Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Beiträge zur Optimierung von Straßenbeton

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

O.Univ.Prof. Dr. Dr. h.c. Ulrich SCHNEIDER
Ass.Prof. DI. Dr. techn. Heinrich BRUCKNER

Institut für Hochbau und Technologie
Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

Von
Melanie MOSER
0225480
Gabrielerstraße 43/2/6, 2340 Mödling

Wien, im Herbst 2008

Zusammenfassung

Da Betonfahrbahndecken eine große Dauerhaftigkeit aufweisen, werden sie vermehrt beim Bau von hoch belasteten Verkehrsflächen verwendet. Nachdem nun jedoch bei einigen Straßenfließbetonfeldern schon nach einigen Jahren vermehrt Risse aufgetreten sind, soll mit dieser Diplomarbeit der Grund für die Schäden gesucht werden.

Die Risse sind spinnennetzartig, zwischen 0,1 mm und 2,5 mm breit und können nicht in allen Betonfeldern beobachtet werden. Dieser Aspekt lässt zuerst auf unterschiedlich verwendete Materialien und später auf unterschiedliche Wetterbedingungen schließen. Bei näheren Untersuchungen konnte jedoch eine alleinige Schadensursache beider ausgeschlossen werden.

Eine Möglichkeit für die Rissbildung wäre die Verdunstungsschutzmenge. Ein zu sparsam nachbehandelter Beton kann unter der Sonneneinstrahlung zu schnell Wasser verlieren und somit „verdursten“.

In dieser Diplomarbeit wurde festgestellt, dass die Risse bis zu 9 cm tief sind, bei einigen Baustellen die genormten Druckfestigkeiten des Betons nicht erreicht werden und der Beton aller untersuchten Baustellen einen zu hohen Kapillarporenanteil über die gesamte Betondeckendicke aufweisen. Der hohe Kapillarporenanteil hat zur Folge, dass der Beton einen viel zu niedrigen Hydratationsgrad besitzt. Das bedeutet, dass der Beton „verdurstet“ ist. Da die Nachbehandlung nur einen Einfluss auf den oberen Bereich der Bauteildicke hat, konnte eine zu geringe Verdunstungsschutzmenge nicht die alleinige Ursache der Schäden sein.

Um das thermische Verhalten der Zementsteine zu untersuchen, wurden die Messkurven der Thermogravimetrie und der Differenzthermoanalyse ausgewertet. Alle fünf ermittelten Messkurven weisen annähernd den gleichen Kurvenverlauf auf und zeigen keine offensichtlichen Abweichungen zu den in der Literatur gefundenen Messkurven.

Abstract

Road surfaces made of concrete feature a higher durability, so they are used at massive frequented roads. Because of the circumstances, that some of the concrete surfaces display fissures already after a few years, this master's thesis shall find the reasons for this type of damage.

The fissures proceed in form of a spider's net, are 0,1 mm to 2,5 mm wide and they don't appear in all observed concrete areas. The aspect leads to the conclusion, that various materials were used or different weather conditions prevailed during the construction. Further analysis proved, that both causes don't effect the damage on their own. One possibility for the origin of fissures can be the amount of evaporation - protection - fluid. A too economical treated area can lose water in a short period of time under solar radiation. Subsequently the concrete "dies of thirst".

In this master's thesis is ascertained, that the fissures reach a depth up to 9 cm. Some of the samples of concrete don't endure compression according to the technical standards and all of the samples show an excessive amount of capillar pores what means, that the concrete shows a very low extent of hydration. So the concrete "dies of thirst". The evaporation - protection - fluid has only a bearing on the area near the surface. So it can't be the reason for the appearance of this kind of fissures. The results of thermal analytical investigations on concrete especially the differential thermal analysis (DTA) and the thermogravimetry (TG) are interpreted. All of them show nearly the same conclusion and don't divergence from studies which can be found in different literature.

Inhaltsangabe

1 EINLEITUNG **1**

2 GRUNDLAGEN **2**
2.1 Straßenaufbau 2
2.1.1 Die Tragschicht 2
2.1.2 Die Deckschicht 3

2.2 Zusammensetzung von Beton 4
2.2.1 Betonsorten 5
2.2.2 Zement 8
2.2.3 Gesteinskörnung 9
2.2.4 Zusatzmittel 10
2.2.5 Zusatzstoffe 10
2.2.6 Zugabewasser 11

2.3 Die Herstellung von Betondecken 11
2.3.1 Die Anlieferung und Lagerung der Rohstoffe 11
2.3.2 Das Mischen von Beton 12
2.3.3 Der Transport und Einbau von Beton 13

3 DOKUMENTATION DER BESTEHENDEN BETONSCHÄDEN **18**

4 VERSUCHSPLANUNG **26**
4.1 Ausgewählte Prüfungen 27
4.1.1 Druckfestigkeit 27
4.1.2 Porosimetrie 27
4.1.3 Thermische Analyse 33
4.2 Die Probekörper 36
4.2.1 Bohrkerne 36
4.2.2 Würfel 39

5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERSUCHSAUSWERTUNG 42
5.1 Optische Untersuchung der Bohrkerne 42
5.2 Mikroskopische Untersuchung der Bohrkerne 44
5.3 Spaltzugfestigkeit der Bohrkerne 46
5.4 Druckfestigkeit der Bohrkerne 46
5.4 Porosimetrie 61
5.4.1 Porosimetrie der Bohrkerne 62
5.4.2 Porosimetrie der Würfel 82
5.3 Thermische Analyse der Bohrkerne 89

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK 95

7 LITERATURVERZEICHNIS 97

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 99

9 TABELLENVERZEICHNIS 102

10 ANHANG 104

1 Einleitung

Betonfahrbahndecken zeichnen sich auch bei einer hohen Verkehrsbelastung in der Regel durch ihre große Dauerhaftigkeit aus und werden daher vermehrt beim Bau von hoch belasteten Verkehrsflächen verwendet. Betonstraßen der heutigen Generation sind sehr langlebig (bis zu 40 Jahren) und sollten in den ersten 15 bis 20 Jahren praktisch keine Servicekosten verursachen. Mit dem Ziel einer dauerhaften Betonfahrbahn werden sowohl an die Tragfähigkeit des Bauteils als auch an die Gebrauchstauglichkeit der Oberfläche sehr hohe Ansprüche gestellt. Nachdem nun jedoch bei einigen Fahrbahnfeldern schon nach ein bis sechs Jahren vermehrt Risse, insbesondere in Straßenfließbetondecken aufgetreten sind, soll mit dieser Diplomarbeit der Grund für die Schäden gefunden werden.

Einführend werden im Kapitel 2 „Grundlagen“ die unterschiedlichen Straßenaufbauten, die Zusammensetzung von Beton, sowie die Herstellung von Betondecken beschrieben. Bei den unterschiedlichen Straßenaufbauten werden die Pflaster- und Asphaltdecken kurz erklärt um anschließend die Betondecken näher zu erläutern. Im Weiteren werden die unterschiedlichen materialtechnologischen Grundlagen des Betons und die Betondeckenherstellung behandelt.

In Kapitel 3 „Dokumentation der bestehenden Betonschäden“ werden anhand mehrerer Fotos das Ausmaß und das konkrete Bild der Schäden dokumentiert und, soweit vorhanden, die Betonzusammensetzungen zusammengestellt. Außerdem werden einige Möglichkeiten bezüglich der Schadensursache erörtert.

Die Auswahl der durchzuführenden Prüfungen wird in Kapitel 4 erläutert. Hierbei werden der Aufbau der jeweiligen Prüfung, wichtige materialtechnische Grundlagen, die für die Auswertung wichtig sein könnten und die Gründe für die Wahl dieser Prüfung beschrieben. Im zweiten Teil wird weiters auf die Beschaffung der Probekörper, das sind einerseits die Bohrkerne, die gebohrt und andererseits die Würfel, die gegossen werden müssen, eingegangen.

In Kapitel 5 ist einerseits die Versuchsdurchführung und andererseits die Auswertung der Ergebnisse zu finden. Anhand der Probekörper wurden die Risstiefen, die Druckfestigkeit, die Porosimetrie und das thermogravimetrische Verhalten untersucht. Die mikroskopische Betrachtung und die Untersuchung einiger Bohrkerne auf deren Spaltzugfestigkeit erfolgte extern. Die derart gewonnenen Daten wurden ebenfalls in diese Arbeit einbezogen.

Das Kapitel „Schlussfolgerungen und Ausblick“ fasst die ermittelten Versuchsergebnisse zusammen und erläutert die daraus gewonnen Informationen.

2 Grundlagen

Um einen groben Überblick über die Grundlagen des Straßenbetons zu erhalten, werden in diesem Kapitel folgende Bereiche näher behandelt:

- Straßenaufbau
- Zusammensetzung von Beton, insbesondere für die Anwendung von Fahrbahndecken
- Herstellung von Betondecken.

2.1 Straßenaufbau

Die Straße ist ein Flächenbauwerk, das in folgende Bereiche unterteilt wird: den Oberbau, den Unterbau (nur bei Dammabschnitten) und den Untergrund.

Der Oberbau besteht aus der zu befahrenden Decke und der darunter liegenden Tragschicht (obere und untere Tragschicht). Das Material der Deckschicht und die Dimensionierung der Oberbaudicke werden auf die Verkehrsbeanspruchung abgestimmt. Auf den Untergrund und den Unterbau wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

2.1.1 Die Tragschicht

Die Tragschicht hat die Aufgabe, die durch den Verkehr erzeugten Vertikal- und Horizontalspannungen aufzufangen und in den Unterbau bzw. Untergrund abzuleiten. Es gibt drei verschiedene Herstellungsarten:

- Tragschichten ohne Bindemittel
- Tragschichten mit bituminösem Bindemittel
- Tragschichten mit hydraulischem Bindemittel.

Die **Tragschichten ohne Bindemittel** können als Kies-, Schotter- oder Recyclingtragschichten vorkommen. Bei diesen Tragschichten wirkt nur die Reibung im Korngerüst.

Bei **Tragschichten mit bituminösem Bindemittel** werden mittels Bitumen Asphalttragschichten hergestellt. Hier wirken die Reibung des Korngerüstes, die Kohäsion des Bindemittels und der viskose Widerstand des bituminösen Mörtels gleichzeitig.

Bei **Tragschichten mit hydraulischem Bindemittel** wird meist Zement unter ein Kies - Sand - Gemisch oder ein Schotter - Splitter - Sand - Gemisch eingemischt. Die Tragfähigkeit wird durch die Wirksamkeit des hydraulischen Bindemittels erreicht (Quellen: [3], [4], [6]).

2.1.2 Die Deckschicht

Die Deckschicht dient der direkten Aufnahme des Verkehrs und dem Schutz der Tragschicht.

Es können folgende Deckschichten unterschieden werden:

- Pflasterdecken
- Asphaltdecken
- Betondecken.

Die **Pflasterdecken** sind die ältesten Decken und besonders aus dem römischen Reich bekannt. Die Pflastersteine werden aus Naturstein, Klinker, Beton, Holz oder Hochofenschlacke hergestellt und liegen in einer Pflasterbettung auf der Tragschicht.

Im 20. Jahrhundert wurde der Bau von Pflasterstraßen von den **Asphaltstraßen** verdrängt. Die Asphaltdecken bestehen aus einer Deckschicht und einer Binderschicht. Die Binderschicht bildet den Übergang zwischen der grobkörnigen Tragschicht und der feinkörnigen Deckschicht und ist einerseits für die Spannungsaufnahme und andererseits zum Ausgleich der Unebenheiten der Tragschicht verantwortlich. Die Deckschicht aus Asphaltbeton gilt als Standardbauweise. Asphaltbeton passt sich gut an alle Verkehrs- und Konstruktionsbedingungen an, lässt sich leicht anliefern und ist sehr wirtschaftlich. Nur bei ungewöhnlichen Anforderungen oder Instandsetzungsarbeiten zieht man Gussasphalt, Splittmastixasphalt oder Sonderbauweisen vor. Bei Asphaltdecken wurde im Laufe der Zeit

jedoch festgestellt, dass sich durch langsam fahrenden oder stehenden Verkehr, sowie durch häufiges Bremsen und Anfahren, verstärkt durch starke Sonneneinstrahlung in heißen Sommermonaten, Spurrinnen bilden. Um diese Schäden zu vermeiden, werden vor allem in großen Städten Bushaltestellen und Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen nicht mehr asphaltiert, sondern betoniert.

Schon vor mehr als 2000 Jahren haben die Römer häufig ihre Stadt- und Landstraßen mit einer betonartigen Schicht - „opus caementitium“ - gebaut. Sie verwendeten Kies und/oder zerschlagenes Gestein, dem sie Kalk untermischten. Bis zu 50 cm dicke Straßenschichten wurden hergestellt. Diese hydraulisch gebundenen Schichten konnten direkt befahren werden. In der Regel deckten sie die Römer aber mit Steinplatten oder Schotter ab. In den folgenden Jahrhunderten entwickelte sich der **Betondeckenbau** durch Erfahrungen im konstruktiven, betontechnologischen und ausführungstechnischen Bereich. Die Erkenntnisse während des Baus und das Gebrauchsverhalten, sowie neu hinzugekommene Anforderungen führen zu ständigen Verbesserungen - nicht nur bei der Bemessung, der Konstruktion und der Baustoffe, sondern auch in der Gerätetechnik, bei den Bauverfahren, der Baustellenorganisation und im verbesserten Umweltschutz.

Die Lastverteilung der Betondecken ist wegen der Plattenwirkung sehr gut und eignet sich somit für sehr hohe Verkehrsbelastungen. Es entstehen keine Spurrinnen, Querwellen und Verdrückungen, weil die auftretenden Verformungen gering sind. Die Nutzungsdauer ist wegen der hohen Festigkeit sehr lange und die Erneuerungen daher nur selten. Da Straßendecken aus Beton sehr hell, griffig und Waschbetondecken auch lärmmindernd sind, verwendet man sie vor allem im Stadtverkehr. Nachteilig beim Bau von Betondecken bleiben die Kosten - Betondecken sind um einiges teurer als Asphaltdecken. Durch die Fugen kommt ein wesentlicher Kostenanteil bei den Betondecken dazu. Fugen sind außerdem stets Problemstellen, daher gehen viele Schäden von ihnen aus (Quellen: [2], [3], [4]).

2.2 Zusammensetzung von Beton

Beton wird aus Zement, Wasser und Gesteinskörnung hergestellt. Zur Beeinflussung bestimmter Betoneigenschaften können mehlfeine oder flüssige Betonzusätze - Betonzusatzmittel und/oder Betonzusatzstoffe - hinzugegeben werden.

Beton ist beliebig verformbar, erhärtet sogar unter Wasser und hat eine hohe Festigkeit und Beständigkeit. In den folgenden Kapiteln wird hauptsächlich der Beton im Straßenbau näher beschrieben.

2.2.1 Betonsorten

Die Einteilung des Betons erfolgt in Druckfestigkeitsklassen - siehe Tabelle 2.1, einer Kurzbezeichnung für die abgedeckten Umweltklassen, Wasserbindemittelgehalt (früher Wasserzementwert), Luftgehalt und anwendbare Beispiele - siehe Tabelle 2.2, der Expositionsklasse - siehe Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4, der Konsistenz - siehe Tabelle 2.5, der Erhärtungszeit, dem Größtkorn, der Zementart und der Zementfestigkeit. Zementart und Zementfestigkeit wird im nächsten Unterkapitel näher behandelt.

Die Firma *Pittel und Brausewetter*, auf deren Initiative und mit deren Unterstützung diese Arbeit durchgeführt wird, verwendet im Straßenbau hauptsächlich folgende Betonarten:

C30/37 B7 XM2 F45 GK22 CEMII 42,5N

C30/37 B7 XM2 12Std. F45 GK22 CEMII 42,5R

C30/37 B7 XM2 24Std. F45 GK22 CEMII 42,5R

C30/37… Festigkeitsklasse (Zylinderdruckfestigkeit: $f_{ck,cyl}$ = 30 N/mm²
Würfeldruckfestigkeit: $f_{ck,cube}$ = 37 N/mm²)

B7 … Betonkurzbezeichnung und damit abgedeckte Umweltklassen (XC4/XC3/XF4/XA1L/SB(A))

XM2 … Expositionsklasse (schwere Verschleißbeanspruchung)

F45 … Konsistenz (weich)

GK22 … Größtkorn (22 mm)

CEMII … Zementart (Portlandkompositzement)

42,5 … Zementsteindruckfestigkeit nach 28 Tagen (42,5 N/mm²)

N … Klasse mit üblicher Anfangsfestigkeit (normal)

R … Klasse mit hoher Anfangsfestigkeit (rapid)

12 Std.… Verkehrsbelastung nach 12 Stunden möglich

24 Std.… Verkehrsbelastung nach 24 Stunden möglich

Tabelle 2.1: Festigkeitsklassen (Quelle: [9])

Festigkeitsklasse	**Zylinderdruckfestigkeit $f_{ck,cyl}$ [N/mm²]**	**Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ [N/mm²]**
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tabelle 2.2: Betonkurzbezeichnung und damit abgedeckte Umweltklassen (Quelle: [17])

Kurzbezeichnung	**Betonsorte (abgedeckte Umweltklassen)**	**W/B-Wert**	**Luftgehalt in %**	**Beispiele**
B1	**XC3** (A)	0,60	-	Wasserdruck bis 10 m
B2	XC3/**XD2/XF1/XA1L**/SB (A)	0,55	-	Schwimmbäder
B3	XC3/**XD2/XF3/XA1L**/SB (A)	0,55	2,5 - 5,0	Wasserbauten waagrecht
B4	**XC4**/XD2/XF1/XA1L/SB (A)	0,50	-	Wasserdruck über 10 m
B5	**XC4**/XD2/**XF2**/XA1L/SB (A)	0,50	2,5 - 5,0	Taumittelhaltiger Sprühnebel
B6/C_3A-frei	**XC4**/XD2/XF3/**XA2L/XA2T**/SB (A)	0,45	2,5 - 5,0	Abwasser-Anlagen
B7	**XC4/XD3/XF4**/XA1L/SB (A)	0,45	4,0 - 8,0	Taumittel direkt
B8	**XC3/UB1** (A)	0,60	-	Schlitzwände, Bohrpfähle im Trockenen
B9	**XC3/UB2** (A)	0,60	-	Bohrpfähle im Wasser
B10	XC3/**XD2/XF1/XA1L**/UB1 (A)	0,55	-	Schlitzwände: Grundwasser lösend
B10/C_3A-frei	XC3/**XD2/XF1/XA1L/XA1T**/UB1/C_3A-frei (A)	0,55	-	Schlitzwände: Grundwasser treibend
B11	XC3/**XD2/XF1/XA1L**/UB2 (A)	0,55	-	Bohrpfähle: Grundwasser lösend
B11/C_3A-frei	XC3/**XD2/XF1/XA1L/XA1T**/UB2/C_3A-frei (A)	0,55	-	Bohrpfähle: Grundwasser treibend
B12	**XC4**/XD2/XF1/XA1L/UB1 (A)	0,50	-	Schlitzwände: Wasserdruck > 10 m, lösend
B12/C_3A-frei	**XC4**/XD2/XF1/XA1L/XA1T/UB1/C_3A-frei	0,50	-	Schlitzwände: Wasserdruck > 10 m, treibend
HL-SW	XC4/XD3/XF3/**XA3L/XA3T**	0,34	-	Hochleistungsbeton im Siedlungswasserbau
HL-B	XC4/XD3/XF4 (A)	0,34	4,0 - 8,0	Hochleistungsbeton für konstruktive Zwecke

Tabelle 2.3: Expositionsklassen (Quelle: [9])

X0	Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko
XC	Korrosion durch Karbonatisierung
XD	Korrosion durch Chloride
XF	Frostangriff mit und ohne Taumittel
XA	Chemischer Angriff
XM	Verschleißbeanspruchung

Tabelle 2.4: Expositionsklasse XM (Quelle: [17])

Klassenbe-zeichnung	Beschreibung der Umgebung	Zuordnung von Expositionsklassen
XM1	mäßige Verschleißbeanspruchung	Straßenbeläge von Wohnstraßen
XM2	schwere Verschleißbeanspruchung	Straßenbeläge von Hauptverkehrsstraßen. Verkehrsflächen mit schwerem Gabelstaplerverkehr
XM3	extreme Verschleißbeanspruchung	Beläge von Flächen, die häufig mit Kettenfahrzeugen befahren werden. Wasserbauwerke in geschiebebelasteten Gewässern, z.B. Tosbecken

Tabelle 2.5: Konsistenz vom Frischbeton (Quelle: [17])

Konsistenz	**Feststellung**	**Bezeichnung**
sehr steif	Verdichtungsmaß	C0
Steif	Verdichtungsmaß	C1
steifplastisch	Verdichtungsmaß	C2
plastisch	Ausbreitmaß	F38
Weich	Ausbreitmaß	F45
sehr weich	Ausbreitmaß	F52
fließfähig	Ausbreitmaß	F59
sehr fließfähig	Ausbreitmaß	F66
Extrem fließfähig	Ausbreitmaß	F73

(Quellen: [7], [8], [9], [16], [17])

2.2.2 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel für Mörtel und Beton. Er wird mit Wasser angemacht und erhärtet durch Hydratation sowohl unter Wasser als auch an der Luft. Der somit entstandene Zementstein ist wasserbeständig. Die Herstellung von Zement erfolgt durch Feinmahlen von Zementklinker und anderen mineralischen Stoffen. Der Zementklinker wird durch das Brennen der folgenden Rohstoffe erzeugt:

- Kalkstein, Kalkmergel u.a. ($CaCO_3$: Calciumcarbonat)
- Sande (SiO_2: Kieselsäure)
- Ton, Mergel (Al_2O_3: Tonerde)
- Eisenoxidische Minerale u.a. (Fe_2O_3: Eisenoxid).

Durch das Brennen und Sintern von Zementklinkern entstehen im allgemeinen die 4 folgenden Klinkerphasen, die unterschiedliche Beiträge zur Zementerhärtung liefern:

- C_3S Tricalciumsilicat
- C_2S Dicalciumsilicat
- $C_4(A,F)$ Tetracalciumaluminatferrit
- C_3A Tricalciumaluminat.

Nebenbestandteile des Portlandzementklinkers sind weiter das freie CaO (freier Kalk) und das freie MgO (Periklas) sowie ein geringer Anteil an Alkalien (Na_2O und K_2O).

Die genormten Zemente werden nach dem Anteil an Portlandzementklinker und den mengenmäßigen Anteilen an Zumahlstoffen in die folgenden fünf Hauptarten unterteilt:

CEM I	Portlandzement	(Zumahlung weniger als 5 % Masse)
CEM II	Portlandkompositzement	(Zumahlung 6 bis 35 % Masse)
CEM III	Hochofenzement	(Zumahlung 36 bis 95 % Masse)
CEM IV	Puzzolanzement	(Zumahlung 11 bis 55 % Masse)
CEM V	Kompositzement	(Zumahlung 18 bis 50 % Masse)

Im Straßenbau wird wie schon erwähnt hauptsächlich der Portlandkompositzement CEM II verwendet, wobei als Zumahlstoff vor allem Hüttensand zur Anwendung kommt.

Die wichtigste Eigenschaft des Zements ist seine Druckfestigkeit. Deshalb werden die Zemente nach ihrer 28 - Tage - Mindestdruckfestigkeit gekennzeichnet. Normalzemente sind in drei Festigkeitsklassen eingeteilt: 32,5, 42,5 und 52,5. Diese drei Klassen werden nach ihrer Anfangsfestigkeit weiter in üblich erhärtende (N = normal) und schnell erhärtende Zemente (R = rapid) unterschieden. Beeinflusst wird die Festigkeit neben äußeren Faktoren, wie Feuchtigkeit und Temperatur, im Wesentlichen durch die chemische Zusammensetzung des Zementes, die Mahlfeinheit des Zementes und den Wasserbindemittelwert (W/B - Wert). Das Erhärten erfolgt in einem exothermen Vorgang, d.h. der Zement entwickelt Wärme, die so genannte Hydratationswärme. Sie wird bei den Zementen mit feiner Mahlung und hoher Frühfestigkeit schneller frei als bei den anderen Zementen mit langsamer Festigkeitsentwicklung (Quellen: [1], [7], [8], [10], [16], [18]).

2.2.3 Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung für Normalbeton - früher als Zuschlag bezeichnet - besteht üblicherweise aus natürlichem oder künstlichem Gestein mit Korngrößen von 0 bis maximal 63 mm und erreicht 60 bis 80 Vol. % des Betons. Es handelt sich hierbei um einen meist preiswerten Füllstoff, der auch die Volumenänderungen, die durch die Hydratation des Zementsteins hervorgerufen werden, vermindert. Die Gesteinskörnung lässt sich auch nach ihrem Gewicht in leichte, normale und schwere Körnung einteilen. Im Straßenbau werden hauptsächlich normale Zuschläge wie Sand, Kies und die meisten gebrochenen Gesteine mit einer Dichte zwischen 2,0 und 3,0 kg/dm³ verwendet. Die Gesteinskörnung der Firma *Pittel und Brausewetter* enthält vor allem Quarz.

Die Qualität der Gesteinskörnung, insbesondere die Festigkeit, hat einen großen Einfluss auf die Betonqualität. Daher muss die Gesteinskörnung Regelanforderungen bezüglich der Festigkeit Kornzusammensetzung, Kornform, Gehalt an Feinteilen und Widerstand gegen Frost und andere schädliche Bestandteile aufweisen (Quellen: [1], [8], [9], [10], [16]).

2.2.4 Zusatzmittel

Betonzusatzmittel sind flüssige oder pulverförmige Betonzusätze, die durch chemische und/oder physikalische Wirkung die Eigenschaften sowohl des frischen als auch des erhärteten Betons verändern. Die Menge ist im Allgemeinen so klein, dass sie als Volumenanteil des Betons bei der Mischungsberechnung ohne Bedeutung ist. Die Wirkung der Zusatzmittel hängt unter anderem von der Zugabemenge, der Zementart, dem Zementgehalt, dem Mehlkorngehalt, dem Wassergehalt sowie der Verarbeitung und der Temperatur der Mischung ab.

Im Straßenbau werden hauptsächlich folgende Zusatzmittel verwendet:

- Betonverflüssiger: Verminderung des Wasseranspruchs und/oder Verbesserung der Verarbeitbarkeit
- Fließmittel: Verminderung des Wasseranspruchs und/oder Verbesserung der Verarbeitbarkeit zur Herstellung von Beton mit fließfähiger Konsistenz
- Luftporenbildner: Verminderung der kapillaren Wasseraufnahme und als Frostschutzmaßnahme
- Beschleuniger: Beschleunigung des Erstarrens und/oder des Erhärtens
- Verzögerer: Verzögerung des Erstarrens

(Quellen: [1], [8], [10], [16])

2.2.5 Zusatzstoffe

Betonzusatzstoffe sind feinverteilte anorganische, puzzolanische oder hydraulische Stoffe, die dem Beton zugegeben werden können um bestimmte Eigenschaften zu erzielen. Im Gegensatz zu den Betonzusatzmitteln ist die Zugabemenge so groß, dass sie bei der Stoffraumrechnung berücksichtigt werden muss.

Es werden hauptsächlich Flugasche, Silicastaub, Gesteinsmehl und Farbpigmente verwendet (Quellen: [1], [8], [10], [16]).

2.2.6 Zugabewasser

Das Wasser, das zur Betonherstellung benutzt wird, ist das in der Natur vorkommende Wasser. Es sollte keine größeren Mengen an gelösten Salzen oder anderen Verunreinigungen enthalten, da die Hydratationsreaktion des Zementes leicht von Fremdstoffen gestört werden kann (Quellen: [1], [8], [10], [16]).

2.3 Die Herstellung von Betondecken

Um Betondecken herstellen zu können, müssen Zement, Gesteinskörnung und Betonzusätze zunächst auf den Bauhof geliefert und dort gelagert werden. Für den jeweiligen Bedarf wird der Beton laut Rezeptur gemischt und anschließend auf die Baustelle gebracht und eingebaut.

2.3.1 Die Anlieferung und Lagerung der Rohstoffe

Der **Zement** wird in Säcken oder lose in Silofahrzeugen auf den Bauhof gebracht und in einen Vorratssilo geblasen. Aus diesem Silo kann er bei Gebrauch mit Hilfe einer Abzugsvorrichtung staubfrei entnommen werden. Normzemente verschiedener Festigkeitsklassen und Zusammensetzungen lassen sich ohne Probleme und ohne Reinigung des Silos nacheinander dort lagern, da sie chemisch verträglich sind. Eine Vermischung könnte jedoch die Betoneigenschaft, wie zum Beispiel die Festigkeit und die Farbe beeinflussen. Zement sollte nicht zu lange - maximal zwei Monate - gelagert werden, da er Luftfeuchtigkeit aufnimmt und dadurch an Festigkeit verliert. Laut *Weber* [1] kann nach drei Monaten ein Festigkeitsverlust von bereits 10 % auftreten.

Bei der Anlieferung und Lagerung von **Gesteinskörnungen** werden diese vor Verunreinigungen geschützt. Gesteinskörnungen lagern in ebenerdigen Boxen nebeneinander, wobei sie nicht mit anderen Korngruppen vermischt werden.

Die flüssigen **Betonzusätze** werden frostsicher und die pulverförmigen feuchtigkeitssicher angeliefert und aufbewahrt (Quellen: [1], [4]).

2.3.2 Das Mischen von Beton

Um den Beton herstellen zu können, werden alle Ausgangsstoffe - Zement, Zugabewasser, Gesteinskörnung, Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe - entsprechend der Mischanweisung abgemessen und gemischt. Der Betonmischer wird von einem erfahrenen und zuverlässigen Personal betrieben, um eine gleichmäßige Betonmischung zu erhalten. Die Zusammensetzung des Frischbetons wird nach dem Verlassen des Mischers oder des Fahrmischers nicht mehr verändert. Nur das Fließmittel wird erst direkt auf der Baustelle dazugemischt. Fließbeton ist ein Beton der Konsistenz F 45, dem ein Fließmittel (ein stark wirkender Verflüssiger) beigegeben wird, um besonders beim händischen Einbau die Verdichtung zu erleichtern. Bei fließfähiger Frischbetonverarbeitung wächst jedoch die Neigung zum Entmischen. Durch die Verwendung des Fließmittels spart man bei der Wasserzugabe, senkt damit den W/B - Wert und erreicht somit höhere Festigkeiten. Ohne Fließmittel könnte man diesen Beton meist gar nicht verarbeiten (Quellen: [1], [4], [18]).

2.3.3 Der Transport und Einbau von Beton

Mittels Fahrmischer oder Fahrzeug mit oder ohne Rührwerk wird der Beton auf die Baustelle gebracht. Im Straßenbau kann der Beton mittels Gleitschalungsfertiger oder händisch eingebaut werden. In dieser Arbeit wird nur der händische Einbau näher behandelt.

Für das Einbringen werden Betonrutschen verwendet, siehe Abbildung 2.1.

Abbildung 2.1: Betoneinbau mittels Betonrutsche (Foto: M. Moser)

Diese Betonrutschen werden kurz über den bereits eingebauten Beton geführt, damit es zu keiner Entmischung kommen kann. Der Beton wird mit Rechen auf die gesamte Fläche verteilt und anschließend mit Abziehbohlen geglättet.

Beton braucht für den Erhärtungsvorgang genügend Feuchtigkeit - die Steuerung der Betonfeuchte (im Wesentlichen Oberflächenfeuchte) ist eine Hauptaufgabe bei der Nachbehandlung. Vor allem Oberflächen, die dem Wind und der Sonne ausgesetzt sind dürfen nicht vernachlässigt werden. Bei der Herstellung von Betondecken verwendet man einerseits ein Verdunstungsschutzmittel um ein Austrocknen des Betons zu vermeiden und andererseits setzt man ein Regenschutzmittel ein um die Betonoberfläche vor Regen zu schützen. Flüssige Nachbehandlungsmittel sollten so früh wie möglich und vollflächig aufgesprüht werden. Trocknet der Beton zu früh aus, ist kein Kapillarwasser mehr für die Hydratation vorhanden, die Hydratation hört auf und der Zementstein hat eine viel geringere Güte als auf Grund des W/B - Wertes möglich wäre.

Die Firma *Pittel und Brausewetter* verwendet den Verdunstungsschutz *Talcure NB2 TX* und *Talcure NB3* von der Firma *Tal* (Quelle: [19]). Bei *Talcure NB2 TX* handelt es sich um einen lösungsmittelhaltigen Verdunstungsschutz, während *Talcure NB3* lösungsmittelfrei ist. Bei beiden Produkten erfolgt abhängig von äußeren Bedingungen eine Filmbildung, die den Beton vor Austrocknung schützt. Der Film wirkt vorbeugend gegen Schwindrisse, welche besonders bei Wind, starker Sonneneinstrahlung oder niedrigen Luftfeuchtigkeiten auftreten können. Der Verdunstungsschutz wird mittels Flachstrahldüsen auf den Beton aufgetragen, wobei der Hersteller bei einer Sprühmenge von 200 g/m² einen Sperrfaktor von 99 % verspricht.

Die Oberflächenstruktur wird in der Regele mittels Besenstrich hergestellt. Dies ist eine sehr einfache und kostengünstige Variante.

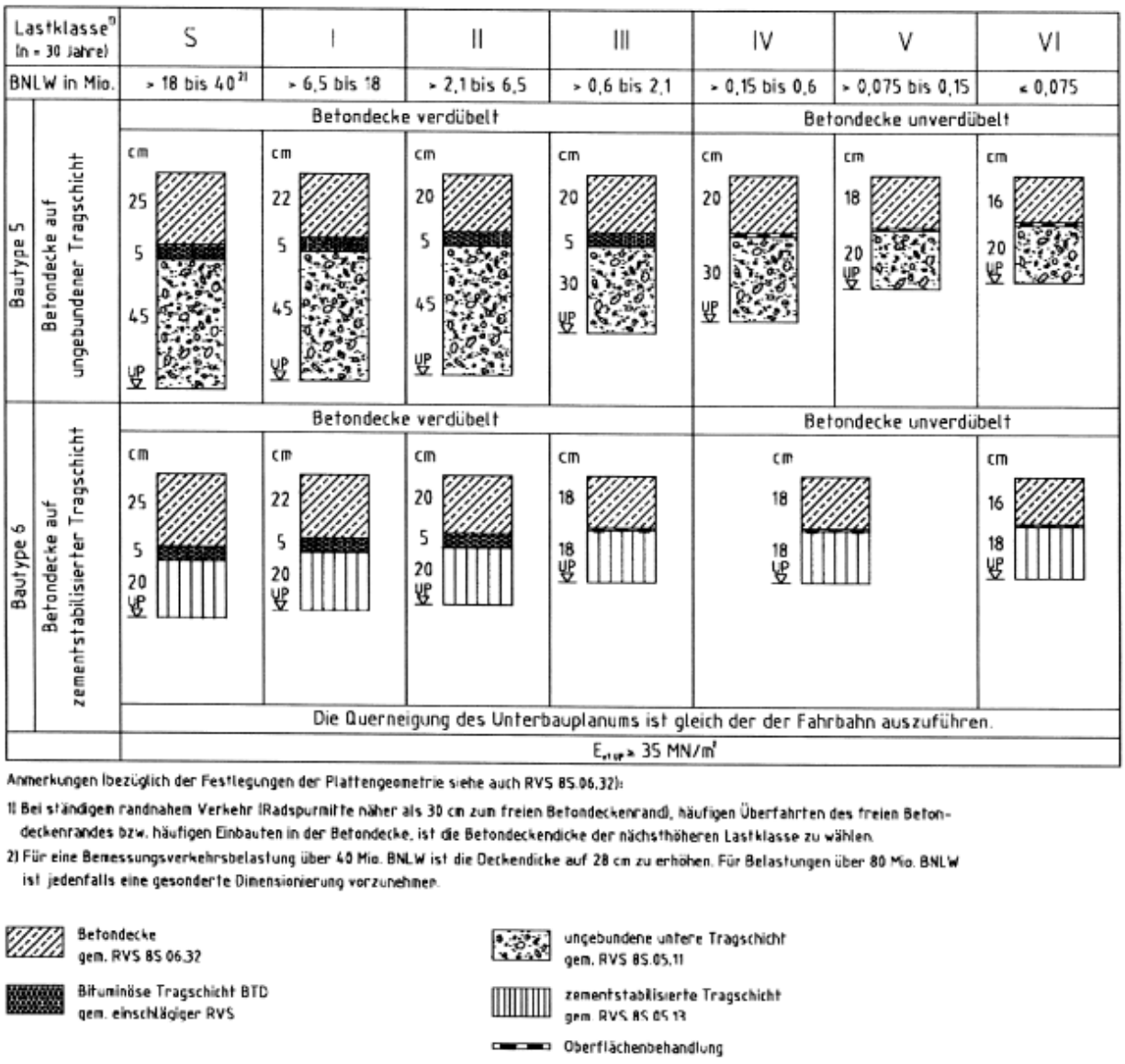
Bei der Herstellung von Betondecken ist auf eine gleichmäßige Auflagerfläche zu achten. Eine Reparatur bei Mängeln in der Herstellung und bei auftretenden Schäden ist sehr aufwendig, da hauptsächlich ganze Betonfelder in ihrer gesamten Dicke erneuert werden.

Die Betondecke wird so gestaltet, dass der Beton im Normalfall ohne Bewehrung unter den Verkehrs- und Temperaturspannungen keinen Schaden erleidet. Die Zug- und Biegespannungen werden somit vom Beton aufgenommen.

Für die Bemessung von Betonfahrbahndecken nach RVS 03.63 [29] sind die Dicke und das Material der Tragschicht und der Frostschutzschicht und die Verkehrsbelastung relevant -

siehe Tabelle 2.6. Mit der Berechnung des Bemessungsnormlastwechsels (BNLW) wird die Lastklasse und somit der Aufbau der Betonstraße bestimmt. Betonstraßen mit einem höheren Verkehrsaufkommen, das bedeutet mit einem hohen BNLW, weisen einen dickeren Aufbau auf und werden zusätzlich verdübelt.

Tabelle 2.6: Bemessungstabellen für Betondecken (Quelle: [29])



Betondecken werden in der Breite der Fahrbahn einschließlich Randstreifen mit senkrechten Rändern hergestellt. Wegen der Entwässerung erhalten sie ein Gefälle in Richtung der

Einlaufschächte - meistens nach außen. Betondecken, die in ihren gesamten Dicken denselben Beton aufweisen bezeichnet man als einschichtig. Es ist jedoch auch möglich, die obere Schicht aus Beton mit frostbeständigem Splitt als Zuschlagsstoff und die untere Schicht aus Beton mit runden Mineralstoffen oder unter Zugabe von recyceltem Beton herzustellen. Hierbei handelt es sich dann um einen zweischichtigen Einbau. Dabei sollten beide Betonsorten annähernd die gleichen Schwindeigenschaften aufweisen, damit der Schichtenverbund erhalten bleibt und keine zusätzlichen inneren Spannungen entstehen.

Zum Vermeiden von wilden Rissen und zum Ausgleich von Längenänderungen ist jede Betonfahrbahndecke durch Fugen zu unterteilen. Man unterscheidet:

- Scheinfugen
- Pressfugen oder Arbeitsfugen
- Raumfugen.

Scheinfugen sind Sollrissstellen, die durch eine obere Querschnittsschwächung der Decke um 25 % - 30 % entstehen, wie in Abbildung 2.2 zu erkennen ist.

Abbildung 2.2: Scheinfuge mit gewünschter Rissbildung (Foto: M. Moser)

Scheinfugen sollen ein Zusammenziehen der Platten infolge Schwinden und Schrumpfen ausgleichen. Zusätzlich erreicht man durch diese Fugen geringere Plattenlängen, die eine Verminderung der Wölbspannungen zur Folge haben. Der Fugenabstand ist somit so zu wählen, dass die durch Reibung auf der Unterlage in den Beton eingebrachten

Zugspannungen und die durch ungleichmäßige Temperatur entstehenden Wölbspannungen zusammen mit den Spannungen aus der Verkehrsbelastung kleiner bleiben als die Dauerbiegezugfestigkeit des Betons. Der Zeitpunkt des Fugenschneidens erfolgt je nach Art des Betons; sollte aber nicht zu früh erfolgen, da der Schnitt sich sonst „ausfranst".

Bei Straßenfließbeton wird der zu vergießende Fugenspalt auch durch Einlegen einer Fugenleiste mit trapezförmigem Querschnitt hergestellt. Die in den frischen Beton eingelegten Fugenleisten werden erst nach der Erhärtung des Betons entfernt.

Querfugen werden im Abstand der 25-fachen Deckendicke, jedoch höchstens im Abstand von 5,50 m, angeordnet. Die Feldlänge darf im Allgemeinen das 1,5-fache der Feldbreite nicht überschreiten. Zu geringe Plattenlängen bewirken, dass infolge geringfügiger Schwankungen der Betonfestigkeit, des Schwindverlaufs, der Temperatur sowie der Reibung an der Unterlage nicht alle Scheinfugen reißen. Dadurch entsteht ein sogenanntes „Paketreißen", bei dem sich mehrere Platten gemeinsam zusammenziehen und entsprechend größere Bewegungen an der gerissenen Fuge verursachen. Es kann dadurch zu einem Reißen der Fugenvergussmasse oder einem Abreißen an den Betonflanken kommen. Scheinfugen treten im Straßenbau als Querfugen auf und werden verdübelt.

Pressfugen oder Arbeitsfugen werden zwischen schon bestehenden Straßendecken und frisch betonierten Feldern ausgeführt wie zum Beispiel bei Betonfahrbahnen an Gehsteigen, nach Tagesabschnitten usw. Diese Fugen trennen die Betondecke in ihrer gesamten Dicke. Man benötigt sie um die schwachen Verbindungen zu überbrücken und das Eindringen von Wasser zu verhindern. Im Straßenbau werden Pressfugen als Längsfugen angeordnet und verankert.

Bei **Raumfugen** handelt es sich um Fugen, die durch die gesamte Dicke der Betondecke reichen und eine Ausdehnung ermöglichen. Im Allgemeinen werden Betondecken raumfugenlos hergestellt.

Das Vergießen des Fugenspalts mit bituminöser Heißvergussmasse hat sich sehr bewährt. Die bituminösen Heißvergussmassen werden durch geeignete Kunststoffzusätze und wirksame Füller an die Beanspruchungen wie Dehnbarkeit, Vergießbarkeit, Haftung und Dauerfestigkeit unter den dynamischen Verkehrsbelastungen angepasst.

Fugen sind immer Unstetigkeitsstellen in der Spannungsverteilung. Somit werden bei Längsscheinfugen und Pressfugen 80 cm lange Anker mit einem Durchmesser von 20 mm aus

Betonformstahl eingebaut, die Längs- und Querkräfte übertragen. Es werden pro Betonfeldlänge drei Anker eingebaut. Zwischen Anker und Beton besteht ein voller Verbund. Um zwei oder mehr Betonspuren nebeneinander einbauen zu können, müssen die Spuren nacheinander geschalt werden. Der Schaler nagelt die Anker zunächst parallel an die Schalung. Kurz vor dem Betonieren der ersten Spur werden die Anker rechtwinkelig aufgebogen, wie in den Abbildungen 2.3 und 2.5 zu erkennen ist. Nach dem Erhärten des Betons in der einen Spur und dem Entfernen der Schalungsbretter werden die Anker nun in die andere Spur hineingebogen. Somit liegen die Anker normal zu den Längsfugen.

Abbildung 2.3: Rechtwinkelig aufgebogene Anker (Foto: M. Moser)

Um Längsbewegungen aufnehmen und Querkräfte übertragen zu können, werden Dübel normal zu den Querfugen angeordnet, siehe Abbildung 2.4 und 2.5.

Abbildung 2.4: Dübel in Stützkörben (Foto: M. Moser)

Die Dübel bestehen aus Rundstahl, sind kunststoffbeschichtet und haben einen Durchmesser von 25 mm und eine Länge von 50 cm. In weniger belasteten Straßen kann man sich eine Verdübelung ersparen. Die Dübel werden vor dem Betonieren mit Stützkörben aus Baustahlgewebe zusammengehalten und auf die Unterlage gestellt. Pro 30 cm Betonfeldbreite wird ein Dübel angeordnet.

Abbildung 2.5: Dübel und Anker für die erste Spur (Foto: M. Moser)

(Quellen: [1], [3], [4], [18], [19], [28], [29])

3 Dokumentation der bestehenden Betonschäden

Im Februar 2008 wurden zum ersten Mal von der Firma *Pittel und Brausewetter* Risse in den von ihnen hergestellten Straßenfließbetondecken bemerkt. Diese Betondecken sind, wie später erwähnt wird, zwischen einem und acht Jahren alt. Nachdem die Gewährleistung für Straßenbetondecken bis zu fünf Jahren dauern kann, würden durch eventuelle Instandsetzungsarbeiten erhebliche Zusatzkosten für die Baufirma entstehen.

Die folgende Dokumentation soll nun einen guten Überblick über die Schäden und mögliche Ursachen dafür geben.

Zu Beginn wurden einige der schadhaften Betondecken fotografiert und die Schadensbilder analysiert. Die Risse verteilen sich netzartig über die gesamten Betonfelder und sind deutlich mit dem freien Auge zu erkennen - siehe Abbildung 3.1, 3.2 und 3.3.

Abbildung 3.1: Risse in der Johnstraße (Foto: M. Moser)

Abbildung 3.2: Risse in der Kolbegasse (Foto: M. Moser)

Abbildung 3.3: Risse in der Elisabeth Allee (Foto: M. Moser)

Mit einer Risslupe wurden zwischen 0,1 mm und 2,5 mm breite Risse gemessen. Um die Rissbreiten ein wenig zu veranschaulichen, wurde ein Maßband auf ein stark zerrissenes Betonfeld gelegt - wie in Abbildung 3.4 zu erkennen ist.

Abbildung 3.4: Millimetergroße Risse in der Grenzackerstraße (Foto: M. Moser)

Betondecken mit Rissen dieser Größenordnung mussten auf Verlangen des Auftraggebers instand gesetzt werden. Dies war in der Grenzackerstraße (Abbildung 3.4) und auf dem Flughafengelände (Abbildung 3.5) der Fall.

Abbildung 3.5: Risse auf dem Flughafengelände (Foto: M. Moser)

Bei den schadhaften Betonfeldern am Hietzinger Kai handelt es sich um eine dreispurige Fahrbahn, die wie alle anderen Baustellen in ca. einer Woche betoniert wurde. In der

Abbildung 3.6 kann man deutlich erkennen, dass die rechte Spur auf dem Foto Risse aufweist, während die linke Spur einwandfrei ist.

