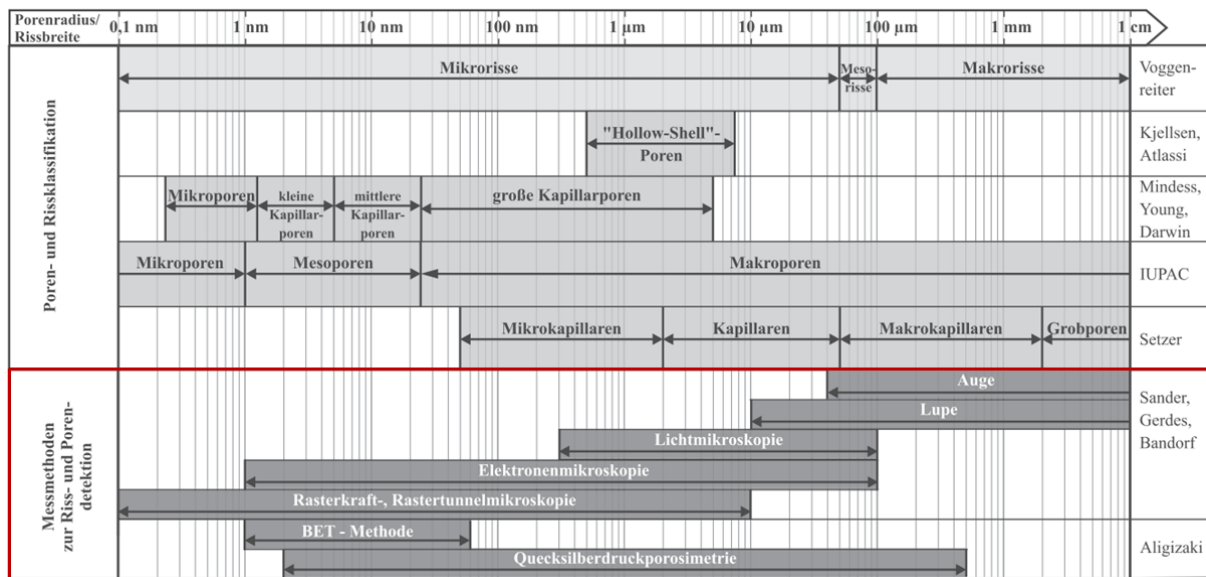


Abbildung 6.9.: Messmethoden verschiedener Porengrößen nach mehreren Autoren [Scheydt.2014]

6.1.2.1. Gasadsorptionsmethode (BET)

Bei der BET-Methode, benannt nach den Entwicklern Brunauer, Emmett und Teller, wird hauptsächlich Stickstoff als Adsorbat verwendet. Im zugrundeliegenden, einfachen Messprinzip, wie in Abb. 6.10 ersichtlich, wird die Probe zuerst im Kältebad abgekühlt. Stickstoff wird in einer bestimmten Menge in die kalibrierte Glasbürette eingefüllt. Die Menge an Stickstoff kann über die im Wasser gelagerten Glaskugeln geregelt werden - das nicht benötigte Volumen wird mit Quecksilber aufgefüllt. Der vorherrschende Druck kann über ein Manometer abgelesen werden. Anschließend wird der Weg zur Probe über ein Ventil geöffnet und das Gas gelangt zur Probe und wird adsorbiert. Über den sich einstellenden Gleichgewichtsdruck, dem Gasvolumen und der benötigten Fläche eines Stickstoffmoleküls kann die spezifische Oberfläche in m^2/g eines bestimmten Porenbereichs angegeben werden.¹

Eine Messung wurde vom Research Center Pharmaceutical Engineering RCPE mit dem Gerät TriStar II ² durchgeführt. Die ausgewerteten Ergebnisse wurden im Anschluss übermittelt.

¹<http://chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/adsorption/adsorbentien/adsorbentien.vlu/Page/vsc/de/ch/10/adsorption/adsorbentien/oberflaechenbestimmung/gasadsorptionsmethode.vscml.html>, 20.07.2017

²<http://micromeritics.com/Product-Showcase/TriStar-II-Series/TriStar-II-Series2.aspx>, 20.07.2017

6.1. Durchgeführte Messungen

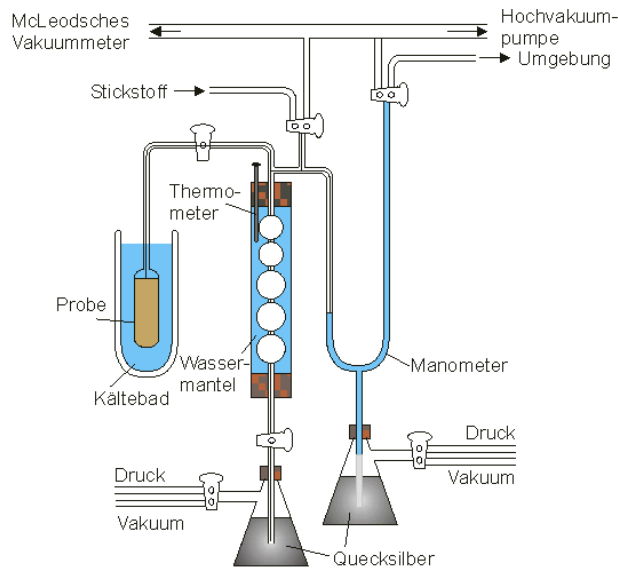


Abbildung 6.10.: BET-Messprinzip: Klassische volumetrische Methode ¹

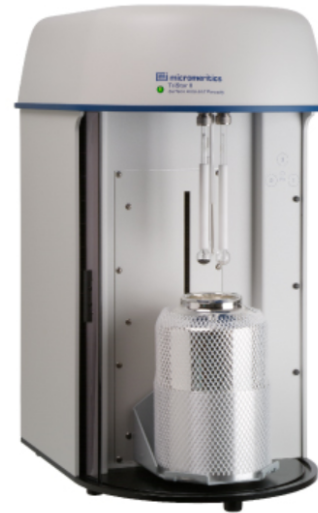


Abbildung 6.11.: BET Messgerät TriStar II ²

6.1.2.2. Quecksilberporosimetrie

Mit der Quecksilberporosimetrie lässt sich die Porenradienverteilung von Meso- und Makroporen, siehe Abb. 6.9 in Festkörpern am gebräuchlichsten bestimmen. Das Messprinzip beruht darauf, dass eine nicht benetzende Flüssigkeit unter Druck in die Messprobe eindringt. Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen äußerem Druck und dem kleinsten zu befüllenden Durchmesser, können die jeweiligen Porenverteilungen bestimmt werden. Bei steigender Druck-erhöhung kann das Quecksilber in immer kleinere Porenradien vordringen. Dazu ist es notwendig vor Beginn der Messung die Poren zu entgasen.³ Zur Versuchsdurchführung wurde wiederum die Probe 2 herangezogen und eine Messung am National Building and Civil Engineering Institute in Ljubljana, Slowenien durchgeführt.

6.1.3. Dichtebestimmung

Aus dem einfachen Grundsatz, je höher die Dichte eines Festkörpers, desto höher seine Dichte, war die Überlegung, von mehreren Proben die Dichte ρ zu bestimmen. Die ÖN EN 1936 regelt Prüfverfahren für Naturstein verschiedener Dichten und Porositäten. In vielen dazu vorgesehenen Formeln der Dichten wie z.B. der Rohdichte ist es notwendig, die Probe vollständig unter Wasser zu sättigen, um mit der gesättigten Masse auf die Rohdichte rückschließen zu

³http://chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/adsorption/adsorbentien/adsorbentien.vlu/Page/vsc/de/ch/10/adsorption/adsorbentien/oberflaechenbestimmung/quecksilber_porosimetrie.vscml.html, 20.07.2017

können. Für ultrahochfesten Beton ist aufgrund des dichten Ausgangsgefüges eine zu 100 %-ige Sättigung nahezu unmöglich. Aus diesem Grund wurde von den geschleuderten Proben 1-6, Probe 10 sowie von der ungeschleuderten, lediglich verdichteten Probe die Dichte bestimmt. Dazu wurden aus den Proben mehrere kleine Betonwürfel je Probe mit den Abmessungen $2 \times 2 \times 2$ cm herausgeschnitten. Verarbeitungstechnisch waren die Abmessungen unpraktisch, jedoch konnte dadurch der Trocknungsprozess wesentlich vorangetrieben werden. Vor der Trocknung wurde eine sogenannte Tauchwägung unter Wasser durchgeführt, um auf ein ausreichend genaues Volumen der Proben über die Dichte des Wassers rückrechnen zu können. Die Proben wurden dann im Ofen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Dieser Vorgang dauerte ca. 1 Woche. Danach konnten die trockenen Proben wiederum gewogen werden und die Trockendichten errechnet werden. Jedoch ist zu beachten, dass vereinzelt in den auserwählten Messproben Stahlfasern enthalten sind, welche das Ergebnis der Trockendichte verfälschen würden. Somit war es notwendig die Probewürfel zu zerstören - siehe Abb. 6.12, enthaltene Fasern mittels Magnete auszusortieren und im Ergebnis zu berücksichtigen.

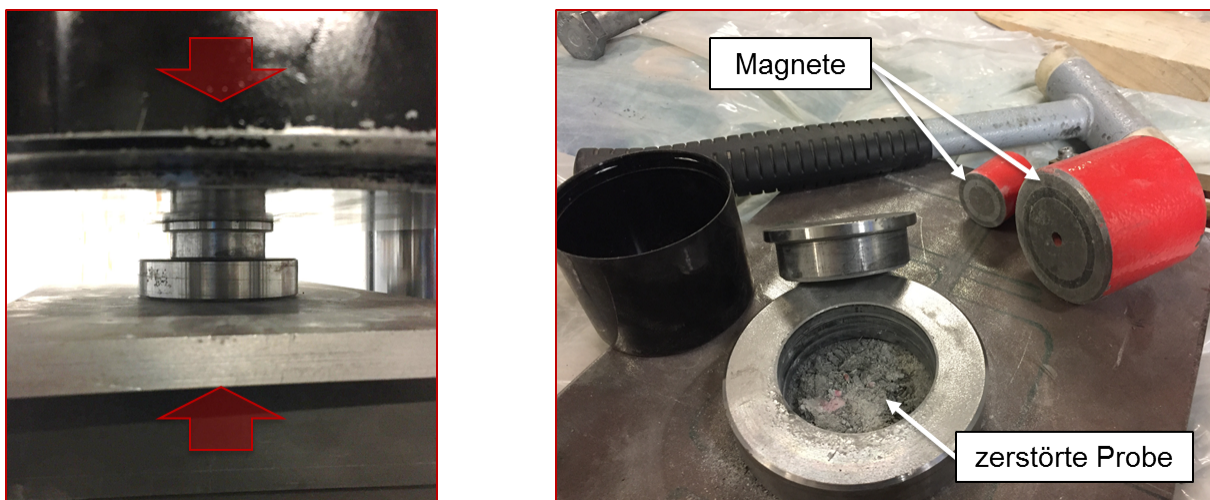


Abbildung 6.12.: Zerstörung des Probewürfels in der Druckpresse (links), Zermahlen mittels Hammer und aussortieren der Stahlfasern mit Magnete (rechts)

6.1.4. Bestimmung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

Da Baustoffe mit höherer Dichte wie z.B. Stahl auch über höhere Festigkeiten verfügen, werden im Zuge dieser Arbeit die Druckfestigkeiten und die E-Moduli geschleudelter UHPC-Proben geprüft. Aufgrund der eingeschränkten, geschleuderten Probeabmessungen konnte je Probe nur ein bzw. zwei Prismen mit den Abmessungen $4 \times 4 \times 16$ cm zur Festbetonprüfung herangezogen werden. In der Auswertung konnten ausschließlich Festigkeiten aus Einzelergebnisse ohne Standardabweichung angegeben werden. Die Prismen wurden aus den geschleuderten Proben

6.2. Ausblick weiterer Messungen

herausgeschnitten und anschließend auf die maßgenauen Abmessungen zugeschliffen. Mit der Würfeldruckpresse vom Labor für Konstruktiven Ingenieurbau LKI wurden die Prismen nach mind. 28-tägiger Aushärtung geprüft. Zuerst wird der E-Modul mit Dehnungsmessungen an beiden Seiten, siehe Abb. 6.13 (rechts), ermittelt. Anschließend werden die Prismen bis zum Bruch gefahren und daraus die max. Druckfestigkeit bestimmt.

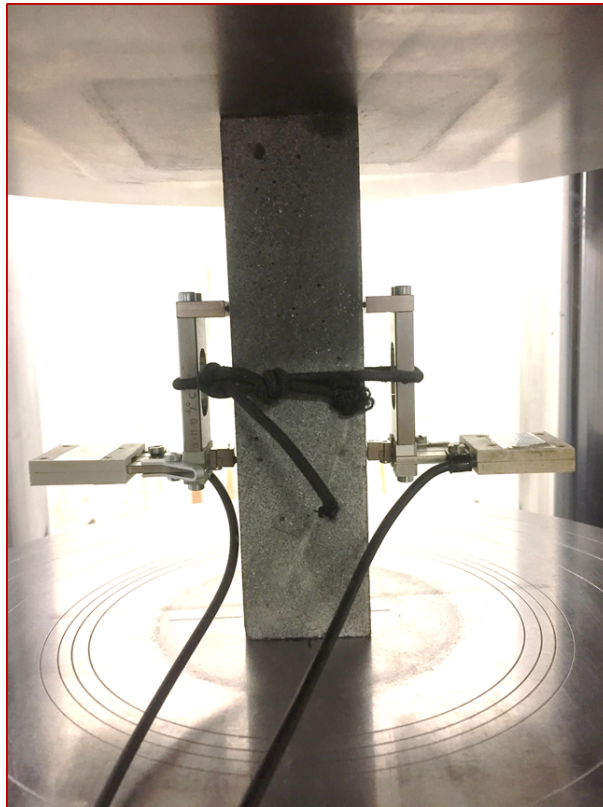


Abbildung 6.13.: *Würfeldruckpresse - Eingespannte Probe mit Dehnungsaufnehmern auf beiden Seiten - LKI*

6.2. Ausblick weiterer Messungen

Neben der durchgeführten Messungen aus Kapitel 6.1 sind auch noch weitere Untersuchungen, die in dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden, möglich. Die Röntgendiffraktometrie sowie die Rasterelektronenmikroskopie werden nachfolgend kurz beschrieben.

6.2.1. Röntgendiffraktometrie - Mineralphasenanalyse

Anhand der Röntgendiffraktometrie kann der Phasenbestand von Materialien analysiert werden. Sowohl Atom- und Ionenradien, als auch die Wellenlänge von Röntgenstrahlung bewegen sich im Bereich weniger Ångström ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{ m}$). Trifft Röntgenstrahlung auf eine kristalline Substanz, so können aus dem Beugungsbild der Röntgenstrahlung Rückschlüsse zum kristallinen Aufbau der Substanz getroffen werden. Dazu dient die sogenannte Rietveldmethode, woraus aus den Röntgenbeugungsdaten ein mathematisches Modell entworfen wird und so die Struktur eines kristallinen Stoffes aufgeklärt wird. Für die vollständige Strukturanalyse eines Stoffes mittels Diffraktometrie ist eine allseitige Durchleuchtung der Probe notwendig. Im Falle zementgebundener Substanzen können Reaktionsprodukte der Zementsteinbildung wie z.B. Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sowohl qualitativ als auch quantitativ ermittelt werden.[Westphal.2007]

6.2.2. Rasterelektronenmikroskopie REM

Neben der in Kap. 5.1.1.2 beschriebenen Lichtmikroskopie kann auch die sogenannte Rasterelektronenmikroskopie REM zur Charakterisierung von Baustoffen herangezogen werden. Dass nicht nur die Oberfläche in hoher Auflösung dargestellt werden kann, sondern auch chemische Analysen möglich sind, hebt die Rasterelektronenmikroskopie von der Lichtmikroskopie deutlich ab. Die Auflösung im Lichtmikroskop hängt von der Wellenlänge des Lichtes ab, während in der REM Strahlung mit Wellenlängen vom Faktor $100.000\times$ kleiner zur jenen des Lichts ist und die Auflösung von den Linsenfehlern der Mikroskope (ca. 10^{-6} mm) begrenzt wird. In der Rasterelektronenmikroskopie wird die Probenfläche Zeile für Zeile mit einem fein fokussierten Elektronenstrahl abgerastert und dabei entstehende Signale wie Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen aufgezeichnet. Aus den Rückstreuielektronen leitet sich der wesentliche Materialkontrast ab, während die Sekundärelektronen den Topografiekontrast sicherstellen. Weiters entstehen bei der Wechselwirkung zwischen Materie und Elektronen auch Röntgenstrahlung, die zur chemischen Analyse der Materie herangezogen wird. Letztendlich kann neben der Topografie und der chemischen Zusammensetzung auch die Kristallstruktur des betreffenden Materials analysiert werden.[Poelt.2007]

Eine Analyse mittels Rasterelektronenmikroskopie REM wäre möglicherweise hinsichtlich der Porenorientierung interessant und aufschlussreich. Weiters könnte durch chemische Analysen beispielsweise die Bindemittelmatrix auf Entmischungseffekte, welche durch das Schleudern verursacht worden sind, untersucht werden.

7. Messergebnisse

Wie im Kapitel 5 beschrieben, wurden insgesamt 10 UHPC-Proben im Schleuderverfahren hergestellt. Da aufgrund der Rezeptur bzw. der Herstellung die Probe 7 sowie die Probe 8 ausgeschlossen werden mussten, werden im Folgenden die Ergebnisse der übrigen 8 Probekörper präsentiert. Wie bereits erwähnt wurde ein Teil der Mixtur von Probe 6 als ungeschleuderte Probe geprüft. Diese Ergebnisse sind im vorliegenden Kapitel ebenfalls vorzufinden, mit dem Hintergrund den Verdichtungsprozess durch das Schleudern aufzuzeigen, wobei die Ergebnisse nicht als Referenzwert für herkömmlichen Ultrahochfesten Beton zu verstehen sind. Eine Analyse der nun folgenden Ergebnisse kann dem Kapitel 8 entnommen werden.

7.1. Ergebnisse zur stationären Permeabilität der Proben

Bei mehrmaligem Messen des Volumenstroms kann ein schnelleres Aufsteigen der Blase nach Abb. 7.1, einerseits in der zunehmenden Steigung der Geraden und andererseits wie die Nullmarke im Volumenstrom durch Wandern der Gerade nach links, dargestellt werden. Dieses Einpendeln auf einen konstanten, stationären Volumenstrom - siehe Abb. 7.2 - war bei allen gemessenen Proben ersichtlich, wobei dieser Vorgang nicht immer kontinuierlich verlief. In Abb. 7.2 wurde mit dem konstanten Volumenstrom nach einer Absolutzeit von 16 Tagen die Durchlässigkeit berechnet. Da eine bestimmte Schwankungsbreite im Volumenstrom auch nach längerer Messzeit festgestellt werden konnte, wurde aus zeitlichen Gründen jener Volumenstrom nach ca. einer Woche Absolutmesszeit für die Berechnung des Permeabilitätskoeffizienten K herangezogen.

Anhand eines konstanten Volumenstroms kann mit Gl. 6.3 der Permeabilitätskoeffizient K berechnet werden. Alle Ergebnisse zur Permeabilität im stationären Verfahren sind in Abb. 7.3 dargestellt. Die Messergebnisse in Abb. 7.3 sind Einzelergebnisse ohne Berücksichtigung

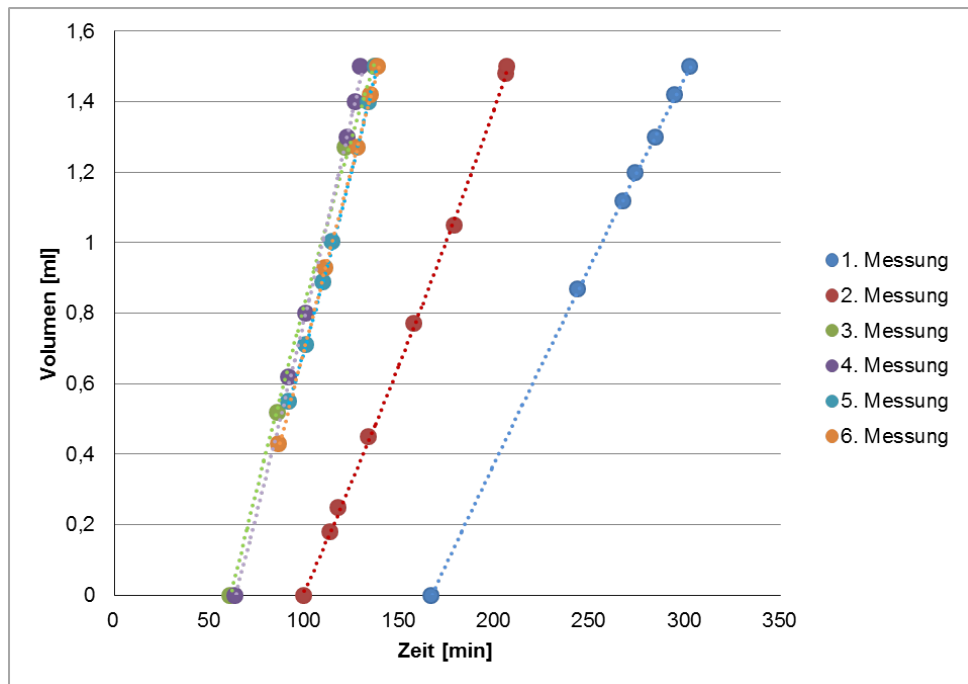


Abbildung 7.1.: Messungen des Volumenstroms der Stationären Permeabilitätsmessung von Probe 1

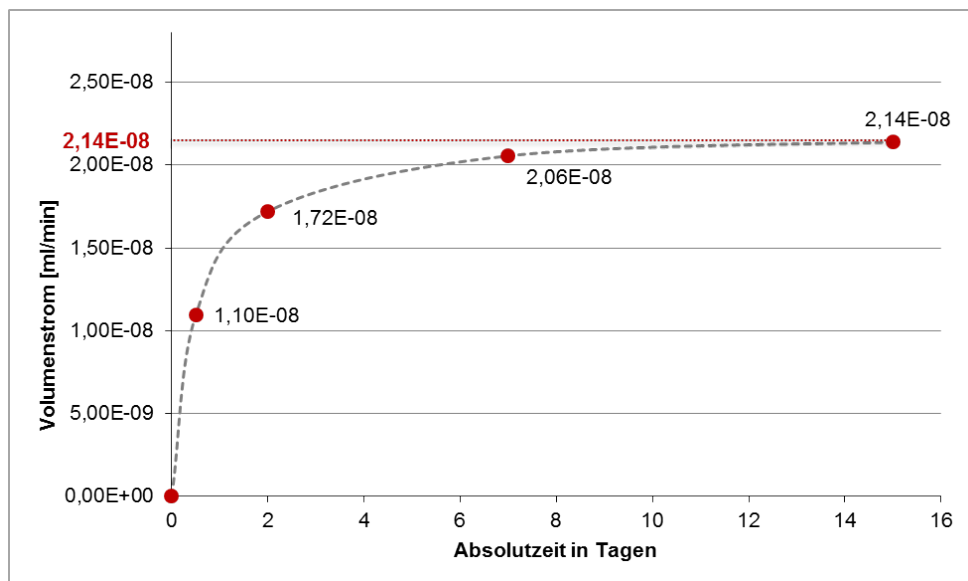


Abbildung 7.2.: Volumenstrom der Stationären Permeabilitätsmessung von Probe 1

etwaiger Standardabweichungen. Alle Ergebnisse der stationären Permeabilitätskoeffizienten K liegen im Größenbereich zwischen 10^{-19} und 10^{-20} m^2 . Probe 2 sowie Probe 5 und 10 weisen etwas geringere Durchlässigkeitsbeiwerte auf, wobei Probe 3 die Höchste der geschleuderten Proben darstellt. Das Ergebnis der ungeschleuderten Probe 6 liegt im mittleren Bereich der erzielten Werte.

