

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei unterschiedlichen Temperaturzuständen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplomingenieurs
unter der Leitung von

O. Univ. Prof. Dr. Dr. h.c. Ulrich SCHNEIDER

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinrich BRUCKNER

Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz

Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

Von

Harald PÖNNINGER

E610 / 9527406

Neustiftgasse 16/1/35, 1070 Wien

Wien, im Winter 2009

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Danke all jenen sagen, die mir geholfen haben diese Arbeit zu schreiben und zu vervollständigen. Herrn *O. Univ.Prof. Dr. h.c. Ulrich Schneider*, der mich durch das Thema geleitet hat. Herrn *Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinrich Bruckner*, der immer die Richtigen Ideen, Anregungen und Worte im rechten Moment hatte um mich wieder zu motivieren, stellvertretend für die Mitarbeiter des Instituts die mich unterstützt haben.

Auch möchte ich meiner Familie danken und allen voran meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben.

Auch den vielen Freunden und Studienkollegen möchte ich Danke sagen, die mir oftmals zur Seite gestanden sind und mich unterstützt haben. Ebenso meinem Arbeitgeber, der viel Verständnis und Geduld für

Und nicht zuletzt möchte ich all jenen danken, die mich immer wieder dazu gedrängt haben endlich zu einem Ende zu finden.

Wien, im Dezember 2009

Harald Pönninger

Abstract

The aim of this work is to further develop and improve the test facility, which was developed at the Technical University of Vienna, Institute of Building Construction and Technology - Research Center of Building Materials, for the measurement of the gas permeability of concrete at varying temperature conditions.

In the course of this undertaking, the fluid-flow measurement was made more dependable by the optimized operation of rotameters. A device for cooling the air and separating the condensation in the gas flow was also developed and installed.

Experiments revealed that the best primary pressure for this test facility was $p_1 = 2,0\text{bar}$. The most exact characteristics for the gas permeability are ascertained with this primary pressure.

The influence of the span of time, during which the testing was kept at a constant temperature, was also examined. The result was that a period of six to eight hours is necessary in order to achieve an absolute value of the gas permeability at this temperature level.

A further objective was to determine how the gas permeability at increased temperature differed in comparison to the permeability after cooling down to room temperature. The result here was that the measured characteristics after cooling down are located between the characteristics of the cold specimen before heating and those of the hot specimen.

It was also tested that the enhanced test facility can measure differences in the permeability characteristics at differing fluctuations (GK4mm und GK16mm).

The test facility has become more precise with these improvements. Additionally, the identified conditions, under which the experiments were conducted, contribute to the enhancement of accuracy of measurement.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	7
2	GRUNDLAGEN	9
2.1	Beton	9
2.1.1	Porenverteilung im Festbeton	10
2.1.2	Temperatureigenschaften von Beton	13
2.1.3	Permeabilität bei Normaltemperatur	20
2.2	Physikalische Grundlagen der Permeabilität	22
2.2.1	Herleitung der Formel über die Permeabilität	22
2.2.2	Normierung der Messergebnisse	25
2.3	Bestehende Messmethoden	27
2.3.1	Messmethoden bei Raumtemperatur	27
2.3.2	Messmethoden bei höheren Temperaturen	31
2.3.3	Verwendete Messmethode und Beschreibung der Anlage	34
3	VERSUCHSPLANUNG	44
3.1	Ausgewählte Betonsorten	44
3.1.1	Normalbeton 1	44
3.1.2	Normalbeton 2	46
3.1.3	Hochfester Beton	47
3.2	Versuchsplanung	49
3.2.1	Dichtigkeit der Anlage	50
3.2.2	Schwebekörper-Durchflussmesser	50
3.2.3	Exakte Ermittlung der Druckmessung und des Vordruckes	52
3.2.4	Haltezeiten	53
3.2.5	Aufheizen und Abkühlen	53

3.2.6	Ermittlung des Absolutwertes eines hochfesten Betons	53
3.2.7	Ermittlung des Einflusses von größeren Körnungen der Zuschlagstoffe auf die Absolutwerte der Permeabilität	53
4	DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER ERSTEN VERSUCHSREIHE	55
4.1.1	Dichtigkeit der Anlage	55
4.1.2	Schwebekörper-Durchflussmesser	57
4.1.3	Druckmessung und Ermittlung eines günstigen Vordrucks	62
5	VERSUCHSREIHE 2	66
5.1	Darstellung der betontechnologischen Kennwerte der ausgewählten Betone	66
5.1.1	Festigkeitsuntersuchungen	66
5.1.2	Porosimetrische Untersuchungen	69
5.2	Einfluss der Haltezeiten	74
5.3	Einfluss des Erhitzens und Abkühlens	76
5.4	Messung der Absolutwerte der Permeabilität eines Normalbetons	78
5.5	Messung der Absolutwerte der Permeabilität eines weiteren Normalbetons mit kleineren Zuschlägen	81
5.6	Messung der Absolutwerte der Permeabilität eines hochfesten Betons	85
5.7	Vergleich der Absolutwerte	87
5.7.1	Vergleich der Normalbetone	87
5.7.2	Vergleich Normalbeton 1 mit hochfestem Beton	90
6	ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN	92
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	95
8	TABELLENVERZEICHNIS	97

9	LITERATUR	98
10	ANHANG	100
10.1	Datenblatt des Differenzdrucksensors	100
10.2	Rotameter	104
10.2.1	Staffelung der Rotameter	104
10.2.2	Durchflusstabellen verwendeter Rotameter bei 22°C und 2bar	105

1 Einleitung

Das Ziel dieser Arbeit ist, die am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz – Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz entwickelte Anlage zur Messung der Permeabilität von Beton bei unterschiedlichen Temperaturzuständen weiterzuentwickeln und zu verbessern.

Die vorhandene Anlage mit dem Entwicklungsstand, wie sie Gornik in seiner Arbeit ‚Einfluss der Temperatur auf die Permeabilität von Beton‘ (Gornik, /3/) entwickelt hat, soll im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt, verbessert und hinsichtlich der Anforderungen an sie optimiert werden.

Diese Verbesserungen sollen vor allem darauf abzielen die Messgenauigkeiten der einzelnen Messapparaturen zu heben, um letztlich Absolutmessungen des Permeabilitätskoeffizienten zu bekommen, die den Anforderungen genügen.

Die Fragen gliedern sich vorrangig in zwei Kategorien:

- Einerseits sind die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messapparaturen an sich und die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Anlage als Gesamtes zu untersuchen. Probleme diesbezüglich haben sich vor allem durch Defekte an den Geräten und den dadurch verursachten Verlust ganzer Versuchsreihen gezeigt.
- Andererseits soll auch untersucht werden, ob und in welcher Art die Gaspermeabilität abhängig von der Korngröße und der Festigkeit der zu prüfenden Betone ist und ob die Anlage diesbezüglich ausreichende Genauigkeiten aufweist um derartige Unterschiede auch zu messen. Weiters stellt sich auch die Frage inwiefern die Haltezeit bei konstantem Temperaturniveau Einfluss auf die Gaspermeabilität hat. Auch die Relation von Permeabilitätswerten vor und nach dem Erhitzen soll ebenso untersucht werden wie die Gaspermeabilität bei Raumtemperatur nach dem Abkühlen im Vergleich zu dem gemessenen Wert bei heißer Probe.

Um diese Ziele zu erreichen gilt es zwei Vorgehensweisen zu verfolgen.

Zum ersten Punkt ist es das Ziel die Dichtheit der Anlage weiter zu optimieren und insbesondere die Durchflussmessung hitze- und feuchtigkeitsresistent zu machen. Es sind

auch ideale Haltezeiten auf den einzelnen Temperaturniveaus herauszufinden. Weiters ist auch ein Vordruck des durchströmenden Gases zu finden, der einerseits die Messgenauigkeit erhöht, jedoch auch die Anlage und ihre Komponenten selbst nicht beschädigt. Hierzu sind Verbesserungen und Ideen zu prüfen. Gegebenenfalls sind diese dann durch einen Umbau der Anlage oder Austausch einzelner Komponenten durch bessere umzusetzen.

Zum zweiten Punkt sind Versuche mit verschiedenen Betonrezepturen zu machen. Hierbei sollen Absolutwerte gemessen werden. Durch den Vergleich dieser unterschiedlichen Betone kann herausgefunden werden, ob die erwarteten Ergebnisse auch durch die Messungen bestätigt werden. Nicht zuletzt aufgrund dieser Vergleiche kann auf die Messgenauigkeit der Anlage rückgeschlossen werden.

Zusammenfassend gesehen ist das Ziel dieser Arbeit die bestehende Anlage zu verbessern, um zahlreiche weitere Untersuchungen über die Gaspermeabilität im Speziellen bei höheren Temperaturen zu ermöglichen.

2 Grundlagen

Unter Permeabilität versteht man die Eigenschaft von Festkörpern Fluide oder Gase passieren zu lassen. Voraussetzung dafür ist, dass die Poren des durchströmten Mediums mit der durchströmenden Flüssigkeit beziehungsweise Gas gesättigt sind und das Medium weder aufhalten noch bewegen können. Eine weitere wichtige Voraussetzung um ein Durchströmen eines Festkörpers möglich zu machen ist neben den vorhandenen Poren auch das Zusammenhängen derselben, sodass ein ganzes Porensystem zustande kommt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Permeabilität ausschließlich als Beschreibung des Transportvermögens eines Gases durch Festbeton verstanden. In diesem Zusammenhang spricht man von der sogenannten Gaspermeabilität des Betons.

Als Grundlage für die Weiterentwicklung der bestehenden Anlage sind folgende Kenntnisse erforderlich:

- Grundlagen von Beton
- physikalische Beschreibung der Permeabilität
- Kenntnisse über bestehende Messmethoden.

2.1 Beton

Die Grundlagen der Betontechnologie können als Voraussetzung für diese Arbeit als bekannt angenommen werden. Daher ist für die vorliegende Arbeit der bereits erstarrte Beton (Festbeton) nur unter zwei Gesichtspunkten zu betrachten:

- Porenverteilung im Festbeton
- Temperatureigenschaften von Beton.

2.1.1 Porenverteilung im Festbeton

Die Porosität des Betons ist ein wichtiges Qualitätskriterium für den Beton im Allgemeinen und in Hinblick auf die Permeabilität im Besonderen. Der Beton ist als Verbundsystem zwischen Zementstein und Zuschlag zu sehen. Der Beitrag des Zuschlages zur Permeabilität ist als relativ gering einzuschätzen. Einerseits aufgrund der geringen Porosität des einzelnen Zuschlagkornes und zum anderen wegen des fehlenden zusammenhängenden Porensystems. Anders verhält es sich da mit dem Zementstein. Dieses poröse, heterogene System aus Hydratationsprodukten, Wasser, Luft und unhydratisierten Zementkörnern liefert den größten Teil des Porenraumes abgesehen von etwaigen Rissen im Verbundsystem. Dieses Porensystem ist zusammenhängend und steht außerdem in dauernder Wechselwirkung mit der Umgebung. Die verschiedenen Arten von Poren im Zementstein unterscheiden sich teilweise stark in Entstehung und Auswirkung voneinander (*Schneider, /1/*).

Man unterscheidet grundsätzlich folgende Arten von Poren (*Reick, /9/*):

➤ Gelporen (\varnothing ca. 0,1 -10 nm)

Das physikalisch gebundene Anmachwasser, welches als Gelwasser bezeichnet wird, ist in Gelporen gespeichert. Da immer der gleiche Anteil Wasser in Gelwasser umgewandelt wird, lässt sich ihre Entstehung nicht vermeiden.

➤ Schrumpfporen (\varnothing ca. 10 nm)

Da die Reaktionsprodukte der Hydratation ein kleineres Volumen als die Ausgangsstoffe haben, kommt es zu Schrumpfvorgängen. Es bilden sich Schrumpfporen. Ihre Entstehung kann ebenfalls nicht vermieden werden.

➤ Kapillarporen (\varnothing 10 nm - 100 μ m)

Bei höheren W/B-Werten bleibt für die Hydratation nicht benötigtes Wasser im Beton zurück, welches mit der Zeit austrocknet und Kapillarporen hinterlässt. Ihr Gesamtvolumen ist durch die Wahl eines günstigen W/B-Werts jedoch steuerbar.

➤ Luftporen (\varnothing 1 μm - 1 mm)

Durch den Mischvorgang gelangt Luft in das Zementgel, sodass sich Luftporen bilden. Sie stellen einen Ausweichraum für gefrierendes Wasser dar und erhöhen somit die Frostbeständigkeit des Betons. Eine gezielte Beeinflussung des Anteils an Luftporen ist durch Luftporenbildner möglich.

➤ Verdichtungsporen ($\varnothing > 1$ mm)

Verdichtungsporen entstehen durch unzureichende Verdichtung des Betons nach dem Einbau. Aufgrund ihrer Größe haben sie einen hohen Einfluss auf die Festigkeit des Werkstoffs. Bei der Herstellung von Sichtbetonoberflächen sind Verdichtungsporen unerwünscht.

Gornik führt in seiner Arbeit (Gornik, /3/) folgende Grafik nach Rüsck auf, um die Volumenanteile der verschiedenen Porenarten in Abhängigkeit vom W/B-Wert zu verdeutlichen (Abbildung 2-1).

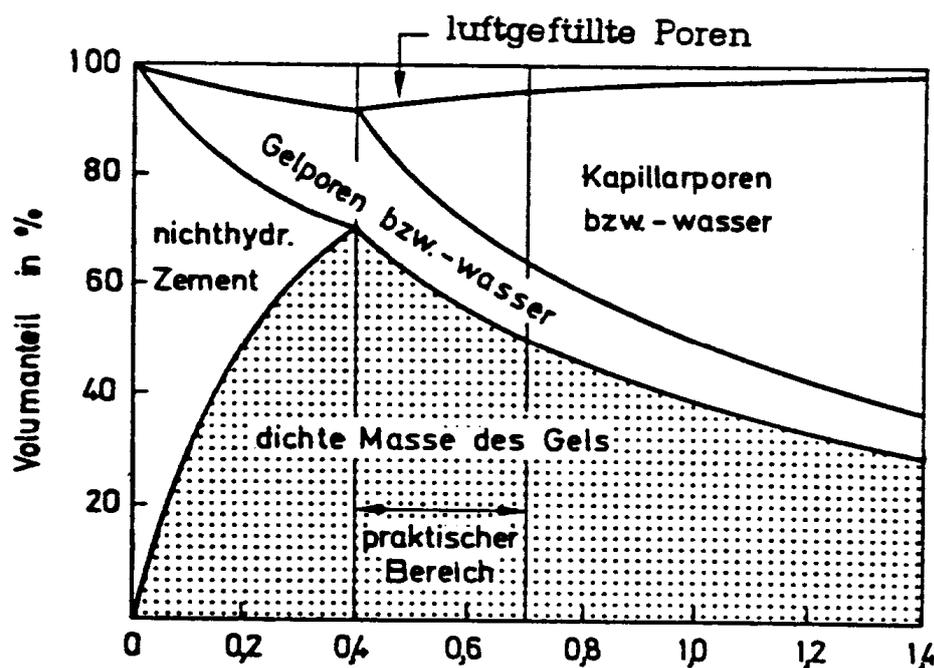


Abbildung 2-1: Anteil der Poren im Zementstein in Abhängigkeit vom W/Z-Wert nach beendeter Hydratation (nach Rüsck)

Beim Festbeton unterscheidet man von den oben genannten Poren hauptsächlich Kapillarporen und Luftporen beziehungsweise Verdichtungs-poren. Sind die Luftporen mit freiem Auge sichtbar, so sind die Kapillarporen weitaus kleiner.

Die Kapillarporen sind vorrangig für die Transportvorgänge im Festbeton verantwortlich. Sie entstehen, wie schon oben erwähnt durch das Verhältnis von Wasser zu Bindemittelgehalt (W/B-Wert) und können durch dieses auch gesteuert werden. Zur Erhärtung von Beton (vollständige Hydratation) ist eine verhältnismäßig geringe Wassermenge notwendig. So kann der Zement nur etwa eine Wassermenge von 40% seines Gewichtes binden. Davon sind 25% chemisch und 15% physikalisch gebunden. Diese 40% entsprechen einem Wasserzementwert (W/Z-Wert) von 0,40. Weist der Zementleim einen höheren Wasserzementwert auf, so bezeichnet man das Wasser, das nicht gebunden werden kann als Überschusswasser. Der Raum, den dieses Überschusswasser einnimmt, bildet ab etwa einem W/Z-Wert von 0,50 ein System feiner, mehr oder weniger zusammenhängender Poren, die Kapillarporen (*Reick, /7/*). Dieses System von Kapillarporen hat nicht nur einen großen Einfluss auf die Festigkeit des Zementsteins und damit auf den Beton sondern ermöglicht auch neben anderen Transportmechanismen die Permeabilität, insbesondere die Gaspermeabilität des Betons (Abbildung 2-2).

Aufgrund der Anforderungen an die Verarbeitbarkeit des Betons beim Einbau sind oftmals W/Z-Werte größer 0,4 nötig, was gegenläufig zur gewünschten Matrixausbildung ist (Abbildung 2-2).

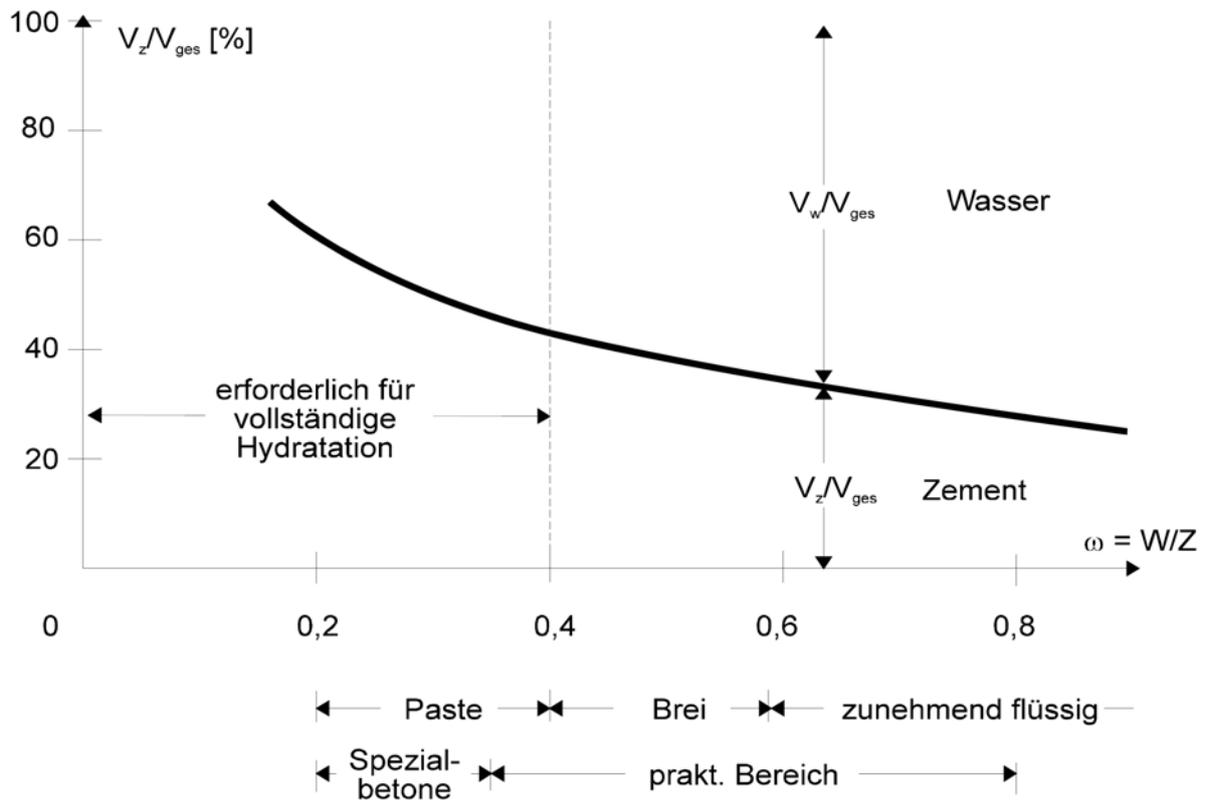


Abbildung 2-2: Verhältnis W/Z-Wert zum Volumen des Wassers und des Zements (Gornik, /3/)

Es ist aus dieser Sicht auch ein direkter Zusammenhang zwischen Porosität und Festigkeit des Betons zu erkennen.

2.1.2 Temperatureigenschaften von Beton

Allgemeine Eigenschaften von Beton bei höheren Temperaturen

Beton weist bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedliche Eigenschaften auf. Insbesondere verändern sich sein Elastizitätsmodul und seine Druckfestigkeit. Es finden aber auch thermomechanische Prozesse statt, die einen wesentlichen Einfluss auf zahlreiche Eigenschaften des Betons haben. Letztlich kommt es bei ausreichend hoher Temperatur zur Zerstörung des Gefüges.

Die Festigkeitseigenschaften und der E-Modul sind Grundsätzlich von der Zementart, dem W/B-Wert, der Porosität und vom Betonalter abhängig. Aus Abbildung 2-3 geht hervor, dass auch die Temperatur großen Einfluss auf die Betonfestigkeit hat.

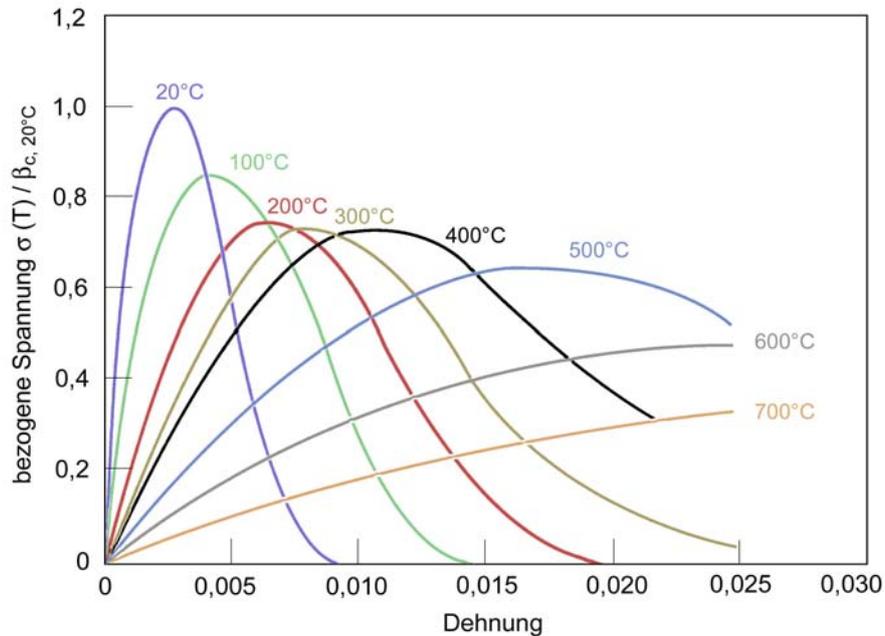


Abbildung 2-3: Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag (Schneider, /12/)

Ab 600°C nimmt die Druckfestigkeit deutlich ab. Bei ca. 1000°C geht die Druckfestigkeit des Betons gegen Null. Weiters ist zu beobachten, dass der E-Modul mit steigender Temperatur stark abnimmt und die Bruchdehnungen erheblich zunehmen. Die verwendete Zuschlagsart spielt keine wesentliche Rolle. Betone mit Kalksteinzuschlägen verhalten sich geringfügig besser als Betone mit Quarzzuschlägen. Jedoch beginnt bei ca. 800°C die Entsäuerung bei den Kalksteinzuschlägen. Das heißt die Zuschläge zersetzen sich und der Beton zerfällt (Schneider, /12/).

Die Abbildung 2-4 zeigt das Verhalten des E-Moduls von Normalbeton. Es erfolgen ein Rückgang der Elastizität und eine deutliche Zunahme der Verformungen schon bei geringer Temperaturzunahme. Weiters ist zu erkennen, dass druckbeanspruchte Bauteile bei Temperaturerhöhung länger ihre Steifigkeit behalten als unbelastete Bauteile. Die Druckspannungen wirken den temperaturbedingten Rissbildungen entgegen (Schneider, /12/).

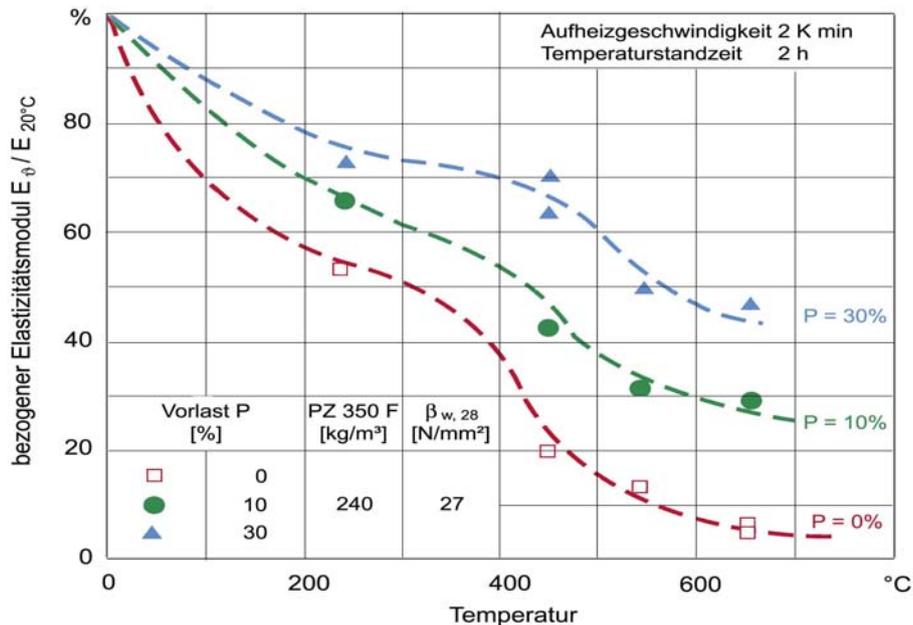


Abbildung 2-4: Bezogener Hochtemperaturolastizitätsmodul von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei verschiedenen Vorlasten nach Erhitzen (Schneider, /12/)

Die nennenswerten thermomechanischen Prozesse im Beton sind

- Thermische Spannungen
- Dehnungsunverträglichkeiten zwischen Zuschlag und Zementstein
- Zuschlagsumwandlungen.

Thermische Spannungen entstehen im Bereich der beheizten Oberfläche durch die Erwärmung des Betonkörpers und die daraus folgende thermische Dehnung. Dadurch kann es, bei der Überschreitung der Betonfestigkeit, zu Rissen kommen – wobei der Wasserdampfdruck im Inneren des Betons keine Rolle spielt. Dieser beeinflusst nur die Instabilität der äußeren Schicht in Folge zusätzlich gespeicherter thermischer Energie.

Gefügespannungen können in den Übergangszonen bei Erwärmung des Betonkörpers, durch Dehnungsunverträglichkeiten zwischen Zuschlag und Zementstein, entstehen. Während sich der Zuschlag mit steigender Temperatur ausdehnt, schrumpft der Zementstein in Folge der Trocknung und Dehydratation.

Die Zuschlagsumwandlungen werden im nächsten Abschnitt behandelt.

Allgemein ist noch zu sagen, dass Beton ein relativ schlechtes Wärmeleitvermögen aufweist. Dieses beläuft sich auf einen mittleren Wert bei Beton von $\lambda_{B,m} = 1,50 \text{ W/mK}$. Dieser Umstand ist auch bei der Durchführung der Versuche im Rahmen dieser Arbeit zu beachten gewesen.

Eigenschaften von Beton in Hinblick auf die Permeabilität

Um das Verhalten der Permeabilität bei höheren Temperaturen zu erklären sind auch chemische und physikalische Prozesse im Beton in den relevanten Temperaturbereichen zu betrachten.

U. Schneider nennt in seiner Abhandlung über die ‚Permeabilität und Porosität von Beton bei hohen Temperaturen‘ (Schneider, /1/) folgende vier charakteristische Änderungen eines feuchten porösen Systems beim Übergang zu einem höheren Temperaturzustand:

- Die Veränderung des Phasenbestandes, des Phasengleichgewichts und der Verteilung von flüssigen Phasen im System, beispielsweise die Entwässerung poröser Baustoffe bei Temperaturen über 100°C.
- Die Änderung des für einen Transport maßgeblichen Porenraumes beziehungsweise Porenstruktur infolge Entleerung von wassergefüllten Kapillarporen und Desorption.
- Die Änderung des Porenraumes und der Porenstruktur infolge von Phasenübergängen der die feststoffphaseaufbauenden Komponenten, wie beispielsweise Dehydratation, Umkristallisation oder Zersetzung.
- Die Änderung des Porenraumes und der Porenstruktur durch Rissbildung infolge von thermischen Inkompatibilitäten der die Feststoffphase aufbauenden Komponenten, wie beispielsweise Zementstein und Zuschlag beziehungsweise infolge von thermischer Zersetzung der Bindemittelkomponente, wie beispielsweise der C-S-H-Phase.

Das Porensystem verändert seine Struktur schon bei geringen Temperaturerhöhungen, da parallel zum physikalisch gebundenen Wasser auch Zwischenschicht- und Hydratwasser schwach gebundener Phasen bereits in diesem Stadium der Erhitzung abgegeben wird. Diese Entwässerung findet ab etwa 100°C statt.

Die Volumenänderung aufgrund der Entleerung der wassergefüllten Kapillarporen hat nicht unerheblichen Einfluss auf die Transporteigenschaften des Betons. So werden aufgrund der Verdampfung des ungebundenen Wassers in den Poren neue Kanäle im Porensystem ermöglicht.

Die Phasenübergänge, hervorgerufen durch die Erhitzung des Gefüges treten erst bei höheren Temperaturen auf. Unterhalb findet zwischen 20 und 70°C ein Gelabbau statt. Der Zerfall elementarer Hydratationsprodukte findet erst oberhalb von 450°C statt. Der Portlandit zersetzt sich zwischen 450 und 550°C. Die Zersetzung der C-S-H-Phasen und Bildung von β -C₂S setzt erst bei 650 - 900°C ein. Die Zersetzung von Calcit findet bei 800-900°C statt. Oberhalb von etwa 850°C finden bereits Sintervorgänge statt (*Reick, /7/*).

Schneider hat die Umsetzungen in einer Tabelle zusammengefasst (Schneider, /1/):

Tabelle 2-1: Hydratphasen des Zementsteins und ihre Phasenübergänge innerhalb eines Umsetzungsbereiches

<i>Hydrattyp</i>	<i>Umsetzung</i>	<i>Umsetzungsbereich [°C]</i>
Ettringit	Halbhydrat	110 – 120
Tobermorit-Gel	β -C ₂ S	20 – 70
14A-Tobermorit	11A-Tobermorit	55 - 60
11A-Tobermorit	9A-Tobermorit	100 – 300
Afwillit	γ -C ₂ S	275 – 285
α -C ₂ S-Hydrat	β -C ₂ S	400 – 450
C ₃ SH	γ -C ₂ S + CaO	420 – 550
Portlandit	CaO	450 – 550
Opal	Tiefquarz + H ₂ O	< 573
	Hochquarz + H ₂ O	> 573
Phase γ	β -C ₂ S	640 – 700
γ -C ₂ SH	nicht genau bekannt	650 – 700
Xonotlit	β -C ₂ S	680 – 700
9A-Tobermorit	β -C ₂ S	300 – 800
C-S-H (I)	β -C ₂ S	120 - 500
C-S-H (II)	β -C ₂ S	650 – 900
Calcit	CaO	800 - 900

Neben den chemischen Reaktionen infolge Temperatureinfluss finden auch physikalische Prozesse statt. Die mechanische Rissbildung aufgrund der unterschiedlichen thermischen Dehnungen von Zementstein und Zuschlagstoffen tragen maßgeblich zur Auflockerung und auch Zerstörung des Verbundes zwischen Zementstein und Zuschlagstoffen bei. Die Ursache hierzu liegt hauptsächlich darin, dass der Zementstein im Bereich zwischen 300 und 1000°C um bis zu 3% schrumpft, der Zuschlag sich hingegen um bis zu 1,5% ausdehnt. Diese Eigenschaft ist jedoch hauptsächlich von der Zuschlagsart abhängig. So ist die Dehnung beispielsweise bei Kies- oder Normalbeton größer als bei Kalksteinbeton und bei diesem

wiederum größer als bei Basaltbeton. Bei gleicher Druckfestigkeit ist also die Ausbildung eines Rissystems bei Kiesbeton deutlich höher als bei Basaltbeton.

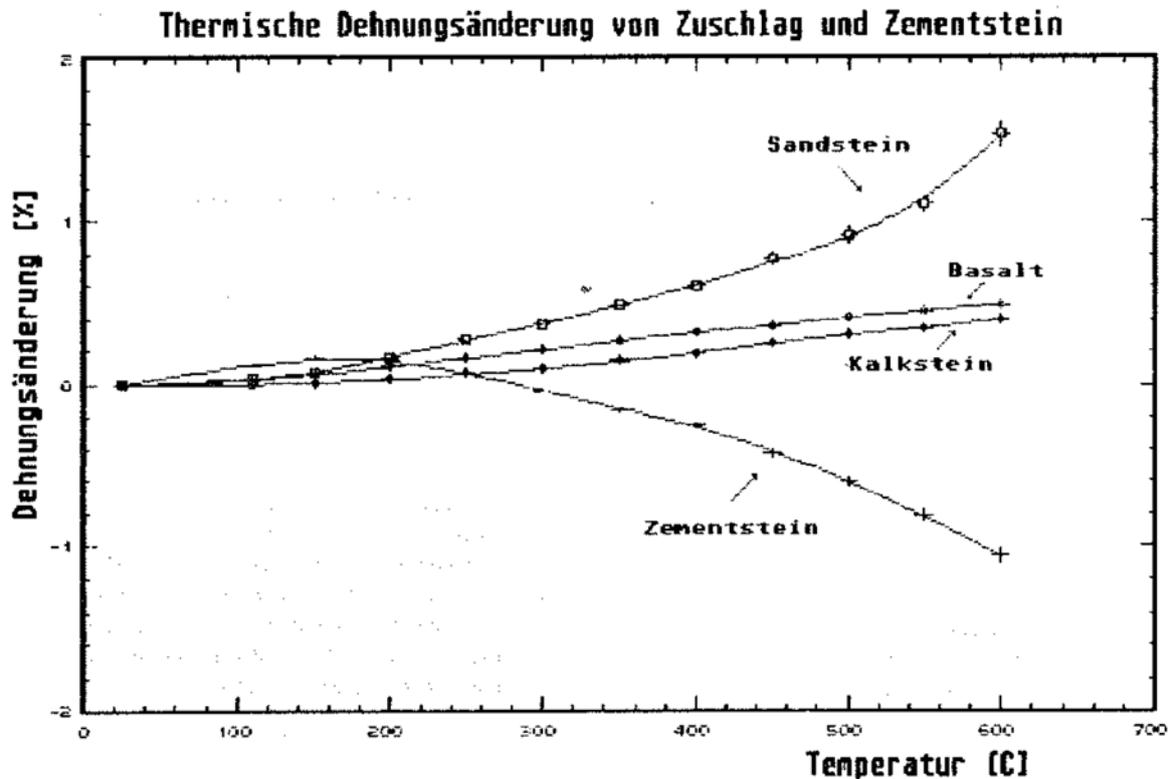


Abbildung 2-5: Thermische Dehnung in Abhängigkeit der Temperatur bei verschiedenen Zuschlagsarten und als Vergleich bei Zementstein (Schneider, /1/)

Zusammenfassend kann man also sagen, dass im niederen Temperaturbereich die Vergrößerung der Porosität durch dehydrierende (entfeuchtende) und dehydratisierende (zersetzende) Reaktionen bedingt ist, bei höheren Temperaturen hingegen die Rissbildung maßgeblich wird. Es ist also nicht nur das poröse System des Zementsteins für die Permeabilität ausschlaggebend, sondern auch ein Rissystem welches aus rein physikalischen Gründen aufgrund des Verbundsystems Beton entstanden ist.