Abbildung 3.6: Risse nur in der rechten Spur am Hietzinger Kai (Foto: M. Moser)

Nun stellt sich die Frage, warum diese beiden Fahrspuren so unterschiedliche Betonoberflächen aufweisen, obwohl sie mit dem gleichen Material und auf die gleiche Art hergestellt wurden.

Nach dem Fotografieren der schadhaften Betonfelder, wurden die Betonlieferscheine der einzelnen Baustellen herausgesucht, um den genauen Betonierzeitpunkt feststellen zu können, siehe Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Übersicht der Baustellen mit schadhaften Betonfeldern

Jahrgang	Baustelle
2002	
4. Mai	Gutraterplatz
14., 16.-21. September	Grenzackerstraße
2003	
9., 10., 21., 23., 24., 30. Juli 4., 5. August 15., 16., 20.-23., 27.-30. Oktober	Flughafen
17., 21.-23., 25., 28., 29. Juli, 12., 14., 18.-21, 25.-28. August	Elisabeth Allee
2004	
8., 9., 14., 15. Juli	Kolbegasse
6., 8., 13. Juli	Hietzinger Kai
3.-5., 12., 19.August	Veitingergasse
2006	
Oktober	Grenzübergang Berg
2007	
4., 9., 12. Juli	Johnstraße
25.-27. September, 1. Oktober	Ottakringerstraße

Nach der zeitlichen Zuordnung der Baustellen mit schadhaften Betondecken wurden Baustellen mit Betonfeldern, die augenscheinlich keine Risse aufweisen, fotografiert. Bei der Betondecke bei der Kreuzung Johann Straußgasse und Rainergasse (Abbildung 3.7 und 3.8) konnten keine Risse mit dem Auge festgestellt werden.

Abbildung 3.7: Betondecke bei Kreuzung Johann Straußgasse / Rainergasse (Foto: M. Moser)

Abbildung 3.8: Nahaufnahme der Betonstruktur bei Kreuzung Johann Straußgasse / Rainergasse (Foto: M. Moser)

Um die Betondecken mit und ohne Schäden gegenüberstellen zu können, wurde die Tabelle 3.1 erweitert. In Tabelle 3.2 kann man nun deutlich erkennen, dass die Baustellen mit den rot gefärbten Feldern („J“ = Ja) schadhafte Betondecken sind, während die sonstigen Baustellen („N“ = Nein) keinen Schaden aufweisen.

Tabelle 3.2: Übersicht von allen beobachteten Baustellen

Jahrgang	Baustelle	Schaden
2002		
4. Mai	Gutraterplatz	J
6.,19.,20. August	Maroltingerstraße	N
14., 16.-21. September	Grenzackerstraße	J
2003		
9., 10., 21., 23., 24., 30. Juli 4., 5. August 15., 16., 20.-23., 27.-30. Oktober	Flughafen	J
17., 21.-23., 25., 28., 29. Juli, 12., 14., 18.-21, 25.-28. August	Elisabeth Allee	J
2004		
7., 8., 16. Juni	Rankgasse	N
8., 9., 14., 15. Juli	Kolbegasse	J
6., 8., 13. Juli	Hietzinger Kai	J
3.-5., 12., 19.August	Veitingergasse	J
2005		
14., 15., 19., 20. Juli	Johann Straußgasse # Rainergasse	N
10., 17. August	Possingergasse	N
4. August	Thaliastraße	N
2006		
28.-30. August, 6. 7. 11. September	Rankgasse	N
Oktober	Grenzübergang Berg	J
2007		
4., 9., 12. Juli	Johnstraße	J
17. August	Maroltingerstraße	N
25.-27. September, 1. Oktober	Ottakringerstraße	J

Nach der Begutachtung der Baustelle Hietzinger Kai (Abbildung 3.6) könnten eventuell unterschiedliche Wetterbedingungen (zu heiße Sommertage und zu starke Stürme) zu den Rissen geführt haben. Mittels der *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik* [20] war es möglich, auch rückwirkend Klimadaten zu ermitteln. Somit wurde für einige Baustellen, schadhaft oder nicht, die Windrichtung und Windstärke, die Temperatur und die Niederschlagsmenge herausgesucht. In der folgenden Tabelle 3.3 wurden zwei Baustellen mit und zwei ohne Schäden herausgesucht und miteinander verglichen.

Die größte Windstärke ist bei der Baustelle Rainergasse zu sehen. Da die Betondecken dieser Baustelle keine Risse aufweisen und auch keine gravierenden Temperaturunterschiede zwischen den damaligen Betoniertagen der schadhaften und schadlosen Betondecken festgestellt werden, kann die Schadensursache nicht alleine vom Wetter abhängen.

Tabelle 3.3: Wetterdaten einiger Baustellen

Baustelle: Gutraterplatz

Schaden:	Ja		
Datum	Wetter		
	Wind	Temperatur	Niederschlag
04.05.2002	S 3	21,0	1,2mm

Baustelle: Kolbegasse

Schaden:	Ja		
Datum	Wetter		
	Wind	Temperatur	Niederschlag
08.07.2004	SE 3	23,4	0,2mm
09.07.2004	W 3	21,5	0,3mm
14.07.2004	W 2	16,4	1,9mm
15.07.2004	W 3	16,7	2,6mm

Baustelle: Maroltingergasse

Schaden:	Nein		
Datum	Wetter		
	Wind	Temperatur	Niederschlag
06.08.2002	N 2	21,8	15,8 mm
19.08.2002	SE 2	22,4	-
20.08.2002	E 3	21,6	1,1mm

Baustelle: Rainergasse

Schaden:	Nein		
Datum	Wetter		
	Wind	Temperatur	Niederschlag
14.07.2005	W 3	22,0	0,0mm
15.07.2005	E 2	22,6	0,0mm
19.07.2005	W 5	23,7	0,1mm
20.07.2005	W 3	21,1	0,0mm

Eine bestimmte Betonzusammensetzung kann nicht der Grund für den Schaden sein, da die Fahrbahnspuren auf dem Hietzinger Kai innerhalb einer Woche mit der selben Betonzusammensetzung betoniert wurden, und nur eine Spur Risse aufweist (Abbildung 3.6).

Trotzdem wurden der Zement, die Gesteinskörnung und die Betonzusätze soweit wie möglich aus den Firmenunterlagen herausgesucht und in der Tabelle 3.4 zusammengestellt. In dem Zeitraum 1999 bis 2004 wurde die Betonsorte: OB B400 FTB K4 GK22 PZ275 als Normalbeton oder auch als schnell erhärtender Beton (12 Std. und 24 Std.) eingebaut. Da die Zementbezeichnung laut Lieferschein der Firma *Pittel und Brausewetter* nur PZ275 lautet (ohne Klammerbezeichnung), könnte es sich um einen CEMI 32,5 handeln. Vielleicht wurde bei der Bezeichnung aber auch nicht genau auf die Zumahlung eingegangen, dann würde diese Bezeichnung auch einem CEMII 32,5 entsprechen. Somit wurde angenommen, dass dieser Beton nach neuer Norm etwa einem OB C30/37 B7 XM2 F45 GK 22 CEM II 32,5 entspricht. Ab 2005 wurde die Betonsorte: OB C30/37 B7 XM2 F45 GK 22 CEM II 42,5 als Normalbeton oder auch als schnell erhärtender Beton (12 Std. und 24 Std.) eingebaut.

Tabelle 3.4: Betonzusammensetzung von 1999 bis 2007

1999 und 2000	
Zuschlagstoff Sand:	Reinbold 0/8
Zuschlagstoff Splitt:	Klöch KK 11/22
Zement:	Mannersdorf
Fließmittel:	Melment L10

2002	
Zuschlagstoff Sand:	Reinbold 0/8
Zuschlagstoff Splitt:	Holler KK 11/22
Zement:	Mannersdorf
Fließmittel:	Betontechnik Duriment FMNA
Luftporenbilder:	Betontechnik Duriment LP 4

2003	
Verdunstungsschutz:	TAL NB 2
Regenschutz:	Murexin
Zuschlagstoff Sand:	Reinbold 0/8
Zuschlagstoff Splitt:	Holler KK 11/22
Zement:	Mannersdorf
Fließmittel:	Betontechnik Duriment FMNA und LZF
Luftporenbilder:	Betontechnik Duriment LP 4
Verflüssiger:	Betontechnik Duriment BV 34
Verzögerer:	Betontechnik Duriment Verzögerer

2004	
Regenschutz:	Murexin
Zuschlagstoff Sand:	Reinbold 0/8, Heka 0/4, Kotzian 0/4
Zuschlagstoff Splitt:	Holler KK 11/22
Zement:	Mannersdorf
Fließmittel:	Betontechnik Duriment FMNA
Luftporenbilder:	Betontechnik Duriment LP 4

2005	
Regenschutz:	Murexin
Zuschlagstoff Sand:	Heka 0/4, Kotzian 0/4
Zuschlagstoff Splitt:	Holler KK 11/22
Zement:	Mannersdorf
Fließmittel:	Betontechnik Duriment FMNA und BV 4710
Luftporenbilder:	Betontechnik Duriment LP 100
Verzögerer:	Betontechnik Duriment Verzögerer

2006	
Regenschutz:	Murexin
Zuschlagstoff Sand:	Heka 0/4, Kotzian 0/4
Zuschlagstoff Splitt:	KU MKN Kiessplitt 8/11, 11/22
Zement:	Mannersdorf
Fließmittel:	Betontechnik Duriment FMNA, BV 4710 und LZF
Luftporenbilder:	Betontechnik Duriment LP 4
Verzögerer:	Betontechnik Duriment Verzögerer

2007	
Verdunstungsschutz:	TAL NB 2, NB 3
Regenschutz:	Murexin
Zuschlagstoff Sand:	Heka 0/4, Kotzian 0/4
Zuschlagstoff Splitt:	Klöch Solosnica 8/11, 11/22
Zement:	Mannersdorf
Fließmittel:	Betontechnik Duriment FMNA, SF Advanced
	BASF Rheobuild
Luftporenbilder:	Betontechnik Duriment LP 4/1, LP 4/2
	BASF Micro Air
Verzögerer:	Betontechnik Duriment Verzögerer

Im Frühjahr 2008 trat der bisher schlimmste Fall ein - Risse, die bereits nach einer Woche aufgetreten sind, siehe Abbildung 3.9.

Abbildung 3.9: Risse bei der Baustelle U 2/8 (Foto: M. Moser)

Laut dem Prüfbericht der Eignungsprüfung von der *MAPAG*, einer staatlich akkreditierten Prüf- und Überwachungsstelle, hat der Straßenoberbeton „C 30/37 B7 XM2 GK22 CEMII 42,5N Fließbeton“ seit einigen Jahren einen W/B - Wert von 0,38. Nachdem die Arbeiter schon länger von einem sehr schwer einbaubaren Beton sprachen und die Obergrenze des W/B - Wertes bei 0,45 liegt (siehe Tabelle 2.2), wurde der W/B - Wert im Frühjahr 2008, nach der Baustelle U 2/8, von ca. 0,38 auf ca. 0,43 erhöht.

Ein Grund für die Rissbildung könnte sein, dass das Nachbehandlungsmittel zu sparsam aufgetragen wurde, sodass der Beton unter der Sonneneinstrahlung zu schnell sein Wasser verloren hatte - „verdurstet“ ist.

4 Versuchsplanung

In diesem Kapitel werden zuerst die ausgewählten Versuche bzw. deren Anwendungsgrund aufgezählt und einige Informationen für die Auswertung der Prüfergebnisse gegeben. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Probekörper.

4.1 Ausgewählte Prüfungen

Aufgrund der Schadensbilder wurden in verschiedenen Literaturquellen Prüfverfahren gesucht, die Aussagen über die tatsächliche Schadensursache ermöglichen.

Zu Beginn werden die Risstiefen der Probekörper gemessen und dokumentiert. Da der *österreichische Zementverein* die Spaltzugfestigkeiten des Betons an einigen Bohrkernen aus den schadhaften Betonfeldern geprüft hat und die Firma *La Farge* längsseitig aufgeschnittene Bohrkerne unter dem Mikroskop betrachtet hat, werden die daraus gewonnenen Erkenntnisse lediglich übernommen. Die Druckfestigkeit, die Porosimetrie und das thermische Verhalten (Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse) werden im Zuge dieser Diplomarbeit an ausgewählten Probekörpern festgestellt.

4.1.1 Druckfestigkeit

Die wichtigste Betoneigenschaft ist die Druckfestigkeit. Sie ist für die Tragfähigkeit verantwortlich und wird in Festigkeitsklassen eingeteilt - siehe Tabelle 2.1. Durch Einspannen von Probekörpern in eine Prüfmaschine lässt sich die Druckfestigkeit von Beton leicht ermitteln. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, wird die Druckfestigkeit des Betons an mehreren Probekörpern je Baustelle geprüft. Anhand von diesem Versuch soll festgestellt werden, ob die Risse einen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Betondecken haben. Weiters werden die Druckfestigkeiten der einzelnen Probekörper verglichen, um einen eventuellen Zusammenhang bzw. Unterschiede der einzelnen Baustellen herausfinden zu können (Quelle: [7]).

4.1.2 Porosimetrie

Viele Eigenschaften des Betons lassen sich über den Aufbau des Zementsteines erklären. Neben der Hydratation spielt für die Festigkeit und die Dichtigkeit eines Betons die Porenverhältnisse im Zementstein eine wesentliche Rolle. Für die Druckfestigkeit ist unter anderem der Gesamtporenraum entscheidend; für andere Güteeigenschaften die Porengrößen. Die Porosität des Betons sollte möglichst niedrig sein, damit das Eindringen von betonschädlichen Fremdstoffen wie CO_2 oder salzhaltigen Wässern verhindert wird und die

Festigkeit des Zementsteins nicht abnimmt. Die Art der Füllung der Poren - Luft oder Wasser - ist für den Einfluss des Porenraumes auf die Festigkeitseigenschaften des Zementsteins von geringer Bedeutung. Es können folgende Poren nach ihrer Größe unterschieden werden:

- Verdichtungsporen
- Luftporen
- Kapillarporen
- Schrumpfporen
- Gelporen.

Die größten Poren im Zementstein sind die **Verdichtungsporen**, die beim Anmachen des Zementes in den Zementleim eingeführt werden. Sie können durch die nachfolgende Verdichtung nie vollkommen ausgetrieben werden. Die Hydratation beeinflusst den Gehalt an Verdichtungsporen kaum - wesentlich ist jedoch die Konsistenz der Mischung.

Die künstlich eingeführten **Luftporen** dienen zur Erhöhung des Frost - Tau - Widerstandes und sind wie die Verdichtungsporen mit dem freien Auge oder zumindest mit dem Lichtmikroskop sichtbar.

Die **Kapillarporen** entstehen durch überschüssiges Wasser. Im Gegensatz zu den Luftporen verändert sich der Kapillarporenraum mit fortschreitender Hydratation erheblich. Für die Dichtigkeit und die Dauerhaftigkeit des Betons ist eine Minimierung des Kapillarporenanteils anzustreben. Der Kapillarporenanteil an der Gesamtporosität hängt im Wesentlichen vom W/B - Wert, vom Hydratationsgrad und von der Zementart ab.

Das im Zementstein chemisch gebundene Wasser verursacht beim Erhärten ein chemisches Schrumpfen, weil das Volumen des Hydratationsprodukts um ungefähr 25 % kleiner als die Summe der Volumina von Zement und freiem Wasser ist. Bei diesem Schrumpfvorgang entstehen die **Schrumpfporen.**

Die Zementkörner wachsen allseitig in den Wasserraum hinein, wobei sie auch bei dichtestem Gefüge den Raum nicht vollständig ausfüllen. Die verbleibenden Zwischenräume werden als **Gelporen** bezeichnet. Sie sind hauptverantwortlich für die Schrumpf- und Quellvorgänge im Beton und ihr Anteil nimmt mit fortschreitender Hydratation zu. Das bedeutet, dass wenige

Gelporen im Zementstein ein Indiz für eine schlechte Hydratation und eine niedrige Festigkeit ist.

Die Größen der einzelnen Porenarten werden in der Literatur teilweise unterschiedlich eingeteilt, siehe Tabelle 4.1, 4.2 und 4.3.

Tabelle 4.1: Porengrößen nach *Wesche* (Quelle: [10])

Porenart	**Porengröße**
Verdichtungsporen	0,1 mm – 2 mm
Luftporen	50 µm – 2 mm
Kapillarporen und Schrumpfporen	50 nm – 50 µm
Gelporen	0,2 nm – 50 nm

Tabelle 4.2: Porengrößen nach *Schneider* (Quelle: [7])

Porenart	**Porengröße**
Gelporen	0,001 µm – 0,1 µm
Poren aus chemischen Schwinden	0,01 µm – 1,0 µm
Kapillarporen	0,1 µm –10 µm
Mikroluftporen	50 µm – 300 µm
Grobporen	größer 1000 µm

Tabelle 4.3: Porengrößen nach *Locher* (Quelle: [13])

Porenart	**Porengröße**
Verdichtungsporen	1 mm – 5 mm
Luftporen	5 µm – 1 mm
Kapillarporen	10 nm – 5 µm
Gelporen	0,5 nm – 3 nm

Bei vollständiger Hydratation ist die Porosität des Zementsteins fast nur vom W/B - Wert abhängig, siehe Abbildung 4.1. Somit verbleiben bei einem W/B - Wert von über 0,40 neben

Gel- und Luftporen noch Kapillarporen im Zementstein, die die Güte von Beton beeinträchtigen.

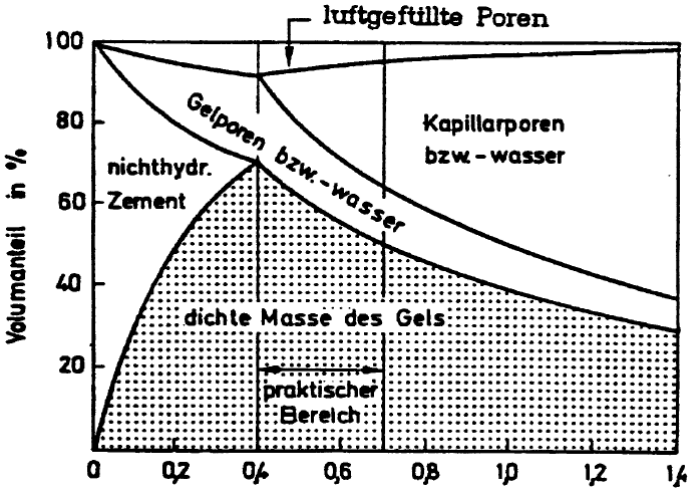


Abbildung 4.1: Porenanteil im Zementstein in Abhängigkeit vom W/B - Wert (Quelle: [7])

In Abbildung 4.2 nach *Springenschmid* [15] sind die Porenanteile etwas anders aufgeteilt - statt den Luftporen in Abbildung 4.1 findet man hier einen Schrumpfporenanteil. Die Abbildung 4.2 stellt den Porenanteil im Zementstein bei unterschiedlichem Hydratationsgrad dar. Bei einer Hydratation von weniger als 100 % steigt die Anzahl der Kapillarporen, während die Anteile der Gel- und Schrumpfporen abnehmen. Da der Zementstein bei einem Hydratationsgrad von weniger als 100 % nicht vollständig hydratatisiert ist, findet man neben dem Zementgel auch noch einen Anteil an unhydratisierten Zement.

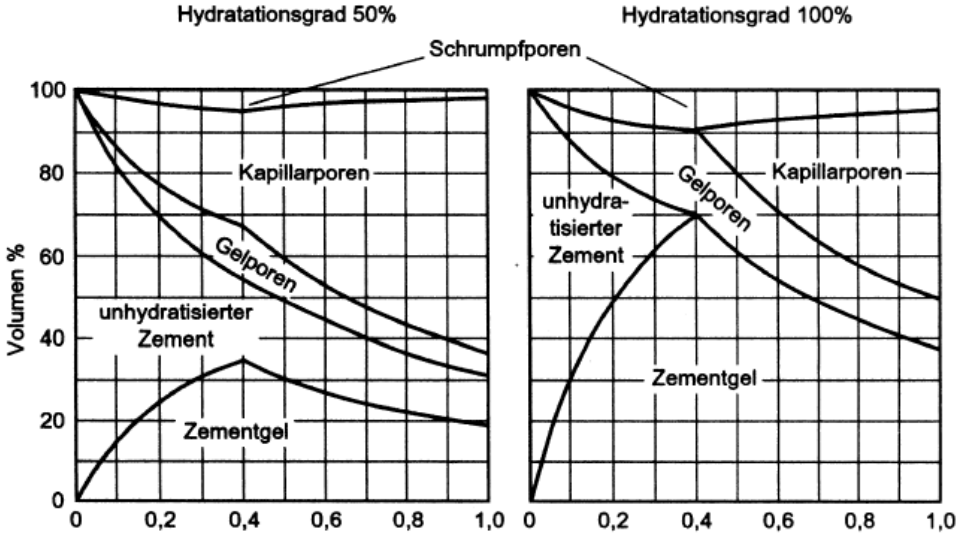


Abbildung 4.2: Porenanteil im Zementstein je nach Hydratationsgrad (Quelle: [15])

Die Abbildung 4.3 zeigt den Gesamtporenraum von Zementsteinen mit unterschiedlichen W/B - Werten. Man kann deutlich erkennen, dass die Zementsteine mit den höheren W/B - Werten einen wesentlich größeren Gesamtporenanteil aufweisen.

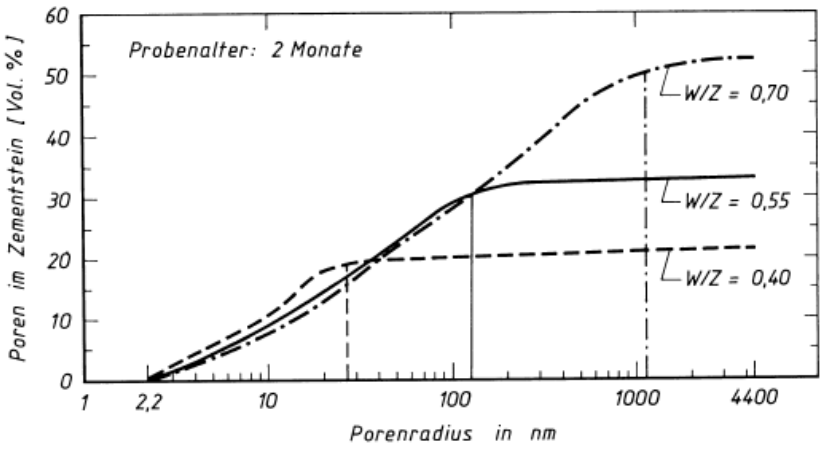


Abbildung 4.3: Gesamtporenraum von Zementsteinen mit unterschiedlichen W/B - Werten (Quelle: [23])

In der folgenden Abbildung 4.4 ist der Einfluss des Alters auf den Gesamtporengehalt und die Porenverteilung von einem Zementstein mit einem W/B - Wert von 0,55 zu erkennen. Der Gesamtporenraum nimmt durch die Hydratation sehr stark ab. Der junge Zementstein hat zu Beginn nur einen sehr geringen Anteil an feinen Poren, während nach einem Jahr schon eine größere Menge an kleinen Poren beobachtet werden kann.

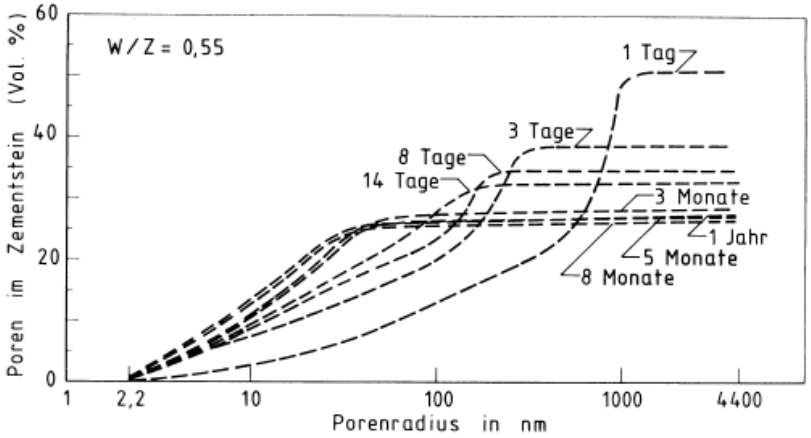


Abbildung 4.4: Einfluss des Alters der Zementsteinprobe auf die Porengrößenverteilung (Quelle: [23])

Die Nachbehandlung spielt auch eine wichtige Rolle für die Porosität, wie in Abbildung 4.5 zu erkennen ist. Der Zementstein aus einer nachbehandelten Betonprobe weist einen wesentlich kleineren Gesamtporenraum auf als der Zementstein aus einer Betonprobe, die nicht nachbehandelt wurde. Der für diesen Versuch verwendete Beton hatte eine W/B - Wert von 0,50.

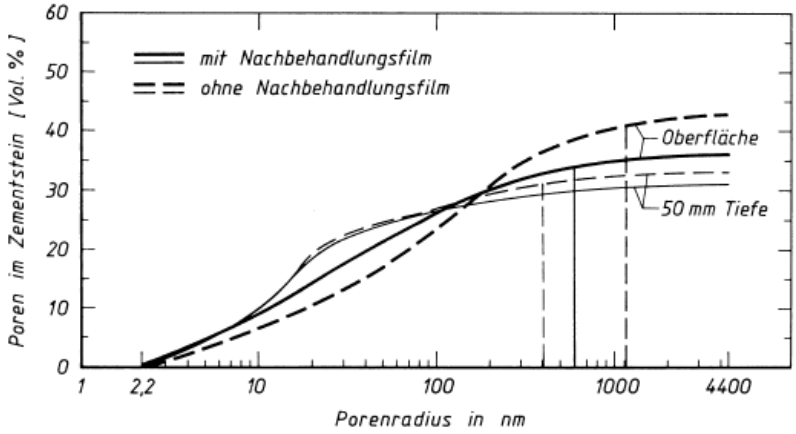


Abbildung 4.5: Einfluss der Nachbehandlung auf die Porengrößenverteilung im Zementstein (Quelle: [22])

Für die Messung der Schrumpf-, Gel- und Kapillarporen werden die Quecksilber - Porosimetrie und die Gas - Adsorption/Desorption am Häufigsten verwendet, siehe Abbildung 4.6.

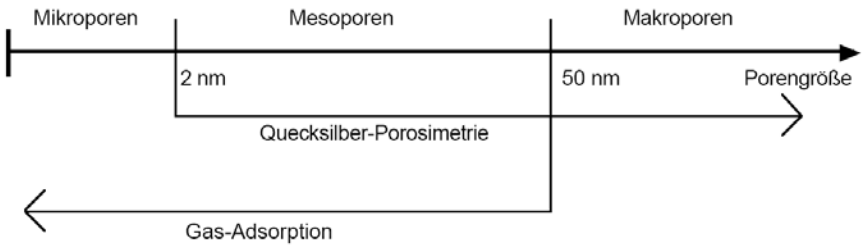


Abbildung 4.6: Messmethoden der Porosimetrie je nach Porengröße (Quelle: [21])

Die Quecksilber - Porosimetrie ist eine Technik, die 1945 von *Ritter und Drake* entwickelt wurde, anhand derer man das Volumen und die Größe von Makro- und Mesoporen messen kann. Das Quecksilber verhält sich zu den meisten Feststoffen wie eine nichtbenetzende

Flüssigkeit. Dadurch dringt das Quecksilber erst unter Einfluss eines steigenden Druckes in die offenen Poren des zu untersuchenden Probekörpers. Der Porenradius ist umgekehrt proportional zum angewendeten Druck laut einer Beziehung 4.1 von *Washburn*:

$$p \cdot r = -2 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta) \tag{4.1}$$

p angewendeter Absolutdruck

r Porenradius

γ Oberflächenspannung des Quecksilbers

θ Benetzungswinkel

Diese Beziehung gilt aber nur dann, wenn die Oberflächenspannung des Quecksilbers und der Benetzungswinkel während der Analyse konstant bleiben und das System im Gleichgewicht ist. Weiters werden zylinderförmige Poren angenommen und der Feststoff darf durch den Druck nicht deformiert werden. Durch die Messung der in die Poren eingedrungenen Quecksilbermenge und des Gleichgewichtdruckes erhält man die Porenvolumenverteilung als Funktion des Porenradius.

Mit diesem Versuch sollen die Porengrößen und das Porengrößenverhältnis im Zementstein der einzelnen Probekörper bestimmt werden, um den Hydratationsfortschritt des Zementsteins feststellen zu können. Es soll herausgefunden werden, ob der Beton in der Erhärtungsphase zu wenig Wasser gehabt hat, folglich „verdurstet“ ist, und deshalb die Risse aufgetreten sind (Quellen: [7], [10], [13], [15], [21], [23]).

4.1.3 Thermische Analyse

Der Oberbegriff „Thermische Analyse“ (TA) bezeichnet Verfahren, bei denen fast jede physikalische oder chemische Reaktion einer Substanz als Funktion der Temperatur gemessen wird. Man unterscheidet hier unter anderem:

- Thermogravimetrie (TG)
- Differenzthermoanalyse (DTA).

Die **Thermogravimetrie (TG)** ist eine Art der thermischen Analyse. Der Aufbau des Geräts, eine Thermowaage wird in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Probenauflage (Probenhalter) im Ofen steht mit einer automatisch kompensierenden Waage in Verbindung. Das Gewicht der Probe kann in Abhängigkeit von der Temperatur oder der Zeit kontinuierlich gemessen werden.

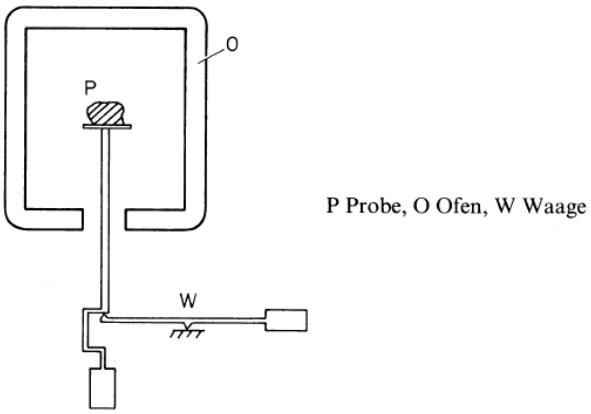
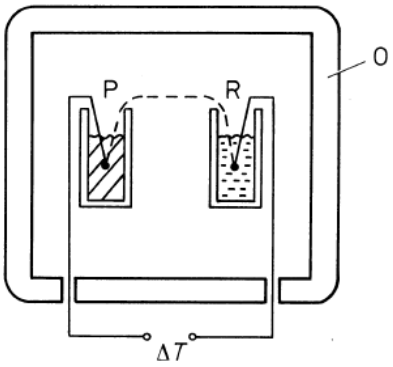


Abbildung 4.7: Gerät für die Thermogravimetrie (Quelle: [12])

Eine Massenänderung kann nur dann eintreten, wenn bei Probenreaktionen flüchtige Komponenten auftreten, die bei der Probe zu- oder abströmen (z.B.: Oxidation, Zersetzung).

Die Aufzeichnung der ersten zeitlichen Ableitung des Messsignals bietet für die Interpretation der untersuchten Reaktion wertvolle Hilfen. Man nennt dm(T)/dt „differenzierte thermogravimetrische Kurve“ (DTG - Kurve). Sie ermöglicht hauptsächlich kleine oder schwer erkennbare „Stufen“ der TG - Kurve als „Peaks“ in der DTG - Kurve abzubilden und damit Anfangs- und Endtemperatur einer Stufe zu bestimmen und Einzelabschnitte komplexer Reaktionen besser zu trennen. Die Thermogravimetrie wird häufig simultan mit der Differenzthermoanalyse eingesetzt.

Die **Differenzthermoanalyse (DTA)** wurde 1899 erstmals von *Roberts - Austen* beschrieben, der damit kleine Umwandlungswärmen bei Festkörperreaktionen qualitativ nachweisen konnte. In Abbildung 4.8 kann man den prinzipiellen Aufbau eines Geräts für die Differenzthermoanalyse, ein Dynamischer Wärmestrom - Differenz - Kalorimeter, erkennen.



P Probe, R Vergleichsprobe, O Ofen, ΔT Temperaturdifferenz zwischen Probe und Vergleichsprobe

Abbildung 4.8: Gerät zur Differenzthermoanalyse (Quelle: [12])

In einem Ofen wird zwischen der Probe und einer Vergleichsprobe die Temperaturdifferenz ΔT als Funktion der Temperatur gemessen. Bei einer idealen thermischen Symmetrie der Messanordnung sind die Wärmeströme zwischen Ofen, Probe und Vergleichsprobe gleich groß. Beide Proben werden gleich schnell erwärmt, um ΔT = 0 zu erreichen. Durch die Reaktionen in der Zementprobe wird Wärme freigesetzt oder verbraucht. Dies hat zur Folge, dass der Temperaturzustand gestört wird und die Temperaturdifferenz ΔT ungleich null ist. Der Wärmestrom vom Ofen zur Probe ändert sich somit. Diese Änderung ist ein Maß für den Reaktionswärmestrom. Um die einzelnen Reaktionen zu erkennen und zu ordnen zu können, sind in der Tabelle 4.4 die Temperaturen dargestellt, bei denen die verschiedenen Reaktionen ablaufen.

Tabelle 4.4: Kinetische Parameter der Reaktionen im Normalbeton (Quelle: [24])

Temperatur °C	**Dominierende Reaktion**	**Reaktionstyp**
20 - 300	Kapillarentwässerung	Entwässerung
300 – 490	Auflösung absorbierter Phasen	Entwässerung
490 – 540	Portlanditzerfall	Zersetzung
573	Quarzumwandlung	Umwandlung
580 - 750	Bildung von β – C_2S	Zersetzung
> 750	Nicht untersucht	-

Die Interpretation von Messkurven der thermischen Prüfverfahren, im Speziellen die Thermogravimetrie und die Differenzthermoanalyse, sind aufgrund der vielen Einflussgrößen

(Zementprobengröße, Zementprobenform, Tiegelmaterial, Störungen bei der Wägung,…) sehr schwierig, siehe *Hemminger und Cammenga* [12]: „ … *Es ist nicht möglich, eine komplette Aufzählung von Einflussgrößen und ihren Wirkungen auf die Messkurve anzubieten. Denn nur selten lässt sich eine quantitative Beziehung zwischen der Einflussgröße und der zugehörigen Änderung der Messkurve angeben, in den meisten Fällen überlagern sich die Einflüsse mehrerer Größen. Dies ist der Grund für die Schwierigkeit bei der vergleichenden Interpretation von thermogravimetrischen Messkurven. …*“

Mittels der Thermogravimetrie und der Differenzthermoanalyse soll das thermische Verhalten des Zementsteins analysiert werden. Anhand der Messkurven kann festgestellt werden, welche für den Zementstein typische Reaktionen statt finden, bzw. in welchem Ausmaß (Quelle: [12], [14], [24]).

4.2 Die Probekörper

Bei den Probekörpern handelt es sich einerseits um Bohrkerne, die aus den Betonfeldern gebohrt wurden und andererseits um Würfel, die im Labor zu Vergleichszwecken hergestellt wurden.

4.2.1 Bohrkerne

Die Druckfestigkeitsprüfung von Festbeton kann anhand von Bohrkernen ermittelt werden. Für die Prüfung der Porosität und für die thermische Analyse sind nur sehr kleine Zementsteinproben notwendig, die nach der Druckfestigkeitsprüfung aus den Bohrkernen herausgeschlagen werden. Um ein halbwegs aussagekräftiges Ergebnis bei den Versuchen zu erhalten, wurden Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm einerseits für den *österreichischen Zementverein* und die Firma *La Farge* und andererseits für die Untersuchungen bezüglich dieser Diplomarbeit aus einigen schadhaften Betondecken entnommen. Bei den Betondecken handelt es sich um fünf „ältere“ Baustellen mit einem W/B - Wert von 0,38 und eine „junge“ Baustelle, die einen W/B - Wert von 0,43 aufweist. Die Bohrkerne wurden mit einer Bohrkrone eines Bohrwagens (siehe Abbildung 4.9 und 4.10) gebohrt und anschließend mit einer Zange (siehe Abbildung 4.11) aus der Straße herausgeholt.

Abbildung 4.9: Bohrwagen (Foto: M. Moser)

Abbildung 4.10: Bohrkrone knapp über der Betondecke (Foto: M. Moser)

Abbildung 4.11: Drei Bohrkerne kurz vor dem Herausnehmen (Foto: M. Moser)

Um die Bohrkerne im Labor richtig zuordnen zu können, wurden alle Bohrkerne mit einer Speckkreide beschriftet. Anschießend wurde für alle Bohrkerne für diese Diplomarbeit Bohrprotokolle zusammengestellt, wie in den Tabellen 4.5 bis 4.10 ersichtlich ist.

Tabelle 4.5: Bohrprotokoll von Baustelle 1

Baustelle 1: Hietzinger Kai

Betoniert:	Juli 2004	
Aufbau:	30 cm Beton	
W/B - Wert:	0,38	
Bohren:		
	Datum:	17. März 2008
	Uhrzeit:	ca. 12.00
	Bohrkernnummerierung:	1 A
		2 A
		3 A

Tabelle 4.6: Bohrprotokoll von Baustelle 2

Baustelle 2: Kolbegasse

Betoniert:	Juli 2004	
Aufbau:	26 cm Beton, darunter Asphalt	
W/B - Wert:	0,38	
Bohren:		
	Datum:	17. März 2008
	Uhrzeit:	ca. 15.00
	Bohrkernnummerierung:	1 B
		2 B
	Datum:	18. März 2008
	Uhrzeit:	ca. 8.00
	Bohrkernnummerierung:	3 B

Tabelle 4.7: Bohrprotokoll von Baustelle 3

Baustelle 3: Grenzackerstraße

Betoniert:	September 2002	
Aufbau:	26 cm Beton, darunter Vlies	
W/B - Wert:	0,38	
Bohren:		
	Datum:	19. März 2008
	Uhrzeit:	ca. 8.00
	Bohrkernnummerierung:	1 C
		2 C
		3 C

Tabelle 4.8: Bohrprotokoll von Baustelle 4

Baustelle 4: Veitingergasse

Betoniert:	August 2004	
Aufbau:	27 cm Beton	
W/B - Wert:	0,38	
Bohren:		
	Datum:	19. März 2008
	Uhrzeit:	ca. 10.00
	Bohrkernnummerierung:	1 D
		2 D
		3 D

Tabelle 4.9: Bohrprotokoll von Baustelle 5

Baustelle 5: Flughafen

Betoniert:	Juli, August, Oktober 2003	
Aufbau:	31 cm Beton	
W/B - Wert:	0,38	
Bohren:		
	Datum:	25. März 2008
	Uhrzeit:	11:00
	Bohrkernnummerierung:	1 E
		2 E
		3 E

Tabelle 4.10: Bohrprotokoll von Baustelle 6

Baustelle 6: Hochheimgasse

Betoniert:	Juni 2008	
Aufbau:	26 cm Beton, darunter Asphalt	
W/B - Wert:	0,43	
Bohren:		
	Datum:	30. Juli 2008
	Uhrzeit:	10:00
	Bohrkernnummerierung:	1 F
		2 F
		3 F

4.2.2 Würfel

Es wurden vier Betonwürfel auf unterschiedliche Arten hergestellt. Die 150 mm x 150 mm x 150 mm großen Würfelformen wurden alle mit Beton gefüllt, einer Spachtel glatt gestrichen und anschließend mit einem Rütteltisch verdichtet - siehe Abbildung 4.12 und 4.13.

Abbildung 4.12: Halbvolle Würfelform auf einem Rütteltisch (Foto: M. Moser)

Abbildung 4.13: Verdichteter Betonwürfel auf einem Rütteltisch (Foto: M. Moser)

Im Weiteren wurden auf zwei Würfel ein gelblich gefärbter Verdunstungsschutz gesprüht, wie in Abbildung 4.14 zu erkennen ist.

Abbildung 4.14: Aufbringen des gelblich gefärbten Verdunstungsschutzes (Foto: M. Moser)

Somit entstanden zwei Serien mit je zwei Würfel, wie in der Tabelle 4.11 ersichtlich ist. Der Luftporengehalt wurde, unabhängig von der Herstellung der Betonwürfel anhand von Beton des selben Fahrmischers festgestellt.

Tabelle 4.11: Protokoll zur Herstellung und Lagerung der Würfel

Betoniert:	31. Juli 2008	
Luftporengehalt:	6 %	
W/B - Wert:	0,42	
1. Serie:		
	Erhärtung:	4 Tage im Wärmeschrank bei 60°C
	1.1 Würfel	ohne Nachbehandlung
	1.2 Würfel	mit Verdunstungsschutz
2. Serie:		
	Erhärtung:	4 Tage im Freien (sonnige Tage)
	2.1 Würfel	ohne Nachbehandlung
	2.2 Würfel	mit Verdunstungsschutz

Die zwei Würfel der 1. Serie wurden für vier Tage in einen Ofen bei 60°C gegeben, während die Würfel der 2. Serie unter den damaligen Wetterbedingungen (vier sonnige Tage mit durchschnittlich 25°C) austrockneten. Diese Probekörper wurden für die Prüfung der Porosität hergestellt. Es soll herausgefunden werden, wie die Poren bei einem Beton ohne Nachbehandlungsmittel im Vergleich zu einem nachbehandelten Beton verteilt sind.

5 Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

In diesem Kapitel werden nun die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung der gebohrten Bohrkerne und hergestellten Würfel beschrieben. Es werden folgende Untersuchungen durchgeführt und ausgewertet:

- Optische Untersuchung
- Mikroskopische Untersuchung
- Spaltzugfestigkeit
- Druckfestigkeit
- Porosimetrie
- Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse

5.1 Optische Untersuchung der Bohrkerne

Zu Beginn der optischen Untersuchungen der Bohrkerne wurden die Rissbreiten an der Oberfläche der Bohrkerne mit einer Risslupe gemessen, siehe Abbildung 5.1.

Abbildung 5.1: Messen der Rissbreiten mit einer Risslupe (Foto: M. Moser)

Es wurde festgestellt, dass die Risse eine Breite zwischen 0,1 mm und 2,5 mm aufweisen. Bei den beiden Baustellen Grenzackerstraße und Flughafen wurden die breitesten Risse gefunden. Im nächsten Schritt wurden die Risstiefen untersucht. Mit einem schwarzen Stift wurde das Ende des jeweiligen Risses markiert und anschließend gemessen, wie in den Abbildungen 5.2 und 5.3 zu erkennen ist.

Abbildung 5.2: Bohrkern aus der Grenzackerstraße (Foto: M. Moser)

Abbildung 5.3: Bohrkern aus dem Flughafengelände (Foto: M. Moser)

Der tiefste Riss mit ungefähr 9 cm wurde bei einem Bohrkern aus der Grenzackerstraße gemessen (Abbildung 5.4). Bei einem der Bohrkerne aus dem Flughafengelände wurde im unteren Bohrkerndrittel ein ungefähr 4 cm langer und 0,8 mm breiter, waagrechter Riss festgestellt (Abbildung 5.5).

Abbildung 5.4: Tiefster Riss im Bohrkern (Grenzackerstraße) (Foto: M. Moser)

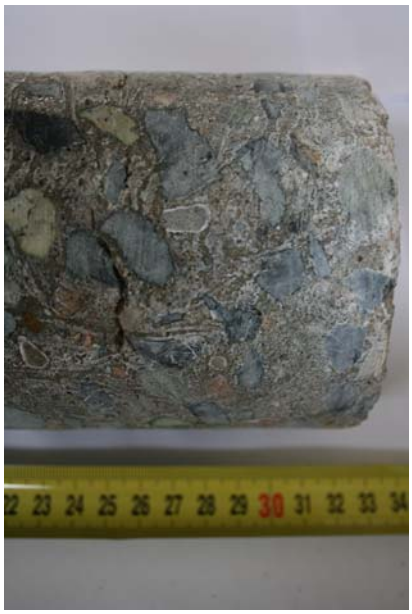


Abbildung 5.5: Waagrechter Riss im Bohrkern (Flughafen) (Foto: M. Moser)

5.2 Mikroskopische Untersuchung der Bohrkerne

Die Firma *La Farge* schnitt einige Bohrkerne längsseitig auf und betrachtete die Risse unter einem stark vergrößerten Mikroskop. Teilweise fangen die Risse bei der Gesteinskörnung an und laufen um diese herum, wie in Abbildung 5.6 zu erkennen ist.

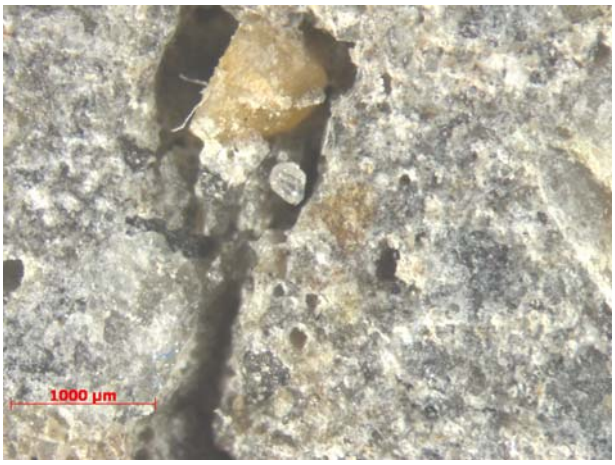


Abbildung 5.6: Riss um Gesteinskörnung mikroskopisch vergrößert (Foto: Firma *La Farge*)

Die Risse sind auch nicht durchgehend als linienförmiger Riss zu erkennen, sondern es entsteht eher der Eindruck, also ob sich die größeren Poren (Luft- und Verdichtungsporen) verbinden wollen (Abbildung 5.7).

Abbildung 5.7: Große Poren mikroskopisch vergrößert (Foto: Firma *La Farge*)

In den beiden vorigen Abbildungen sowie in Abbildung 5.8 können Risse erkannt werden, die aufgrund von chemischen oder physikalischen Prozessen entstanden sein müssen. Sie sind teilweise an den Rändern „ausgefranst“, in ihrer Länge unterbrochen oder verlaufen sogar waagrecht im Bezug zur Bohrkernoberfläche.