7.2. Ergebnisse zur instationären Permeabilität der Probe 2

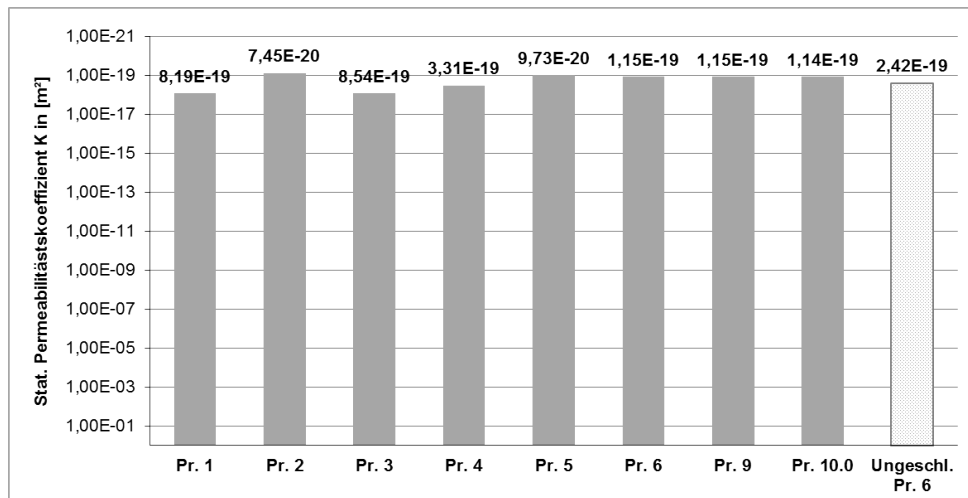


Abbildung 7.3.: Ergebnisse der Stationären Permeabilitätsmessung der Proben

7.2. Ergebnisse zur instationären Permeabilität der Probe 2

Zur Bestimmung der instationären Permeabilität wurde wie in Kap. 6.1.1.3 erwähnt, ein Probekörper der Probe 2 zum Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau der TU Bergakademie Freiberg gesendet und dort die instationäre Messung vorgenommen. Der Messverlauf ist in Abb. 7.4 ersichtlich. Der Druckverlauf der Ausgangskammer (voller Druck zu Messbeginn) ist in schwarz abgebildet und der Druckverlauf der Eingangskammer in blau. Nach einer Dauer von ca. 28 Stunden (100.000 s) wird der Ausgleich der beiden Kammern erreicht. Aus der Berechnung ergibt sich ein instationärer Permeabilitätskoeffizient von $k=2,4E-18 \text{ m}^2$.

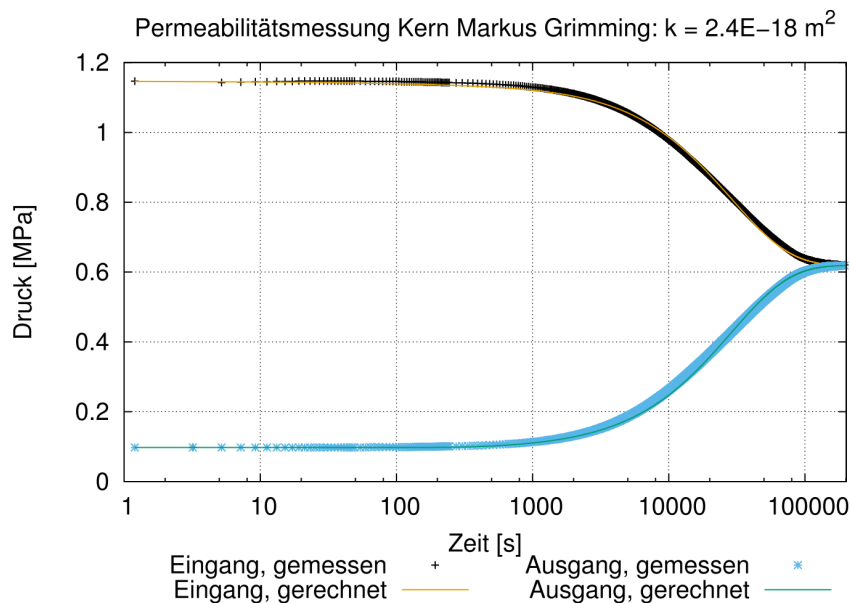


Abbildung 7.4.: Ergebnis der instationären Permeabilitätsmessung von Probe 2

7.3. Ergebnisse zur Gasadsorptionsmethode der Probe 2

Wie bereits erwähnt wurde die Messung der Gasadsorption vom Research Center Pharmaceutical Engineering RCPE durchgeführt. Der vollständige Bericht zur Gasadsorptionsmessung der Probe 2 ist dem Anhang A zu entnehmen. In der Messung wurde Stickstoff N_2 als Adsorbat verwendet. Dabei betrug das Ausgleichsintervall zur Adsorption (Druckausgleich) 10 s. Folgende Kenntnisse konnten aus der Untersuchung gewonnen werden:

- **BET Oberfläche:** $3,3145 \text{ m}^2/\text{g}$ - unter dieser Oberfläche ist die gesamte innere Porenfläche sowie die äußere Oberfläche der Probe aufsummiert. Der Anteil der äußeren Fläche je Gramm ist marginal und kann vernachlässigt werden.
- **Porenvolumen**
 - Adsorbiertes Porenvolumen mit Porendurchmesser $<310 \text{ nm}$: $0,0132 \text{ cm}^3/\text{g}$
 - Adsorbiertes kumulatives Porenvolumen zwischen Durchmessern $1,7$ und 300 nm : $0,0133 \text{ cm}^3/\text{g}$
- **Porengröße** - bereits aus den durchschnittlichen Porenweiten kann eine Klassifizierung nach Abb. 3.10 in Mesoporen bzw. Gelporen getroffen werden.
 - Durchschnittlich adsorbierte Porenweite: $15,89 \text{ nm}$
 - Durchschnittlich adsorbierter Porendurchmesser: $13,40 \text{ nm}$

In Abb. 7.5 ist das kumulative Porenvolumen zum Porendurchmesser dargestellt. Die Verteilungsfunktion des Porenvolumens mit Durchmessern zwischen $1,7$ und 300 nm verläuft dabei gleichmäßig und gleicht mehr oder weniger einer Geraden (in log-Darstellung). Aufgrund dessen müssen im Gefüge viel mehr Poren mit kleinem Durchmesser als mit Großem vorhanden sein. Abb. 7.6 zeigt die Porendichteverteilung im Gefüge. Daraus lässt sich ein Peak - eine Häufung von Poren - bei einem Durchmesser von 5 nm herauslesen. Stellt man die beiden Verteilungen gegenüber, kann in Abb. 7.5 bei einem Porendurchmesser von 5 nm die größte Steigung der Funktionskurve, was auf eine hohe Porendichte dieses Durchmessers hinweist, festgestellt werden. Ab einem Porendurchmesser $<5 \text{ nm}$ wird die Kurve der Porengrößenverteilung flacher und die Porendichte sinkt ebenfalls, was Abb. 7.6 zeigt. Wird die Porendichteverteilung nicht im Nanometerbereich (10^{-9} m) sondern im Ångströmbereich (10^{-10} m) betrachtet, stellen sich wie in Abb. 7.7 ersichtlich ein Peak bei einem Porendurchmesser von 6 nm und im Bereich zwischen 60 und 200 nm weitere Peaks ein. Auch bei diesen Porendurchmessern ist die Steigung der Funktionsgerade in Abb. 7.5 sehr steil.

7.3. Ergebnisse zur Gasadsorptionsmethode der Probe 2

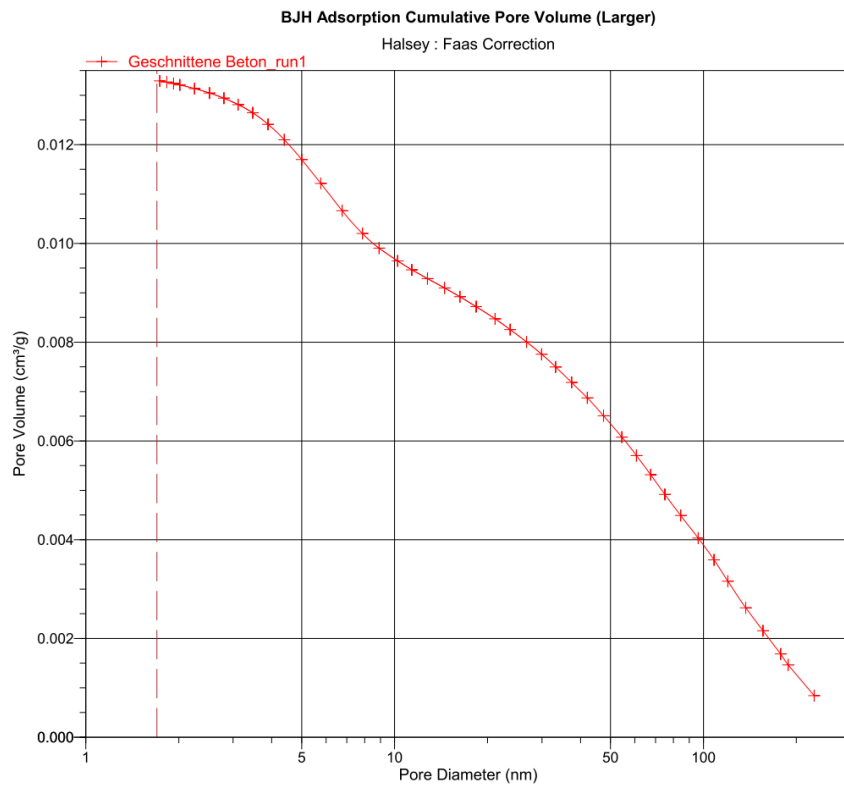


Abbildung 7.5.: Porengrößenverteilung als Summenkurve von Poren mit Durchmesser zwischen 1,7 und 300 nm - Probe 2

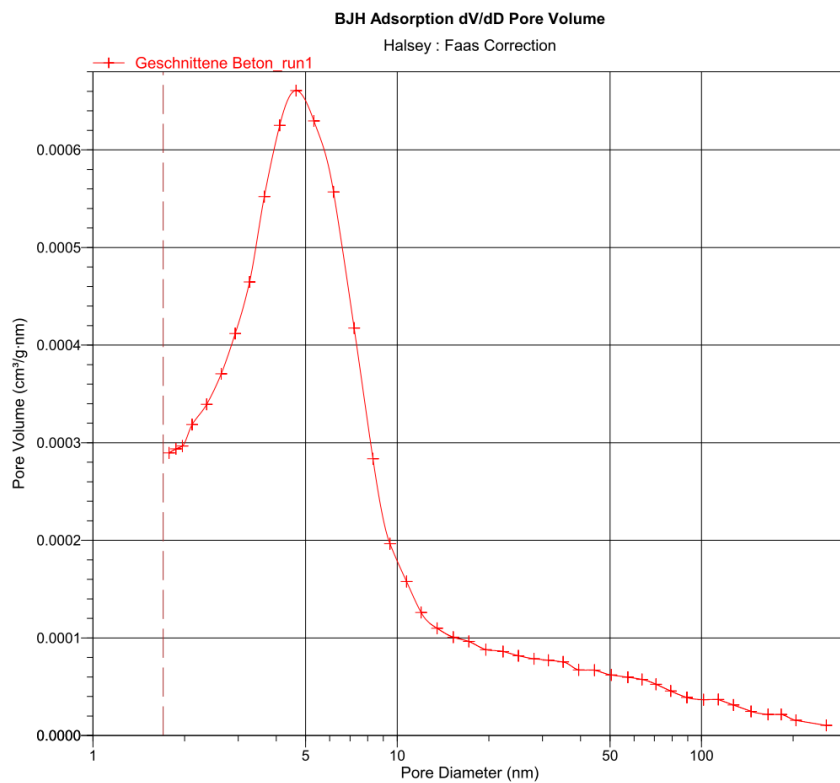


Abbildung 7.6.: Porendichteverteilung im Nanometerbereich von Poren mit Durchmesser zwischen 1,7 und 300 nm - Probe 2

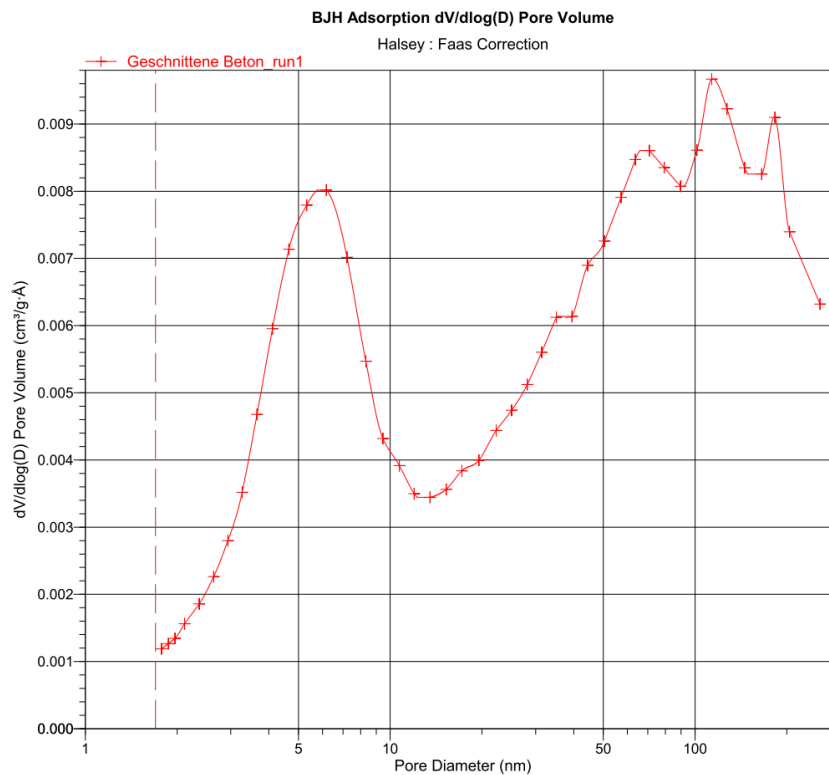


Abbildung 7.7.: Porendichteverteilung im Ängströmbereich (10^{-10} m) von Poren mit Durchmesser zwischen 1,7 und 300 nm - Probe 2

7.4. Ergebnisse zur Quecksilberporosimetrie der Probe 2

Für die Quecksilberporosimetrie bzw. MIP - Mercury Intrusion Porosimetrie - und deren Auswertung wurde die ZAG, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, beauftragt die Messung durchzuführen. Dem vollständigen Endbericht in Anhang B können die in Tab.7.1 bzw. in Abb. 7.8 und 7.9 dargestellten Ergebnisse, entnommen werden. Die bei $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) ofengetrocknete Probe wurde mit einem Druck von 414 MPa beaufschlagt. Die Ausgleichszeit war mit 10s angesetzt. Die anschließenden Untersuchungen wurden nach SIST ISO 15901-1:2006 durchgeführt. Die Porositätsparameter der untersuchten Probe (K 134/17) aus Probe 2 sind in Tab. 7.1 angeführt.

Sample	Sample weight [g]	Median pore diameter (volume) [μm]	Median pore diameter (area) [μm]	Average pore diameter [μm]	Porosity [%]	Total pore area [m^2/g]
K 134/17	12.4480	0.0123	0.0050	0.0092	4.3394	9.042

Tabelle 7.1.: Ergebnis der Quecksilberporosimetrie zu den Porositätsparameter der Probe 2

7.4. Ergebnisse zur Quecksilberporosimetrie der Probe 2

Die Phasenanalyse der Quecksilbereindringung, sprich das XRD-Spektrum ist in Abb. 7.8, die übliche Darstellungsform der Quecksilberporosimetrie, sowie 7.9 zu sehen. Dabei zeigt Abb. 7.8 das kumulativ introdierte Quecksilbervolumen bezogen auf die Porbenmasse in Abhängigkeit vom logarithmisch aufgetragenen Porenradius. Verläuft die Kurve in Abb. 7.8 steil, wird viel Quecksilber in den Poren (je nach zugeordneter Porengröße) intrudiert - siehe Porenbereich zwischen $0,003$ und $0,1 \mu\text{m}$; bei einem flacheren Verlauf zwischen $0,1$ und $100 \mu\text{m}$ sind wenige Poren zugeordneter Größe im Gefüge vorhanden.

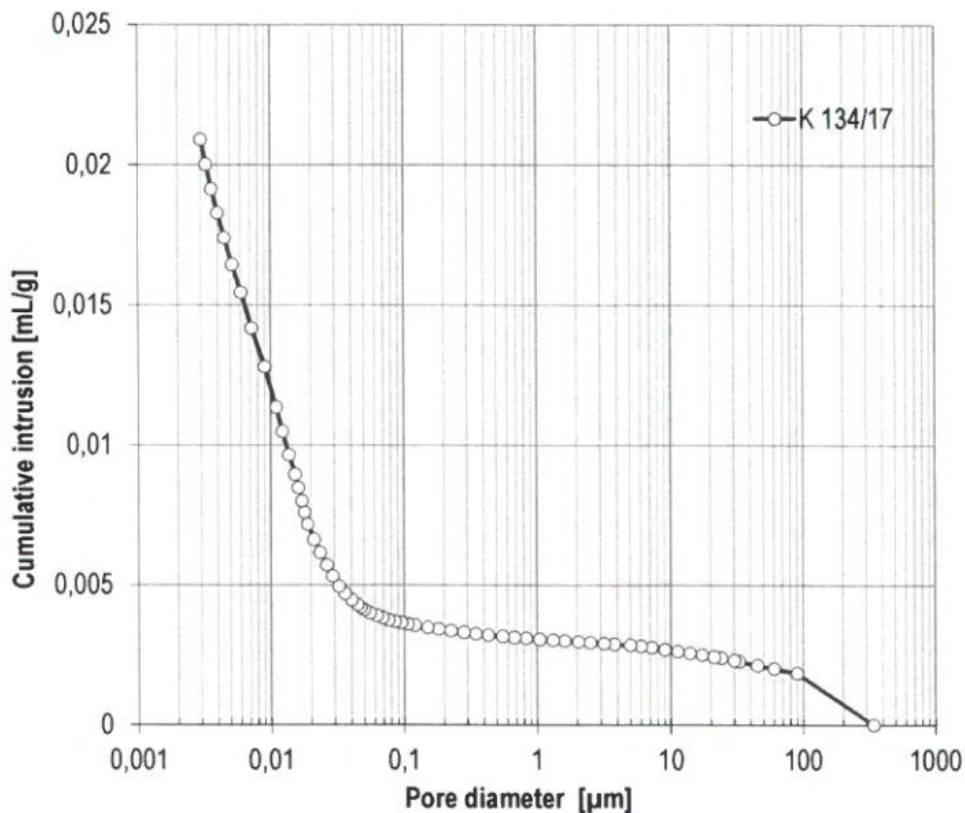


Abbildung 7.8.: Ergebnis zur Eindringung von Quecksilber in den Prüfkörper K 134/17 der Probe 2

Weites folgt aus Abb. 7.8, dass aufgrund der steigenden Intrusion an Quecksilber bei kleinen Porenradien die Porenanzahl und somit die Porendichte zugeordneter Porenradien viel größer ist als jene Poren mit größeren Durchmessern. Dazu stellt Abb. 7.9 die Porenradienverteilung im Gefüge dar. Nach dieser Abbildung sind keine Poren mit Durchmesser zwischen $0,05$ und $30 \mu\text{m}$ in der untersuchten Probe enthalten. Im Bereich zwischen $0,003$ und $0,02 \mu\text{m}$ sind mehrere Peaks festzustellen.