2.1.3 Permeabilität bei Normaltemperatur

In der Literatur finden sich zahlreiche Werte über die Luftpermeabilität bei Raumtemperatur ($\sim 20^\circ\text{C}$). Als grober Richtwert gilt generell bei Normalbeton und einem W/Z-Wert von 0,5 eine Luftpermeabilität von 10^{-15} - 10^{-17} m^2 .

So geht *Schneider* in seiner Veröffentlichung über die Permeabilität von Werten bei Normaltemperatur von 10^{-15} – 10^{-16} m^2 aus (*Schneider*, /1/, Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3). Beachtet werden muss, dass hier ein Beton B25 (entspricht C25/30), sowie ein B35 (entspricht C35/45) untersucht wurde und die Werte in Abhängigkeit vom W/Z-Wert und der Zuschlagsart unterschieden werden.

Tabelle 2-2: Permeabilitätswerte für B35 – Betone bei $T = 20^\circ\text{C}$ ($\Delta p = 1\text{bar}$) (*Schneider*; /1/)

Mischung	Zementart	Zuschlagsart	W/Z-Wert	Permeabilitätskoeffizient [m^2] $\times 10^{-16}$
1	PZ 35F	Kies 0/8	0,5	5,0
2	PZ 35F	Basalt 2/8	0,5	20,0
5	PZ 35F	Kalkstein 2/8	0,5	15,0
7	HOZ 45	Basalt 8/16	0,54	0,5

Tabelle 2-3: Permeabilitätswerte für B25 – Betone bei $T = 20^\circ\text{C}$ ($\Delta p = 1\text{bar}$) (*Schneider*; /1/)

Mischung	Zementart	Zuschlagsart	W/Z-Wert	Permeabilitätskoeffizient [m^2] $\times 10^{-16}$
2	PZ 35F	Kies 0/8	0,7	35,0
4	PZ 35F	Basalt 2/8	0,75	100,0
6	PZ 35F	Kalkstein 2/8	0,75	110,0

F. Jacobs schreibt in seinem Bericht über die Luftpermeabilität als Kenngröße für die Qualität des Überdeckungsbetons von Betonbauwerken (Jacobs, /4/) von Werten um 10^{-16}m^2 (Tabelle 2-4). Er nennt hier Richtwerte von Überdeckungsbetonen bei geschalten Flächen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Expositionsklassen.

Tabelle 2-4: Vorgeschlagene Richtwerte für die maximale Luftpermeabilität von geschalten Flächen in Abhängigkeit der Expositionsklassen (Jacobs, /4/)

Expositionsklassen	Max W/Z-Wert [-]	Luftpermeabilität	
		Maximalwert	Geometr. Mittelwert. bei $\sigma = 0,4$
		[10^{-16}m^2]	
XC1, XC2	0,65	1,00	0,40
XC3	0,6	0,60	0,24
XC4, XD1 – XD2, XF1 – XF3	0,5	0,40	0,16
XD3, XF4	0,45	0,20	0,08

Im Cementbulletin 68 (Hermann, /6/) wird von einer Luftpermeabilität bei Normalbeton unter Normaltemperatur von 10^{-17} ausgegangen (Tabelle 2-5). Hier wird wiederum der Einfluss des W/Z-Wertes auf die Gaspermeabilität untersucht. Die hier ermittelte Gaspermeabilität bei Normalbeton liegt um etwa eine Zehnerpotenz unter den zwei oben zitierten Werten aus der Literatur (Schneider, /1/).

Eine Erklärung für die gefundenen Unterschiede konnte nicht gefunden werden. Es wird jedoch vermutet, dass die Cembureau-Methode aufgrund der beidseitigen porösen Plexiglasabdeckung der Prüfflächen der Proben prinzipiell niedrigere Permeabilitäten ergeben als ohne die Plexiglasabdeckungen.

Tabelle 2-5: Einfluss des W/Z-Wertes auf die Gaspermeabilität (Hermann, /6/)

	Matrixvolumen [%]	Gaspermeabilität k [m ²]x10 ⁻¹⁷ bei W/Z-Wert von			
		0,40	0,50	0,60	0,70
Zementstein	100	97,0	220,0	260,0	340,0
Mörtel	46	2,2	3,3	31,0	33,0
Normalbeton	32	1,9	2,1	6,4	15,0

Gornik hat in seiner Arbeit über den Einfluss der Temperatur auf die Permeabilität von Beton bei seinen Versuchen zum Normalbeton (XC3) auf der Anlage, die im Rahmen dieser Arbeit modifiziert und verbessert wurde, bei Raumtemperatur Werte für den Permeabilitätskoeffizienten k von 10^{-16} m² ermittelt (Gornik, /3/).

2.2 Physikalische Grundlagen der Permeabilität

2.2.1 Herleitung der Formel über die Permeabilität

Um die Permeabilität physikalisch zu erfassen, ist die Strömungsmechanik zu bemühen. Das aus der Strömungsmechanik bekannte Darcy'sche Gesetz in seiner ursprünglichen Form beschreibt diesen Vorgang für inkompressible Flüssigkeiten:

$$\dot{V} = -\frac{k \cdot A}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \quad \dots dp \text{ negativ}$$

Berücksichtigt man, dass $m = \rho \cdot V$ und daher auch $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$ ist, dann folgt:

$$\frac{\dot{m}}{\rho} = -\frac{k \cdot A}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx}$$

oder explizit nach k :

$$k = -\frac{\dot{m} \cdot \eta}{A \cdot \rho} \cdot \frac{dx}{dp}$$

Handelt es sich beim durchströmenden Medium nicht um eine inkompressible Flüssigkeit, sondern um ein Gas ist die Formel zu adaptieren. Für die Gaspermeabilität ist die Dichte ρ über das spezifische Gasgesetz zu definieren und zu ersetzen:

$$R = \frac{R_0}{M_r} = \frac{p \cdot v}{T} = \frac{p}{\rho \cdot T}$$

Oder explizit nach ρ :

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

Was infolge dann für k ergibt:

$$k = \frac{\dot{m} \cdot \eta}{A} \cdot \frac{R \cdot T}{p} \cdot \frac{dx}{dp}$$

Integriert man nun über den Weg, den das Gas durch die Probe zurücklegt beziehungsweise über den Druckunterschied

$$\int_0^l \dot{m} \cdot \eta \cdot R \cdot T \cdot dx = \int_{p_1}^{p_2} k \cdot A \cdot p \cdot dp,$$

wobei davon ausgegangen wird, dass $T = const.$ (stationärer Fall) und $\eta = const.$ ist, dann folgt:

$$\dot{m}_2 \cdot \eta \cdot l \cdot R \cdot T = k \cdot A \cdot \frac{(p_1^2 - p_2^2)}{2}.$$

Setzt man nun $\dot{m} \cdot R \cdot T = p \cdot \dot{V}$ und stellt wiederum k explizit dar, gelangt man zu:

$$k = \frac{\dot{V}_2 \cdot p_2 \cdot l}{A} \cdot \eta \cdot \frac{2}{(p_1^2 - p_2^2)}.$$

Setzt man noch $\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$ und $\frac{\eta}{\rho} = \nu$, wobei ν als die kinematische Zähigkeit definiert ist,

dann folgt für die Permeabilität:

$$k = \frac{\dot{m}_2 \cdot l}{A} \cdot \nu \cdot \frac{2p_2}{p_1^2 - p_2^2}.$$

Mit dieser Formel lässt sich die Permeabilität für die hier verwendete Versuchsanlage und deren Anordnung der Messeinrichtungen auswerten (Abbildung 2-6).

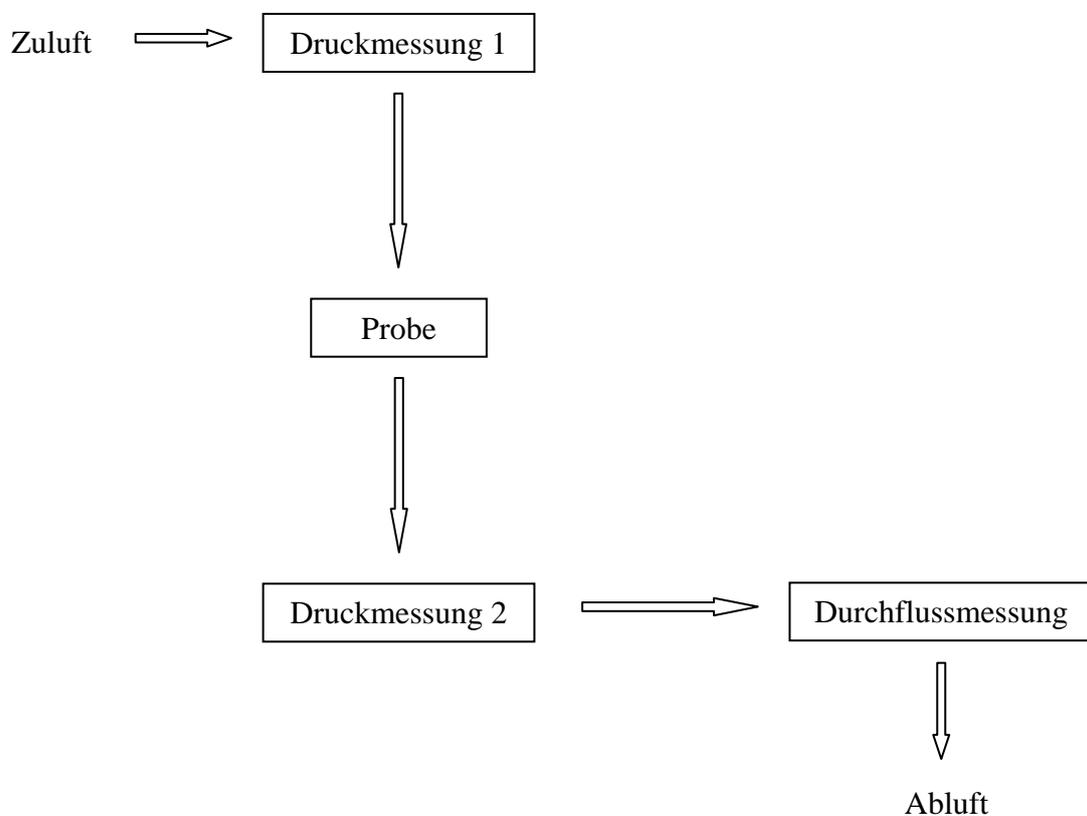


Abbildung 2-6: Ablaufschema des Luftstroms und Anordnung der Messapparaturen

Würde die Anordnung der Messeinrichtungen verändert werden, beispielsweise der Durchfluss des Mediums wird vor der Probe gemessen, müsste die Formel dahingehend adaptiert werden.

Augenmerk ist darauf zu legen, dass bei der Messung des Druckes in ‚bar‘ oder ‚bara‘ unterschieden wird. ‚Bar‘ bezeichnet den Druck über dem herrschenden, relativen atmosphärischen Druck, ‚bara‘ (in der Literatur auch oft ‚bar(a)‘ geschrieben) hingegen den absoluten Druck.

2.2.2 Normierung der Messergebnisse

Um die gemessenen Werte der Permeabilität von unterschiedlichen Messmethoden und unter unterschiedlichen Druckverhältnissen miteinander vergleichen zu können, sind die Ergebnisse zu normieren. Im Zuge dieser Diplomarbeit wird sowohl auf die Normierung an sich als auch auf eine tiefere Betrachtung der Ansätze verzichtet, da hier nur die Werte von ein und derselben Messapparatur verglichen werden und die theoretischen Ansätze nicht Gegenstand dieser Arbeit sein sollen.

Für diese Normierung gibt es zwei nennenswerte Ansätze. Den Ansatz von *Klinkenberg*, der verbreiteter ist und der Ansatz nach *Carman* und *Kozeny*. Diese zwei Zugänge unterscheiden sich insofern grundlegend voneinander, als der Ansatz von *Klinkenberg* auf der Grenzschichttheorie (Slip-Theory)¹ basiert und teilweise in der Fachwelt nicht unumstritten ist. Der Ansatz von *Carman* und *Kozeny* basiert hingegen auf dem Anteil der Molekulardiffusion, welche einen theoretisch einwandfreien Hintergrund hat, basiert.

Beide Ansätze gehen davon aus, dass zum tatsächlichen (viskosen) Massentransport noch der nicht-viskose hinzukommt, oder anders ausgedrückt, dass der gemessene Wert um den nicht-viskosen Anteil reduziert werden muss, um einen normierten und damit vergleichbaren Permeabilitätskoeffizienten zu erlangen.

¹ Die Grenzschichttheorie besagt, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Oberfläche einer ruhenden Wand (Kapillare) nur Einfluss auf die wandnahe Grenzschicht, nicht aber auf die Potentialströmung des strömenden Mediums in weiter entfernten Schichten hat.

Ansatz nach Klinkenberg

Klinkenberg schreibt von einem normierten Permeabilitätskoeffizienten (k_{int}), der entsteht wenn der gemessene Koeffizient k_A mit dem Klinkenberg-Faktor β_K multipliziert und durch den gemittelten Druck (p_m) dividiert und letztlich zu dem gemessenen Koeffizienten hinzugezählt wird. Als Formel ausgedrückt:

$$k_{app} = k_{int} \cdot \left(1 + \frac{\beta_K}{P_m} \right),$$

wobei k_{app} der gemessene Permeabilitätskoeffizient aus dem Versuch und k_{int} (*int.* = Abk. f. *intrinsic* (engl.) eigentlich, wirklich, wahr) der normierte Koeffizient für $P_m = \infty$ ist.

β_K ist der sogenannte Klinkenberg-Faktor in [Pa]. $P_m [Pa] = \frac{P_1 + P_2}{2}$, wobei P_1 der Eingangs- und P_2 der Ausgangsdruck, also vor und nach dem Prüfkörper ist. Graphisch ist dies folgendermaßen darzustellen (Abbildung 2-7):

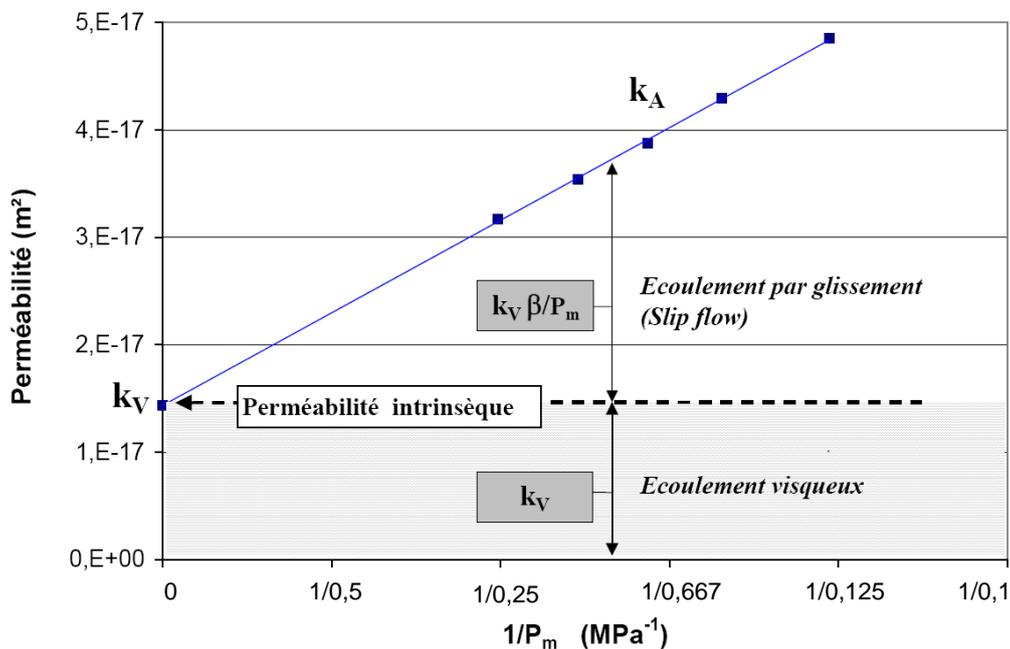


Abbildung 2-7: Zusammenhang zwischen k_{app} mit k_{int} nach Klinkenberg (Picandet, /11/)

In der Grafik wird k_{app} mit k_A bezeichnet und k_v stellt k_{int} dar.

Ansatz nach Carman und Kozeny

Nach *Carman* und *Kozeny* wird in diesem Ansatz die Molekulardiffusion (Kondensdiffusion) in den Gelporen berücksichtigt. In der Grundgleichung (*Karman-Kozeny-Gleichung*) ist der

Massenfluss $m \left[\frac{kg}{m^2 s} \right]$ mit der Länge $l [m]$ des Strömungsweges durch die Probe, der

Druckdifferenz $\Delta P [Pa]$ und in komplexer Weise mit geometrischen Größen (Porenstruktur der Probe) und physikalischen Parametern (Eigenschaften des Gases) verknüpft. Auf eine nähere Erläuterung wird in dieser Arbeit jedoch verzichtet.

2.3 Bestehende Messmethoden

Zur Ermittlung der Permeabilität bei Normalbedingungen insbesondere bei Raumtemperatur gibt es mehrere Messmethoden, die auch in der Fachwelt anerkannt und in der Praxis angewendet werden. Man unterscheidet zum einen zwischen Methoden zur Messung vor Ort und solchen im Labor und weiter bei den Prüfmethode vor Ort in zerstörungsfreie Methoden und solche, die den Prüfkörper nicht beschädigen. Für alle Messmethoden unter Normalbedingung gilt, dass die Feuchtigkeit der Probe einen maßgeblichen Einfluss auf die Messergebnisse hat. So steigt die Durchlässigkeit des Betons bei sinkendem Feuchtegehalt.

2.3.1 Messmethoden bei Raumtemperatur

Die *Cembureau-Methode* zählt zu den Standard-Laborverfahren (Abbildung 2-8). Es ist hierfür ein zylindrischer Prüfkörper mit einem Durchmesser von 150mm und einer Höhe von 50mm hergestellt.

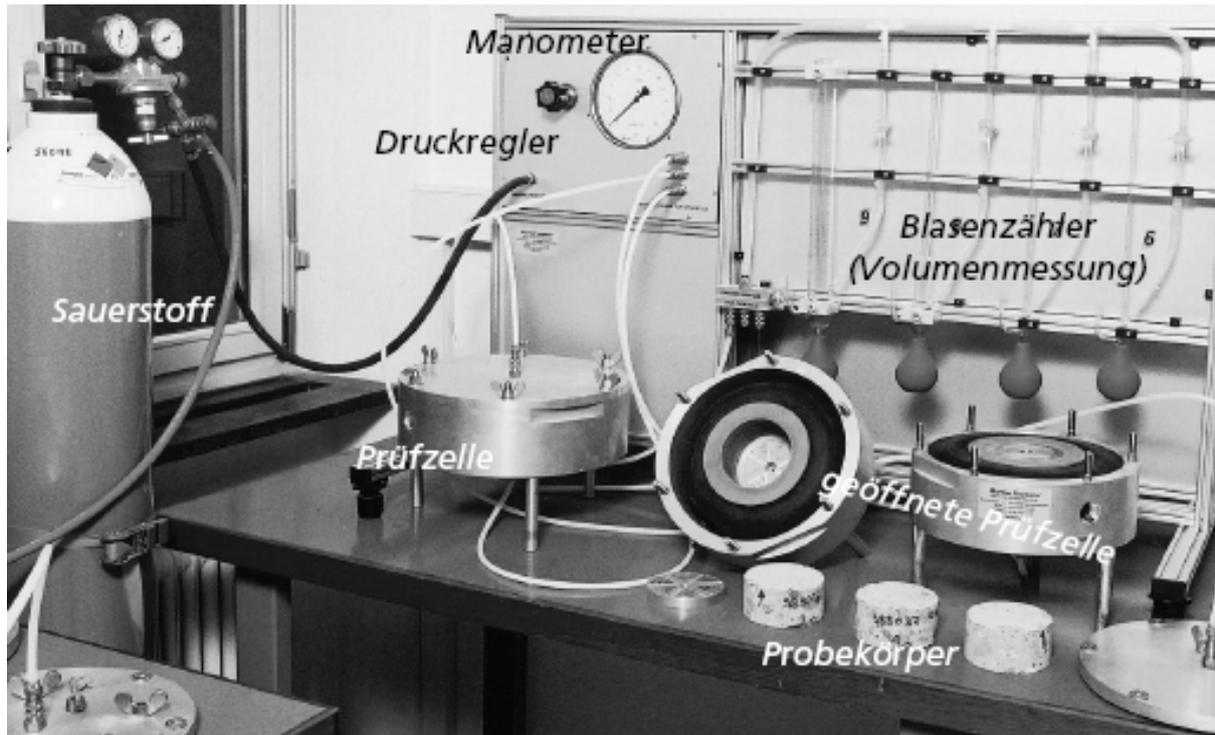


Abbildung 2-8 Prüfanordnung nach der Cembureau-Methode (Quelle, /6/)

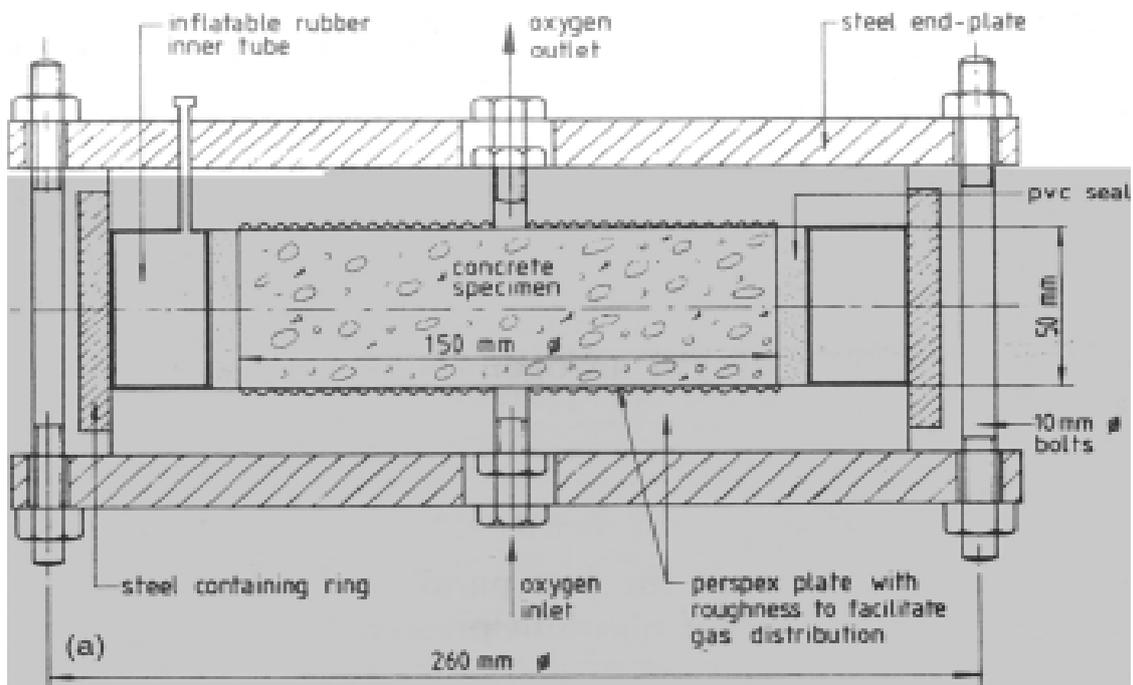


Abbildung 2-9: Schema der Prüfzelle der Cembureau-Methode (Quelle, /10/)

In einer Prüfwelle, die eine vollständige Abdichtung der Mantelflächen erlaubt, wird der zylindrische Probekörper einseitig mit Gas unter erhöhtem Druck (bis zu 3,5bar) belastet. Auf der gegenüberliegenden Seite wird das Volumen des durchströmenden Gases gemessen.

Die Formel zur Auswertung der einzelnen Messergebnisse lautet:

$$k = \eta \frac{2 Q p_0 l}{A (p^2 - p_0^2)} \text{ [m}^2\text{]}. \text{ Sie ist ident mit der in Abschnitt 2.2.1 hergeleiteten Gleichung.}$$

Der *Torrent-Permeability-Tester* (Zweikammer-Vakuum-Tester) ist ein Testgerät zur Ermittlung der Luftpermeabilität am bestehenden Bauwerk vor Ort durch eine zerstörungsfreie Methode (Abbildung 2-10).

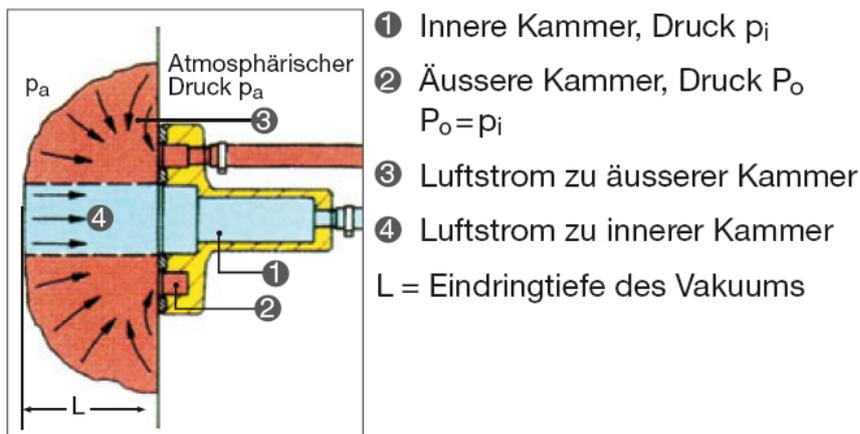


Abbildung 2-10 Torrent-Permeability-Tester (Quelle: /15/)

Der Tester besteht aus einer Prüfkammer und einem diese Kammer umgebenden Schutzring zur Abdichtung. Die Prüfkammer ist zur Probe hin geöffnet. In der Kammer wird 10 – 15mbar Unterdruck erzeugt. Durch diesen Unterdruck wird nun durch den Beton die Umgebungsluft angesaugt und die Druckänderung in der Kammer vom Zeitpunkt der Beendigung der Evakuierung wird gemessen.

In Zusammenhang mit anderen Kenngrößen und der zeitlichen Druckänderung wird die Luftpermeabilität ermittelt.

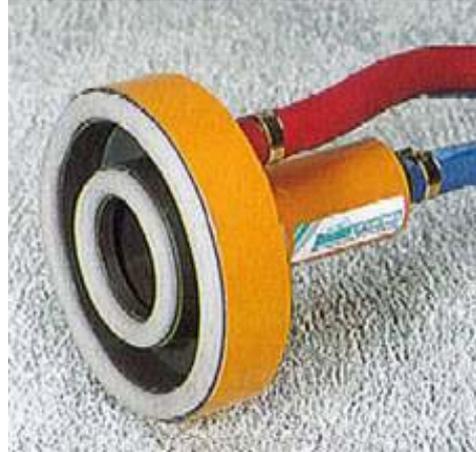
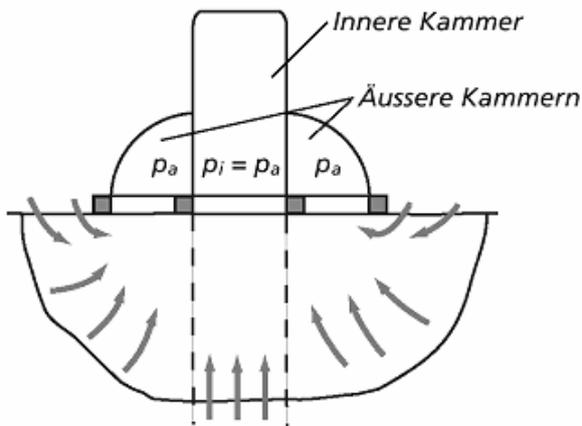


Abbildung 2-11: Torrent-Permeability-Tester, schematisch und Ansicht (Quelle: /18/)

Mit folgender Formel wird der Permeabilitätskoeffizient ermittelt:

$$K_T = \left(\frac{V_c}{A} \right) \cdot \frac{\mu}{2 \varepsilon P_a} \cdot \left[\frac{\ln \left(\frac{P_a + \Delta P_t}{P_a - \Delta P_t} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2$$

- K_T = Permeabilitätskoeffizient
- V_c = Vol. der inneren Kammer + Schlauch
- A = Querschnittsfläche der inneren Kammer
- μ = Viskosität der Luft
- ε = Porosität des Betons
- P_a = Umgebungsdruck
- ΔP_t = Druckdifferenz am Ende der Messung
- t_0 = 60 sec
- t = Zeit am Ende der Messung.

Aufgrund des Umstandes, dass es sich hierbei um einen normierten Vorgang handelt, ist die Ermittlung relativ einfach und rasch durchzuführen.

Zu den Permeabilitätsmessmethoden, die nicht zerstörungsfrei arbeiten zählt auch die Bohrlochmethode. Hierbei wird ein Bohrloch mit einem Überdruck von bis zu 11bar beaufschlagt (Abbildung 2-12: Bohrlochmethode (Quelle: /6/)). Die Zeitintervalle des Druckabfalls werden gemessen. Über die Druckabnahmezeit, Geometrie des Bohrloches und weiterer Annahmen wird auf die Gaspermeabilität geschlossen.

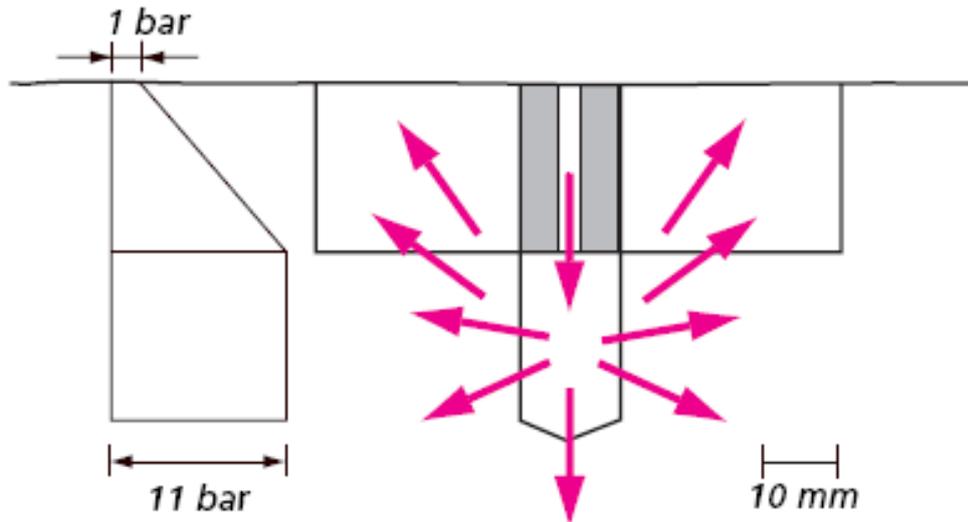


Abbildung 2-12: Bohrlochmethode (Quelle: /6/)

2.3.2 Messmethoden bei höheren Temperaturen

Die Messung der Permeabilität bei höheren Temperaturen ist noch nicht so weit erforscht, wie bei Normalbedingung. Die große Herausforderung besteht hierbei darin, dass die Probe erhitzt und gleichzeitig gemessen werden muss. Weiters muss versucht werden eine weitgehend laminare Strömung zu erreichen.

In der Veröffentlichung von *U. Schneider* und *H. J. Herbst* aus dem Jahr 1989 über die ‚Permeabilität und Porosität von Beton bei hohen Temperaturen‘ (*Schneider*, p.21ff, /2/) im deutschen Ausschuss für Stahlbeton wird eine Anlage beschrieben.

Der Probekörper besteht aus einem hohlen Zylinder, dessen Hohlraum mit Druckluft beaufschlagt wird. Die Stirnflächen sind soweit abgedichtet, dass über diese kein Gas entweichen kann. So entweicht die Luft nur radial über die Mantelfläche des Zylinders. Über

einen vorgeschalteten Feindruckregler und die Temperatursteuerung des Ofens werden die Eingangsparameter festgelegt. Der Durchfluss als Ausgangsparameter wird mit einem vorgeschalteten Durchflussmessgerät bestimmt.