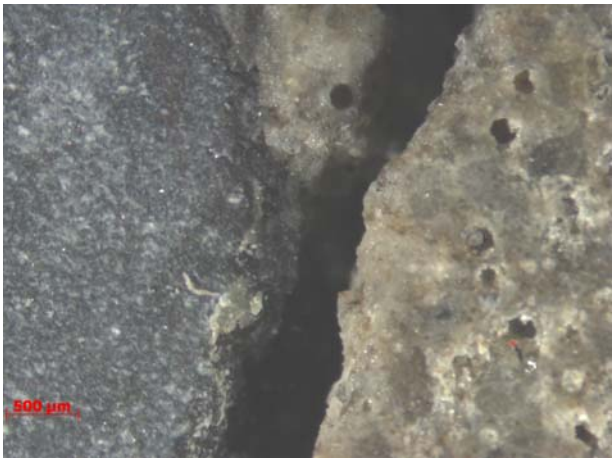


Abbildung 5.8: Riss mikroskopisch vergrößert (Foto: Firma *La Farge*)

5.3 Spaltzugfestigkeit der Bohrkerne

Der *österreichische Zementverein* hat die Spaltzugfestigkeit an Bohrkernen aus vielen verschiedenen Baustellen geprüft. Es wurden aus dem Prüfbericht [22] jedoch nur die Prüfungsergebnisse der Bohrkerne von jenen Baustellen entnommen, die im Zuge dieser Diplomarbeit in den nächsten Kapiteln näher untersucht werden, siehe Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Spaltzugfestigkeit der Bohrkerne der ausgewählten Baustellen (Quelle: [22])

Baustelle	Spaltzugfestigkeit von Bohrkern 1 [N/mm²]	Spaltzugfestigkeit von Bohrkern 2 [N/mm²]
1. Hietzinger Kai	3,70	3,50
2. Kolbegasse	2,15	3,15
3. Grenzackerstraße	2,05	2,25
4. Veitingergasse	2,85	2,85
5. Flughafen	1,45	2,15

5.4 Druckfestigkeit der Bohrkerne

Die Bohrkerne hatten alle einen Durchmesser von ca. 10 cm und eine Höhe von 26 cm bis 31 cm. Da die Prüfmaschine nicht allzu hohe Probekörper testen kann, wurden alle Bohrkerne mit einer Steinsäge auf ungefähr 20 cm gekürzt. Um vor der Druckfestigkeitsprüfung die Rohdichte laut Formel 5.1 ermitteln zu können, wurden alle Prüfkörper nacheinander auf einer Waage abgewogen (siehe Abbildung 5.9) und mit einer Schieblehre vermessen (siehe Abbildung 5.10).

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{5.1}$$

ρ Rohdichte [kg/m³]

m Masse [kg]

V Volumen [m³]

Abbildung 5.9: Abwiegen der Probekörper (Foto: M. Moser)

Abbildung 5.10: Vermessen der Probekörper (Foto: M. Moser)

Anschließend wurden die Bohrkerne laut Norm gelagert. *„…Proben, zur Ermittlung der Druckfestigkeit, die in einem Betonalter über 21 Tage entnommen wurden, sind nach ihrer prüffertigen Vorbereitung vor der Prüfung drei Tage in einem be- und entlüfteten Trockenschrank bei (50 ± 5) °C zu lagern …“* (Quelle: [26] Kapitel: 5.2.3).

Nach der dreitägigen Lagerung wurden die Druckfestigkeiten des Betons von allen Bohrkernen mit der Prüfmaschine „Toni Technik“ (siehe Abbildung 5.11) ermittelt.

Abbildung 5.11: Prüfmaschine „Toni Technik“ (Foto: M. Moser)

Die einzelnen Prüfprotokolle der Druckfestigkeiten des Betons aller Probekörper sind dem Anhang zu entnehmen.

Bohrkerne der Baustelle 1: Hietzinger Kai

Betoniert im:	Juli 2004
Aufbau:	30 cm Beton
Betonsorte:	OB B400 HS FTB 24 Std. K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Maschinendaten:	kraftgesteuert - 0,6 N/mm²s

In Tabelle 5.2 sind die Ist - Abmessungen und die beiden Messwerte (Rohdichte und Druckfestigkeit) des Beton der Probekörper der Baustelle 1 zusammengestellt.

Die Rohdichten und die Druckfestigkeiten der Probekörper 1A und 2A sind annähernd gleich groß. Der Probekörper 3 hat eine etwas geringere Festigkeit, obwohl seine Rohdichte ein wenig größer war als bei den Proben 1A und 2A.

Tabelle 5.2: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 1

	Probekörper 1A	**Probekörper 2A**	**Probekörper 3A**
Ist - Höhe [mm]:	202	202	202
Ist - Durchmesser [mm]:	103	103	103
Ist - Gewicht [g]:	3826,0	3827,5	3856,5
Rohdichte [kg/m³]:	2273,16	2274,05	2291,28
$f_{ck,cube}$ [N/mm²]:	37	37	37
Druckfestigkeit [N/mm²]:	42,60	42,81	35,18

Die Druckfestigkeitskurven des Betons der drei Bohrkerne werden in Abbildung 5.12 zusammengefasst. Die geprüften Druckfestigkeiten der Probekörper 1A und 2A sind höher als die zu erreichenden Festigkeiten laut Festigkeitsklassen (siehe Tabelle 2.1). In Österreich wird die Würfeldruckfestigkeit als Vergleichswert herangezogen.

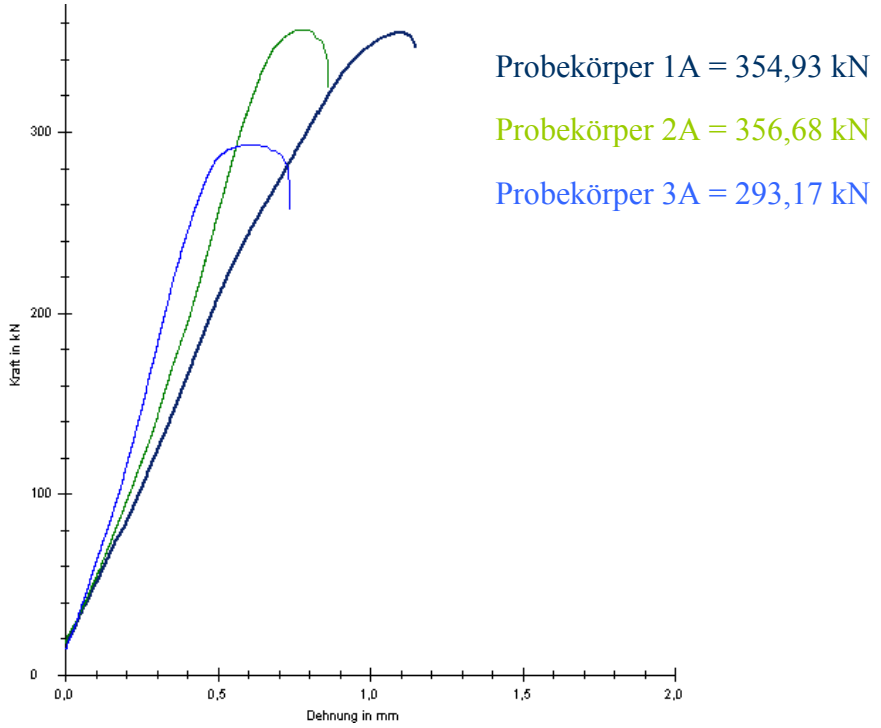


Abbildung 5.12: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 1)

Die Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne in Form eines Balkendiagramms findet man in Abbildung 5.13. Die rote Linie stellt die genormte Würfeldruckfestigkeit dar.

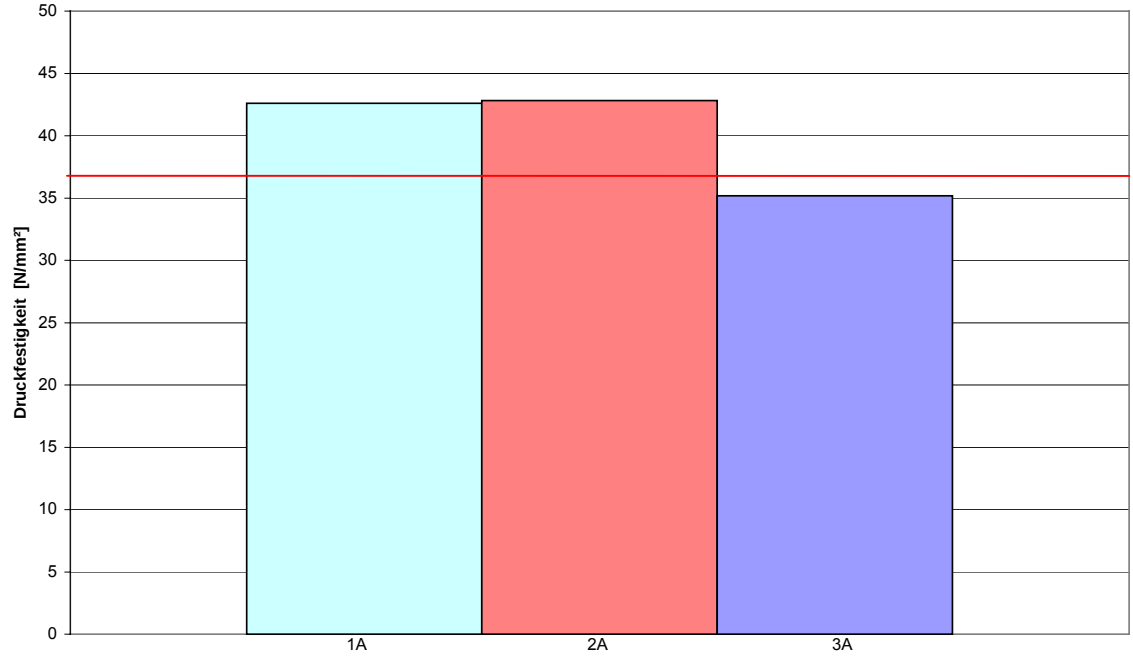


Abbildung 5.13: Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne (Baustelle 1)

Bohrkerne der Baustelle 2: Kolbegasse

Betoniert im:	Juli 2004
Aufbau:	26 cm Beton, darunter Asphalt
Betonsorte:	OB B400 HS FTB K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Maschinendaten:	kraftgesteuert - 0,6 N/mm²s

In Tabelle 5.3 sind die Ist - Abmessungen und die beiden Messwerte (Rohdichte und Druckfestigkeit) des Betons der Probekörper der Baustelle 2 zusammengestellt.

Bei dieser Versuchsserie findet man die größte Rohdichte und die maximalste Druckfestigkeit des Betons bei Probekörper 3B. Die Druckfestigkeiten des Betons der Probekörper 1B und 2B sind annähernd gleich groß. Der Beton von dieser Baustelle kann nicht die genormten Druckfestigkeiten erreichen.

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 2

	Probekörper 1B	**Probekörper 2B**	**Probekörper 3B**
Ist - Höhe [mm]:	202	202	203
Ist - Durchmesser [mm]:	103	103	103
Ist - Gewicht [g]:	3815,5	3777,0	3862,0
Rohdichte [kg/m³]:	2266,92	2244,04	2283,24
$f_{ck,cube}$ [N/mm²]:	37	37	37
Druckfestigkeit [N/mm²]:	26,52	26,61	33,38

Die Druckfestigkeitskurven des Betons der drei Bohrkerne sind in Abbildung 5.14 zusammengefasst.

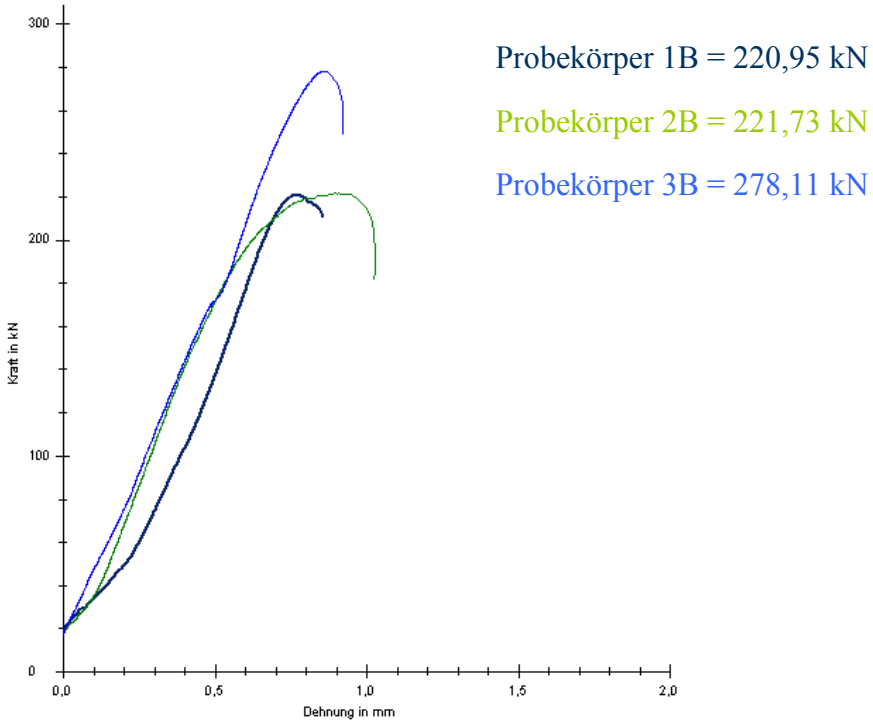


Abbildung 5.14: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 2)

Die Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne in Form eines Balkendiagramms findet man in Abbildung 5.15. Da die rote Linie die genormte Würfeldruckfestigkeit darstellt, kann man deutlich erkennen, dass der genormte Wert nicht erreicht wird.

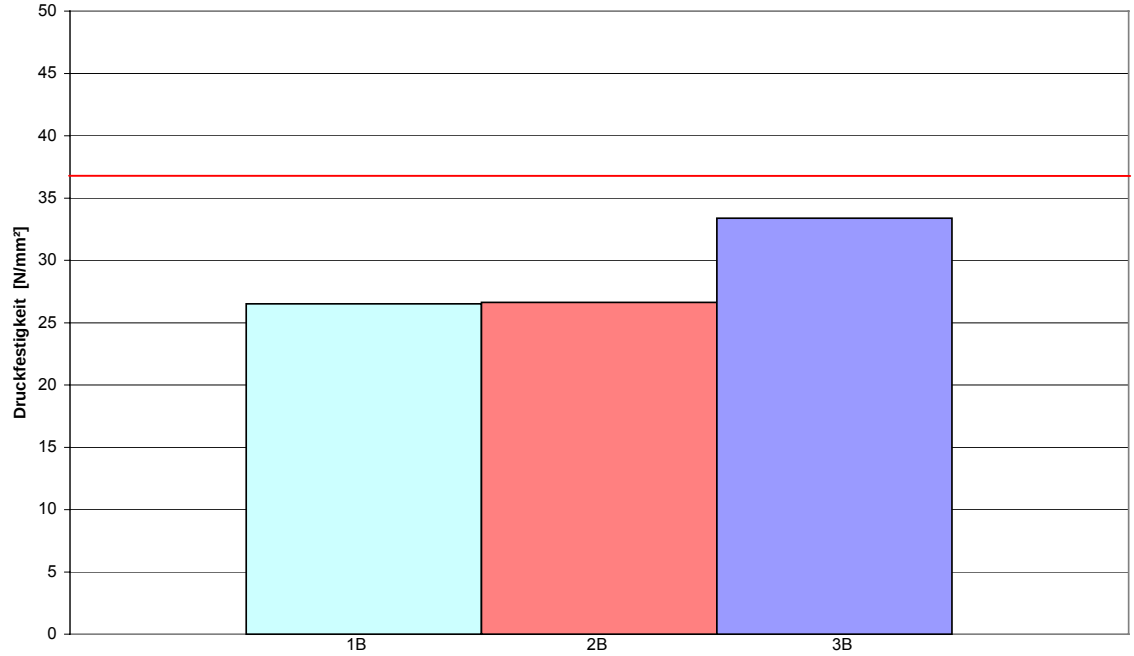


Abbildung 5.15: Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne (Baustelle 2)

Bohrkerne der Baustelle 3: Grenzackerstraße

Betoniert im:	September 2002
Aufbau:	26 cm Beton, darunter Flies
Betonsorten:	OB B400 FTB HS K4 GK22 PZ275
Betonsorten:	OB B400 FTB 12Std. HS K4 GK22 PZ275
Betonsorten:	OB B400 FTB 24Std. K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Maschinendaten:	kraftgesteuert - 0,6 N/mm²s

In Tabelle 5.4 sind die Ist - Abmessungen und die beiden Messwerte (Rohdichte und Druckfestigkeit) des Betons der Probekörper der Baustelle 3 zusammengestellt.

Bei Probekörper 3C ist zu erkennen, dass er die kleinste Rohdichte und die maximalste Druckfestigkeit von dieser Versuchsserie aufweist. Der Beton der Probekörper dieser Baustelle kann die genormten Druckfestigkeiten nicht erreichen.

Tabelle 5.4: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 3

	Probekörper 1C	**Probekörper 2C**	**Probekörper 3C**
Ist - Höhe [mm]:	202	202	202
Ist - Durchmesser [mm]:	103	103	103
Ist - Gewicht [g]:	3917,0	3927,0	3827,0
Rohdichte [kg/m³]:	2327,22	2333,16	2278,80
$f_{ck,cube}$ [N/mm²]:	37	37	37
Druckfestigkeit [N/mm²]:	28,50	33,09	34,98

Die Druckfestigkeitskurven des Betons der drei Bohrkerne sind in Abbildung 5.16 zusammengefasst.

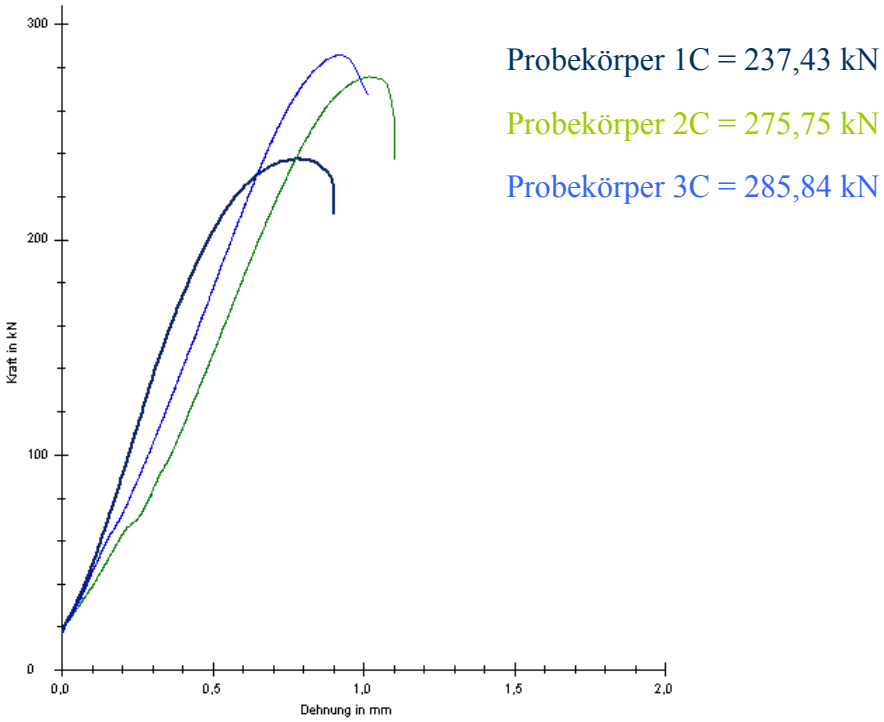


Abbildung 5.16: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 3)

Die Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne in Form eines Balkendiagramms findet man in Abbildung 5.17. Da die rote Linie die genormte Würfeldruckfestigkeit darstellt, kann man deutlich erkennen, dass der genormte Wert bei dieser Baustelle wieder nicht erreicht wird.

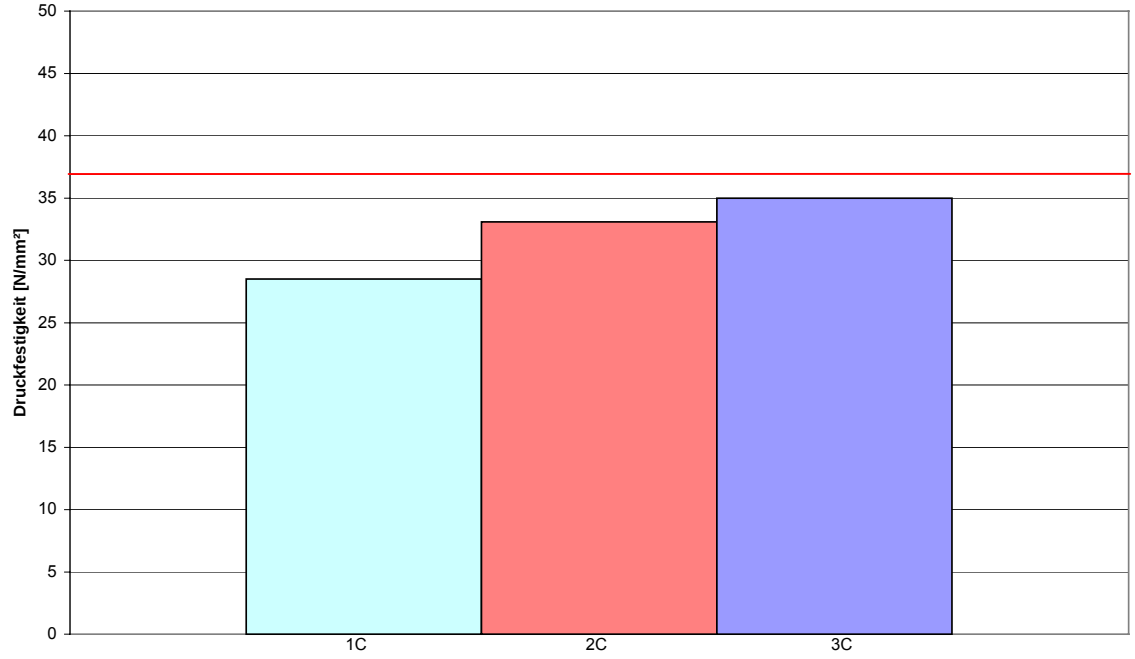


Abbildung 5.17: Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne (Baustelle 3)

Bohrkerne der Baustelle 4: Veitingergasse

Betoniert im:	August 2004
Aufbau:	27 cm Beton
Betonsorten:	OB B400 FTB HS K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Maschinendaten:	kraftgesteuert - 0,6 N/mm²s

In Tabelle 5.5 sind die Ist - Abmessungen und die beiden Messwerte (Rohdichte und Druckfestigkeit) des Betons der Probekörper der Baustelle 4 zusammengestellt.

Vergleicht man die Rohdichten und die Druckfestigkeiten des Betons der drei Probekörper, dann kann man erkennen, dass der Beton des Probekörpers 1D die größte Rohdichte und die maximalste Druckfestigkeit aufweist. Bei dieser Versuchsreihe erreicht nur der Beton des Probekörpers 1D die genormte Druckfestigkeit.

Tabelle 5.5: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 4

	Probekörper 1D	**Probekörper 2D**	**Probekörper 3D**
Ist - Höhe [mm]:	203	203	203
Ist - Durchmesser [mm]:	103	103	103
Ist - Gewicht [g]:	3956,0	3921,0	3905,0
Rohdichte [kg/m³]:	2338,82	2318,12	2308,66
$f_{ck,cube}$ [N/mm²]:	37	37	37
Druckfestigkeit [N/mm²]:	41,29	35,30	35,24

Die Druckfestigkeitskurven des Betons der drei Bohrkerne sind in Abbildung 5.18 zusammengefasst.

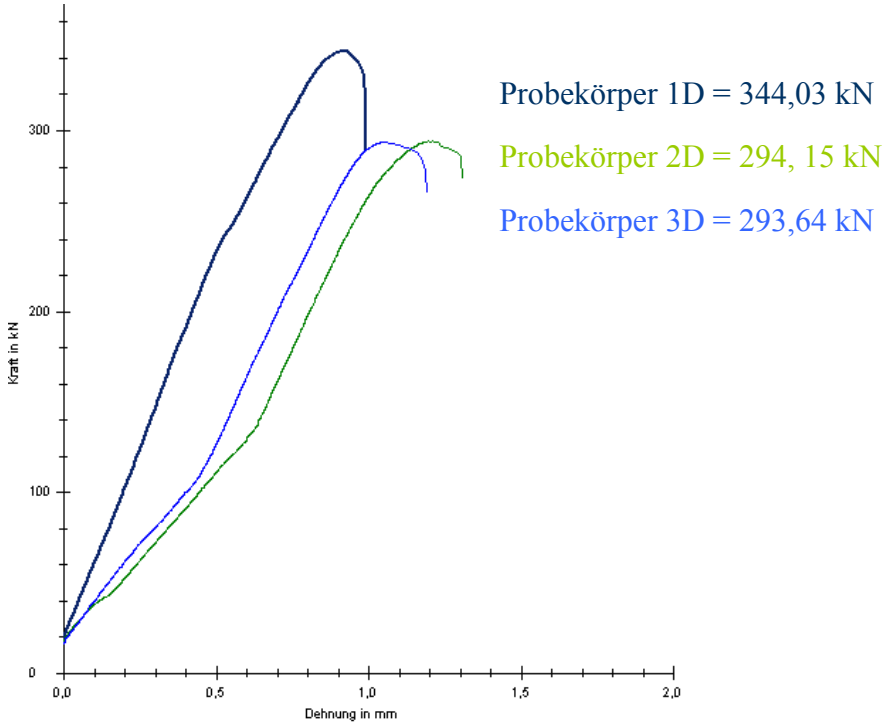


Abbildung 5.18: Maximal erreichte Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 4)

Die Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne in Form eines Balkendiagramms findet man in Abbildung 5.19. Da die rote Linie die genormte Würfeldruckfestigkeit darstellt, kann man deutlich erkennen, dass nur der Probekörper 1D den genormten Wert erreicht.

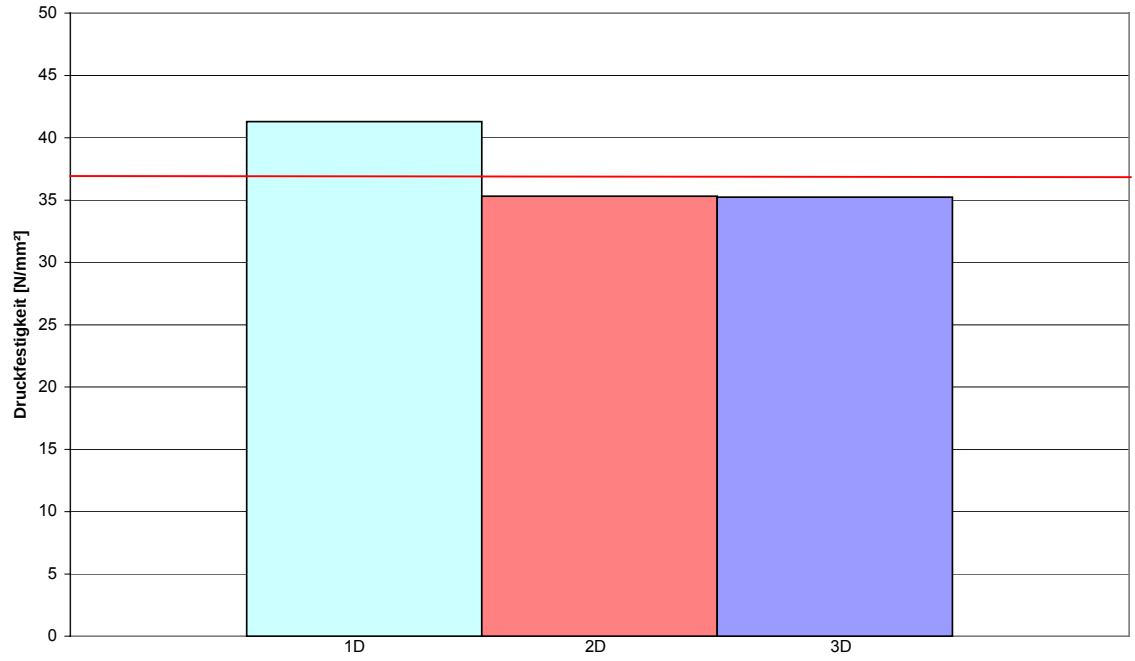


Abbildung 5.19: Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne (Baustelle 4)

Baustelle 5: Flughafen

Betoniert im:	Juli, August und Oktober 2003
Aufbau:	31 cm Beton
Betonsorten:	OB B400 FTB HS K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Maschinendaten:	kraftgesteuert - 0,6 N/mm²s

In Tabelle 5.6 sind die Ist - Abmessungen und die beiden Messwerte (Rohdichte und Druckfestigkeit) des Betons der Probekörper der Baustelle 5 zusammengestellt.

In dieser Versuchsserie konnte der Beton von keinem der drei Probekörper die genormten Druckfestigkeiten erreichen. Der Beton des Probekörpers 1E weist die niedrigste Druckfestigkeit auf.

Tabelle 5.6: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 5

	Probekörper 1E	**Probekörper 2E**	**Probekörper 3E**
Ist - Höhe [mm]:	202	202	202
Ist - Durchmesser [mm]:	103	103	103
Ist - Gewicht [g]:	3820,5	3836,5	3809,5
Rohdichte [kg/m³]:	2269,89	2279,39	2263,35
$f_{ck,cube}$ [N/mm²]:	37	37	37
Druckfestigkeit [N/mm²]:	23,58	27,82	27,55

Die Druckfestigkeitskurven des Betons der drei Bohrkerne sind in Abbildung 5.20 zusammengefasst.

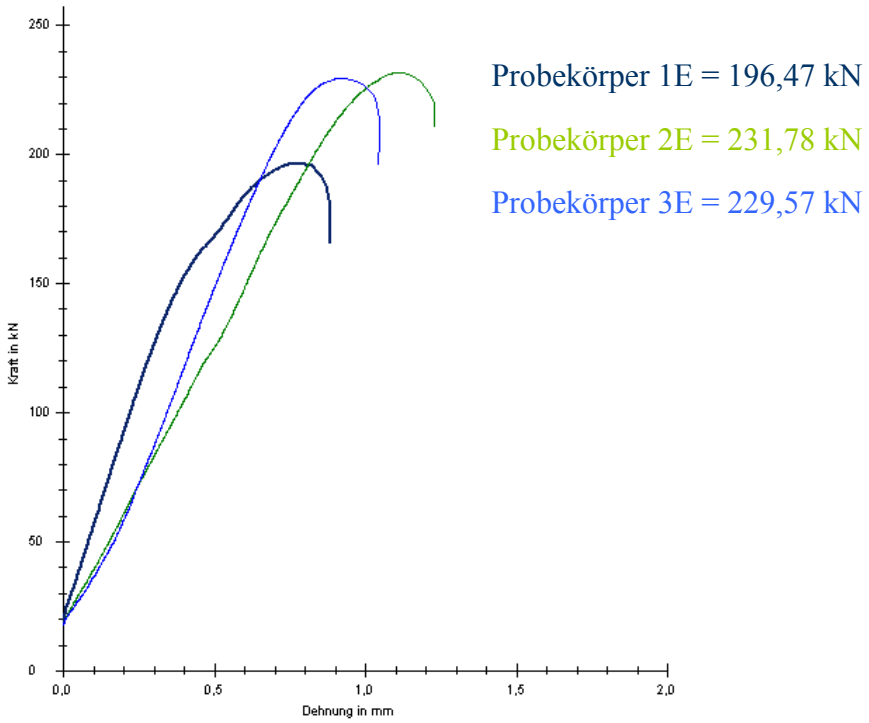


Abbildung 5.20: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 5)

Die Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne in Form eines Balkendiagramms findet man in Abbildung 5.21. Da die rote Linie die genormte Würfeldruckfestigkeit darstellt, kann man deutlich erkennen, dass der genormte Wert bei dieser Baustelle wieder nicht erreicht wird.

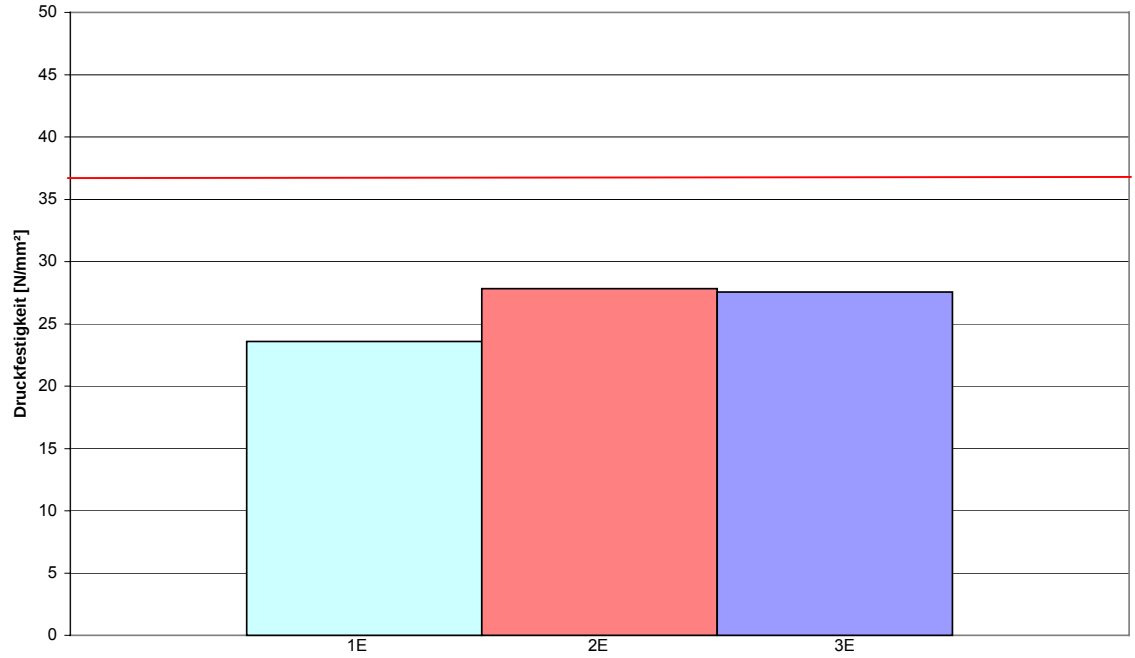


Abbildung 5.21: Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne (Baustelle 5)

Bohrkerne der Baustelle 6: Hochheimgasse

Betoniert im: Juni 2008

Aufbau: 26 cm Beton, darunter Asphalt

Betonsorten: OB C30/37 B7 XM2 GK22 CEMII 42,5N

W/B - Wert: 0,43

Maschinendaten: kraftgesteuert - 0,6 N/mm²s

In Tabelle 5.7 sind die Ist - Abmessungen und die beiden Messwerte (Rohdichte und Druckfestigkeit) des Betons der Probekörper der Baustelle 6 zusammengestellt.

Die Bohrkerne dieser Versuchsreihe sind von der jüngsten Baustelle (betoniert im Juni 2008) und haben somit bereits einen W/B - Wert von 0,43. Der Beton der Probekörper 1HHG und 2HHG erreichen die genormten Druckfestigkeiten. Zu erwähnen ist der große Unterschied der Druckfestigkeiten der Probekörper 2HHG und 3HHG. Die Rohdichten des Betons der drei Probekörper streuen nicht so stark wie die Druckfestigkeiten.

Tabelle 5.6: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 6

	Probekörper 1HHG	**Probekörper 2HHG**	**Probekörper 3HHG**
Ist - Höhe [mm]:	202	202	202
Ist - Durchmesser [mm]:	103	103	103
Ist - Gewicht [g]:	3816,5	3848,5	3831,0
Rohdichte [kg/m³]:	2267,51	2286,52	2276,13
$f_{ck,cube}$ [N/mm²]:	37	37	37
Druckfestigkeit [N/mm²]:	37,37	45,20	31,78

Die Druckfestigkeitskurven des Betons der drei Bohrkerne sind in Abbildung 5.22 zusammengefasst.

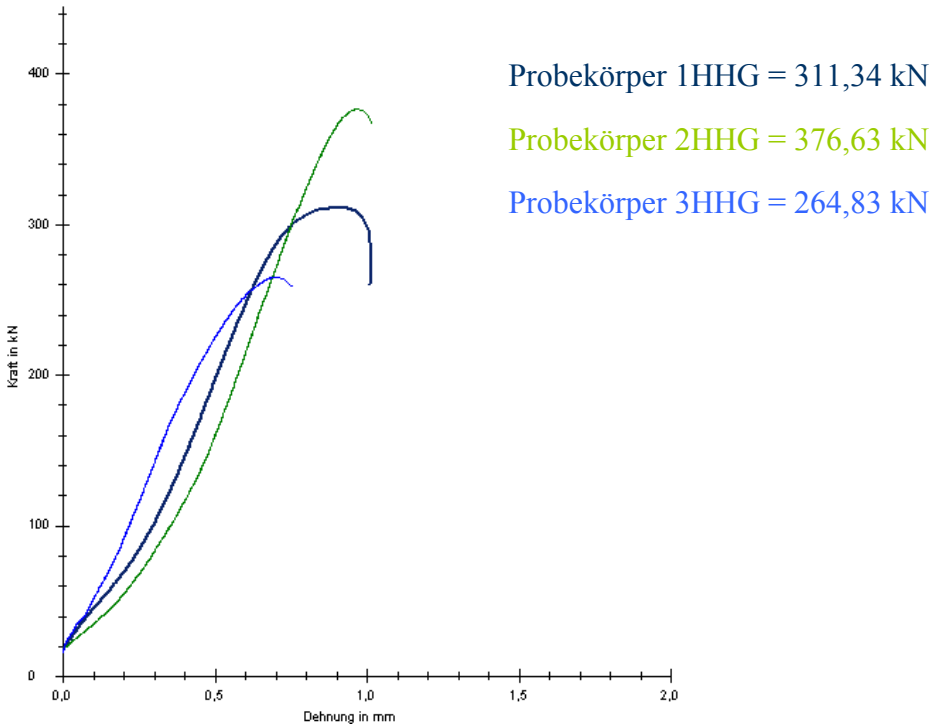


Abbildung 5.22: Maximal ausgehaltene Kraft der Bohrkerne (Baustelle 6)

Die Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne in Form eines Balkendiagramms findet man in Abbildung 5.23. Die rote Linie stellt die genormte Würfeldruckfestigkeit dar. Man kann deutlich erkennen, dass nur der Probekörper 3HHG den genormten Wert nicht erreicht.

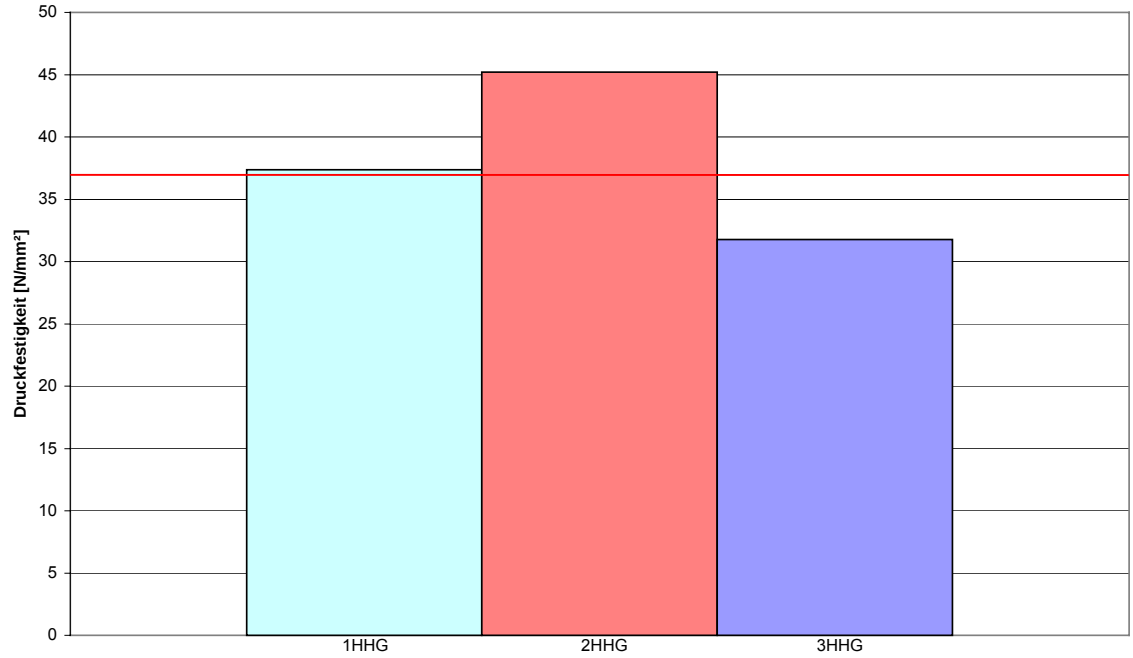


Abbildung 5.23: Druckfestigkeit des Betons der Bohrkerne (Baustelle 6)

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Werte der Rohdichten des Betons aller Bohrkerne nahe beisammen liegen - die minimale Rohdichte beträgt 3809,5 kg/m³ und die maximale Rohdichte 3956,0 kg/m³, während die gemessenen Druckfestigkeiten stark streuen - 23,58 N/mm² bis 45,20 N/mm². Der Beton der Bohrkerne mit dem niedrigen W/B - Wert von 0,38 erreichten zum Großteil nicht die genormten Druckfestigkeitswerte. In Abbildung 5.24 sind die Mittelwerte der Druckfestigkeiten des Betons von allen sechs Baustellen zusammengefasst. Wie man sehr gut erkennen kann, fallen die Werte der Baustellen 2, 3 und 5 am Schlechtesten aus, während der Beton der Baustelle 1 die höchste durchschnittliche Druckfestigkeit aufweist.

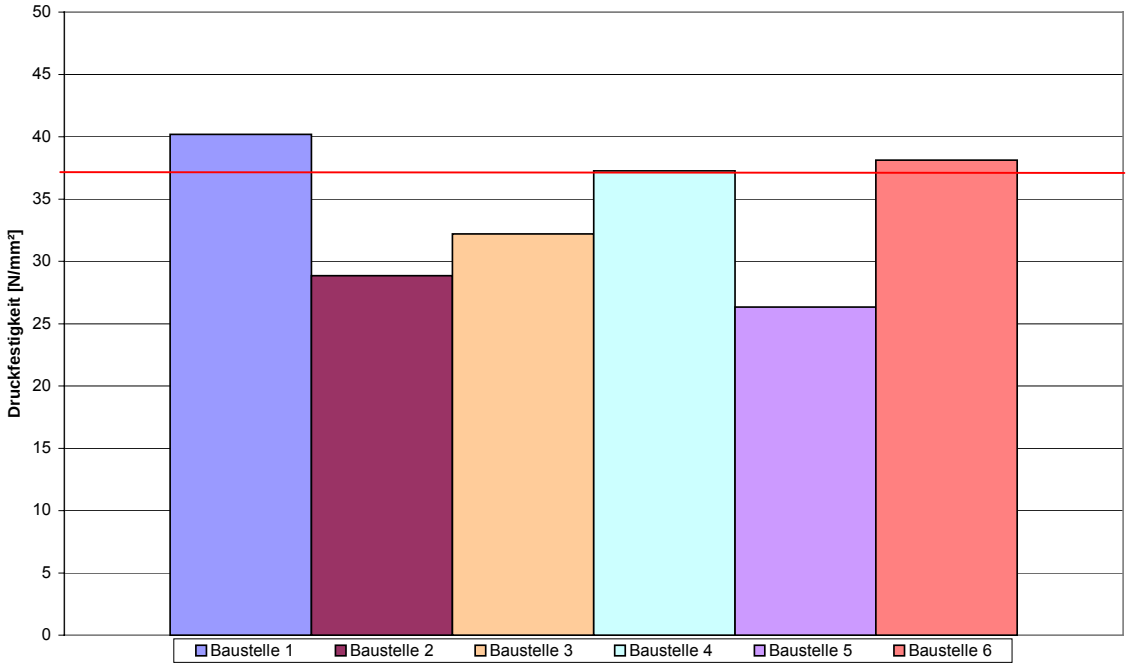


Abbildung 5.24: Vergleich der Mittelwerte der Druckfestigkeiten des Betons aller Baustellen

5.5 Porosimetrie

Die Porosimetrie wurde am Zementstein aller Probekörper (Bohrkerne und Würfel) mit dem Porosimeter PASCAL 240/440 geprüft. Dieses Gerät ist in Abbildung 5.25 zu sehen.

Abbildung 5.25: Porosimeter PASCAL 240/440 (Foto: M. Moser)

Das Porosimeter PASCAL 240/440 besteht aus den folgenden drei Teilen: dem Dilatometer, dem Drucksystem und dem Messsystem für die Kapazität und den Druck. Wie in Kapitel 4.1.2 erwähnt, wird die in die Poren eingedrungene Quecksilbermenge gemessen. Daraus erhält man die Porenvolumenverteilung als Funktion des Porenradius. Diese Kurven sagen einiges über den Hydratationsfortschritt, den W/B - Wert und das Festigkeitsverhalten aus.

5.5.1 Porosimetrie der Bohrkerne

Der Probekörper für eine genaue Porosimeterprüfung sollte nur aus Zementstein bestehen und keine Gesteinskörnung enthalten. Somit wurden aus jedem Bohrkern mit Meißel und Hammer kleine Zementsteinkörper herausgeschlagen. Um eine schöne Verteilung der Porosimetrie über die gesamte Betondeckendicke zu bekommen, wurden Zementsteine aus dem oberen, mittleren und unteren Bohrkerndrittel entnommen und verglichen.

Die einzelnen Prüfprotokolle der Porengrößenverteilungen des Zementsteins aller Probekörper können dem Anhang entnommen werden.

Bohrkerne der Baustelle 1: Hietzinger Kai

Betoniert im: Juli 2004

Aufbau: 30 cm Beton

Betonsorte: OB B400 HS FTB 24 Std. K4 GK22 PZ275

W/B - Wert: 0,38

In Tabelle 5.8 sind das Ist - Gewicht und die Porosität der Zementsteinproben der Baustelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 5.8: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 1

	Probekörper 1A_oben	**Probekörper 2A_oben**	**Probekörper 3A_Mitte**
Ist - Gewicht [g]:	1,0504	1,0197	1,0084
Totale Porosität [%]:	13,36	14,74	15,22

Wie in Kapitel 4.1.2 erwähnt wurde, sollte ein Zementstein mit einem W/B - Wert kleiner als 0,40 nahezu keine Kapillarporen aufweisen, da viele Kapillarporen und wenige Gelporen eine schlechte Hydratation und somit eine niedrige Festigkeit bedeuten. In Abbildung 4.1, laut [7], kann man deutlich erkennen, dass ein Zementstein mit einem W/B - Wert von 0,40 im Wesentlichen aus Zementgel, Gelporen und luftgefüllten Poren besteht. Betrachtet man nur das Porenvolumen, so sieht man auch in Abbildung 4.2, dass der Zementstein mit einem W/B - Wert von 0,40 eine Porosität von ungefähr 20 % aufweist. Da die Zuordnung der Größen der einzelnen Poren je nach Literatur unterschiedlich sind, wurden die Werte aus der Tabelle 4.2 nach *Schneider* [7] entnommen. Die Kapillarporen liegen somit zwischen 100 nm und 10 µm. In Abbildung 5.26 sind die Porengrößenverteilungen des Zementsteins der Probekörper der Baustelle 1 dargestellt.