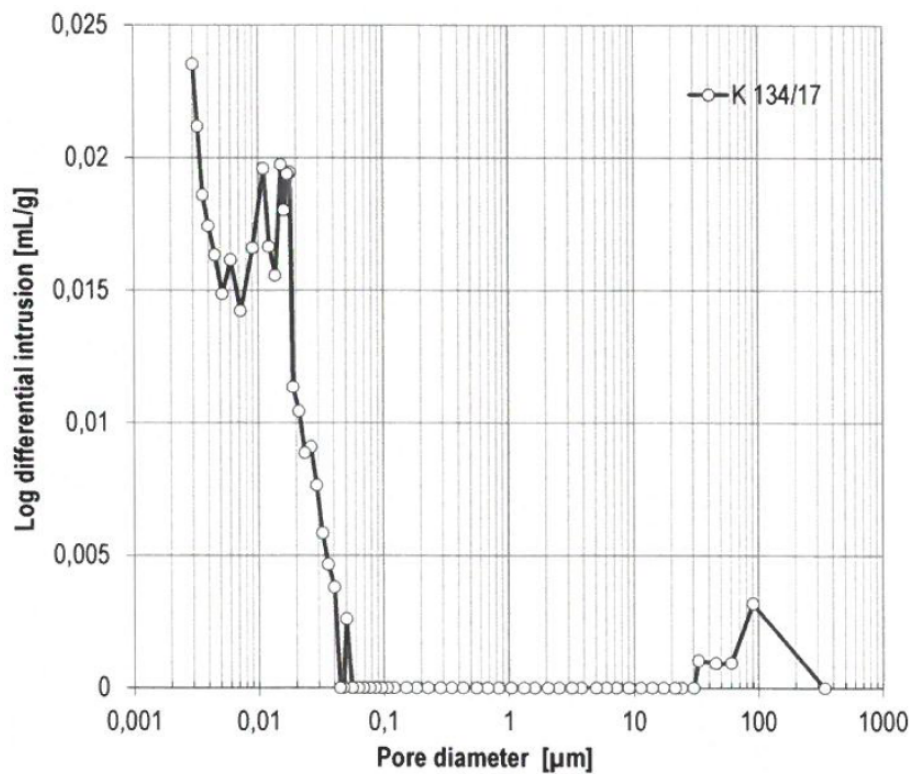


Abbildung 7.9.: Ergebnis zur Porenverteilung der Prüfkörper K 134/17 der Probe 2

7.5. Ergebnisse zur Dichtebestimmung der Proben

In Abb. 7.10 sind die Ergebnisse zur Dichte der gemessenen Proben ersichtlich. Von Probe 9 wurde die Dichte nicht bestimmt, da aufgrund des verwendeten Grobkorns kein Vergleich zu den anderen Proben möglich ist. Hinsichtlich der Ergebnisse sind nur geringe Unterschiede feststellbar. Aufgrund der Messgenauigkeit der Waage konnten die Proben in Gramm, auf zwei Nachkomastellen genau, gewogen werden.

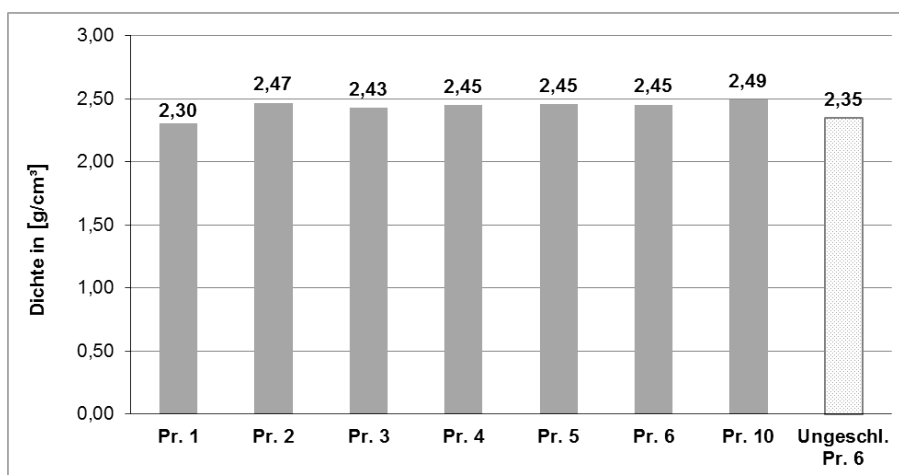


Abbildung 7.10.: Ergebnisse zur Dichtebestimmung der Proben 1-6, 10

7.6. Ergebnisse zur Bestimmung des E-Moduls der Proben

Wie in Kap. 6.1.4 beschrieben, wurden die E-Moduli der Proben geprüft. Alle Ergebnisse dazu können Abb. 7.11 entnommen werden. Von der Probe 1 konnte kein E-Modul ermittelt werden, da das Prisma beim Schleifen zerstört wurde. Von den Proben 3, und 10 konnte auch ein zweites Prisma geprüft werden - aus Gründen der Einheitlichkeit wurde die Ergebnisse nicht gemittelt.

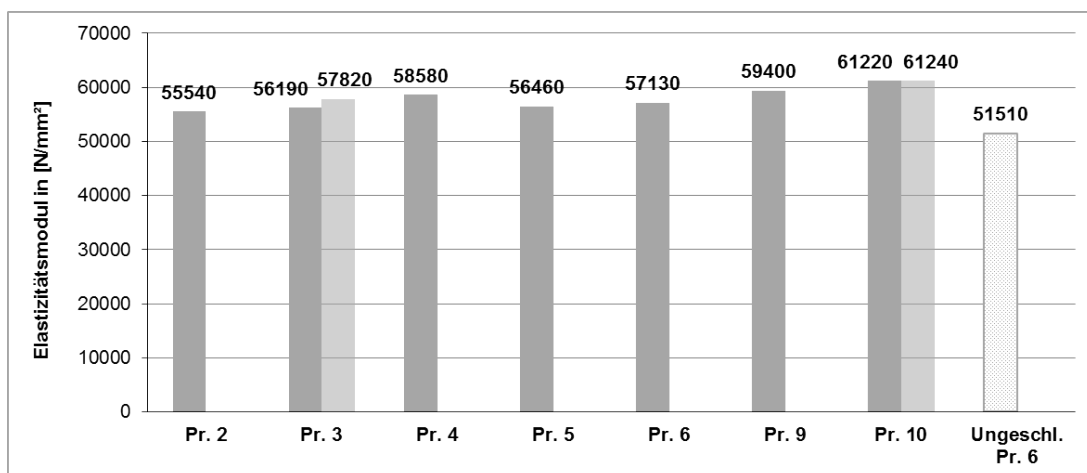


Abbildung 7.11.: Geprüfte E-Moduli der Proben

7.7. Ergebnisse zur Bestimmung der Druckfestigkeit der Proben

Da die Bestimmung der Druckfestigkeit im Zuge der E-Modul-Prüfung erfolgte, treffen auch hier die probespezifischen Eigenheiten aus Kap. 7.6 zu. Bezüglich der Druckfestigkeit konnten folgende Ergebnisse nach Abb. 7.12 erzielt werden. Das Ergebnis aus Probe 9 erscheint auffällig klein. Möglicherweise ist dies auf einen Prüffehler zurückzuführen. Weiters könnte die geringere Druckfestigkeit auch der verwendeten Grobkörnung aus Edelbasaltsplitt 2-4 mm bzw. der unterschiedlichen Heterogenität der Zuschläge zugeschrieben werden.

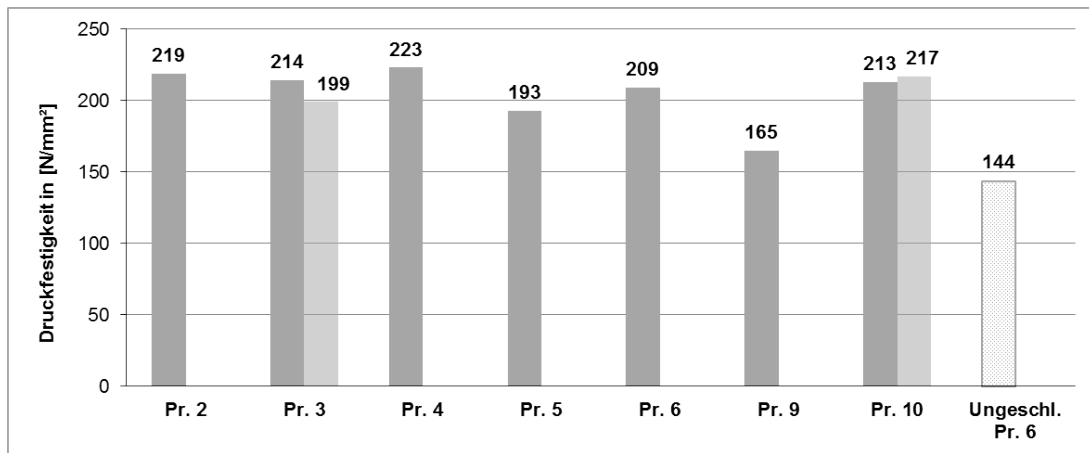


Abbildung 7.12.: Geprüfte Druckfestigkeit der Proben

8. Versuchsanalyse

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse aus Kapitel 7 analysiert. Dazu werden verschiedene Kennwerte korreliert. Sofern möglich werden auch Kenngrößen mit jenen aus der Literatur und anderen Quellen verglichen. Hier werden nicht mehr die Messergebnisse explizit aufgelistet, vielmehr geht es um die richtige Interpretation der Ergebnisse und um das Erkennen möglicher Zusammenhänge.

8.1. Analyse zur Gaspermeabilität

8.1.1. Stationären Gaspermeabilität

Betrachtet man die Ergebnisse aus Abb. 7.3, so scheinen die Permeabilitätskoeffizienten der verschiedenen Proben marginal unterschiedlich zu sein. Probe 2 besitzt dabei den geringsten stationären Gaspermeabilitätskoeffizienten mit $7,45E-20 \text{ m}^2$. Wird jedoch ein relativer Bezug zu Probe 1 dargestellt, kann gezeigt werden, um welchen Größenfaktor sich der Gaspermeabilitätskoeffizient der verschiedenen Proben ändert, was Abb. 8.1 zu entnehmen ist. Darin wird beispielsweise gezeigt, dass Probe 2 11-fach weniger durchlässig für Luft ist gegenüber Probe 1. Die Proben 2, 5 und Probe 10 scheinen mehrfach dichter zu sein als Probe 1. Aufgrund dieser Tatsache ist bei Probe 2, 5 bis 10 der Volumenstrom durch die Proben geringer und dementsprechend ist die Zeitdauer bis ein durchströmtes Luftvolumen von 1,5 ml erreicht wird, viel länger als bei Probe 1, was Abb. 8.2 verdeutlicht. Werden die Herstellungsparameter der Proben 2, 5 und 10 (vergleichbar) aus Tabelle 5.1 (Versuchsübersicht) betrachtet, geht hervor, dass diese Proben unterschiedlich lang geschleudert wurden - Probe 5 - 10 min, Probe 2 - 30 min und Probe 10 - 7 Stunden. Aus den Ergebnissen dieser drei Einzelproben (ohne Standardabweichung) zeigt sich, dass die Schleuderzeit einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Durchlässigkeit des Endprodukts hat. Möglicherweise kann festgestellt werden, dass ab

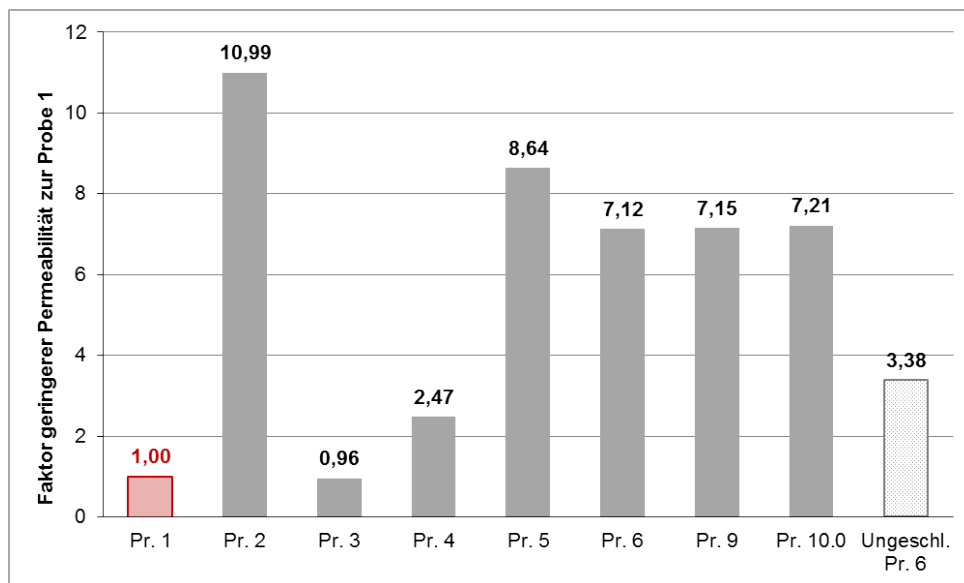


Abbildung 8.1.: Größenfaktor geringerer Gaspermeabilität bezogen auf Probe 1

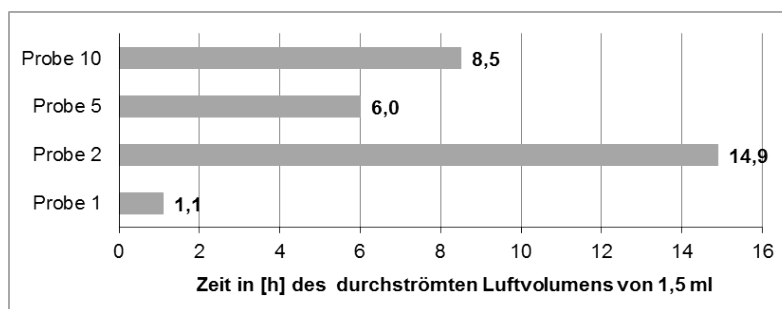


Abbildung 8.2.: Dauer des durchströmten Luftvolumens von Probe 1, 2, 5 und 10

einer bestimmten Schleuderdauer die Durchlässigkeit wiederum steigt. Dies ist lediglich eine Vermutung und könnte in weiteren Versuchsserien analysiert werden. Ein derartiger Verlauf könnte wie in Abb. 8.3 dargestellt, aussehen. Vergleicht man Probe 2 und Probe 3, hat die in

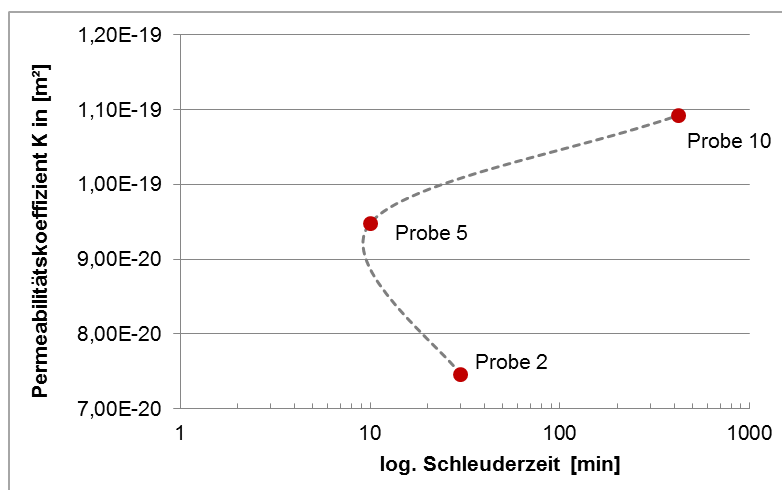


Abbildung 8.3.: Permeabilität in Abhängigkeit der Schleuderzeit

8.1. Analyse zur Gaspermeabilität

Probe 3 reduzierte Umdrehungszahl pro Minute nicht nur einen optischen Einfluss aufgrund der vielen Verdichtungsporen, sondern auch in der Durchlässigkeit. Die Fasern mit höherer Schlankheit in Probe 4 wirken sich ebenfalls schlechter auf das Ergebnis der Dichtheit aus.

8.1.2. Vergleich der stationären und instationären Gaspermeabilität von Probe 2

Das Ergebnis der instationären Gaspermeabilität der Probe 2 weicht von jenem der stationären Gaspermeabilität ab, was Abb. 8.4 zeigt. Im Gegensatz zu Probe 2 werden auch Vergleichswerte einer UHPC-Probe aus der Literatur nach SCHEYDT [Scheydt.2014] angegeben. Im linken Bild der Abb. 8.4 sind die unterschiedlichen Koeffizienten angeführt, wobei im rechten Bild wiederum der Größenfaktor bezüglich dem stationären Verfahren von Probe 2 angegeben ist. Dieser erhebliche Unterschied in den Ergebnissen, kann möglicherweise durch Inhomogenitäten begründet werden. Fraglich bleibt, warum in der eigenen Probe 2 bzw. der UHPC-Probe aus der Literatur das Verhältnis von Stationärer zu Instationärer Messung entgegengesetzt ist. Es ist jedoch anzumerken, dass die Probenhöhe aus der Literatur lediglich 25 mm (Höhe Pr. 2 ca. 50 mm) entsprach und deswegen ein direkter Vergleich schwer möglich ist. Weiters kann die lange Zeitdauer für einen konstanten Volumenstrom nach Abb. 8.2 und der dementsprechend geringe Luftstrom durch die Probe zu fehlerbehafteten Ergebnissen der stationären Messung führen. Möglicherweise ist auch das unterschiedliche Prüfgas für die Abweichung des Ergebnis der stationären zur instationären Messung verantwortlich. Auch die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen (Vorlagerung unmittelbar vor der Messung) können aufgrund unterschiedlicher Umgebungsfeuchten zu verschiedenen Messergebnissen führen.

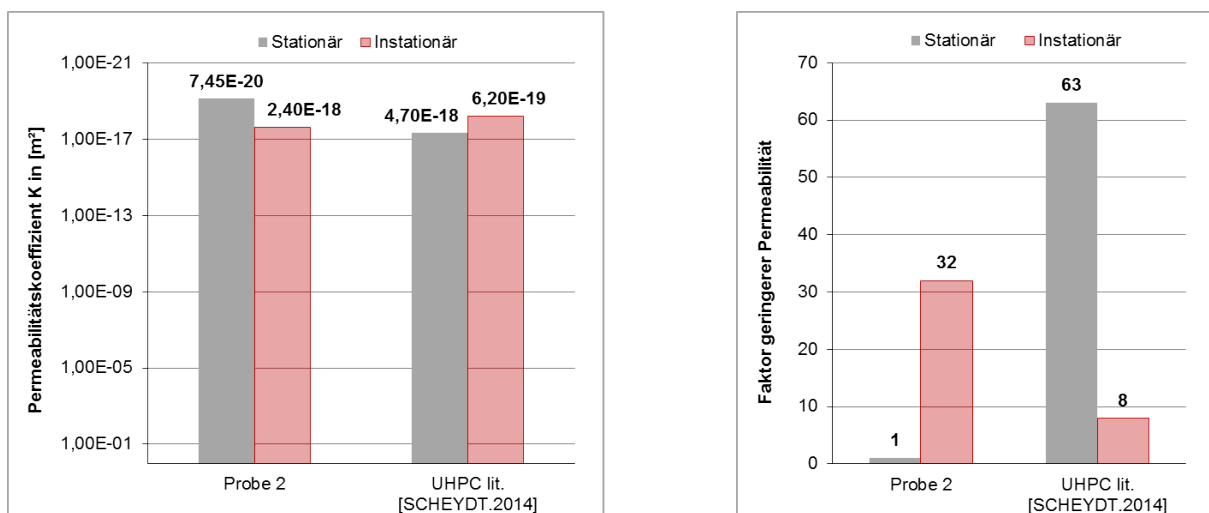


Abbildung 8.4.: Vergleich der Permeabilitäten (links) und Größenfaktor (rechts) der Probe 2 zu einer UHPC-Probe aus der Literatur nach SCHNEYDT [Scheydt.2014]

8.1.3. Vergleich der Gaspermeabilität von geschleudertem UHPC zu anderen Betonen

In den Empfehlungen für UHPC der Association Francaise de Genie Civil - AFGC in Paris [AFGC.2013], sind Luftpermeabilitäten unterschiedlicher Betone zum geschleuderten UHPC der Probe 2 (Stationär und Instationär) - siehe dazu Abb. 8.5 (links) - angegeben. Für Ultrahochfeste Betone steht ein Gaspermeabilitätskoeffizient nach AFGC von $<1,0E-19 \text{ m}^2$. Vergleiche beliebiger Gaspermeabilitäten aus der Literatur mit den erzielten Werten aus dem eigenen Versuchsprogramm sind prinzipiell nicht möglich. Die Gaspermeabilität hängt sehr stark vom Sättigungsgrad der Proben ab. Vor allem ist sind dabei die Lagerungsbedingungen (Dauer, Temperatur, ...) sehr einflussreich. Um dennoch den Größenbereich von Permeabilitätskoeffizienten unterschiedlicher Betone mit den Werten aus den eigenen Versuchen darstellen zu können, dient Abb. 8.5. Aus Gründen einer besseren Verständlichkeit sind in Abb. 8.5 (rechts) die Faktoren einer geringeren Gaspermeabilität, bezogen auf das instationäre Messergebnis von Probe 2 ersichtlich.