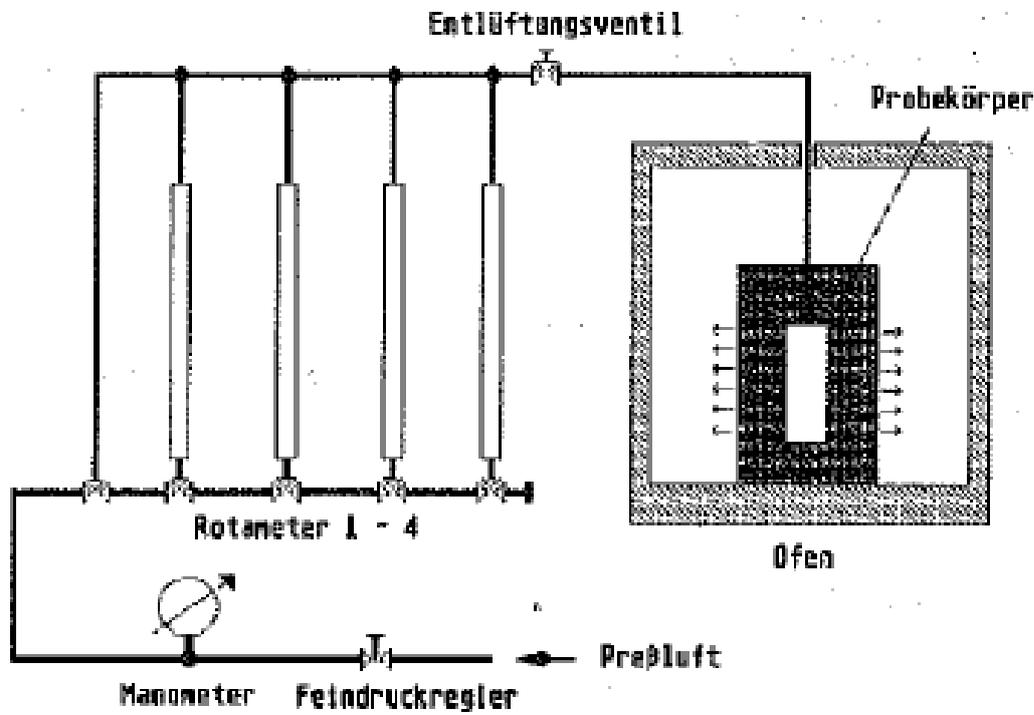


Abbildung 2-13: Versuchsschema (Quelle: /2/)

In der Diplomarbeit ‚Experimental investigation of concrete subjected to fire loading: micromechanical approach for determination of the permeability‘ von *David Leithner* (*Leithner*, p.9ff, /2/) wird eine weitere Messeinrichtung beschrieben, die am Institut für Festigkeitslehre an der TU Wien entwickelt wurde. Bei dieser wird erst eine zylindrische Probe auf die gewünschte Temperatur erhitzt und dann abgekühlt. In Folge wird die Probe auf einem Stahlring fixiert und mit Silikon oder Acryl abgedichtet. Dann die Probe samt Ring in eine Druckkammer so eingebaut, dass die Unterseite ins Freie zeigt. Wird die Kammer mit Druck beaufschlagt, wird das Gas die Probe durchströmen (Abbildung 2-14).

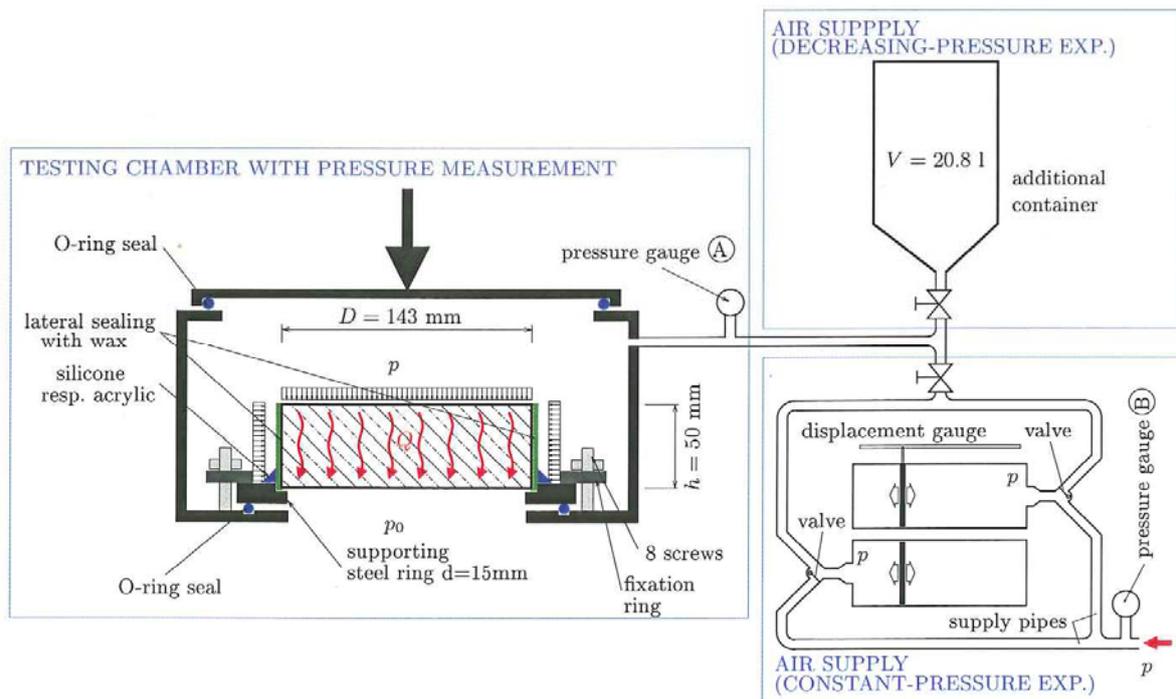


Abbildung 2-14: Versuchsschema (Leithner; /2/)

Hier wird dann zwischen zwei Arten der Messungen unterschieden:

- Bei der Messung mit konstantem Druck wird mit zwei gegenläufigen Pumpen ein konstanter Druck hergestellt. Stellt sich ein konstanter Luftstrom ein, kann über den Druck im System und die Förderleistung der Pumpe auf die Permeabilität rückgeschlossen werden.
- Die zweite Messmethode wird als Messung mit abnehmendem Druck bezeichnet. Hier wird mittels eines weiteren Druckbehälters mit einer bekannten Menge des Mediums das gesamte System mit der Druckkammer kurzgeschlossen und dadurch die gesamte Anlage mit bekannter Menge unter Druck gesetzt. Durch die Abnahme des Drucks in Zusammenhang mit der Zeit kann so ebenfalls die Permeabilität errechnet werden. Diese Methode ist nur für Proben mit geringer Permeabilität geeignet.

Auch hier wird eine Variante der in Abschnitt 2.2.1 hergeleiteten Formel über die Permeabilität zur Auswertung der Messwerte herangezogen. Aufgrund der beiden

Messmethoden (konstanter und abnehmender Druck) sind auch die Auswertungen dahingehend adaptiert:

$$k = \frac{2 \eta h}{A (p_t^2 - p_b^2)} Q_t p_t \text{ für die Messung mit konstantem Druck und}$$

$$k = \frac{2 h \eta}{A (\bar{p}_t^2 - \bar{p}_b^2)} Q_t \bar{p}_t \text{ für die Messung mit abnehmendem Druck.}$$

Die Indices ,t' und ,b' bedeuten ,top' für den gemessenen Druck vor der Probe und ,bottom' für den ermittelten Druck nach der Probe. ,h' beschreibt die Probenhöhe, ,Q' die Durchflussrate des Gases und ,A' die durchströmte Fläche der Probe.

Die bei diesen Versuchen erhaltenen Werte für die Permeabilität geben allerdings nur ,Restwerte' der Permeabilität nach der Erwärmung und Abkühlung an. Sie unterscheiden sich also von den Werten, die im Moment des herrschenden höheren Temperaturniveaus erreicht werden.

2.3.3 Verwendete Messmethode und Beschreibung der Anlage

Die Prüfanlage, die für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, ist am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU Wien gebaut worden. Ziel dieser Arbeit war es diese Anlage weiterzuentwickeln und zu verbessern (Abbildung 2-15).



Abbildung 2-15: Messanlage zur Bestimmung der Permeabilität unter Temperaturbelastung

Die Prüfvorrichtung sieht vor, dass der Frischbeton in einen metallischen Probenring eingebracht und nach Erhärten in einen Druckkolben eingespannt wird. Der Druckkolben ist so situiert, dass sich die Probe in einem Ofen befindet und so erhitzt werden kann. Durch eine Bohrung im Druckkolben wird die Oberseite des Probekörpers mit Luft belastet. Auf der Unterseite wird das durchströmende Gas wieder über eine Bohrung im Druckkolben abgeführt. Die zugeführte Luft wird über einen Filterregler dosiert. Über einen Messsensor wird der Differenzdruck vor und nach der Probe ermittelt. Nach der Probe wird der Durchfluss gemessen. Auf diese Weise wird nur die Menge des durchströmenden Mediums

ermittelt, die auch tatsächlich die Probe passiert hat. Sollte die Anlage also im oberen Bereich der Anlage undicht sein, so werden die Ergebnisse nicht maßgeblich verfälscht. Nachstehendes Schema soll das Prinzip noch verdeutlichen (Abbildung 2-16).

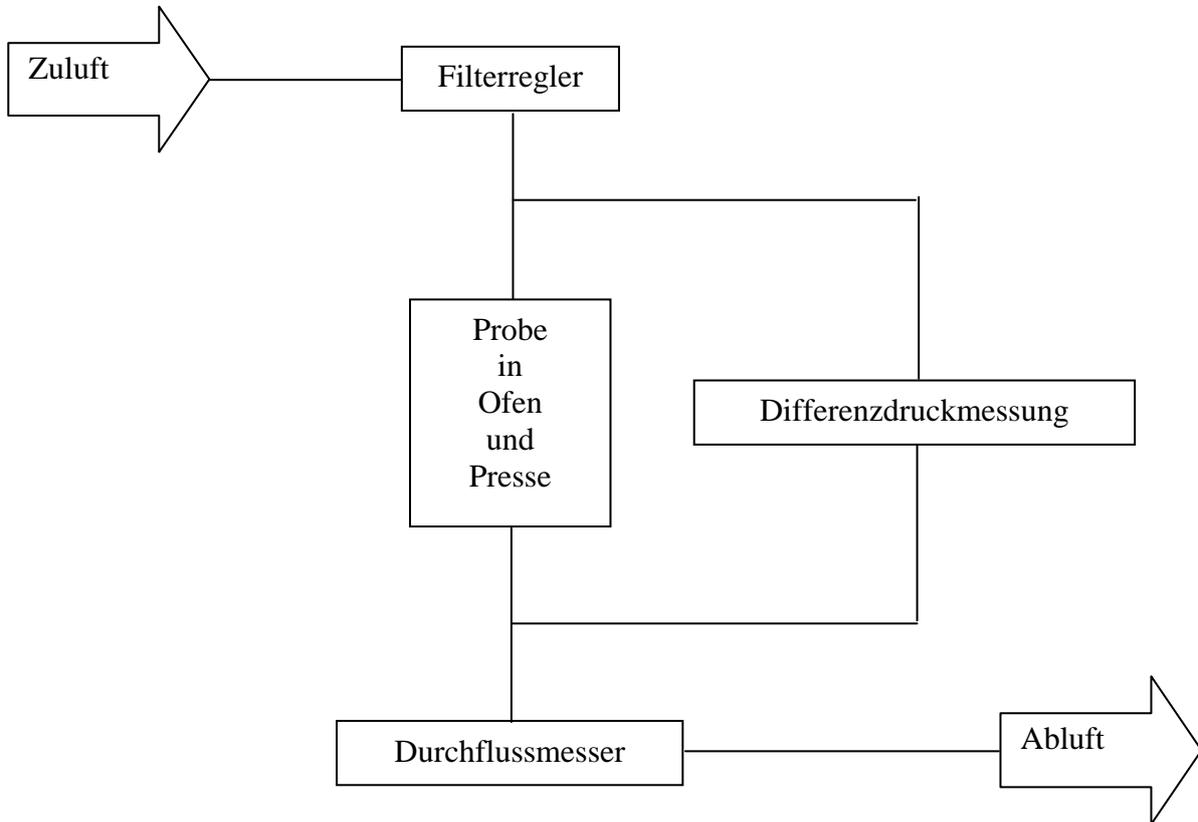


Abbildung 2-16: Schema Versuchsanlage

Die Anlage besteht im Wesentlichen aus folgenden Teilen:

- Elektroofen
- Presse
- Probenhalterung und Probenring
- Druckluftversorgung (der Anschluss von Gasen wäre jederzeit möglich)
- Differenzdruckmesser
- Durchflussmesser (Strömungsmesser) mit Reduzierventil

Elektroofen

Der Elektroofen (Abbildung 2-17) ist ein Produkt der *Firma Rohde* TE10 Quattro und verfügt über zehn Liter Fassungsvermögen und wird über eine Regelanlage der Firma Rohde TC60 gesteuert. Diese Regelanlage ermöglicht ein ausreichend genaues Aufheizen und Halten der gewünschten Temperatur. Die maximale Temperatur des Ofens beträgt 1320°C, der Ofen wurde aber im Zuge der Versuche nur bis auf maximal 600°C erhitzt.



Abbildung 2-17: Elektroofen

Presse

Der Rahmen ist der einer Presse (Abbildung 2-18) der *Firma Bernardo*. Mit dem Rahmen wird ein Widerlager für den Druckkolben geschaffen, sodass die Probe zwischen den Stempeln mit einer Hydraulikvorrichtung satt eingespannt wird und über eine Skala auch die Last, die auf den Probenring wirkt genau dosiert und überwacht werden kann. Für die Versuche wurde eine Last von zwei Tonnen bei kaltem Ofen aufgebracht. Im Zuge der Erwärmung des Ofens dehnt sich der Probenring und die Stempel aus, was eine Erhöhung des Druckes der Presse auf über vier Tonnen zufolge hat. Steigt die Anzeige weiter ist über den Hydraulikzylinder die Last zu reduzieren. Die Last soll fünf Tonnen nicht überschreiten, da der Probenring und die gesamte Prüfvorrichtung auf jene Last bemessen ist. Die relativ großen Kräfte auf den Ring sind nötig um die Dichtheit zwischen dem Probenring und den Druckkolben zu gewährleisten.



Abbildung 2-18: Werkstattpresse mit eingebautem Ofen

Druckluftversorgung

Die Druckluft, mit welcher die Versuche durchgeführt wurden kommt aus der laboreigenen Druckluftanlage. Die Anlage kann bis zu zehn bar liefern. Über einen Filterregler wird der Vordruck gesteuert und die Luft gesäubert. Über ein Druckübersteuerungsmodul wird eine Beschädigung der Anlage und der Sensoren durch falsche Handhabung verhindert (Abbildung 2-19).



Abbildung 2-19: Filterregler mit Druckübersteuerungsmodul

Differenzdruckmesser

Die Differenz zwischen Vor- und Nachdruck wird mit einem Messsensor der Firma RS Components SCX100DN 0-6,0 bar gemessen (Abbildung 2-20) und über die Messeinheit Keithley 2700 umgerechnet und angezeigt (Abbildung 2-20). Die Messgenauigkeit der Messeinheit liegt über der des Messensors.



Abbildung 2-20: Druckmesssensor

Durchflussmesser (Strömungsmesser)

Die Durchflussmessung erfolgte bisher über ein elektronisches Stoffflussmessgerät der Firma Kobold (Abbildung 2-21).



Messbereich: 0-10 Ncm³/min.... 0-500 NI/min. N2
Anschluss: 1/4 NPT..1/2 NPT, Swagelok 1/4" - 1/2"
Material: Nylon; Edelstahl
Max. Druck: 10 bar (Nylon), 35 bar (Edelstahl)
Max. Temperatur 50°C
Genauigkeit: ± 1,5 % v. ME
Analogausgang, Option: Digitalanzeige

Abbildung 2-21: elektronisches Stoffflussmessgerät (Gornik, /3/)

Aufgrund der großen Hitze und der feuchten Luft nach der Probe kam es wiederholt zu Ausfällen und zur Beschädigung des Gerätes. Im Zuge der Weiterentwicklung wurden mehrere Rotameter hintereinandergeschaltet um möglichst exakte und zuverlässige Messwerte zu erzielen.

Probenhalterung (Probenring)

Die Probekörperherstellung erfolgt direkt in den Proberingen, wobei im Zuge des Einfüllens des Frischbetons darauf zu achten ist, dass der Beton plan mit dem unteren Rand des Probenringes anschließt (Abbildung 2-22) und ausreichend verdichtet wird.



Abbildung 2-22: Probenringe

Zusätzlich kann der Probekörper nach dem Erhärten am Übergang zum Metallring mit Hochtemperaturkitt abgedichtet werden. Diese Schwachstelle erwies sich jedoch nach einer Modifizierung der Prüfringe im Zuge dieser Arbeit als nicht notwendig.

Die Probenringe sind von einem Stahlrohr (Durchmesser 116,40mm) in 50mm breite Ringe heruntergeschnitten. Die Stirnflächen wurden nachgedreht, damit eine plane Fläche entsteht, wodurch erst ein dichter Anschluss an die Stempel der Presse erreicht werden kann. Zusätzlich sind noch aus einer Hitzeschutzplatte der *Firma Haberkorn* herausgeschnittene Dichtungsringe zwischen Probenring und Stempel eingelegt.

3 Versuchsplanung

3.1 Ausgewählte Betonsorten

Für die Versuche im Zuge dieser Arbeit werden Standardrezepte gewählt. Zwei für Normalbetone und eines für die Versuche mit hochfestem Beton. Der Normalbeton 1 wird auch für die Versuche zur Dichtheit der Anlage herangezogen. Im Folgenden sind die Einzelnen Rezepturen angeführt.

3.1.1 Normalbeton 1

Um Referenzergebnisse für die Versuche zu bekommen werden Betone gewählt, die keine besonderen Eigenschaften aufweisen. Dies soll vor allem die Interpretation der Ergebnisse erleichtern und eine gewisse Sicherheit dahingehend bewirken, dass die Ergebnisse nicht durch besondere Eigenschaften des Betons beeinflusst werden. In diesem Sinne wurde untenstehende Betonmischung für einen Normalbeton gewählt (Tabelle 3-1).

Als Betonausgangsstoffe werden Zuschlagstoffe der Fa. *Kiesunion* verwendet und als Bindemittel *Portlandhüttenzement EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42*. Als Fließmittel dient *MAPEI Dynamon SX 14*.

Tabelle 3-1: Betonrezeptur OPC-1

OPC-1		W/B = 0,55	
	Menge %	1 Ring [g]	3 Ringe [g]
Zuschlag			
RK 0-1	25,0	263,1	789,3
RK 1-4	15,6	163,9	491,7
RK 4-8	17,8	187,6	562,9
RK 8-16	21,5	226,4	679,3
BM	12,9	135,9	407,6
FM	0,1	1,0	3,1
Wasser	7,1	74,6	223,8
	100,0	1052,5	3157,6

RK ... Rundkorn

BM ... Bindemittel (Portlandhüttenzement)

FM ... Fließmittel

Bei den Probekörperlingen wird kein Schalöl verwendet, da ja eine möglichst dichte Verbindung zwischen Ring und Beton erwünscht ist. Aufgrund der kleinen Probekörper für die Permeabilitätsmessung müssen nur relativ geringe Mengen Beton angemischt werden. Hierfür wird ein elektrischer Mixer verwendet (Abbildung 3-1). Nach Befüllen der Ringe und der Würfelformen für die Druckfestigkeitsuntersuchungen werden diese zwei Minuten auf der Rüttelplatte verdichtet und anschließend mit einem feuchten Tuch bedeckt. Am nächsten Tag werden sie für sechs Tage im Wasserbad gelagert. Die restlichen drei Wochen bis die Versuche durchgeführt werden, lagern die Probekörper im Klimaschrank unter Normalbedingungen. Für die Bestimmung der Porosimetrie werden kleine Mengen beiseitegelegt.



Abbildung 3-1: Mixer

3.1.2 Normalbeton 2

Auch für das zweite Rezept für Normalbeton wird eine Standardmischung verwendet (Tabelle 3-2). Bei dieser Mischung werden allerdings nur Sande bis RK 0-4 verwendet.

Als Betonausgangsstoffe werden Zuschlagstoffe der Fa. *Kiesunion* verwendet und als Bindemittel *Portlandhüttenzement EN 197-1-CEM II/A-S42,5 R WT 42*. Fließmittel wurde bei dieser Mischung keines verwendet.

Die Herstellung der Probekörper kann analog zu den vorangegangenen Probekörpern erfolgen. Es werden wieder die Komponenten gemischt und die Stahlringe und Würfelformen

befüllt und verdichtet. Die Lagerung entspricht auch hier dem in der Norm beschriebenen Procedere.

Tabelle 3-2: Betonrezeptur OPC-2

OPC-2		W/B = 0,50	
	Menge %	1 Ring [g]	3 Ringe [g]
Zuschlag			
RK 0-1	23,0	242,1	726,3
RK 1-4	44,0	463,1	1389,4
RK 4-8	0,0	0,0	0,0
RK 8-16	0,0	0,0	0,0
BM	22,0	231,6	694,7
FM	0,0	0,0	0,0
Wasser	11,0	115,8	347,3
	100,0	1052,5	3157,6

RK ... Rundkorn

BM ... Bindemittel (Portlandhüttenzement)

FM ... Fließmittel

3.1.3 Hochfester Beton

Für die zweite Versuchsreihe, in der ein erster Vergleich der Permeabilität zwischen Normalbeton und einem HPC untersucht werden soll, wird eine Mischung verwendet, die genau diese Eigenschaft aufweist (Tabelle 3-3). Die Betonausgangsstoffe und die Herstellungsart bleiben die Gleichen, wie bei der Mischung der Normalbetone.

Tabelle 3-3: Betonrezeptur HPC

HPC		W/B = 0,40	
	Menge %	1 Ring [g]	3 Ringe [g]
Zuschlag			
RK 0-1	34,8	366,3	1098,9
RK 1-4	34,8	366,3	1098,9
RK 4-8	0,0	0,0	0,0
RK 8-16	0,0	0,0	0,0
MS	2,9	30,5	91,6
BM	19,5	205,2	615,7
FM	0,1	1,1	3,2
Wasser	7,8	82,1	246,3
	100,0	1052,5	3157,6

RK ... Rundkorn

MS ... Microsilica

BM ... Bindemittel (Portlandhüttenzement)

FM ... Fließmittel

Es werden Probekörper für die Permeabilitätsmessung in den oben beschriebenen Stahlringen und Würfelformen hergestellt. Für die Porosimetriemessungen werden kleine Mengen benötigt. Diese werden den Mischungen entnommen, um sie entsprechend zu untersuchen.

Die Beschreibungen der Druckfestigkeitsmessungen und Porosimetriemessungen werden in Kapitel 5.1 dargelegt.

3.2 Versuchsplanung

Die Versuche sollten mehrere offene Fragen beantworten. Fragen, die teilweise auch schon bei den Untersuchungen von *K. Gornik* im Rahmen seiner Diplomarbeit ‚Einfluss der Temperatur auf die Permeabilität von Beton‘ am Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Baustoffforschung und Werkstofftechnik und Brandschutz (*Gornik, /3/*) auftauchen:

- Einerseits Fragen und Probleme, die in direktem Zusammenhang mit der verwendeten Anlage stehen,
- andererseits Themen die allgemein die Permeabilität bei unterschiedlichen Temperaturniveaus betreffen.

Fragen und Probleme, die in direktem Zusammenhang mit der verwendeten Anlage stehen wurden im Rahmen der ersten Versuchsreihe behandelt. Es waren dies die Frage über:

- die Dichtigkeit der Anlage an sich,
- die Funktion und Genauigkeit der Schwebekörper-Durchflussmesser,
- die exakte Ermittlung der Druckmessung und des Vordruckes mit dem die Versuche durchgeführt werden sollten.

In der zweiten Versuchsreihe sollten dann folgende Frage beantwortet werden:

- die erforderliche Haltezeiten bei gleichbleibender Temperatur
- die Veränderung der Permeabilität während des Erhitzens und des anschließenden Abkühlens,
- Einfluss der Korngröße der Zusatzstoffe auf die Absolutwerte der Permeabilität eines Normalbetons,
- Absolutwerte der Permeabilität eines hochfesten Betons im Vergleich mit einem Normalbeton.

3.2.1 Dichtigkeit der Anlage

Allgemein liegt ein Problem bei der Messung der Permeabilität bei hohen Temperaturen darin, dass die Dichtigkeit der Anlage bei hohen Temperaturen gewährleistet werden muss. Bei der Messung unter Raumtemperatur kann beispielsweise bei der *Cembureau-Methode* ein Gummiring zur Abdichtung der Probe verwendet werden, was bei höheren Temperaturen nicht mehr möglich ist. Will man nun die Permeabilität bei höheren Temperaturen messen, treten bei der Abdichtung Probleme auf, die auch zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen können.

Um derartigen Problemen zu begegnen, wurde entschieden entgegen der klassischen *Cembureau-Methode* den Durchfluss erst nach der Probe zu messen.

Diese Anordnung ist insofern günstiger als tatsächlich nur die Menge des Gases beziehungsweise der Luft gemessen wird, die auch tatsächlich die Probe durchströmt. Sollte davor tatsächlich eine Undichtigkeit auftreten und dadurch Luft entweichen, so wird diese Menge nicht erfasst und somit die Messergebnisse nicht verfälscht. Es muss allerdings die Formel zur Auswertung daraufhin abgestimmt sein.

Ein Problem, welches sich schon früher bemerkbar gemacht hatte, ist, dass zwischen dem Beton und dem Metallring Luft hindurchströmen kann. Diese Undichtigkeit verfälscht natürlich die Messergebnisse eklatant. *Gornik* hat bei seinen Versuchen den oberen Rand seiner Probekörper mit einem Hochtemperaturkitt abgedichtet und so ein Vorbeistreichen der Luft am Beton verhindert. Die Verwendung des Kitts verändert jedoch die Maße der Oberfläche der Probe und ist auch in der Anwendung unpraktikabel, da nie sichergestellt sein kann, dass bei langen Haltezeiten nicht doch noch undichte Stellen auftreten können. Aus diesem Grund wurde entschieden die Stahlringe innen konisch auszdrehen, sodass der Beton wie ein Stoppel in seiner Form steckt. Durch den Druck wird er so hineingepresst, dass sich keine Kapillare zwischen Beton und Stahl bilden können

3.2.2 Schwebekörper-Durchflussmesser

Zur Messung des Durchflusses werden Schwebekörper-Durchflussmesser, sogenannte Rotameter verwendet. Durch die starke Erwärmung der Luft beim Durchströmen der Probe

und der Abkühlung danach fällt Kondensat an. Durch diese feuchte Luft ist es entgegen der ursprünglichen Idee der Anlagenkonstruktion nicht möglich einen elektronischen Durchflussmesser zu verwenden, da dieser beschädigt würde. Aber auch die Rotameter sind gegen die Feuchtigkeit nicht gänzlich unempfindlich. So kann bei kleinen Rotametern für geringe Durchflüsse ein Kondensat direkt am Schwebekörper im Rotameter die Messergebnisse beeinflussen. Auch durch den Ausfall des Kondensats in den Verbindungsleitungen wird der Luftstrom in den Leitungen erheblich beeinflusst. Es sammelt sich dort soviel Flüssigkeit an, sodass der Luftstrom in den Leitungen unterbrochen wird und erst bei genügend Druck wieder ein Luftstoß zu den Rotametern gelangt und damit auch die erforderliche laminare Strömung stören könnte, wodurch die Ergebnisse unbrauchbar werden beziehungsweise durch das ständige Schwingen des Schwebekörpers nicht abzulesen sind.

Ein weiteres Problem mit den Schwebekörper-Durchflussmessern trat in Hinblick auf die Staffelung der vier gewählten Rotameter auf. Erst in Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma (*Fa. Vögtlin*, Schweiz) und deren Vertretung in Österreich (*Fa. Burde*) wurde diesem Problem auf den Grund gegangen.

Ein Rotameter ist konzipiert in einem vorher bestimmten Bereich den Durchfluss eines bestimmten Gases bei annähernd gleichbleibender Temperatur und Feuchtegehalt zu messen. Um aber wie hier einen so großen Bereich der Durchflussmenge mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen, sind mehrere Rotameter in verschiedener Abstufung parallel geschaltet. Durch umschalten von einem Rotameter zum nächsten kann so ein wesentlich größerer Bereich genau gemessen werden.

Bei Rotametern ist es nach Auskunft der herstellenden Firma leider so, dass ein Rotameter im unteren Bereich der Skala sehr genaue Messergebnisse liefert, im oberen Bereich der Skala jedoch die Ungenauigkeit zunimmt. Dieses Problem ist nur durch eine entsprechende Staffelung der Schwebekörper-Durchflussmesser in den Griff zu bekommen. Hierzu wurde eine eigene Versuchsreihe im Rahmen der Vorversuche durchgeführt um die Staffelung der Rotameter zu optimieren.

Weiters sind Rotameter dahingehend konzipiert, in einem geschlossenen System installiert zu sein. Da in dieser Messanordnung die Luft jedoch unmittelbar hinter den Rotametern ins Freie strömt, ist im Rotameter quasi kein Überdruck vorhanden. Um also ein geschlossenes System

zu simulieren beziehungsweise den Druck im Rotameter zu erhöhen, wurde auf Anraten der herstellenden Firmen ein Druckminderer nachgeschaltet und damit der Druck im Rotameter erhöht. Hierzu ist zu bemerken, dass ein Verstellen des Druckminderers während einer Versuchsreihe zu einer vollständigen Verfälschung der Ergebnisse führt.

Auch ist darauf zu achten, dass die verwendeten Rotameter richtig abgelesen werden. Das verwendete Produkt der Firma *Vögtlin* ist so geeicht, dass der Wert in der Mitte des Schwebekörpers (Kugel) ermittelt wird. Es gibt sehr wohl andere Produkte auf dem Markt, bei denen andere Marken (Oberkante der Kugel) verwendet werden.

Zur Auswertung der Messergebnisse in Form von Millimeterangaben auf den Rotametern wird ein Tabellenwerk in Form eines einfachen Computerprogramms (*Flowcalc 1.0*) der Firma *Vögtlin* herangezogen. Mithilfe dieses Programms können die auf den Rotametern abgelesenen Werte von Millimeter auf Liter pro Stunde [l/h] umgewandelt werden. Das Programm kann Normliter oder Betriebsliter ausgeben. Betriebsliter [Bl/h] ist die tatsächlich bei diesem Druck und dieser Temperatur gemessene Literanzahl pro Stunde, wohingegen die Normliter [Nl/h] bereits auf Normaldruck und –temperatur normierte Werte angeben. Da bei der Permeabilitätsmessung parallel auch Temperatur und Druck ermittelt werden und die Werte letztlich zur Permeabilität zusammengefügt werden, sind Betriebsliter pro Stunde anzugeben.

3.2.3 Exakte Ermittlung der Druckmessung und des Vordruckes

Nach den ersten Versuchen mit der vorliegenden Anlage wurde die Genauigkeit der Umrechnung der Druckmessung von elektrischer Spannung [V] des Differenzdrucksensors in den für die Bestimmung der Permeabilität benötigten Druck [bar] hinterfragt. Dies sollte in einer eigenen Versuchsreihe untersucht werden. Dazu mussten auch parallelgeschaltete Messeinrichtungen zur Überprüfung der Messergebnisse verwendet werden.

Ein weiteres Ziel einer Versuchsreihe ist es herauszufinden welcher Vordruck, mit dem die Probe belastet wird, am günstigsten für die Anlage und damit verbunden die Genauigkeit der Messergebnisse ist. In diesem Sinne ist zu untersuchen, ob bei zu niederem Druck die Messgenauigkeit sowohl der Rotameter als auch der Differenzdruckmessung unbrauchbar ist.

Bei höheren Drücken war die Befürchtung naheliegend, dass die Dichtigkeit der Anlage nicht mehr gegeben ist.

3.2.4 Haltezeiten

Eine sehr wichtige Abhängigkeit der Messergebnisse fiel erst im Rahmen der Vorversuche auf. Die Versuche zeigten, dass beim Abkühlen der Probe insbesondere der Differenzdruck und damit die Permeabilität weiter ansteigt. Es musste also herausgefunden werden, wie lange die Temperatur auf einem Wert gehalten werden sollte, damit man die tatsächliche Permeabilität bei eben diesem Temperaturniveau misst.

3.2.5 Aufheizen und Abkühlen

Ein sehr zentraler Punkt dieser Diplomarbeit ist es herauszufinden, wie sich die Permeabilität verändert wenn man die Probe bis zu einem bestimmten Temperaturwert erhitzt und anschließend wieder abkühlt, d.h. ob die Permeabilität die sich bei der Höchsttemperatur unter zirka 400°C einstellt auch nach dem Abkühlen erhalten bleibt, ob die Permeabilität reversibel ist und sich dem Ausgangspunkt wieder annähert, oder ob sich eine Restpermeabilität einstellt

3.2.6 Ermittlung des Absolutwertes eines hochfesten Betons

In Zuge der Permeabilitätsuntersuchungen stellte sich die Frage nach dem Unterschied der Permeabilität bei einem Normalbeton und bei hochfestem Beton. Dazu sollen ebenfalls erste Ergebnisse geliefert werden.

3.2.7 Ermittlung des Einflusses von größeren Körnungen der Zuschlagstoffe auf die Absolutwerte der Permeabilität

Beim Herstellen der Probekörper wurde festgestellt, dass die großen Körnungen für die relativ kleinen Probenringe problematisch bei der Verdichtung sind. Um diesem Problem auf den

Grund zu gehen und zu untersuchen, ob das eventuell Einfluss auf die Permeabilität haben könnte, wurde eine Versuchsreihe gefahren, die ein Betonrezept mit kleinen Körnungen verwendet. Im Vergleich mit der Versuchsreihe, bei welcher der andere Normalbeton verwendet wurde kann eine Tendenz herausgefunden werden, ob grundsätzlich Auswirkungen auf die Permeabilität bestehen.

4 Durchführung und Auswertung der ersten Versuchsreihe

Die erste Versuchsreihe behandelt die

- Dichtigkeit der Anlage an sich,
- die Funktion und Genauigkeit der Schwebekörper-Durchflussmesser,
- die exakte Ermittlung der Druckmessung und des Vordruckes mit dem die Versuche durchgeführt werden sollen.

4.1.1 Dichtigkeit der Anlage

Wie schon im vorigen Kapitel angesprochen, wurde in einer eigenen Versuchsreihe untersucht, ob die Messgenauigkeit durch Undichtigkeiten der Anlage in Mitleidenschaft gezogen wird.

In einem ersten Schritt sollte der vor der Probe liegende Abschnitt sowohl im kalten als auch im heißen Zustand auf Dichtigkeit überprüft werden. Hierzu wurde eine Probe eingebaut, deren Oberfläche mit einem Hochtemperaturkitt so abgedichtet wurde, dass sie als gasdicht gelten kann (Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Probekörper für die Messung der Dichtigkeit der Anlage

Durch Beaufschlagung der Probe wurde der Druck in der Anlage vor der Probe in Relation zum Druck nach der Probe, also in der Atmosphäre gemessen. Das gemessene Ergebnis stimmte exakt mit dem eingestellten Druck der Druckluftanlage überein. Selbiges Ergebnis wurde auch bei heißem Ofen festgestellt.

Im zweiten Schritt wurde eine normale Probe eingebaut und sämtliche Verbindungen und Anschlüsse der Schläuche und Rohre in kaltem Zustand mit einer Seifenlauge bestrichen. Da keine Blasenbildung erkennbar wurde, konnte von der Dichtheit der gesamten Anlage ausgegangen werden. Im heißen Zustand konnten aufgrund der Hitze nur die kühleren Verbindungen überprüft werden. Die fehlenden, insbesondere jene im Ofen waren aber schon im ersten Schritt für dicht befunden worden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass keine Undichtigkeitsstellen der Anlage feststellbar waren.