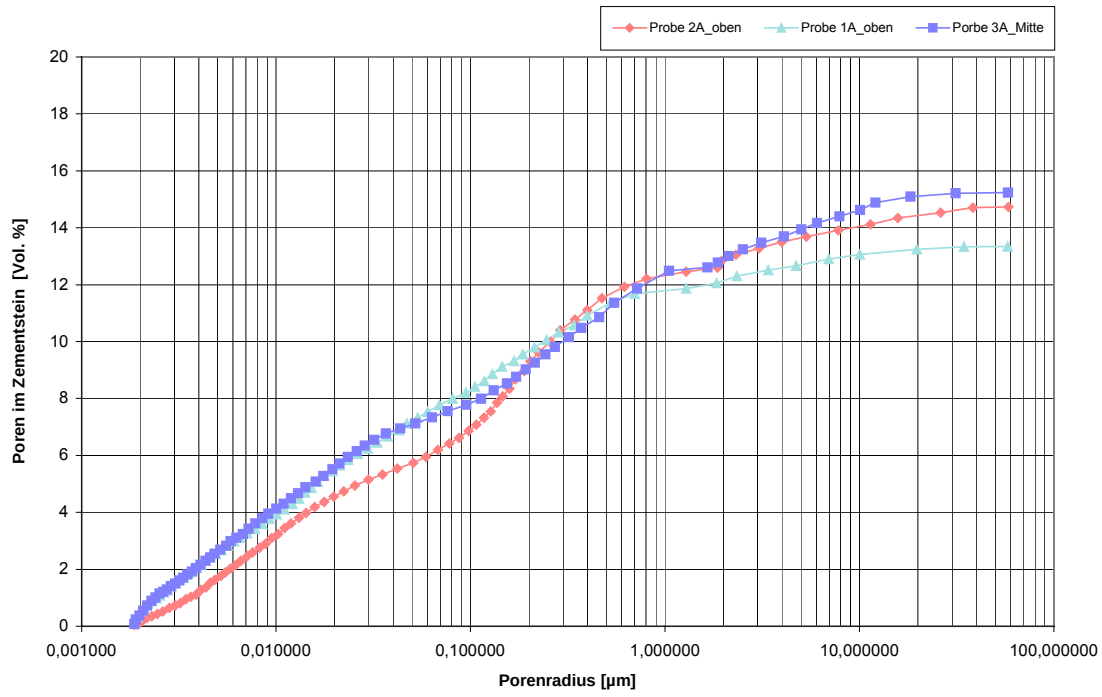


Abbildung 5.26: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 1)

In der folgenden Abbildung 5.27 sind die prozentuellen Anteile der verschiedenen Porengrößen des Zementsteins für die Baustelle 1 zusammengestellt. Der blaue Bereich (kleiner 0,1 µm) zeigt den Anteil der Gelporen und der rosa Bereich (0,1 µm - 10 µm) den Anteil der Kapillarporen. Der türkise Teil (größer 10 µm) steht für den Luftporenanteil. Da die Zementsteinprobe sehr klein ist, kann mit dem Quecksilberporosimeter nicht die gesamte

Menge der Luftporen erfasst werden. Da es sich bei allen drei Probekörpern um eine Zementsteinprobe mit einem W/B - Wert von ca. 0,38 handelt und einem Alter von mehr als vier Jahren, sollte der Anteil der Kapillarporen eigentlich nahezu Null sein. Laut Abbildung 4.1 besteht der Zementstein aus ca. 70 % Zementgel und ca. 30 % Poren (ca. 20 % Gelporen und ca. 10 % Luftporen). In Abbildung 5.27 kann man jedoch erkennen, dass der rosa Anteil (Kapillarporen) bei allen drei Zementsteinproben 35 % bis 50 % ausmacht.

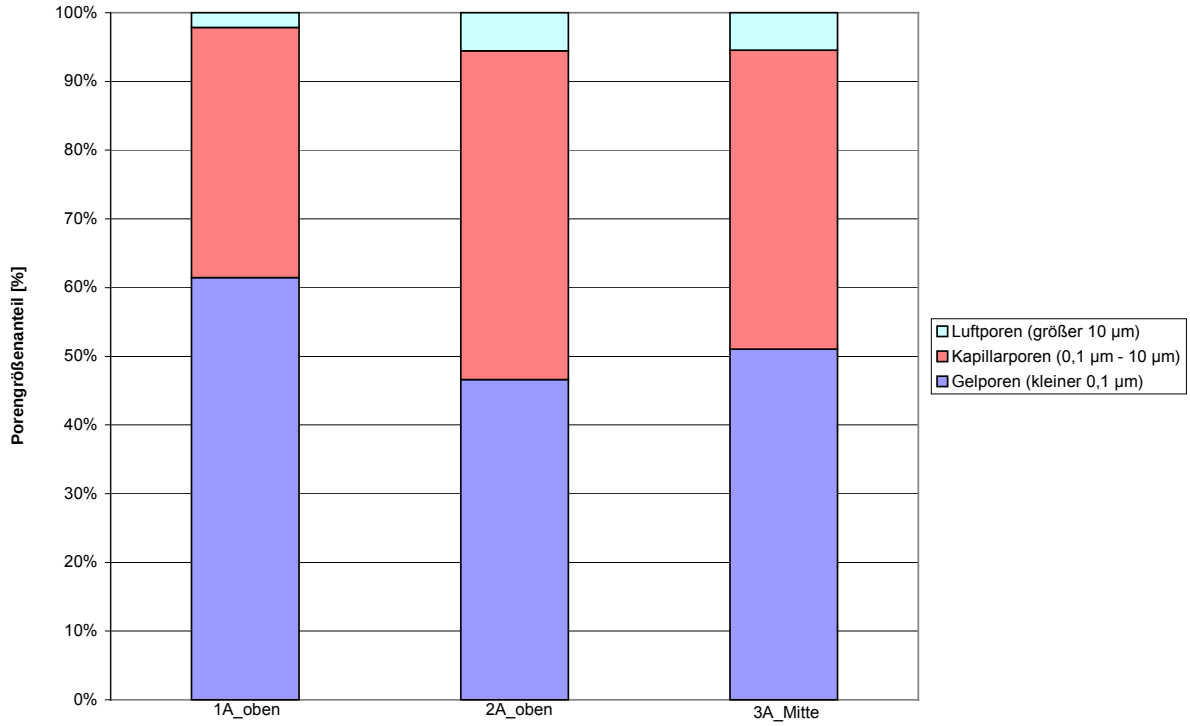


Abbildung 5.27: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 1)

Die Porositäten alle drei Zementsteinproben bestehen fast zu 50 % aus Kapillarporen. Vergleicht man die Ergebnisse mit dem rechten Diagramm (Hydratationsgrad 100 %) in Abbildung 4.2, so kann man erkennen, dass der ermittelte Kapillarporenanteil zu groß und der ermittelte Gelporenanteil zu klein ist. Somit muss der Hydratationsgrad des geprüften Zementsteins zwischen 50 % und 100 % liegen.

Die Porositäten der drei Zementsteinproben liegen nahe beisammen und erreichen zwischen 13 % und 15 % des Zementsteinvolumens (Abbildung 5.28).

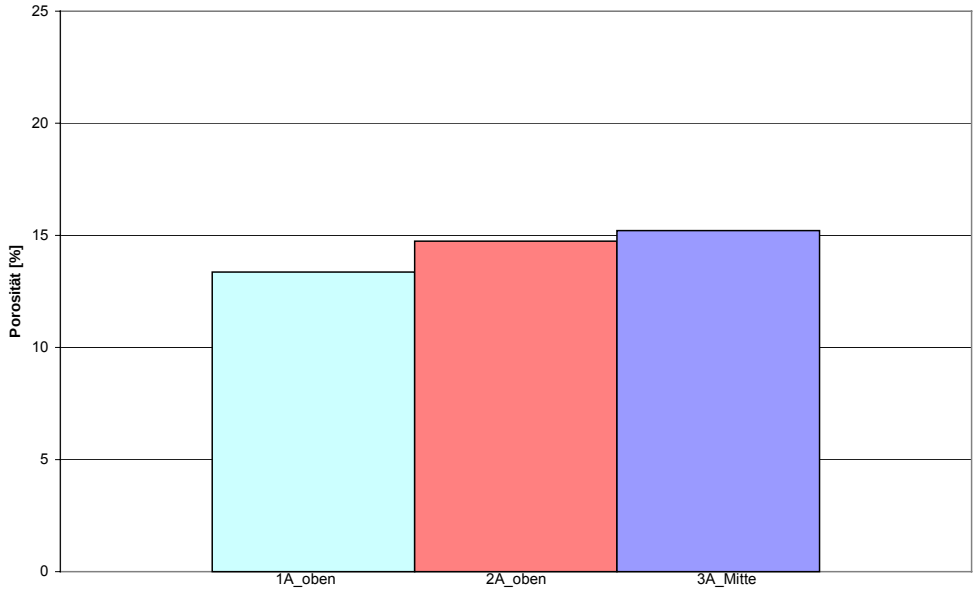


Abbildung 5.28: Porosität des Zementsteins (Baustelle 1)

Im Weiteren wurden für alle drei Bohrkerne die absoluten Anteile der einzelnen Porengrößen bezogen auf die Gesamtporosität in Abbildung 5.29 zusammengestellt.

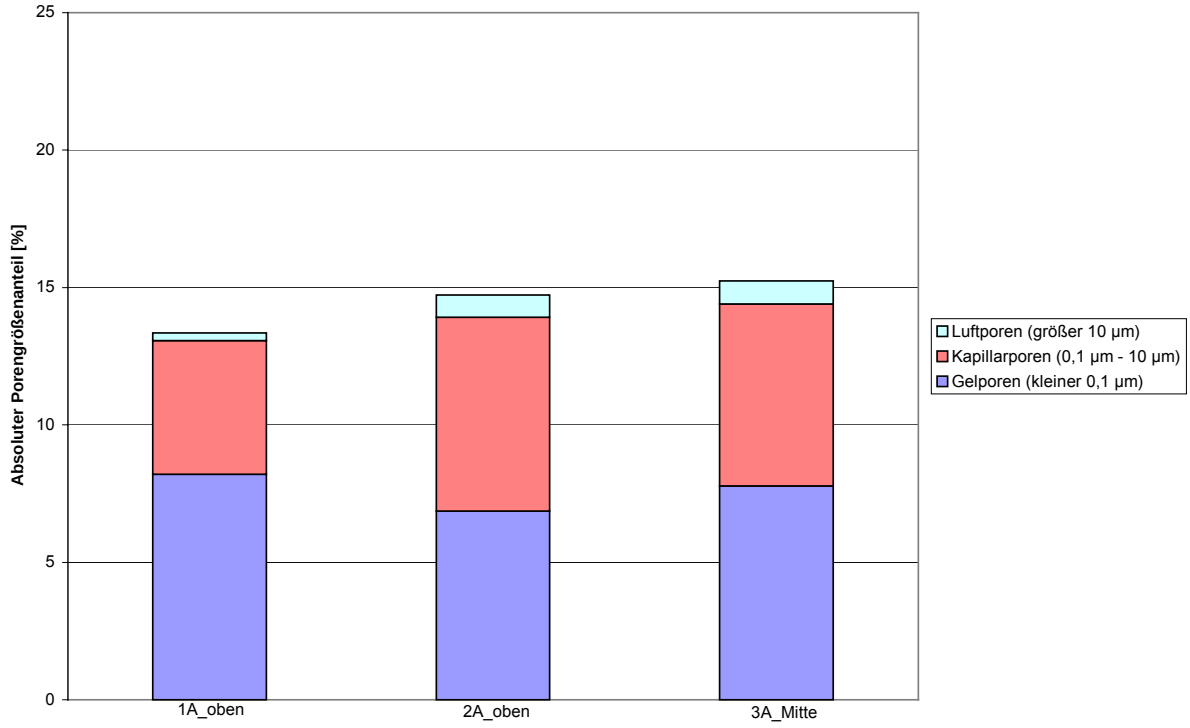


Abbildung 5.29: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 1)

Bohrkerne der Baustelle 2: Kolbegasse

Betoniert im: Juli 2004

Aufbau: 26 cm Beton, darunter Asphalt

Betonsorte: OB B400 HS FTB K4 GK22 PZ275

W/B - Wert: 0,38

In Tabelle 5.9 sind das Ist - Gewicht und die Porosität der Zementsteinproben der Baustelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 5.9: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 2

	Probekörper 1B_Mitte	**Probekörper 2B_unten**	**Probekörper 3B_unten**
Ist - Gewicht [g]:	1,1015	1,0068	1,0072
Totale Porosität [%]:	16,97	14,78	16,09

In Abbildung 5.30 sind die Porengrößenverteilungen des Zementsteins der Baustelle 2 dargestellt.

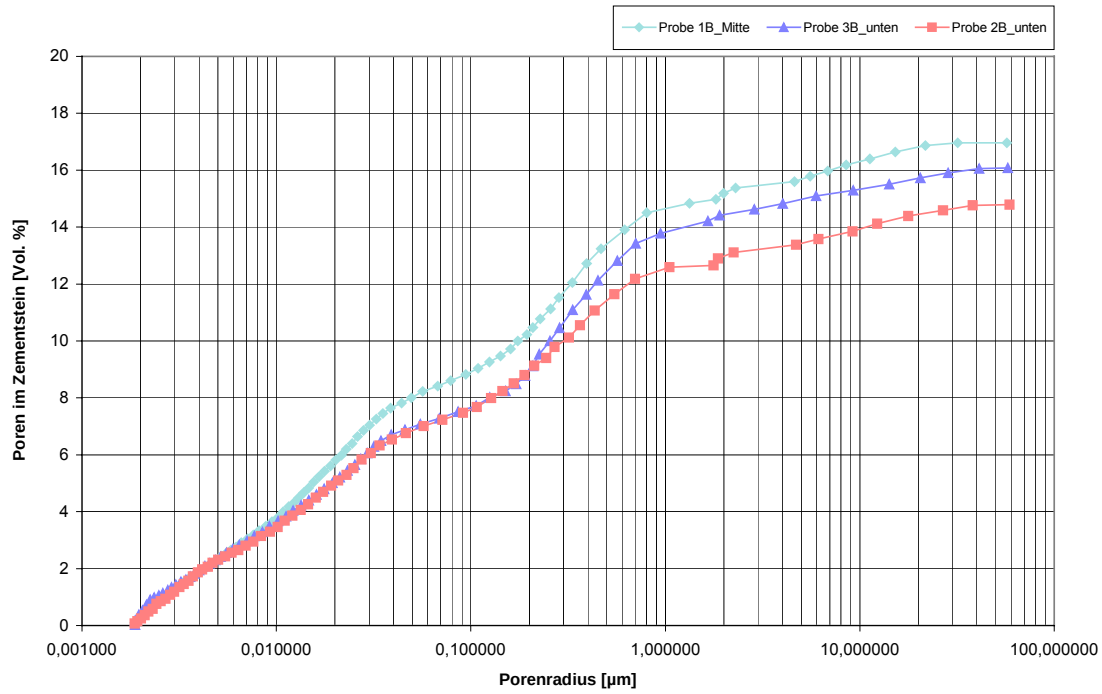


Abbildung 5.30: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 2)

In Abbildung 5.31 sind die Porengrößenanteile der drei Zementsteinproben dieser Baustelle dargestellt. Der Kapillarporenanteil ist auch hier wesentlich größer, als er laut *Schneider* [7] und *Springenschmid* [15] bei einem Hydratationsgrad von 100 % sein sollte.

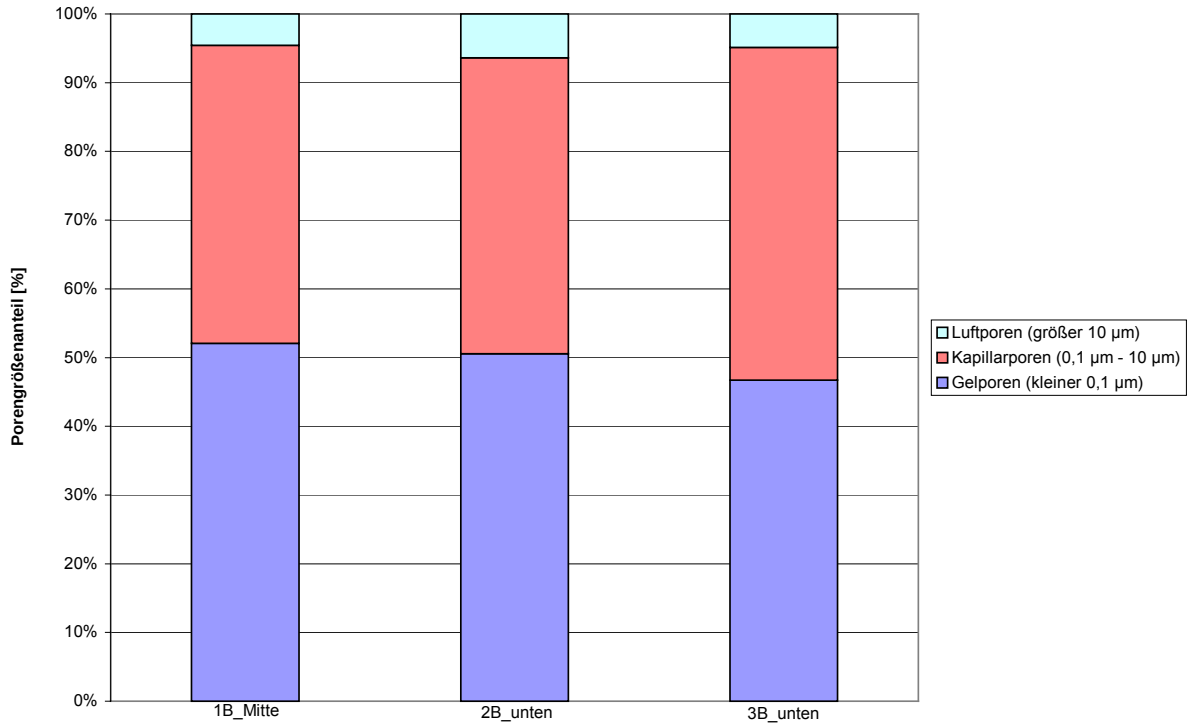


Abbildung 5.31: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 2)

Die Porositäten der drei Zementsteinproben der Baustelle 2 liegen zwischen 15 % und 17 % und sind in der Abbildung 5.32 dargestellt. Die Porengrößenverteilungen der Zementsteinproben bezogen auf die Gesamtporosität können aus Abbildung 5.33 herausgelesen werden.

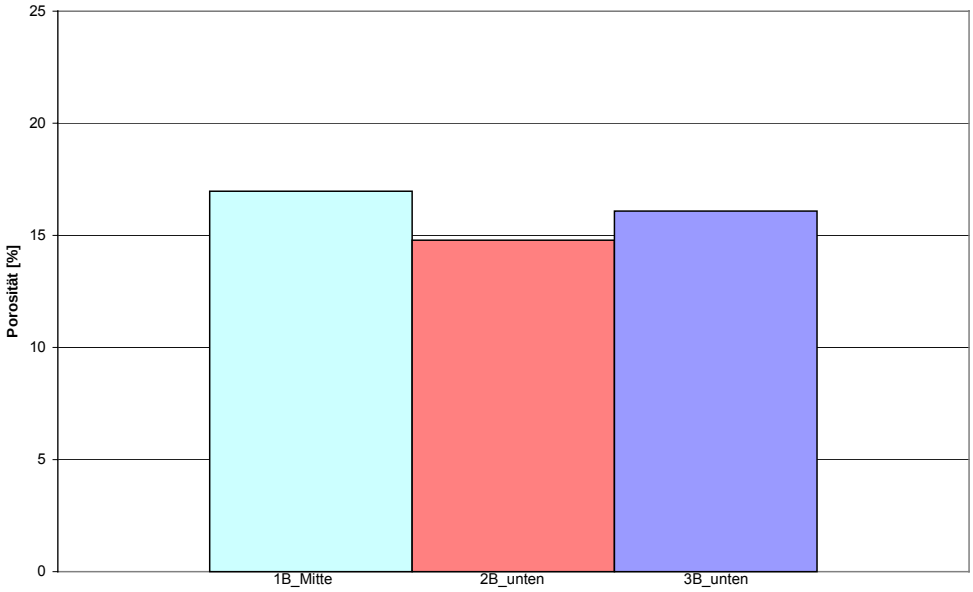


Abbildung 5.32: Porosität des Zementsteins (Baustelle 2)

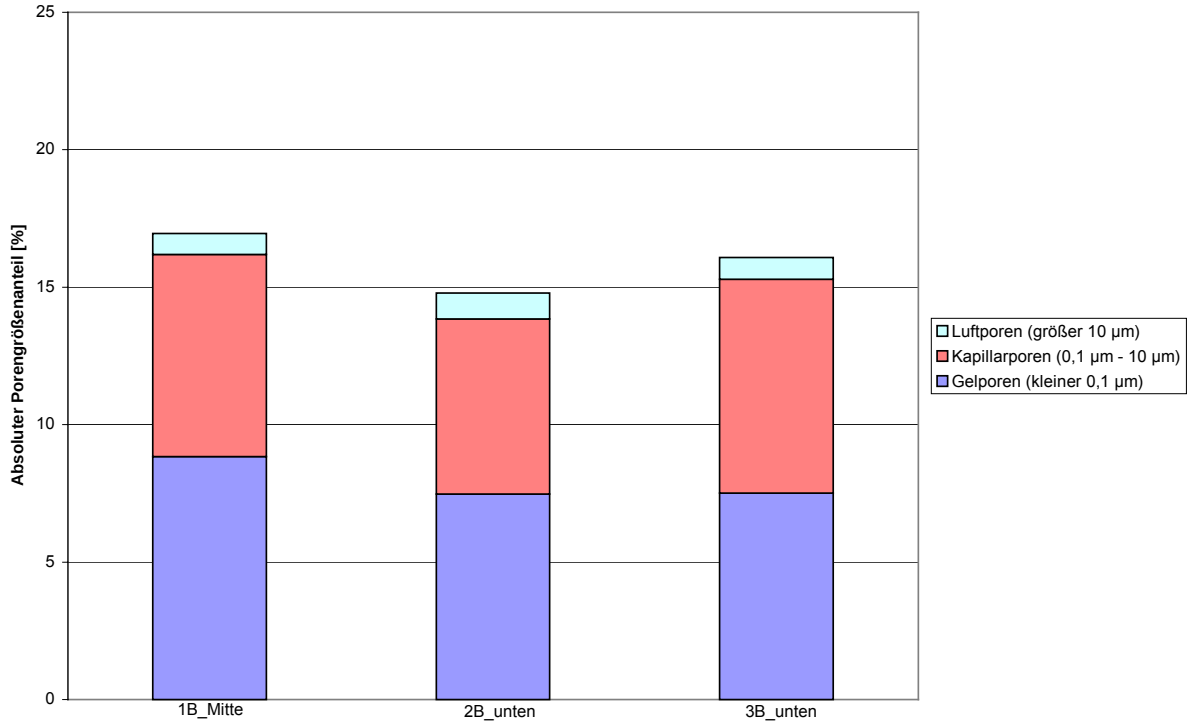


Abbildung 5.33: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 2)

Bohrkerne der Baustelle 3: Grenzackerstraße

Betoniert im: September 2002

Aufbau: 26 cm Beton, darunter Flies

Betonsorten: OB B400 FTB HS K4 GK22 PZ275

Betonsorten: OB B400 FTB 12Std. HS K4 GK22 PZ275

Betonsorten: OB B400 FTB 24Std. K4 GK22 PZ275

W/B - Wert: 0,38

In Tabelle 5.10 sind das Ist - Gewicht und die Porosität der Zementsteinproben der Baustelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 5.10: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 3

	Probekörper 1C_oben	**Probekörper 2C_Mitte**	**Probekörper 3C_unten**
Ist - Gewicht [g]:	1,0448	0,9933	1,0349
Totale Porosität [%]:	16,18	6,00	13,02

In Abbildung 5.34 sind die Porengrößenverteilungen der Zementsteine der Baustelle 3 dargestellt. Die Kurven dieser Baustelle streuen sehr stark.

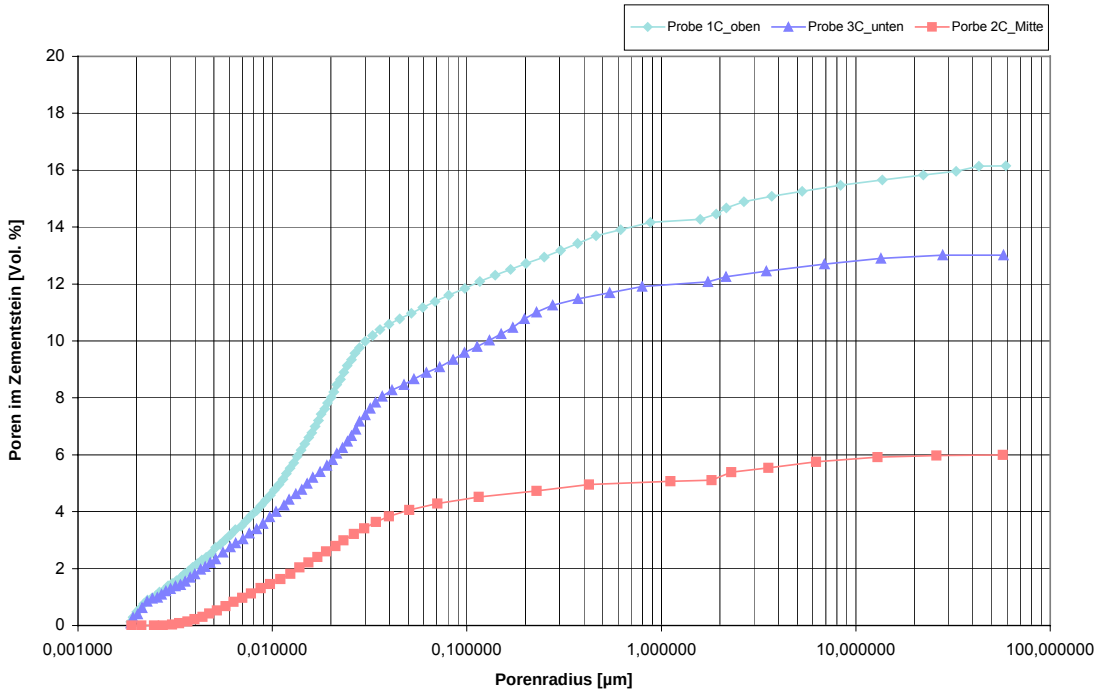


Abbildung 5.34: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 3)

Die Anteile der verschiedenen Porengrößen im Zementstein können der Abbildung 5.35 entnommen werden. Bei dieser Baustelle ist der Kapillarporenanteil im Vergleich zu den anderen Baustellen am niedrigsten, nur bei ungefähr 25 % bezogen auf die Gesamtporosität. Das bedeutet, dass der Zementstein dieser Baustelle einen höheren Hydratationsgrad aufweist, als bei den Baustellen 1 und 2.

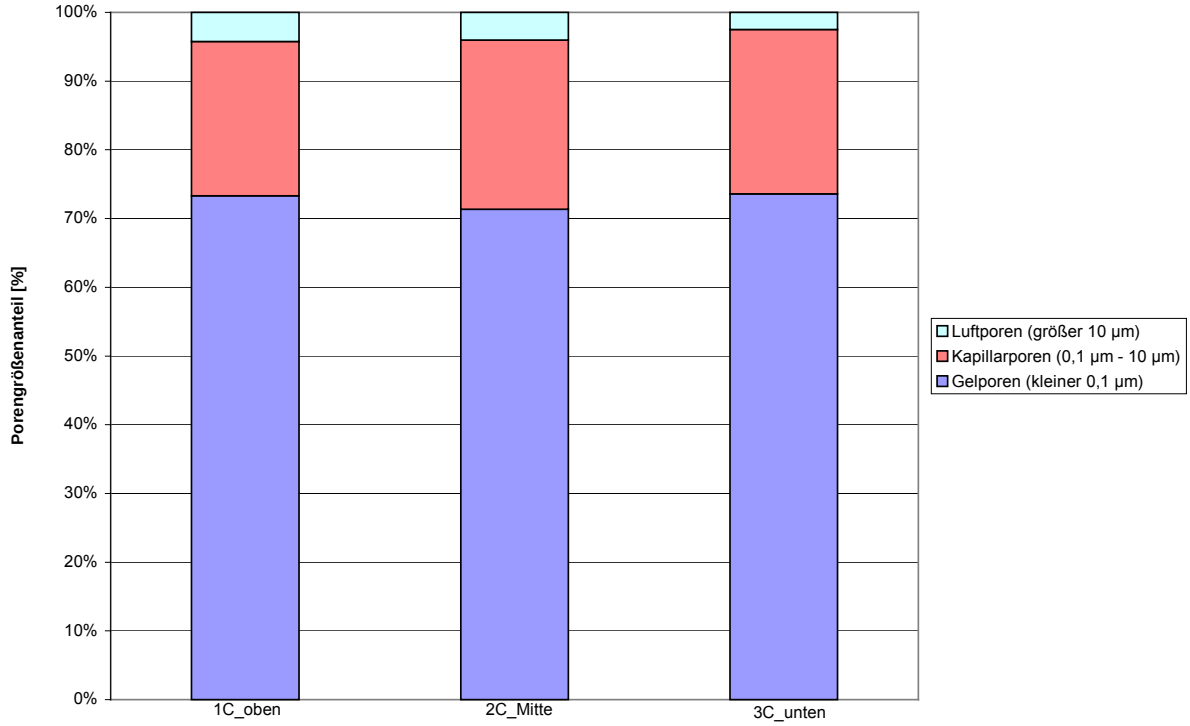


Abbildung 5.35: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 3)

In Abbildung 5.36 kann man die Porosität der einzelnen Zementsteinproben erkennen. Hier fällt auf, dass der Probekörper 2 eine sehr geringe Porosität aufweist und auch in Abbildung 5.34 weichen die Messwerte von diesem Probekörper stark von denen der anderen ab - eventuell ein Messfehler.

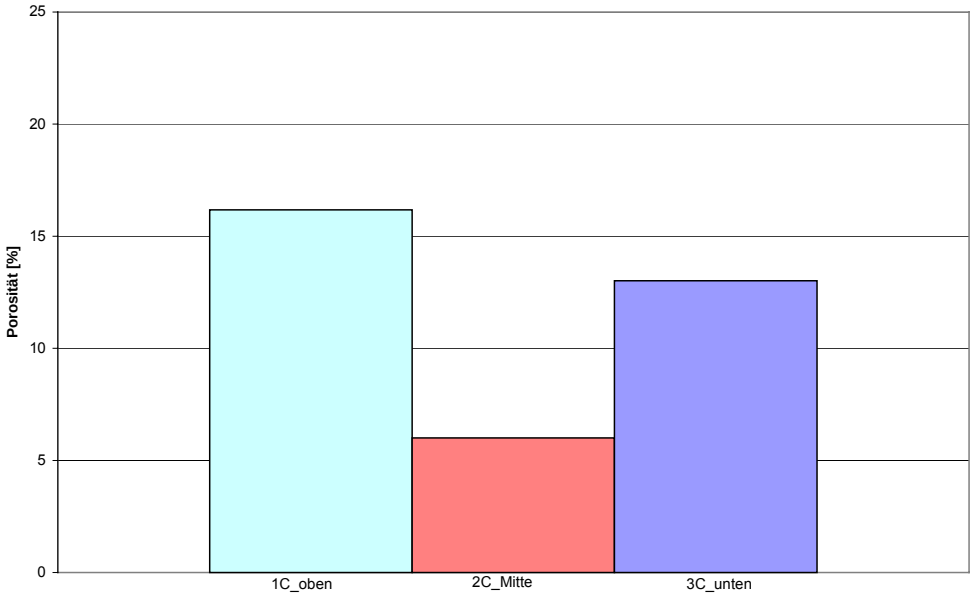


Abbildung 5.36: Porosität des Zementsteins (Baustelle 3)

Die Anteile der einzelnen Porengrößen, bezogen auf die Gesamtporosität, sind in Abbildung 5.37 dargestellt.

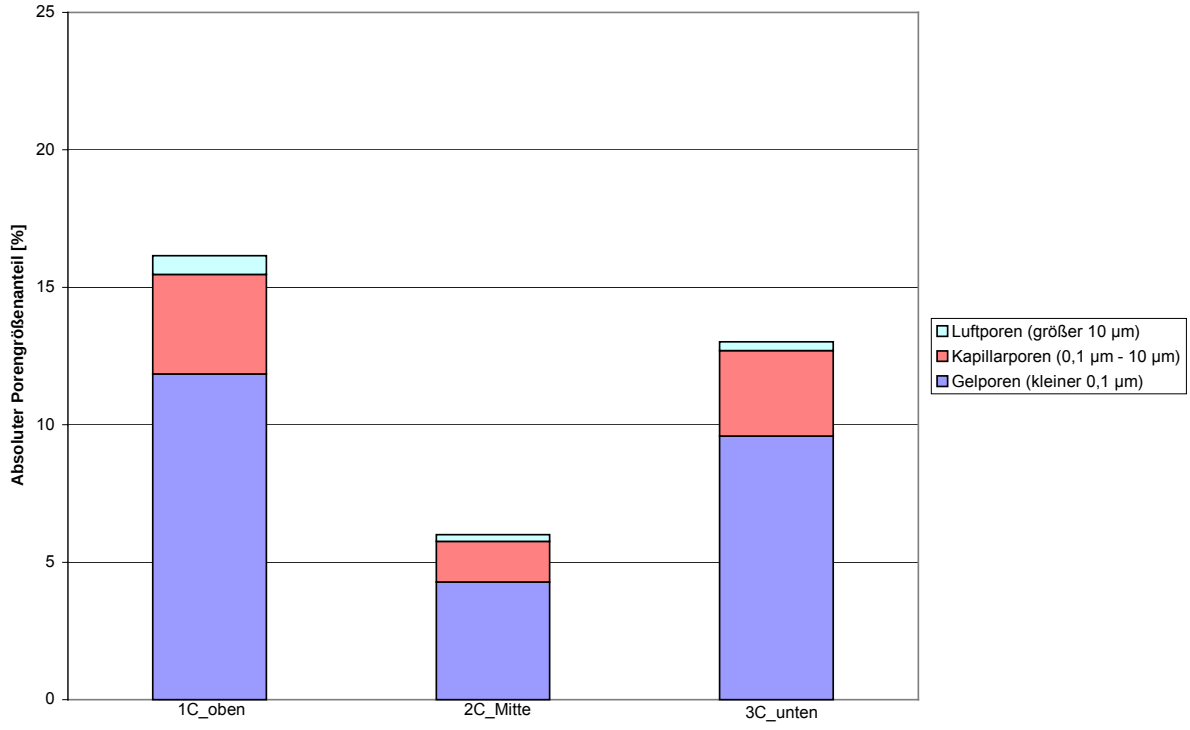


Abbildung 5.37: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 3)

Bohrkerne der Baustelle 4: Veitingergasse

Betoniert im: August 2004

Aufbau: 27 cm Beton

Betonsorten: OB B400 FTB HS K4 GK22 PZ275

W/B - Wert: 0,38

In Tabelle 5.11 sind das Ist - Gewicht und die Porosität der Zementsteinproben der Baustelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 5.11: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 4

	Probekörper 1D_oben	**Probekörper 2D_Mitte**	**Probekörper 3D_unten**
Ist - Gewicht [g]:	1,0413	1,0290	1,0240
Totale Porosität [%]:	15,05	16,33	14,44

In Abbildung 5.38 sind die Porengrößenverteilungen der Zementsteinproben der Baustelle 4 dargestellt.

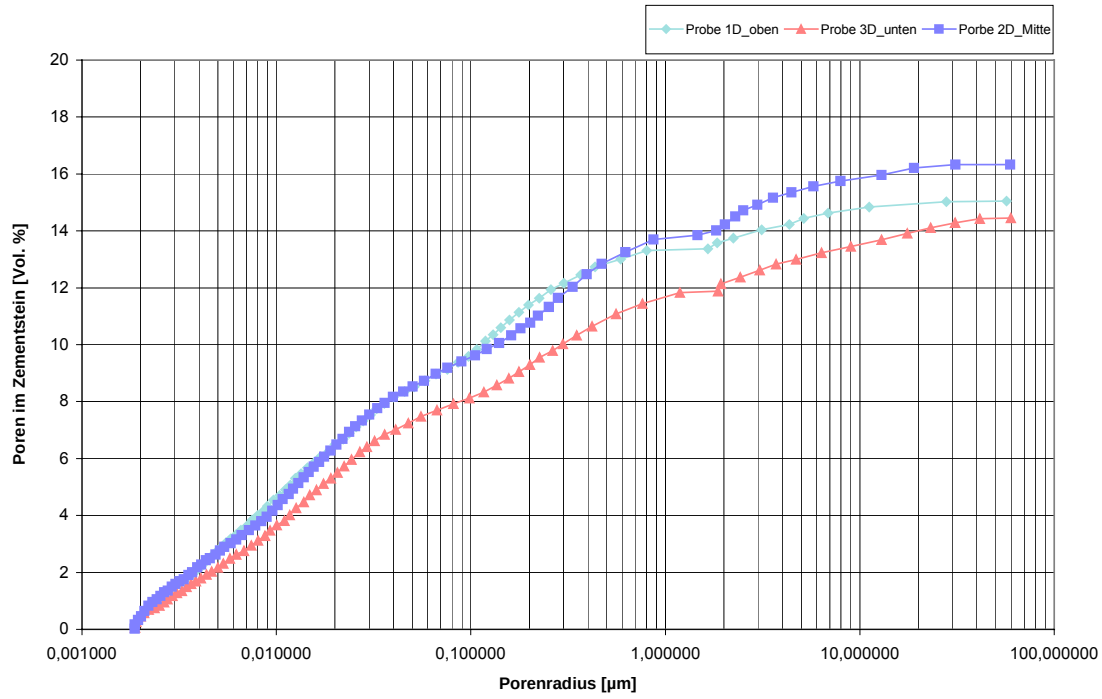


Abbildung 5.38: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 4)

Der Anteil der Kapillarporen beträgt zwischen ungefähr 33 % und 39 %. Somit sind auch diese Zementsteinproben nicht vollständig hydratatisiert, siehe Abbildung 5.39.

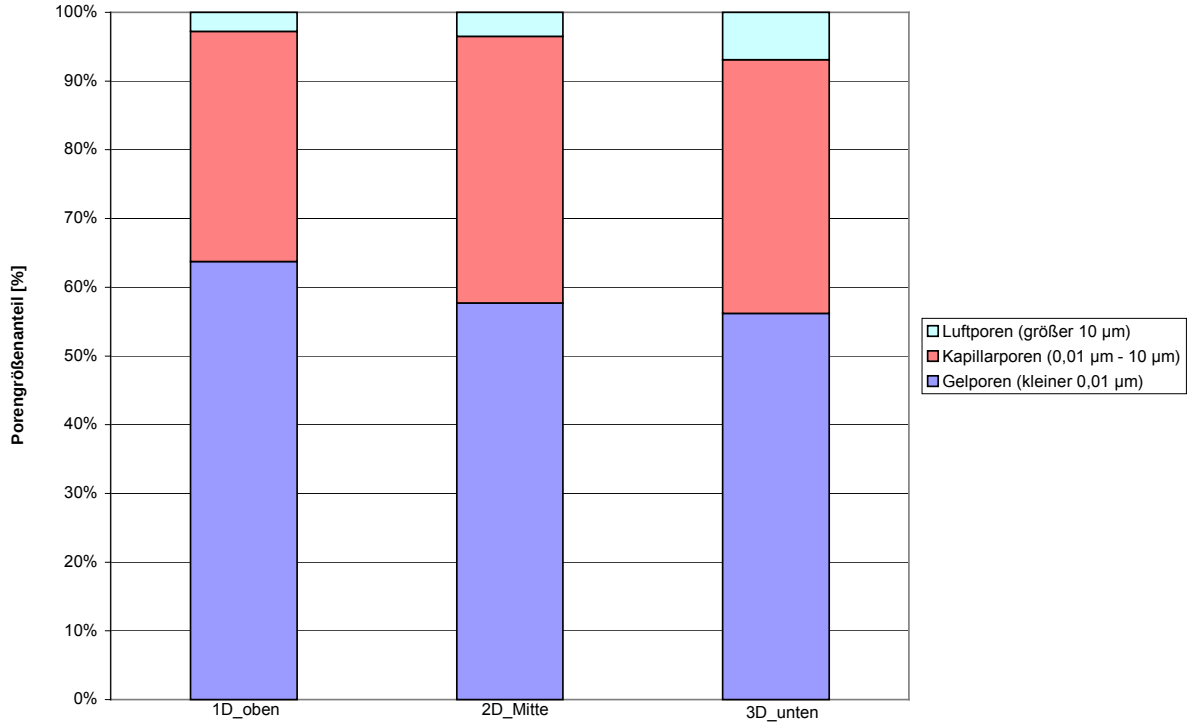


Abbildung 5.39: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 4)

Die Porosität aller Probekörper beträgt zwischen 14 % und 16 % (Abbildung 5.40).

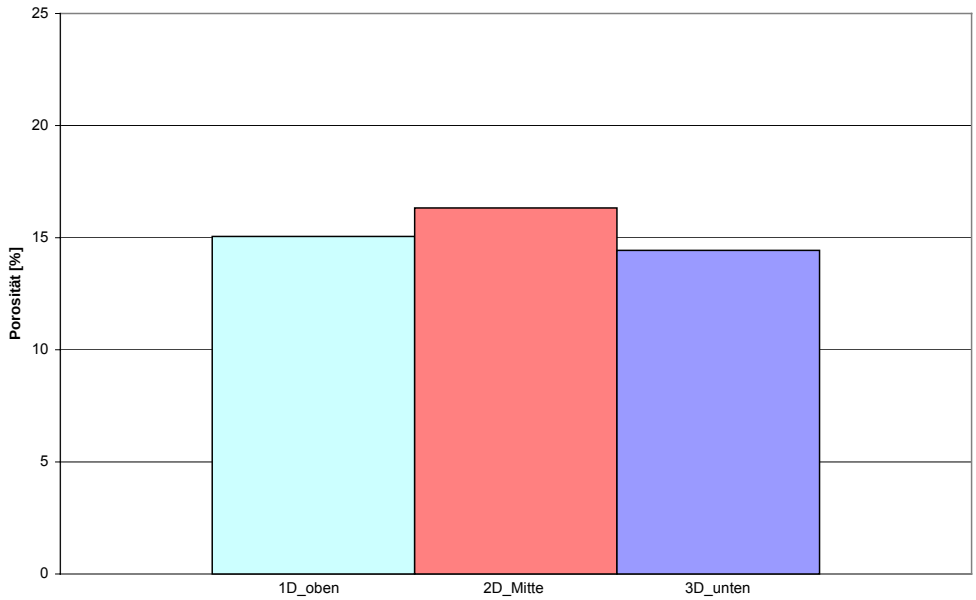


Abbildung 5.40: Porosität des Zementsteins der Probekörper (Baustelle 4)

Die absolute Porengrößenverteilung ist in Abbildung 5.41 dargestellt.

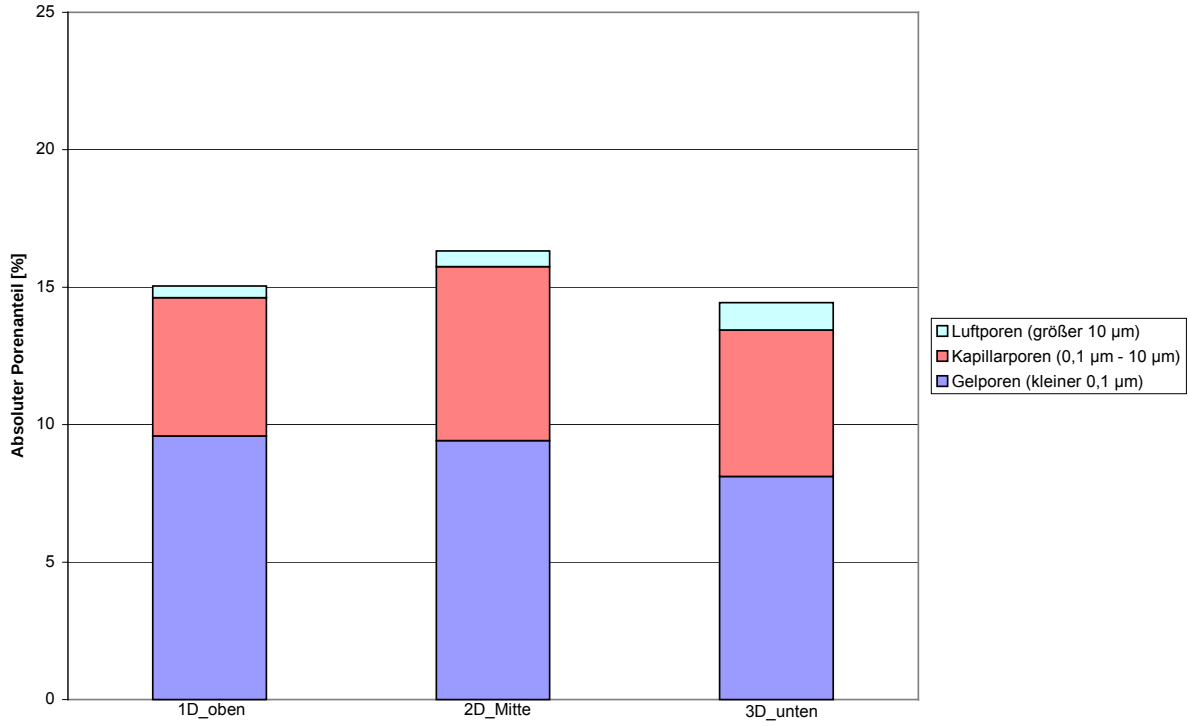


Abbildung 5.41: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 4)

Bohrkerne der Baustelle 5: Flughafen

Betoniert im: Juli, August und Oktober 2003

Aufbau: 31 cm Beton

Betonsorten: OB B400 FTB HS K4 GK22 PZ275

W/B - Wert: 0,38

In Tabelle 5.12 sind das Ist - Gewicht und die Porosität der Zementsteinprobe der Baustelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5.12: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 5

	Probekörper 1E_oben	**Probekörper 2E_Mitte**	**Probekörper 3E_unten**
Ist - Gewicht [g]:	0,9981	1,0087	1,0201
Totale Porosität [%]:	20,82	19,18	14,44

In Abbildung 5.42 sind die Porengrößenverteilungen der Zementsteinproben der Baustelle 5 dargestellt.