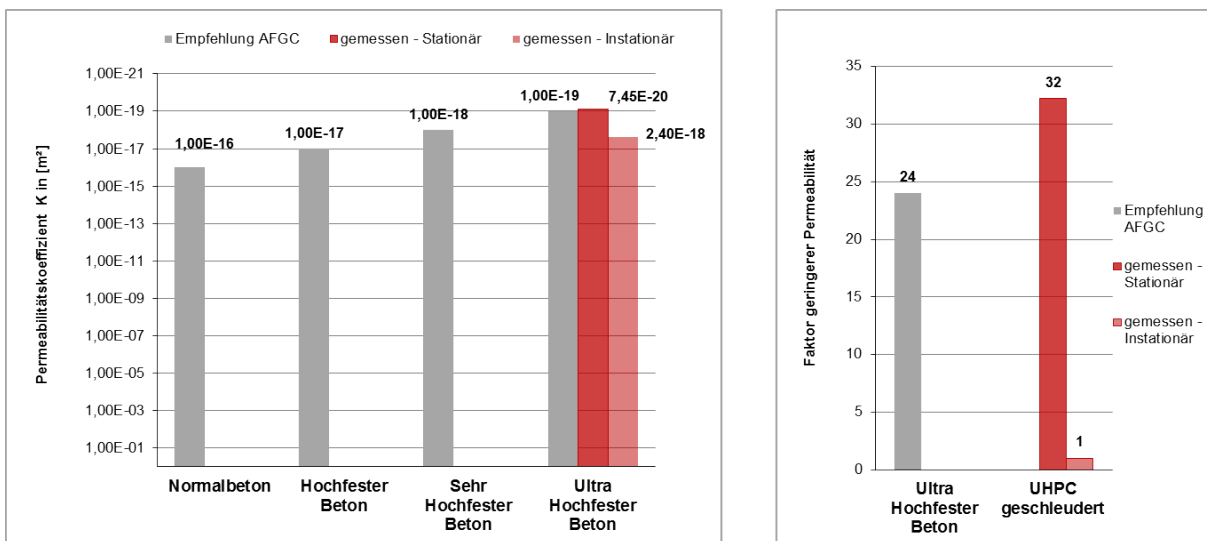


Abbildung 8.5.: Vergleich der Permeabilitäten unterschiedlicher Betone zu geschleuderten UHPC der Probe 2 [AFGC.2013]

Die Ergebnisse der eigenen Versuchen liegen grundsätzlich im Bereich jener für herkömmlichen UHPC aus der Literatur. Anhand der Verdichtung durch Schleudern konnten für die hergestellten Proben keine übermäßige Steigerung der Gasdichtheit, verglichen zur herkömmlichen Herstellung des ultrahochfesten Betons, erzielt werden. Eine Erklärung könnte sein, dass eventuell durch das Schleudern von UHPC eine bestimmte Orientierung der Porenkanäle entsteht. Dieses Phänomen könnte möglicherweise dazu beitragen, dass durch das einheitlich Orientieren dieser Porenkanäle, beispielsweise von Gelporen, eine geringere Dichtheit angestrebt wird.

8.2. Analyse zur Bestimmung der Porenradienverteilung

Zur Untersuchung der Porosität wurde lediglich nur eine BET-Messung sowie eine Quecksilberporosimetrie der Probe 2 durchgeführt. Aus diesem Grunde werden Vergleichswerte aus der Literatur von *SCHEYDT* [Scheydt.2014] herangezogen. Da diverse Rahmenbedingungen wie die Probengeometrie, max. Intrusionsdruck, Vorbehandlung usw. unterschiedlich sind und keinen direkten Vergleich zulassen, gilt dieser Vergleich lediglich mehr als qualitativ und weniger als quantitativ. *SCHEYDT* vergleicht in ihrer Dissertation [Scheydt.2014] die folgenden Betone:

- NCP - Normalbeton
- RPC - Ultrahochfester Feinkornbeton
- UHPC - Ultrahochfester Beton
- UHPC_{o.F.} - Ultrahochfester Beton ohne Fasern
- UHPC_{90°C} - Ultrahochfester Beton wärmebehandelt bei 90°C

8.2.1. Zur Gasadsorptionsmethode BET

Das adsorbierte Porenvolumen wird über den Gasdruck bestimmt und lässt sich als sogenannte Sorptionsisothermen darstellen. Abb. 8.6 (links) zeigt die Isotherme der Probe 2 mit einem ähnlichen Verlauf wie im Bild rechts nebenan von unterschiedlichen Betonen aus der Literatur. An der Achsskalierung können jedoch Unterschiede festgestellt werden. Während Probe 2 ein adsorbiertes Gasvolumen von ca. $8,3 \text{ cm}^3/\text{g}$ besitzt, werden im Beispiel aus der Literatur je nach Beton ca. 7 bis $23 \text{ cm}^3/\text{g}$ an adsorbierten Volumina erreicht. Daraus folgt ein porenärmeres Gefüge der Probe 2 als jene Ergebnisse nach *SCHEYDT*.

Betrachtet man nach Abb. 8.7 die Porengößenverteilung (links) und die Porendichteverteilung (rechts) aus der Literatur, können mit den Kurven aus Abb. 8.8 (Ergebnisse siehe auch Kapitel 7.3) diverse Ähnlichkeiten erkannt werden. Die unterschiedliche Achsbezeichnung von Porendurchmesser und Porenradius muss jedoch bedacht werden. Hinsichtlich der Porengrößenverteilung der Probe 2 nach Abb. 8.8 (links) muss die Kurve gespiegelt über die x-Achse angesehen werden (Aufsummierung), um in weiterer Folge Ähnlichkeiten zur Porengrößenverteilung aus der Literatur feststellen zu können.

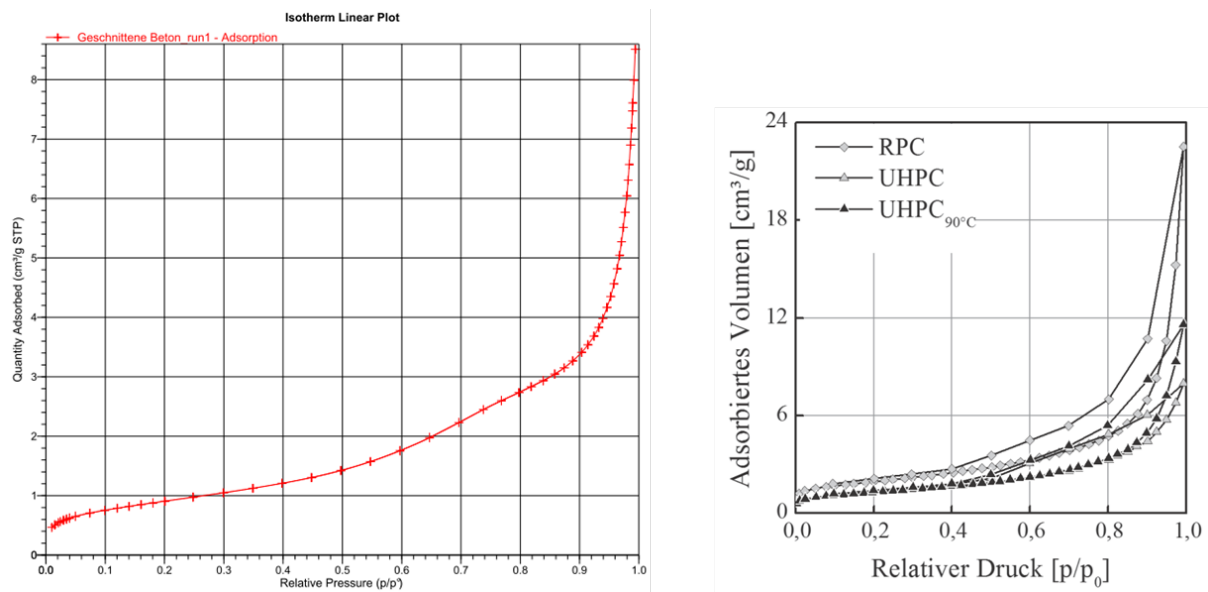


Abbildung 8.6.: Sorptionsisotherme von Pr. 2 (links), Sorptionsisothermen verschiedener Betone aus der Literatur [Scheydt.2014] (rechts)

Die Porendichtevertellung von Probe 2 in der Abb. 8.8 (rechts) erreicht bei Durchmesser 5 nm das Maximum und weist, verglichen zu Abb. 8.7 (rechts), keine weiteren Peaks auf. Man kann daraus schließen, dass in Probe 2 viele kleine Poren, verglichen zu anderen Betonen aus der angeführten Literatur, vorhanden sind.

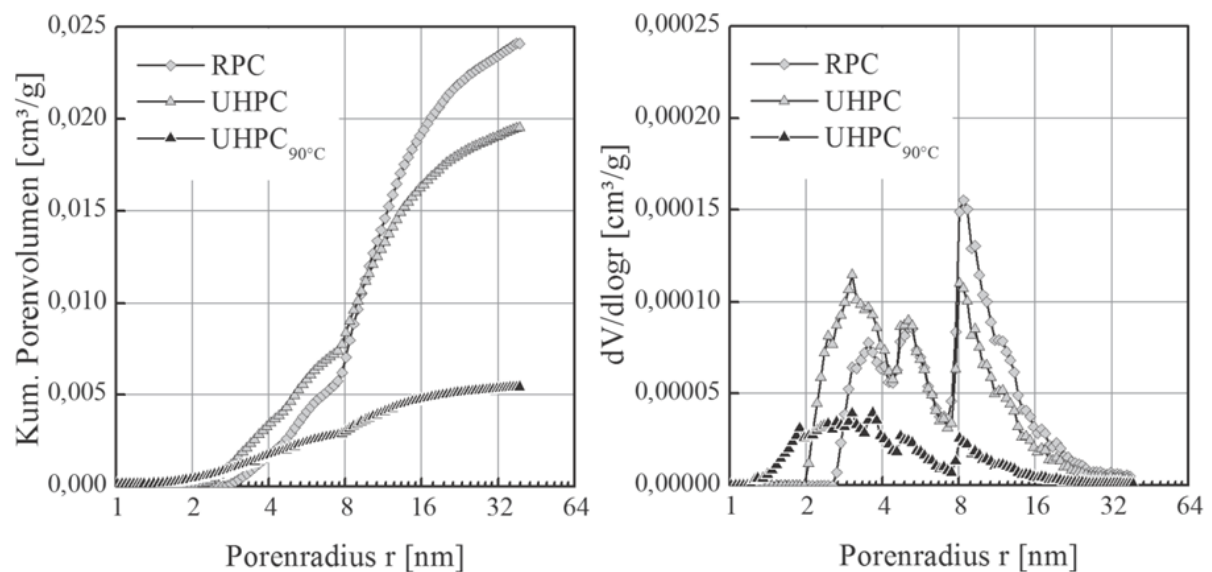


Abbildung 8.7.: Porengrößenverteilung (links) und Porendichtevertellung (rechts) aus der Literatur [Scheydt.2014]

8.2. Analyse zur Bestimmung der Porenradienverteilung

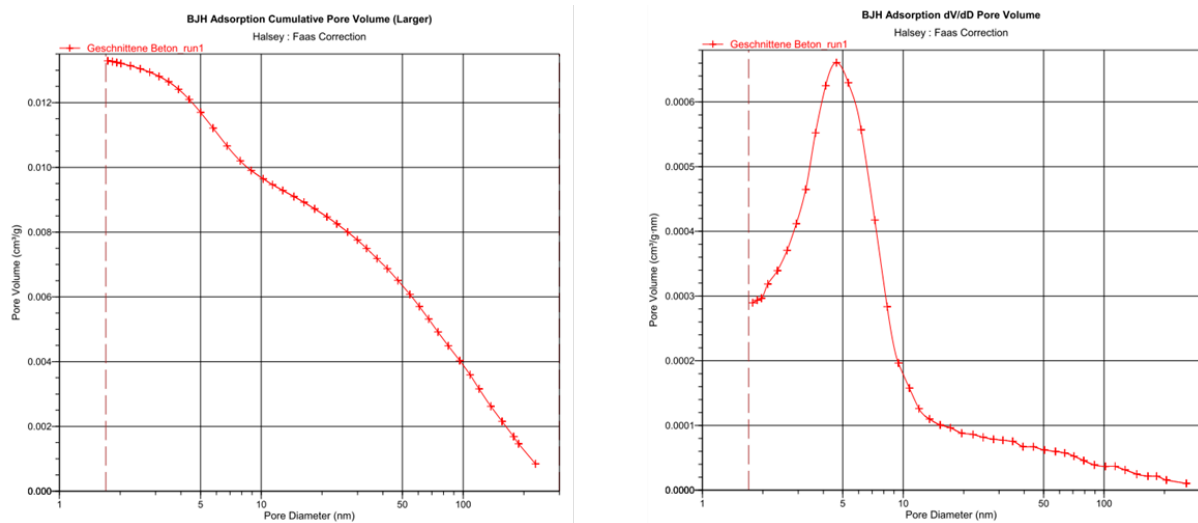


Abbildung 8.8.: Porengrößenverteilung (links) und Porendichteverteilung (rechts) der Probe 2

8.2.2. Zur Quecksilberporosimetrie

Die übliche Darstellung der Porenradienverteilung nach kumulativer (aufsummiert) und logarithmisch - differentialer Intrusion zeigt Abb. 8.9 aus der Literatur. Das Ergebnis von Probe 2 nach Abb. 8.10 zeigt mehr oder weniger einen ähnlichen Verlauf. Es ist wiederum auf die unterschiedliche Achsbeschriftung von Porenradius und Porendurchmesser zu achten. Auffällig ist die erhöhte Intrusion von Probe 2 bei einem Porendurchmesser von $100\ \mu\text{m}$. Ansonsten sind keine markanten Unterschiede festzustellen.

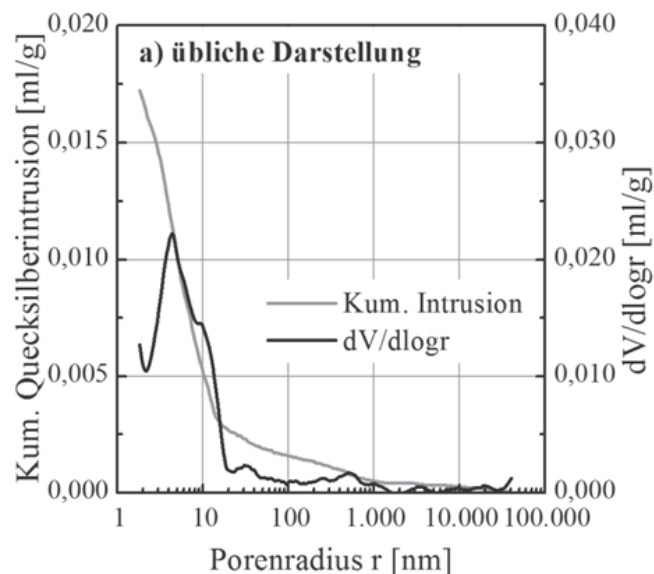


Abbildung 8.9.: Übliche Darstellung einer Porenradienverteilung von UHPC aus der Literatur [Scheydt.2014]

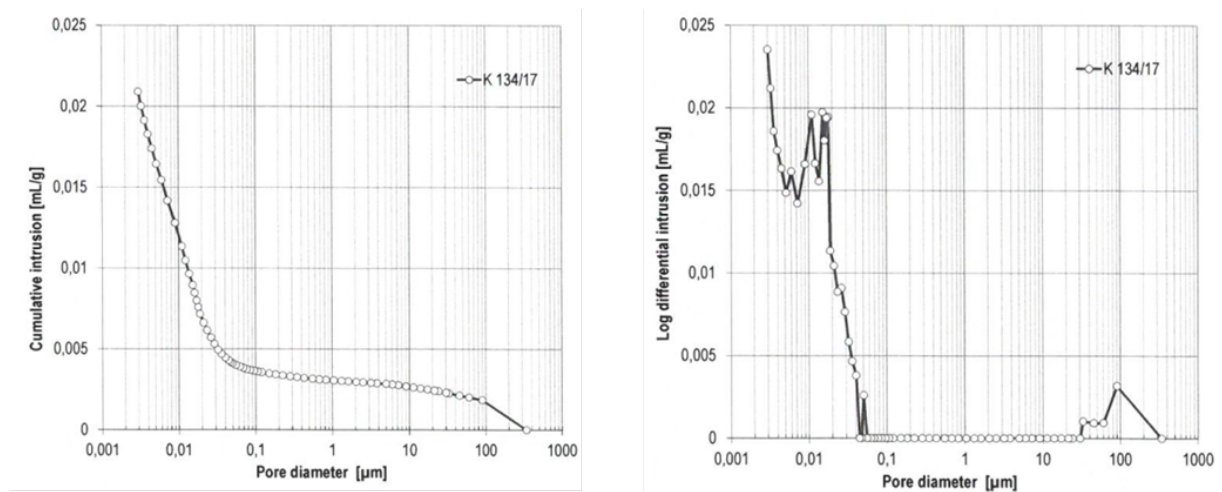


Abbildung 8.10.: Porenradienverteilung der Probe 2 - Kumulativ (links), log.-differential (rechts)

In Abb. 6.9 wird gezeigt, dass sich der Analysebereich von BET-Methode und Quecksilberporosimetrie bei Porenradien zwischen 2 - 60 nm überschneidet. Jedoch kann mit der Quecksilberporosimetrie ein viel breiteres Porenspektrum von 2 nm bis 500 μm erfasst werden. Zusätzlich zum Ergebnis aus Abb. 8.10 (links) wurde in Anlehnung an SETZER - siehe Abb. 6.9 - der Porenraum von Probe 2 in verschiedene Porenklassen (Gelporen, Mikropallaren, Kapillaren, Makrokapillaren) unterteilt. Dies kann Abb. 8.11 entnommen werden.

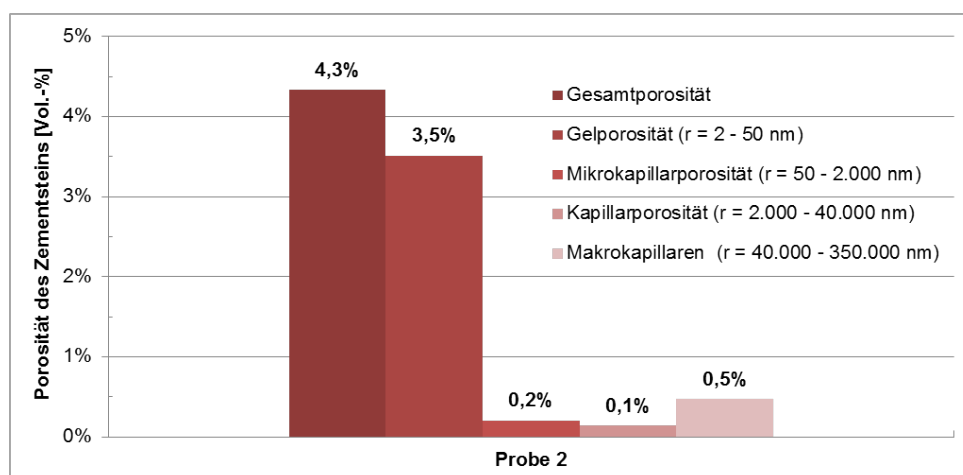


Abbildung 8.11.: Gesamtporosität und Porenklassen von Probe 2

Die Klassifizierung der Poren wurde dahingehend gewählt um Vergleichswerte aus der Literatur heranziehen zu können. Wie eingangs erwähnt werden Ergebnisse von SCHEYDT als Vergleichswerte verwendet. Dazu gibt Abb. 8.12 eine Übersicht an Porositäten verschiedener Betone. Probe 2 besitzt dabei die kleinste Gesamtporosität.