4.1.2 Schwebekörper-Durchflussmesser

Bei der bestehenden Anlage wurde von *Gornik* (/3/) ein elektronischer Durchflussmesser verwendet. Durch die hohe Luftfeuchtigkeit nahm das Gerät jedoch schnell Schaden. Alternativ hat *Gornik* auch einen einzelnen Rotameter eingebaut. Die Ergebnisse des Rotameters waren allerdings unbefriedigend. Um bessere Ergebnisse zu erzielen wird im Zuge der Weiterentwicklung eine Staffelung von mehreren Rotametern mit unterschiedlichen Messbereichen eingesetzt. Das Problem der Staffelung der Rotameter wurde in einer Versuchsreihe sichtbar, bei der eigentlich das Verhalten der Permeabilität beim Erhitzen und Abkühlen untersucht hätte werden sollen. Bei jedem Wechsel von einem Rotameter zum nächsthöheren zwischen zwei Temperaturhaltepunkten wurde bei der an sich sehr glatten Kurve ein Sprung sichtbar. Bei dieser Versuchsreihe wurde bei jedem Temperaturhaltepunkt mit 0,5, 1,0 und 3,0bar gemessen. Im Sinne einer Weiterentwicklung der Anlage wurden zahlreiche Recherchen gemacht und eine Apparatur entwickelt, die eine relativ leichte Handhabung der Rotameter und den Wechsel zwischen den einzelnen Durchflussmessern ermöglicht (Abbildung 4-2). Erst durch diese Nachforschungen und Untersuchungen und der Hilfe der herstellenden Firmen wurde eine ideale Staffelung der Schwebekörper-Durchflussmesser erreicht. Der Hersteller machte darauf aufmerksam, dass die Rotameter im oberen Bereich ab 50% des maximalen Durchflusses exakter messen. So wird bei der Staffelung darauf geachtet, dass das nächsthöhere Rotameter bereits bei 50% der Kapazität des Voranstehenden beginnt. Hierdurch ist es nun möglich, wesentlich genauere Messergebnisse zu erzielen.

Zur Messung des Durchflusses werden nun Durchflussmesser (Rotameter) der *Firma Vögtlin* verwendet. Es sind dies Durchflussmesser der Baureihe V100 mit unterschiedlichen Messbereichen:

- K140 E01G: Messglas: Länge 140mm / Schwebekörper: Material Glas, schwarz, $d=1,191$ / Eichmedium: Stickstoff, 1,5bara / Durchfluss (20°C, 2bara, Luft): 0 – 3,3NI/h
- K140 E08G: Messglas: Länge 140mm / Schwebekörper: Material Glas, schwarz, $d=3,175$ mm / Eichmedium: Stickstoff, 1,013bara / Durchfluss (20°C, 2bara, Luft): 1 – 26,9NI/h
- K140 E11G: Messglas: Länge 140mm / Schwebekörper: Material Glas, schwarz, $d=3,175$ mm / Eichmedium: Stickstoff, 4,013bara / Durchfluss (20°C, 2bara, Luft): 18,9 – 144,8NI/h
- K140 H14: Messglas: Länge 140mm / Schwebekörper: Material Stahl, metallisch, $d=6,35$ mm / Eichmedium: Wasser, 20°C / Durchfluss (20°C, 2bara, Luft): 103,2 – 1118,1NI/h
- K140 H15: Messglas: Länge 140mm / Schwebekörper: Material Keramik, weiß , $d=9,525$ mm / Eichmedium: Wasser, 20°C / Durchfluss (20°C, 2bara, Luft): 5 – 3423,7NI/h

Bei allen fünf Schwebekörperdurchflussmessern handelt es sich bei der am Messglas aufgezeichneten Skala um eine Millimeterskala von 0 – 120mm.

Zur Ansteuerung der unterschiedlichen Durchflussmesser wird über einen Mehrfachverteiler und Kugelventile der Luftstrom zum passenden Rotameter geleitet. Dieser Messverteiler wurde ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit hergestellt (Abbildung 4-2).

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit der Durchflussmessung ist ein Reduzierventil am Auslass angesetzt. Es handelt sich hierbei um ein Produkt der Firma *Burde*. (Abbildung 4-2)

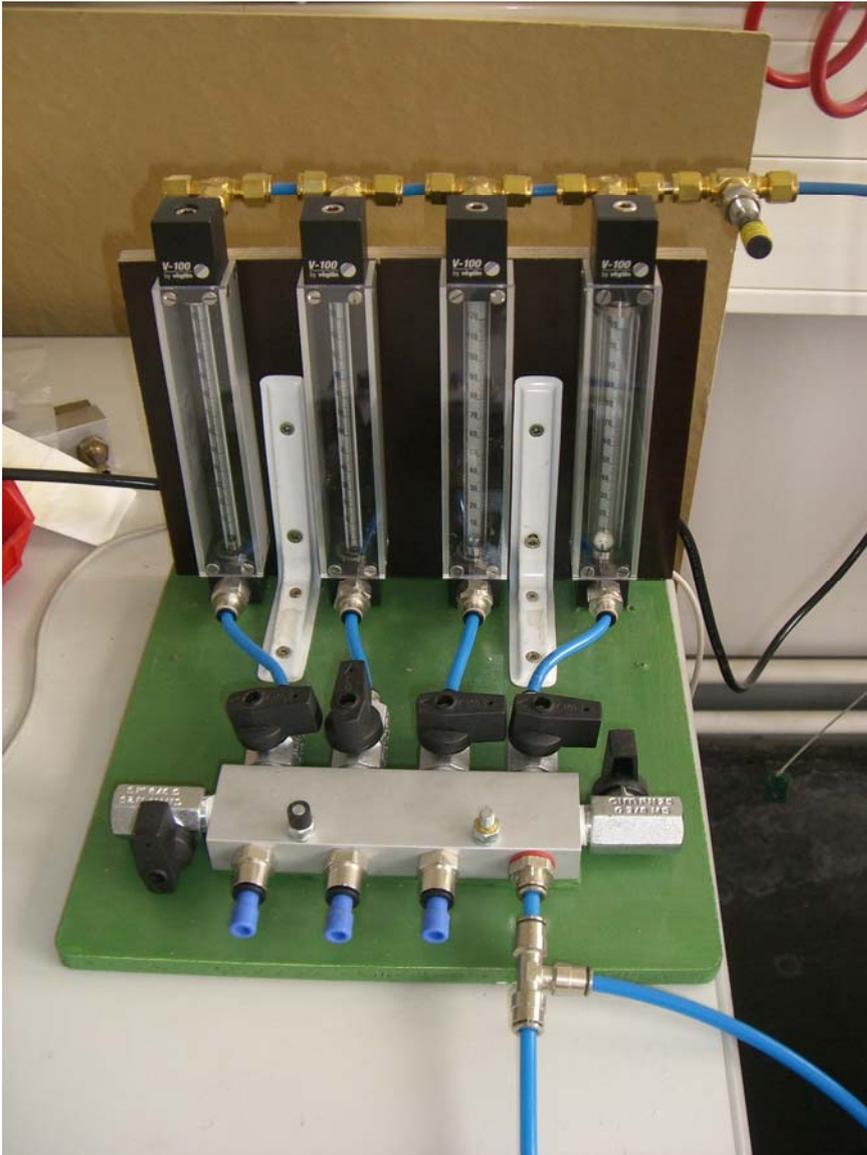


Abbildung 4-2: Rotameter mit Verteiler und Reduzierventil

Mit den jetzt verwendeten Rotametern wird ein relativ kontinuierlicher Verlauf bei der Durchflussmessung erreicht.

Dem Problem, dass zu feuchte Luft die Genauigkeit der Durchflussmessung beeinträchtigen könnte wurde durch die Entwicklung einer Kühlfalle begegnet. So wurde ein Topf mit Anschlüssen geschweißt, durch welche die heiße Luft nach der Probe einströmen kann. Da hier die Luft noch heiß sein kann, wurde eine Nirostaleitung ($d=6\text{mm}$) verwendet. Der Topf steht in einem kalten Wasserbad, sodass im Inneren des Kessels an den kalten Wänden die

Feuchtigkeit niederschlägt. Durch den Auslass strömt sie weiter über einen Kunststoffschlauch zu den Durchflussmessern (Abbildung 4-3).



Abbildung 4-3: Kühlfalle

Die ausströmende Luft ist dadurch nicht nur wesentlich getrocknet, sondern auch auf eine relativ niedrige Temperatur abgekühlt.

Durch diese Weiterentwicklungen stellt sich die Versuchsanlage in folgender Form dar (Abbildung 4-4):

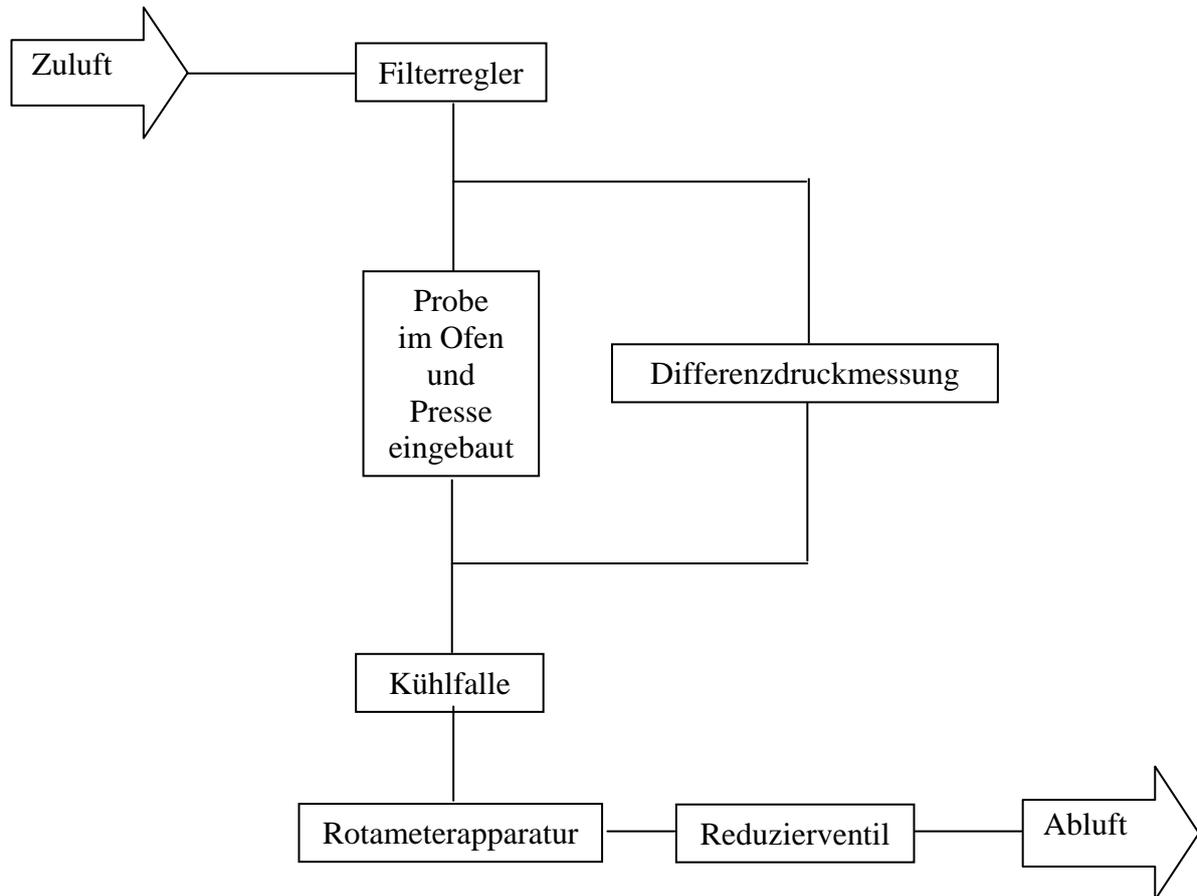


Abbildung 4-4: Ablaufschema der weiterentwickelten Anlage

Diese weiterentwickelte Anlage wird in sämtlichen folgenden Versuchen im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

4.1.3 Druckmessung und Ermittlung eines günstigen Vordrucks

Ermittlung eines Umrechnungsfaktors für den Druckmesssensor

Wie schon oben beschrieben sollte überprüft werden, ob der Umrechnungsfaktor, der die Spannung, die der Druckmesssensor ausgibt in den benötigten Wert für den Druck umrechnet korrekt ist.

Zieht man die Angaben des Herstellers des Sensors heran und ermittelt sich damit einen rechnerischen Wert für den benötigten Faktor so kommt man relativ genau auf $7,0 \times 10^3$.

Es stellte sich die Frage, ob der errechnete Wert mit dem gemessenen übereinstimmt, und auch ob die Angaben bei unterschiedlichem Druck variieren. Hierzu wurde eine eigene Versuchsreihe im Rahmen der Vorversuche gefahren. Um einen möglichst genauen Wert für die Umrechnung der gemessenen Druckwerte herauszufinden, wurde nur der leere Probenring in die Anlage eingebaut und die Apparatur zur Messung des Durchflusses abgehängt. Wenn man also mit 0,5, 1,0, 2,0, oder 3,0bar Vordruck beaufschlagt und parallel den Differenzdruck gegen die Atmosphäre misst kann ein sehr exakter Umrechnungsfaktor, der auch auf die Anlage und ihre Eigenheiten berücksichtigt ermittelt werden. In Abbildung 4-5 wurden die Werte in Bezug auf den gewählten Vordruck als Kurve dargestellt. Durch die Darstellung der Werte als Kurve konnte auch rückgeschlossen werden, ab welchem Druck eine Veränderung desselben nur noch geringe Auswirkungen auf den Umrechnungsfaktor ,x' hat.

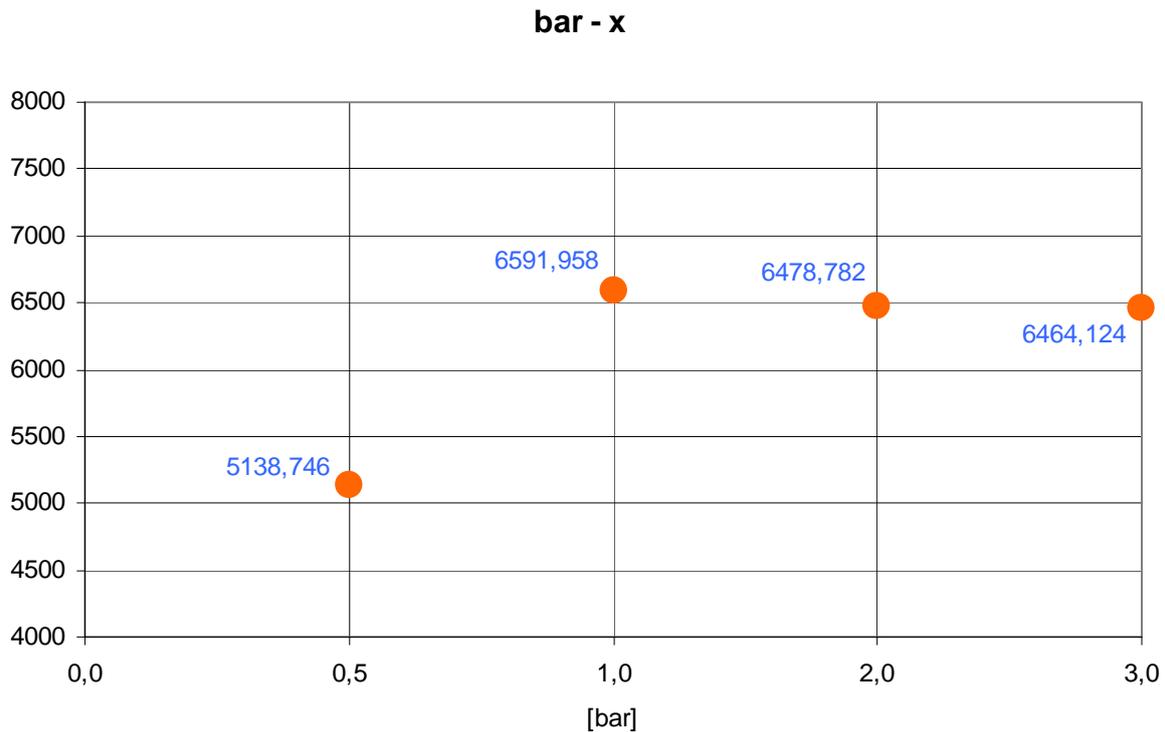


Abbildung 4-5 Diagramm der unterschiedlichen Umrechnungsfaktoren in Bezug auf den Vordruck gegenüber dem atmosphärischen Druck

Für die weiteren Messungen wurden passend zum eingestellten Vordruck also folgende Werte als Umrechnungsfaktor verwendet. Die ermittelten Werte sind überdies auf der verwendeten Anlage gemessen worden und damit auch nur für diese stimmig.

Tabelle 4-1: Umrechnungsfaktor x von Spannung [mV] auf Druck[bar]

Druck [bar]	0,5	1,0	2,0	3,0
Umrechnungsfaktor x	5138,746	6591,958	6478,782	6464,124

Ermittlung eines für die Anlage günstigen Vordruckes

Zur Problematik des Vordrucks wurde eine Versuchsreihe gemacht, bei welcher der Vordruck bei jedem Temperaturniveau variiert wurde. So konnte durch Vergleich der Permeabilitätskurven (Abbildung 4-6) eine Aussage über die Qualität der Messung getroffen

werden und der günstigste Vordruck mit dem die Probe belastet wird festgelegt werden. Die Proben bestanden aus Normalbeton 1 und wurden nach ca. 28 Tagen eingebaut.

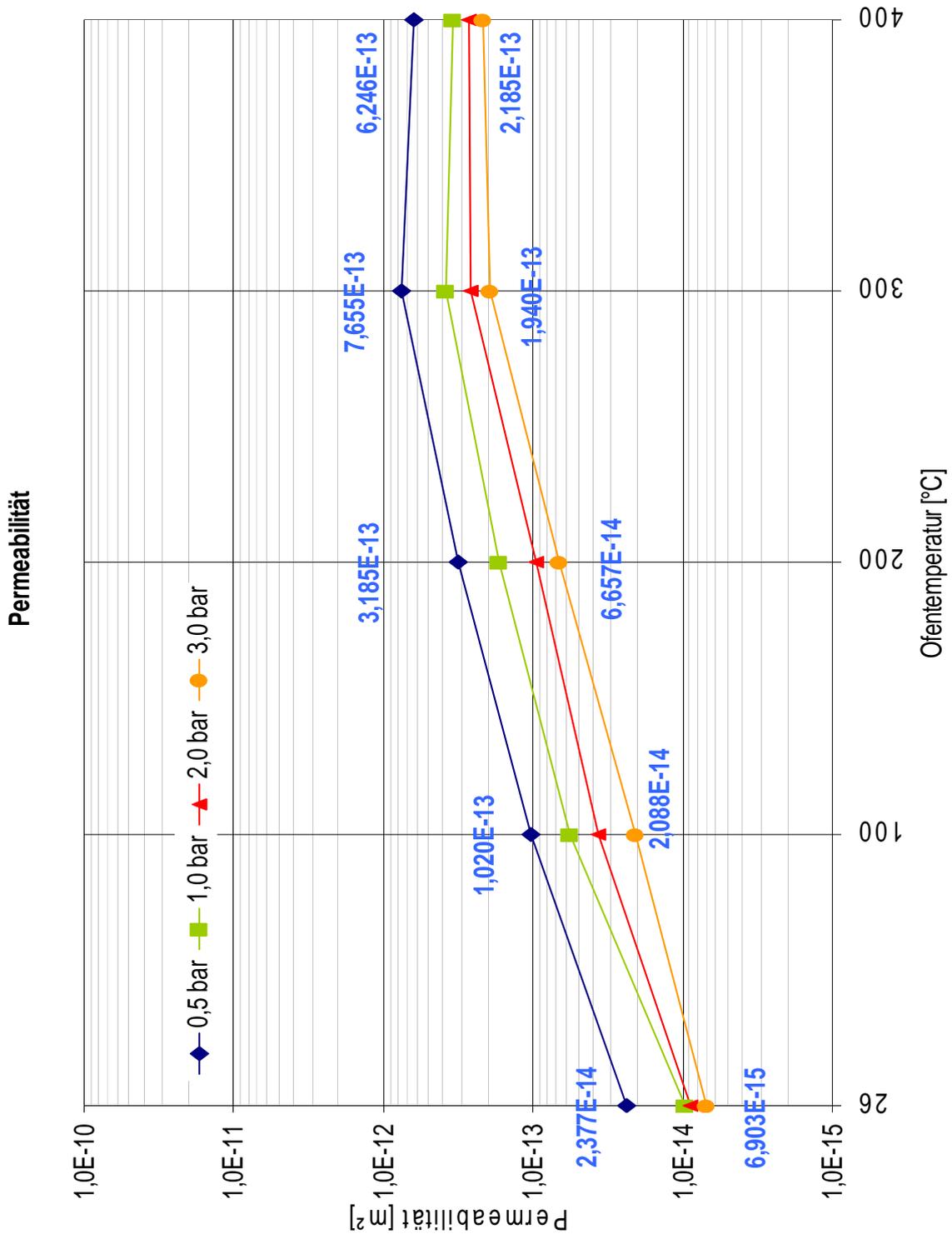


Abbildung 4-6 Kurven der Permeabilität bei unterschiedlichem Druck von Normalbeton 1

Bei den Messungen von 0,5bar erreicht man vor allem bei geringer Permeabilität bald die Grenzen der Genauigkeit der Anlage. Durch den geringen Druck und damit einhergehenden geringen Durchfluss ist der Aufwand bei der Durchflussmessung groß. Bei drei bar ist ebenso die Anlage bereits an ihren Grenzen, da die Kupplungen der Verbindungen dann schon sehr leicht aufgehen und damit die Messung verloren ist. Für die weiteren Messungen wurde ein Druck von 2 bar gewählt, da hier die Leitungsverbindungen noch keine Probleme aufweisen und die Messungen der Durchflussmesser einen brauchbaren Wert anzeigen können.

5 Versuchsreihe 2

Die zweite Versuchsreihe behandelt folgende Gesichtspunkte:

- die erforderliche Haltezeiten bei gleichbleibender Temperatur,
- die Veränderung der Permeabilität während des Erhitzens und des anschließenden Abkühlens,
- Einfluss der Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe auf die Permeabilität,
- Absolutwerte der Permeabilität eines hochfesten Betons.

5.1 Darstellung der betontechnologischen Kennwerte der ausgewählten Betone

Untersucht wird die Würfeldruckfestigkeit mit Einteilung in eine Festigkeitsklasse und die Porosimetrie der Betonsorten.

5.1.1 Festigkeitsuntersuchungen

Für die Druckfestigkeitsuntersuchungen werden drei Würfel mit je einer Kantenlänge von 15cm betoniert und nach 28 Tagen normgerechter Trockenlagerung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $0,6\text{N/mm}^2\text{s}$ abgedrückt. Die Messungen werden an dem institutseigenen Prüfgerät der Firma *TONI Technik* (Modell 2040, Bj. 1997, max. Prüflast 3000kN) durchgeführt (Abbildung 5-1). Die Versuche werden entsprechend der ÖNORM B3303 geprüft.

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt einaxial. Die Prüfmaschine drückt die Probe von zwei Seiten zusammen. Dies erfolgt über 2 Druckplatten, wobei die obere starr, die untere hydraulisch betätigt wird. Hierbei ist zu beachten, dass sich die abgezogene Seite (Probenoberseite) seitlich befindet. Die Prüflast der Prüfmaschine wird mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $0,6\text{ N/mm}^2\text{s}$ beaufschlagt. Die Belastung des Probewürfels

wird bis hin zur Bruchlast durchgeführt. Mittels einer beiliegenden Software kann dann über die erreichte Höchstlast die Druckfestigkeit mittels der Definition der Spannung errechnet werden:

$$f_c = \frac{F}{A_f}$$

F *Höchstkraft = Bruchlast*

A_f *Fläche des Probenquerschnittes*



Abbildung 5-1: TONI Technik Prüfmaschine zur einaxialen Druckfestigkeitsuntersuchung (Gornik, /3/)

Die Ergebnisse des Normalbeton 1 sind in folgender Tabelle (Tabelle 5-1) zusammengefasst:

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung von Normalbeton 1

Probewürfel	Probenfläche A [mm ²]	Probendicke a [mm]	Probenbreite b [mm]	F _{max} [kN]	f _{c,m} [N/mm ²]
1	22455	150,3	149,4	1079,06	48,05
2	22261	149,0	149,4	1083,10	48,66
3	22156	148,3	149,5	961,30	43,39

Bildet man das geometrische Mittel über die drei Bruchspannungen $f_{c,m}$, so ergibt sich eine Bruchspannung für die Würfeldruckfestigkeit von 46,70 N/mm².

Ein $f_{c,m}=46,70$ N/mm² entspricht nach ÖNORM B4710-1 Tab. NAD13 einem Beton der Festigkeitsklasse C25/30.

Für den Normalbeton 2 wurde analog vorgegangen (Tabelle 5-2):

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung von Normalbeton 2

Probewürfel	Probenfläche A [mm ²]	Probendicke a [mm]	Probenbreite b [mm]	F _{max} [kN]	f _{c,m} [N/mm ²]
1	22465	149,4	149,4	1058,10	47,10
2	22262	150,1	149,4	935,67	42,03
3	22151	148,7	149,4	980,85	44,28

Bildet man bei diesem ebenso das geometrische Mittel über die drei Bruchspannungen $f_{c,m}$, so ergibt sich eine Bruchspannung für die Würfeldruckfestigkeit von 44,47 N/mm².

Ein $f_{c,m}=44,47$ N/mm² entspricht nach ÖNORM B4710-1 Tab. NAD13 ebenso einem Beton der Festigkeitsklasse C25/30.

Für den hochfesten Beton wurde auch wieder analog vorgegangen (Tabelle 5-3):

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung des hochfesten Betons

Probewürfel	Probenfläche A [mm ²]	Probendicke a [mm]	Probenbreite b [mm]	F _{max} [kN]	f _{c,m} [N/mm ²]
1	22152	150,2	149,4	1697,51	76,63
2	22253	150,1	149,4	1678,10	75,41
3	22159	148,1	149,4	1725,08	77,85

Bildet man bei diesem ebenso das geometrische Mittel über die drei Bruchspannungen $f_{c,m}$, so ergibt sich eine Bruchspannung für die Würfeldruckfestigkeit von 76,63 N/mm².

Ein $f_{c,m}=76,63$ N/mm² entspricht nach ÖNORM B4710-1 Tab. NAD13 ebenso einem Beton der Festigkeitsklasse C70/85.

5.1.2 Porosimetrische Untersuchungen

Die Porosität steht in engem Zusammenhang mit der Roh- und Reindichte eines Festkörpers.

Die Rohdichte (*engl.*: bulk density) wird auch als scheinbare oder geometrische Dichte oder auch als Raumgewicht bezeichnet. Es handelt sich hier um die Dichte eines porösen Festkörpers bestehend aus dem Gesamtvolumen des Körpers einschließlich der Porenräume.

Das Gegenstück zur Rohdichte ist die Reindichte (*engl.*: true density). Die Reindichte wird auch Skelett-, absolute oder wahre Dichte genannt. Sie bezeichnet die Dichte des stofflichen Teils eines Körpers in beliebigem Aggregatzustand. Bei einem Festkörper also das Gesamtvolumen abzüglich des Porenraumes. Im Zuge dieser Arbeit ist nur die Reindichte eines Festkörpers ausschlaggebend.

Der Quotient aus Rein- zu Rohdichte, also das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen wird als relative Dichte oder auch als Porosität bezeichnet. Sie dient als klassifizierendes Maß für die tatsächlich vorliegenden Hohlräume. Sind Roh- und Reindichte gleich, so handelt es sich demnach um einen unporösen Körper, einen Körper ohne Hohlräume. Folgende Definition ist im Bauwesen gebräuchlich:

$$\Phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_0},$$

wobei Φ [/] die Porosität, ρ [kg/m³] die Rohdichte und ρ_0 [kg/m³] die Reindichte bezeichnet.

Aus diesem Zusammenhang zwischen den drei Eigenschaften kann durch Bestimmung der Rohdichte und der Porosität die Reindichte ermittelt werden.

Die Messung der Porosität erfolgt mittels der Quecksilberporosimetrie, welche eine verbreitete Methode bei der Bestimmung der Porenverteilung von Festkörpern im Bereich von Makro- und Mesoporen ist.

Sie gibt Werte über:

- Porengrößenverteilung
- Porenvolumen und
- Rohdichte

unabhängig von der Art und Form der Probe an. Sie beruht auf der Technik der Intrusion (=Eindringung) des inkompressiblen und nicht benetzenden, flüssigen Quecksilbers in einen porösen Körper. Mittels der *Washburn Gleichung* kann ausgehend von dem aufgebrachtten Druck auf die entsprechende Porenweite zurückgerechnet werden.

$$p = \frac{-2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{r}$$

p	<i>Druck</i>
γ	<i>Oberflächenspannung</i>
θ	<i>Benetzungswinkel</i>
r	<i>Porenradius</i>

Die Versuche wurden am institutseigenen Porosimeter PASCAL 140 (Niederdruckmessung) und 440 (Hochdruckmessung) durchgeführt (Abbildung 5-2).



Abbildung 5-2: Porosimeter PASCAL 140 und PASCAL 440 (Gornik, /3/)

Technische Daten der Porosimeter:

Modell	PASCAL 140	PASCAL 240/440
Druckbereich	0,01 kPa - 200 MPa	0,01 kPa - 400 MPa
Porenradius	58 μm - 3,7 nm	58 μm - 1,8 nm
Partikeldurchmesser	300 - 0,015 μm	300 - 0,01 μm
Genauigkeit (Druck)	besser 0,25%	besser 0,25%
max. Volumen	2000 mm ³	500 mm ³
Auflösung	0,1 mm ³ *	0,1 mm ³ *
max. Datenpunkte	5000	5000

Normalbeton 1

Die Porosimetriemessung des Betons der Mischung *Normalbeton 1* brachte folgendes Ergebnis:

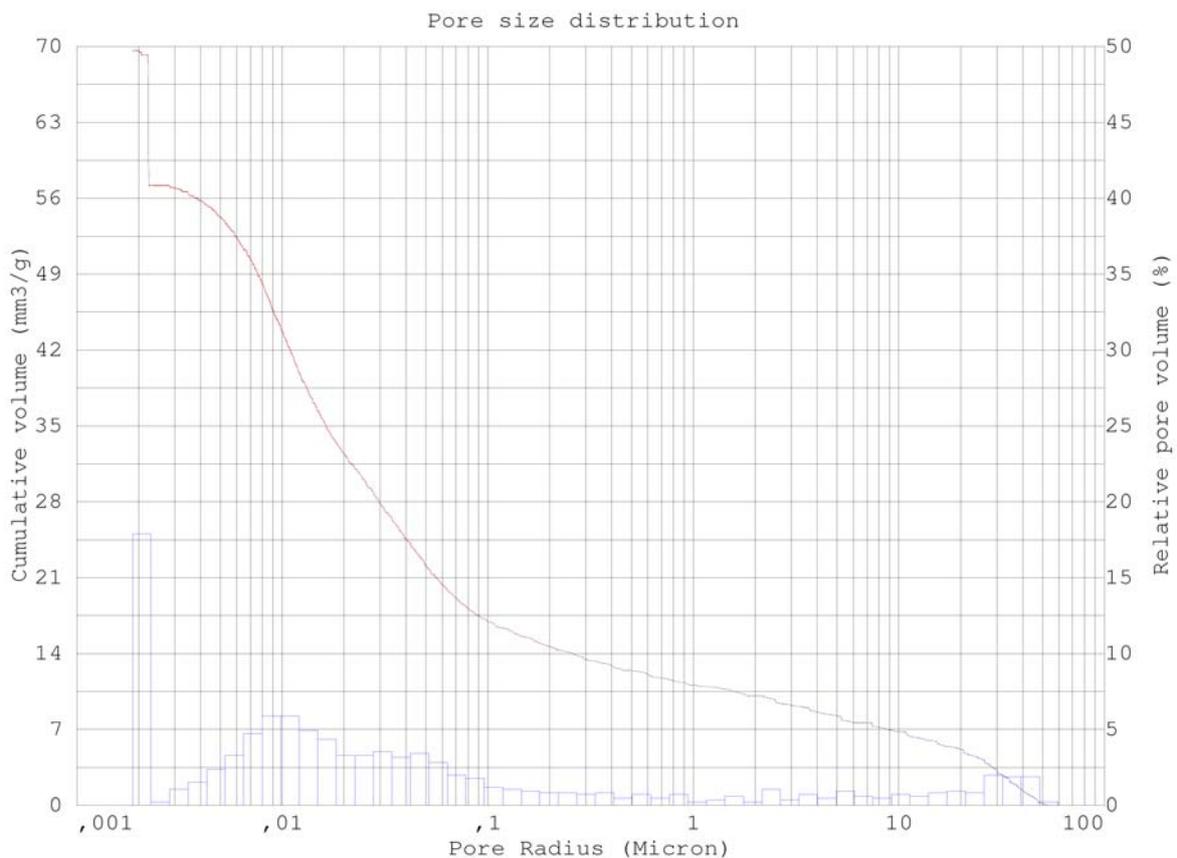


Abbildung 5-3: Ergebnisse aus der porosimetrischen Untersuchung *Normalbeton 1*

Die Ergebnisse brachten also eine Porosität von 15,6839 %, eine Rohdichte von 2,25277 g/cm³ und eine Reindichte von 2,67181 g/m³.