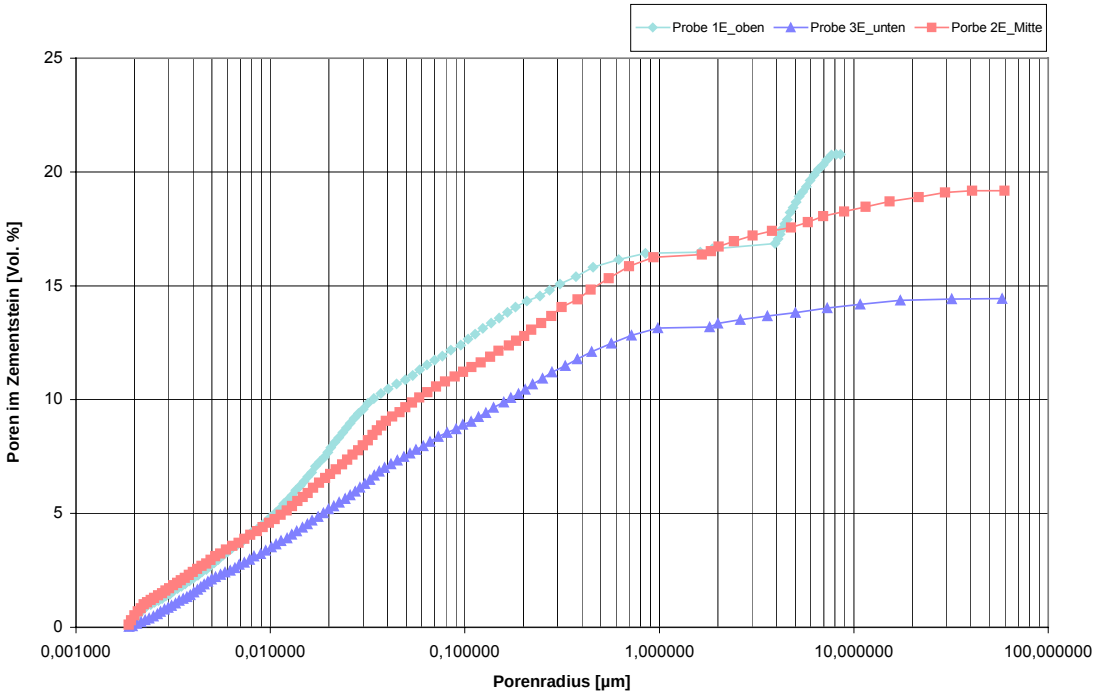


Abbildung 5.42: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 5)

Der Kapillarporenanteil beträgt wieder ca. 40 %, siehe Abbildung 5.43. Der Zementstein von dieser Baustelle ist somit auch nicht zu 100 % hydratatisiert.

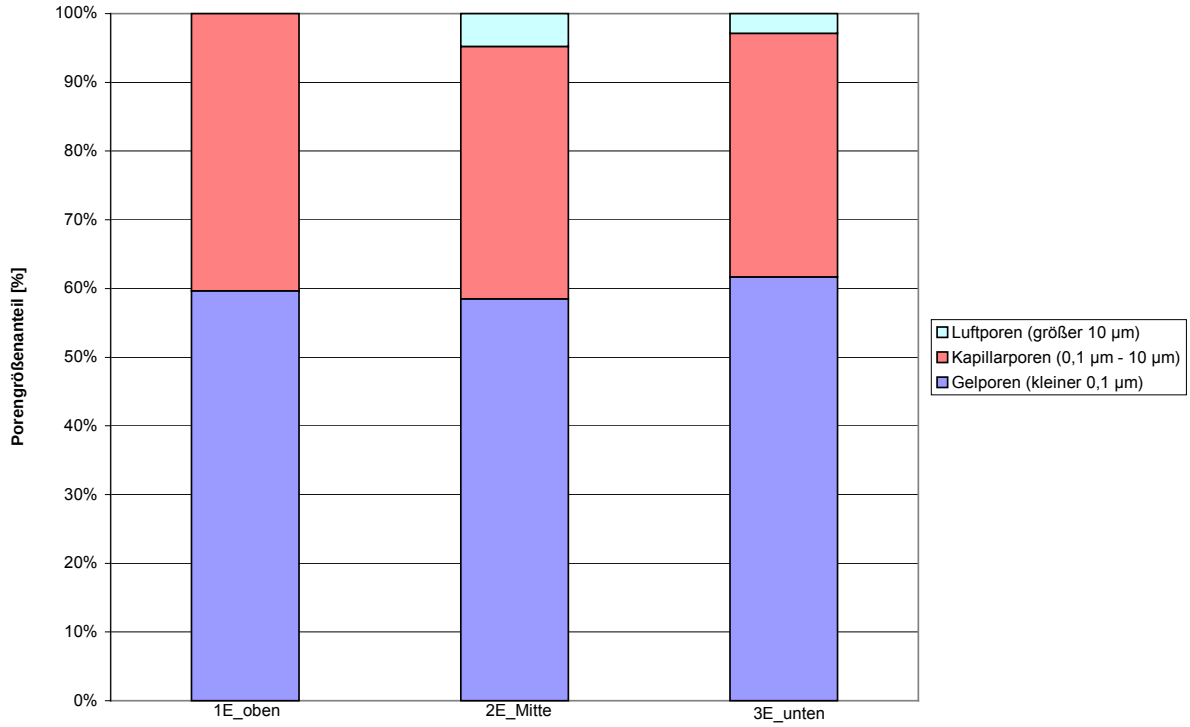


Abbildung 5.43: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 5)

Die Porosität befindet sich zwischen ungefähr 14 % und 21 % (Abbildung 5.44).

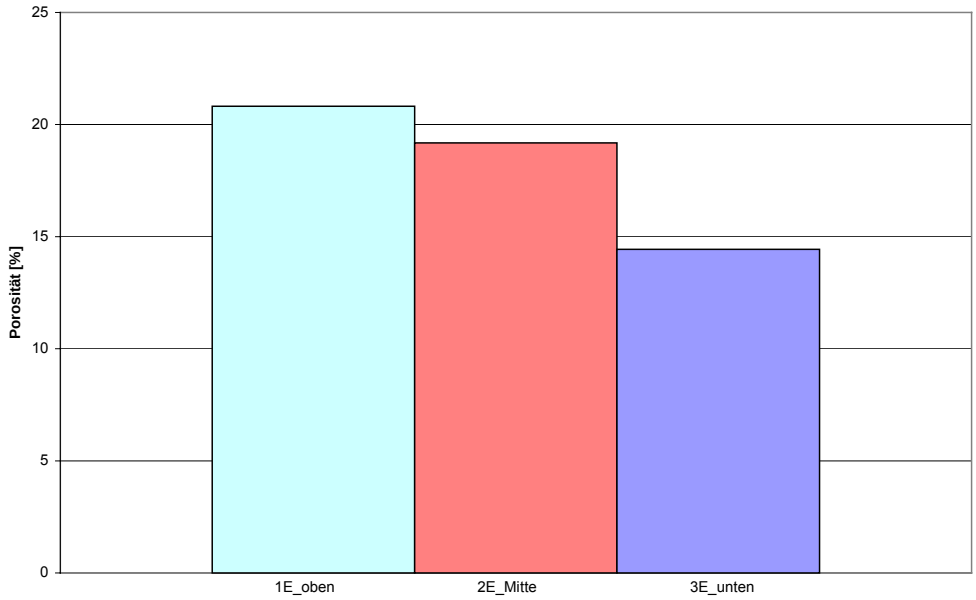


Abbildung 5.44: Porosität des Zementsteins (Baustelle 5)

Die absolute Porengrößenverteilung ist in Abbildung 5.45 dargestellt. Hier kann man erkennen, dass sowohl die Gesamtporosität als auch der Kapillarporenanteil von der Zementsteinprobe 1 bis 3 abnimmt.

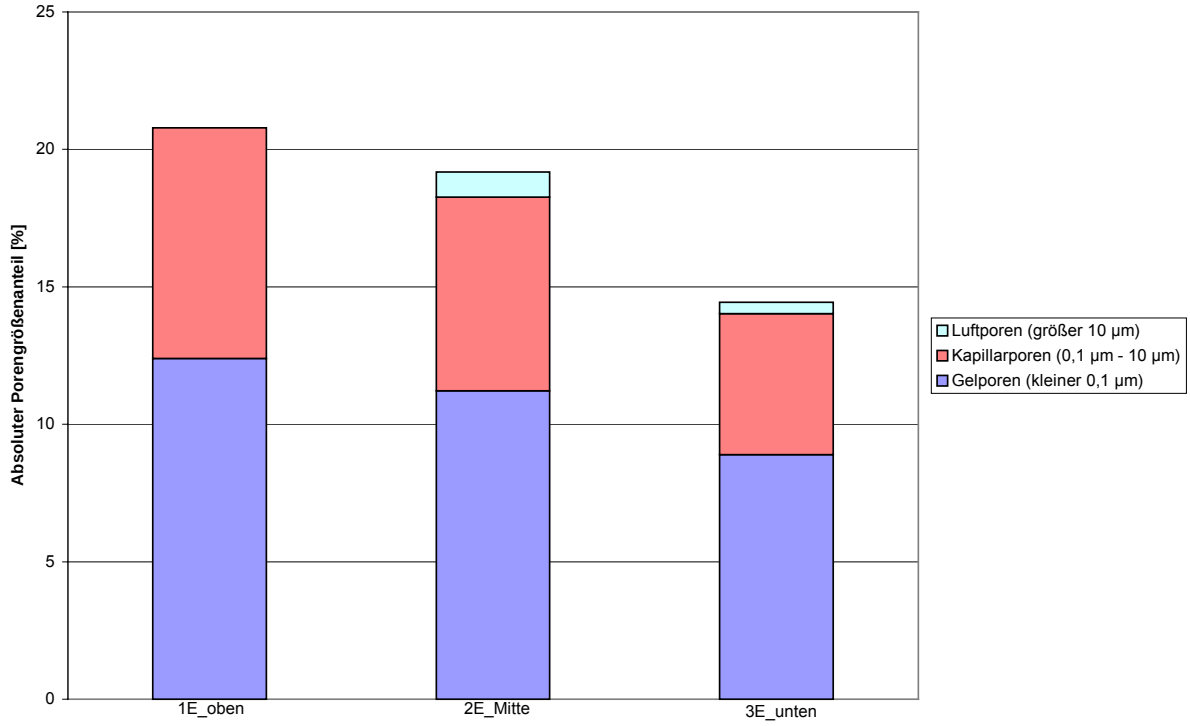


Abbildung 5.45: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 5)

Bohrkerne der Baustelle 6: Hochheimgasse

Betoniert im:	Juni 2008
Aufbau:	26 cm Beton, darunter Asphalt
Betonsorten:	OB C30/37 B7 XM2
W/B - Wert:	0,43

In Tabelle 5.13 sind das Ist - Gewicht und die Porosität der Zementsteinprobe der Baustelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 5.13: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 6

	Probekörper 1HHG_oben	**Probekörper 2HHG_Mitte**	**Probekörper 3HHG_unten**
Ist - Gewicht [g]:	1,0570	1,0007	1,0402
Totale Porosität [%]:	6,78	19,27	18,62

In Abbildung 5.46 sind die Porengrößenverteilungen der Zementsteinproben der Baustelle 6 dargestellt. Die erste Zementsteinprobe weicht sehr stark von den beiden anderen ab. Wahrscheinlich handelt es sich hierbei um einen Messfehler.

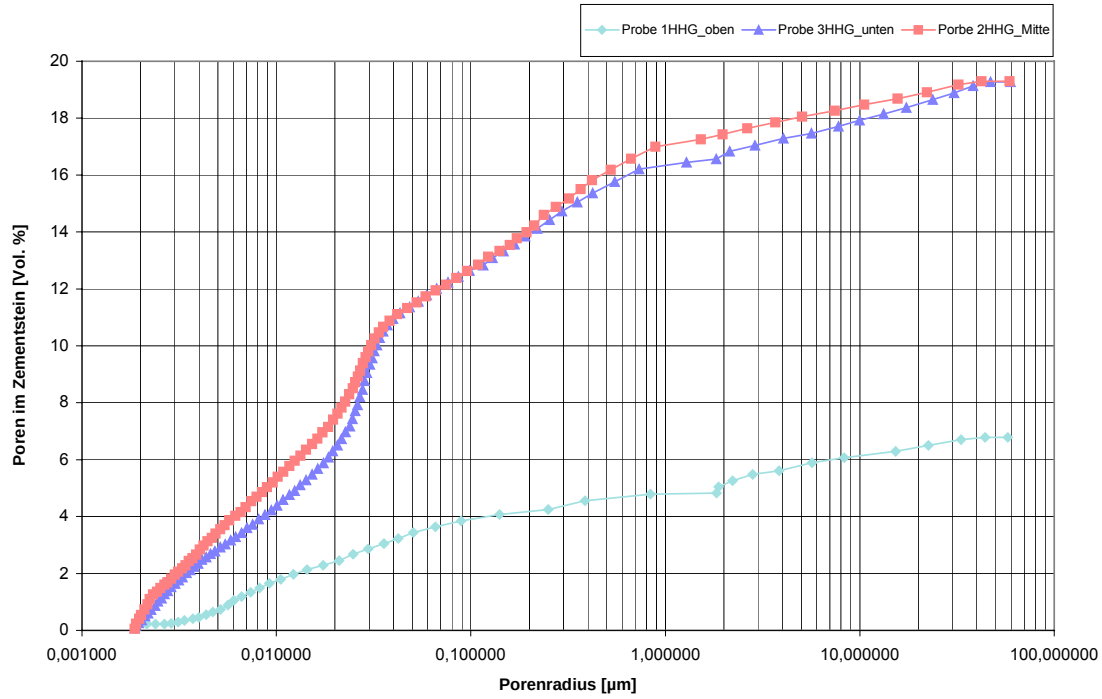


Abbildung 5.46: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 6)

Diese Baustelle ist erst im Juni 2008 betoniert worden, das heißt, dass der W/B - Wert statt 0,38 schon 0,43 beträgt. Laut Abbildung 4.1 enthält ein Beton mit einem W/B - Wert von 0,43 bereits einen kleinen Kapillarporenanteil. Der ermittelte Kapillarporenanteil der Zementsteinproben ist in Abbildung 5.47 dargestellt und liegt zwischen 30 % und 40 %.

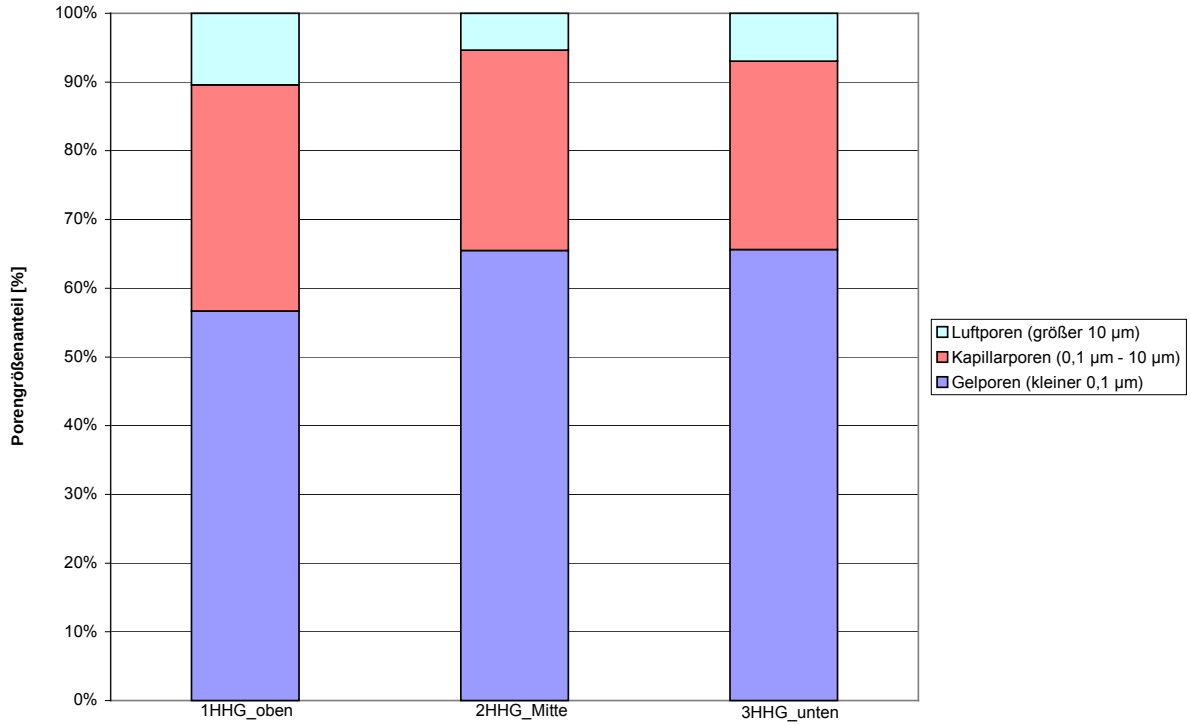


Abbildung 5.47: Porengrößenanteil des Zementsteins (Baustelle 6)

Die Gesamtporosität wird in Abbildung 5.48 dargestellt.

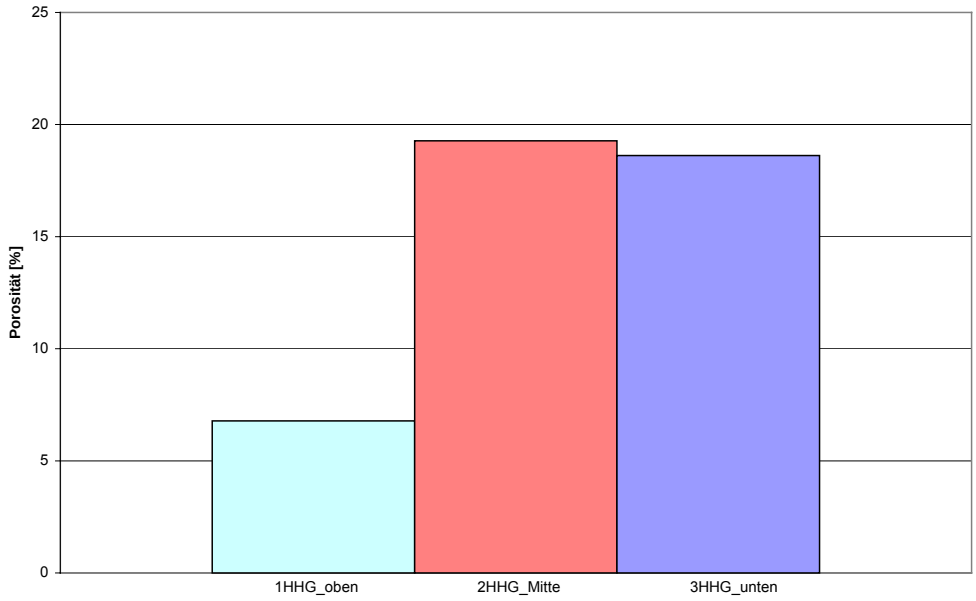


Abbildung 5.48: Porosität des Zementsteins (Baustelle 6)

Die absoluten Porengrößenanteile der Zementsteinproben sind in Abbildung 5.49 dargestellt. Hier kann man erkennen, dass der Kapillarporenanteil der Zementsteinproben 2HHG und 3HHG ungefähr 10 % beträgt. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Diagrammen (Abbildung 4.1 und 4.2), dann kann diesen Zementsteinproben ein sehr hoher Hydratationsgrad zugeordnet werden.

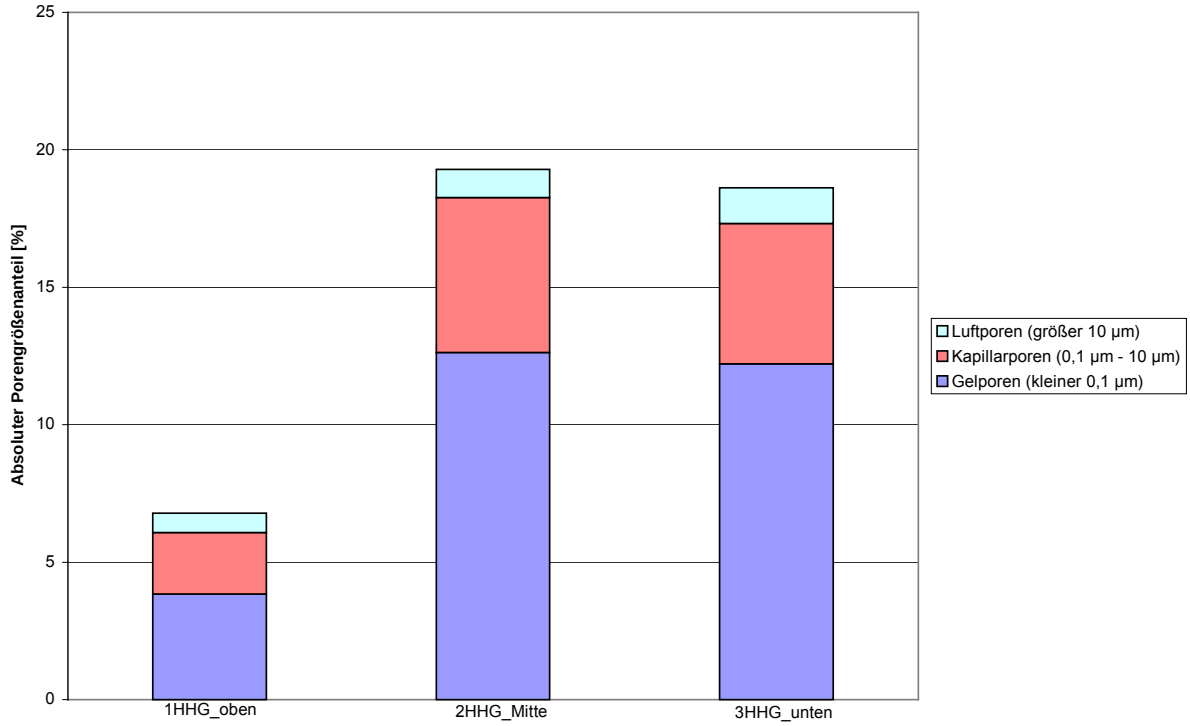


Abbildung 5.49: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins der Probekörper (Baustelle 6)

Die Abbildung 5.50 zeigt die durchschnittlichen Anteile der Kapillar- und Gelporen im Zementstein aller sechs Baustellen. Bis auf die Baustelle 3 weisen alle Baustellen einen durchschnittlichen Kapillarporenanteil zwischen 40 % und 50 % auf. Wie schon erwähnt, ist der W/B - Wert der Baustelle 6 mit 0,43 ein wenig höher als bei den anderen Baustellen.

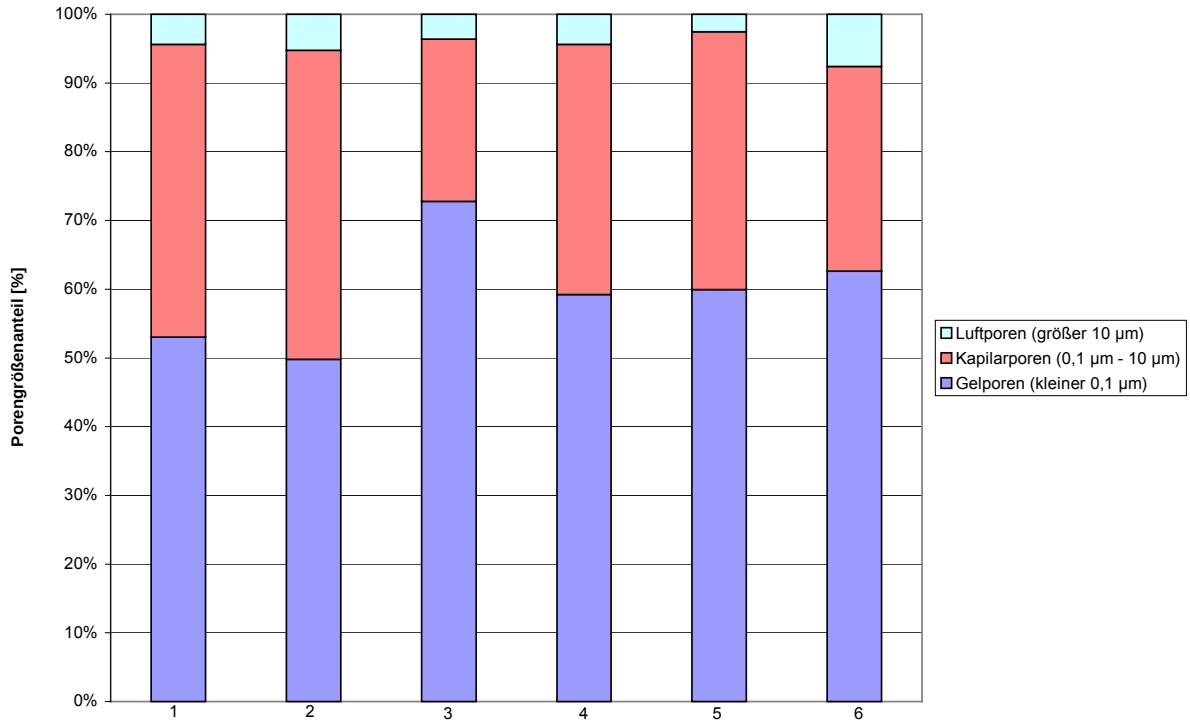


Abbildung 5.50: Durchschnittlicher Porengrößenanteil des Zementsteins aller sechs Baustellen

Weiters sind in Abbildung 5.51 die durchschnittliche Porositäten der Zementsteinproben aller sechs Baustellen zusammengestellt.

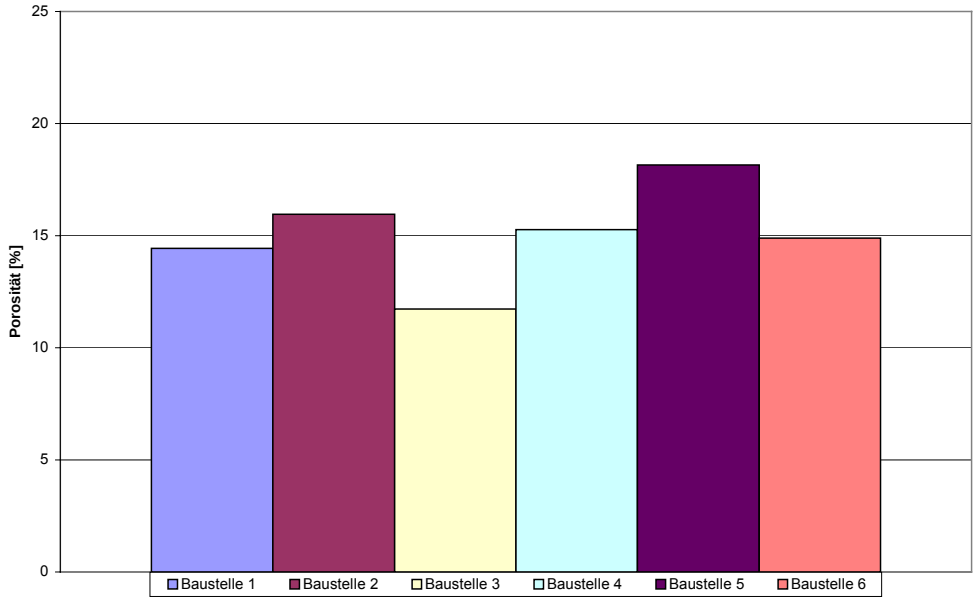


Abbildung 5.51: Durchschnittliche Porosität des Zementsteins aller sechs Baustellen

5.5.2 Porosimetrie der Würfel

Ungefähr 3 cm unterhalb der Würfeloberfläche wurden mit einem Hammer und einem Meißel kleine, reine Zementsteine aus allen vier Würfeln herausgeschlagen. Es wurde besonders darauf geachtet, dass sich keine Gesteinskörnungen im Zementstein befinden, die das Ergebnis der Porosität verfälschen könnten. Da die Würfel zweimal mit und zweimal ohne Verdunstungsschutz hergestellt wurden, sollte primär der Unterschied der Nachbehandlungsmenge auf die Porosität untersucht und mit Diagrammen aus der Literatur verglichen werden.

Würfelprüfserie 1:

Betoniert im: Juli 2008

Betonsorten: OB C30/37 B7 XM2 GK22 CEMII 42,5

W/B - Wert: 0,42

Erhärtung: 4 Tage im Wärmeschrank bei 60°C

Maschinendaten: kraftgesteuert - 0,6 N/mm²s

In Tabelle 5.14 sind das Ist - Gewicht und die Porosität der Zementsteine der Würfelprüfserie 1 zusammengestellt.

Tabelle 5.14: Gegenüberstellung der Messwerte der Würfelprüfserie 1

	Würfel 1.1	**Würfel 1.2**
Ist - Gewicht [g]:	1,0309	1,0431
Totale Porosität [%]:	21,94	23,51

Da diese Zementsteinproben genau 28 Tage alt sind, hat sich nach vorliegenden Erfahrungen ein Hydratationsgrad von 75 % eingestellt. In der Zementsteinprobe befindet sich eine geringe Menge an wassergefüllte Kapillarporen und eine wesentlich größere Menge an Gelporen. Anhand der unterschiedlichen Probewürfel, mit und ohne Verdunstungsschutz, soll nun primär festgestellt werden, wie die Anteile der einzelnen Poren im Zementstein verteilt sind.

Um den Einfluss des Verdunstungsschutzes eindeutig erkennen zu können, wurden die Zementsteinproben ungefähr 3 cm unterhalb der Oberfläche der Probewürfel entnommen.

In der Abbildung 5.52 kann man die Porengrößenverteilungen des Zementsteins der beiden Probewürfel erkennen. Vergleicht man diese Kurve mit den Kurven in Abbildung 4.5, so muss festgestellt werden, dass die Kurven sehr stark von einander abweichen.

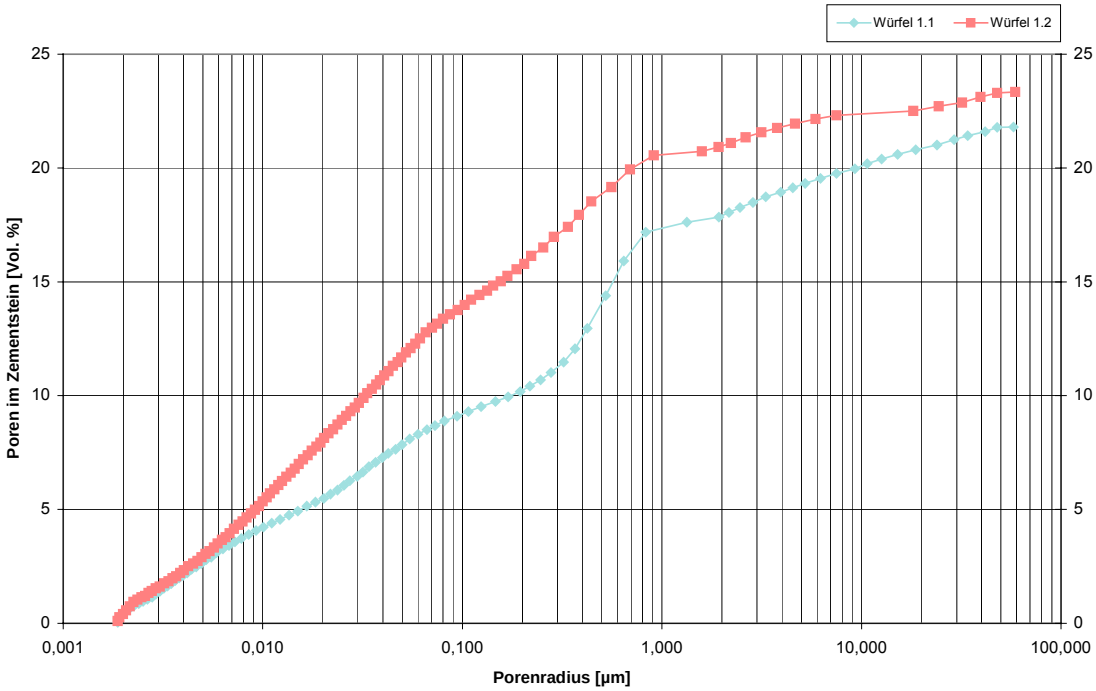


Abbildung 5.52: Porengrößenverteilung des Zementsteins der Würfelprüfserie 1

In Abbildung 5.53 werden die relativen Porengrößen der beiden Zementsteinproben dargestellt. Bei beiden Probekörpern ist der Anteil der Kapillarporen viel größer als der Gelporenanteil. Der Zementstein aus dem Probewürfel 1.1, der Probekörper ohne Nachbehandlung, weißt den größten relativen Kapillarporenanteil auf. Die Abbildung 5.54 zeigt die Porosität des Zementsteins der beiden Prüfwürfel. Wird die Kapillarporenmenge auf die Gesamtporosität bezogen (Abbildung 5.55), so ist die Kapillarporenmenge bei der Zementsteinprobe 1 auch deutlich größer als bei Zementsteinprobe 2.

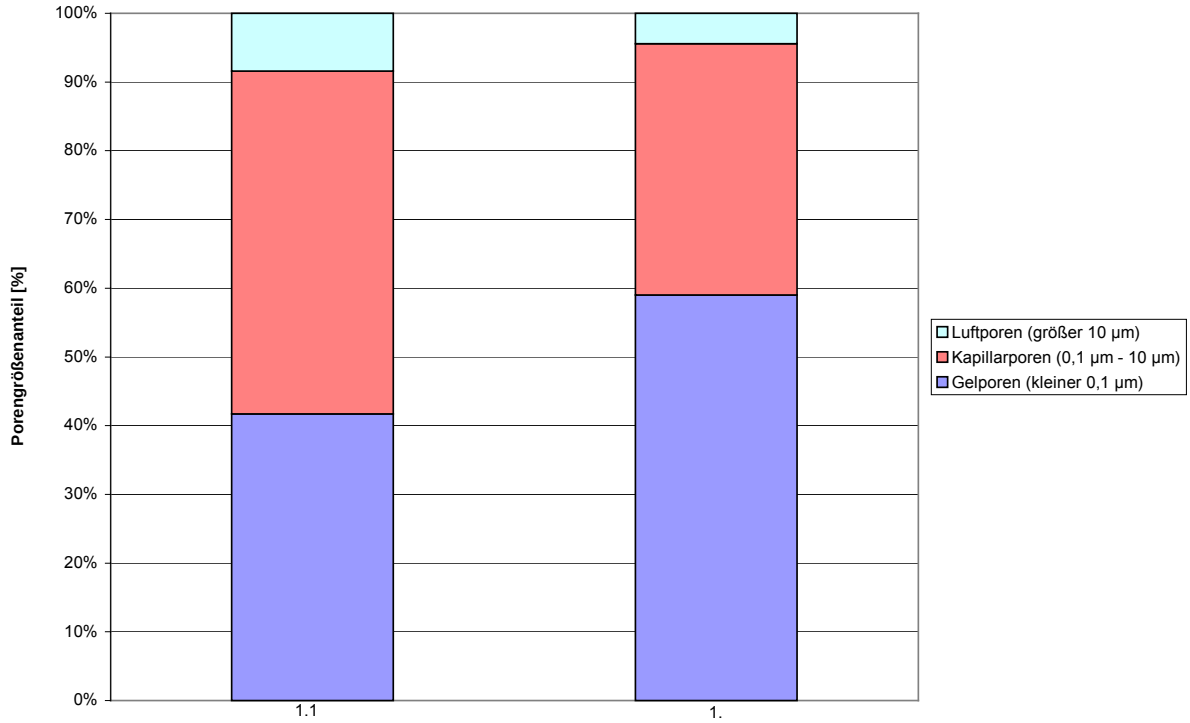


Abbildung 5.53: Porengrößenanteile des Zementsteins der Würfelprüfserie 1

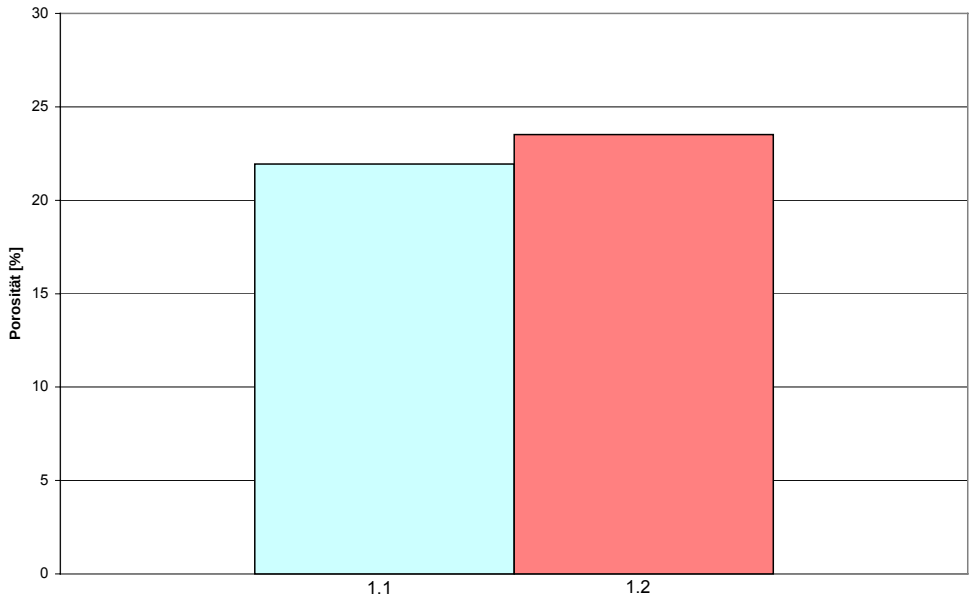


Abbildung 5.54: Porosität des Zementsteins der Würfelprüfserie 1

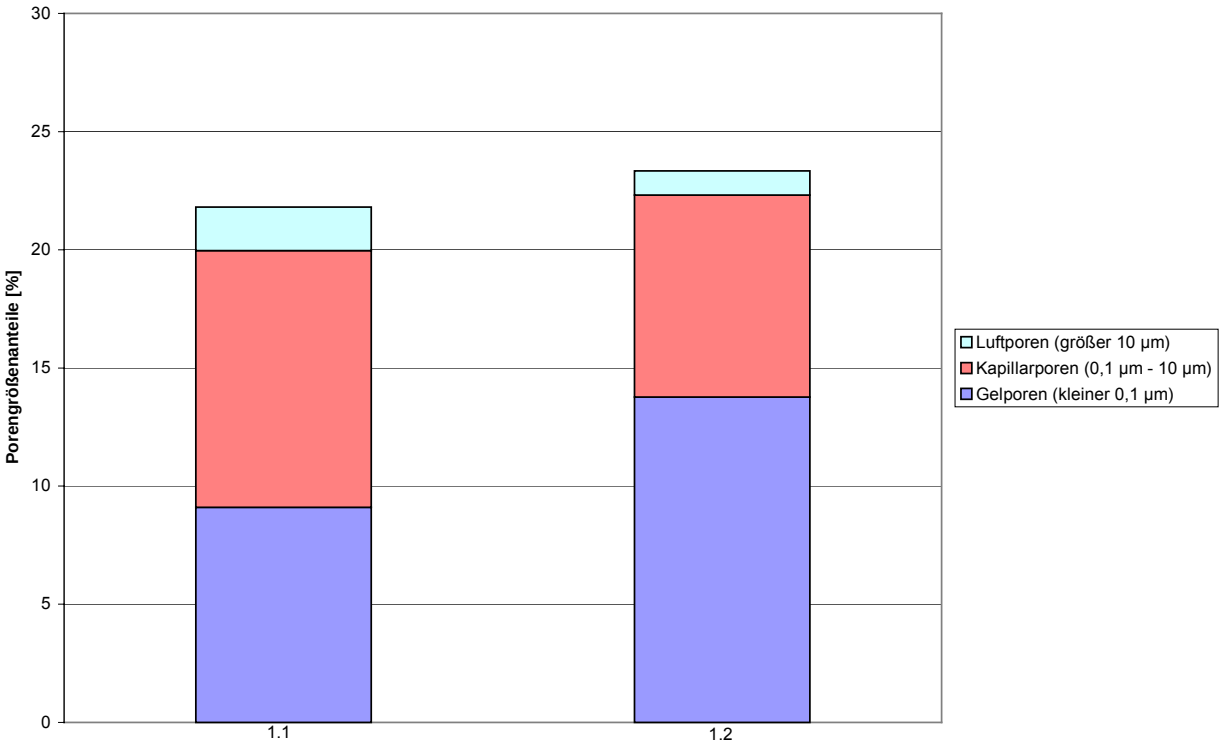


Abbildung 5.55: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins der Würfelprüfserie 1

Würfelprüfserie 2:

Betoniert im: August 2008

Betonsorten: OB C30/37 B7 XM2 GK22 CEMII 42,5

W/B - Wert: 0,42

Erhärtung: 4 Tage bei damaligem Klima (sonnige Tage)

Maschinendaten: kraftgesteuert - 0,6 N/mm²s

In Tabelle 5.15 sind das Ist - Gewicht und die Porosität der Zementsteinproben der Würfelprüfserie 2 zusammengestellt.

Tabelle 5.15: Gegenüberstellung der Messwerte der Würfelprüfserie 2

	Würfel 2.1	**Würfel 2.2**
Ist - Gewicht [g]:	1,0493	1,0488
Totale Porosität [%]:	21,80	22,19

Bei dieser Serie handelt es sich, wie schon erwähnt, um zwei Würfel, die bei normalen Klimabedingungen, sonnigem Wetter und durchschnittlich 25°C, erhärtet sind. Die Zementsteinproben wurden wieder ca. 3 cm unterhalb der Oberfläche entnommen. In Abbildung 5.56 kann man die Porengrößenverteilung der Zementsteine der Würfelserie 2 erkennen. Vergleicht man den die Porengrößenverteilungskurven aus Abbildung 5.56 mit der Abbildung 4.5, so kann man einen ähnlichen Verlauf feststellen.

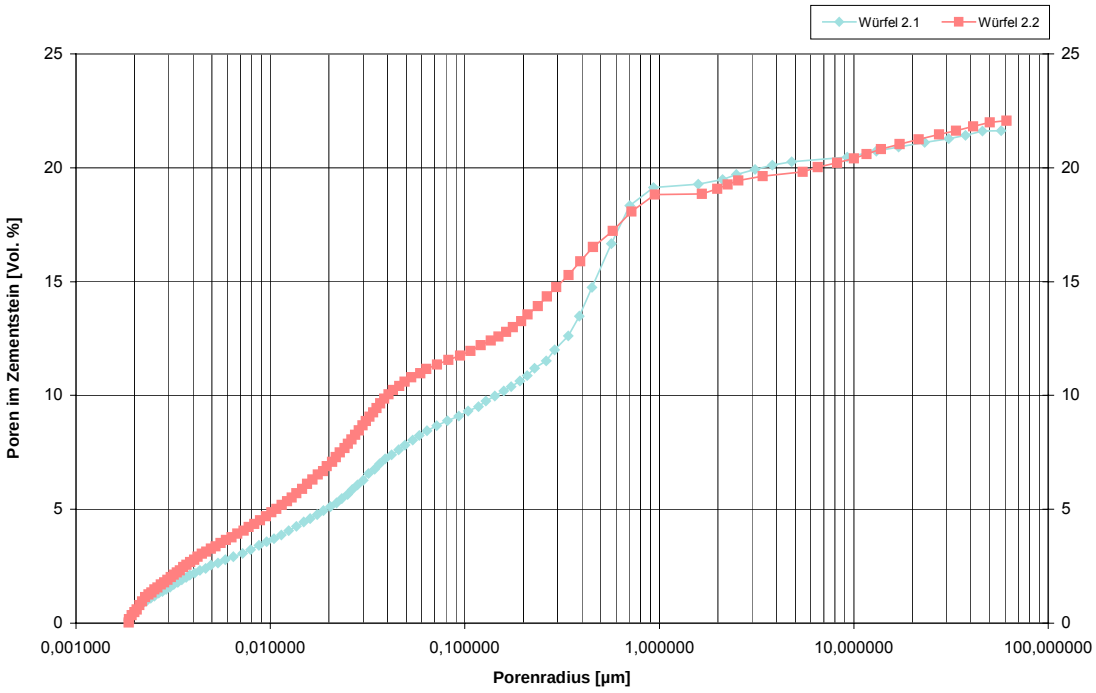


Abbildung 5.56: Porengrößenverteilung des Zementsteins der Würfelprüfserie 2

In der Abbildung 5.57 nehmen die Kapillarporenanteile ungefähr 50 % der Gesamtporosität ein und der Probekörper 1 weist mehr Kapillarporen auf, als der Probekörper 2.