8.3. Korrelation von Permeabilität, Dichte, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

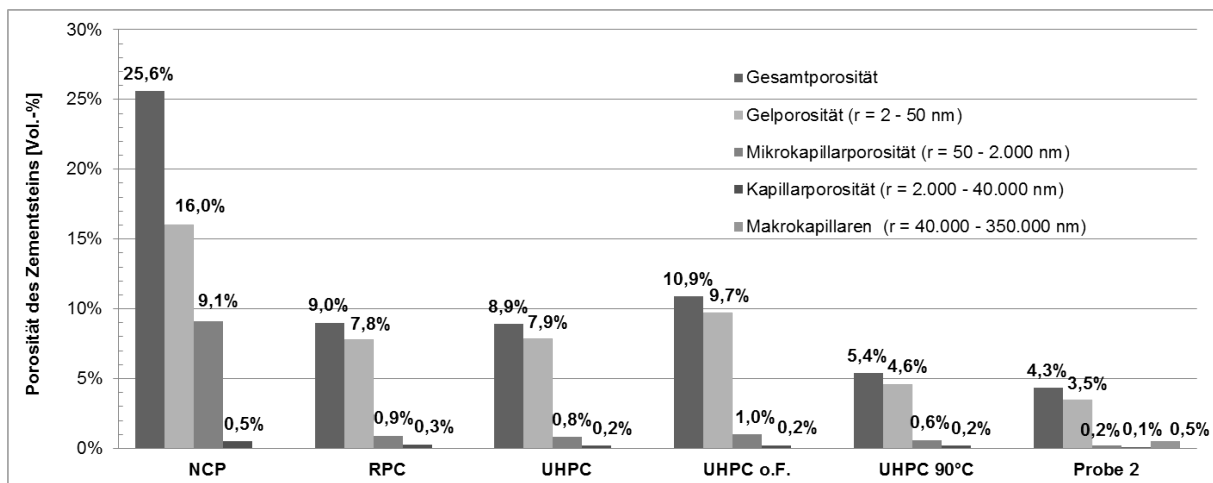


Abbildung 8.12.: Gesamtporosität und Porenklassen unterschiedlicher Betone in Anlehnung an SCHEYDT [Scheydt.2014]

8.3. Korrelation von Permeabilität, Dichte, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

Um Zusammenhänge der einzelnen Kenngrößen zu erkennen, wurden die Ergebnisse aus Permeabilität, Dichte, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul korreliert. Es wurden ausschließlich vergleichbare Werte herangezogen. Aufgrund der Rezepturänderung von Probe 9 wird diese für derartige Vergleiche nicht miteinbezogen. Bei allen Angaben der Permeabilität handelt es sich um die stationären Ergebnisse. Abb. 8.13 zeigt die Gegenüberstellung von Permeabilität zu Dichte. Daraus lässt sich bei steigender Dichte eine geringere Durchlässigkeit ableiten. Es sei angemerkt dass der Permeabilitätskoeffizient im logarithmischen Maßstab verläuft, weswegen auch die lineare Trendlinie exponentiell verläuft. Betrachtet man hingegen die in Abb. 8.14 und 8.15 dargestellten Korrelationen von Permeabilität zu den Festigkeitskenngrößen (Druckfestigkeit und E-Modul), kann hier kein Zusammenhang herausgelesen werden. In den folgenden Abbildungen sollte beachtet werden, dass der Permeabilitätskoeffizient (y-Achse) im logarithmischen Maßstab aufgetragen ist. Werden die Festigkeitskenngrößen jedoch mit der Dichte kombiniert, können bei höherer Dichte größere Festigkeiten erzielt werden, was in den Abb. 8.17 und 8.16 gezeigt wird. In allen Kombinationen mit Festigkeitskenngrößen kann die Probe 1 nicht angeführt werden.

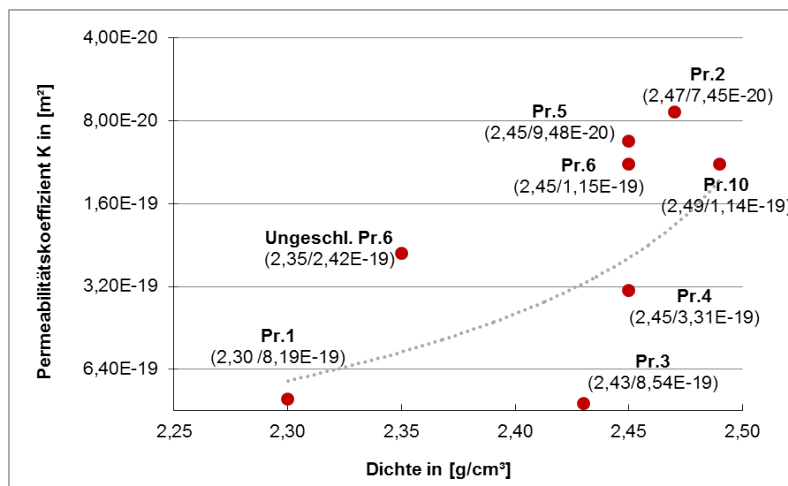


Abbildung 8.13.: Korrelation von stat. Permeabilitätskoeffizient (log.) zu Dichte

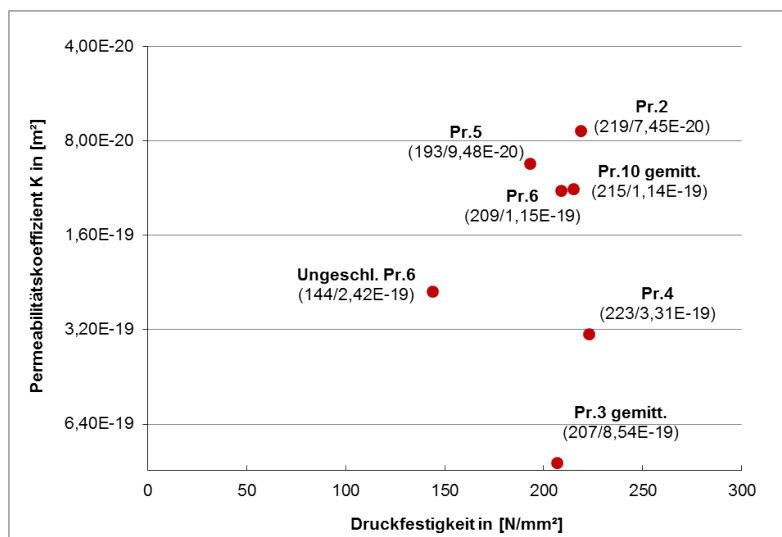


Abbildung 8.14.: Korrelation von stat. Permeabilitätskoeffizient (log.) zu Druckfestigkeit

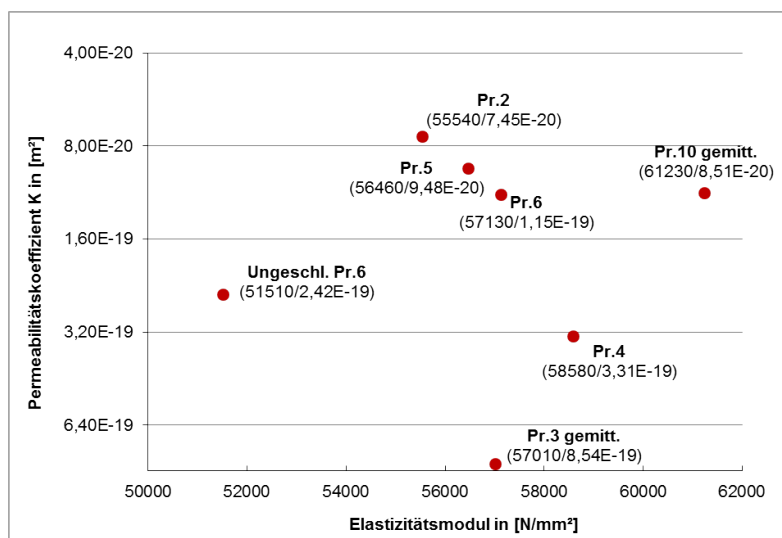


Abbildung 8.15.: Korrelation von stat. Permeabilitätskoeffizient (log.) zu Elastizitätsmodul

8.4. Unterschied zwischen herkömmlichem und geschleudertem UHPC

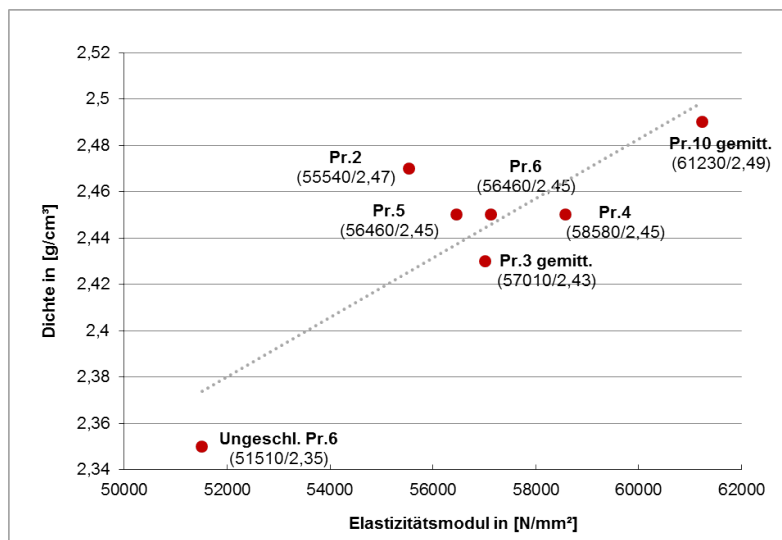


Abbildung 8.16.: Korrelation von Dichte zu Elastizitätsmodul

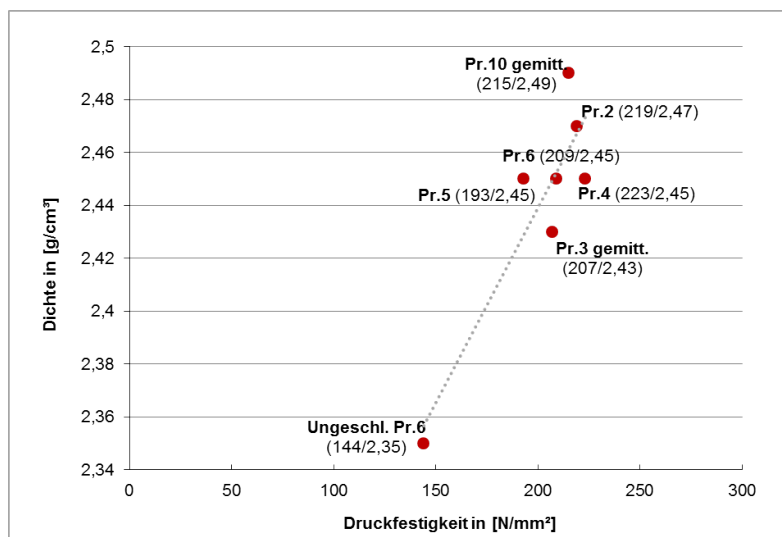


Abbildung 8.17.: Korrelation von Dichte zu Druckfestigkeit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass hinsichtlich der Luftdurchlässigkeit eine Korrelation zwischen (stationärem) Permeabilitätskoeffizient und Dichte zu erkennen ist. Weiters können bei höherer Dichte größere Festigkeiten an Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul erreicht werden, was auch bei anderen Materialien wie beispielsweise Stahl und Holz gegeben ist.

8.4. Unterschied zwischen herkömmlichem und geschleudertem UHPC

Am Institut für Betonbau IBB der Technischen Universität Graz wurden parallel zu dieser Arbeit Probekörper verschiedener Mixturen hergestellt und nach 28-tägiger Aushärtungszeit die Druck-

festigkeit bzw. der stationäre Permeabilitätskoeffizient gemessen. Zur Permeabilitätsmessung wurden die Zylinder der selben Abmessungen wie in den eigenen Versuchen über 21 Tagen bei Raumtemperatur gelagert und anschließend bei 45°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, was durchschnittlich zusätzliche 7 Tage dauerte. Wie bereits erwähnt, ist ein prinzipieller Vergleich zwischen herkömmlichem, ungeschleudertem UHPC und geschleudertem UHPC gar nicht möglich, da die Anforderungen an die Konsistenz in beiden Fällen unterschiedlich sind. Während im herkömmlichen UHPC zur Selbstverdichtung eine weiche und fließfähige Konsistenz verlangt wird, muss die Konsistenz vom geschleuderten UHPC viel steifer sein, um Entmischungseffekte auszuschließen und die erforderliche Grünstandfestigkeit nach dem Schleudern zu gewährleisten. Herkömmlicher UHPC verdichtet sich von selbst, wofür im geschleuderten UHPC der entstehende Druck für eine entsprechende Verdichtung verantwortlich ist. Abb. 8.18 zeigt trotz mangelnder Vergleichbarkeit Kenngrößen aus Druckfestigkeit und stationärer Permeabilität von herkömmlichen UHPC zu den Ergebnissen der geschleuderten Probe 2. Die Ausgangskomponenten der Rezeptur sind ident - lediglich hat die geschleuderte Probe aufgrund der steiferen Konsistenz einen geringeren Leimanteil von ca. 25 Vol.-%. Abbildung 8.18 kann entnommen werden, dass die geschleuderte Probe zwar eine um 30 % höhere Druckfestigkeit besitzt, die Durchlässigkeit der herkömmlichen UHPC-Probe ist aber 3-fach geringer als jene der geschleuderten.

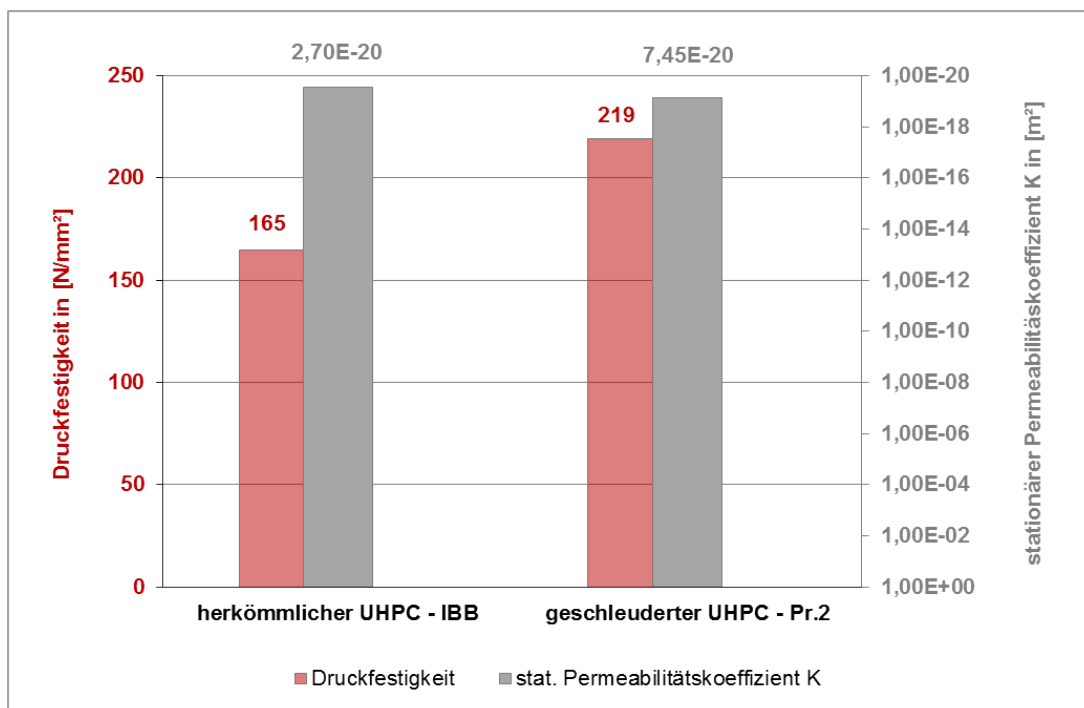


Abbildung 8.18.: Kenngrößen der Druckfestigkeit und Permeabilität von herkömmlichem und geschleudertem UHPC

9. Resümee und Ausblick

Aus den eigenen Versuchen konnten viele Erkenntnisse zu geschleuderten, ultrahochfesten Beton gewonnen werden. An dieser Stelle wird auf die eingangs definierten Ziele dieser Arbeit in Kapitel 1.2 verwiesen. Weiters fördert die Versuchsübersicht aus Abb. 5.1 die Verständlichkeit der zusammengefassten Erkenntnisse.

Resümee

Es konnte gezeigt werden, dass eine herkömmliche Rezeptur für ultrahochfesten Beton - als Referenzrezeptur in dieser Arbeit - zur Verdichtung im Schleuderverfahren nicht geeignet ist. Aus mechanischer Sicht ist einerseits die erforderliche Standfestigkeit direkt nach dem Schleudern nicht gegeben und andererseits kommt es durch die fließfähige Konsistenz zu Entmischungserscheinungen, welche zu einem inhomogenen Endprodukt führen. Dem inhomogenen UHPC-Gefüge konnte durch die Beimengung von Grobzuschlägen (hier: Basaltsplitt 2-4 mm) entgegengewirkt werden. Dazu wurde auch der Feinstoffanteil in Probe 9 reduziert, welcher möglicherweise noch weiter reduziert werden kann. Die Erhöhung der Schlankheit von den Stahlfasern wirkt sich marginal auf die Homogenität des Gefüges aus, hingegen werden durch eine höhere Faseranzahl mehrere Kontaktzonen (auch Störstellen) zwischen Stahlfaser und Zementstein gebildet. Auch das stationäre Permeabilitätsergebnis von Probe 4 (mit Fasern höherer Schlankheit) widerlegt eine Verbesserung der Dichtheit. Um primär die Entmischungseffekte bewältigen zu können und eine Art „Sperreffekt“ zu generieren, ist möglicherweise der Einsatz von Grobzuschlägen unumgänglich.

Neben den rezepturbedingten Parametern haben auch die herstellungsbedingten Parameter einen großen Einfluss auf das geschleuderte Endprodukt. Hier sind an erster Stelle die Umdrehungszahl der Schleudertrommel und die effektive Schleuderzeit (Verdichtungszeit) zu nennen. Die Dauer zwischen Mischende und Schleuderstart zeigte geringeren Einfluss auf die

Kenngößen der Probe im ausgehärteten Zustand, was mit Probe 6 demonstriert werden konnte. Gekoppelt an die Umdrehungszahl, ist in der Praxis die Angabe der Umdrehungsbeschleunigung - als Mehrfaches der Erdbeschleunigung - üblich. Geringere Beschleunigungen sind nicht nur optisch mit freiem Auge am geschleuderten Endprodukt anhand des verbliebenen Porengefüges erkennbar. Vielmehr resultiert nach Abb. 8.1 eine Verschlechterung der Gasdichtheit, was durch die 11-fache Vergrößerung der Permeabilität der Probe 3 verglichen zu Probe 2 gezeigt werden konnte. Analysiert man die unterschiedlichen Schleuderzeiten aus den Versuchen (Pr.5 - 10 min, Pr.2 - 30 min, Pr.10 - 7 Std.), kann zwar ein stetiges Ansteigen der Dichte (Pr.5 - $2,45 \text{ g/cm}^3$, Pr.2 - $2,47 \text{ g/cm}^3$, Pr.10 - $2,49 \text{ g/cm}^3$) nach Abb. 7.10 festgestellt werden, was aber nicht für die stationäre Gaspermeabilität nach Abb. 7.3 gilt. Es konnte gezeigt werden, dass die Dichte im Sinne der geprüften Trockenrohddichte gesteigert werden kann, was aber in den eigenen Versuchen nicht unbedingt für die stat. Gaspermeabilität zutrifft - hier kommt es nach Abb. 8.3 zu einer Verschlechterung von Pr.10, wobei dieser Verlauf lediglich vermutet wird. Bezugnehmend auf die herstellungsbedingten Parameter ist festzustellen, dass der Einfluss der Umdrehungsbeschleunigung (als Druckregler) höher ist, als jener der effektiven Schleuderzeit. Die effektive Schleuderzeit ist durch chemischer Zusätze leichter manipulierbar, was auch wirtschaftliche Vorteile im Sinne von Prozessoptimierung, mit sich bringt. In dieser Arbeit stellt sich ebenfalls heraus, dass die geprüfte Dichte nicht derartig stark mit der stationären Gaspermeabilität korreliert wie beispielsweise die Druckfestigkeit bzw. der Elastizitätsmodul, was die Abbildungen 8.13, 8.17 und 8.16 verdeutlichen. Kombiniert man die stationäre Gaspermeabilität mit Druckfestigkeit oder Elastizitätsmodul wie in den Abb. 8.14 und 8.15, kann hier kein zusammenhängender Trend abgeleitet werden. Aus diesen Erkenntnissen kann geschlossen werden, dass die Dichte - hier die gemessene Trockenrohddichte - einen zuverlässigen Kennwert für Festigkeiten aber auch für die Dichtheit darstellt. Besonders wenn die Dichtheit im Zuge einer Porenanalyse wie der durchgeführten Gasadsorptionsmethode bzw. der Quecksilberporosimetrie untersucht wird, können die Gesamtporosität und der einzelnen Porenklassen in Abb. 8.11 analysiert werden. Mit den Porenanalysen von Probe 2 konnte gezeigt werden, dass durch die Verdichtung im Schleuderprozess der Porenraum verglichen zu anderen Betonen aus Abb. 8.12 deutlich reduziert werden kann. Der größte Porenanteil kann dabei der Gelporosität zugeschrieben werden - möglicherweise ein Indiez, dass man daran arbeiten muss, um für weitere Entwicklungen eine höhere Gasdichtheit erzielen zu können.

Abschließend kann im Zuge des Schleuderprozesses von ultrahochfestem Beton durchaus ein bereits optisch erkennbares, extrem dichtes Gefüge hergestellt werden. Anhand der Probe 2 konnte ein stationärer Gaspermeabilitätskoeffizient von $K = 7,45 \text{E-}20 \text{ m}^2$ gezeigt werden, welcher im oberen Bereich, im Sinne einer geringeren Gasdurchlässigkeit und verglichen zu her-

kömmlichen ultrahochfesten Betonen ($K < 10E-19$ lt. Sachstandsbericht UHPC des *Deutschen Ausschusses für Stahlbeton* [Schmidt.2008]) liegt. Weiters muss angemerkt werden, dass die unterschiedlichen Messverfahren zur Bestimmung der Gaspermeabilität (Stationär - Instationär) aufgrund der verschiedenen Modellvorstellungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, was in andere Arbeiten - siehe *SCHEYDT et al.* [Scheydt.2014] ebenfalls angeführt ist. Ein direkter Vergleich von Permeabilitäten ist grundsätzlich nur möglich, wenn alle Randbedingungen wie Probeabmessungen, Prüfgas, Lagerungsbedingungen usw. ident sind. Prinzipiell zielt diese Arbeit aber auf die Luftdichtheit von geschleudertem ultrahochfesten Beton ab, wobei die Gaspermeabilität besonders mit Luft als Prüfmedium für das zu erzeugende Vakuum im Projekt *HYPERLOOP* relevant ist.