Hochfester Beton

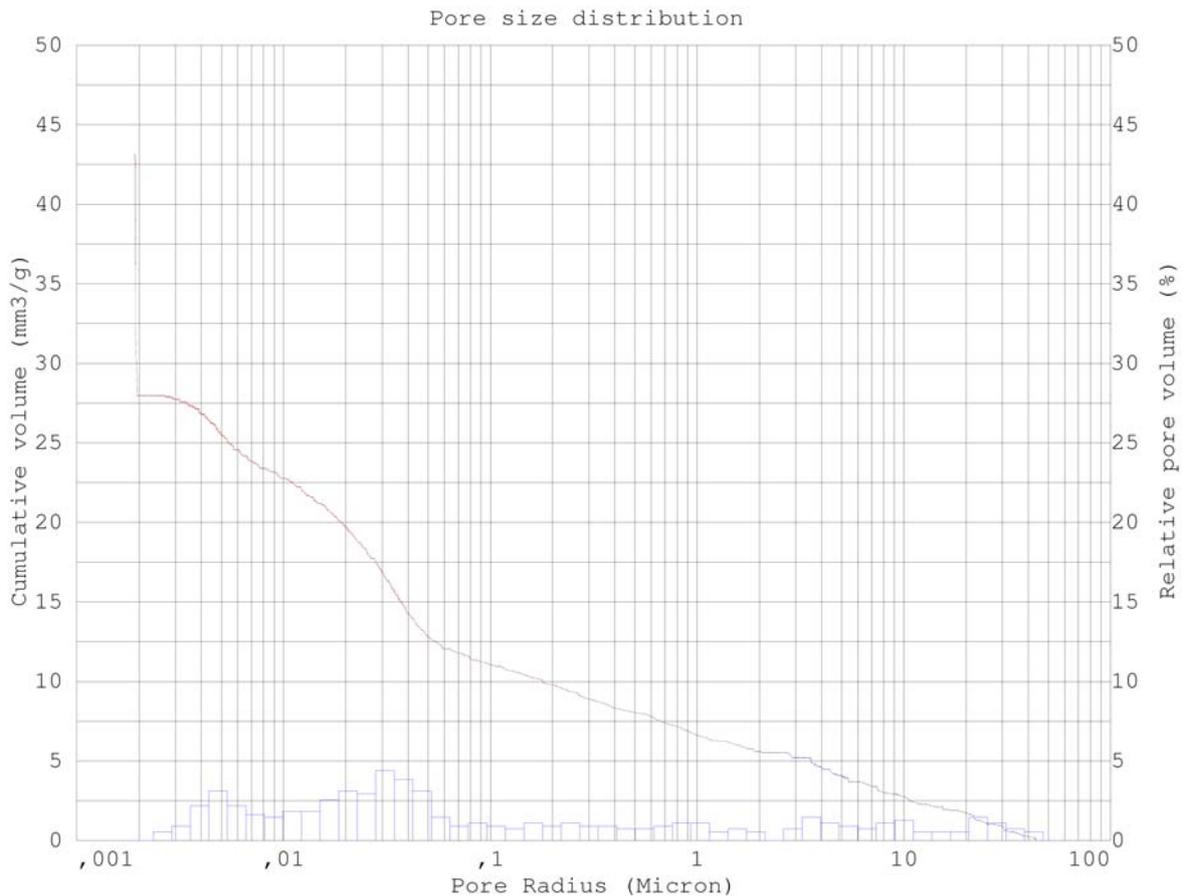


Abbildung 5-4: Ergebnisse aus der porosimetrischen Untersuchung *hochfester Beton*

Die Ergebnisse brachten für den hochfesten Beton eine Porosität von 10,5336 %, eine Rohdichte von 2,44390 g/cm³ und eine Reindichte von 2,73164 g/m³.

Interpretation

Vergleicht man die Werte der Porosität der Normalbeton mit dem hochfesten Beton, so zeigt sich deutlich, dass der hochfeste Beton mit nur rund zehn Prozent eine um fünf Prozentpunkte

geringere Porosität aufweist, als die Normalbetone. Insofern ist zu überprüfen, ob bei den Messungen der Absolutwerte der Permeabilität, der hochfeste Beton im Vergleich zu den Normalbetonen auch geringere Permeabilitätswerte erreicht werden. Dieser Überlegung wird in dieser Arbeit im Kapitel über den Vergleich der Absolutwerte auch nachgegangen.

5.2 Einfluss der Haltezeiten

Wie im vorigen Kapitel schon beschrieben stellte sich die Frage über die Dauer der Haltezeiten bei einem Temperaturniveau vor allem beim Aufheizen einer Probe. Also jene Zeitspanne, über welche die neu erreichte Temperatur gehalten werden muss bis sich die Permeabilität nicht mehr ändert. Vor allem der Differenzdruck vor und nach der Probe weist noch über eine lange Zeitspanne eine Veränderung auf.

Mit diesem Hintergrund ist eine Versuchsreihe mit Proben mit Normalbeton 1 gefahren worden, bei der die Temperatur solange auf demselben Niveau gehalten wurde, bis sich keine messbare Veränderung der Permeabilität mehr einstellte. Durch das permanente Aufzeichnen insbesondere der Messergebnisse der Druckmessung konnte dann in der Auswertung auf ausreichend lange Zeitfenster rückgeschlossen werden.

Für diesen Versuch wurden drei Probekörper betoniert und entsprechend mehr als 28 Tage gelagert, sodass sich die gewünschte Festigkeit eingestellt hat. Wie es die Versuchsanordnung fordert wurden Dichtungsringe mit der Schablone ausgeschnitten und samt dem Probekörper in den Ofen eingebaut. Als Last, mit welcher die Stempel auf die Ringe wirken wurden 2t aufgebracht. Wie der Vorversuch ergeben hat, wurde die Druckluft, die auf den Probekörper wirkt mit den für die Versuche günstigen 2bar eingestellt. Es wurde das Rotameter gewählt, bei dem die Anzeige einen möglichst genauen Wert ergibt, die anderen wurden abgeriegelt.

Für diesen Versuch war die Differenzdruckmessung besonders ausschlaggebend. Hierzu wurde das Messgerät an den PC angeschlossen, um diese Messung permanent mit einem Intervall von einer Minute über die gesamte Zeit, die der Versuch gefahren wurde durchführen zu können. Die zum Messgerät gehörende Software exportiert die Werte als Textfile mit der dazugehörigen Uhrzeit. So kann genau abgelesen werden, ab welcher Haltezeit keine Änderung des Messergebnisses mehr ablesbar ist.

Nun wurden nacheinander Messungen bei Normaltemperatur, 100, 200, 300 und 400°C gemacht und eben die Haltezeit auf 24 Stunden ausgedehnt.

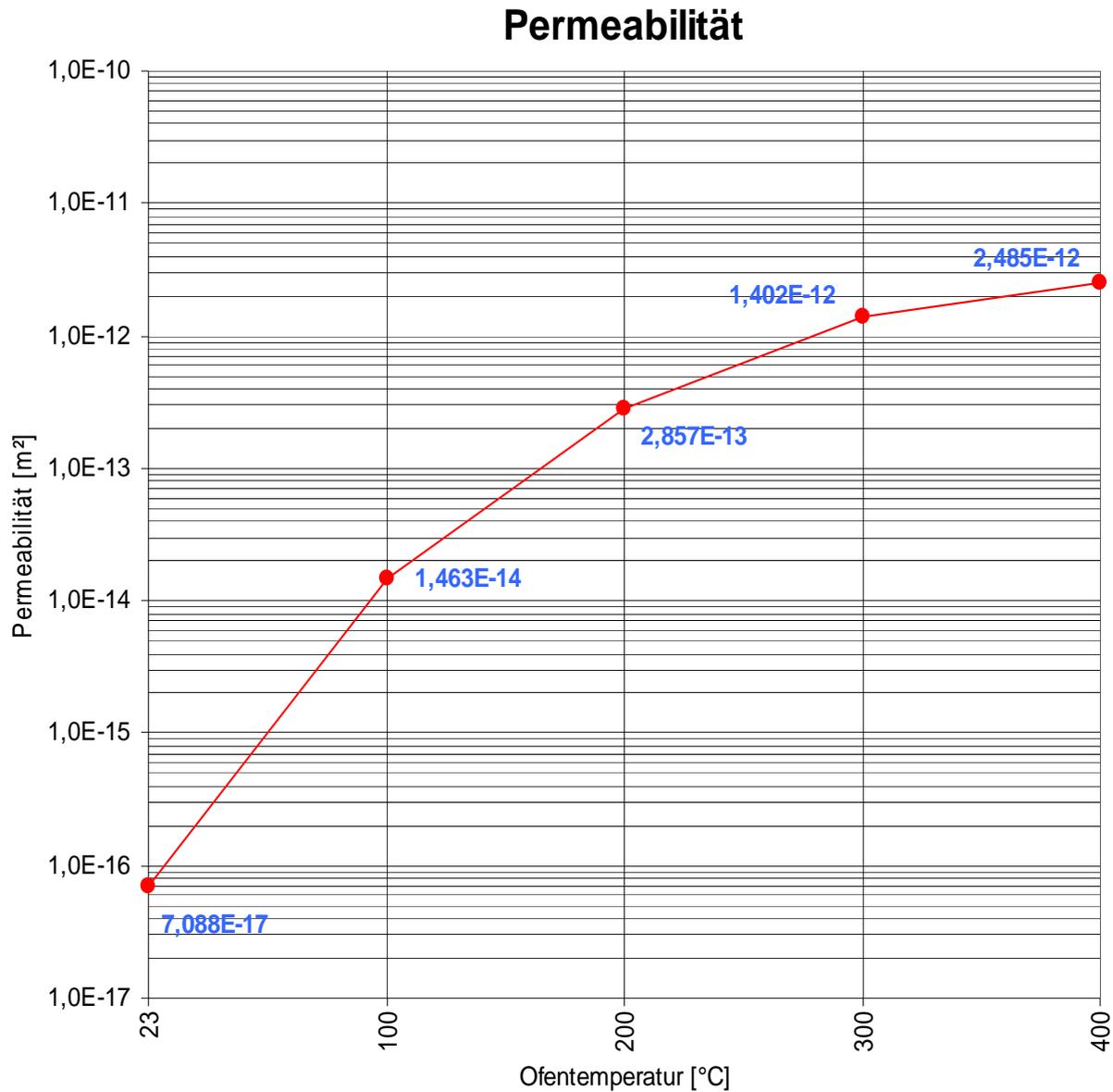


Abbildung 5-5: Tabelle zum Versuch mit Haltezeiten von bis zu 24 Stunden

Eine Änderung des Durchflusses konnte bei allen getesteten Temperaturniveaus bei einem Differenzdruck $\Delta p = 2\text{bar}$ bereits nach ungefähr zwei Stunden nicht mehr festgestellt werden. Hingegen hat sich der Differenzdruck noch nach sechs Stunden verändert. Betrachtet man die

Zahlenflut genauer, so stellt man fest, dass Haltezeiten von sechs bis acht Stunden nötig sind um einen konstanten Differenzdruck und einen ausreichend exakten Wert für die Permeabilitätsmessung ermitteln zu können.

Zu erklären ist dieser Umstand einerseits sicher damit, dass sich erst eine einigermaßen laminare Strömung einstellen muss, was nur durch eine Sättigung der Probe mit dem durchströmenden Medium zustande kommen kann. Weiters können noch Veränderungen in der Porenstruktur durch Verlegen von Poren mit Feinstteilchen oder auch ein Freiblasen von Luftkanälen eine Veränderung der Durchlässigkeit hervorrufen.

Es ist jedenfalls zu beachten, dass ein exakter Wert bezüglich der Permeabilität sich erst nach längerer Haltezeit einstellt. Es scheinen erst Haltezeiten von mindestens sechs bis acht Stunden eine ausreichende Genauigkeit für die Permeabilitätsmessung zu liefern.

5.3 Einfluss des Erhitzens und Abkühlens

Für die Frage des Verhaltens der Permeabilität beim Erhitzen und anschließenden Abkühlen der Proben wurde eine Versuchsreihe gemacht, bei der die Permeabilität der eingebauten Probe bei Raumtemperatur, einhundert, zweihundert, dreihundert und vierhundert Grad Celsius gemessen und im Anschluss beim Abkühlen in den gleichen Schritten gemessen wurde. Durch einen Vergleich der gemessenen Werte bei den verschiedenen Temperaturniveaus kann eine Aussage über den Temperatureinfluss auf die Permeabilität getroffen werden.

Es wurde erwartet, dass sich die Permeabilität durch das Aufheizen vergrößert, was ja auch schon vorangegangene Versuchsreihen bewiesen haben. Es wurde auch erwartet, dass sich die Permeabilität während des Abkühlvorgangs nicht mehr maßgeblich verändert.

Auch für diesen Versuch wurden drei Probekörper des Normalbeton 1 in den oben erwähnten Ringen betoniert und entsprechend mindestens 28 Tage gelagert um eine Festigkeit zu erlangen, die den Anforderungen entspricht. Es wurden auch hier die Dichtungsringe aus der Hitzeschutzplatte ausgeschnitten und mit der Probe in die Versuchsanlage eingebaut. Als Druckbeaufschlagung wurden die als günstig ermittelten $\Delta p = 2 \text{ bar}$ gewählt. Als Last, mit

welcher die Stempel auf die Ringe wirken wurden 2to aufgebracht. Der Rotameter wurde so gewählt und das Druckminderungsventil so eingestellt, dass sich ein für den Versuch günstiger Wert bei den Rotametern einstellte.

Nun wurde nach acht Stunden eine Permeabilitätsmessung bei Normaltemperatur durchgeführt. Die nächste Messung wurde bei 150°C und acht Stunden Haltezeit, die nächste bei 250 und schließlich bei 400°C und jeweils ca. acht Stunden Haltezeit gemacht. Nach der Messung bei 400°C wurde der Temperaturregler für den Ofen auf 250°C eingestellt. Nach mehr als acht Stunden wurde gemessen. Derselbe Vorgang wurde bei dann noch bei 250°C und bei Normaltemperatur wiederholt.

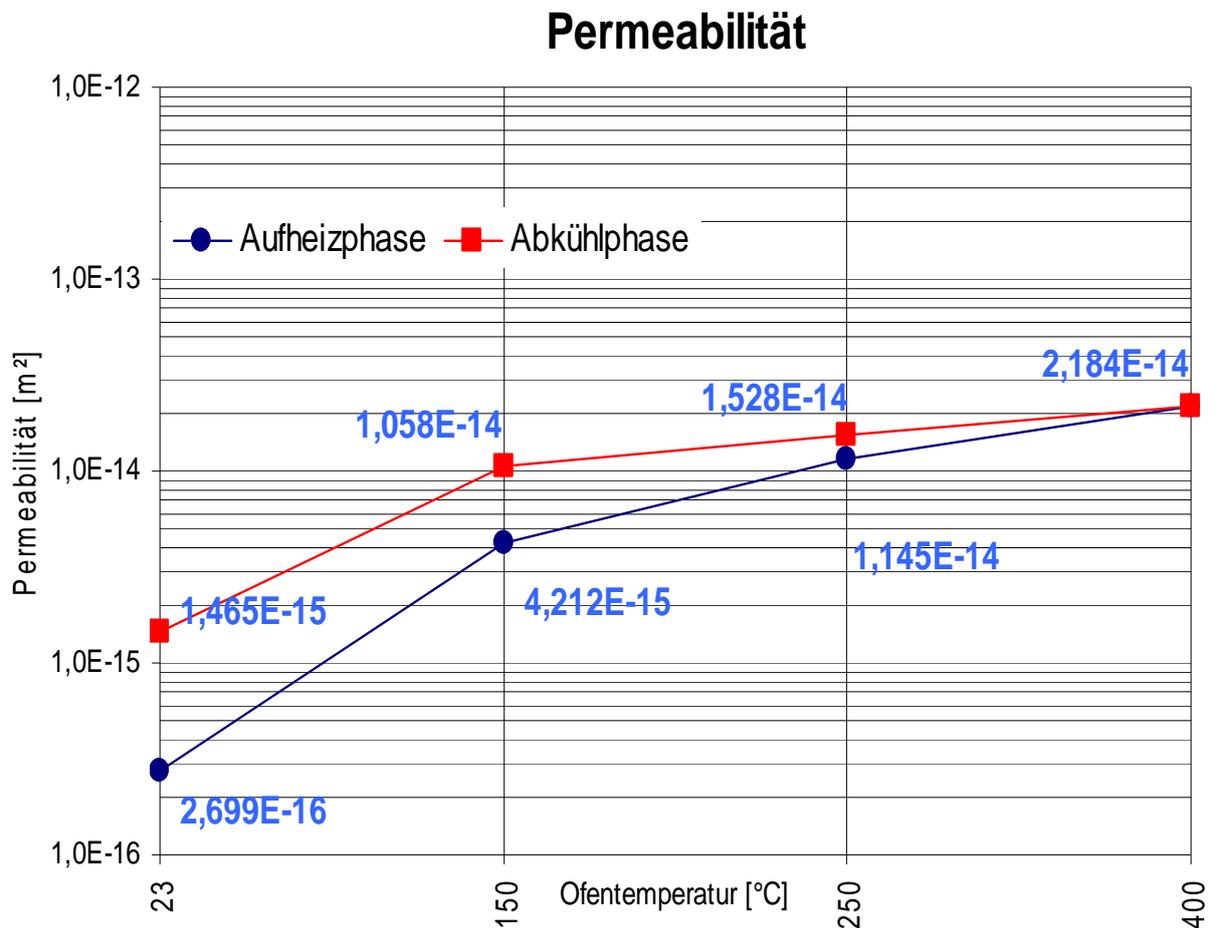


Abbildung 5-6: Diagramm zur Versuchsreihe

Die Erwartungen wurden bei diesem Versuch nur zum Teil bestätigt. Entgegen den Erwartungen unterscheidet sich die Kurve beim Aufheizvorgang von jener vom Abkühlvorgang relativ deutlich. Erwartet wurde jedoch, dass sich die Kurve der Abkühlphase relativ flach ist. Dem ist allerdings nicht so. Bei den Ergebnissen ist zwar die Tendenz zu erkennen, dass sich die Permeabilität nach dem Abkühlvorgang im Vergleich zu dem Wert vor dem Aufheizen vergrößert und zwar in Bereichen $2,699 \times 10^{-16} \text{m}^2$ bis zu $1,465 \times 10^{-15} \text{m}^2$ bei Raumtemperatur. Es entsteht also wie hier im angeführten Versuch eine Differenz der Permeabilität bei Normaltemperatur vor und nach dem Erhitzen von $1,2151 \times 10^{-15} \text{m}^2$. Es ist aber eine weitaus größere Differenz zwischen der Permeabilität bei Raumtemperatur nach Erhitzen und beispielsweise beispielsweise wie hier bei 400°C . Hierbei handelt es sich um eine Differenz von $2,0355 \times 10^{-14} \text{m}^2$.

Die Differenz zwischen den Permeabilitätswerten bei Raumtemperatur vor und nach dem Erhitzen ist also jedenfalls kleiner als die Differenz zwischen den Werten bei Raumtemperatur nach Erhitzen und bei 400°C .

Tatsache ist, dass die Differenz der Permeabilität bei Raumtemperatur zu der bei einem höheren Temperaturniveau nicht vernachlässigbar ist. Eine Messung der Permeabilität, die sich auf ein bestimmtes Temperaturniveau bezieht, darf also auch nur bei diesem Temperaturniveau ermittelt werden kann.

5.4 Messung der Absolutwerte der Permeabilität eines Normalbetons

Es soll einerseits untersucht werden, ob die Korngröße tatsächlich Auswirkungen auf die Permeabilität hat. Andererseits soll auch untersucht werden, ob sich die Permeabilität eines hochfesten Betons im Vergleich zu einem Normalbeton unterscheidet. Es wird erwartet, dass aufgrund der wesentlich höheren Dichte und des damit verbundenen geringeren Porenvolumens die Permeabilität deutlich geringer ist.

Zur Messung der Permeabilität des Normalbeton 1 wurden drei Proberinge mit der Betonmischung für den Normalbeton 1 (GK = 16mm) hergestellt. Es wurde also dasselbe Mischungsrezept verwendet, das auch schon für die Probenringe der Versuchsreihe 1 genutzt wurde. Auch hier wurde der Beton entsprechend unter Normalbedingungen gelagert und nach den vorgeschriebenen 28 Tagen die Versuchsreihe gestartet. Als Temperaturniveaus für die

Messungen wurden Raumtemperatur, einhundert, zweihundert, dreihundert und vierhundert Grad Celsius gewählt. Die Probe wurde mit 2bar beaufschlagt. Die Rotameteranlage wurden entsprechend eingestellt und die Druckmessapparatur mit dem PC zur Aufzeichnung und leichten Ablesung verbunden. Als Haltezeiten wurden sechs bis acht Stunden gewählt.

Die Werte der Durchflussmessungen wurden ebenso, wie die Werte der Differenzdruckmessungen aufgezeichnet. Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 stellen diese in Bezug zur Ofentemperatur grafisch dar.

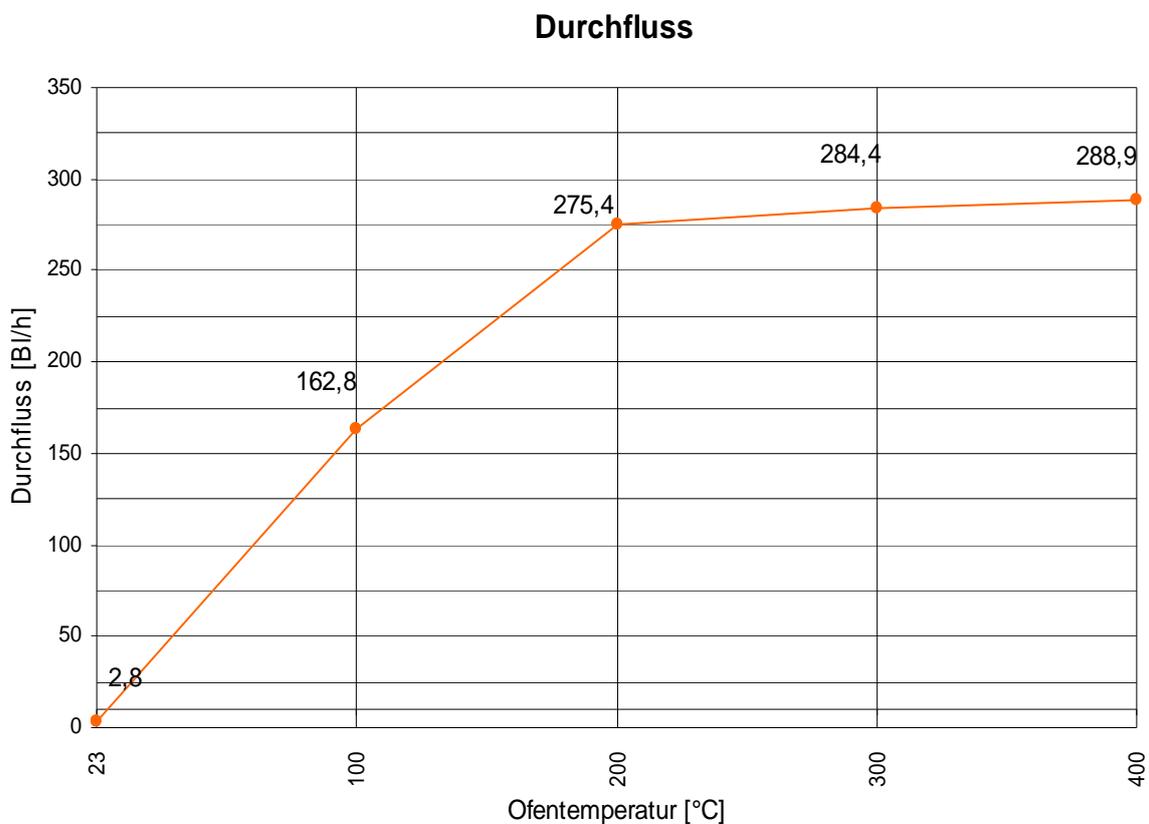


Abbildung 5-7: Gemittelte Absolutwerte der Durchflussmessung des Normalbeton 1

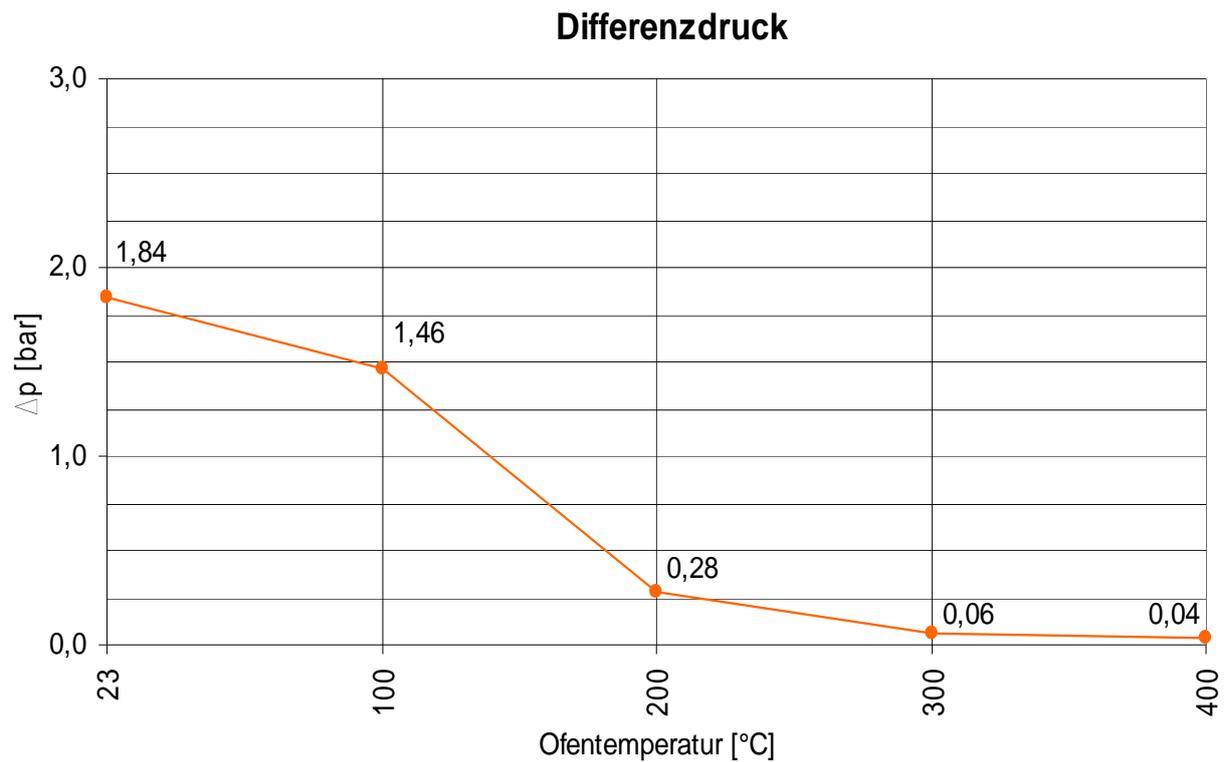


Abbildung 5-8: Gemittelte Absolutwerte der Differenzdruckmessung des Normalbeton 1

Berücksichtigt man die gesamten Parameter und setzt sie ebenso wie die Werte aus den Messungen in die in Kapitel 2.2 hergeleitete Formel ein, so bekommt man die in der Grafik (Abbildung 5-9) dargestellten Absolutwerte der Gaspermeabilität für den Normalbeton 1.

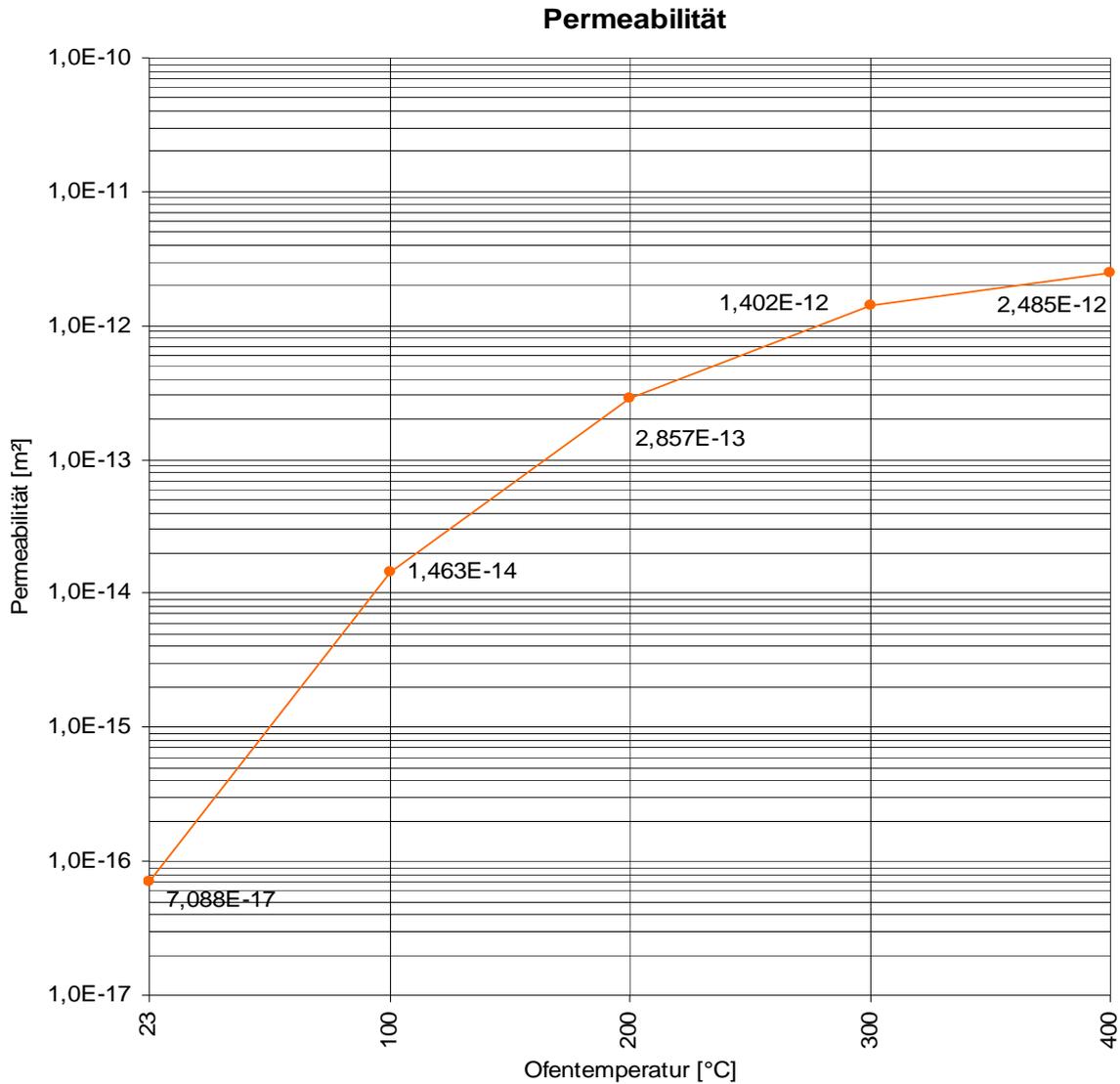


Abbildung 5-9: Absolutwerte der Permeabilität des Normalbeton 1 (GK = 16mm) nach 28 Tagen Lagerung

5.5 Messung der Absolutwerte der Permeabilität eines weiteren Normalbetons mit kleineren Zuschlägen

Zur Durchführung des Versuchs wurden diesmal drei Proberinge mit Normalbeton mit dem Rezept für den Normalbeton 1 (GK = 4mm) hergestellt. Auch hier wurde der Beton

entsprechend unter Normalbedingungen gelagert und nach den vorgeschriebenen 28 Tagen die Versuchsreihe gestartet. Als Temperaturniveaus wurden diesmal einhundert, 105, zweihundert, dreihundert und vierhundert Grad Celsius gewählt. Die Probe wurde mit 2bar beaufschlagt. Die Rotameteranlage wurden entsprechend eingestellt und die Druckmessapparatur mit dem PC zur Aufzeichnung und leichteren Ablesung verbunden. Als Haltezeiten wurden sechs bis acht Stunden gewählt.

Die Werte der Durchflussmessungen wurden ebenso, wie die Werte der Differenzdruckmessungen aufgezeichnet. Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 stellen diese in Bezug zur Ofentemperatur grafisch dar.

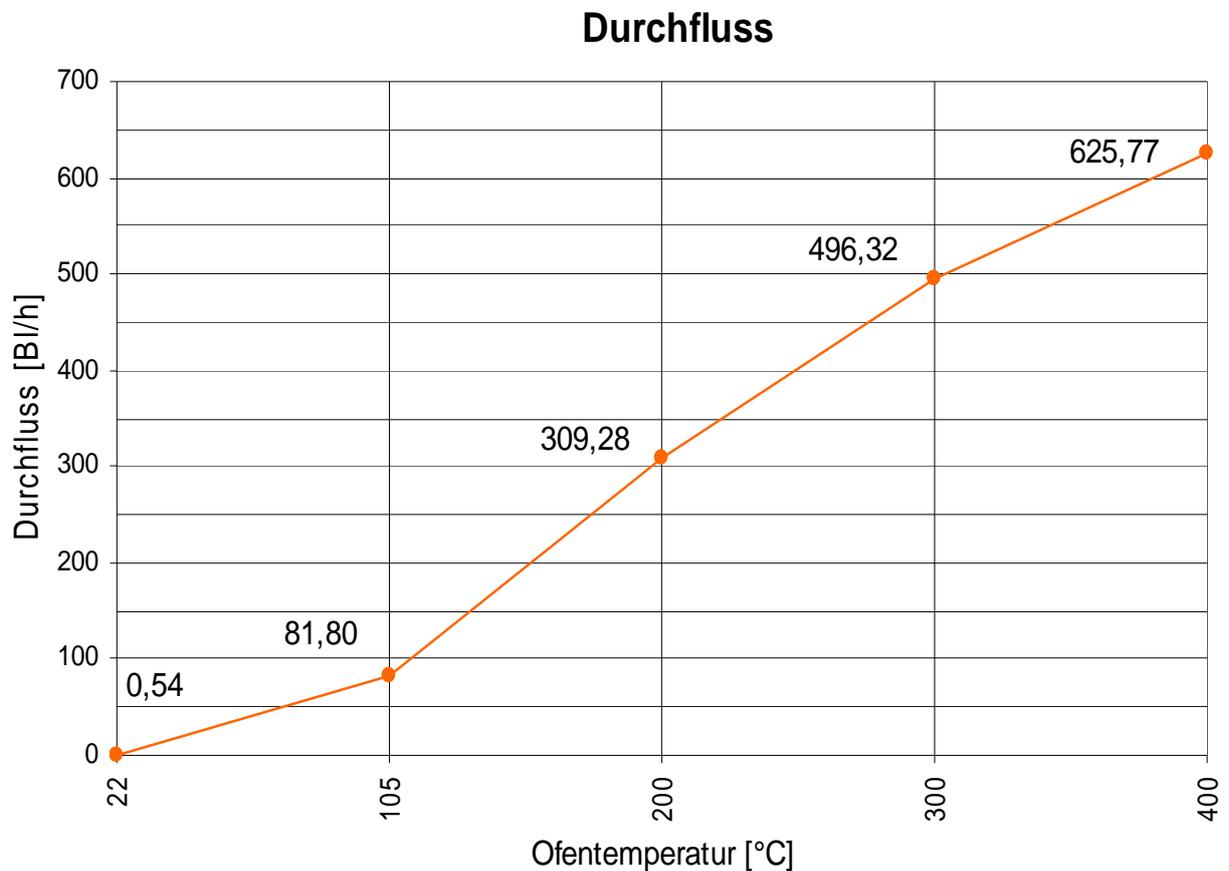


Abbildung 5-10: Gemittelte Absolutwerte der Durchflussmessung des Normalbeton 2

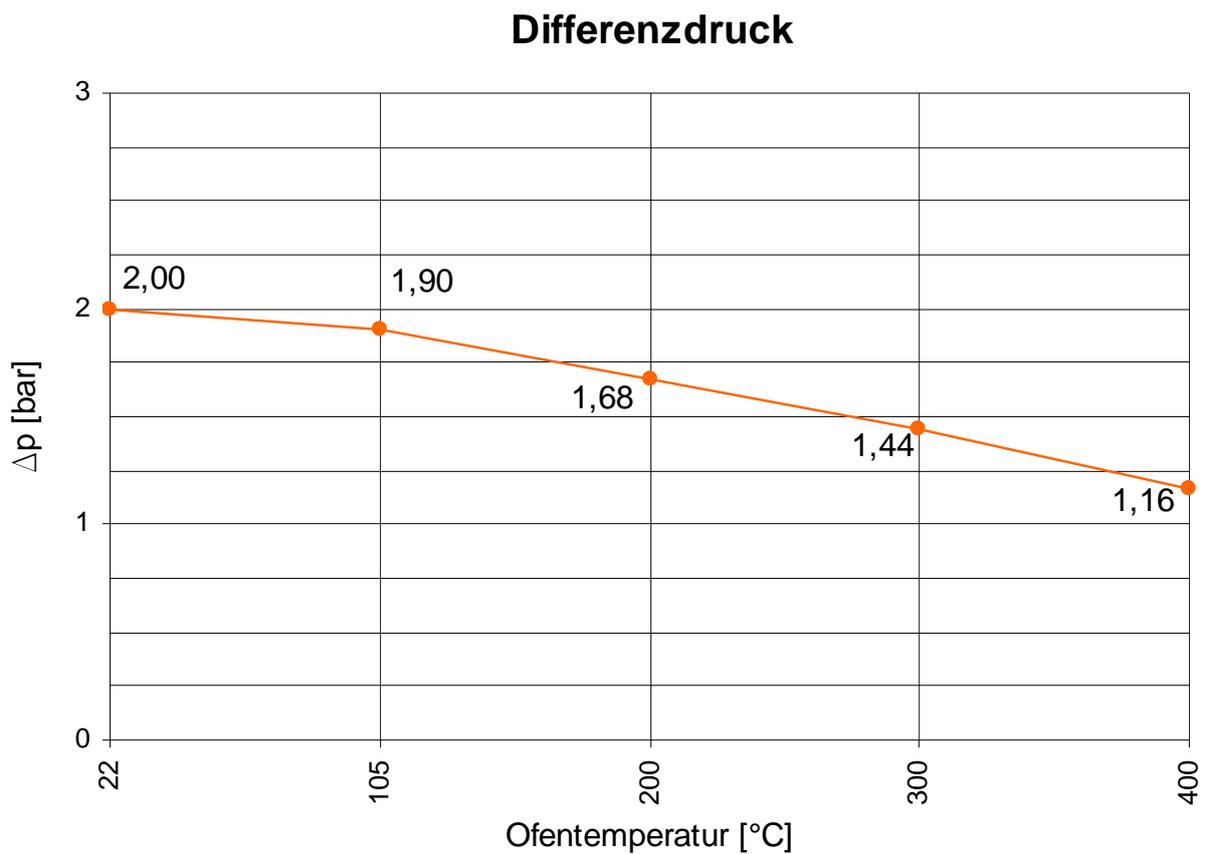


Abbildung 5-11: Gemittelte Absolutwerte der Differenzdruckmessung des Normalbeton 2

Berücksichtigt man die gesamten Parameter und setzt sie ebenso wie die Werte aus den Messungen in die in Kapitel 2.2 hergeleitete Formel ein, so bekommt man die in der Grafik (Abbildung 5-9) dargestellten Absolutwerte der Gaspermeabilität für den Normalbeton.