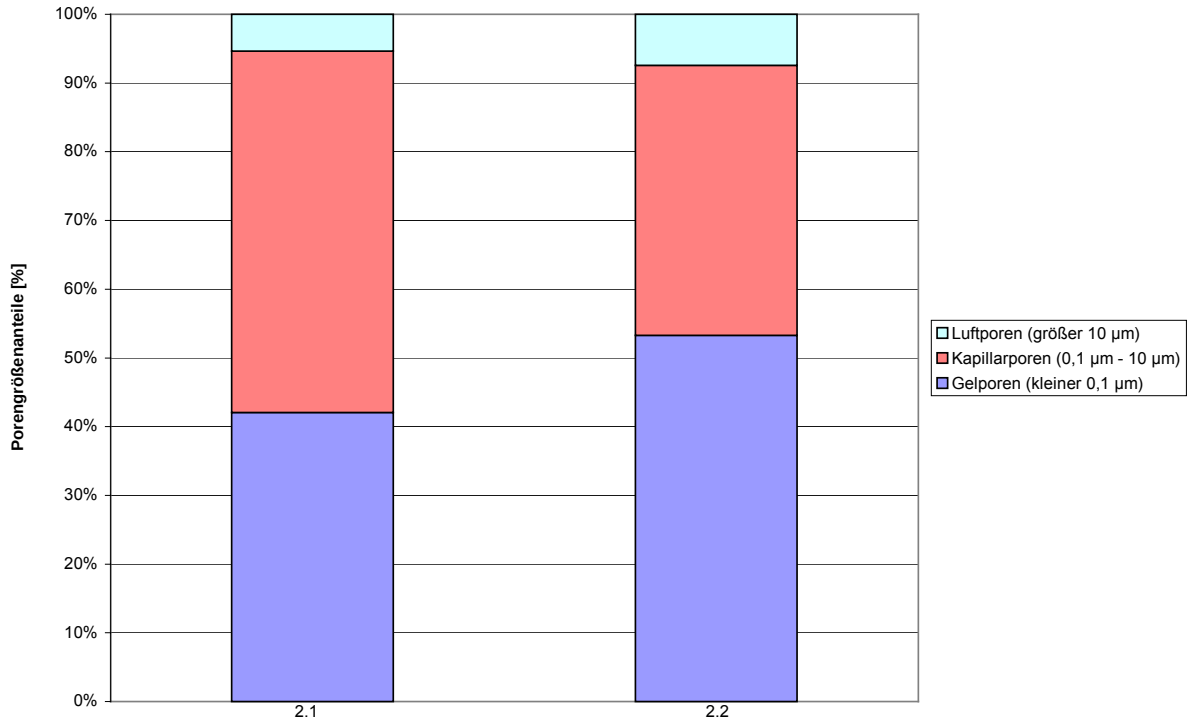


Abbildung 5.57: Porengrößenanteile des Zementsteins der Würfelprüfserie 2

In Abbildung 5.58 wird die Gesamtporosität der Zementsteine der beiden Probewürfel zusammengestellt. Die Abbildung 5.59 zeigt die absolute Porengrößenverteilung.

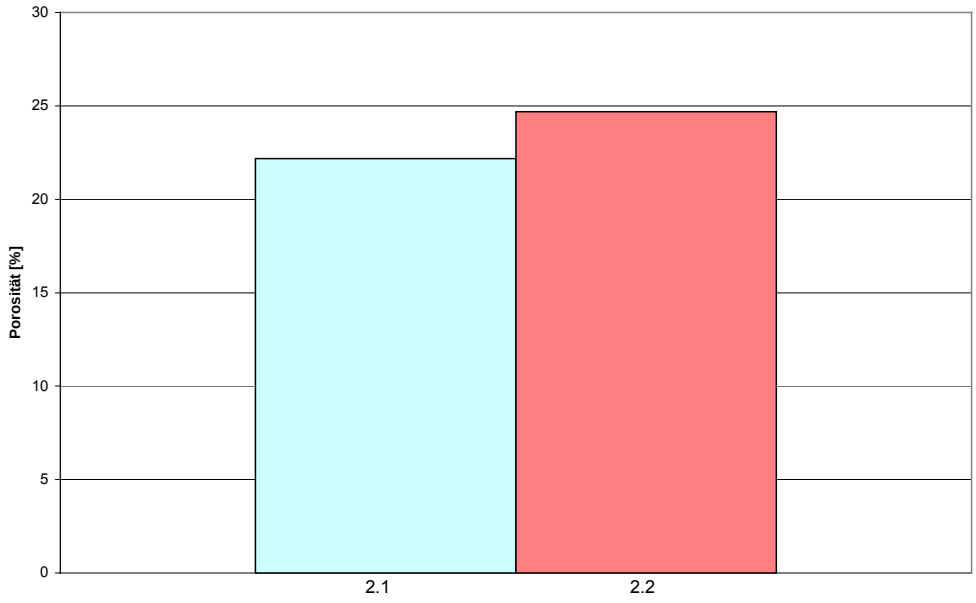


Abbildung 5.58: Porosität des Zementsteins der Würfelprüfserie 2

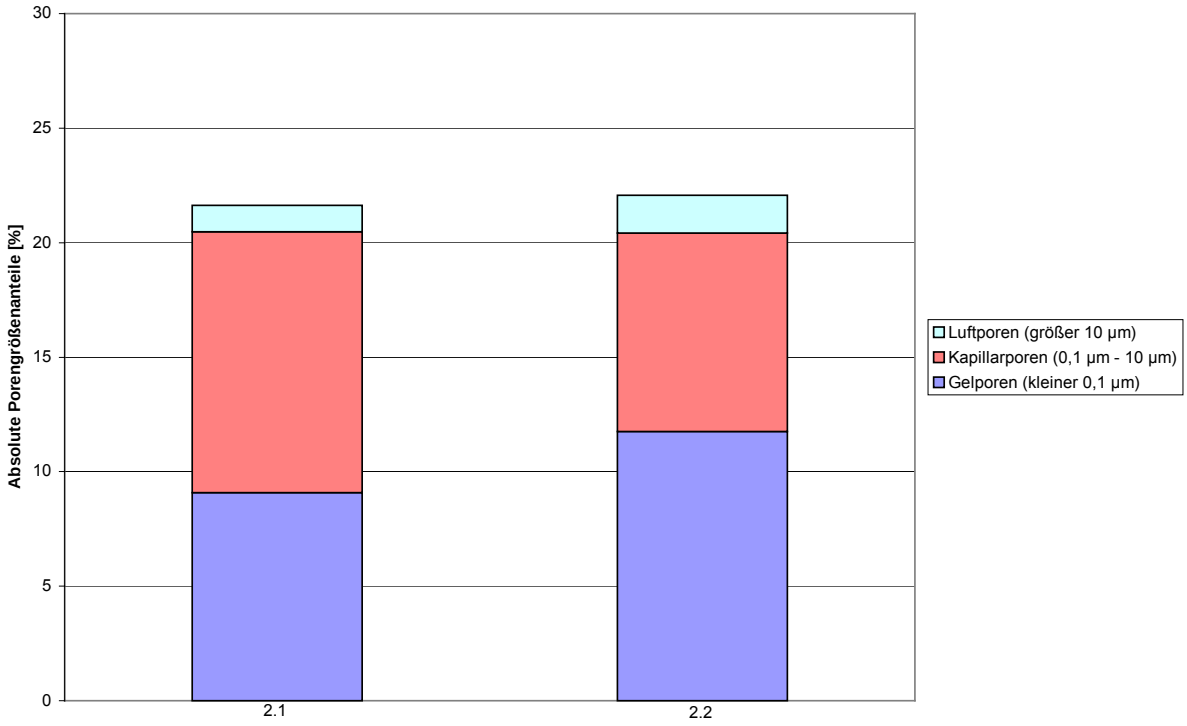


Abbildung 5.59: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins der Würfelprüfserie 2

Kern [25] hat die Einwirkung der Nachbehandlungsmittel auf den Hydratationsgrad bezogen auf die Bauteiltiefe untersucht und konnte eine fehlende oder zu geringe Nachbehandlung nur im oberen Bereich des Bauteils feststellen.

Zusammenfassend handelt es sich bei allen sechs Baustellen um einen schlecht hydratatisierten Beton. Da der Hydratationsgrad in den oberen Dritteln der Bohrkerne ähnlich wie in den unteren Drittel war, kann eine zu geringe Verdunstungsschutzmenge nicht zu diesen Schäden geführt haben.

Die Hydratation von Zement ist ein sehr komplexer Vorgang, bei der verschiedene Einflussfaktoren eine Rolle spielen. Laut *Locher* [13] „ … *können auch Hydratationsreaktionen mit der Luftfeuchtigkeit beim Lagern des Zements den Wasseranspruch erhöhen. … Die Einflüsse von Eigenschaften und Korngrößenverteilung der Partikel und der chemischen Reaktionen unmittelbar nach Zugabe des Anmachwassers auf den Wasseranspruch gelten sowohl für Portlandzement als auch für die Zemente, bei denen ein mehr oder weniger großer Anteil des Zementklinkers durch andere Bestandteile ersetzt wird…*“

5.6 Thermische Analyse der Bohrkerne

Die thermische Analyse der Zementsteinproben wurde mit der

- Thermogravimetrie (TG) und
- der Differenzthermoanalyse (DTA)

durchgeführt.

Die TG und DTA wurde an fünf verschiedenen Zementsteinproben geprüft. Jede Zementsteinprobe ist von einer unterschiedlichen Baustelle und aus unterschiedlichen Bohrkernbereichen (u = unteres Bohrkerndrittel, m = mittleres Bohrkerndrittel, o = oberes Bohrkerndrittel). Für die Prüfung der fünf Zementsteinproben wurden folgende Parameter festgelegt:

Tiegelmaterial:	Al_2O_3
Atmosphäre:	trockene Luft
Maximale Temperatur:	1200°C
Temperatursteigerung:	5K/min

Die einzelnen Prüfprotokolle aller Probekörper können dem Anhang entnommen werden.

Bohrkerne der Baustelle 1: Hietzinger Kai

Betoniert im:	Juli 2004
Betonsorte:	OB B 400 HS FTB 24Std. K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Probekörper 3A_Mitte:	Ist - Gewicht: 77,1 mg

In Abbildung 5.60 sind die DTA- und TG- Kurven von Probekörper 3A_Mitte dargestellt.

Der erste Peak kann laut Tabelle 4.4 der Kapillarentwässerung zugeordnet werden. Bei dem zweiten Peak, bei 464°C findet der Portlanditzerfall sein Ende. Der Masseverlust beträgt 0,90 %. Der sehr kleine dritte Peak stellt die Quarzumwandlung dar, die eventuell durch Sandreste in der Probe zustande gekommen ist.

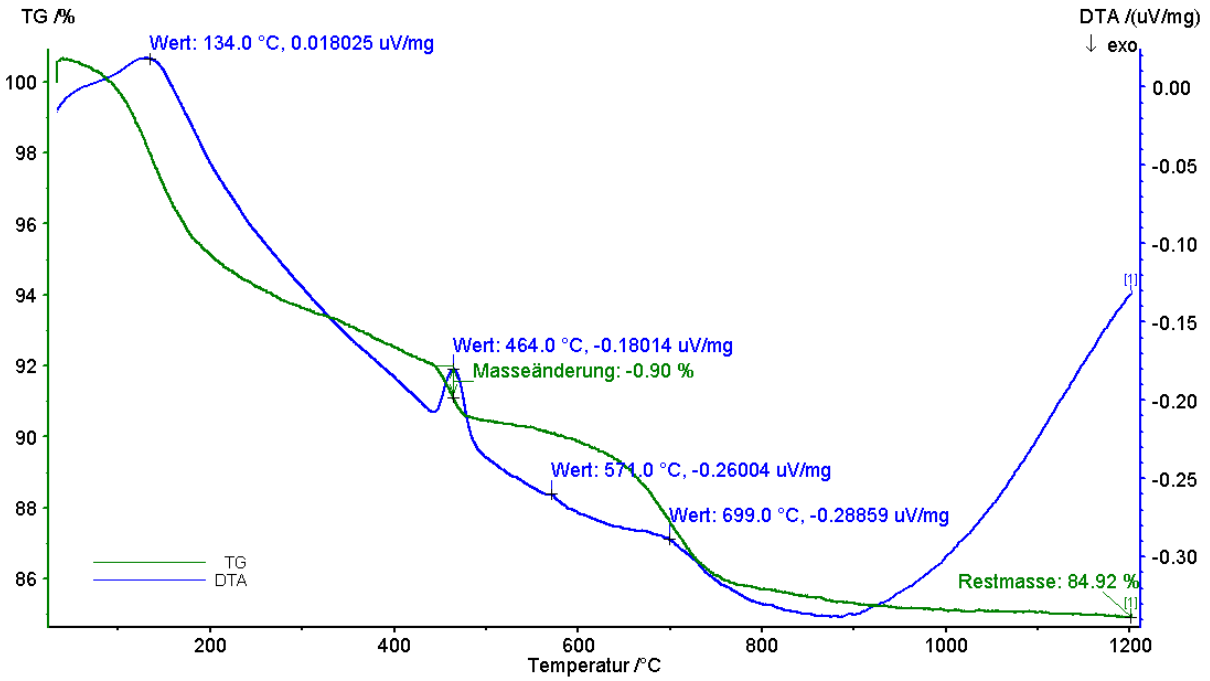


Abbildung 5.60: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 3A_Mitte

Bohrkerne der Baustelle 2: Kolbegasse

Betoniert im:	Juli 2004
Betonsorte:	OB B 400 HS FTB K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Probekörper 2B_unten:	Ist - Gewicht: 65,1 mg

In Abbildung 5.61 sind die DTA - und TG - Kurven von Probekörper 2B_unten dargestellt.

Der erste Peak kann laut Tabelle 4.4 der Kapillarentwässerung zugeordnet werden. Bei 461°C, dem zweiten Peak handelt es sich um das Ende des Portlanditzerfalls. Der Masseverlust beträgt 1,13 %. Bei dem sehr schwachen, langgezogenen vierten Peak findet die Kalkentsäuerung aus $CaCO_3$ im Zuschlag, bzw. die β - C_2S - Bildung statt.

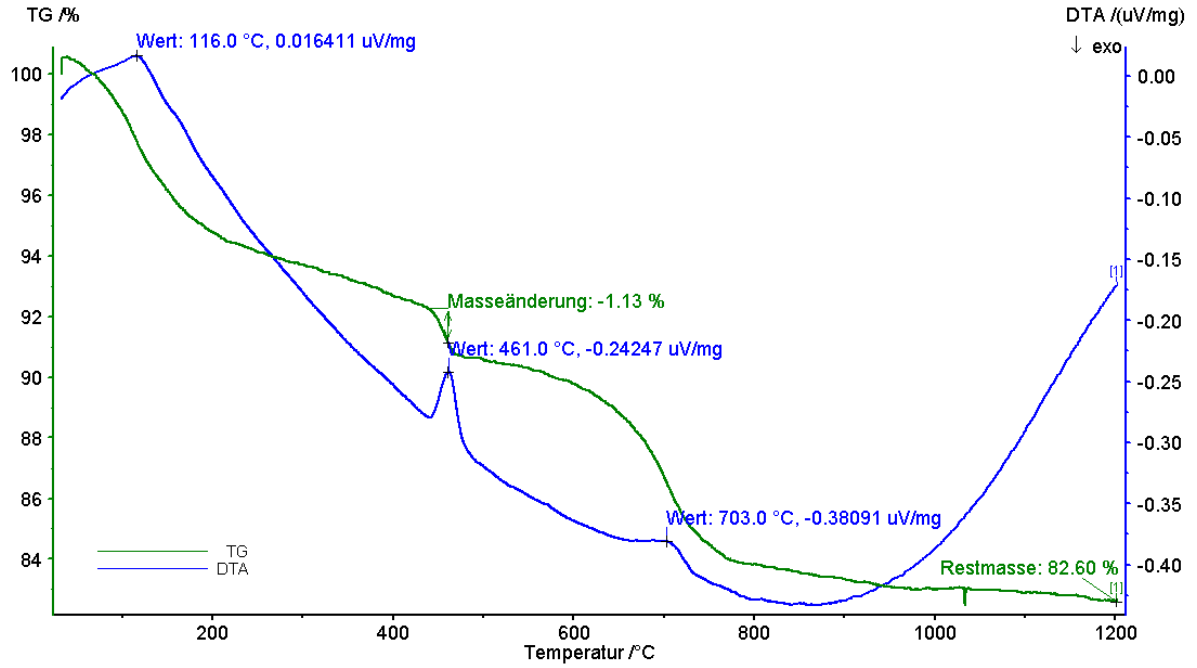


Abbildung 5.61: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 2B_unten

Bohrkerne der Baustelle 3: Grenzackerstraße

Betoniert im:	September 2002
Betonsorte:	OB B 400 HS FTB K4 GK22 PZ275
	OB B 400 HS FTB 12Std. K4 GK22 PZ275
	OB B 400 HS FTB 24Std. K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Probekörper 2C_Mitte:	Ist - Gewicht: 74,5 mg

In Abbildung 5.62 sind die DTA - und TG - Kurven von Probekörper 2C_Mitte dargestellt.

Der erste Peak kann laut Tabelle 4.4 der Kapillarentwässerung zugeordnet werden. Bei 465°C, dem zweiten Peak handelt es sich um das Ende des Portlanditzerfalls. Der Masseverlust beträgt 0,79 %. Der sehr kleine dritte Peak stellt die Quarzumwandlung dar, welche aus Sandanteilen im Zementstein entsteht. Bei dem sehr schwachen, langgezogenen vierten Peak findet die Kalkentsäuerung aus $CaCO_3$ im Zuschlag, bzw. die β - C_2S - Bildung statt.

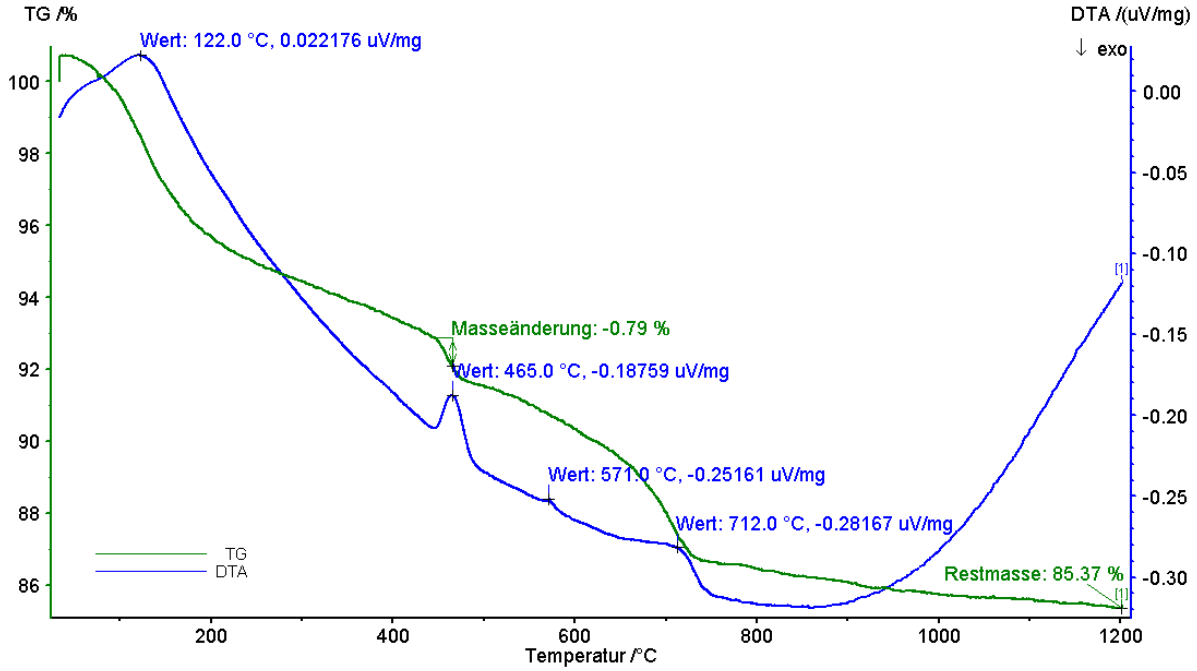


Abbildung 5.62: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 2C_Mitte

Bohrkerne der Baustelle 4: Veitingergasse

Betoniert im:	August 2004
Betonsorte:	OB B 400 HS FTB K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Probekörper 1D_oben:	Ist - Gewicht: 63,0 mg

In Abbildung 5.63 sind die DTA - und TG - Kurven von Probekörper 1D_oben dargestellt.

Bei dieser Zementsteinprobe können bei der TG-Kurve einige Peaks festgestellt werden. Da die Thermowaage sehr empfindlich ist, kam es wahrscheinlich während des Versuchs zu Störungen, die diese Messkurve beeinflussen.

Der erste Peak kann laut Tabelle 4.4 der Kapillarentwässerung zugeordnet werden. Bei 458°C, dem zweiten Peak handelt es sich um das Ende des Portlanditzerfalls. Der Masseverlust beträgt 0,69 %. Der sehr kleine dritte Peak stellt die Quarzumwandlung dar, die durch Sandreste in der Probe zustande gekommen ist. Bei dem sehr schwachen, langgezogenen vierten Peak findet die Kalkentsäuerung aus $CaCO_3$ im Zuschlag, bzw. die β - C_2S - Bildung statt.

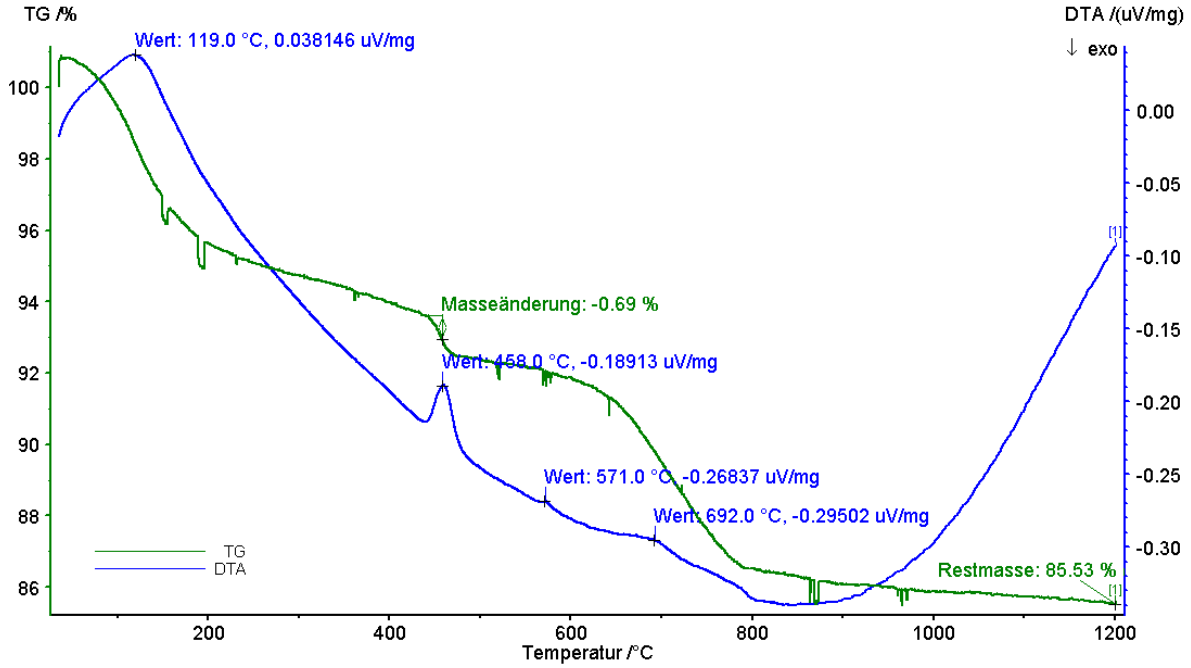


Abbildung 5.63: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 1D_oben

Bohrkerne der Baustelle 5: Flughafen

Betoniert im:	Juli, August und Oktober 2003
Betonsorte:	OB B 400 HS FTB K4 GK22 PZ275
W/B - Wert:	0,38
Probekörper 1E_oben:	Ist - Gewicht: 61,0 mg

In Abbildung 5.64 sind die DTA - und TG - Kurven von Probekörper 1E_oben dargestellt.

Auch bei dieser Zementsteinprobe können bei der TG - Kurve einige Peaks festgestellt werden, die den Störungen bei der Wägung zugeordnet werden.

Der erste Peak kann laut Tabelle 4.4 der Kapillarentwässerung zugeordnet werden. Bei 462°C, dem zweiten Peak handelt es sich um das Ende des Portlanditzerfalls. Der Masseverlust beträgt 1,06 %. Der sehr kleine dritte Peak stellt die Quarzumwandlung dar, die durch Sandreste in der Probe zustande gekommen ist. Bei dem sehr schwachen, langgezogenen vierten Peak findet die Kalkentsäuerung aus $CaCO_3$ im Zuschlag, bzw. die β - C_2S - Bildung statt.

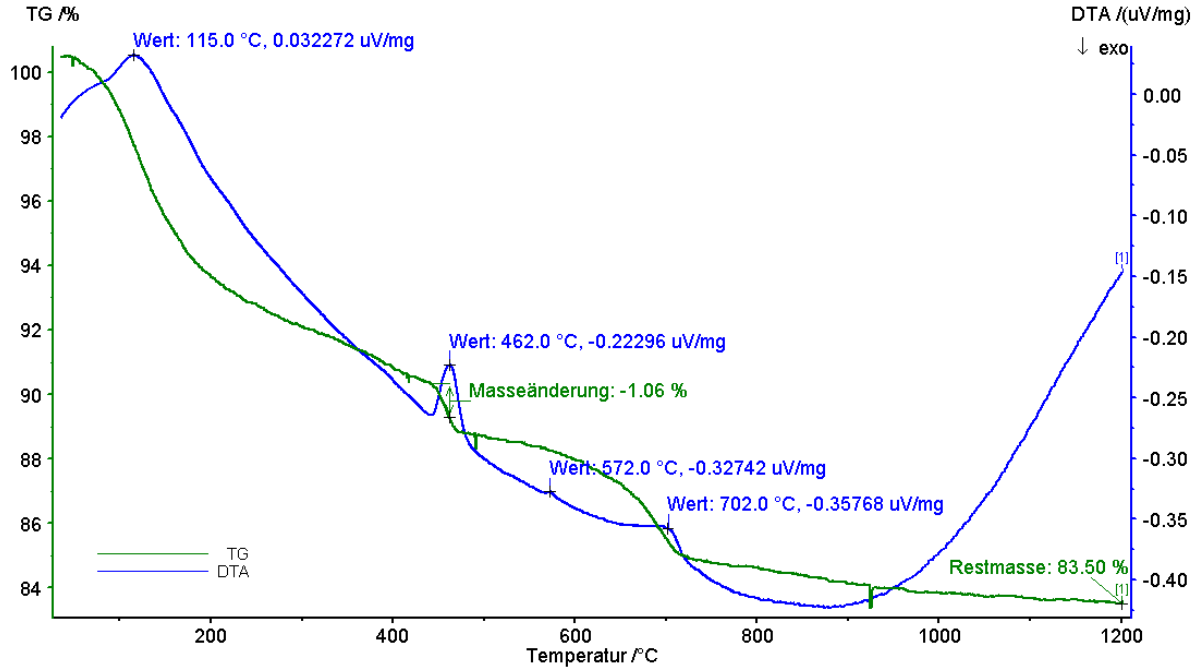


Abbildung 5.64: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 1E_oben

Um den Temperaturbereich des Portlanditzerfalls zu untersuchen, wurde das thermische Verhalten von Kalk mit der DTA und der TG geprüft. In Abbildung 5.65 kann man bei 443°C einen eindeutigen Peak, somit das Ende der stattgefundenen Reaktion, erkennen.

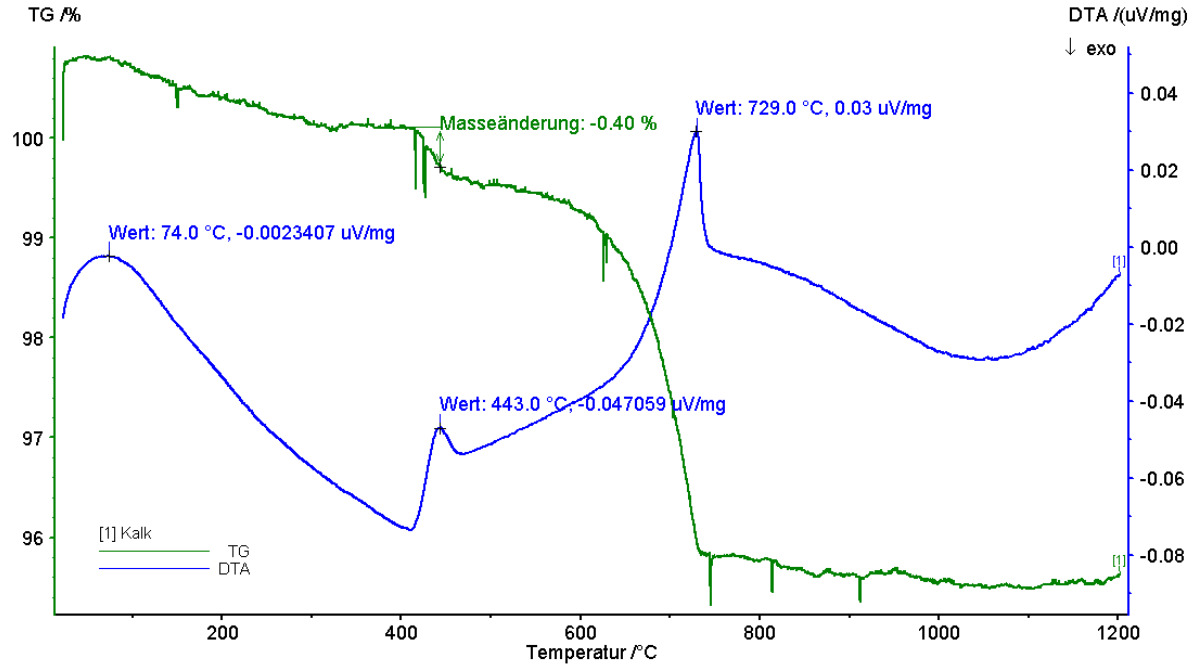


Abbildung 5.65: DTA - und TG - Kurve von Kalk

Um einen eventuellen Anteil an Kalk im Zuschlag ausschließen zu können, wurden von den Bohrkernen 3A, 2B, 3C, 1D und 1E Gesteinkörnungen mit Hammer und Meißel herausgeschlagen, gereinigt und mit Salzsäure in Verbindung gebracht. Keine der Gesteinskörnungen reagierte mit der Salzsäure.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Diplomarbeit konnte die Ursache für die Bildung der Risse nicht abschließend geklärt werden. Da der Aufbau von Beton sehr komplex ist und sehr viele Einflussfaktoren eine Rolle spielen, hängt der Grund für die Rissbildung von mehreren Faktoren ab.

Grundsätzlich gehören dazu u.a. folgende Faktoren:

- Art und Dauer der Nachbehandlung
- Wärmestrahlung (Sonne) nach dem Betonieren
- W/B - Wert des Betons
- Schwindverhalten des Betons
- Unvollständige Hydratation, inneres Schwinden
- „Verdursten“ des Betons an der Oberfläche, äußeres Schwinden
- Falsche Dosierung des Fließmittels.

Im Weiteren werden die aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und Anstöße für weitere Untersuchungen zur Findung der Ursache der Risse gegeben.

Die ermittelten Rohdichten des Betons aller Bohrkerne sind annähernd gleich groß, während die Druckfestigkeiten stark streuen. Dies deutet auf eine innere Schädigung hin. Werden die Probekörper bezüglich ihres W/B - Wertes verglichen, so kann festgestellt werden, dass die Bohrkerne mit dem niedrigen W/B - Wert von 0,38 teilweise nicht die genormten Druckfestigkeiten erreichen, während die Bohrkerne mit dem höheren W/B - Wert von 0,43 eine ausreichende Druckfestigkeit aufweisen.

Bei der Untersuchung der Porosimetrie wurde festgestellt, dass die Zementsteine aller Probekörper - egal ob Bohrkerne aus älteren oder jüngeren Betondecken oder gesondert hergestellte Probewürfel - einen zu hohen Kapillarporenanteil besitzen. Diese Porenverteilung führt zu der Erkenntnis, dass es sich bei allen sechs Baustellen um nicht vollständig hydratatisierte Zementsteine handelt. Da die Porenverteilungen des Zementsteins in den oberen Dritteln der Bohrkerne ähnlich wie in dem unteren Dritteln sind, kann eine zu geringe Verdunstungsschutzmenge nicht allein zu diesen Schäden geführt haben. Die Hydratation von Zement an sich ist ebenfalls ein sehr komplexer Vorgang. Um die Ursache für den niedrigen Hydratationsgrad finden zu können, müssten noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, bezüglich unterschiedlicher W/B - Werte und inneres Schwinden. Die Korngrößenverteilung des Zementes, die Lagerung des Zementes usw. können ebenfalls die Porosität und die Porengrößenverteilung des Zementsteins beeinflussen. Ebenso ist eine falsche Dosierung des Fließmittels im Hinblick auf unterschiedliche Einbaubedingungen möglich, welche im Rahmen von Laborversuchen nachgestellt werden könnte.

Bei den thermischen Analysen konnte annähernd der gleiche Kurvenverlauf bei allen fünf untersuchten Zementsteinproben festgestellt werden. Da keine offensichtlichen Abweichungen zu den in der Literatur gefundenen Messkurven beobachtet werden und die Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse sehr empfindliche Prüfungen für Umwandlungen bei sehr hohen Temperaturen sind, können aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen keine direkten Schlüsse auf mögliche Strukturänderungen im Bindemittelbereich abgeleitet werden.

Es könnten nun in weiterer Folge reine Zementsteinproben mit unterschiedlichen W/B - Werten hergestellt und deren Hydratationsablauf direkt untersucht werden. Ebenso würden Schwindversuche bei verschiedenen Erhärtungstemperaturen (15°C, 20°C, 25°C) eventuell weitere Aufschlüsse über das Verhalten des Zementes in Verbindung mit dem Fließmittel geben. Infolge von unzureichender Verdichtung ist es eventuell zu einer Entmischung im Beton gekommen. Dies tritt u.a. immer dann auf, wenn der Mehlkorngehalt im Frischbeton variiert, weil z.B.: der verwendete Sand aus verschiedenen Lieferungen stammt. Derartige technologische Untersuchungen sind allerdings sehr kosten- und zeitaufwendig und können im Rahmen von sehr umfangreichen Untersuchungen durchgeführt werden. Die vorliegende Arbeit liefert diesbezüglich erste Anhaltspunkte.

7 Literaturverzeichnis

[1] WEBER Robert, Guter Beton - Ratschläge für die richtige Betonherstellung, Verlag Bau + Technik, 22. Auflage, Düsseldorf, 2007

[2] VOLLPRACHT Alf, EIFERT Helmut, HERSEL Otmar, KNOPP Wolfgang, Straßenbau heute - Betondecken, Beton - Verlag, 4. Auflage, Düsseldorf, 1995

[3] VELSKE Siegfried, MENTLEIN Horst, EYMANN Peter, Straßenbautechnik, Werner Verlag, 4. Auflage, Düsseldorf, 1998

[4] EIFERT Helmut, Straßenbau heute - Tragschichten, Verlag Bau + Technik, 3. Auflage, Düsseldorf, 2006

[5] KNOBLAUCH Harald, SCHNEIDER Ulrich, Bauchemie, Werner Verlag, 5. Auflage, Düsseldorf, 2001

[6] LITZKA Johann, Skriptum Straßenwesen, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Ausgabe 2005/2006, Wien

[7] SCHNEIDER Ullrich, Bindemittel, Wiener Baustofflehre Blätter, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, TU Wien, 12. Auflage, Wien, 2008

[8] SCHNEIDER Ullrich, Frischbeton, Wiener Baustofflehre Blätter, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, TU Wien, 12. Auflage, Wien, 2008

[9] SCHNEIDER Ullrich, Festbeton, Wiener Baustofflehre Blätter, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, TU Wien, 12. Auflage, Wien, 2008

[10] WESCHE Karlhans, Baustoffe für tragende Bauteile Band 2: Beton, Mauerwerk, Bauverlag - Wiesbaden und Berlin, 3. Auflage, Wiesbaden und Berlin, 1993

[11] CZERNIN Wolfgang, Zementchemie für Bauingenieure, Bauverlag - Wiesbaden und Berlin, 3. Auflage, Wiesbaden und Berlin, 1977

[12] HEMMINGER Wolfgang, CAMMENGA Heiko, Methoden der thermischen Analyse, Springer - Verlag, 1. Auflage, Heidelberg, 1989

[13] LOCHER Friedrich W., Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Verlag Bau + Technik, 1. Auflage, Düsseldorf, 2002

[14] SCHLÜSSLER Karl Heinz, MCEDLOV – PETROSJAN Otar Petrovich, Der Baustoff Beton, VEB Verlag für Bauwesen ,1. Auflage, Berlin, 1990

[15] SPRINGENSCHMID Rupert, Betontechnologie für die Praxis, Bauwerk Verlag, 1. Auflage, Berlin, 2007

[16] www.schwenk.de, Mai 2008

[17] www.lafarge.at, Mai 2008

[18] www.zementindustrie.at, Juni 2008

[19] www.tal-betonchemie.at, August 2008

[20] www.zamg.ac.at, März 2008

[21] Bedienungsanleitung Porosimeter Pascal - 140/240/440

[22] VÖZ, Verein der Österreichischen Zementindustrie - Forschungsinstitut, Prüfbericht B329-1/08, Bestimmung der Spaltzugfestigkeit an Bohrkernen und Dokumentation von Gefügeschäden an Straßenfließbeton, 22.04.2008

[23] Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der österreichischen Zementfabrikanten, Erhöhung der Beständigkeit von Betonbauwerken - Betontechnologische Einflussfaktoren, Wien, 1988

[24] SCHNEIDER Ulrich, Dissertation zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen, Braunschweig, 1973

[25] KERN Rüdiger, Dissertation über den Einfluss der Austrocknung auf die Wasserbindung und Eigenschaften des Betons, Darmstadt, 1998

[26] ON-NP 10, Zusammenstellung der Prüfverfahren - Beton, Ausgabe 2002-10-01

[27] ÖNORM B 3303, Betonprüfung, Ausgabe 2002-09-01

[28] RVS 8S.06.32, Deckenarbeiten, Stand Februar 2006

[29] RVS 03.63, Oberbaubemessung, Ausgabe Mai 2005

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Betoneinbau mittels Betonrutsche (Foto: M. Moser)
Abbildung 2.2: Scheinfuge mit gewünschter Rissbildung (Foto: M. Moser)
Abbildung 2.3: Rechtwinkelig aufgebogene Anker (Foto: M. Moser)
Abbildung 2.4: Dübel in Stützkörben (Foto: M. Moser)
Abbildung 2.5: Dübel und Anker für die erste Spur (Foto: M. Moser)

Abbildung 3.1: Risse in der Johnstraße (Foto: M. Moser)
Abbildung 3.2: Risse in der Kolbegasse (Foto: M. Moser)
Abbildung 3.3: Risse in der Elisabeth Allee (Foto: M. Moser)
Abbildung 3.4: Millimetergroße Risse in der Grenzackerstraße (Foto: M. Moser)
Abbildung 3.5: Risse auf dem Flughafengelände (Foto: M. Moser)
Abbildung 3.6: Risse nur in der rechter Spur am Hietzinger Kai (Foto: M. Moser)
Abbildung 3.7: Betondecke bei Kreuzung Johann Straußgasse / Rainergasse (Foto: M. Moser)
Abbildung 3.8: Nahaufnahme der Betonstruktur bei Kreuzung Johann Straußgasse / Rainergasse (Foto: M. Moser)
Abbildung 3.9: Risse bei der Baustelle U 2/8 (Foto: M. Moser)

Abbildung 4.1: Porenanteil im Zementstein in Abhängigkeit vom W/B - Wert (Quelle: [7])
Abbildung 4.2: Porenanteil im Zementstein je nach Hydratationsgrad (Quelle: [15])
Abbildung 4.3: Gesamtporenraum von Zementsteinen mit unterschiedlichen W/B - Werten (Quelle: [23])
Abbildung 4.4: Einfluss des Alters der Zementsteinprobe auf die Porenverteilung (Quelle: [23])
Abbildung 4.5: Einfluss der Nachbehandlung auf die Porengrößenverteilung im Zementstein (Quelle: [23])
Abbildung 4.6: Messmethoden der Porosimetrie je nach Porengröße (Quelle: [21])
Abbildung 4.7: Gerät für die Thermogravimetrie (Quelle: [12])
Abbildung 4.8: Gerät zur Differenzthermoanalyse (Quelle: [12])
Abbildung 4.9: Bohrwagen (Foto: M. Moser)
Abbildung 4.10: Bohrkrone knapp über der Betondecke (Foto: M. Moser)
Abbildung 4.11: Drei Bohrkerne kurz vor dem Herausnehmen (Foto: M. Moser)
Abbildung 4.12: Halbvolle Würfelform auf einem Rütteltisch (Foto: M. Moser)
Abbildung 4.13: Verdichteter Betonwürfel auf einem Rütteltisch (Foto: M. Moser)
Abbildung 4.14: Aufbringen des gelblich gefärbten Verdunstungsschutzes (Foto: M. Moser)

Abbildung 5.1: Messen der Rissbreiten mit einer Risslupe (Foto: M. Moser)

Abbildung 5.2: Bohrkern aus der Grenzackerstraße (Foto: M. Moser)
Abbildung 5.3: Bohrkern aus dem Flughafengelände (Foto: M. Moser)
Abbildung 5.4: Tiefster Riss im Bohrkern (Grenzackerstraße) (Foto: M. Moser)
Abbildung 5.5: Waagrechter Riss im Bohrkern (Flughafen) (Foto: M. Moser)
Abbildung 5.6: Riss um Gesteinskörnung mikroskopisch vergrößert (Foto: Firma *La Farge*)
Abbildung 5.7: Große Poren mikroskopisch vergrößdert (Foto: Firma *La Farge*)
Abbildung 5.8: Riss mikroskopisch vergrößert (Foto: Firma *La Farge*)
Abbildung 5.9: Abwiegen der Probekörper (Foto: M. Moser)
Abbildung 5.10: Vermessen der Probekörper (Foto: M. Moser)
Abbildung 5.11: Prüfmaschine „Toni Technik“ (Foto: M. Moser)
Abbildung 5.12: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 1)
Abbildung 5.13: Druckfestigkeiten des Betons der Bohrkerne (Baustelle 1)
Abbildung 5.14: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 2)
Abbildung 5.15: Druckfestigkeiten des Betons der Bohrkerne (Baustelle 2)
Abbildung 5.16: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 3)
Abbildung 5.17: Druckfestigkeiten des Betons der Bohrkerne (Baustelle 3)
Abbildung 5.18: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 4)
Abbildung 5.19: Druckfestigkeiten des Betons der Bohrkerne (Baustelle 4)
Abbildung 5.20: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 5)
Abbildung 5.21: Druckfestigkeiten des Betons der Bohrkerne (Baustelle 5)
Abbildung 5.22: Maximal ausgehaltene Kraft des Betons der Bohrkerne (Baustelle 6)
Abbildung 5.23: Druckfestigkeiten des Betons der Bohrkerne (Baustelle 6)
Abbildung 5.24: Vergleich der Mittelwerte der Druckfestigkeiten des Betons aller Baustellen
Abbildung 5.25: Porosimeter PASCAL 240/440 (Foto: M. Moser)
Abbildung 5.26: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 1)
Abbildung 5.27: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 1)
Abbildung 5.28: Porosität des Zementsteins (Baustelle 1)
Abbildung 5.29: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 1)
Abbildung 5.30: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 2)
Abbildung 5.31: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 2)
Abbildung 5.32: Porosität des Zementsteins (Baustelle 2)
Abbildung 5.33: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 2)
Abbildung 5.34: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 3)
Abbildung 5.35: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 3)
Abbildung 5.36: Porosität des Zementsteins (Baustelle 3)
Abbildung 5.37: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 3)
Abbildung 5.38: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 4)
Abbildung 5.39: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 4)
Abbildung 5.40: Porosität des Zementsteins (Baustelle 4)

Abbildung 5.41: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 4)
Abbildung 5.42: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 5)
Abbildung 5.43: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 5)
Abbildung 5.44: Porosität des Zementsteins (Baustelle 5)
Abbildung 5.45: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 5)
Abbildung 5.46: Porengrößenverteilung des Zementsteins (Baustelle 6)
Abbildung 5.47: Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 6)
Abbildung 5.48: Porosität des Zementsteins (Baustelle 6)
Abbildung 5.49: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins (Baustelle 6)
Abbildung 5.50: Durchschnittlicher Porengrößenanteil des Zementsteins aller sechs Baustellen
Abbildung 5.51: Durchschnittliche Porosität des Zementsteins aller sechs Baustellen
Abbildung 5.52: Porengrößenverteilung des Zementsteins der Würfelprüfserie 1
Abbildung 5.53: Porengrößenanteile des Zementsteins der Würfelprüfserie 1
Abbildung 5.54: Porosität des Zementsteins der Würfelprüfserie 1
Abbildung 5.55: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins der Würfelprüfserie 1
Abbildung 5.56: Porengrößenverteilung des Zementsteins der Würfelprüfserie 2
Abbildung 5.57: Porengrößenanteile des Zementsteins der Würfelprüfserie 2
Abbildung 5.58: Porosität des Zementsteins der Würfelprüfserie 2
Abbildung 5.59: Absolute Porengrößenanteile des Zementsteins der Würfelprüfserie 2
Abbildung 5.60: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 3A_Mitte
Abbildung 5.61: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 2B_unten
Abbildung 5.62: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 2C_Mitte
Abbildung 5.63: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 1D_oben
Abbildung 5.64: DTA - und TG - Kurve von Probekörper 1E_oben
Abbildung 5.65: DTA - und TG - Kurve von Kalk

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Festigkeitsklassen (Quelle: [9])
Tabelle 2.2: Betonkurzbezeichnung und damit abgedeckte Umweltklassen (Quelle: [17])
Tabelle 2.3: Expositionsklassen (Quelle: [9])
Tabelle 2.4: Expositionsklasse XM (Quelle: [17])
Tabelle 2.5: Konsistenz vom Frischbeton (Quelle: [17])
Tabelle 2.6: Bemessungstabellen für Betondecken (Quelle: [29])

Tabelle 3.1: Übersicht der Baustellen mit schadhaften Betonfeldern
Tabelle 3.2: Übersicht von allen beobachteten Baustellen
Tabelle 3.3:Wetterdaten einiger Baustellen
Tabelle 3.4: Betonzusammensetzung von 1999 bis 2007

Tabelle 4.1: Porengrößen nach *Wesche* (Quelle: [10])
Tabelle 4.2: Porengrößen nach *Schneider* (Quelle: [7])
Tabelle 4.3: Porengrößen nach *Locher* (Quelle: [13])
Tabelle 4.4: Kinetische Parameter der Reaktionen im Normalbeton (Quelle: [24])
Tabelle 4.5: Bohrprotokoll von Baustelle 1
Tabelle 4.6: Bohrprotokoll von Baustelle 2
Tabelle 4.7: Bohrprotokoll von Baustelle 3
Tabelle 4.8: Bohrprotokoll von Baustelle 4
Tabelle 4.9: Bohrprotokoll von Baustelle 5
Tabelle 4.10: Bohrprotokoll von Baustelle 6
Tabelle 4.11: Protokoll zur Herstellung und Lagerung der Würfel

Tabelle 5.1: Spaltzugfestigkeit des Betons der ausgewählten Bohrkerne (Quelle: [22])
Tabelle 5.2: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 1
Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 2
Tabelle 5.4: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 3
Tabelle 5.5: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 4
Tabelle 5.6: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 5
Tabelle 5.7: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper von Baustelle 6
Tabelle 5.8: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 1
Tabelle 5.9: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 2
Tabelle 5.10: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 3
Tabelle 5.11: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 4