Ausblick

Überleitend zum Ausblick stellt sich die Frage, warum die stationäre Gaspermeabilität von Probe 10 schlechter ist, trotz höherer Dichte als beispielweise bei Probe 2. Zu dieser Frage passen möglicherweise mehrere Antworten wie z.B. der Umstand des Einzelergebnisses ohne Berücksichtigung von etwaiger Standardabweichung betrachtet werden. Es könnte aber auch möglich sein, dass sich aufgrund des Schleuderprozesses eine bestimmte Orientierung des Porensystems (vorwiegend bestehend aus Gelporen) einstellt. Um derartige Hypothesen zu untersuchen wird eine genauere Analyse in der Rasterelektronenmikroskopie empfohlen. Da sich die Dichtebestimmung neben der direkten Permeabilitätsmessung als die effektivste Methode gezeigt hat, sollen dahingehend andere Methoden (zur Bestimmung der Rohdichte, Reindichte, ...) bzw. präzisere Messungen hinsichtlich der Messgenauigkeit durchgeführt werden. Wie in dieser Arbeit öfters erwähnt, können mit mehreren Probenserien zuverlässigere Aussagen getroffen werden. Auch die Methoden einer denkbaren Kombination von Wärmebehandlung während und nach dem Schleuderprozess, welche im Zuge dieser Arbeit lediglich zitiert wurden, könnten zu einer Verbesserung der Gasdichtheit von ultrahochfestem Beton beitragen.

10. Zusammenfassung

HYPERLOOP, eine zukunftssträngige Technologie soll die Reisezeit von Personen und Gütern an den schnellen Wandel der Gegenwart anpassen. Konzipiert nach dem Prinzip der Rohrpost, werden Kapseln durch einen evakuierten Rohrtunnel (im Teilvakuum) „geschossen“. In einer Röhre aus Stahl wäre ein Unterdruck von 1 hPa zwar denkbar, die frei bewitterte Außenoberfläche kann jedoch aus Gründen der Korrosion als Schwachstelle deklariert werden.

Alternativ könnten Röhren aus ultrahochfestem Beton UHPC bzw. UHPFRC - Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete - im Schleuderverfahren hergestellt werden, was auch Thema dieser Arbeit ist. Für das aufzubauende Teilvakuum in der *HYPERLOOP*-Röhre werden Anforderungen an die Luftdichtheit gestellt, die in dieser Arbeit in Versuchen geprüft werden. Im Gegensatz zu Materialien wie Stahl oder Glas ist Beton inhomogen und bis dato für Vakuumanwendungen unbrauchbar. Prinzipien wie den W/B-Wert reduzieren, die Packungsdichte optimieren und damit den Beton homogener zu gestalten, machten es möglich, den Normalbeton bis hin zum ultrahochfesten Beton weiter zu entwickeln. Poren im Gefüge klassifizieren dabei das Produkt Beton und bestimmen die Materialkenngrößen wie Festigkeit und Durchlässigkeit. Neben Gliederungen nach beispielsweise Form und Zustand, erfolgt die Einteilung der Poren meist nach Größe in Makro-, Meso- und Mikroporen bzw. nach der Entstehung in Verdichtungs-, Kapillar- und Gelporen. Die Durchlässigkeit von porösen Stoffen wie Beton ist durch den Transport von Fluiden gegeben und von der Porosität, der Porenstruktur und des Aggregatzustandes des Fluids sowie des Potentials (z.B. Druckunterschied) abhängig. Im Unterschied zu Transportmechanismen wie der kapillaren Wasseraufnahme, Diffusion und Effusion, beschränkt sich diese Arbeit ausschließlich auf die Gasdurchlässigkeit über die Permeabilität. Insgesamt wurden 10 Schleuderversuche (Probe 1 - Probe 10) nach Abb. 5.1 mit anschließender Untersuchung von Permeabilität, Porosität, Dichte sowie Kenngrößen wie Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul durchgeführt. Als Mixtur diente zu Beginn eine Referenzrezeptur für herkömmlichen UHPC. Diese zeigte, dass durch die fließfähige Konsistenz Entmischungseffekte zwischen Bindemittelleim, Stahlfaser und Zuschlag die Folge sind und das Verdichten von

ultrahochfesten Beton im Schleuderverfahren eine Herausforderung im Sinne eines homogenen Endprodukts darstellt. Mit Mixturen steiferer Konsistenz wurden herstellungsbedingte Parameter wie die Umdrehungsanzahl der Schleuder oder die Schleuderzeit variiert. Bereits optisch mit freiem Auge konnten Unterschiede im Gefüge (Poren, Homogenität, . . .) wahrgenommen werden und damit ein großer Einfluss auf das geschleuderte Endprodukt festgestellt werden. In anderen Versuchen wurden auch rezepturbedingte Parameter wie die Fasergeometrie oder der Zuschlagsstoff abgeändert. Es stellte sich heraus, dass weniger die Fasergeometrie für eine homogene Verteilung der Stahlfasern verantwortlich ist, vielmehr kann der Entmischungseffekt durch Einsatz einer Grobkörnung eingeschränkt werden. Aufgrund der zeitintensiven und aufwändigen Versuchsreihe, konnten in den anschließenden Untersuchungen nur Einzelergebnisse ohne Standardabweichungen analysiert werden. Hinsichtlich der Gasdurchlässigkeit wurde bei allen relevanten Proben der stationäre Permeabilitätskoeffizient gemessen. Dabei konnten bis zu 11-fach geringere Permeabilitäten (Probe 2 - steife Konsistenz) zur Probe 1 als Referenzprobe (Referenzrezeptur - sehr weiche Konsistenz) gemessen werden. Zusätzlich wurde von Probe 2 auch die instationäre Permeabilität bestimmt, wobei hier Unterschiede aufgrund von Inhomogenitäten zum stationären Verfahren gegeben sind. Werden die Permeabilitätsergebnisse mit anderen Ergebnissen mit ähnlicher Rezeptur verglichen, kann durch den Schleuderprozess keine übermäßige Verbesserung oder Verschlechterung festgestellt werden. Aufschlüsse über die Porosität der Probe 2 konnten mit einer Gasadsorptionsmessung sowie einer Quecksilberporosimetrie bestimmt werden. Dabei konnte die Gesamtporosität durch die Verdichtung im Schleuderverfahren um die Hälfte des herkömmlichen Porengehaltes von ultrahochfesten Beton reduziert werden. Auch die Dichtebestimmung bewies, dass durch einen höheren Verdichtungsdruck über längere Zeit, die Rohdichte erhöht werden kann. Betrachtet man die Ergebnisse von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul, können zu herkömmlichen ultrahochfesten Betonen signifikant höhere Festigkeiten erzielt werden.

Ausblickend könnte beispielsweise eine Rasterelektronenmikroskopie REM zu zusätzlichen Erkenntnissen über die Porenstruktur führen. In Korrelationen konnte gezeigt werden, dass die Dichte mit allen geprüften Materialkenngrößen zusammenhängt. Möglicherweise könnten die Genauigkeiten der Dichtebestimmung durch bessere Messgeräte oder andere Methoden gesteigert werden, um somit zuverlässigere Vergleiche erzielen zu können. Abschließend kann gesagt werden, dass ultrahochfester Beton im Schleuderverfahren derartig verdichtet werden kann, dass ein dichteres Betongefüge als bei herkömmlichem ultrahochfesten Beton, erzielt werden kann. Ein optimiertes Packungsmodell für UHPC als Schleuderbeton, sowie Zusätze auf chemischer Basis könnten noch dichtere Strukturen ermöglichen und die Anforderungen von *HYPERLOOP* erfüllen – das Grundprinzip von UHPC als homogener Baustoff darf allerdings niemals in Frage gestellt werden.

Bibliography

- [Hyperloop.2017] *Bilder zu Hyperloop*. 23.08.2017. URL: https://www.google.at/search?tbm=isch&source=hp&biw=1920&bih=1084&q=hyperloop&oq=hyperloop&gs_l=img.3..35i39k112j018.7928.10519.0.10880.11.11.0.0.0.88.679.9.9.0...0...1.1.64.img..2.9.672.0.r0-392aI0w4.
- [EuroInternationalCommitteeforConcrete.1993] *CEB-FIP model code 1990: Design code*. Vol. 213/214. Bulletin d'information / Comité Euro-International du Béton. Telford, 1993.
- [AFGC.2013] AFGC Association Francaise de Genie Civil, ed. *béton fibré ultra hautes performances recommandations: Documents scientifiques et techniques*. Paris, 2013.
- [Amro.2012] M. Amro, F. Häfner, and C. Freese. "Moderne In-situ- und Labor-messung von Permeabilität und Porosität zum Dichtheitsnachweis von Speichern für Wasserstoff, Erdgas und CO₂". In: *Erdöl Erdgas Kohle Zeitschrift* 128.4 (2012).
- [Adam.2012] T. Adam and J. Ma. "Development of an Ultra-High Performance Concrete for precast spun concrete columns: Publikation MFPA Leibzig". Publikation MFPA Leibzig. Leibzig, 2012.
- [Basca.1981] E. Basca. "Schleuderbeton: Herstellung und Verwendung im Hoch- und Tiefbau". In: 99.7/81 (1981), pp. 107–115. (Visited on 05/01/2017).
- [Bergmeister.2014] K. Bergmeister, F. Fingerloos, and J.-D. Wörner. *Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung-Behalter*. 2nd ed. Beton-Kalender (VCH) *. Wiley, 2014.
- [Rinnhofer.2003] S. L. Burtscher, G. Rinnhofer, V. Benko, and J. Kollegger. "Zerstörende Großversuche an hochbewehrten Schleuderbetonstützen". In: ().
- [DeutscheBauchemie.2007] Deutsche Bauchemie. "Moderne Fließmittel in der Betontechnologie - Herstellung und Verwendung von Beton mit PCE: Betontechnologie. Informationsschrift". In: (2007).
- [DAfStb.1991] Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton. "Pruefung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergaenzung zu DIN 1048". Berlin, 1991.

- [Ehrenberg.1996] F. Ehrenberg, U. Diederichs, and F. S. Rostásy. *Untersuchungen zur Geometrie der für den Transport aggressiver Lösungen und Schadgase relevanten Porensysteme in Beton*. 1996.
- [Eibl.1989] J. Eibl, H. K. Hilsdorf, and K. Schönlin. "Eibl, J., Hilsdorf, H. K., Schönlin, K. Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton". In: 8 (1989).
- [Freytag.2012] B. Freytag, J. Juhart, G. Santner, and E. Baumgartner. *A novel microstructural approach for modeling the adhesive power of UHPC*. Ed. by Cairns, J. W., G. Metelli, and G. A. Plizzari. Brescia, Italien, 2012.
- [Freytag.2014] B. Freytag. "UHPC im Konstruktiven Ingenieurbau". Habilitationsschrift. Graz: TU-Graz, 2014.
- [Gertis.1976] K. Gertis, K. Kießl, H. Werner, and U. Wolfseher. "Hygrische Transportphänomene in Baustoffen". In: 258 (1976).
- [Gruebl.2001] P. Gröbl, H. Weigler, and S. Karl. *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Aufl. Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Ernst, 2001.
- [Holcim.2011] Holcim AG, ed. *Ultrahochleistungs-Faserbeton: Anwendungsbroschüre*. Schweiz, 2011.
- [Haefner.2015] Haefner F., Wagner S., and Freese C. "Durchlässigkeitmessung: Bestimmung der absoluten Durchlässigkeit poröser Stoffe mit Flüssigkeit und Gas". Laborschrift Praktikum Geostromungstechnik. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 2015.
- [Jooss.2001] M. Jooss. "Dichtheit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton". Dissertation. Universität Stuttgart, 2001.
- [Jousten.2013] K. Jousten and M. Wutz, eds. *Wutz Handbuch Vakuumtechnik*. 11., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Vieweg, 2013.
- [Kaufmann.2007b] J. P. Kaufmann, F. Winnefeld, D. Hesselbarth, and W. Trindler. "Evaluation of the consistency of fiber reinforced cementitious composites". In: *Materials and Structures* 39.6 (2007), pp. 645–654.
- [Kaufmann.2007] J. Kaufmann and D. Hesselbarth. "High performance composites in spun-cast elements". In: *Cement and Concrete Composites* 29.10 (2007), pp. 713–722.
- [Kiessl.1987] K. Kiessl. "Feuchtetransport in Bauteilen". In: 4 (1987).
- [Krischer.1978] O. Krischer and W. Kast. *Trocknungstechnik: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Dritte, neubearbeitete Auflage. Springer Berlin Heidelberg, 1978.
- [Klopfer.1974] H. Klopfer. *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen: Insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen*. Bauverl., 1974.

Bibliography

- [Kordts.2005] S. Kordts. "Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone". Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2005.
- [Krueger.2016] M. Krueger. "Frisch- und Festbetoneigenschaften". Vorlesungsfolien. Graz: TU Graz, 2016.
- [Koenig.2001] G. König, N. V. Tue, and M. Zink. *Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung*. Ernst, 2001.
- [LKI.2017] T. G. Labor für Konstruktiven Ingenieurbau. "Gasdichter UHPC für innovative Anwendungen in Verkehr, Energie und Umwelt". Förderungsansuchen. TU Graz, 2017.
- [Larrard.1994] F. de Larrard and T. Sedran. "Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model". In: (*Keine Angabe*) 24.6 (1994), pp. 997–1009.
- [Lutz.1994] P. Lutz et al. *Lehrbuch der Bauphysik: Schall Wärme Feuchte Licht Brand Klima*. 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 1994.
- [Transportbeton.Luzern] T. A. G. Luzern. "Einbringen, Verdichten und Nachbehandeln von Beton". In: ().
- [Ma.2010] J. Ma. "Faserfreier Ultrahochfester Beton: Dissertation". In: (2010).
- [Marquardt.1930] E. Marquardt. "Geschleuderte Beton- und Eisenbetonrohre". In: 8.40 (1930), pp. 587–628.
- [Macht.2007] Macht, J., and P. Nischer. *Porosität des Feinmörtels im Beton*. Ed. by Beton + Zement. Wien, 2007.
- [Mueller.2012] C. Mueller, M. Empelmann, F. Hude, and T. Adam. "Schleuderbetonstützen aus hochfester Bewehrung und ultrahochfestem Beton". In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107.10 (2012), pp. 690–699.
- [Oberbeck.1995] N. Oberbeck. *Instationärer Wärme-Feuchte-Schadstoff-Transport in Beton: Theorie und Berechnung*. Vol. 79. Bericht aus dem Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig. Inst. für Statik der Techn. Univ. Braunschweig, 1995.
- [Poelt.2007] P. Pölt, Reichmann A., and Hofer F. *Charakterisierung und Schadensanalyse von Baustoffen mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie*. Graz, 2007.
- [Philip.1957] J. R. Philip and D. A. de Vries. "Moisture movement in porous materials under temperature gradients". In: (*Keine Angabe*) 38.2 (1957), p. 222.
- [Richard.1995] P. Richard and M. Cheyrezy. "Composition of reactive powder concretes". In: (*Keine Angabe*) 25.7 (1995), pp. 1501–1511.
- [Rinnhofer.2001] G. Rinnhofer. "Möglichkeiten zur Tragfähigkeitssteigerung von Schleuderbetonstützen einschließlich deren Stoßausbildung". Diplomarbeit. Graz: TU Graz, 2001.

- [Santner.2016] G. Santner. *Arbeitsnotiz - Berechnung Permeabilität / Durchfluss: Vergleich UHPC mit Stahl / Metallen*. 2016.
- [Schmidt.2015] W. Schmidt. "Wirkungsweise verschiedener Fließmittel". In: *BWI - BetonWerk International* 2015.3 ().
- [Schneider.2001] U. Schneider, J. Horvath, G. Koenig, and F. Dehn. "Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHPC)". In: *(Keine Angabe)* 96.7 (2001), pp. 468–477.
- [Schmidt.2008] M. Schmidt, ed. *Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton*. 1. Aufl. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth, 2008.
- [Scheydt.2014] J. C. Scheydt. *Mechanismen der Korrosion bei ultrahochfestem Beton: Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2013*. Vol. 74. Karlsruher Reihe Massivbau, Baustofftechnologie, Materialprüfung / Institut für Massivbau und Baustofftechnologie. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2014.
- [Schmidt.2014] M. Schmidt, E. Fehling, and S. Fröhlich, eds. *Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton: Fließmittel für ultra-hochfesten Beton: Molekülstrukturen und Wirkungsmechanismen*. Vol. H. 22. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau. Kassel: Kassel Univ. Press, 2014.
- [Sparowitz.2017] Sparowitz and Lutz. *Bilder zu Hyperloop*. 2017.
- [Tennis.2000] P. D. Tennis and H. M. Jennings. "A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes". In: *(Keine Angabe)* 30.6 (2000), pp. 855–863.
- [Trummer.2013] Trummer M. "Experimentielle Analyse von Faserorientierungszuständen mittels räumlich kombinierter Schnittbildauswertung". Masterarbeit. Graz: TU Graz, 2013.
- [ZementHB.2002] V. D. Z. e. V. *Zement: Taschenbuch 2002*. 50th ed. 2002.
- [Westphal.2007] Westphal T. "Quantitative Rietveld-Analyse von amorphen Materialien: am Beispiel von Hochofenschlacke und Flugasche". Dissertation. Halle: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2007.
- [Wolf.2016] M. Wolf. *Optimierung von Ultra-Hochleistungsbeton zur Verwendung als Konstruktionsmaterial Optimierung von Ultra-Hochleistungsbeton zur Verwendung als Konstruktionsmaterial für statisch-konstruktive Vacuum Insulated Wall (VIW-) Elemente: Disseratation*. 2016.
- [Zagar.1955] L. Žagar. "Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Baustoffen". In: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 26.12 (1955), pp. 777–782.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Hyperlooptrasse mit zwei Röhren auf Stützen (links), Transportkapsel (rechts) [Hyperloop.2017]	17
1.2. möglicher Querschnitt einer Trassenführung [Sparowitz.2017]	18
1.3. 3D-Visualisierungen [Sparowitz.2017]	19
2.1. Physikalische Untersuchungsmethoden im Vakuum [Jousten.2013]	22
2.2. Permeationsleitfähigkeit \bar{q}_{perm} von Stickstoff H ₂ bzw. Helium He durch verschiedene Materialien bei 20 °C nach Anlehnung an WUTZ [Jousten.2013]	27
3.1. Schematische Darstellung der Hydratationsphasen des Zements mit Gefügeentwicklung [ZementHB.2002]	31
3.2. Prinzipskizze einer Rollenbank [Basca.1981]	32
3.3. Rollenbank [Marquardt.1930]	32
3.4. Hochbewehrte Schleuderbetonstützen, UKH-Linz [Rinnhofer.2003]	34
3.5. Porengrößenverteilung und Gesamtporosität nach Betonalter [Macht.2007]	37
3.6. Poren <0.01 μm der Gesamtporosität nach Betonalter [Macht.2007]	37
3.7. Übersicht - Größenbereiche im Beton und deren Messmethoden [Macht.2007]	38
3.8. Einteilung nach Porengeometrie [Wolf.2016]	39
3.9. Einteilung nach Zugänglichkeit [Wolf.2016]	39
3.10. Klassifikationen nach Porengröße aus der Literatur nach SCHEYDT [Scheydt.2014]	41
3.11. Weg eines Ions, Moleküls oder Atoms (Fluid) durch den Beton [Scheydt.2014]	42
3.12. Transportphänomene in porösen Baustoffen - Übersicht [Kießl.1987]	43
3.13. Formen der Gasströmung	44
3.14. Mittlere freie Weglänge $\bar{\lambda}$ bei Wasserdampfdiffusion, Wasserdampfeffusion und Lösungsmitteldiffusion [Lutz.1994]	48
3.15. Wasserinsel in Poren [Philip.1957]	48
4.1. Entwicklung der Betone in Abhängigkeit von W/Z-Wert zur Druckfestigkeit [Holcim.2011]	51

4.2. Korrelation der Relative Dichte k_{rel} zum W/B-Wert [Richard.1995]	53
4.3. Überblick zu den verschiedenen Mischungszusammensetzungen von normalfesten, hochfesten und ultrahochfesten Betonen [Bergmeister.2014]	55
4.4. Einfluss der Fließparameter auf Beton [Schmidt.2015]	59
4.5. Grundsätzliche Wirkung von Fließmitteln [DeutscheBauchemie.2007] (links), Fließmitteladsorption in der frühen Hydrataionsphase [Schmidt.2014] (rechts) . .	59
4.6. Wirkungsweise verschiedener Fließmittel (links), Darstellung verschiedener PCE-Moleküle (rechts) [Kordts.2005]	60
4.7. Qualitative Folgen bei Änderungen von Wasser- zu PCE-Gehalt bezogen auf Konsistenz- und Abbindeverhalten des Frischbetons [Schmidt.2015]	61
4.8. Fußgänger- und Radfahrbrücke in Lienz - Österreich [Freytag.2014]	62
4.9. Segmentklappverfahren (links), Wildbrücke nach Fertigstellung (rechts) [Freytag.2014]	62
4.10. Zeitliche Abfolge im Schleudervorgang [Rinnhofer.2001]	63
4.11. Thixotropes Materialverhalten [Krueger.2016]	65
4.12. Cone-Consistency-Test (links), Querschnitt (rechts) [Kaufmann.2007]	66
4.13. Ergebnisse vom Cone-Consistency-Test und optimaler Bereich des Zentrifugierens [Kaufmann.2007b]	66
4.14. Ergebnisse zu den Konsistenzkurven A-B-C [Kaufmann.2007b]	66
4.15. Biegezugfestigkeit von UHPC mit Carbonfasern und verschiedener Zusätze [Kaufmann.2007]	68
4.16. Partikelgröße von Mikro- zu Normalzement [Kaufmann.2007]	68
4.17. Faserentmischung - PVA-Fasern (links und Mitte), Carbonfasern (rechts) [Kaufmann.2007]	69
5.1. Dig. Lichtmikroskop vom Typus Keyence VHX-5000 - IMBT, TU Graz	74
5.2. Betonschleuder mit Schalungsrohren - Fa. Maba	75
5.3. Querschnitt (links) und Längsschnitt (rechts) des Schalungelements - M 1/10 . .	75
5.4. Gleichgewichtszustand von Vollrohrquerschnitt zu Segmentquerschnitt	76
5.5. Betonieren des Gegengewichtes	76
5.6. Einschalvorgang	77
5.7. Eirich-Labormischer	78
5.8. Mischwerkzeug	78
5.9. Befüllungsvorgang	79
5.10. Blick ins Innere des Schalungselementes des eingefüllten Betons	79
5.11. Ausschalen der Probe	80
5.12. Konsistenzprüfung mittels Hägermann-Konus - Probe 1	81