Permeabilität

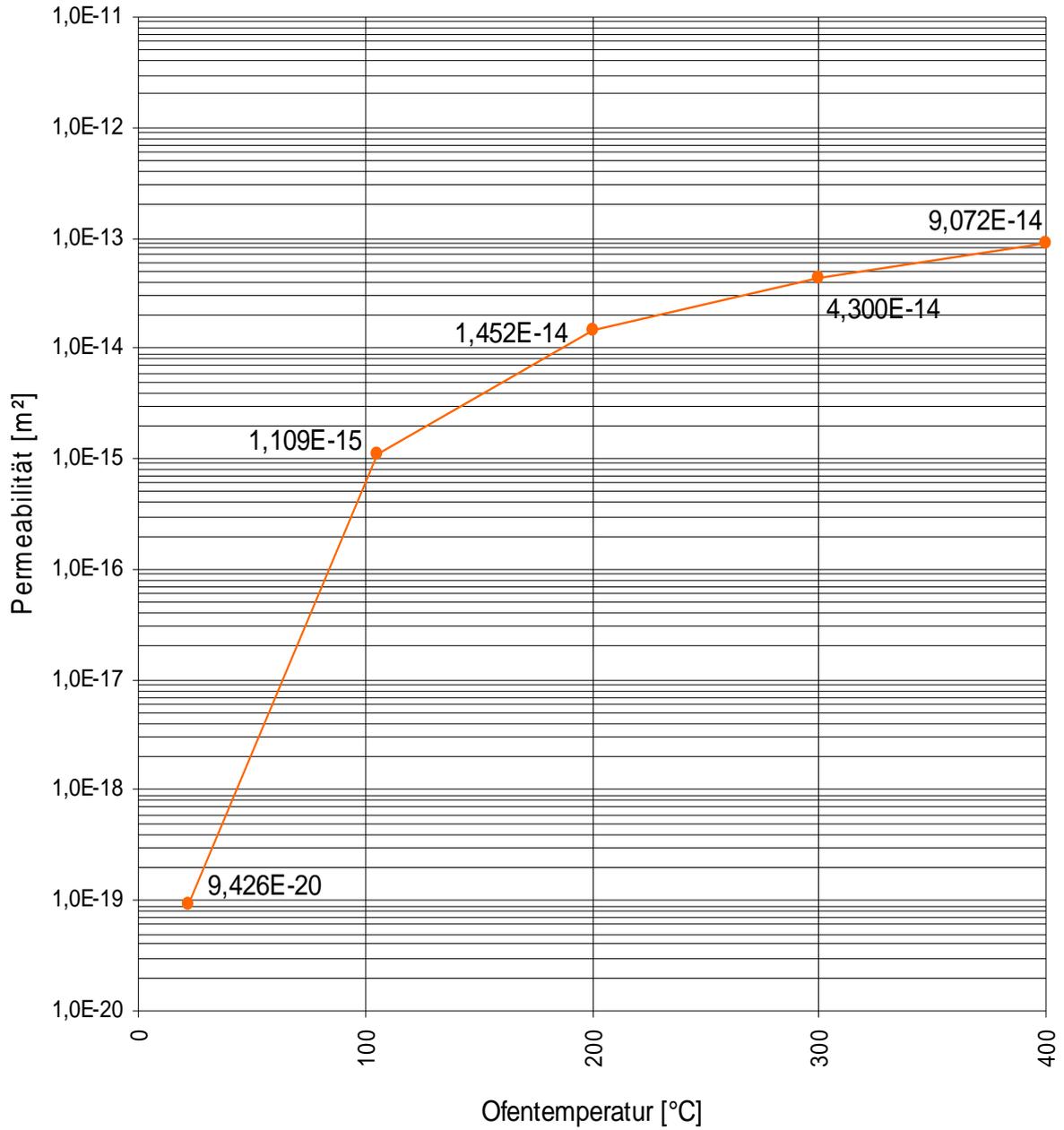


Abbildung 5-12: Absolutwerte der Permeabilität des Normalbetons 2 (GK = 4mm) nach 28 Tagen Lagerung

5.6 Messung der Absolutwerte der Permeabilität eines hochfesten Betons

Der Frischbeton wurde wie bei jedem Versuch in drei Probenringe eingebaut und unter Normalbedingungen gelagert. Nach der vorgeschriebenen Aushärtungszeit von mindestens 28 Tagen wurde der Probekörper mit den oben beschriebenen Dichtungsringen in den Ofen eingebaut, mit zwei Tonnen eingespannt und mit zwei bar Druckluft beaufschlagt. Die Rotameter wurden ordnungsgemäß eingestellt und die Druckmessapparatur mit dem PC verbunden.

Für die Messpunkte bezüglich der Temperatur wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit dieselben wie bei der vorangegangenen Versuchsreihe über die Absolutwerte der Permeabilität eines Normalbetons gewählt, nämlich Raumtemperatur, einhundert, zweihundert, dreihundert und vierhundert Grad Celsius. Bei diesem Versuch mit dem hochfesten Beton wurden die Haltezeiten mit sechs bis acht Stunden gewählt.

Bei der Durchflussmessung stellte sich wie erwartet eine mit der Temperatur ansteigende Durchflusskurve ein (Abbildung 5-13).

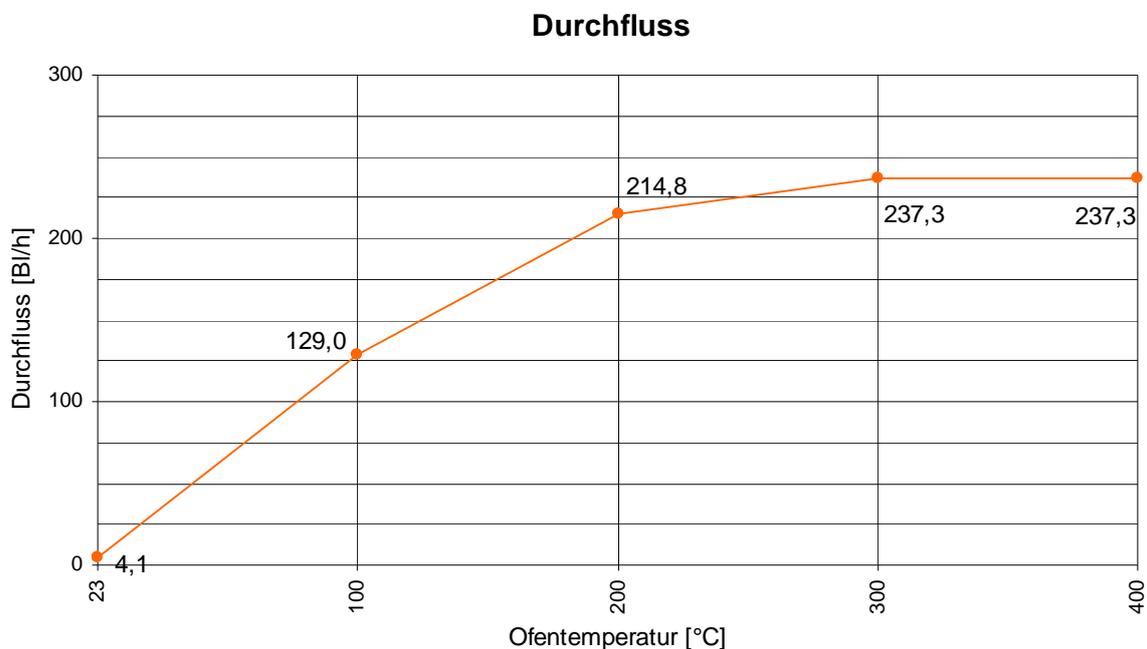


Abbildung 5-13: Gemittelte Absolutwerte der Durchflussmessungen des hochfesten Betons

Bei der Differenzdruckmessung hingegen ist der Abfall des Druckes mit steigender Temperatur wie immer deutlich erkennbar (Abbildung 5-14).

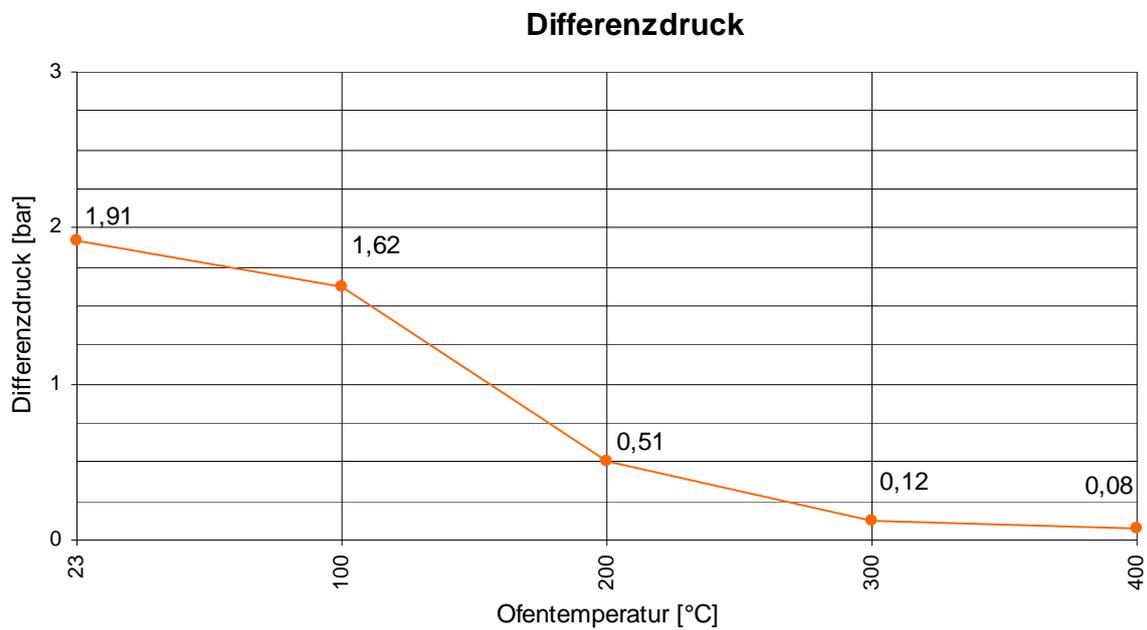


Abbildung 5-14: Gemittelte Absolutwerte der Differenzdruckmessung des hochfesten Betons

Setzt man die erhaltenen Ergebnisse und die restlichen Parameter in die Formel ein, so erhält man folgende Kurve für die Absolutwerte der Permeabilität eines hochfesten Betons (Abbildung 5-15).

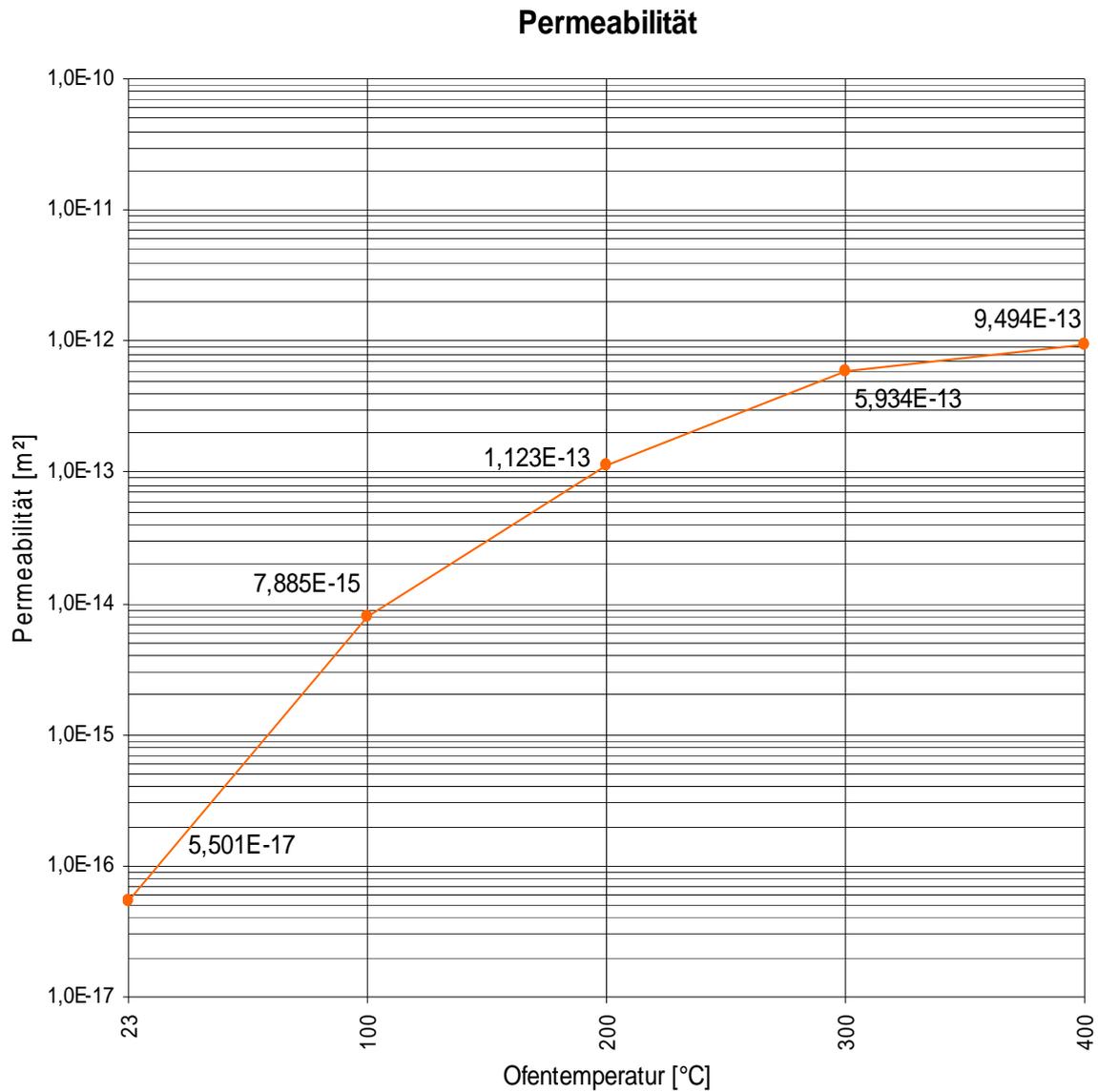


Abbildung 5-15: Absolutwerte der Permeabilität des hochfesten Betons

5.7 Vergleich der Absolutwerte

5.7.1 Vergleich der Normalbetone

In Abbildung 5-16 werden die Kurven der zwei Normalbetone übereinandergelegt. Auffallend ist, dass die Kurve des Normalbeton 1 über der des Normalbeton 2 liegt. Qualitativ jedoch die

beiden Kurven sehr ähnlich sind. Die größte Differenz ist für den Ausgangswert bei 20°C festzustellen. Hier liegt der Normalbeton 2 noch weiter unter dem Normalbeton 1.

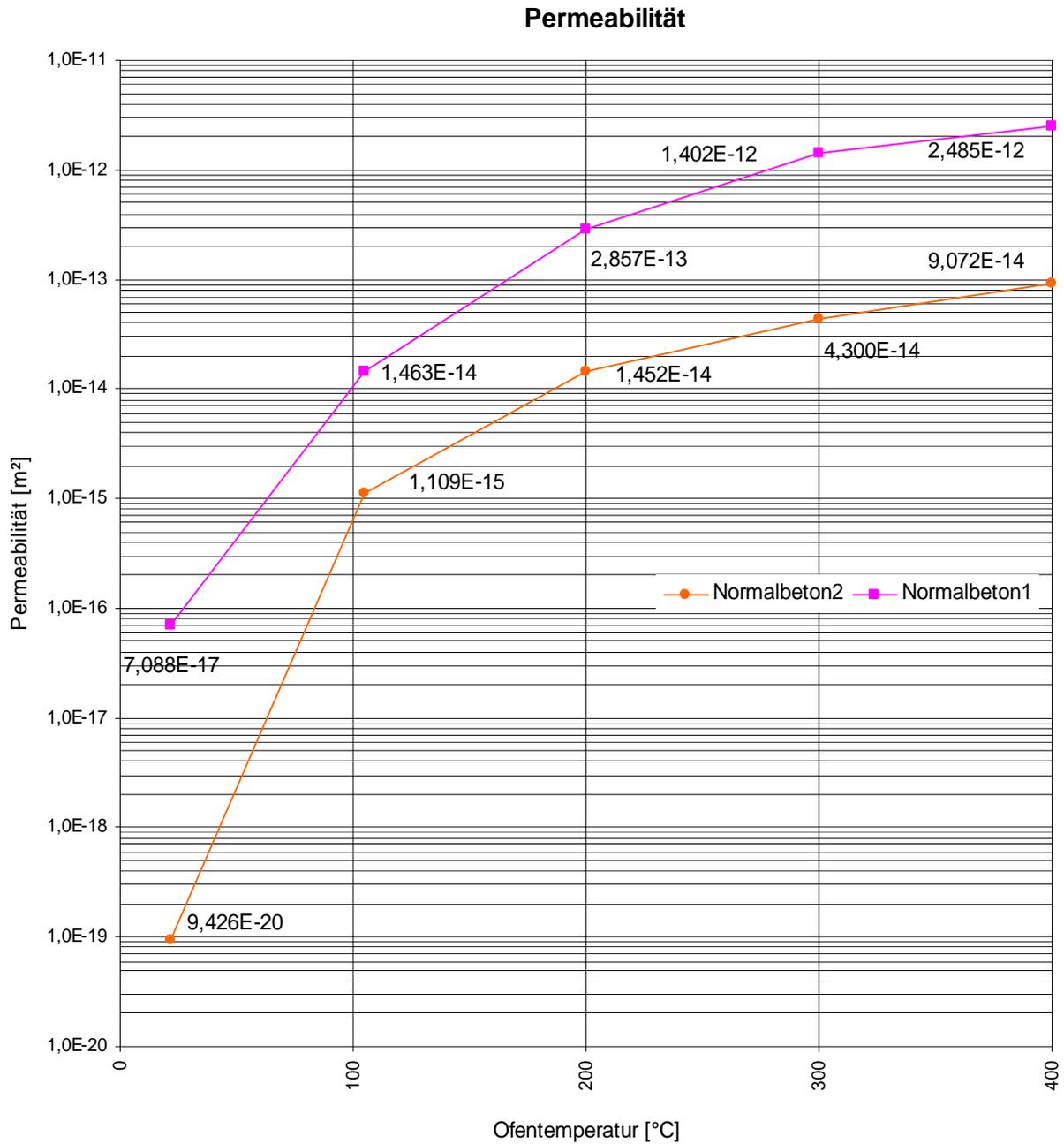


Abbildung 5-16: Vergleich Normalbeton 1 und Normalbeton 2

Verdeutlichen lässt sich die Ähnlichkeit der Messkurven durch die Darstellung der Differenzen in einem eigenen Diagramm (Abbildung 5-17).

Differenzen der Permeabilitätswerte

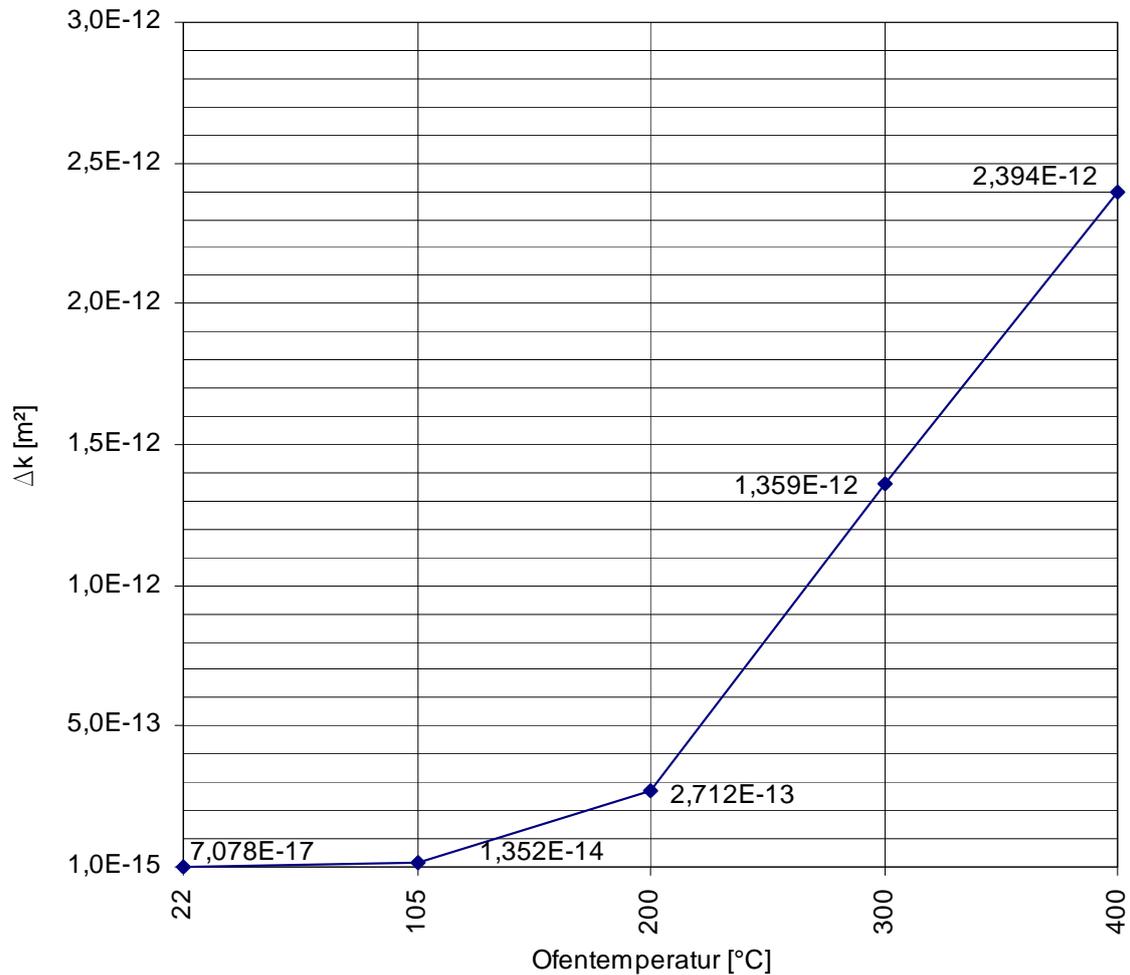


Abbildung 5-17: Differenzen der Permeabilitätswerte von Normalbeton 1 und Normalbeton 2

Betrachtet man die Werte so lässt sich eine Vergrößerung der Differenzen erkennen. Interessanterweise steigern sich die Differenzen jedoch ab ungefähr 200°C stärker.

Eine Erklärung dieses Umstandes dürfte sein, dass in den unteren Bereichen der Erwärmung wesentliche Kapillargänge nur durch Verdampfen des gebundenen Wassers erschlossen werden, wohingegen in den höheren Bereichen der Zuschlagsanteil ausschlaggebend zu sein scheint. So wurde beim Normalbeton 2 80% Zuschlag verwendet, wobei beim Normalbeton 1 rund 10% weniger Zuschlag verwendet wurde. Bei höheren Temperaturen entstehen daher beim Beton mit höherem Zuschlagsanteil mehr Risse, was sich direkt auf die Permeabilität auswirkt.

5.7.2 Vergleich Normalbeton 1 mit hochfestem Beton

Als zweiter Schritt wird das Verhältnis der Ergebnisse der Permeabilität zwischen dem Normalbeton 1 und dem hochfesten Beton untersucht (Abbildung 5-18). Es ergibt sich, dass die Werte des Normalbetons höher liegen als die des hochfesten Betons, was aufgrund der Zusammensetzung und der höheren Festigkeit auch zu erwarten war. Die Qualitäten der Kurven haben wiederum eine sehr große Ähnlichkeit.

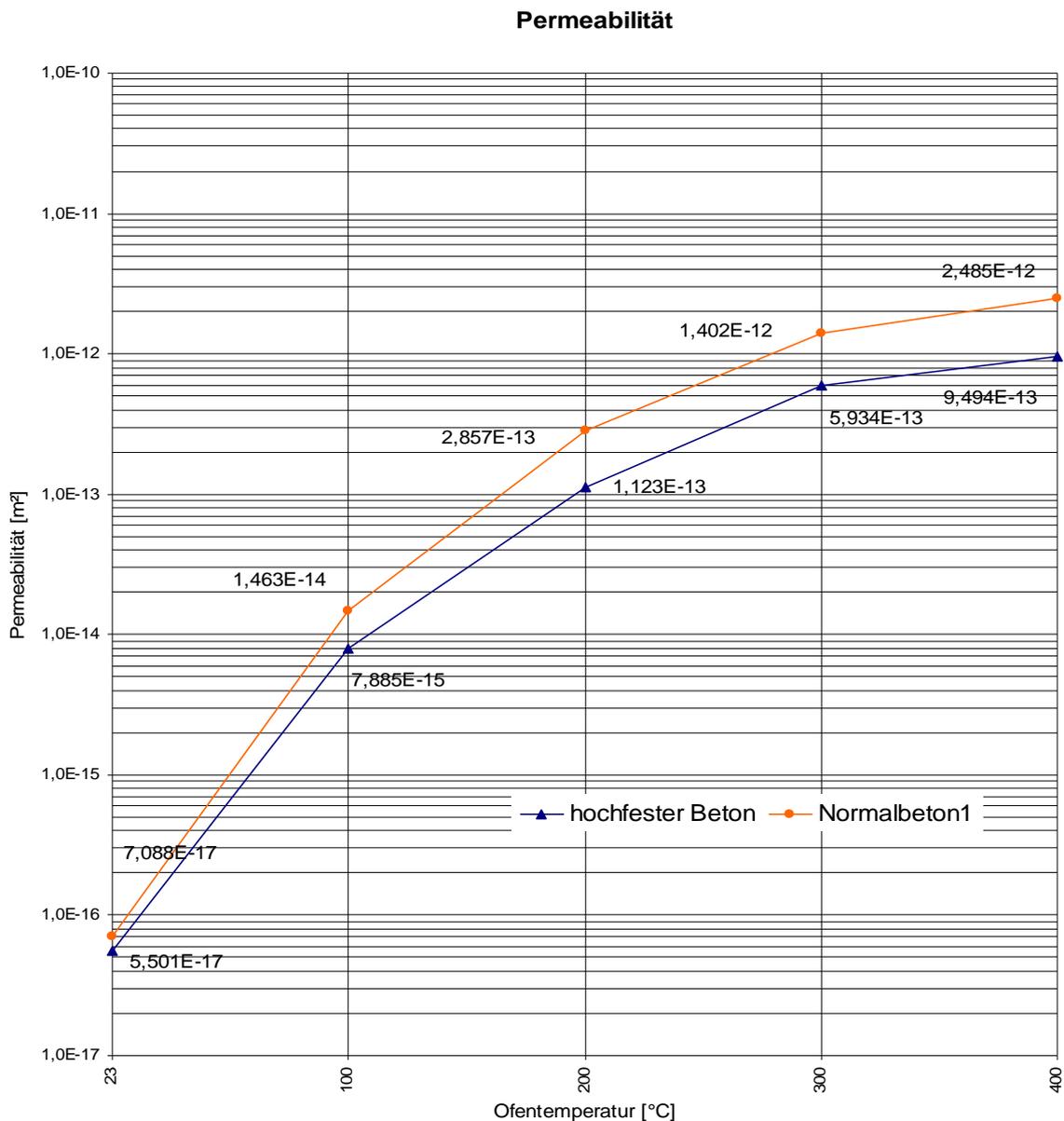


Abbildung 5-18: Vergleich der Permeabilitäten von Normalbeton 1 mit hochfestem Beton

Auch hier soll untersucht werden, wie sich die Kurven zueinander, also die Differenzen der Werte bei den einzelnen Temperaturniveaus verhalten (Abbildung 5-19).

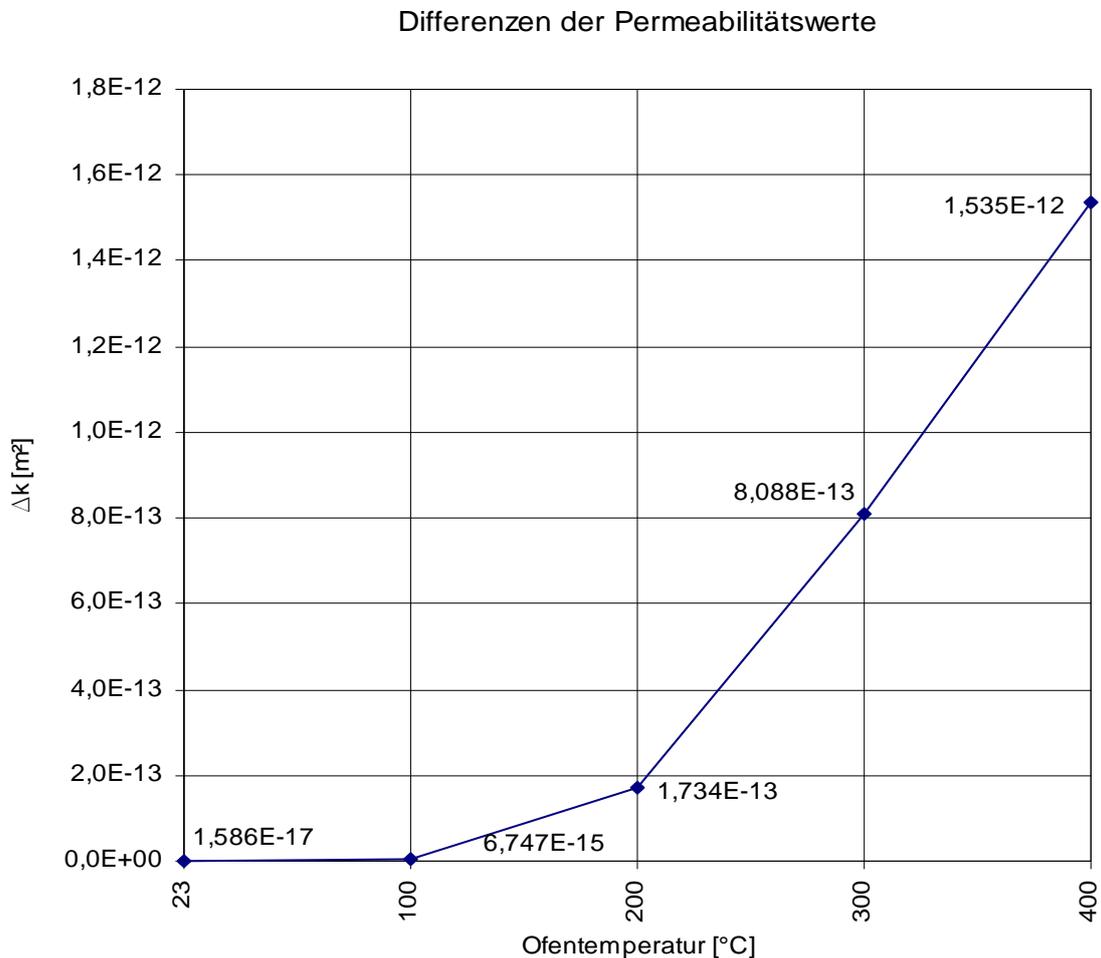


Abbildung 5-19: Differenzen der Permeabilitätswerte der Normalbetons 1 zum hochfesten Beton

Die Ursache für die Differenz der Werte liegt im Unterschied der Porenstruktur der Betone. Sieht man sich die Ergebnisse der Porosimetrie (Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4) an, so ist zu erkennen, dass der hochfeste Beton eine deutlich dichtere Struktur aufweist als der Normalbeton. Hochfester Beton weist aufgrund der Zugabe von Microsilica einen geringeren W/B-Wert, eine höhere Dichte und dadurch auch einen viel geringeren Porenanteil auf als Normalbeton. Es können sich also weniger Kanäle und Verbindungen, durch welche die Luft hindurch dringen kann, ausbilden. Das Ergebnis ist die hier aufgezeigte geringere Permeabilität des hochfesten Betons.

6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Ziel dieser Arbeit war es die bestehende Anlage zur Messung der Gaspermeabilität von Beton bei höheren Temperaturzuständen, wie sie *Gornik* in seiner Arbeit ‚Einfluss der Temperatur auf die Permeabilität von Beton‘ (*Gornik, /3/*) entwickelt hatte weiterzuentwickeln und zu optimieren. Verschiedene Probleme waren damals und in der praktischen Anwendung der Messanlage aufgetreten und aufgefallen. Unter diesen Gesichtspunkten wurden Ideen entwickelt und untersucht und nicht zuletzt durch Versuche bestätigt.

Um zu Ergebnissen zu gelangen wurden die Versuche in zwei Versuchsreihen gegliedert. Die erste Versuchsreihe sollte dabei helfen Ideen, Verbesserungen und Probleme, die in direktem Zusammenhang mit der verwendeten Anlage stehen zu klären. In der zweiten Versuchsreihe wurde auf Themen eingegangen, die allgemein die Gaspermeabilität bei unterschiedlichen Temperaturniveaus betreffen.

So wurde im ersten Schritt die Durchflussmessung durch den Einsatz mehrerer Rotameter auf eine hohe Genauigkeit und Robustheit im Betrieb gebracht. Ermöglicht wird das durch verschiedene Rotameter mit unterschiedlichen Messbereichen, die in gestaffelter Form angeordnet sind. Auch die an sich sehr feuchte Luft nach dem Passieren der heißen Probe wurde durch die Entwicklung und den Einbau einer Kühlfalle soweit heruntergekühlt und getrocknet, dass die Messungen der Rotameter nunmehr verlässlich Ergebnisse liefern. Es wurde die Dichtheit der gesamten Anlage verbessert, sodass auch die gemessenen Werte tatsächlich dem Luftstrom entstammen, der die Probe passiert hat und nicht durch undichte Stellen und Druckverlust verfälscht werden. Weiters wurde auch ein idealer Vordruck von $p_1 = 2\text{bar}$ gefunden, der eine hohe Genauigkeit der Messergebnisse ermöglicht jedoch keinen Schaden an der Anlage verursacht.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden auch Versuche gemacht und herausgefunden, dass erst Haltezeiten von sechs bis acht Stunden auf einem Temperaturniveau vonnöten sind, um einen verlässlichen Absolutwert der Gaspermeabilität bei eben dieser Temperatur zu bekommen. Diese Versuche haben auch einen Einblick gegeben wie träge sich die Permeabilität bei steigender Temperatur verhält. Ein zentrales Thema war es auch herauszufinden, ob sich die Werte beim Erhitzen und anschließenden Abkühlen verändert haben und in welcher Relation

die Werte bei Normaltemperatur vor und nach dem Erhitzen zu den gemessenen Werten bei einem bestimmten Temperaturniveau stehen. Es wurden auch Versuche gemacht, um herauszufinden ob die gesamte Anlage Unterschiede bei unterschiedlichen Betonrezepturen messen kann, was auch auf die Genauigkeit der Anlage Rückschlüsse zulässt und wie die verschiedenen Rezepturen Einfluss auf die Qualität der Messkurven hat. Hierzu wurden Betonrezepturen mit unterschiedlichen Zuschlagsgrößen (GK4mm bzw. GK16mm) untersucht und auch entsprechende Unterschiede in den Permeabilitätswerten gemessen.

Die Anlage ist durch diese Verbesserungen wesentlich genauer geworden und auch die herausgefundenen Bedingungen, unter denen die Versuche durchgeführt werden, tragen zur Steigerung der Messgenauigkeit bei.

Ausblick

Aufgrund dieser Verbesserungen kann die Gaspermeabilität von Beton bei höheren Temperaturzuständen weiter untersucht und erforscht werden. Es wäre interessant genau zu untersuchen, welche Betone sich wie bei höheren Temperaturen verhalten. Wie Faserbetone im Vergleich zu Normalbetonen ihre Permeabilität verändern oder wie andere Zuschläge auf die gemessenen Werte Einfluss nehmen. Betone unterschiedlicher Festigkeitsklassen können untersucht werden. Wie verhält sich die Gaspermeabilität eines Betons unter langer aber konstanter Temperatureinwirkung? Auch die Frage nach der tatsächlichen dynamischen Entwicklung der Permeabilitätswerte bei unterschiedlich raschen Temperaturanstiegen scheint interessant.

Weitere Untersuchungen, die allerdings eine Weiterentwicklung der Anlage nötig machen würden liegen auf der Hand. Höhere Temperaturen oder auch ein höherer Vordruck wären zu untersuchen. Für Versuche bei noch höheren Temperaturen wäre sicherlich eine Adaptierung der Anlage nötig. Bei höheren Temperaturen können zum derzeitigen Ausbaugrad eventuell Verbindungen aufgehen und die Dichtheit der Anlage kann nicht mehr garantiert werden. Auch die Stahlringe selbst werden an ihre Grenzen stoßen. Auch Versuche bei weit höherem Druck in Bereichen über die hier verwendeten Drücke hinaus wären interessant zu verfolgen. Doch auch hierzu müssten ganz andere Verbindungen und Anschlüsse und vielleicht auch Probeformen verwendet und entwickelt werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Weiterentwicklung der Anlage im Zuge dieser Arbeit viele Probleme beseitigt hat und hierdurch der Weg geebnet ist, weitere Forschung im Bereich der Gaspermeabilität von Betonen bei hohen Temperaturen und Drücken zu betreiben.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Anteil der Poren im Zementstein in Abhängigkeit vom W/Z-Wert nach beendeter Hydratation (nach <i>Rüsch</i>)	11
Abbildung 2-2: Verhältnis W/Z-Wert zum Volumen des Wassers und des Zements (<i>Gornik, /3/</i>)	13
Abbildung 2-3: Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag (<i>Schneider, /12/</i>)	14
Abbildung 2-4: Bezogener Hochtemperaturrelastizitätsmodul von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag bei verschiedenen Vorlasten nach Erhitzen (<i>Schneider, /12/</i>) ..	15
Abbildung 2-5: Thermische Dehnung in Abhängigkeit der Temperatur bei verschiedenen Zuschlagsarten und als Vergleich bei Zementstein (<i>Schneider, /1/</i>)	19
Abbildung 2-6: Ablaufschema des Luftstroms und Anordnung der Messapparaturen.....	24
Abbildung 2-7: Zusammenhang zwischen k_{app} mit k_{int} nach <i>Klinkenberg</i> (<i>Picandet, /11/</i>).....	26
Abbildung 2-8 Prüfanordnung nach der Cembureau-Methode (Quelle, /6/)	28
Abbildung 2-9: Schema der Prü fzelle der Cembureau.Methode (Quelle, /10/).....	28
Abbildung 2-10 Torrent-Permeability-Tester (Quelle: /15/).....	29
Abbildung 2-11: Torrent-Permeability-Tester, schematisch und Ansicht (Quelle: /18/).....	30
Abbildung 2-12: Bohrlochmethode (Quelle: /6/)	31
Abbildung 2-13: Versuchsschema (Quelle: /2/).....	32
Abbildung 2-14: Versuchsschema (<i>Leithner, /2/</i>).....	33
Abbildung 2-15: Messanlage zur Bestimmung der Permeabilität unter Temperaturbelastung	35
Abbildung 2-16: Schema Versuchsanlage	36
Abbildung 2-17: Elektroofen	37
Abbildung 2-18: Werkstattpresse mit eingebautem Ofen	39
Abbildung 2-19: Filterregler mit Druckübersteuerungsmodul.....	40
Abbildung 2-20: Druckmesssensor	41
Abbildung 2-21: elektronisches Stoffflussmessgerät (<i>Gornik, /3/</i>).....	42
Abbildung 2-22: Probenringe	43
Abbildung 3-1: Mixer.....	46
Abbildung 4-1: Probekörper für die Messung der Dichtigkeit der Anlage.....	56

Abbildung 4-2: Rotameter mit Verteiler und Reduzierventil.....	59
Abbildung 4-3: Kühlfalle	60
Abbildung 4-4: Ablaufschema der weiterentwickelten Anlage	61
Abbildung 4-5 Diagramm der unterschiedlichen Umrechnungsfaktoren in Bezug auf den Vordruck gegenüber dem atmosphärischen Druck	63
Abbildung 4-6 Kurven der Permeabilität bei unterschiedlichem Druck von Normalbeton 1..	64
Abbildung 5-1: TONI Technik Prüfmaschine zur einaxialen Druckfestigkeitsuntersuchung (Gornik, /3/).....	67
Abbildung 5-2: Porosimeter PASCAL 140 und PASCAL 440 (Gornik, /3/)	71
Abbildung 5-3: Ergebnisse aus der porosimetrischen Untersuchung <i>Normalbeton 1</i>	72
Abbildung 5-4: Ergebnisse aus der porosimetrischen Untersuchung <i>hochfester Beton</i>	73
Abbildung 5-5: Tabelle zum Versuch mit Haltezeiten von bis zu 24 Stunden	75
Abbildung 5-6: Diagramm zur Versuchsreihe	77
Abbildung 5-7: Gemittelte Absolutwerte der Durchflussmessung des Normalbeton 1.....	79
Abbildung 5-8: Gemittelte Absolutwerte der Differenzdruckmessung des Normalbeton 1 ...	80
Abbildung 5-9: Absolutwerte der Permeabilität des Normalbeton 1 (GK = 16mm) nach 28 Tagen Lagerung.....	81
Abbildung 5-10: Gemittelte Absolutwerte der Durchflussmessung des Normalbeton 2.....	82
Abbildung 5-11: Gemittelte Absolutwerte der Differenzdruckmessung des Normalbeton 2..	83
Abbildung 5-12: Absolutwerte der Permeabilität des Normalbetons 2 (GK = 4mm) nach 28 Tagen Lagerung.....	84
Abbildung 5-13: Gemittelte Absolutwerte der Durchflussmessungen des hochfesten Betons	85
Abbildung 5-14: Gemittelte Absolutwerte der Differenzdruckmessung des hochfesten Betons	86
Abbildung 5-15: Absolutwerte der Permeabilität des hochfesten Betons.....	87
Abbildung 5-16: Vergleich Normalbeton 1 und Normalbeton 2	88
Abbildung 5-17: Differenzen der Permeabilitätswerte von Normalbeton 1 und Normalbeton 2	89
Abbildung 5-18: Vergleich der Permeabilitäten von Normalbeton 1 mit hochfestem Beton ..	90
Abbildung 5-19: Differenzen der Permeabilitätswerte der Normalbetons 1 zum hochfesten Beton	91

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Hydratphasen des Zementsteins und ihre Phasenübergänge innerhalb eines Umsetzungsbereiches	18
Tabelle 2-2: Permeabilitätswerte für B35 – Betone bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ ($\Delta p = 1\text{bar}$) (<i>Schneider</i> ; /1/)	20
Tabelle 2-3: Permeabilitätswerte für B25 – Betone bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ ($\Delta p = 1\text{bar}$) (<i>Schneider</i> ; /1/)	20
Tabelle 2-4: Vorgeschlagene Richtwerte für die maximale Luftpermeabilität von geschalteten Flächen in Abhängigkeit der Expositionsklassen (<i>Jacobs</i> , /4/).....	21
Tabelle 2-5: Einfluss des W/Z-Wertes auf die Gaspermeabilität (<i>Hermann</i> , /6/).....	22
Tabelle 3-1: Betonrezeptur OPC-1	45
Tabelle 3-2: Betonrezeptur OPC-2.....	47
Tabelle 3-3: Betonrezeptur HPC	48
Tabelle 4-1: Umrechnungsfaktor x von Spannung [mV] auf Druck[bar]	63
Tabelle 5-1: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung von Normalbeton 1.....	68
Tabelle 5-2: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung von Normalbeton 2.....	68
Tabelle 5-3: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung des hochfesten Betons.....	69

9 Literatur

Nr.	Autor	Titel, Verlag, Auflage, Ort, Jahr
/1/	Schneider, Ulrich	Permeabilität von Porosität von Beton bei hohen Temperaturen, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1989
/2/	Leithner, David	Experimental investigation of concrete subjected to fire loading: micromechanical approach for determination of the permeability, Diplomarbeit am Institut für Festigkeitslehre an der TU-Wien, Wien 2004
/3/	Gornik, Konrad	Einfluss der Temperatur auf die Permeabilität von Beton, Diplomarbeit am Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der TU-Wien, Wien 2006
/4/	Jacobs, Frank	Luftpermeabilität als Kenngröße für die Qualität des Überdeckungsbetons von Betonbauwerken, TFB, Wildegg 2006
/5/		Measurement of the gas permeability of concrete by the rilm - cembureau method, RILEM Materials and Structures Vol. 32 No. 217, Cachan Cedex 1999
/6/	Hermann, Kurt	Gaspermeabilität von Betonen, Cementbulletin, TFB, Wildegg 2000
/7/	Schneider, Ulrich & Harand, Hadubrand	Festbeton, Wiener Baustofflehre Blätter, Schriftenreihe des Inst. F. Hochbau und Technologie Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der TU-Wien, Wien 2006
/8/	Wikipedia	http://de.wikipedia.org/wiki/Beton , 09/2008
/9/	Reick, Michael	Brandverhalten von Befestigungen mit großem Randabstand im Beton bei zentrischer Zugbeanspruchung, Dissertation am Institut für Werkstoffe im Bauwesen an der Fakultät für Bauingenieur und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, Stuttgart 2001
/10/	Moahutian, Mehrdad	Permeability Of High Performance Concrete, Construction Materials Institute, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran
/11/	Picandet, Vincent	Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons, Dissertation am Laboratoire de Genie Civil de Nantes, Nantes 2001
/12/	Klinkenberg, L. J.	The permeability of porous media to liquids and gases; Drilling and Production Practice pp. 200 – 213, American Petroleum Institute, 1941
/13/	Tanikawa, W. & Shimamoto, T.	Klinkenberg effect for gas permeability and its comparison to water permeability for porous sedimentary rocks; Hydrology and earth system sciences discussions; Kyoto 2006
/14/	Wikipedia	http://en.wikipedia.org/wiki/Permeation , 01/2009
/15/	Proceq SA	Torrent - Permeabilität Tester; Proceq SA, Schweiz, Schwerzenbach 2006
/16/	Leemann, A., Hoffmann, C. & Olbrecht, H.	Selbstverdichteter Beton; Tec21, Dübendorf 2001
/17/	Müller, H. S., Nolting, U. & Haist, M.	Innovationen in der Bautechnik, 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruhe 2006

/18/	Cerner, Christoph & Huber, Jürgen	Gaspermeabilitätsmessungen an Beton – Probenkonditionierung und Versuchsdruchführung; CBM-Mitteilungen wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 8 (2005), München 2005
/19/	Jooss, Martin	Selbstheilung von Beton unter Temperatureinfluss; Inst. F. Werkstoffe im Bauwesen, Stuttgart 1999
/20/	Schneider, U.	Brandschutz; Wiener Baustofflehre Blätter, Schriftenreihe des Inst. F. Hochbau und Technologie Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der TU-Wien, Wien 2004

10 Anhang

10.1 Datenblatt des Differenzdrucksensors

Honeywell

Microstructure Pressure Sensors

Compensated 0 psi to 1psi up to 0 psi to 150 psi

SCX Series

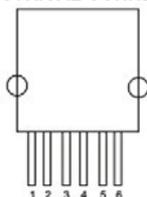
FEATURES

- Precision Temperature Compensation
- Calibrated Zero & Span
- Small Size
- Low Noise
- Low Cost (SCX_NC)
- High Accuracy (SCX_N)
- High Impedance for Low Power Applications

TYPICAL APPLICATIONS

- Medical Equipment
- Barometry
- Computer Peripherals
- Pneumatic Controls
- HVAC

ELECTRICAL CONNECTION



PIN 1) TEMPERATURE OUTPUT (+)
PIN 2) V_s
PIN 3) + OUTPUT
PIN 4) GROUND
PIN 5) - OUTPUT
PIN 6) TEMPERATURE OUTPUT (-)

Note: The polarity indicated is for pressure applied to port B. (For absolute devices pressure is applied to port A and the output polarity is reversed)

⚠ WARNING

PERSONAL INJURY
DO NOT USE these products as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.



The SCX series sensors provide a very cost-effective solution for pressure applications that require operation over wide temperature range. These internally calibrated and temperature compensated sensors were specifically designed to provide an accurate and stable output over a 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] temperature range. This series is intended for use with non-corrosive, non-ionic working fluids such as air, dry gases and the like.

Devices are available to measure absolute, differential and gage pressures from 1 psi (SCX01) up to 150 psi (SCX150). The Absolute (A in model number) devices have an internal vacuum reference and an output voltage proportional to absolute pressure. The Differential (D in model number) devices allow application of pressure to either side of the pressure-sensing diaphragm and can be used for gage or differential measurements.

The SCX series devices feature an integrated circuit (IC) sensor element and laser trimmed thick film ceramic housed in a compact solvent resistant case. This package provides excellent corrosion resistance and provides isolation to external packaging stresses. The package has convenient mounting holes and pressure ports for ease of use with standard plastic tubing for pressure connection.

If the application requires extended temperature range operation, beyond 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F], two pins which provide an output voltage proportional to temperature are available for use with external circuitry. The 100 microsecond response time makes this series an excellent choice for computer peripherals and pneumatic control applications.

The output of the bridge is ratio metric to the supply voltage. Operation from any dc supply voltage up to 20 Vdc is acceptable.

Contact your local honeywell representative, or go to Honeywell's website at www.honeywell.com/sensing for additional details.

⚠ WARNING

MISUSE OF DOCUMENTATION

- The information presented in this product sheet is for reference only. Do not use this document as a product installation guide.
- Complete installation, operation, and maintenance information is provided in the instructions supplied with each product.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

Microstructure Pressure Sensors

Compensated 0 psi to 1 psi up to 0 psi to 150 psi

SCX Series

PRESSURE RANGE SPECIFICATIONS

Model *	Operating Pressure	Proof Pressure ⁽²⁾	Sensitivity	Full-Scale Span ⁽¹⁾		
				Min.	Typ.	Max.
SCX01DN	0 psid to 1 psid	20 psid	18 mV/psi	17.82 mV	18.00 mV	18.18 mV
SCX01DNC				17.00 mV	18.00 mV	19.00 mV
SCX05DN	0 psid to 5 psid	20 psid	12 mV/psi	59.40 mV	60.00 mV	60.60 mV
SCX05DNC				57.50 mV	60.00 mV	62.50 mV
SCX15AN	0 psid to 15 psia	30 psia	6.0 mV/psi	89.10 mV	90.00 mV	90.90 mV
SCX15ANC				85.00 mV	90.00 mV	95.00 mV
SCX15DN	0 psid to 15 psid	30 psid	6.0 mV/psi	89.10 mV	90.00 mV	90.90 mV
SCX15DNC				85.00 mV	90.00 mV	95.00 mV
SCX30AN	0 psid to 30 psia	60 psia	3.0 mV/psi	89.10 mV	90.00 mV	90.90 mV
SCX30ANC				85.00 mV	90.00 mV	95.00 mV
SCX30DN	0 psid to 30 psid	60 psid	3.0 mV/psi	89.10 mV	90.00 mV	90.90 mV
SCX30DNC				85.00 mV	90.00 mV	95.00 mV
SCX100AN	0 psid to 100 psia	150 psia	1.0 mV/psi	99.00 mV	100.0 mV	101.0 mV
SCX100ANC				95.00 mV	100.0 mV	105.0 mV
SCX100DN	0 psid to 100 psid	150 psid	1.0 mV/psi	99.00 mV	100.0 mV	101.0 mV
SCX100DNC				95.00 mV	100.0 mV	105.0 mV
SCX150AN	0 psid to 150 psia	150 psia	0.6 mV/psi	89.00 mV	90.00 mV	91.00 mV
SCX150ANC				85.00 mV	90.00 mV	95.00 mV
SCX150DN	0 psid to 150 psid	150 psid	0.6 mV/psi	89.00 mV	90.00 mV	91.00 mV
SCX150DNC				85.00 mV	90.00 mV	95.00 mV

* **Ordering information:** Order model number.

GENERAL SPECIFICATIONS

Characteristic	Description (Maximum Ratings) All Devices
Supply Voltage (Vs)	20 Vdc
Common Mode Pressure	50 psig
Lead Soldering Temperature (2 seconds to 4 seconds)	250 °C [482 °F]

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Characteristic	Description (Maximum Ratings) All Devices
Compensated Operating Temperature	0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F]
Operating Temperature	-40 °C to 85 °C [-40 °F to 185 °F]
Storage Temperature	-55 °C to 125 °C [-67 °F to 257 °F]
Humidity Limits	0 % RH to 100 % RH

ACCURACY

Model	Accuracy
SCX01 through SCX150	Calibrated for span to within ±1 % (Highest accuracy)
SCX01_C through SCX150_C	Calibrated for span to within ±5 % (Fine adjustments of zero and span can be provided in external circuitry)

Microstructure Pressure Sensors

Compensated 0 psi to 1psi up to 0 psi to 150 psi

SCX Series

SCX PERFORMANCE CHARACTERISTICS ⁽³⁾

Characteristic	Min.	Typ.	Max.	Unit
Zero Pressure Offset ⁽⁴⁾	-300	0.0	300	Microvolt
Combined Pressure Non-Linearity and Pressure Hysteresis ⁽⁵⁾	–	±0.1	±0.5	% FSO
Temperature Effect on Span 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] ⁽⁶⁾	–	±0.2	±0.1	% FSO
Temperature Effect on Offset 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] ⁽⁶⁾	–	±100	±500	Microvolt
Repeatability ⁽⁷⁾	–	±0.2	±0.5	% FSO
Input Resistance ⁽⁸⁾	–	4.0	–	kOhm
Output Resistance ⁽⁹⁾	–	4.0	–	kOhm
Common Mode Voltage ⁽¹⁰⁾	5.8	6.0	6.2	Vdc
Response Time ⁽¹¹⁾	–	100	–	Microsec.
Long Term Stability of Offset and Span ⁽¹²⁾	–	±0.1	–	mV

SCX C SERIES PERFORMANCE CHARACTERISTICS ⁽³⁾

Characteristic	Min.	Typ.	Max	Unit
Zero Pressure Offset	-1.0	0.0	±1.0	mV
Combined Pressure Non-Linearity and Pressure Hysteresis ⁽⁵⁾	–	±0.1	±1.0	% FSO
Models: SCX05DNC, SCX15ANC, and SCX15DNC, Models: SCX01DNC, SCX30ANC, SCX30DNC, SCX100ANC, SCX100DNC, SCX150ANC, and SCX150DNC	–	±0.2	±1.0	% FSO
Temperature Effect on Span 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] ⁽⁶⁾	–	±0.4	±2.0	% FSO
Temperature Effect on Offset 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] ⁽⁶⁾	–	±0.2	±1.0	mV
Repeatability ⁽⁷⁾	–	±0.2	±0.5	% FSO
Input Resistance ⁽⁸⁾	–	4.0	–	kOhm
Output Resistance ⁽⁹⁾	–	4.0	–	kOhm
Common Mode Voltage ⁽¹⁰⁾	5.7	6.0	6.3	Vdc
Response Time ⁽¹¹⁾	–	100	–	Microsec.
Long Term Stability of Offset and Span ⁽¹²⁾	–	±0.1	–	mV

SPECIFICATION NOTES

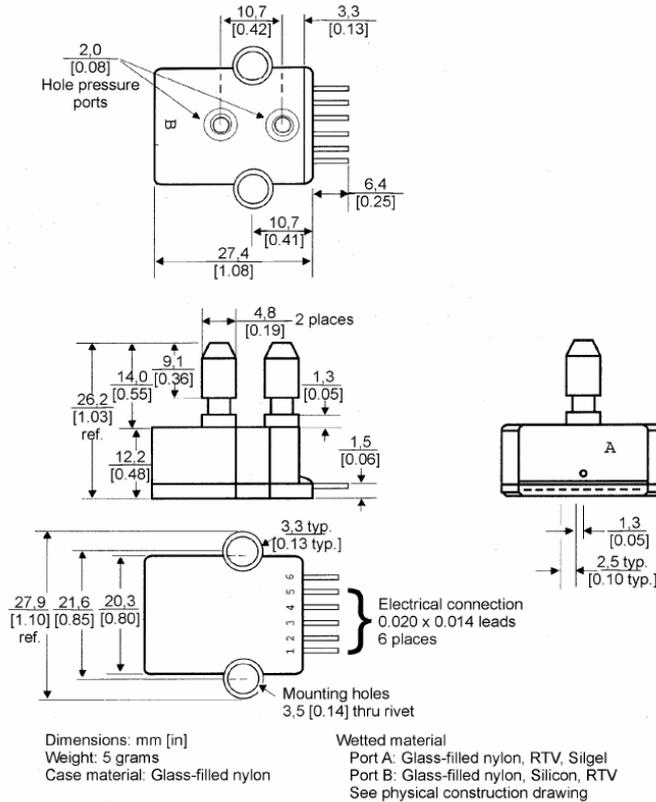
- Note 1: Full-Scale Span is the algebraic difference between the output voltage at full-scale pressure and the output at zero pressure. Full-Scale Span is ratiometric to the supply voltage.
- Note 2: Maximum pressure above which causes permanent sensor failure.
- Note 3: Reference Conditions: (Unless otherwise noted)
T_A = 25°C, Supply V_s = 12 Vdc, Common Mode Line pressure = 0 psig, Pressure applied to Port B. For absolute devices only, pressure is applied to Port A, and the output polarity is reversed.
- Note 4: For models SCX15AN, SCX30AN, SCX100AN, and SCX150AN, the Maximum zero pressure offset for absolute devices is 0 to ±500 Microvolt.
- Note 5: Pressure Hysteresis – the maximum output difference at any point within the operating pressure range for increasing and decreasing pressure.
- Note 6: Maximum error band of the offset voltage and the error band of the span, relative to the 25 °C [77 °F] reading.
- Note 7: Maximum difference in output at any pressure within the operating pressure range and the temperature within 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F] after:
a) 1,000 temperature cycles, 0 °C to 70 °C [32 °F to 158 °F]
b) 1.5 million pressure cycles, 0 psi to Full-Scale Span.
- Note 8: Input resistance is the resistance between pins 2 and 4.
- Note 9: Output resistance is the resistance between pins 3 and 5.
- Note 10: Common Mode voltage of the output arms (Pins 3 and 5) for V_s=12 Vdc.
- Note 11: Response time for a 0 psi to Full-Scale Span pressure step change, 10 % to 90 % rise time.
- Note 12: Long term stability over a one-year period.

Microstructure Pressure Sensors

Compensated 0 psi to 1psi up to 0 psi to 150 psi

SCX Series

PHYSICAL DIMENSIONS for Reference Only (mm/in)



WARRANTY/REMEDY

Honeywell warrants goods of its manufacture as being free of defective materials and faulty workmanship. Contact your local sales office for warranty information. If warranted goods are returned to Honeywell during the period of coverage, Honeywell will repair or replace without charge those items it finds defective. **The foregoing is Buyer's sole remedy and is in lieu of all other warranties, expressed or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose.**

Specifications may change without notice. The information we supply is believed to be accurate and reliable as of this printing. However, we assume no responsibility for its use.

While we provide application assistance personally, through our literature and the Honeywell web site, it is up to the customer to determine the suitability of the product in the application.

For application assistance, current specifications, or name of the nearest Authorized Distributor, contact a nearby sales office. Or call:

1-800-537-6945 USA/Canada
 1-815-235-6847 International

FAX

1-815-235-6545 USA

INTERNET

www.honeywell.com/sensing
 info.sc@honeywell.com

Honeywell

Sensing and Control

www.honeywell.com/sensing

Honeywell

11 West Spring Street

Freeport, Illinois 61032

10.2 Rotameter

10.2.1 Staffelung der Rotameter

Rotameter [Nl/h]	K140E01G	K140E08G	K140E11G	K140E12	K140E13G	K140E14	K140H14	K140E18	K140H15
0%	0,122			0,459					
50%	0,672	0,511							
120%	1,949	1,142							
		65%				5,417			
			10,968		31,965				
		20%							
		16,136		40,33				40,929	
			43,351						56,86
			97,552	116%	27%	27%	62,183		
				100,567			11%		
					153,596				
						165,8			
							341,433		
					361,483				
						414,944			
								672,308	
								55%	48%
								773,185	809,147
								1743,965	1922,5

10.2.2 Durchflusstabellen verwendeter Rotameter bei 22°C und 2bar

DURCHFLUSSTABELLE K140E01G

Schwebekörper:

Typ : Kugel, Glas
Durchmesser: 1,191 mm
Farbe : Schwarz
Art.-Nummer: 131-6101

Messglas:

Typ : V100-140.01
Länge : 140 mm
Art.-Nummer: 131-5301

Eichmedium:

Stickstoff (N₂)
Dichte : 0,00125 g/cm³
Viskosität: 0,0166 mPa*s
Alpha : 0,000043 cP/°C
Temperatur: 22,8 °C
Druck : 1,5 bara

Messmedium:

Luft ()
Dichte : 0,001293 g/cm³
Viskosität: 0,0171 mPa*s
Alpha : 0,000047 cP/°C
Temperatur: 22,0 °C
Druck : 3,0 bara

Höhe mm	Betriebs-Fluss		Norm-Fluss	
	l/h	l/min	NI/h	NI/min
0,0	0,12102	0,00202	0,33159	0,00553
1,0	0,12758	0,00213	0,34959	0,00583
2,0	0,13383	0,00223	0,36670	0,00611
3,0	0,13993	0,00233	0,38342	0,00639
4,0	0,14603	0,00243	0,40014	0,00667
5,0	0,15214	0,00254	0,41687	0,00695
6,0	0,15824	0,00264	0,43359	0,00723
7,0	0,16434	0,00274	0,45032	0,00751
8,0	0,17045	0,00284	0,46704	0,00778
9,0	0,17655	0,00294	0,48377	0,00806
10,0	0,18266	0,00304	0,50049	0,00834
11,0	0,19106	0,00318	0,52352	0,00873
12,0	0,19947	0,00332	0,54655	0,00911
13,0	0,20787	0,00346	0,56959	0,00949
14,0	0,21623	0,00360	0,59250	0,00987
15,0	0,22453	0,00374	0,61522	0,01025
16,0	0,23282	0,00388	0,63794	0,01063
17,0	0,24111	0,00402	0,66065	0,01101
18,0	0,24940	0,00416	0,68337	0,01139
19,0	0,25769	0,00429	0,70609	0,01177
20,0	0,26598	0,00443	0,72881	0,01215
21,0	0,27627	0,00460	0,75700	0,01262
22,0	0,28656	0,00478	0,78519	0,01309
23,0	0,29685	0,00495	0,81339	0,01356
24,0	0,30714	0,00512	0,84158	0,01403
25,0	0,31743	0,00529	0,86977	0,01450
26,0	0,32772	0,00546	0,89799	0,01497
27,0	0,33804	0,00563	0,92625	0,01544

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

28,0	0,34835	0,00581	0,95451	0,01591
29,0	0,35866	0,00598	0,98277	0,01638
30,0	0,36898	0,00615	1,01103	0,01685
31,0	0,38104	0,00635	1,04408	0,01740
32,0	0,39310	0,00655	1,07713	0,01795
33,0	0,40516	0,00675	1,11018	0,01850
34,0	0,41723	0,00695	1,14324	0,01905
35,0	0,42929	0,00715	1,17629	0,01960
36,0	0,44135	0,00736	1,20934	0,02016
37,0	0,45341	0,00756	1,24239	0,02071
38,0	0,46494	0,00775	1,27398	0,02123
39,0	0,47620	0,00794	1,30484	0,02175
40,0	0,48746	0,00812	1,33569	0,02226
41,0	0,50009	0,00833	1,37030	0,02284
42,0	0,51272	0,00855	1,40490	0,02342
43,0	0,52536	0,00876	1,43951	0,02399
44,0	0,53799	0,00897	1,47412	0,02457
45,0	0,55062	0,00918	1,50873	0,02515
46,0	0,56325	0,00939	1,54334	0,02572
47,0	0,57588	0,00960	1,57795	0,02630
48,0	0,58851	0,00981	1,61256	0,02688
49,0	0,60114	0,01002	1,64717	0,02745
50,0	0,61391	0,01023	1,68216	0,02804
51,0	0,62804	0,01047	1,72088	0,02868
52,0	0,64217	0,01070	1,75960	0,02933
53,0	0,65630	0,01094	1,79832	0,02997
54,0	0,67043	0,01117	1,83704	0,03062
55,0	0,68456	0,01141	1,87575	0,03126
56,0	0,69869	0,01164	1,91447	0,03191
57,0	0,71282	0,01188	1,95319	0,03255
58,0	0,72695	0,01212	1,99191	0,03320
59,0	0,74108	0,01235	2,03063	0,03384
60,0	0,75521	0,01259	2,06934	0,03449

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei unterschiedlichen Temperaturzuständen

61,0	0,77025	0,01284	2,11054	0,03518
62,0	0,78481	0,01308	2,15044	0,03584
63,0	0,79819	0,01330	2,18711	0,03645
64,0	0,81157	0,01353	2,22378	0,03706
65,0	0,82496	0,01375	2,26045	0,03767
66,0	0,83834	0,01397	2,29712	0,03829
67,0	0,85172	0,01420	2,33379	0,03890
68,0	0,86511	0,01442	2,37046	0,03951
69,0	0,87849	0,01464	2,40713	0,04012
70,0	0,89187	0,01486	2,44380	0,04073
71,0	0,90584	0,01510	2,48208	0,04137
72,0	0,91981	0,01533	2,52036	0,04201
73,0	0,93378	0,01556	2,55864	0,04264
74,0	0,94842	0,01581	2,59875	0,04331
75,0	0,96387	0,01606	2,64108	0,04402
76,0	0,97932	0,01632	2,68341	0,04472
77,0	0,99477	0,01658	2,72574	0,04543
78,0	1,01021	0,01684	2,76807	0,04613
79,0	1,02566	0,01709	2,81039	0,04684
80,0	1,04111	0,01735	2,85272	0,04755
81,0	1,05695	0,01762	2,89613	0,04827
82,0	1,07279	0,01788	2,93953	0,04899
83,0	1,08863	0,01814	2,98293	0,04972
84,0	1,10447	0,01841	3,02634	0,05044
85,0	1,12031	0,01867	3,06974	0,05116
86,0	1,13615	0,01894	3,11314	0,05189
87,0	1,15199	0,01920	3,15655	0,05261
88,0	1,16783	0,01946	3,19995	0,05333
89,0	1,18367	0,01973	3,24336	0,05406
90,0	1,19951	0,01999	3,28676	0,05478
91,0	1,21550	0,02026	3,33057	0,05551
92,0	1,23149	0,02052	3,37437	0,05624
93,0	1,24748	0,02079	3,41818	0,05697