5.13. Probe 1 nach vollendetem Schleudervorgang (links), Ausschalvorgang Probe 1 (rechts)	81
5.14. Querschnitt Probe 1	81
5.15. Flächenanteil der Quarzkörnung am inneren (links) und äußeren (rechts) Radius der geschleuderten Probe 1	83
5.16. Konsistenzprüfung mittels Hägermann-Konus (links), Probe vor Beginn des Schleudervorgangs (rechts) - Probe 2	84
5.17. Probe 2 nach Schleuderende (links), Probe 2 beim Ausschalen (rechts)	84
5.18. Querschnitt Probe 2	85
5.19. Faseranordnung in Probe 2	85
5.20. Faseranordnung in Probe 2	86
5.21. Vergrößertes Gefüge der Probe 2	87
5.22. Querschnitt Probe 3	88
5.23. Vergleich der Faserverteilung zwischen Probe 2 (links) und Probe 3 (rechts)	89
5.24. Vergleich von Probe 2 zu Probe 3 hinsichtlich der Verdichtungsporen	90
5.25. Strukturierte Stahlfasern - Schlankheit $\lambda \sim 100$	91
5.26. Querschnitt Probe 4	92
5.27. Vergleich der Faserverteilung von Probe 2 (unten) zu Probe 4 (oben)	92
5.28. Querschnitt Probe 5	93
5.29. Querschnitt Probe 6	95
5.30. Ungeschleuderte Probe 6	95
5.31. Querschnitt Probe 9	97
5.32. Schichtungen - Querschnitt Probe 9	97
5.33. Querschnitt Probe 10	99
6.1. Beispielhafter Vergleich von scheinbarer Permeabilität zu Klinkenberg Permeabilität (absolute Permeabilität) aus ungeschleuderten Vorversuchen [LKI.2017]	104
6.2. Methode nach <i>RILEM-CEMBUREAU</i> - schematische Darstellung (links) [Haefner.2015] und Messgerät vom Institut für Betonbau, TU Graz (rechts)	105
6.3. Querschnitt der Prüfzelle des Messgerätes mit Probe (links)[DAfStb.1991], Prüfzelle ohne Probe - Institut für Betonbau, TU Graz (rechts)	106
6.4. Bohren der Probekörper aus den geschleuderten UHPC-Proben	107
6.5. Messröhre (links) und Messskala (rechts)	108
6.6. Versuchsaufbau der instationären Permeabilitätsmessung [Haefner.2015]	110
6.7. Messgrößen der instationären Permeabilitätsmessung: Druckverlauf in Eingang- und Ausgangskammer [Haefner.2015]	110
6.8. Probekörper $\varnothing 50$ mm für die Instationäre Messung von Probe 2	111

6.9. Messmethoden verschiedener Porengrößen nach mehreren Autoren [Scheydt.2014]	112
6.10. BET-Messprinzip: Klassische volumetrische Methode ¹	113
6.11. BET Messgerät TriStar II ²	113
6.12. Zerstörung des Probewürfels in der Druckpresse (links), Zermahlen mittels Hammer und aussortieren der Stahlfasern mit Magnete (rechts)	114
6.13. Würfeldruckpresse - Eingespannte Probe mit Dehnungsaufnehmern auf beiden Seiten - LKI	115
7.1. Messungen des Volumenstroms der Stationären Permeabilitätsmessung von Probe 1	118
7.2. Volumenstrom der Stationären Permeabilitätsmessung von Probe 1	118
7.3. Ergebnisse der Stationären Permeabilitätsmessung der Proben	119
7.4. Ergebnis der instationären Permeabilitätsmessung von Probe 2	119
7.5. Porengrößenverteilung als Summenkurve von Poren mit Durchmesser zwischen 1,7 und 300 nm - Probe 2	121
7.6. Porendichteverteilung im Nanometerbereich von Poren mit Durchmesser zwischen 1,7 und 300 nm - Probe 2	121
7.7. Porendichteverteilung im Ångströmbereich (10^{-10} m) von Poren mit Durchmesser zwischen 1,7 und 300 nm - Probe 2	122
7.8. Ergebnis zur Eindringung von Quecksilber in den Prüfkörper K 134/17 der Probe 2	123
7.9. Ergebnis zur Porenverteilung der Prüfkörper K 134/17 der Probe 2	124
7.10. Ergebnisse zur Dichtebestimmung der Proben 1-6, 10	124
7.11. Geprüfte E-Moduli der Proben	125
7.12. Geprüfte Druckfestigkeit der Proben	126
8.1. Größenfaktor geringerer Gaspermeabilität bezogen auf Probe 1	128
8.2. Dauer des durchströmten Luftvolumens von Probe 1, 2, 5 und 10	128
8.3. Permeabilität in Abhängigkeit der Schleuderzeit	128
8.4. Vergleich der Permeabilitäten (links) und Größenfaktor (rechts) der Probe 2 zu einer UHPC-Probe aus der Literatur nach SCHNEYDT [Scheydt.2014]	129
8.5. Vergleich der Permeabilitäten unterschiedlicher Betone zu geschleuderten UHPC der Probe 2 [AFGC.2013]	130
8.6. Sorptionsisotherme von Pr. 2 (links), Sorptionsisothermen verschiedener Betone aus der Literatur [Scheydt.2014] (rechts)	132
8.7. Porengrößenverteilung (links) und Porendichteverteilung (rechts) aus der Literatur [Scheydt.2014]	132
8.8. Porengrößenverteilung (links) und Porendichteverteilung (rechts) der Probe 2	133

8.9. Übliche Darstellung einer Porenradienverteilung von UHPC aus der Literatur [Scheydt.2014]	133
8.10. Porenradienverteilung der Probe 2 - Kumulativ (links), log.-differential (rechts) . .	134
8.11. Gesamtporosität und Porenklassen von Probe 2	134
8.12. Gesamtporosität und Porenklassen unterschiedlicher Betone in Anlehnung an <i>SCHEYDT</i> [Scheydt.2014]	135
8.13. Korrelation von stat. Permeabilitätskoeffizient (log.) zu Dichte	136
8.14. Korrelation von stat. Permeabilitätskoeffizient (log.) zu Druckfestigkeit	136
8.15. Korrelation von stat. Permeabilitätskoeffizient (log.) zu Elastizitätsmodul	136
8.16. Korrelation von Dichte zu Elastizitätsmodul	137
8.17. Korrelation von Dichte zu Druckfestigkeit	137
8.18. Kenngrößen der Druckfestigkeit und Permeabilität von herkömmlichem und ge- schleudertem UHPC	138

Tabellenverzeichnis

3.1. Stöchiometrie der Reaktionen typischer Portlandzemente in Verbindung mit Wasser [Tennis.2000]	30
3.2. Porenmodell von <i>JENNINGS et al</i> und <i>SETZER</i> - Einteilung nach Größe und Zugänglichkeit von fluidalen Medien [Wolf.2016]	41
5.1. Versuchsüberblick	72
5.2. Referenzrezeptur	77
5.3. Mischablauf	78
5.4. Schleuderparameter	79
5.5. Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 1	80
5.6. Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 2	84
5.7. Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 3	88
5.8. Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 4	91
5.9. Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 5	93
5.10. Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 6	94
5.11. Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 9	96
5.12. Herstellungs- und rezepturbedingte Angaben - Probe 10	98
7.1. Ergebnis der Quecksilberporosimetrie zu den Porositätsparameter der Probe 2	122
C.1. Dichtebestimmung der Proben	169

A. Anhang - 1

Vollständiger Bericht zur Gasadsorptionsmethode BET - Probe 2

Full Report Set

TriStar II 3020 V1.03 (V1.03) Unit 1 Port 1 Serial #: 677 Page 1

Sample: Geschnittene Beton_run1
 Operator: Feroz Ahmed
 Submitter: RCPE
 File: C:\WIN3020\DATA\IPPT\PROBE01.SMP

Started: 12.07.2017 9:00:27 Analysis Adsorptive: N2
 Completed: 12.07.2017 16:41:16 Analysis Bath Temp.: 77.350 K
 Report Time: 10.08.2017 13:06:26 Sample Mass: 2.6672 g
 Warm Free Space: 14.4733 cm³ Measured Cold Free Space: 44.6678 cm³ Measured
 Equilibration Interval: 10 s Low Pressure Dose: None
 Sample Density: 1.000 g/cm³ Automatic Degas: No

Summary Report

Surface Area
 BET Surface Area: 3.3145 m²/g

Pore Volume
 Single point adsorption total pore volume of pores
 less than 310.5620 nm diameter at p/p⁰ = 0.99375010: 0.013167 cm³/g
 t-Plot micropore volume: -0.000081 cm³/g

BJH Adsorption cumulative volume of pores
 between 1.7000 nm and 300.0000 nm diameter: 0.013291 cm³/g

Pore Size
 Adsorption average pore width (4V/A by BET): 15.88986 nm
 BJH Adsorption average pore diameter (4V/A): 13.3976 nm

Full Report Set

TriStar II 3020 V1.03 (V1.03) Unit 1 Port 1 Serial #: 677 Page 2

Sample: Geschnittene Beton_run1
 Operator: Feroz Ahmed
 Submitter: RCPE
 File: C:\WIN3020\DATA\IPPT\PROBE01.SMP

Started: 12.07.2017 9:00:27 Analysis Adsorptive: N2
 Completed: 12.07.2017 16:41:16 Analysis Bath Temp.: 77.350 K
 Report Time: 10.08.2017 13:06:26 Sample Mass: 2.6672 g
 Warm Free Space: 14.4733 cm³ Measured Cold Free Space: 44.6678 cm³ Measured
 Equilibration Interval: 10 s Low Pressure Dose: None
 Sample Density: 1.000 g/cm³ Automatic Degas: No

Isotherm Tabular Report

Relative Pressure (p/p ⁰)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.010056942	7.365569	0.4674	01:16	732.671326
0.014944740	10.947105	0.5091	02:06	732.386475
0.020961340	15.353476	0.5460	02:18	732.505554
0.024375822	17.855534	0.5634	02:29	732.466309
0.029622058	21.691551	0.5866	02:44	732.276978
0.034786291	25.470797	0.6059	02:50	732.207886
0.039749733	29.102898	0.6226	02:55	732.155823
0.049673726	36.375820	0.6518	03:01	732.294983
0.074179145	54.308918	0.7067	03:07	732.131897
0.098964514	72.454086	0.7533	03:12	731.971741
0.120239766	88.023750	0.7883	03:16	732.068542
0.140295618	102.674522	0.8198	03:19	731.844116
0.160462555	117.435036	0.8499	03:23	731.853210
0.180455110	132.071762	0.8789	03:26	731.881531
0.200435026	146.684418	0.9072	03:29	731.830261
0.248167377	181.600189	0.9746	03:33	731.764954
0.299232308	218.953506	1.0479	03:36	731.717468
0.349177361	255.489563	1.1243	03:40	731.689941
0.398232003	291.382813	1.2072	03:43	731.691101
0.447984619	327.788860	1.3042	03:47	731.652039
0.497493968	363.989822	1.4230	03:51	731.633160
0.547298803	400.330902	1.5721	03:56	731.466797
0.596931941	436.886090	1.7562	04:01	731.383362
0.646791299	472.964203	1.9758	04:07	731.247009
0.696278571	509.143463	2.2291	04:14	731.235291
0.737803263	539.404480	2.4487	04:20	731.095276
0.789196003	561.737671	2.5862	04:25	731.242065
0.737742274	593.155840	2.7350	04:29	731.007568
0.818229508	598.045166	2.8346	04:34	730.901489
0.838508264	612.783569	2.9360	04:38	730.802063
0.857370691	627.004761	3.0456	04:42	730.799744
0.873789305	638.524841	3.1502	04:46	730.753784
0.888441285	649.364685	3.2676	04:50	730.903320
0.903397857	660.130249	3.4107	04:55	730.719299
0.913395895	667.986835	3.5379	05:00	730.749146
0.924068374	675.104309	3.6851	05:06	730.578308
0.932276263	681.137573	3.8306	05:11	730.617737
0.939232793	686.059509	3.9814	05:17	730.467116
0.946178449	691.166321	4.1661	05:23	730.481995
0.952276093	695.52246	4.3507	05:30	730.410278
0.957857452	699.453247	4.5655	05:37	730.226868
0.963330331	703.409607	4.8193	05:45	730.185486
0.967210127	706.168945	5.0425	05:53	730.109131
0.970545258	708.550049	5.2724	06:01	730.053589
0.973603728	710.735335	5.5122	06:09	730.004944
0.976590653	712.890076	5.7686	06:17	729.978394
0.979493299	714.774414	6.0436	06:25	729.738953
0.981610636	716.360657	6.3102	06:34	729.632202
0.983617780	717.514771	6.5720	06:42	729.465027
0.985710476	719.062256	6.8997	06:52	729.486267
0.987459108	720.162354	7.1845	07:01	729.308533

Full Report Set

TriStar II 3020 V1.03 (V1.03) Unit 1 Port 1 Serial #: 677 Page 3

Sample: Geschnittene Beton_run1
 Operator: Feroz Ahmed
 Submitter: RCPE
 File: C:\WIN3020\DATA\IPPT\PROBE01.SMP

Started: 12.07.2017 9:00:27 Analysis Adsorptive: N2
 Completed: 12.07.2017 16:41:16 Analysis Bath Temp.: 77.350 K
 Report Time: 10.08.2017 13:06:26 Sample Mass: 2.6672 g
 Warm Free Space: 14.4733 cm³ Measured Cold Free Space: 44.6678 cm³ Measured
 Equilibration Interval: 10 s Low Pressure Dose: None
 Sample Density: 1.000 g/cm³ Automatic Degas: No

Isotherm Tabular Report

Relative Pressure (p/p ⁰)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.989023114	721.084595	7.4731	07:10	729.087708
0.989629026	721.537109	7.6089	07:16	729.098572
0.991474688	722.779490	7.9915	07:26	728.994385
0.993750102	724.255676	8.5123	07:39	728.810669

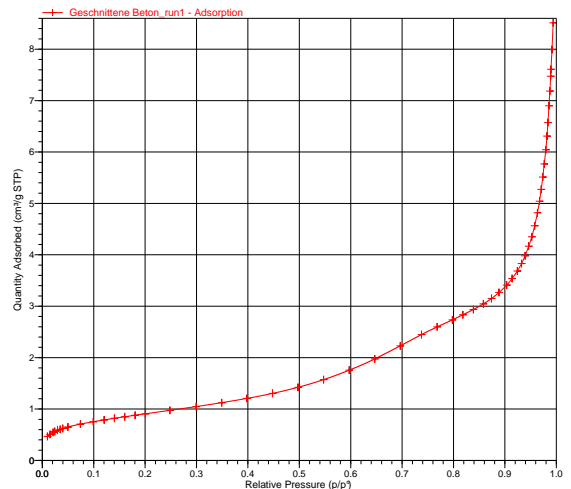
Full Report Set

TriStar II 3020 V1.03 (V1.03) Unit 1 Port 1 Serial #: 677 Page 4

Sample: Geschnittene Beton_run1
 Operator: Feroz Ahmed
 Submitter: RCPE
 File: C:\WIN3020\DATA\IPPT\PROBE01.SMP

Started: 12.07.2017 9:00:27 Analysis Adsorptive: N2
 Completed: 12.07.2017 16:41:16 Analysis Bath Temp.: 77.350 K
 Report Time: 10.08.2017 13:06:26 Sample Mass: 2.6672 g
 Warm Free Space: 14.4733 cm³ Measured Cold Free Space: 44.6678 cm³ Measured
 Equilibration Interval: 10 s Low Pressure Dose: None
 Sample Density: 1.000 g/cm³ Automatic Degas: No

Isotherm Linear Plot



Full Report Set

TriStar II 3020 V1.03 (V1.03) Unit 1 Port 1 Serial #: 677 Page 5

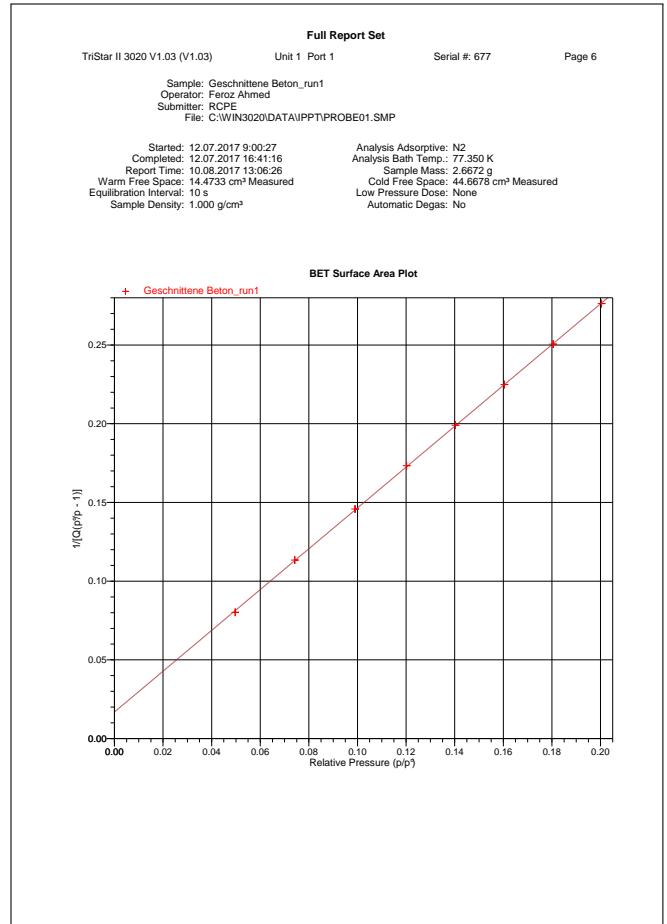
Sample: Geschnittene Beton_run1
 Operator: Feroz Ahmed
 Submitter: RCPE
 File: C:\WIN3020\DATA\IPPT\PROBE01.SMP

Started: 12.07.2017 9:00:27 Analysis Adsorptive: N2
 Completed: 12.07.2017 16:41:16 Analysis Bath Temp.: 77.350 K
 Report Time: 10.08.2017 13:06:26 Sample Mass: 2.6672 g
 Warm Free Space: 14.4733 cm³ Measured Cold Free Space: 44.6678 cm³ Measured
 Equilibration Interval: 10 s Low Pressure Dose: None
 Sample Density: 1.000 g/cm³ Automatic Degas: No

BET Surface Area Report

BET Surface Area: 3.3145 ± 0.0116 m²/g
 Slope: 1.236402 ± 0.004570 g/cm³ STP
 Y-Intercept: 0.016875 ± 0.000627 g/cm³ STP
 C: 77.830007
 Cm: 0.7614 cm³/g STP
 Correlation Coefficient: 0.9998627
 Molecular Cross-Sectional Area: 0.1620 nm²

Relative Pressure (p/p')	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	1/[Q(p/p' - 1)]
0.049673726	0.6518	0.080195
0.074179145	0.7067	0.113368
0.098984814	0.7533	0.145837
0.120239766	0.7883	0.173369
0.140295618	0.8198	0.199064
0.160462555	0.8499	0.224878
0.180455110	0.8789	0.250527
0.200435026	0.9072	0.276310



Full Report Set

TriStar II 3020 V1.03 (V1.03) Unit 1 Port 1 Serial #: 677 Page 7

Sample: Geschnittene Beton_run1
 Operator: Feroz Ahmed
 Submitter: RCPE
 File: C:\WIN3020\DATA\IPPT\PROBE01.SMP

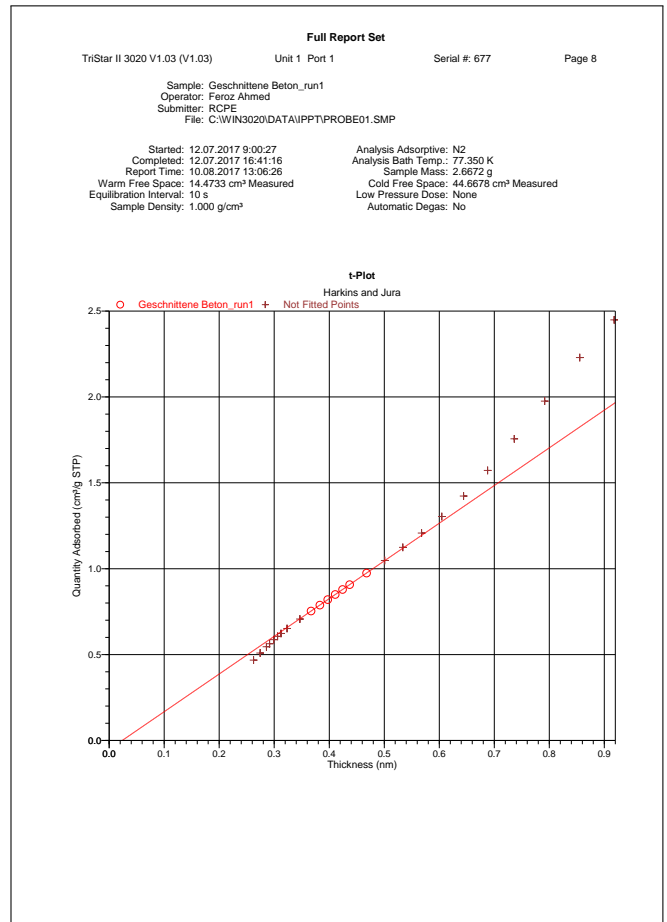
Started: 12.07.2017 9:00:27 Analysis Adsorptive: N2
 Completed: 12.07.2017 16:41:16 Analysis Bath Temp.: 77.350 K
 Report Time: 10.08.2017 13:06:26 Sample Mass: 2.6672 g
 Warm Free Space: 14.4733 cm³ Measured Cold Free Space: 44.6678 cm³ Measured
 Equilibration Interval: 10 s Low Pressure Dose: None
 Sample Density: 1.000 g/cm³ Automatic Degas: No

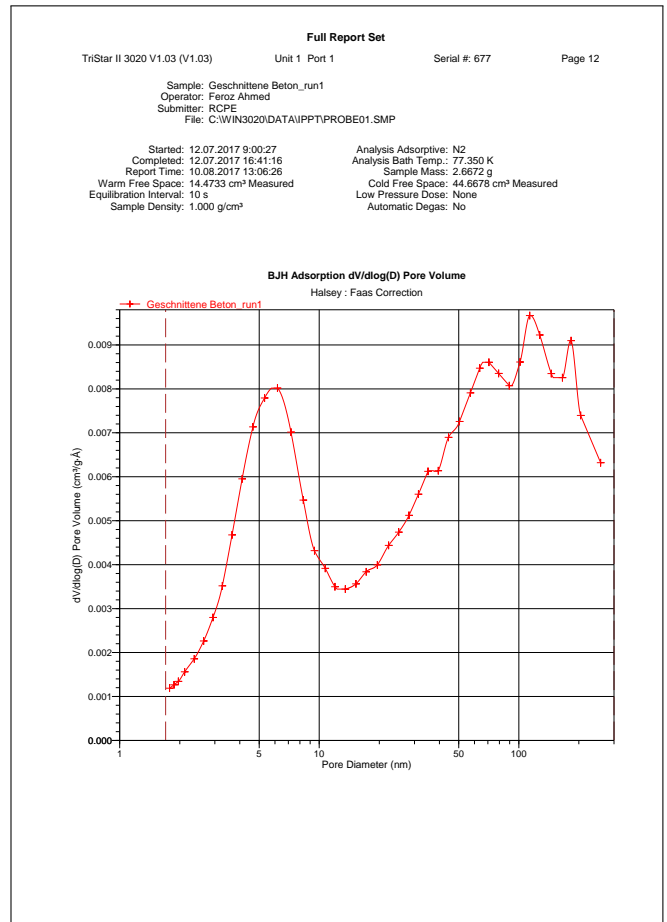
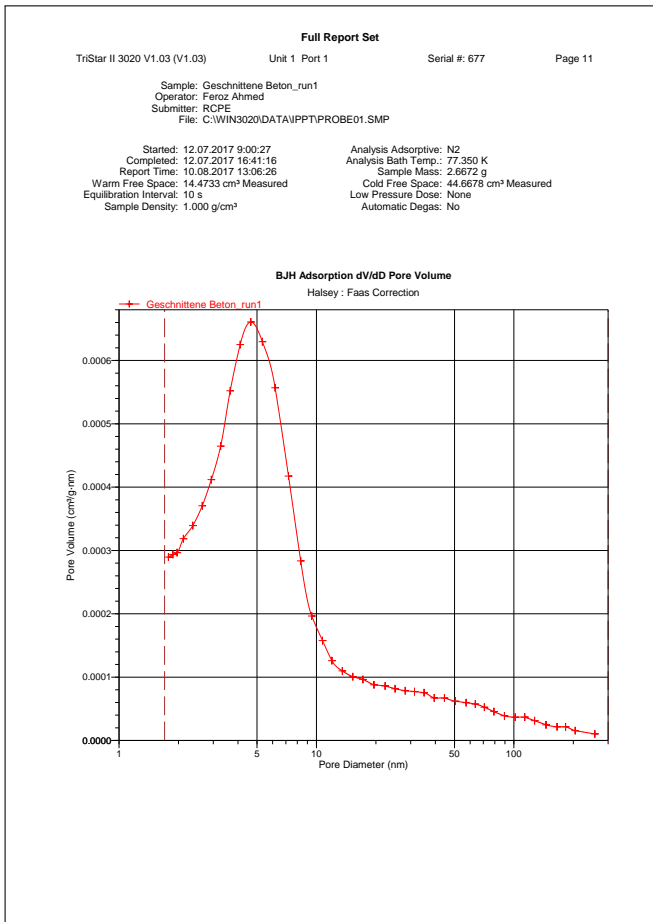
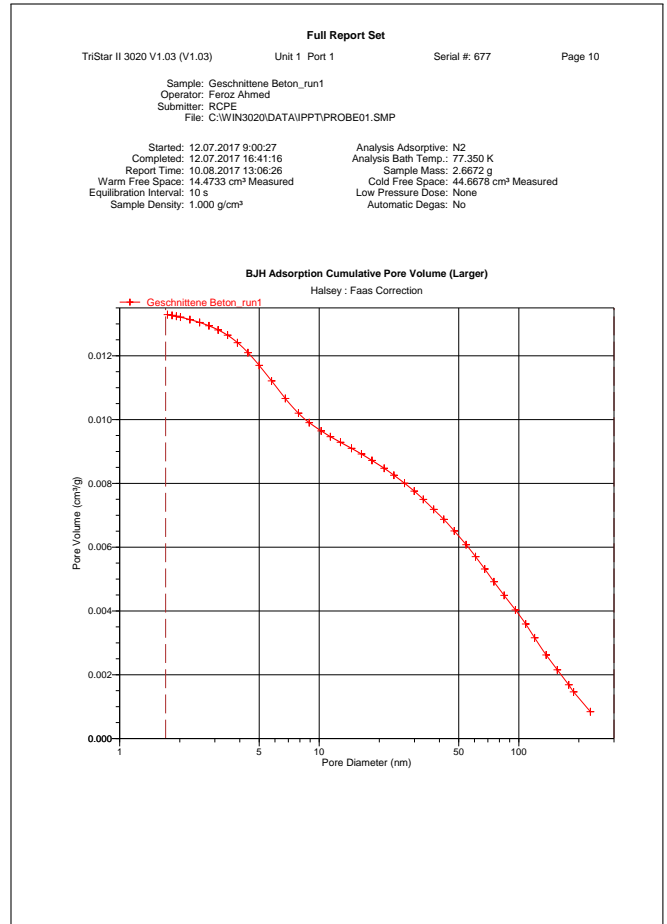
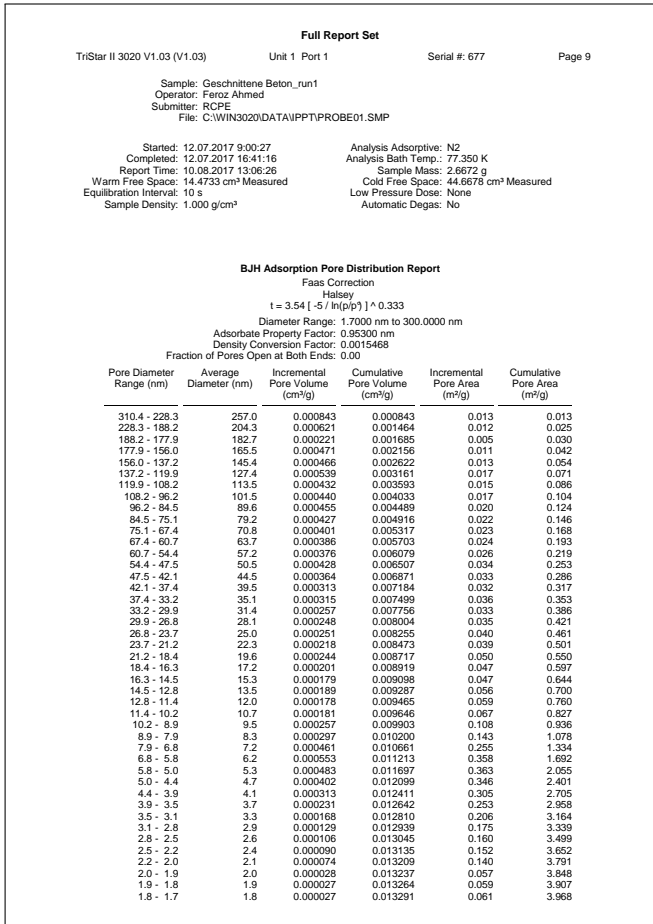
t-Plot Report

Micropore Volume: -0.000081 cm³/g
 Micropore Area: -
 External Surface Area: 3.3948 m²/g
 Slope: 2.194734 ± 0.002166 cm³/g-nm STP
 Y-Intercept: -0.052071 ± 0.000896 cm³/g STP
 Correlation Coefficient: 0.999998
 Surface Area Correction Factor: 1.000
 Density Conversion Factor: 0.0015468
 Total Surface Area (BET): 3.3145 m²/g
 Thickness Range: 0.35000 nm to 0.50000 nm
 Thickness Equation: Harkins and Jura
 $t = [13.99 / (0.034 - \log(p/p'))]^{0.5}$

Relative Pressure (p/p')	Statistical Thickness (nm)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Fitted
0.010056942	0.26242	0.4674	
0.014944740	0.27429	0.5091	
0.020961340	0.28581	0.5460	
0.024375822	0.29145	0.5634	
0.029622058	0.29924	0.5866	
0.034786291	0.30615	0.6059	
0.039749733	0.31227	0.6226	
0.049673726	0.32337	0.6518	
0.074179145	0.34672	0.7067	
0.098984814	0.36705	0.7533	*
0.120239766	0.38295	0.7883	*
0.140295618	0.39715	0.8198	*
0.160462555	0.41089	0.8499	*
0.180455110	0.42415	0.8789	*
0.200435026	0.43717	0.9072	*
0.248167377	0.46781	0.9746	
0.299232308	0.50072	1.0479	
0.349177361	0.53381	1.1243	
0.398232003	0.56785	1.2072	
0.447984619	0.60459	1.3042	
0.497437868	0.64411	1.4230	
0.547298803	0.68775	1.5721	
0.596931941	0.73627	1.7562	
0.646791299	0.79164	1.9758	
0.696278571	0.85535	2.2291	
0.737803263	0.91786	2.4487	

* The micropore area is not reported because either the micropore volume is negative or the calculated external surface area is larger than the total surface area.





Full Report Set

TriStar II 3020 V1.03 (V1.03) Unit 1 Port 1 Serial #: 677 Page 13

Sample: Geschnittene Beton_run1
 Operator: Feroz Ahmed
 Submitter: RCPE
 File: C:\WIN3020\DATA\IPPT\PROBE01.SMP

Started: 12.07.2017 9:00:27 Analysis Adsorptive: N2
 Completed: 12.07.2017 16:41:16 Analysis Bath Temp.: 77.350 K
 Report Time: 10.08.2017 13:06:26 Sample Mass: 2.6672 g
 Warm Free Space: 14.4733 cm³ Measured Cold Free Space: 44.6678 cm³ Measured
 Equilibration Interval: 10 s Low Pressure Dose: None
 Sample Density: 1.000 g/cm³ Automatic Degas: No

BJH Desorption Reports

Primary Data
 1045- Fewer than 2 points available for BJH Desorption calculations.
 1045- Fewer than 2 points available for BJH Desorption calculations.

Full Report Set

TriStar II 3020 V1.03 (V1.03) Unit 1 Port 1 Serial #: 677 Page 14

Sample: Geschnittene Beton_run1
 Operator: Feroz Ahmed
 Submitter: RCPE
 File: C:\WIN3020\DATA\IPPT\PROBE01.SMP

Started: 12.07.2017 9:00:27 Analysis Adsorptive: N2
 Completed: 12.07.2017 16:41:16 Analysis Bath Temp.: 77.350 K
 Report Time: 10.08.2017 13:06:26 Sample Mass: 2.6672 g
 Warm Free Space: 14.4733 cm³ Measured Cold Free Space: 44.6678 cm³ Measured
 Equilibration Interval: 10 s Low Pressure Dose: None
 Sample Density: 1.000 g/cm³ Automatic Degas: No

Options Report

Sample Tube
 Warm free space: 3.7700 cm³
 Cold free space: 3.7700 cm³
 Non-ideality factor: 0.0000620
 Use Isothermal Jacket: Yes
 Use Filler Rod: No
 Vacuum seal type: None

Analysis Conditions

Preparation
 Fast evacuation: No
 Evacuation rate: 5.0 mmHg/s
 Unrestricted evacuation from: 5.0 mmHg
 Evacuation time: 0.50 h
 Leak test: Yes
 Leak test duration: 120 s
 Use TranSeal: No

Free Space
 Free-space type: Measured
 Lower dewar for evacuation: Yes
 Evacuation time: 0.30 h
 Outgas test: Yes
 Outgas test duration: 60 s

p² and Temperature
 p² and T type: Measure p² in the p²-tube for each isotherm point. Enter the Analysis Bath Temperature below.
 Temperature: 77.350 K

Dosing
 Use first pressure fixed dose: No
 Use maximum volume increment: No
 Target tolerance: 5.0% or 5.000 mmHg

Equilibration
 Equilibration interval: 10 s
 Minimum equilibration delay at p/p²= 0.995: 600 s

Sample Backfill
 Backfill at start of analysis: Yes
 Backfill at end of analysis: Yes
 Backfill gas: N2


Adsorptive Properties
 Adsorptive: Nitrogen
 Maximum manifold pressure: 1050.00 mmHg
 Non-ideality factor: 0.0000620
 Density conversion factor: 0.0015468
 Molecular cross-sectional area: 0.162 nm²

B. Anhang - 2

Vollständiger Bericht zur Quecksilberporosimetrie - Probe 2

Department of Materials
Laboratory for Stone, Aggregate
and Recycled Materials

Ljubljana, 28.7.2017



ZAVOD ZA
GRADNENIŠTVO
SLOVENIJE

SLOVENIAN
NATIONAL BUILDING
AND CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE

Dimrova ulica 12
1000 Ljubljana
Slovenija

info@zag.si
www.zag.si

REPORT


No. P 721/17 - 420 - 1

**about the mercury intrusion porosimetry analysis
of cement composite**


Orderer: TU GRAZ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY,
Rechbauerstrasse 12/1, 8010 Graz


Order/Contract: Order no. 4500094845 dated 10.7.2017

Responsible investigator:
Dr. Vesna Zalar Serjun

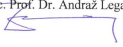


Head of Laboratory:
Dr. Ana Mladenovič






Director:
Assoc. Prof. Dr. Andraž Legat



The test results refer only to the test specimens. This report may only be reproduced as a whole. Complaints will be considered only if received within 15 days from the date of issue of this report. Total number of pages: 3, number of annexes: 0
Form: P.S. 12-001-01/2

No. P 721/17 - 420 - 1



Page: 2/3

1.0 Introduction

On 20.7.2017 a sample of cement composite was delivered to ZAG. The client requests the mercury porosimetry analysis.

The sample was given the joint internal laboratory designation K 134/17. The investigations were carried out between 25.7. and 27.7. 2017.

2.0 Method

Porosity was determined by means of mercury intrusion porosimetry (MIP), taking into account the Washburn equation and assuming a contact angle of 130°. The MIP measurement was performed within a pressure range of up to 414 MPa, using an AutoPore IV 9500 porosimeter (Micromeritics). The equilibration time used was 10s. Steam volume and penetrometer volume of the penetrometer used was 0.3920 mL and 15.2350 mL respectively.

Investigations were carried out in accordance with the requirements of the standard:

- SIST ISO 15901-1:2006 – Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 1: Mercury porosimetry.


Prior to the MIP analysis, the sample was oven dried at 60 °C ± 1 °C in the presence of soda lime pellets until a constant mass was reached.

3.0 Results of the analysis

The results of the MIP analysis are given in Table 1, and the XRD spectrum is presented in Figures 1 and 2.


Table 1: The porosity parameters.

Sample	Sample weight [g]	Median pore diameter (volume) [µm]	Median pore diameter (area) [µm]	Average pore diameter [µm]	Porosity [%]	Total pore area [m ² /g]
K 134/17	12.4480	0.0123	0.0050	0.0092	4.3394	9.042



The test results refer only to the test specimens. This report may only be reproduced as a whole.

No. P 721/17 - 420 - 1



Page: 3/3

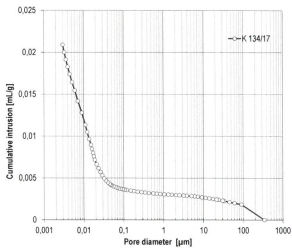


Figure 1: The intrusion of Hg for the sample K 134/17.

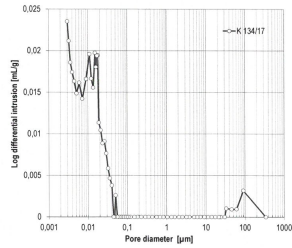



Figure 2: Pore size distribution of the sample K 134/17.

Analysis performed by:

Vesna Zalar Serjun, Ph.D (Geol.),
Mateja Štefančič, Ph.D (Geol.)



The test results refer only to the test specimens. This report may only be reproduced as a whole.

C. Anhang - 3

Dichtebestimmung Probe 1-6 und Probe 9-10

Probe	Gewicht [g/cm ³]	Tauchwägung [g/cm ³]	Volumen [cm ³]	Trocknung bei 105°C				Einzelidichten mit Fasern [g/cm ³]	gemittelte Dichte mit Fasern [g/cm ³]	Gewicht Fasern [g]	Volumen Fasern [cm ³]	Beton- Volumen netto [cm ³]	Beton- Gewicht netto [g]	Einzelidichte ohne Fasern [g/cm ³]	gemittelte Dichte ohne Fasern [g/cm ³]	
				Datum		Uhrzeit										Dauer [min]
				14.06 - 14:42	16.06 - 10:45	19.06 - 13:20	21.06 - 09:58									
1.1	20,65	11,95	8,72	20,02	19,87	19,76	19,72	2,31	0,00	0	8,72	19,72	2,31			
1.2	19,83	11,46	8,39	19,24	19,09	18,99	18,96	2,30	0,00	0	8,39	18,96	2,30	2,30		
1.3	19,78	11,41	8,39	19,14	18,99	18,88	18,84	2,29	0,00	0	8,39	18,84	2,29	2,30		
2.1	21,01	12,57	8,46	20,63	20,54	20,48	20,47	2,47	0,08	0,01	8,44	20,39	2,46			
2.2	20,85	12,47	8,40	20,52	20,44	20,38	20,36	2,47	0,04	0,01	8,39	20,32	2,47			
2.3	20,62	12,32	8,31	20,29	20,21	20,14	20,12	2,47	0,03	0,00	8,31	20,09	2,46	2,47		
3.1	23,42	14,21	9,23	23,09	23,00	22,90	22,88	2,53	0,96	0,12	9,10	21,92	2,45			
3.2	23,77	14,40	9,39	23,41	23,32	23,25	23,22	2,52	1,24	0,16	9,23	21,98	2,43			
3.3	21,70	12,99	8,73	21,35	21,27	21,20	21,18	2,47	0,27	0,04	8,69	20,91	2,45	2,43		
4.1	19,80	11,80	8,01	19,42	19,33	19,27	19,24	2,45	0,05	0,01	8,01	19,19	2,44			
4.2	19,75	11,77	7,99	19,38	19,30	19,23	19,21	2,45	0,01	0,00	7,99	19,20	2,45			
4.3	20,35	12,13	8,23	19,98	19,90	19,84	19,82	2,45	0,03	0,00	8,23	19,79	2,45	2,45		
5.1	21,90	13,05	8,87	21,49	21,41	21,34	21,33	2,45	0,09	0,01	8,85	21,24	2,45			
5.2	18,88	11,30	7,59	18,55	18,48	18,41	18,40	2,47	0,12	0,02	7,58	18,28	2,46			
5.3	20,09	12,01	8,09	19,75	19,67	19,60	19,59	2,47	0,14	0,02	8,08	19,45	2,45	2,45		
6.1	21,95	13,12	8,85	21,54	21,45	21,39	21,38	2,46	0,05	0,01	8,84	21,33	2,46			
6.2	19,19	11,44	7,76	18,77	18,68	18,63	18,62	2,44	0,06	0,01	7,76	18,56	2,44			
6.3	21,30	12,72	8,60	20,88	20,79	20,73	20,72	2,46	0,05	0,01	8,59	20,67	2,45	2,45		
U6.1	9,09	5,41	3,69	8,91	8,87	8,84	8,84	2,44	0,39	0,05	3,64	8,45	2,37			
U6.2	8,20	4,80	3,41	8,04	8,00	7,98	7,98	2,39	0,38	0,05	3,36	7,60	2,31			
U6.3	10,39	6,19	4,21	10,21	10,17	10,14	10,13	2,45	0,59	0,08	4,13	9,54	2,35	2,35		
10.1	18,26	11,00	7,27	18,05	17,99	17,95	17,94	2,51	0,00	0	7,27	17,94	2,51			
10.2	21,53	13,07	8,48	21,27	21,18	21,14	21,13	2,54	0,49	0,06	8,41	20,64	2,50			
10.3	17,39	10,38	7,02	17,09	17,01	16,97	16,96	2,46	0,00	0	7,02	16,96	2,46	2,49		

Tabelle C.1.: Dichtebestimmung der Proben