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

94,0	1,26346	0,02106	3,46199	0,05770
95,0	1,27945	0,02132	3,50579	0,05843
96,0	1,29544	0,02159	3,54960	0,05916
97,0	1,31143	0,02186	3,59341	0,05989
98,0	1,32741	0,02212	3,63722	0,06062
99,0	1,34340	0,02239	3,68102	0,06135
100,0	1,35939	0,02266	3,72483	0,06208
101,0	1,37526	0,02292	3,76833	0,06281
102,0	1,39114	0,02319	3,81184	0,06353
103,0	1,40702	0,02345	3,85534	0,06426
104,0	1,42290	0,02371	3,89885	0,06498
105,0	1,43877	0,02398	3,94235	0,06571
106,0	1,45465	0,02424	3,98586	0,06643
107,0	1,47053	0,02451	4,02936	0,06716
108,0	1,48604	0,02477	4,07186	0,06786
109,0	1,50026	0,02500	4,11082	0,06851
110,0	1,51447	0,02524	4,14978	0,06916
111,0	1,52838	0,02547	4,18788	0,06980
112,0	1,54228	0,02570	4,22598	0,07043
113,0	1,55619	0,02594	4,26408	0,07107
114,0	1,57010	0,02617	4,30219	0,07170
115,0	1,58400	0,02640	4,34029	0,07234
116,0	1,59791	0,02663	4,37839	0,07297
117,0	1,61181	0,02686	4,41649	0,07361
118,0	1,62572	0,02710	4,45459	0,07424
119,0	1,63962	0,02733	4,49270	0,07488
120,0	1,65353	0,02756	4,53080	0,07551

DURCHFLUSSTABELLE K140E08G

Schwebekörper:

Typ : Kugel, Glas

Durchmesser: 3,175 mm

Farbe : Schwarz

Art.-Nummer: 131-6131

Messglas:

Typ : V100-140.08

Länge : 140 mm

Art.-Nummer: 131-5336

Eichmedium:

Stickstoff (N₂)

Dichte : 0,00125 g/cm³

Viskosität: 0,0166 mPa*s

Alpha : 0,000043 cP/°C

Temperatur: 24,6 °C

Druck : 1,013 bara

Messmedium:

Luft ()

Dichte : 0,001293 g/cm³

Viskosität: 0,0171 mPa*s

Alpha : 0,000047 cP/°C

Temperatur: 22,0 °C

Druck : 3,0 bara

Höhe mm	Betriebs-Fluss		Norm-Fluss	
	l/h	l/min	NI/h	NI/min
0,0	0,49608	0,00827	1,35930	0,02265
1,0	0,53717	0,00895	1,47189	0,02453
2,0	0,57826	0,00964	1,58449	0,02641
3,0	0,61936	0,01032	1,69708	0,02828
4,0	0,65941	0,01099	1,80683	0,03011
5,0	0,69890	0,01165	1,91503	0,03192
6,0	0,73839	0,01231	2,02323	0,03372
7,0	0,77787	0,01296	2,13144	0,03552
8,0	0,81736	0,01362	2,23964	0,03733
9,0	0,85685	0,01428	2,34784	0,03913
10,0	0,89634	0,01494	2,45605	0,04093
11,0	0,93732	0,01562	2,56833	0,04281
12,0	0,97830	0,01630	2,68061	0,04468
13,0	1,01928	0,01699	2,79290	0,04655
14,0	1,06025	0,01767	2,90518	0,04842
15,0	1,10123	0,01835	3,01746	0,05029
16,0	1,14221	0,01904	3,12974	0,05216
17,0	1,18288	0,01971	3,24119	0,05402
18,0	1,22326	0,02039	3,35183	0,05586
19,0	1,26364	0,02106	3,46246	0,05771
20,0	1,30401	0,02173	3,57310	0,05955
21,0	1,36189	0,02270	3,73169	0,06219
22,0	1,41977	0,02366	3,89029	0,06484
23,0	1,47765	0,02463	4,04889	0,06748
24,0	1,53554	0,02559	4,20749	0,07012
25,0	1,59342	0,02656	4,36609	0,07277
26,0	1,65130	0,02752	4,52468	0,07541
27,0	1,70918	0,02849	4,68328	0,07805

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

28,0	1,76706	0,02945	4,84188	0,08070
29,0	1,82494	0,03042	5,00048	0,08334
30,0	1,88282	0,03138	5,15908	0,08598
31,0	1,96458	0,03274	5,38309	0,08972
32,0	2,04180	0,03403	5,59469	0,09324
33,0	2,11902	0,03532	5,80629	0,09677
34,0	2,19625	0,03660	6,01789	0,10030
35,0	2,27347	0,03789	6,22950	0,10382
36,0	2,35070	0,03918	6,44110	0,10735
37,0	2,42792	0,04047	6,65270	0,11088
38,0	2,50515	0,04175	6,86430	0,11440
39,0	2,58237	0,04304	7,07590	0,11793
40,0	2,65960	0,04433	7,28750	0,12146
41,0	2,76265	0,04604	7,56989	0,12616
42,0	2,86677	0,04778	7,85516	0,13092
43,0	2,97514	0,04959	8,15211	0,13587
44,0	3,08351	0,05139	8,44906	0,14082
45,0	3,19188	0,05320	8,74601	0,14577
46,0	3,30025	0,05500	9,04296	0,15072
47,0	3,40863	0,05681	9,33991	0,15567
48,0	3,51700	0,05862	9,63685	0,16061
49,0	3,62537	0,06042	9,93380	0,16556
50,0	3,73374	0,06223	10,23075	0,17051
51,0	3,86673	0,06445	10,59514	0,17659
52,0	3,99347	0,06656	10,94242	0,18237
53,0	4,11897	0,06865	11,28632	0,18811
54,0	4,24448	0,07074	11,63022	0,19384
55,0	4,36999	0,07283	11,97412	0,19957
56,0	4,49550	0,07492	12,31802	0,20530
57,0	4,62100	0,07702	12,66192	0,21103
58,0	4,74651	0,07911	13,00582	0,21676
59,0	4,87202	0,08120	13,34972	0,22250
60,0	4,99753	0,08329	13,69362	0,22823

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

61,0	5,13808	0,08563	14,07875	0,23465
62,0	5,27390	0,08790	14,45090	0,24085
63,0	5,40972	0,09016	14,82306	0,24705
64,0	5,54554	0,09243	15,19521	0,25325
65,0	5,68136	0,09469	15,56737	0,25946
66,0	5,81718	0,09695	15,93952	0,26566
67,0	5,95300	0,09922	16,31168	0,27186
68,0	6,08881	0,10148	16,68383	0,27806
69,0	6,22463	0,10374	17,05599	0,28427
70,0	6,36045	0,10601	17,42814	0,29047
71,0	6,50617	0,10844	17,82741	0,29712
72,0	6,65188	0,11086	18,22669	0,30378
73,0	6,79760	0,11329	18,62596	0,31043
74,0	6,94332	0,11572	19,02524	0,31709
75,0	7,08903	0,11815	19,42451	0,32374
76,0	7,23475	0,12058	19,82378	0,33040
77,0	7,38047	0,12301	20,22306	0,33705
78,0	7,52618	0,12544	20,62233	0,34371
79,0	7,66894	0,12782	21,01351	0,35023
80,0	7,81108	0,13018	21,40298	0,35672
81,0	7,95571	0,13260	21,79926	0,36332
82,0	8,10033	0,13501	22,19554	0,36993
83,0	8,24495	0,13742	22,59181	0,37653
84,0	8,38957	0,13983	22,98809	0,38313
85,0	8,53420	0,14224	23,38437	0,38974
86,0	8,67882	0,14465	23,78065	0,39634
87,0	8,82344	0,14706	24,17692	0,40295
88,0	8,96806	0,14947	24,57320	0,40955
89,0	9,11269	0,15188	24,96948	0,41616
90,0	9,25731	0,15429	25,36575	0,42276
91,0	9,39803	0,15663	25,75134	0,42919
92,0	9,53875	0,15898	26,13693	0,43562
93,0	9,67947	0,16132	26,52251	0,44204

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

94,0	9,82019	0,16367	26,90810	0,44847
95,0	9,96091	0,16602	27,29368	0,45489
96,0	10,10163	0,16836	27,67927	0,46132
97,0	10,24235	0,17071	28,06486	0,46775
98,0	10,38307	0,17305	28,45044	0,47417
99,0	10,51444	0,17524	28,81039	0,48017
100,0	10,64057	0,17734	29,15600	0,48593
101,0	10,75586	0,17926	29,47190	0,49120
102,0	10,87115	0,18119	29,78779	0,49646
103,0	10,98643	0,18311	30,10369	0,50173
104,0	11,10172	0,18503	30,41959	0,50699
105,0	11,21701	0,18695	30,73548	0,51226
106,0	11,33229	0,18887	31,05138	0,51752
107,0	11,44758	0,19079	31,36727	0,52279
108,0	11,56287	0,19271	31,68317	0,52805
109,0	11,67815	0,19464	31,99906	0,53332
110,0	11,79344	0,19656	32,31496	0,53858
111,0	11,90715	0,19845	32,62652	0,54378
112,0	12,02085	0,20035	32,93808	0,54897
113,0	12,13455	0,20224	33,24963	0,55416
114,0	12,24826	0,20414	33,56119	0,55935
115,0	12,36196	0,20603	33,87275	0,56455
116,0	12,47567	0,20793	34,18431	0,56974
117,0	12,58937	0,20982	34,49587	0,57493
118,0	12,70307	0,21172	34,80743	0,58012
119,0	12,81678	0,21361	35,11898	0,58532
120,0	12,93048	0,21551	35,43054	0,59051

DURCHFLUSSTABELLE K140E11G

Schwebekörper:

Typ : Kugel, Glas

Durchmesser: 3,175 mm

Farbe : Schwarz

Art.-Nummer: 131-6131

Messglas:

Typ : V100-140.11

Länge : 140 mm

Art.-Nummer: 131-5339

Eichmedium:

Stickstoff (N₂)

Dichte : 0,00125 g/cm³

Viskosität: 0,0166 mPa*s

Alpha : 0,000043 cP/°C

Temperatur: 24,5 °C

Druck : 4,013 bara

Messmedium:

Luft ()

Dichte : 0,001293 g/cm³

Viskosität: 0,0171 mPa*s

Alpha : 0,000047 cP/°C

Temperatur: 22,0 °C

Druck : 3,0 bara

Höhe mm	Betriebs-Fluss		Norm-Fluss	
	l/h	l/min	NI/h	NI/min
0,0	9,20302	0,15338	25,21701	0,42028
1,0	9,60163	0,16003	26,30923	0,43849
2,0	10,00024	0,16667	27,40145	0,45669
3,0	10,39885	0,17331	28,49367	0,47489
4,0	10,79082	0,17985	29,56769	0,49279
5,0	11,18215	0,18637	30,63997	0,51067
6,0	11,57348	0,19289	31,71225	0,52854
7,0	11,96481	0,19941	32,78453	0,54641
8,0	12,35614	0,20594	33,85681	0,56428
9,0	12,74748	0,21246	34,92909	0,58215
10,0	13,13881	0,21898	36,00137	0,60002
11,0	13,55666	0,22594	37,14631	0,61911
12,0	13,98068	0,23301	38,30816	0,63847
13,0	14,40470	0,24008	39,47002	0,65783
14,0	14,82872	0,24715	40,63187	0,67720
15,0	15,25275	0,25421	41,79373	0,69656
16,0	15,67677	0,26128	42,95558	0,71593
17,0	16,10079	0,26835	44,11744	0,73529
18,0	16,52481	0,27541	45,27929	0,75465
19,0	16,94884	0,28248	46,44115	0,77402
20,0	17,37286	0,28955	47,60301	0,79338
21,0	17,81078	0,29685	48,80293	0,81338
22,0	18,24869	0,30414	50,00285	0,83338
23,0	18,68661	0,31144	51,20277	0,85338
24,0	19,12452	0,31874	52,40269	0,87338
25,0	19,56244	0,32604	53,60261	0,89338
26,0	20,00035	0,33334	54,80254	0,91338
27,0	20,43827	0,34064	56,00246	0,93337

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

28,0	20,87618	0,34794	57,20238	0,95337
29,0	21,31410	0,35523	58,40230	0,97337
30,0	21,75201	0,36253	59,60222	0,99337
31,0	22,20328	0,37005	60,83875	1,01398
32,0	22,64812	0,37747	62,05764	1,03429
33,0	23,09140	0,38486	63,27227	1,05454
34,0	23,53469	0,39224	64,48690	1,07478
35,0	23,97797	0,39963	65,70152	1,09503
36,0	24,42125	0,40702	66,91615	1,11527
37,0	24,86453	0,41441	68,13078	1,13551
38,0	25,30781	0,42180	69,34540	1,15576
39,0	25,75109	0,42918	70,56003	1,17600
40,0	26,19438	0,43657	71,77466	1,19624
41,0	26,65027	0,44417	73,02383	1,21706
42,0	27,10616	0,45177	74,27301	1,23788
43,0	27,56205	0,45937	75,52218	1,25870
44,0	28,01794	0,46697	76,77136	1,27952
45,0	28,47383	0,47456	78,02053	1,30034
46,0	28,92972	0,48216	79,26971	1,32116
47,0	29,38561	0,48976	80,51888	1,34198
48,0	29,84151	0,49742	81,77808	1,36297
49,0	30,30927	0,50515	83,04978	1,38416
50,0	30,77338	0,51289	84,32148	1,40536
51,0	31,24979	0,52083	85,62689	1,42711
52,0	31,72620	0,52877	86,93230	1,44887
53,0	32,20262	0,53671	88,23771	1,47063
54,0	32,67903	0,54465	89,54312	1,49239
55,0	33,15544	0,55259	90,84853	1,51414
56,0	33,63186	0,56053	92,15394	1,53590
57,0	34,10827	0,56847	93,45935	1,55766
58,0	34,58468	0,57641	94,76476	1,57941
59,0	35,06110	0,58435	96,07017	1,60117
60,0	35,53751	0,59229	97,37558	1,62293

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

61,0	36,02570	0,60043	98,71326	1,64522
62,0	36,51389	0,60856	100,05094	1,66752
63,0	37,00208	0,61670	101,38862	1,68981
64,0	37,48672	0,62478	102,71656	1,71194
65,0	37,96700	0,63278	104,03256	1,73388
66,0	38,44727	0,64079	105,34856	1,75581
67,0	38,92755	0,64879	106,66456	1,77774
68,0	39,40783	0,65680	107,98055	1,79968
69,0	39,88810	0,66480	109,29655	1,82161
70,0	40,36838	0,67281	110,61255	1,84354
71,0	40,85973	0,68100	111,95888	1,86598
72,0	41,35108	0,68918	113,30521	1,88842
73,0	41,84243	0,69737	114,65154	1,91086
74,0	42,33377	0,70556	115,99788	1,93330
75,0	42,82512	0,71375	117,34421	1,95574
76,0	43,31647	0,72194	118,69054	1,97818
77,0	43,80782	0,73013	120,03687	2,00061
78,0	44,29916	0,73832	121,38320	2,02305
79,0	44,79051	0,74651	122,72953	2,04549
80,0	45,28186	0,75470	124,07586	2,06793
81,0	45,79151	0,76319	125,47236	2,09121
82,0	46,30167	0,77169	126,87024	2,11450
83,0	46,81183	0,78020	128,26812	2,13780
84,0	47,32199	0,78870	129,66599	2,16110
85,0	47,83215	0,79720	131,06387	2,18440
86,0	48,34231	0,80571	132,46175	2,20770
87,0	48,85247	0,81421	133,85963	2,23099
88,0	49,36263	0,82271	135,25751	2,25429
89,0	49,87279	0,83121	136,65538	2,27759
90,0	50,38295	0,83972	138,05326	2,30089
91,0	50,90330	0,84839	139,47906	2,32465
92,0	51,42365	0,85706	140,90486	2,34841
93,0	51,94400	0,86573	142,33066	2,37218

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

94,0	52,46435	0,87441	143,75646	2,39594
95,0	52,97752	0,88296	145,16258	2,41938
96,0	53,48820	0,89147	146,56189	2,44270
97,0	53,99889	0,89998	147,96121	2,46602
98,0	54,50957	0,90849	149,36053	2,48934
99,0	55,02026	0,91700	150,75985	2,51266
100,0	55,53095	0,92552	152,15917	2,53599
101,0	56,05111	0,93419	153,58447	2,55974
102,0	56,57128	0,94285	155,00978	2,58350
103,0	57,09145	0,95152	156,43508	2,60725
104,0	57,61162	0,96019	157,86039	2,63101
105,0	58,13179	0,96886	159,28570	2,65476
106,0	58,65196	0,97753	160,71100	2,67852
107,0	59,17213	0,98620	162,13631	2,70227
108,0	59,69408	0,99490	163,56647	2,72611
109,0	60,22409	1,00373	165,01875	2,75031
110,0	60,75410	1,01257	166,47103	2,77452
111,0	61,29325	1,02155	167,94835	2,79914
112,0	61,83240	1,03054	169,42566	2,82376
113,0	62,37155	1,03953	170,90297	2,84838
114,0	62,91070	1,04851	172,38029	2,87300
115,0	63,44985	1,05750	173,85760	2,89763
116,0	63,98901	1,06648	175,33492	2,92225
117,0	64,52816	1,07547	176,81223	2,94687
118,0	65,06731	1,08446	178,28955	2,97149
119,0	65,60646	1,09344	179,76686	2,99611
120,0	66,14561	1,10243	181,24418	3,02074

DURCHFLUSSTABELLE K140H14

Schwebekörper:

Typ : Kugel, Stahl 1.4125

Durchmesser: 6,35 mm

Farbe : Metallisch

Art.-Nummer: 131-6471

Messglas:

Typ : V100-140.14

Länge : 140 mm

Art.-Nummer: 131-5374

Eichmedium:

Wasser, 20°C (H₂O, 20°C)

Dichte : 1,0 g/cm³

Viskosität: 1,0 mPa*s

Messmedium:

Luft ()

Dichte : 0,001293 g/cm³

Viskosität: 0,0171 mPa*s

Alpha : 0,000047 cP/°C

Temperatur: 22,0 °C

Druck : 3,0 bara

Höhe mm	Betriebs-Fluss		Norm-Fluss	
	l/h	l/min	NI/h	NI/min
0,0	49,84010	0,83067	136,56579	2,27610
1,0	53,97771	0,89963	147,90319	2,46505
2,0	58,25732	0,97096	159,62965	2,66049
3,0	62,53693	1,04228	171,35611	2,85594
4,0	66,81653	1,11361	183,08256	3,05138
5,0	70,92977	1,18216	194,35316	3,23922
6,0	74,27800	1,23797	203,52759	3,39213
7,0	77,62624	1,29377	212,70201	3,54503
8,0	80,97447	1,34957	221,87644	3,69794
9,0	84,32271	1,40538	231,05086	3,85085
10,0	87,70545	1,46176	240,31984	4,00533
11,0	91,32796	1,52213	250,24581	4,17076
12,0	94,95047	1,58251	260,17179	4,33620
13,0	98,57299	1,64288	270,09776	4,50163
14,0	102,19550	1,70326	280,02373	4,66706
15,0	105,57303	1,75955	289,27842	4,82131
16,0	108,94567	1,81576	298,51973	4,97533
17,0	112,31831	1,87197	307,76103	5,12935
18,0	115,69095	1,92818	317,00233	5,28337
19,0	119,06359	1,98439	326,24364	5,43739
20,0	122,43624	2,04060	335,48494	5,59142
21,0	126,00514	2,10009	345,26402	5,75440
22,0	129,57405	2,15957	355,04310	5,91739
23,0	133,14295	2,21905	364,82218	6,08037
24,0	136,40514	2,27342	373,76084	6,22935
25,0	139,62370	2,32706	382,57995	6,37633
26,0	142,84227	2,38070	391,39907	6,52332
27,0	146,06083	2,43435	400,21819	6,67030

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

28,0	149,27939	2,48799	409,03730	6,81729
29,0	152,49795	2,54163	417,85642	6,96427
30,0	155,71652	2,59528	426,67554	7,11126
31,0	159,09384	2,65156	435,92965	7,26549
32,0	162,47115	2,70785	445,18377	7,41973
33,0	165,98307	2,76638	454,80671	7,58011
34,0	169,70154	2,82836	464,99560	7,74993
35,0	173,42001	2,89033	475,18449	7,91974
36,0	177,13847	2,95231	485,37339	8,08956
37,0	180,85694	3,01428	495,56228	8,25937
38,0	184,57541	3,07626	505,75117	8,42919
39,0	188,29388	3,13823	515,94007	8,59900
40,0	192,01234	3,20021	526,12896	8,76882
41,0	195,88541	3,26476	536,74148	8,94569
42,0	199,75811	3,32930	547,35297	9,12255
43,0	203,62897	3,39382	557,95944	9,29932
44,0	207,49983	3,45833	568,56590	9,47610
45,0	211,37069	3,52284	579,17236	9,65287
46,0	215,24155	3,58736	589,77882	9,82965
47,0	219,11241	3,65187	600,38528	10,00642
48,0	222,98327	3,71639	610,99174	10,18320
49,0	226,85413	3,78090	621,59821	10,35997
50,0	230,71243	3,84521	632,17026	10,53617
51,0	234,23383	3,90390	641,81916	10,69699
52,0	237,75522	3,96259	651,46806	10,85780
53,0	241,27662	4,02128	661,11696	11,01862
54,0	244,79802	4,07997	670,76586	11,17943
55,0	248,31941	4,13866	680,41476	11,34025
56,0	251,84081	4,19735	690,06366	11,50106
57,0	255,36220	4,25604	699,71256	11,66188
58,0	258,88360	4,31473	709,36146	11,82269
59,0	262,53600	4,37560	719,36935	11,98949
60,0	266,49758	4,44163	730,22438	12,17041

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei unterschiedlichen Temperaturzuständen

61,0	270,57219	4,50954	741,38914	12,35649
62,0	274,64680	4,57745	752,55390	12,54256
63,0	278,72142	4,64536	763,71866	12,72864
64,0	282,79603	4,71327	774,88342	12,91472
65,0	286,87064	4,78118	786,04818	13,10080
66,0	290,94526	4,84909	797,21294	13,28688
67,0	295,01987	4,91700	808,37770	13,47296
68,0	298,92178	4,98203	819,06925	13,65115
69,0	302,77340	5,04622	829,62298	13,82705
70,0	306,62501	5,11042	840,17670	14,00295
71,0	310,56467	5,17608	850,97168	14,18286
72,0	314,50433	5,24174	861,76666	14,36278
73,0	318,44399	5,30740	872,56164	14,54269
74,0	322,38365	5,37306	883,35661	14,72261
75,0	326,32331	5,43872	894,15159	14,90253
76,0	330,26297	5,50438	904,94657	15,08244
77,0	334,20263	5,57004	915,74155	15,26236
78,0	338,14229	5,63570	926,53652	15,44228
79,0	342,08195	5,70137	937,33150	15,62219
80,0	346,02160	5,76703	948,12648	15,80211
81,0	350,03048	5,83384	959,11113	15,98519
82,0	354,03936	5,90066	970,09577	16,16826
83,0	358,04824	5,96747	981,08042	16,35134
84,0	362,05712	6,03429	992,06507	16,53442
85,0	366,06600	6,10110	1.003,04972	16,71750
86,0	370,07488	6,16791	1.014,03436	16,90057
87,0	374,08377	6,23473	1.025,01901	17,08365
88,0	377,99781	6,29996	1.035,74380	17,26240
89,0	381,83486	6,36391	1.046,25761	17,43763
90,0	385,67190	6,42787	1.056,77142	17,61286
91,0	389,55720	6,49262	1.067,41745	17,79029
92,0	393,44250	6,55738	1.078,06347	17,96772
93,0	397,32780	6,62213	1.088,70950	18,14516

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

94,0	401,21310	6,68688	1.099,35552	18,32259
95,0	405,09840	6,75164	1.110,00155	18,50003
96,0	408,98370	6,81639	1.120,64757	18,67746
97,0	412,86900	6,88115	1.131,29360	18,85489
98,0	416,75429	6,94590	1.141,93963	19,03233
99,0	420,63959	7,01066	1.152,58565	19,20976
100,0	424,52489	7,07541	1.163,23168	19,38719
101,0	428,44043	7,14067	1.173,96055	19,56601
102,0	432,35596	7,20593	1.184,68942	19,74482
103,0	436,27150	7,27119	1.195,41829	19,92364
104,0	440,18703	7,33645	1.206,14717	20,10245
105,0	444,10256	7,40171	1.216,87604	20,28127
106,0	448,01810	7,46697	1.227,60491	20,46008
107,0	451,93363	7,53223	1.238,33378	20,63890
108,0	456,00661	7,60011	1.249,49407	20,82490
109,0	460,12081	7,66868	1.260,76731	21,01279
110,0	464,23502	7,73725	1.272,04055	21,20068
111,0	468,36209	7,80603	1.283,34907	21,38915
112,0	472,48917	7,87482	1.294,65758	21,57763
113,0	476,61625	7,94360	1.305,96610	21,76610
114,0	480,74333	8,01239	1.317,27462	21,95458
115,0	484,87040	8,08117	1.328,58314	22,14305
116,0	488,99748	8,14996	1.339,89166	22,33153
117,0	493,12456	8,21874	1.351,20017	22,52000
118,0	497,25164	8,28753	1.362,50869	22,70848
119,0	501,37872	8,35631	1.373,81721	22,89695
120,0	505,50579	8,42510	1.385,12573	23,08543

DURCHFLUSSTABELLE K140H15

Schwebekörper:

Typ : Kugel, Stahl 1.4125

Durchmesser: 6,35 mm

Farbe : Metallisch

Art.-Nummer: 131-6471

Messglas:

Typ : V100-140.15

Länge : 140 mm

Art.-Nummer: 131-5375

Eichmedium:

Wasser, 20°C (H₂O, 20°C)

Dichte : 1,0 g/cm³

Viskosität: 1,0 mPa*s

Messmedium:

Luft ()

Dichte : 0,001293 g/cm³

Viskosität: 0,0171 mPa*s

Alpha : 0,000047 cP/°C

Temperatur: 22,0 °C

Druck : 3,0 bara

Höhe mm	Betriebs-Fluss		Norm-Fluss	
	l/h	l/min	NI/h	NI/min
0,0	46,23591	0,77060	126,69004	2,11150
1,0	59,69716	0,99495	163,57491	2,72625
2,0	72,75931	1,21266	199,36626	3,32277
3,0	83,50708	1,39178	228,81597	3,81360
4,0	94,37122	1,57285	258,58459	4,30974
5,0	105,04665	1,75078	287,83612	4,79727
6,0	115,17750	1,91963	315,59544	5,25992
7,0	125,30835	2,08847	343,35476	5,72258
8,0	135,25741	2,25429	370,61597	6,17693
9,0	144,39376	2,40656	395,65029	6,59417
10,0	153,53011	2,55884	420,68462	7,01141
11,0	162,62150	2,71036	445,59573	7,42660
12,0	172,43987	2,87400	472,49883	7,87498
13,0	182,44960	3,04083	499,92628	8,33210
14,0	192,45932	3,20766	527,35372	8,78923
15,0	202,46713	3,37445	554,77589	9,24626
16,0	212,47114	3,54119	582,18768	9,70313
17,0	222,47515	3,70792	609,59946	10,15999
18,0	232,25468	3,87091	636,39613	10,60660
19,0	241,05004	4,01750	660,49612	11,00827
20,0	249,84541	4,16409	684,59611	11,40994
21,0	258,63456	4,31058	708,67908	11,81132
22,0	268,18207	4,46970	734,84001	12,24733
23,0	278,06987	4,63450	761,93338	12,69889
24,0	287,95768	4,79929	789,02675	13,15045
25,0	297,74114	4,96235	815,83421	13,59724
26,0	307,08780	5,11813	841,44479	14,02408
27,0	316,43446	5,27391	867,05537	14,45092

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei unterschiedlichen Temperaturzuständen

28,0	325,78112	5,42969	892,66595	14,87777
29,0	335,12778	5,58546	918,27653	15,30461
30,0	344,47443	5,74124	943,88711	15,73145
31,0	353,85395	5,89757	969,58771	16,15980
32,0	363,23346	6,05389	995,28831	16,58814
33,0	372,61297	6,21022	1.020,98892	17,01648
34,0	381,73049	6,36217	1.045,97164	17,43286
35,0	390,70796	6,51180	1.070,57062	17,84284
36,0	399,68544	6,66142	1.095,16961	18,25283
37,0	408,66291	6,81105	1.119,76860	18,66281
38,0	417,64039	6,96067	1.144,36758	19,07279
39,0	426,61786	7,11030	1.168,96657	19,48278
40,0	435,59533	7,25992	1.193,56556	19,89276
41,0	444,64257	7,41071	1.218,35569	20,30593
42,0	453,73768	7,56229	1.243,27703	20,72128
43,0	463,24396	7,72073	1.269,32498	21,15542
44,0	472,75024	7,87917	1.295,37293	21,58955
45,0	482,25652	8,03761	1.321,42088	22,02368
46,0	491,76279	8,19605	1.347,46883	22,45781
47,0	501,26907	8,35448	1.373,51678	22,89195
48,0	510,77535	8,51292	1.399,56473	23,32608
49,0	520,28163	8,67136	1.425,61267	23,76021
50,0	529,78790	8,82980	1.451,66062	24,19434
51,0	539,41095	8,99018	1.478,02854	24,63381
52,0	549,22355	9,15373	1.504,91584	25,08193
53,0	559,03615	9,31727	1.531,80314	25,53005
54,0	568,84876	9,48081	1.558,69044	25,97817
55,0	578,66136	9,64436	1.585,57774	26,42630
56,0	588,47396	9,80790	1.612,46504	26,87442
57,0	598,28656	9,97144	1.639,35234	27,32254
58,0	608,09916	10,13499	1.666,23964	27,77066
59,0	617,91176	10,29853	1.693,12694	28,21878
60,0	628,33287	10,47221	1.721,68159	28,69469

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei unterschiedlichen Temperaturzuständen

61,0	639,00831	10,65014	1.750,93316	29,18222
62,0	649,68376	10,82806	1.780,18473	29,66975
63,0	660,35921	11,00599	1.809,43630	30,15727
64,0	671,03466	11,18391	1.838,68786	30,64480
65,0	681,71010	11,36184	1.867,93943	31,13232
66,0	692,38555	11,53976	1.897,19100	31,61985
67,0	703,06536	11,71776	1.926,45453	32,10758
68,0	713,83125	11,89719	1.955,95392	32,59923
69,0	724,59714	12,07662	1.985,45330	33,09089
70,0	735,36303	12,25605	2.014,95269	33,58254
71,0	746,34106	12,43902	2.045,03336	34,08389
72,0	757,31909	12,62198	2.075,11403	34,58523
73,0	768,29712	12,80495	2.105,19470	35,08658
74,0	779,27515	12,98792	2.135,27537	35,58792
75,0	790,25319	13,17089	2.165,35604	36,08927
76,0	799,02560	13,31709	2.189,39314	36,48989
77,0	807,24442	13,45407	2.211,91337	36,86522
78,0	815,46325	13,59105	2.234,43359	37,24056
79,0	823,68207	13,72803	2.256,95382	37,61590
80,0	831,90090	13,86501	2.279,47405	37,99123
81,0	840,31143	14,00519	2.302,51958	38,37533
82,0	848,72197	14,14537	2.325,56512	38,75942
83,0	857,13251	14,28554	2.348,61066	39,14351
84,0	865,54305	14,42572	2.371,65620	39,52760
85,0	874,70986	14,57850	2.396,77398	39,94623
86,0	884,29767	14,73829	2.423,04535	40,38409
87,0	893,88549	14,89809	2.449,31671	40,82195
88,0	903,47330	15,05789	2.475,58807	41,25980
89,0	913,06111	15,21769	2.501,85943	41,69766
90,0	922,64892	15,37748	2.528,13079	42,13551
91,0	932,49260	15,54154	2.555,10325	42,58505
92,0	942,33628	15,70560	2.582,07571	43,03460
93,0	952,17996	15,86967	2.609,04817	43,48414

Weiterentwicklung der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gaspermeabilität von Beton bei
unterschiedlichen Temperaturzuständen

94,0	962,02364	16,03373	2.636,02063	43,93368
95,0	971,86732	16,19779	2.662,99309	44,38322
96,0	981,71100	16,36185	2.689,96555	44,83276
97,0	991,55468	16,52591	2.716,93801	45,28230
98,0	1.001,39836	16,68997	2.743,91047	45,73184
99,0	1.011,24204	16,85403	2.770,88293	46,18138
100,0	1.021,08572	17,01810	2.797,85539	46,63092
101,0	1.031,22295	17,18705	2.825,63218	47,09387
102,0	1.041,36017	17,35600	2.853,40897	47,55682
103,0	1.051,49739	17,52496	2.881,18576	48,01976
104,0	1.061,63462	17,69391	2.908,96255	48,48271
105,0	1.071,77184	17,86286	2.936,73934	48,94566
106,0	1.081,90906	18,03182	2.964,51613	49,40860
107,0	1.092,04629	18,20077	2.992,29292	49,87155
108,0	1.102,18351	18,36973	3.020,06971	50,33450
109,0	1.112,32073	18,53868	3.047,84651	50,79744
110,0	1.122,45795	18,70763	3.075,62330	51,26039
111,0	1.132,92604	18,88210	3.104,30667	51,73844
112,0	1.143,39412	19,05657	3.132,99004	52,21650
113,0	1.153,86221	19,23104	3.161,67342	52,69456
114,0	1.164,33029	19,40550	3.190,35679	53,17261
115,0	1.174,79837	19,57997	3.219,04017	53,65067
116,0	1.185,26646	19,75444	3.247,72354	54,12873
117,0	1.195,73454	19,92891	3.276,40691	54,60678
118,0	1.206,20262	20,10338	3.305,09029	55,08484
119,0	1.216,67071	20,27785	3.333,77366	55,56289
120,0	1.227,13879	20,45231	3.362,45704	56,04095