Tabelle 5.12: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 5
Tabelle 5.13: Gegenüberstellung der Messwerte der drei Probekörper der Baustelle 6
Tabelle 5.14: Gegenüberstellung der Messwerte der Würfelprüfserie 1
Tabelle 5.15: Gegenüberstellung der Messwerte der Würfelprüfserie 2

10 Anhang

Prüfprotokolle:

- Druckfestigkeit
- Porosimetrie
- DTA und TG

Prüfprotokolle von der Druckfestigkeitsprüfung:

Bohrkern 1 der Baustelle 1: Hietzinger Kai

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

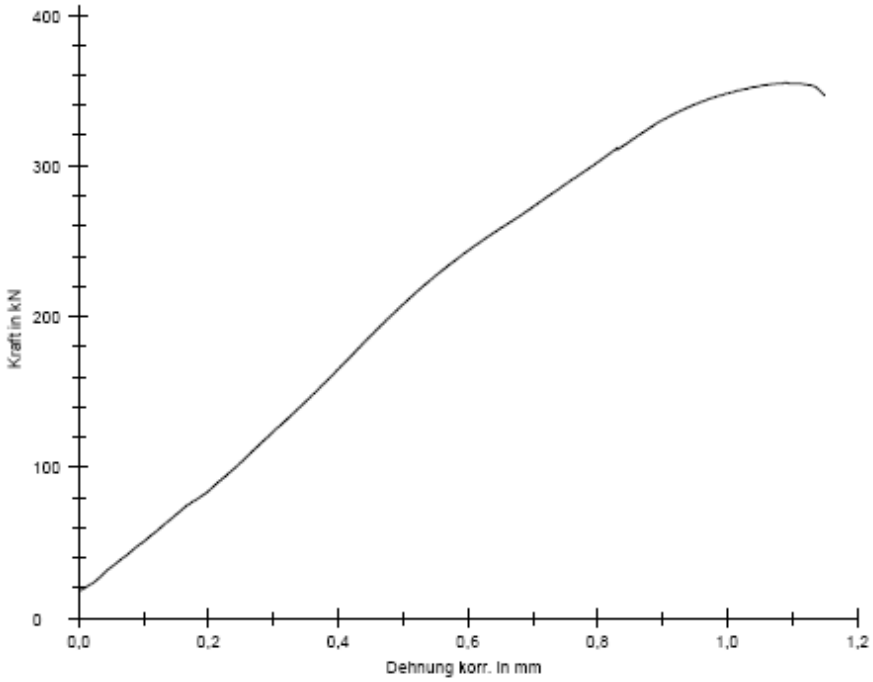
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	354,93	42,60	1,09	227,73	249,34
2	2	8332	356,68	42,81	0,78	151,78	180,86
3	3	8332	293,17	35,18	0,62	109,76	143,93

Seriengrafik:



Bohrkern 2 der Baustelle 1: Hietzinger Kai

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

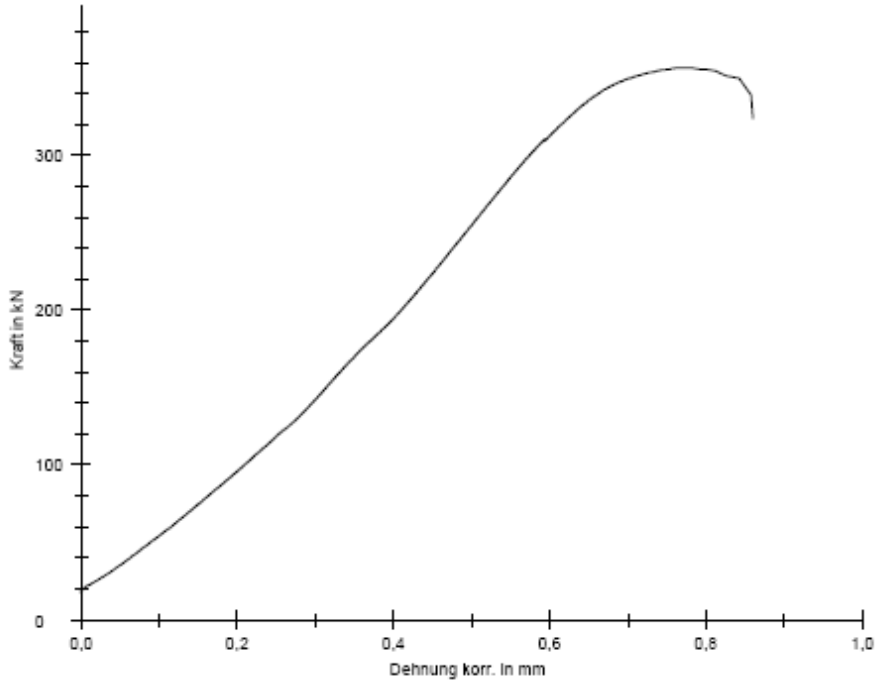
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	354,93	42,60	1,09	227,73	249,34
2	2	8332	356,68	42,81	0,78	151,78	180,86
3	3	8332	293,17	35,18	0,62	109,76	143,93

Seriengrafik:



Bohrkern 3 der Baustelle 1: Hietzinger Kai

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

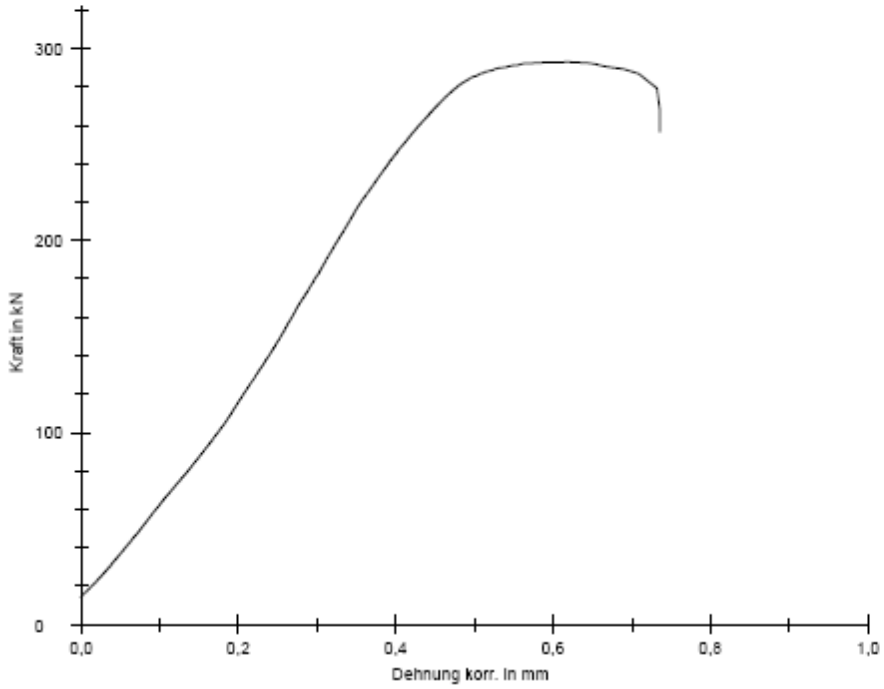
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	354,93	42,60	1,09	227,73	249,34
2	2	8332	356,68	42,81	0,78	151,78	180,86
3	3	8332	293,17	35,18	0,62	109,76	143,93

Seriengrafik:



Bohrkern 1 der Baustelle 2: Kolbegasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

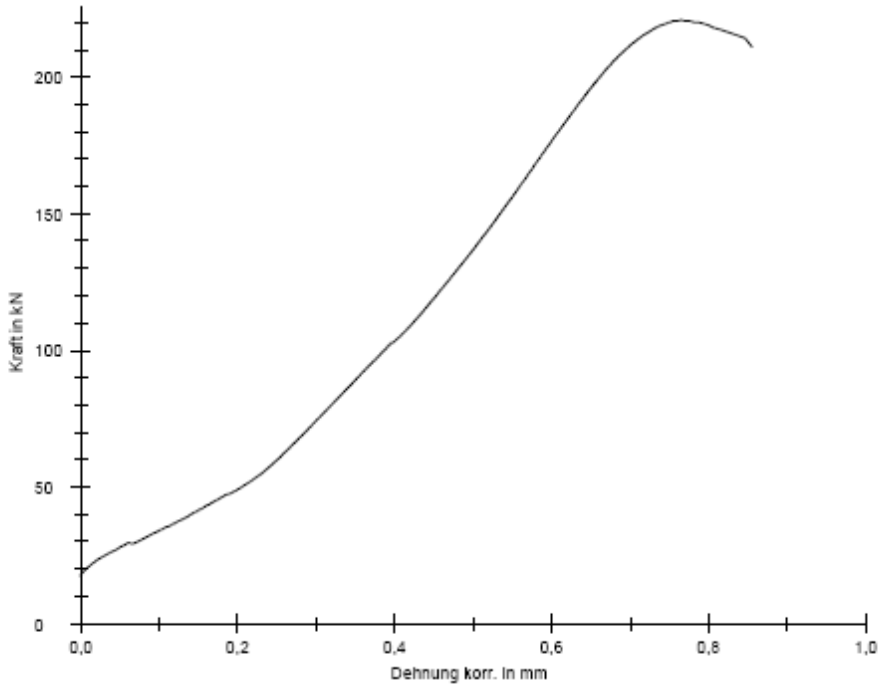
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	220,95	26,52	0,77	83,16	102,86
2	2	8332	221,73	26,61	0,91	128,07	153,77
3	3	8332	278,11	33,38	0,86	132,09	147,80

Seriengrafik:



Bohrkern 2 der Baustelle 2: Kolbegasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

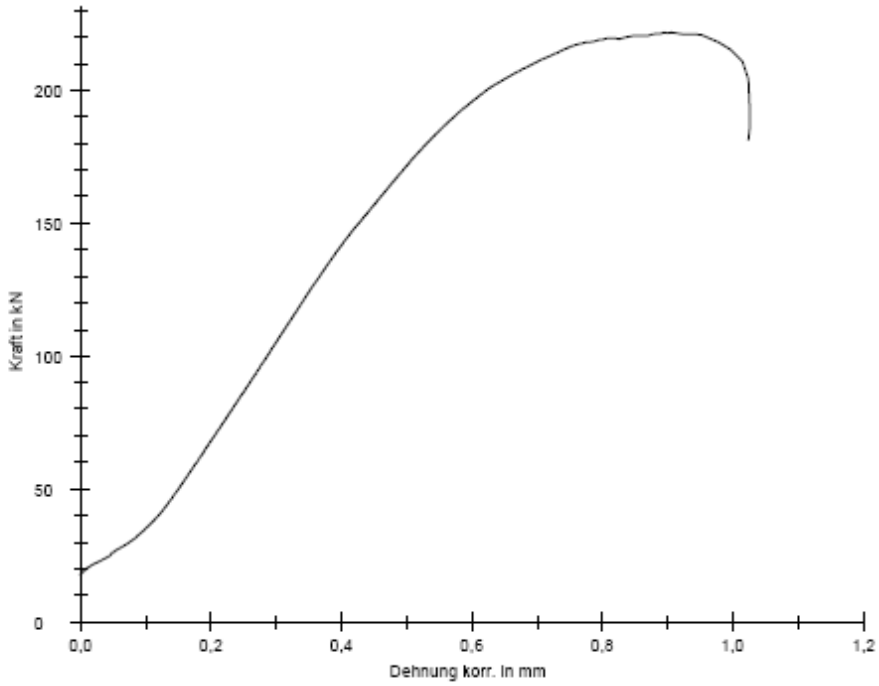
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	220,95	26,52	0,77	83,16	102,86
2	2	8332	221,73	26,61	0,91	128,07	153,77
3	3	8332	278,11	33,38	0,86	132,09	147,80

Seriengrafik:



Bohrkern 3 der Baustelle 2: Kolbegasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

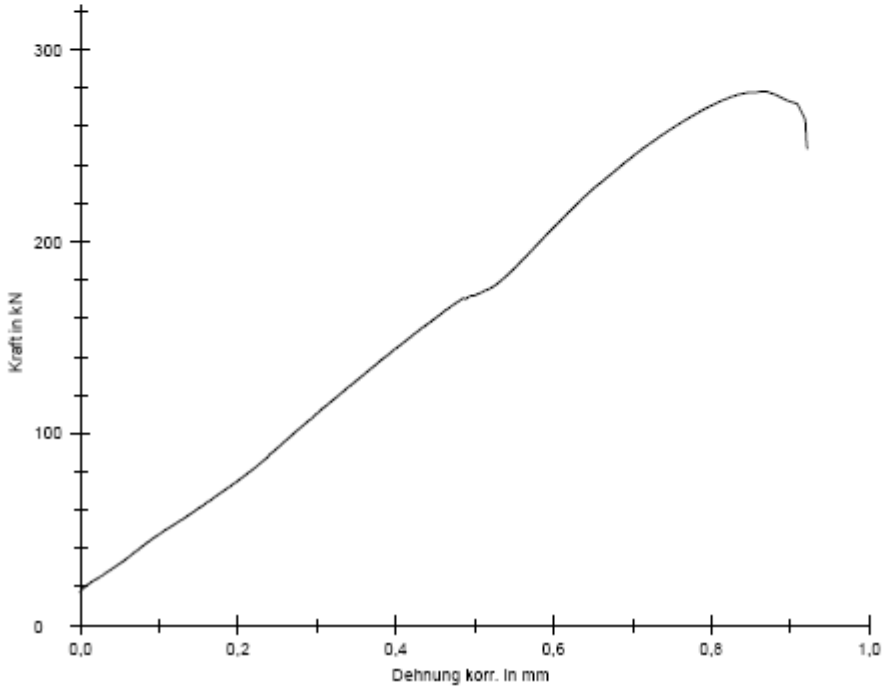
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	220,95	26,52	0,77	83,16	102,86
2	2	8332	221,73	26,61	0,91	128,07	153,77
3	3	8332	278,11	33,38	0,86	132,09	147,80

Seriengrafik:



Bohrkern 1 der Baustelle 3: Grenzackerstraße

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

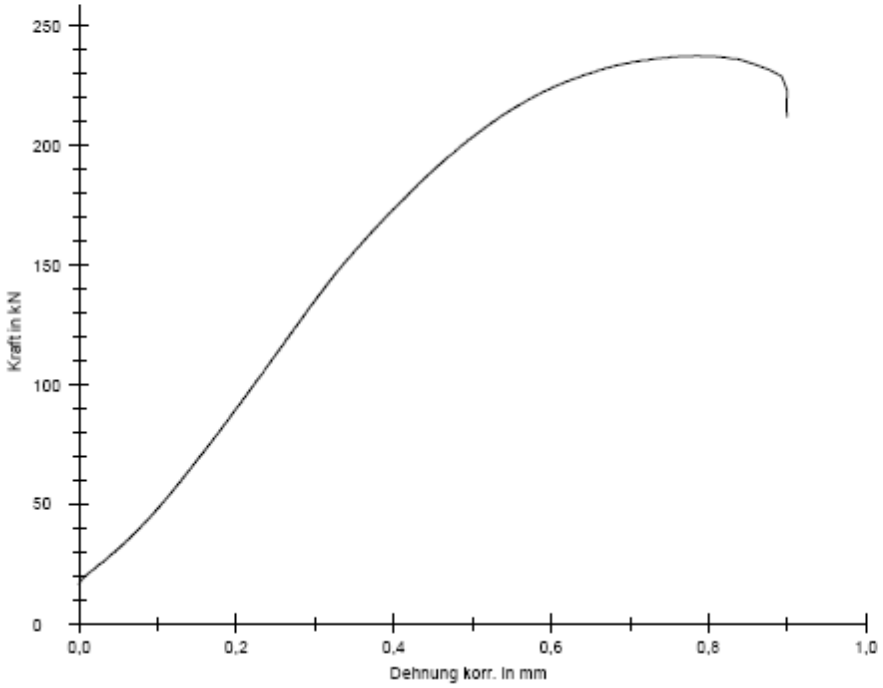
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	237,43	28,50	0,78	119,66	147,21
2	2	8332	275,75	33,09	1,02	155,04	177,74
3	3	8171	285,84	34,98	0,92	149,20	174,66

Seriengrafik:



Bohrkern 2 der Baustelle 3: Grenzackerstraße

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

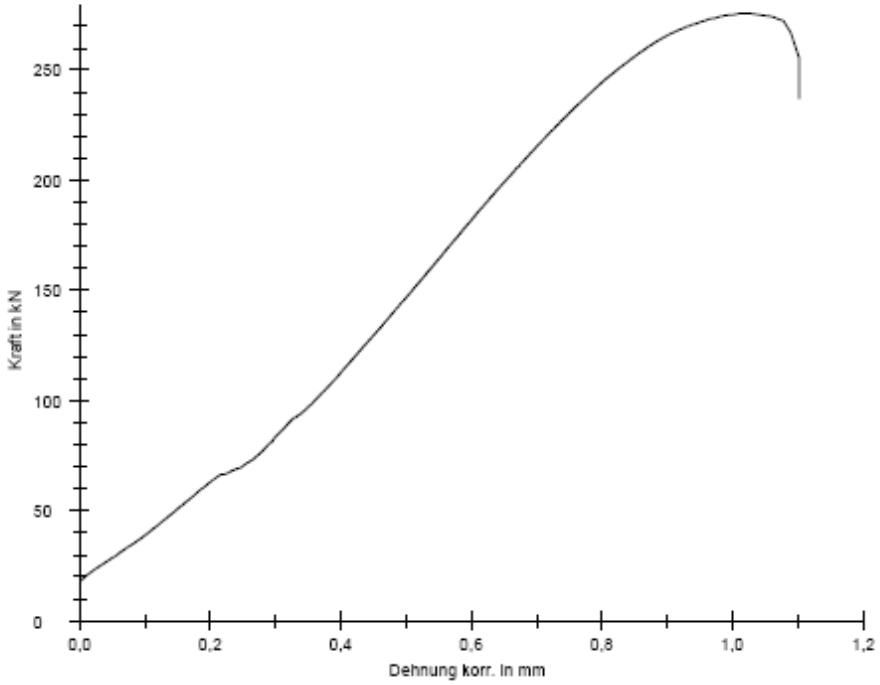
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	237,43	28,50	0,78	119,66	147,21
2	2	8332	275,75	33,09	1,02	155,04	177,74
3	3	8171	285,84	34,98	0,92	149,20	174,66

Seriengrafik:



Bohrkern 3 der Baustelle 3: Grenzackerstraße

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

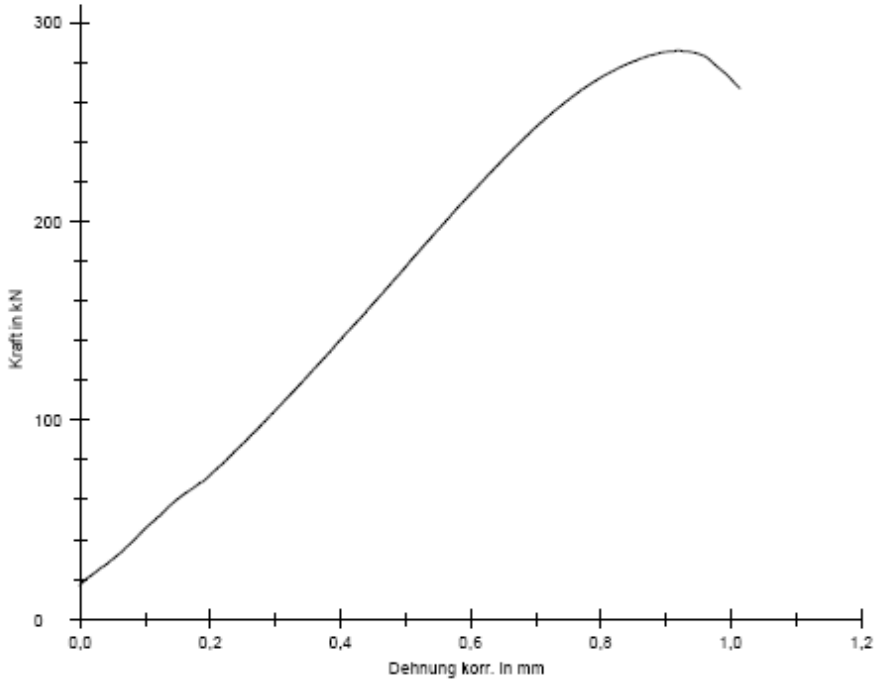
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	237,43	28,50	0,78	119,66	147,21
2	2	8332	275,75	33,09	1,02	155,04	177,74
3	3	8171	285,84	34,98	0,92	149,20	174,66

Seriengrafik:



Bohrkern 1 der Baustelle 4: Veitingergasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

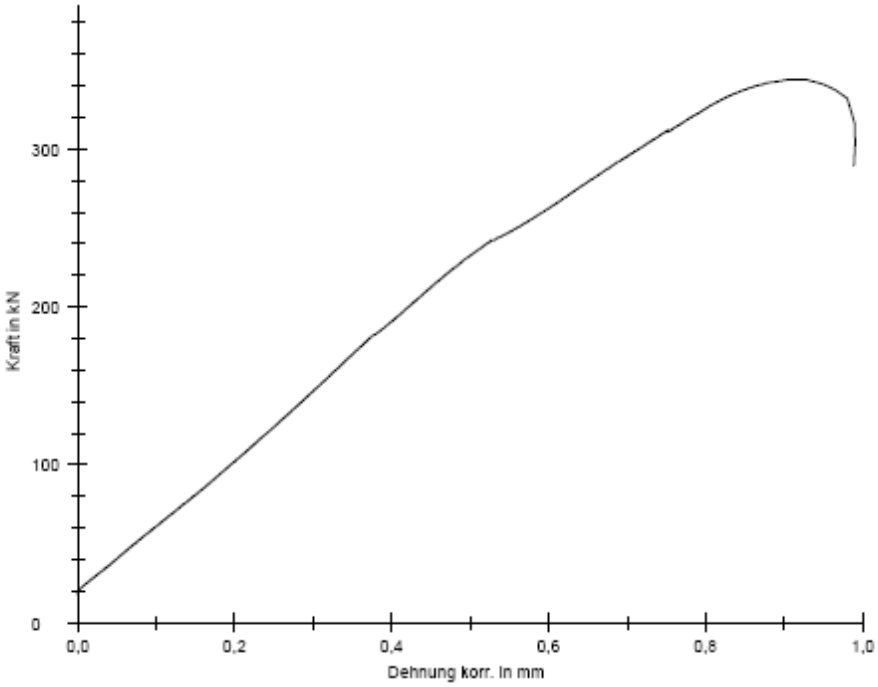
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	344,03	41,29	0,92	185,65	210,24
2	2	8332	294,15	35,30	1,19	177,89	210,43
3	3	8332	293,64	35,24	1,05	157,90	197,49

Seriengrafik:



Bohrkern 2 der Baustelle 4: Veitingergasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

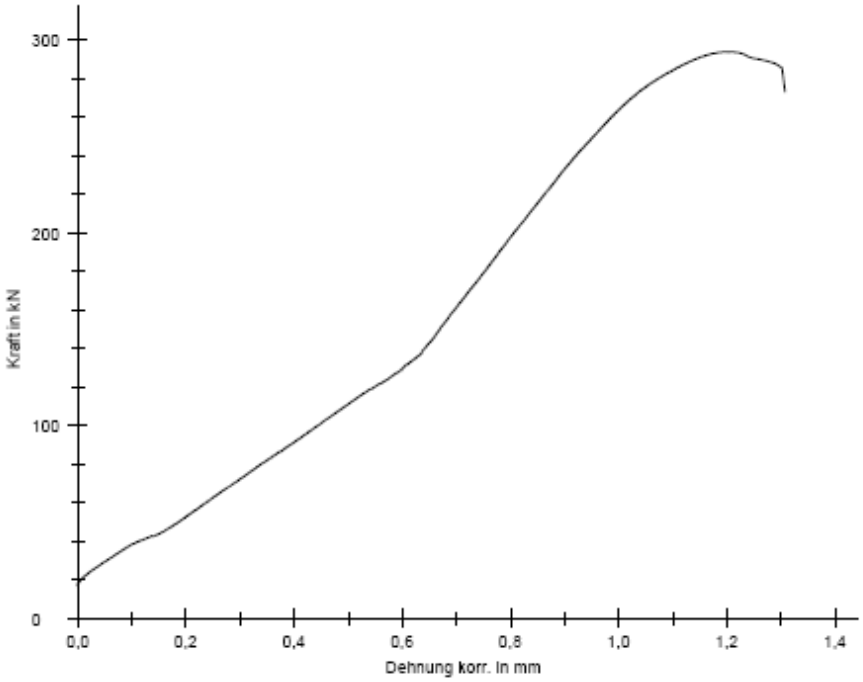
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	344,03	41,29	0,92	185,65	210,24
2	2	8332	294,15	35,30	1,19	177,89	210,43
3	3	8332	293,64	35,24	1,05	157,90	197,49

Seriengrafik:



Bohrkern 3 der Baustelle 4: Veitingergasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

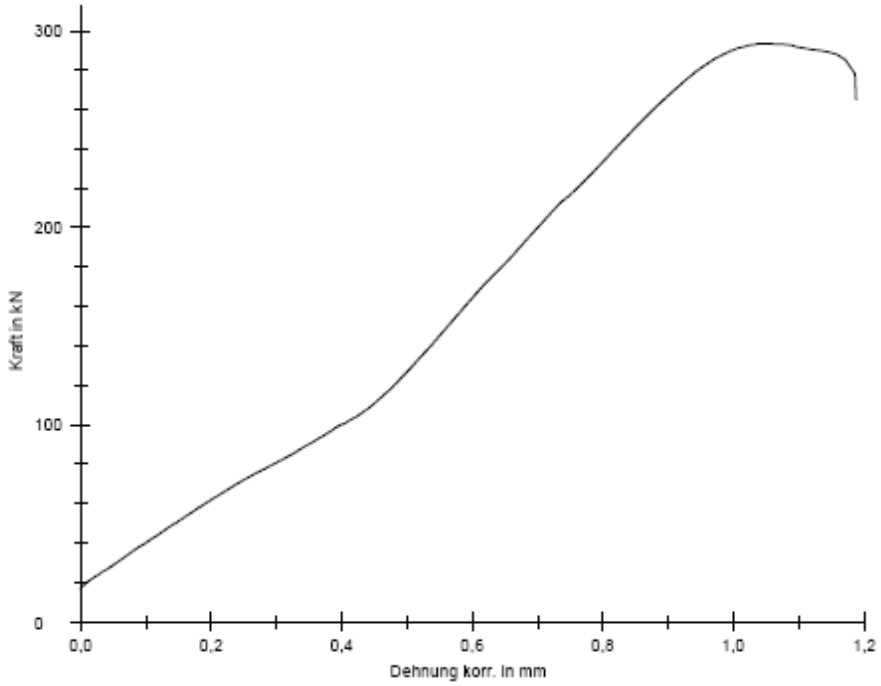
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	344,03	41,29	0,92	185,65	210,24
2	2	8332	294,15	35,30	1,19	177,89	210,43
3	3	8332	293,64	35,24	1,05	157,90	197,49

Seriengrafik:



Bohrkern 1 der Baustelle 5: Flughafen

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

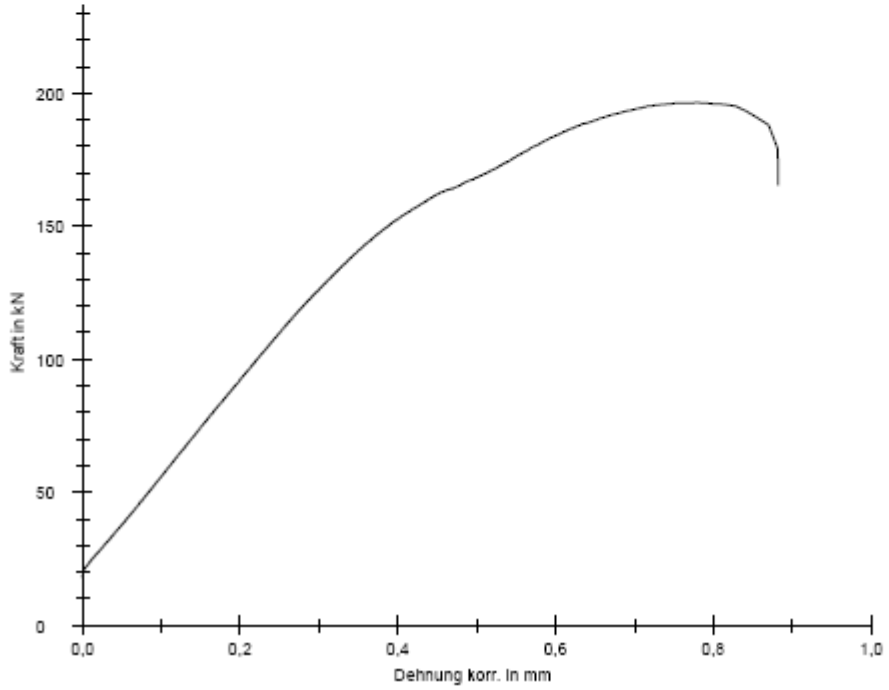
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	196,47	23,58	0,78	103,83	124,27
2	2	8332	231,78	27,82	1,10	149,86	178,65
3	3	8332	229,57	27,55	0,91	119,26	149,55

Seriengrafik:



Bohrkern 2 der Baustelle 5: Flughafen

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

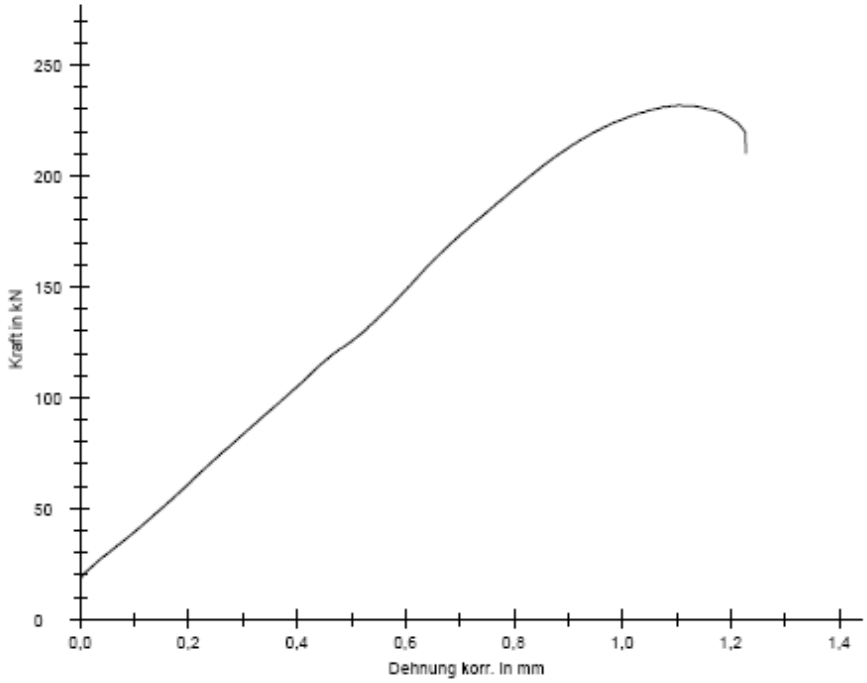
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	196,47	23,58	0,78	103,83	124,27
2	2	8332	231,78	27,82	1,10	149,86	178,65
3	3	8332	229,57	27,55	0,91	119,26	149,55

Seriengrafik:



Bohrkern 3 der Baustelle 5: Flughafen

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

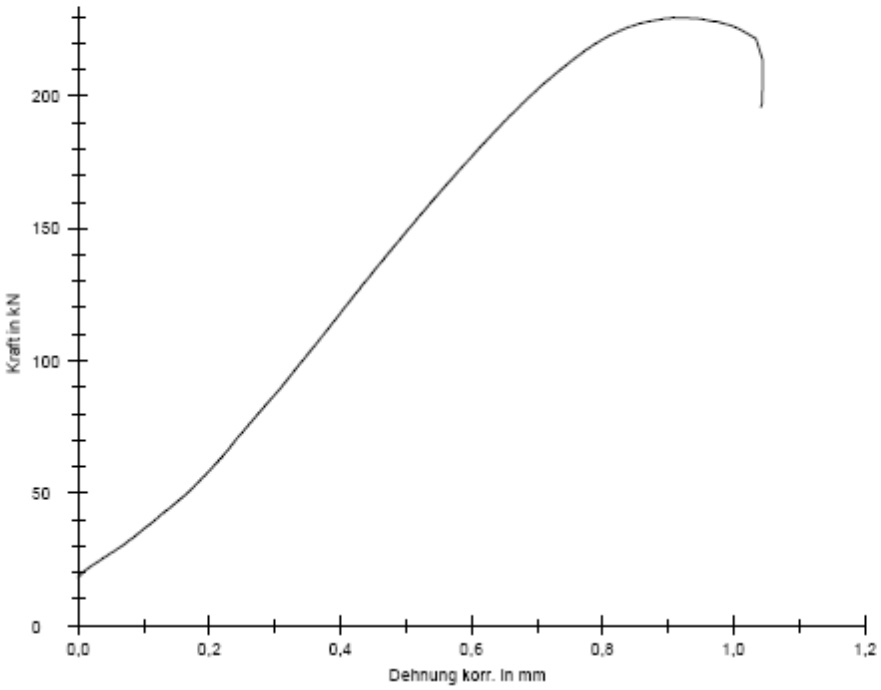
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	196,47	23,58	0,78	103,83	124,27
2	2	8332	231,78	27,82	1,10	149,86	178,65
3	3	8332	229,57	27,55	0,91	119,26	149,55

Seriengrafik:



Bohrkern 1 der Baustelle 6: Hochheimgasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

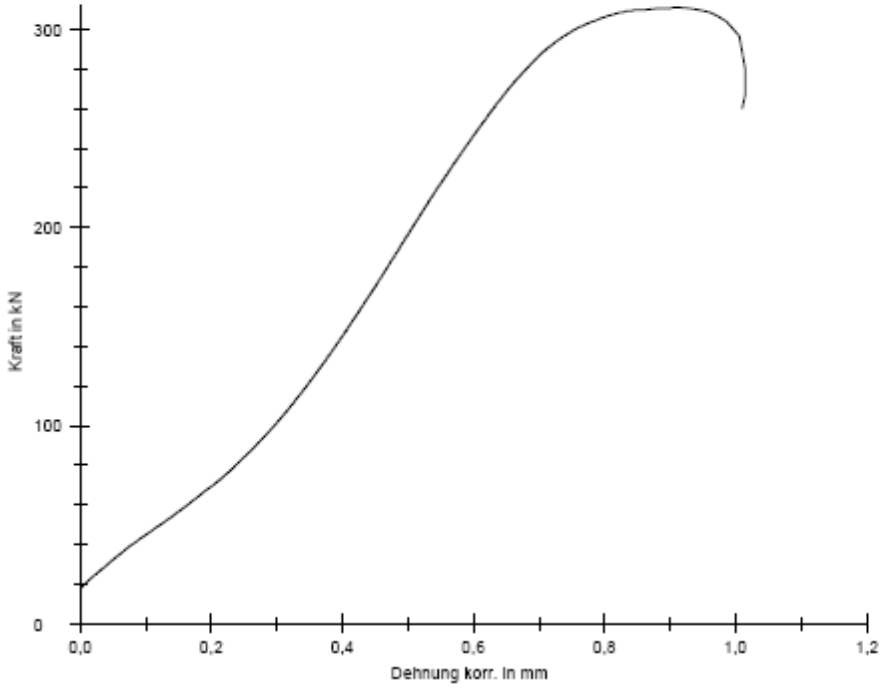
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	311,34	37,37	0,92	161,58	190,27
2	2	8332	376,63	45,20	0,96	169,06	189,50
3	3	8332	264,83	31,78	0,69	108,15	125,18

Seriengrafik:



Bohrkern 2 der Baustelle 6: Hochheimgasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

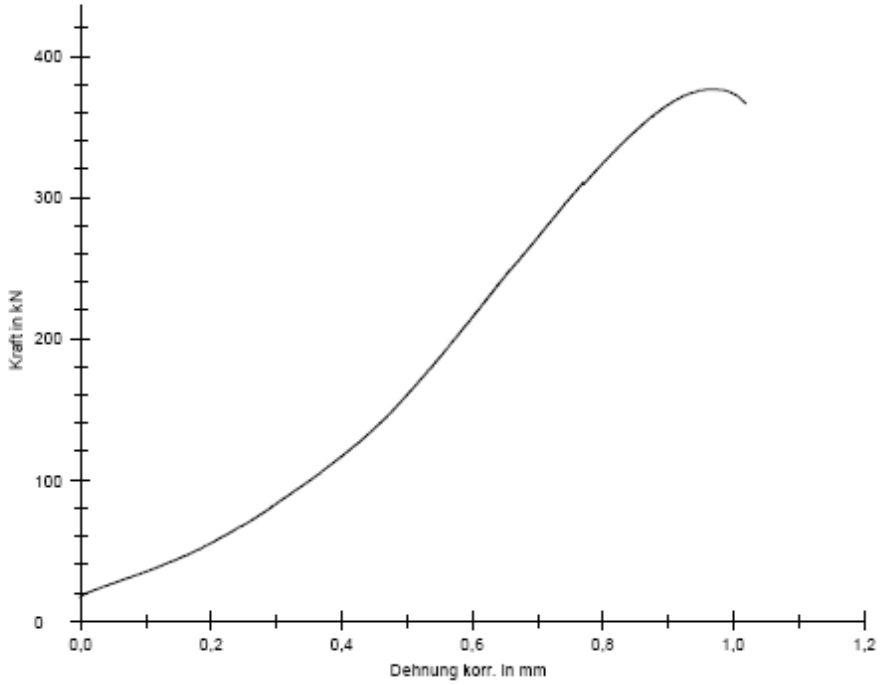
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	311,34	37,37	0,92	161,58	190,27
2	2	8332	376,63	45,20	0,96	169,06	189,50
3	3	8332	264,83	31,78	0,69	108,15	125,18

Seriengrafik:



Bohrkern 3 der Baustelle 6: Hochheimgasse

Einfaches Standardprotokoll

TU-WIEN
Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz
Adolf Blamauergasse 1-3
1030 WIEN

Toni Technik

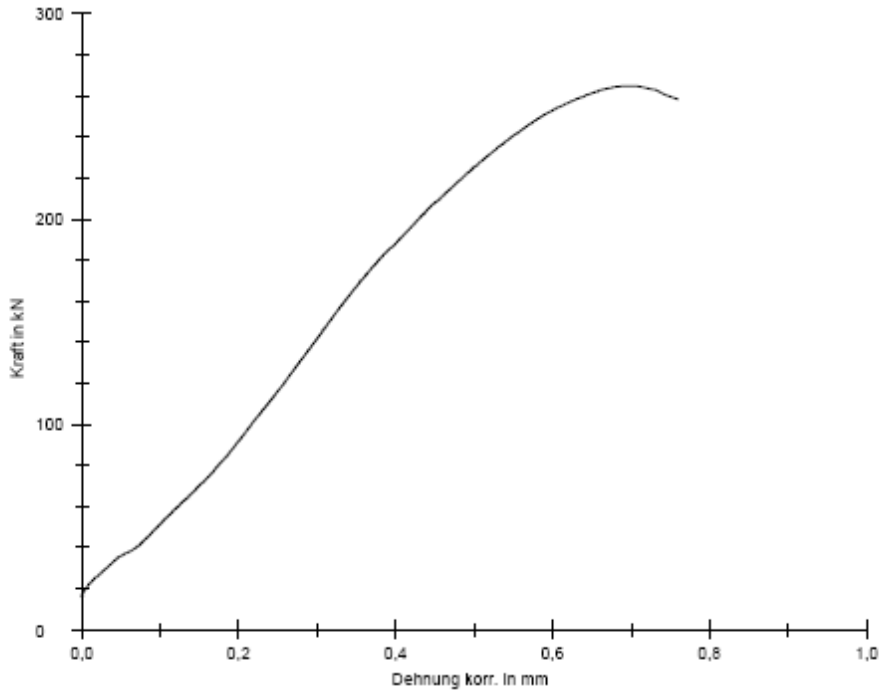
Parametertabelle:

Kunde : Pittel Und Brausewetter
Prüfer : Melanie Moser
Material : Bohrkerne Straßenfließbeton
Prüfnorm: Druckversuch Zylinder

Ergebnisse:

Nr	Probennummer	A mm²	F_{max} kN	σ_m N/mm²	ε_m mm	W_m Nm	W_b Nm
1	1	8332	311,34	37,37	0,92	161,58	190,27
2	2	8332	376,63	45,20	0,96	169,06	189,50
3	3	8332	264,83	31,78	0,69	108,15	125,18

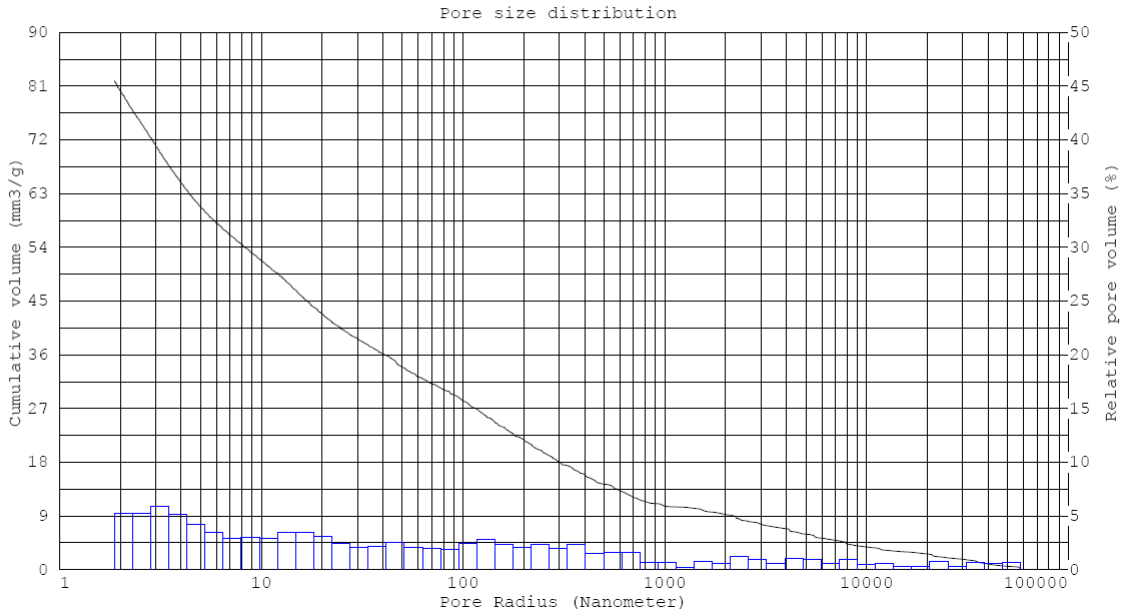
Seriengrafik:



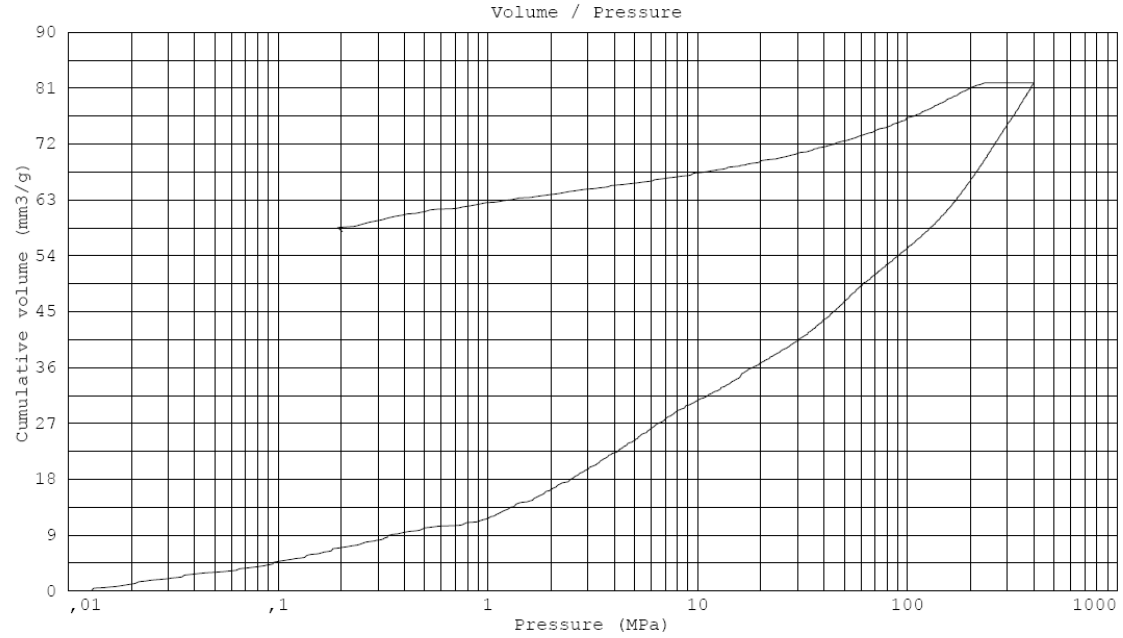
Prüfprotokolle von der Porosimeterprüfung:

1. Baustelle: 1A_oben

Instrument type : Pascal 440

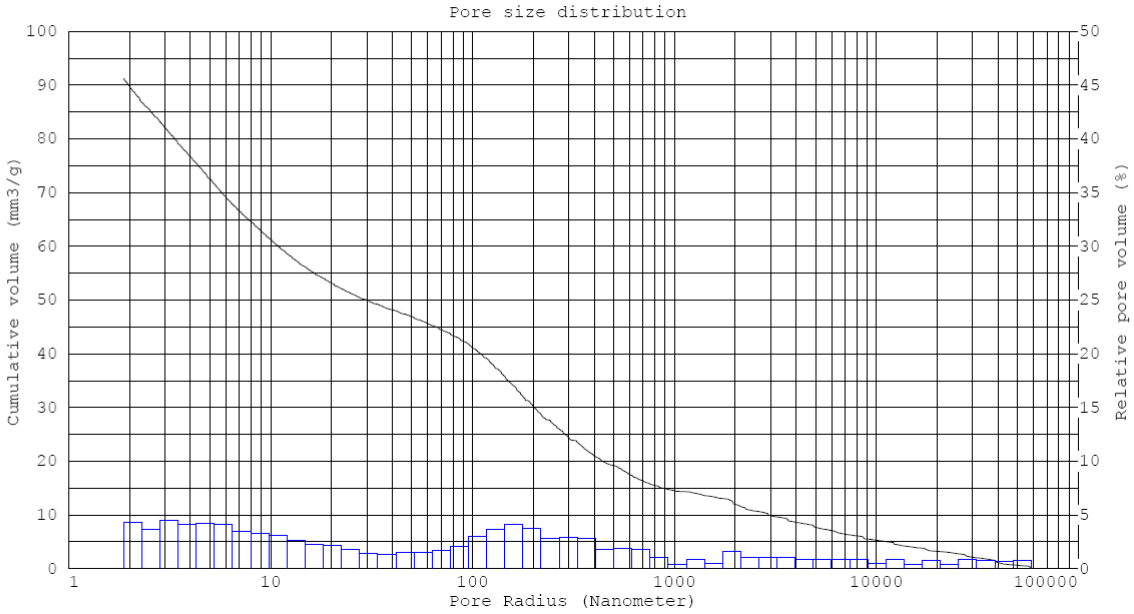


Instrument type : Pascal 440

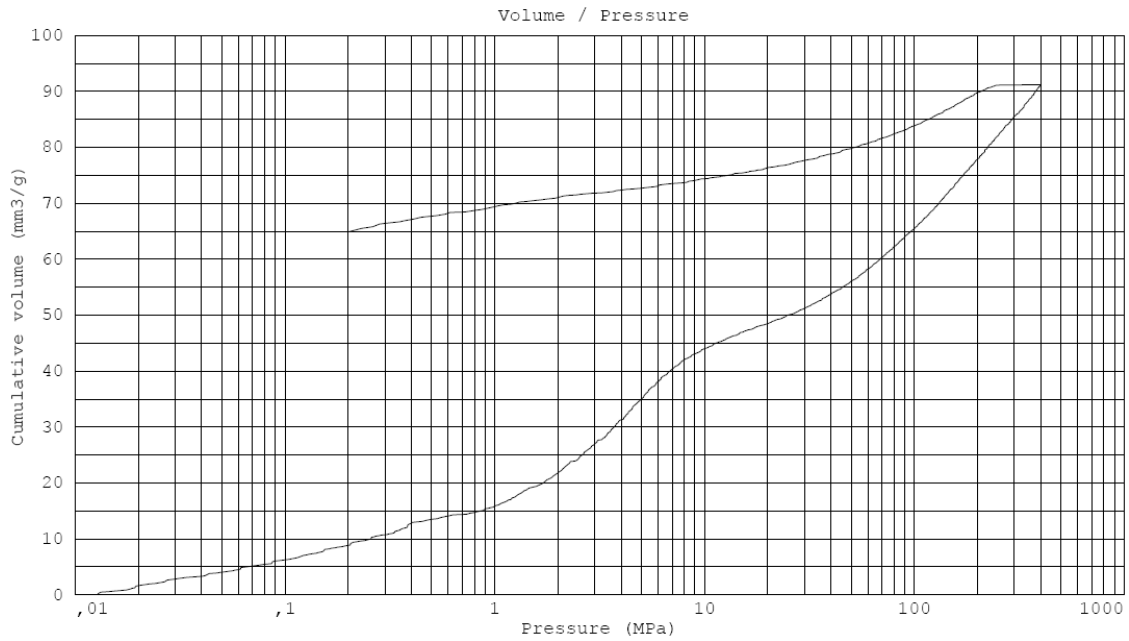


1. Baustelle: 2A_oben

Instrument type : Pascal 440

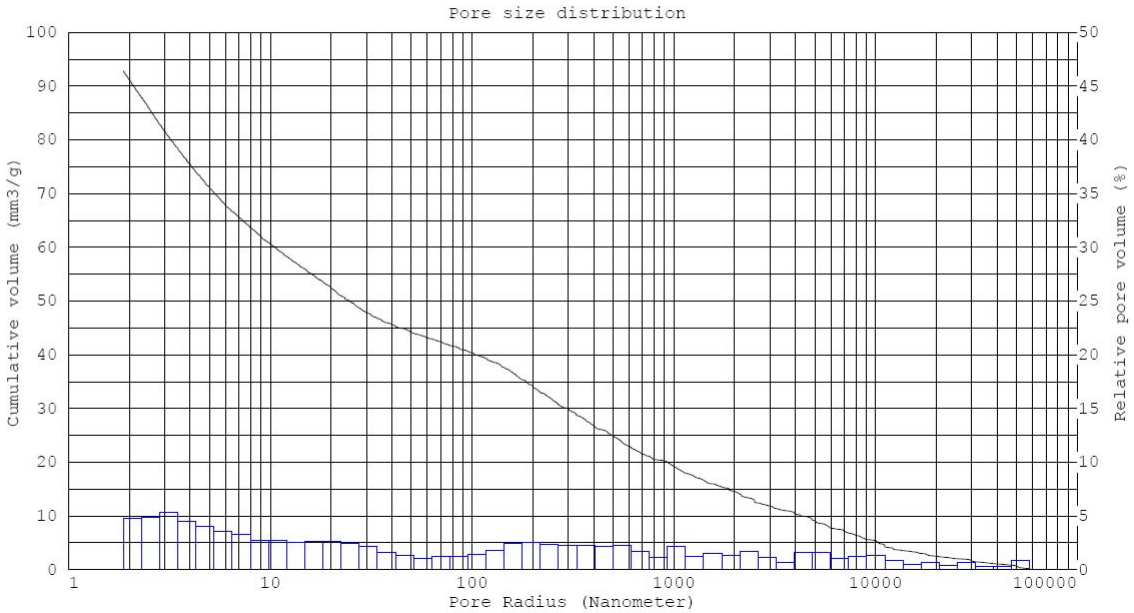


nstrument type : Pascal 440

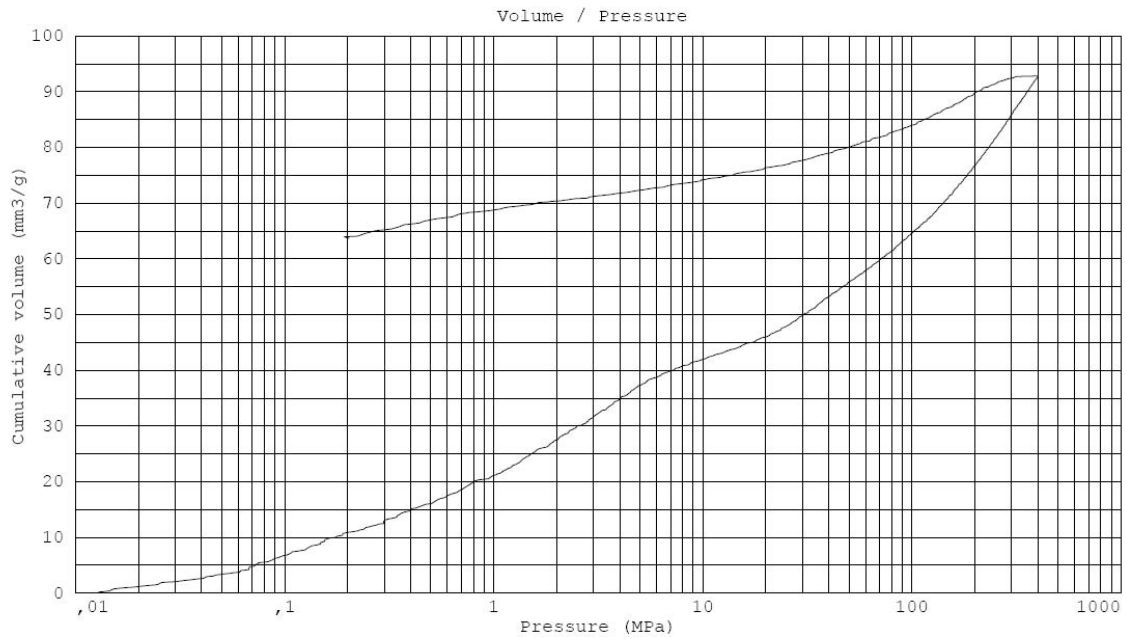


1. Baustelle: 3A_Mitte

nstrument type : Pascal 440

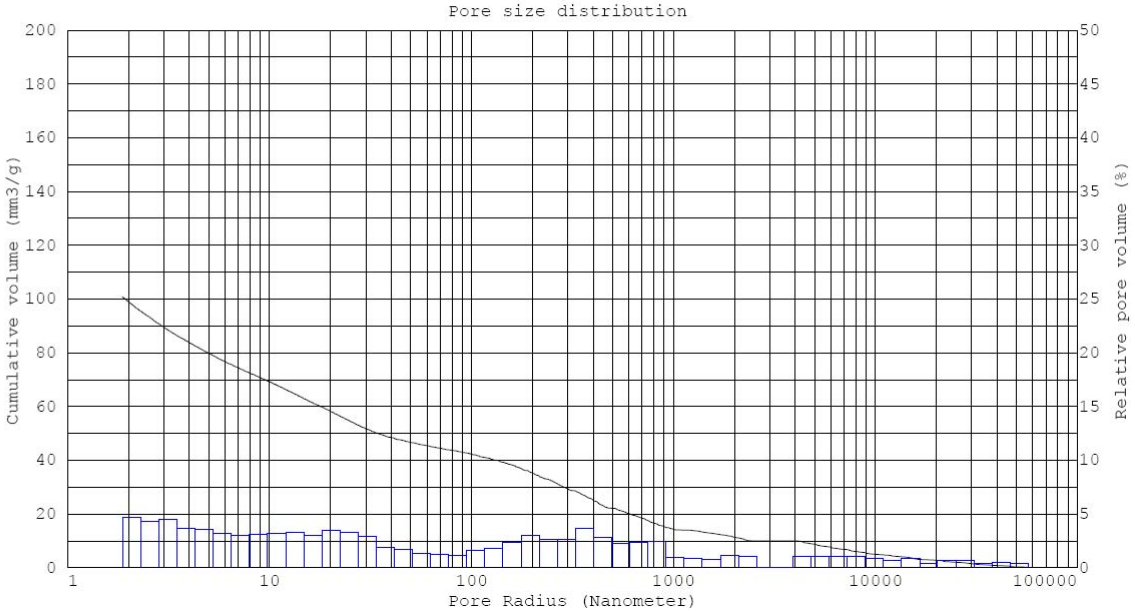


nstrument type : Pascal 440

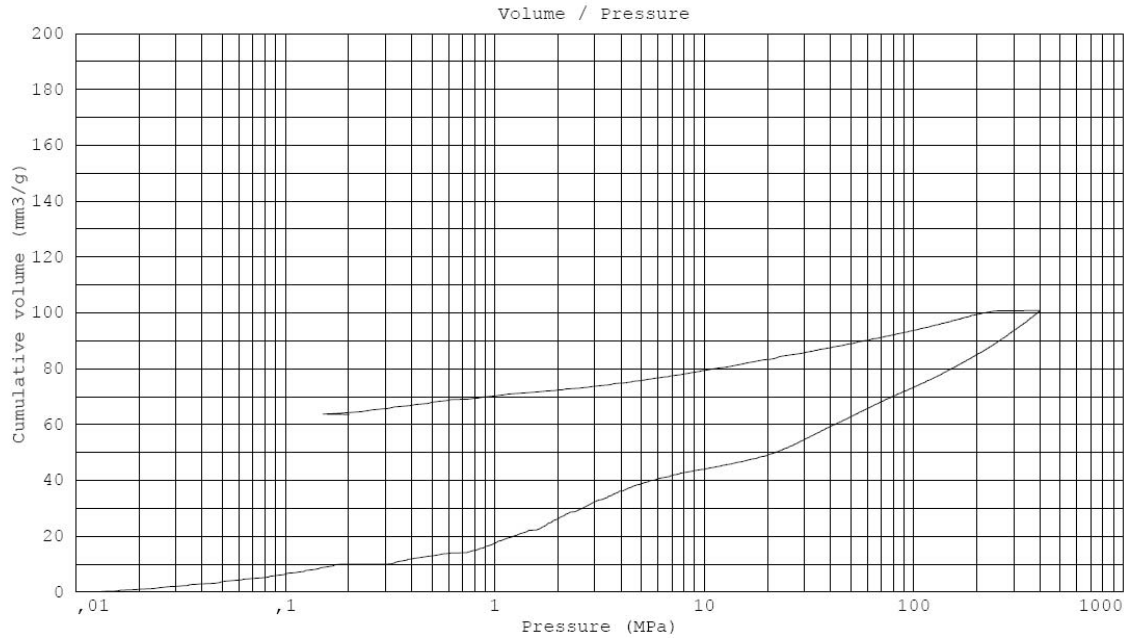


2. Baustelle: 1B_Mitte

ThermoQuest
Instrument type : Pascal 440

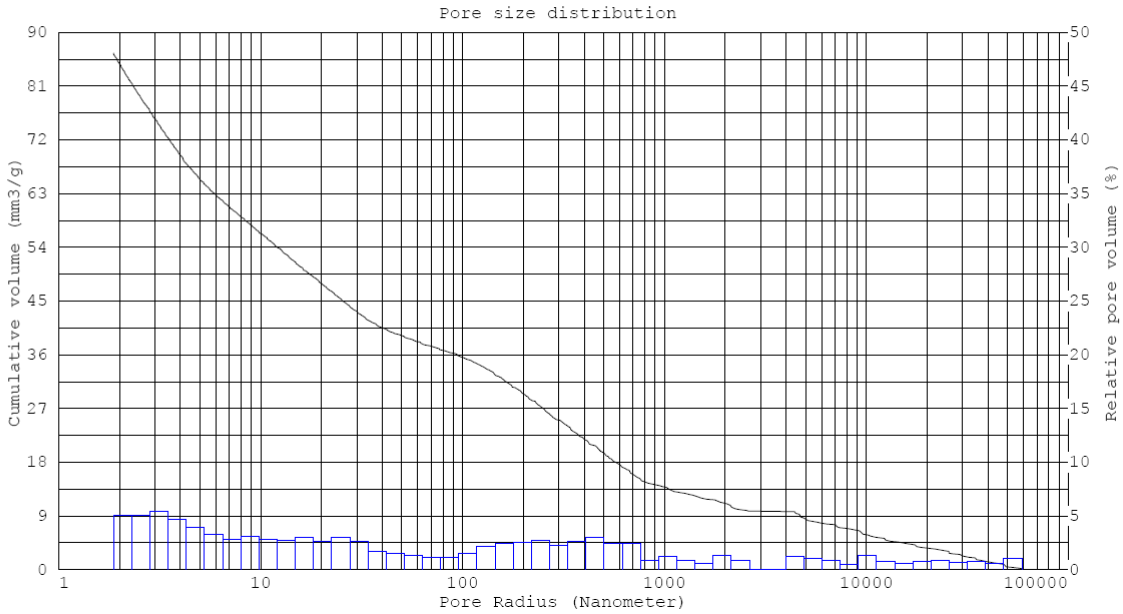


ThermoQuest
Instrument type : Pascal 440

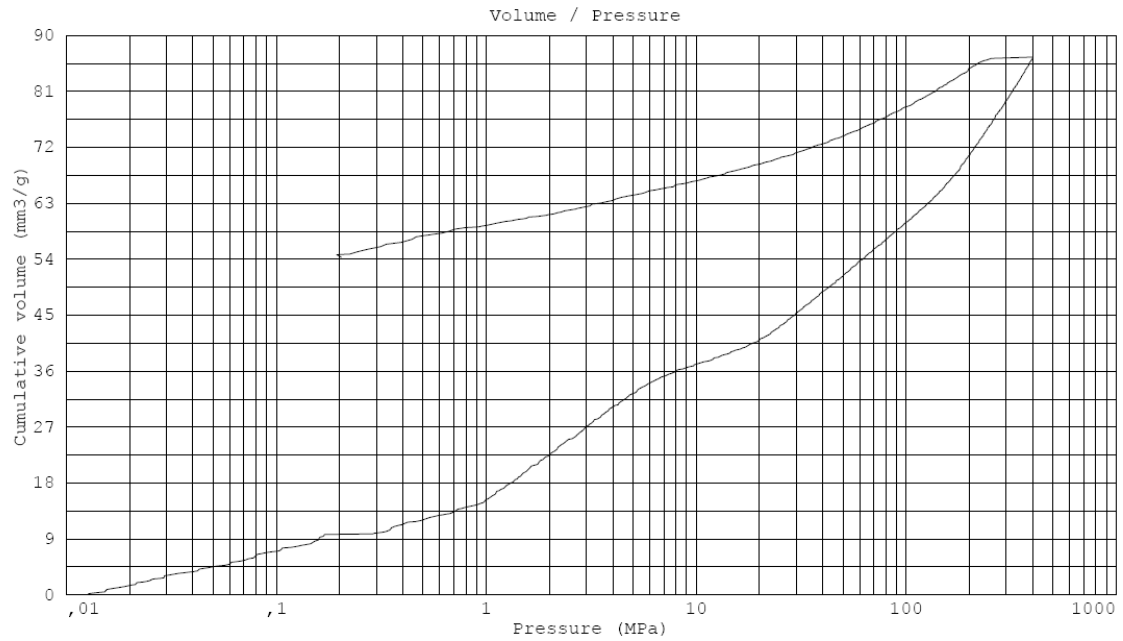


2. Baustelle: 2B_unten

Instrument type : Pascal 440

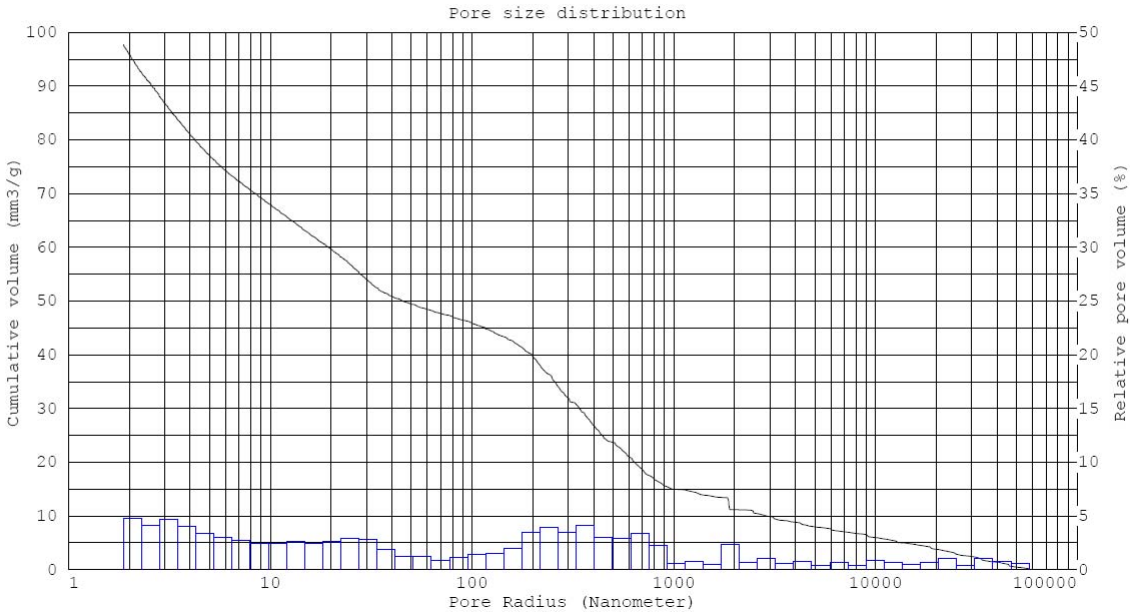


Instrument type : Pascal 440

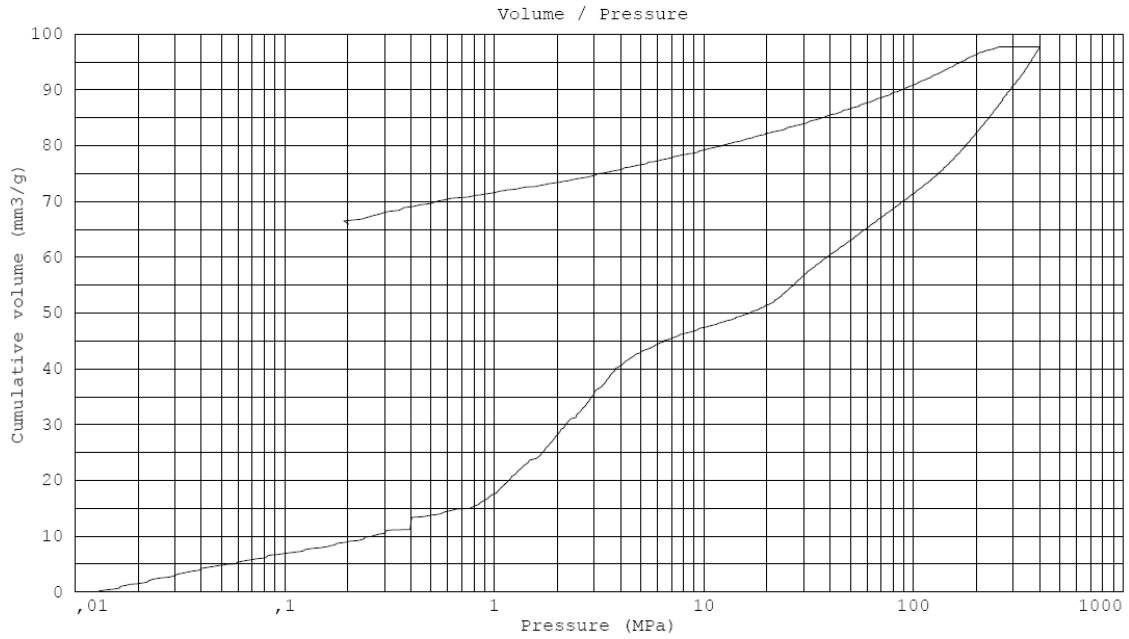


2. Baustelle: 3B_unten

Instrument type : Pascal 440

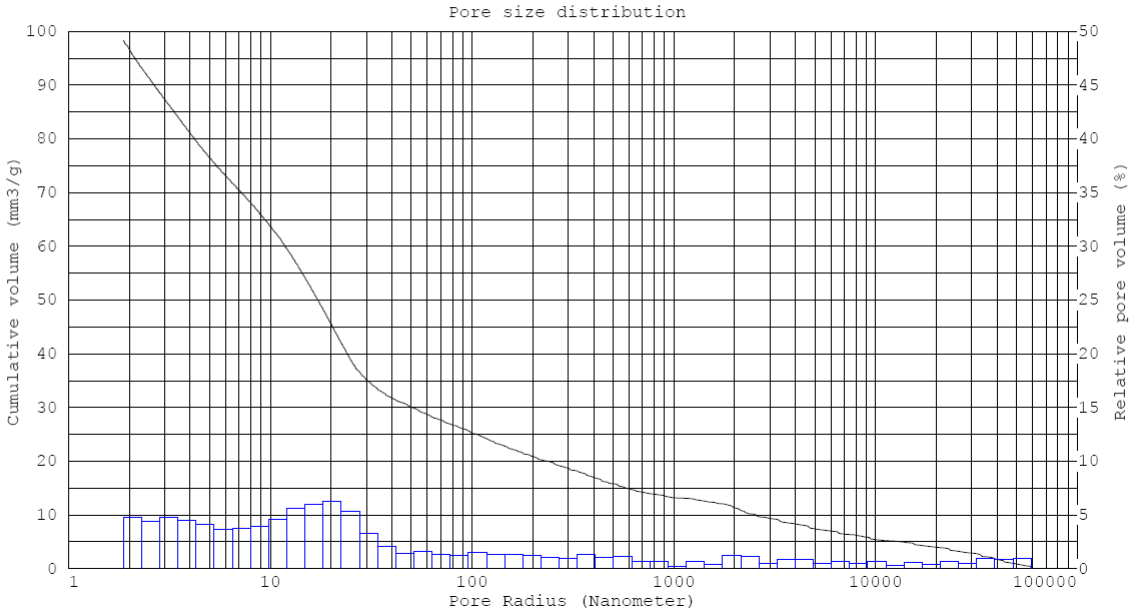


Instrument type : Pascal 440

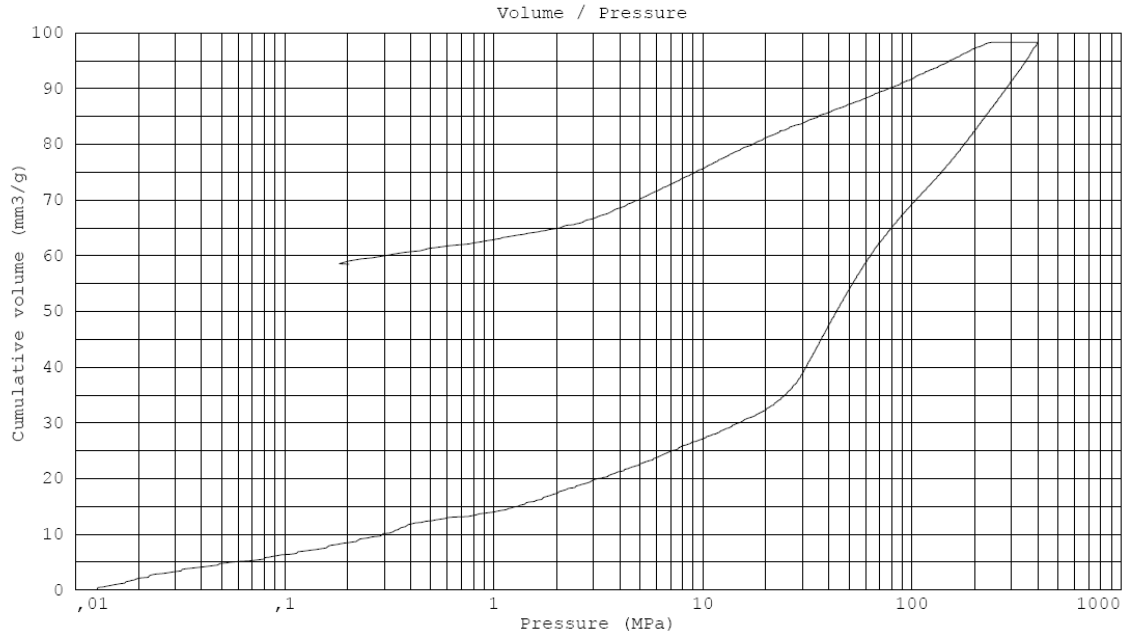


3. Baustelle: 1C_oben

Instrument type : Pascal 440

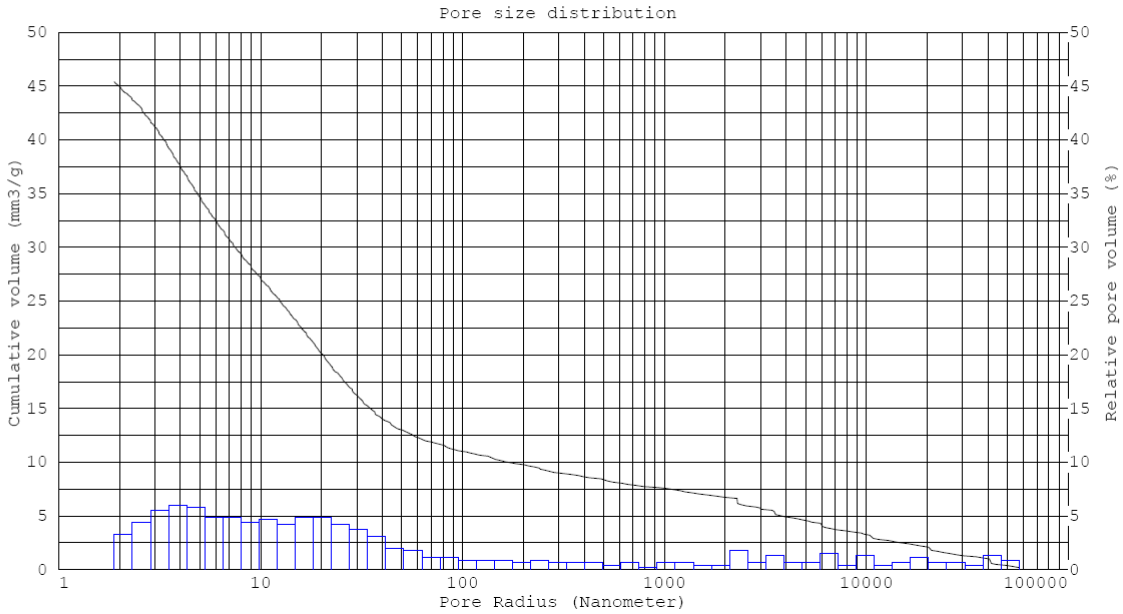


Instrument type : Pascal 440

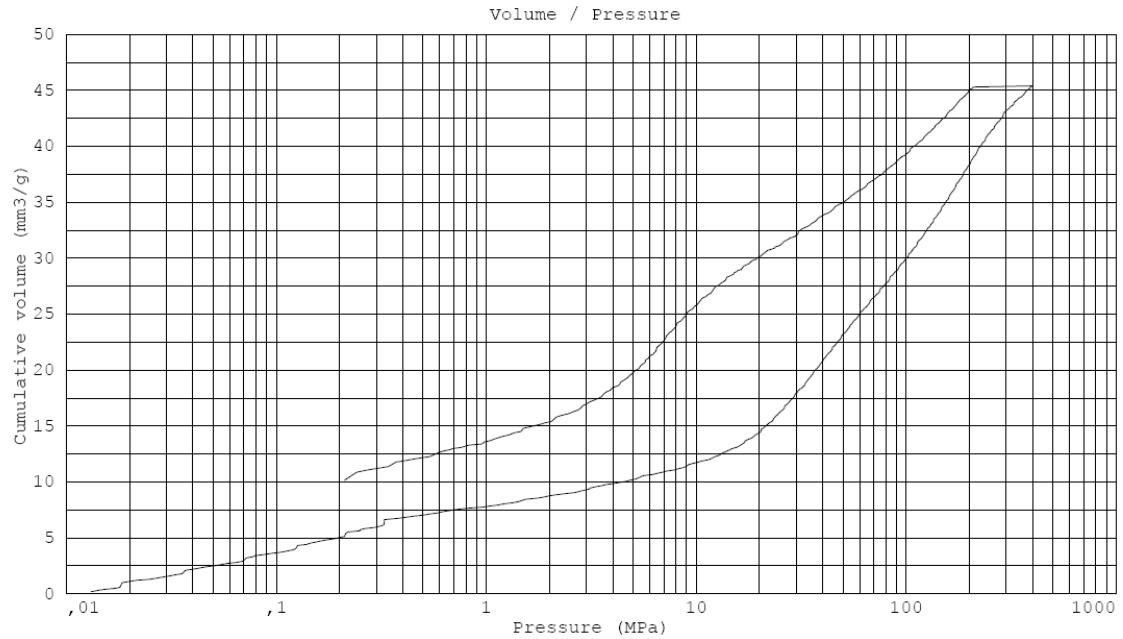


3. Baustelle: 2C_Mitte

Instrument type : Pascal 440

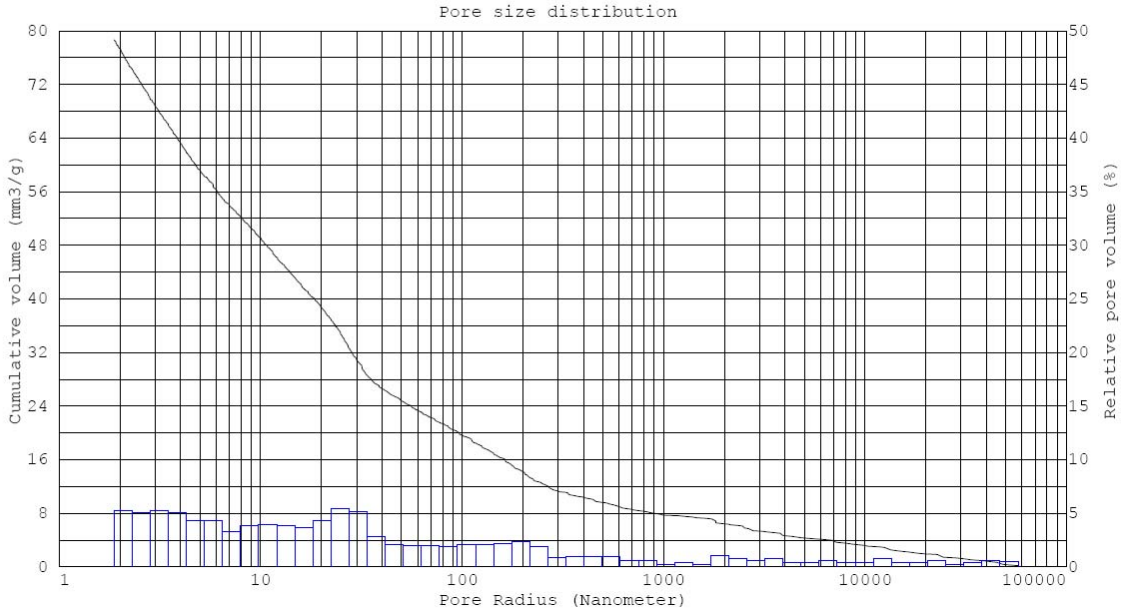


Instrument type : Pascal 440

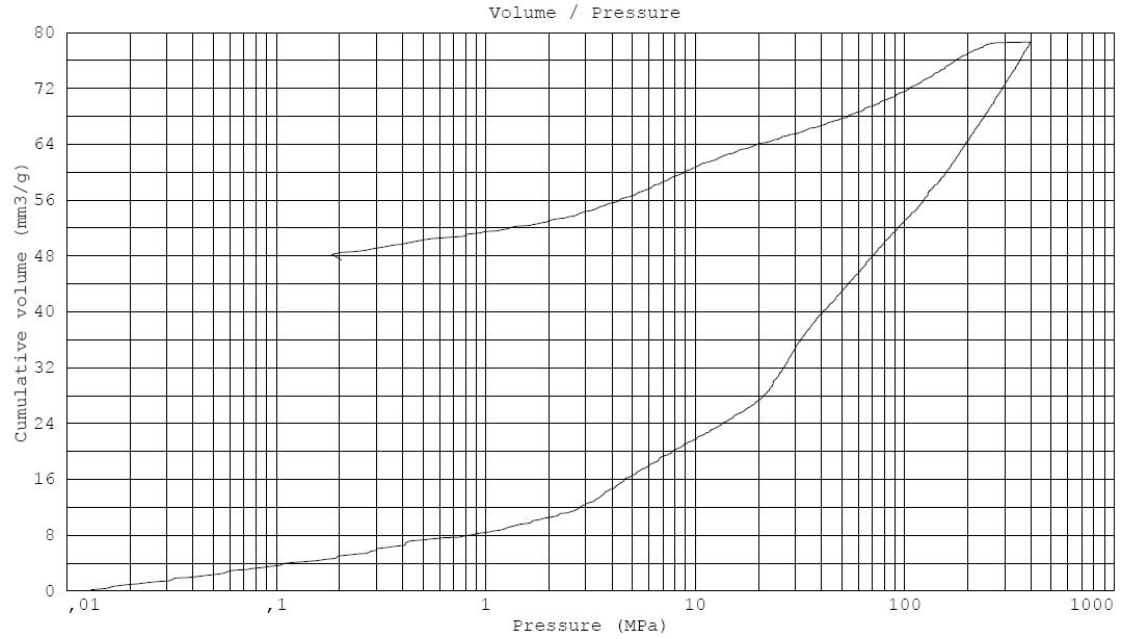


3. Baustelle: 3C_unten

Instrument type : Pascal 440

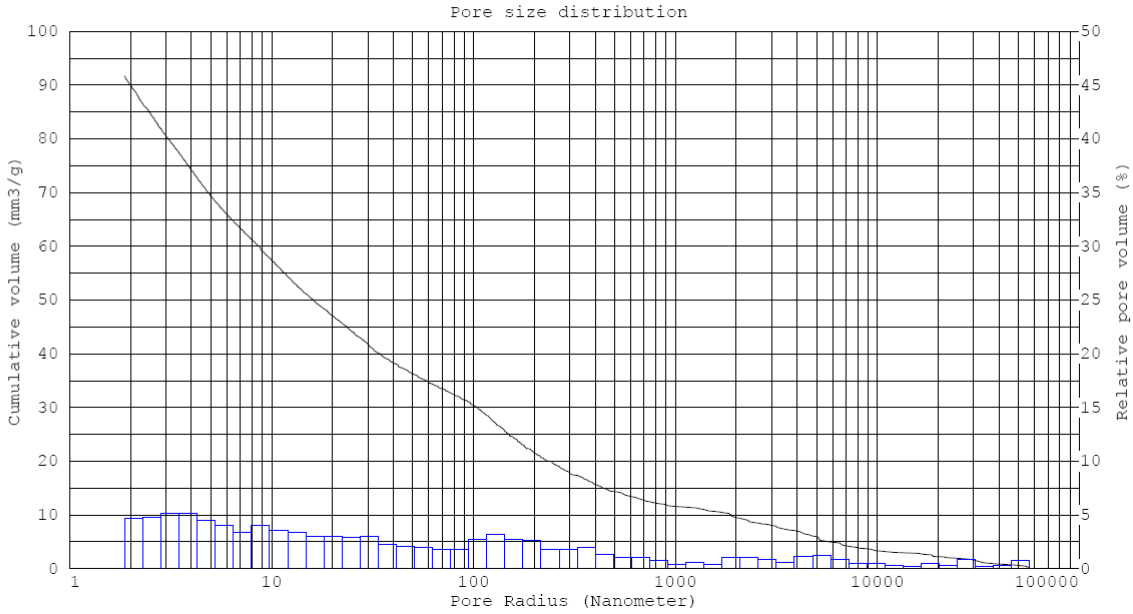


Instrument type : Pascal 440

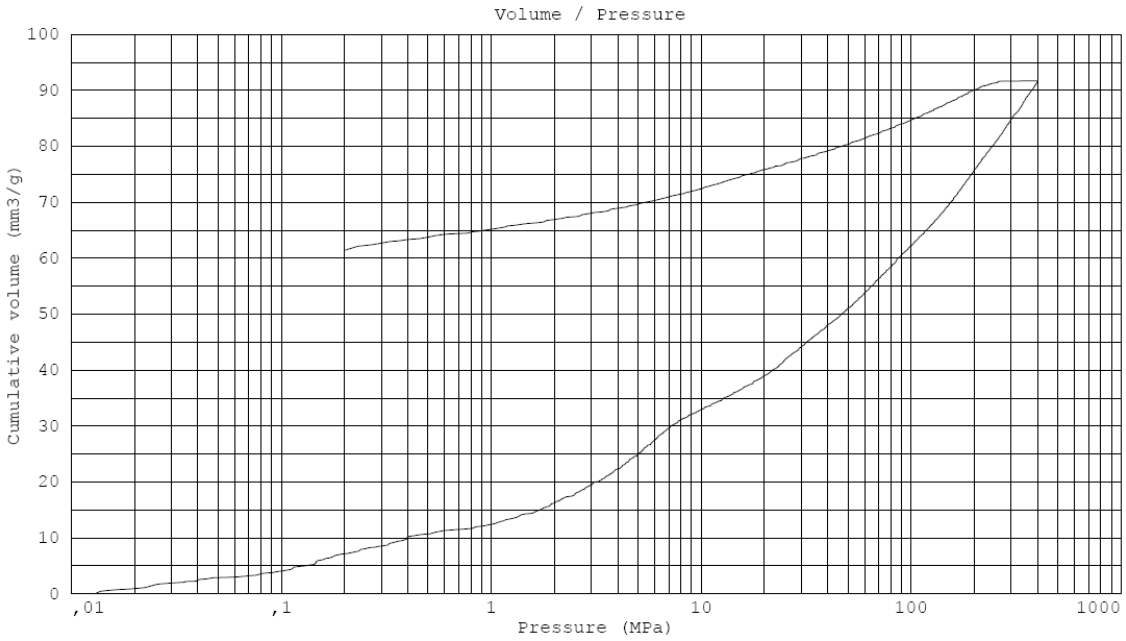


4. Baustelle: 1D_oben

nstrument type : Pascal 440

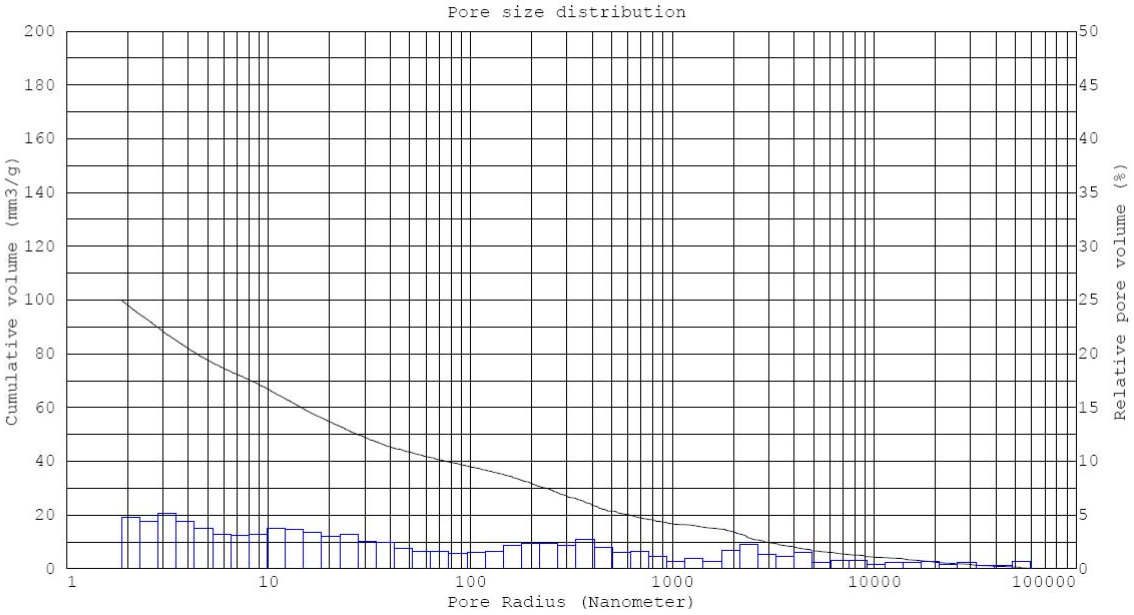


nstrument type : Pascal 440

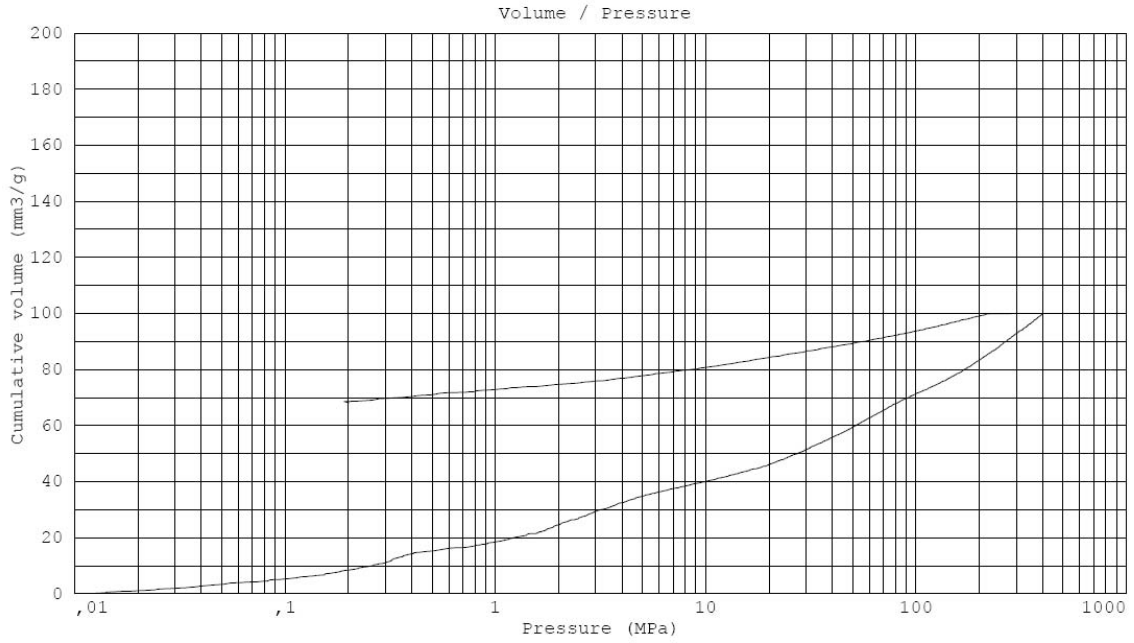


4. Baustelle: 2D_Mitte

Thermo Quest
nstrument type : Pascal 440

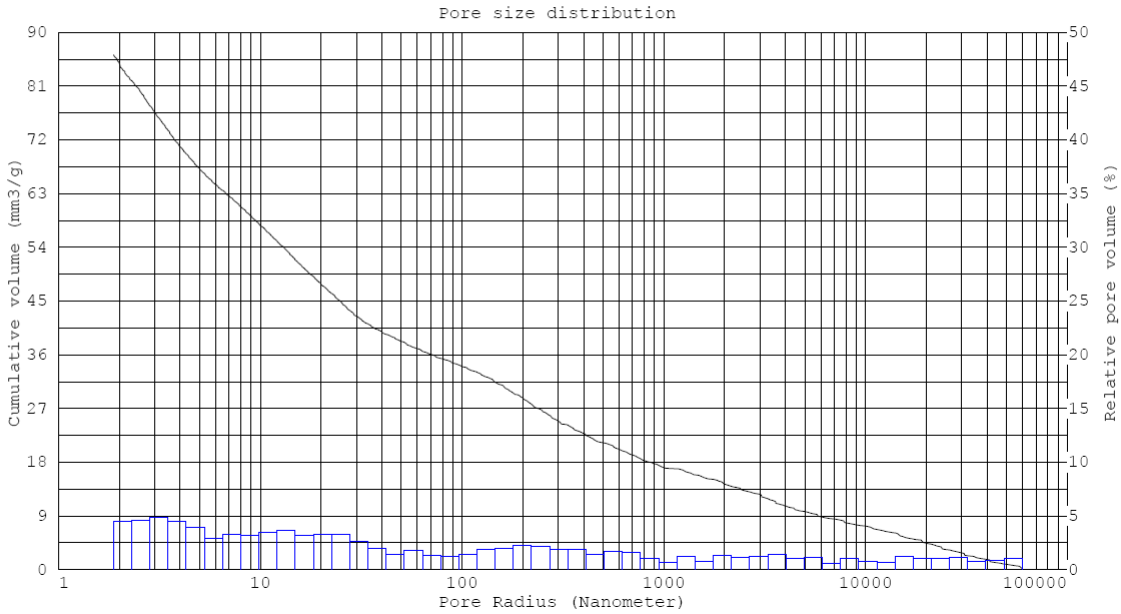


Thermo Quest
nstrument type : Pascal 440

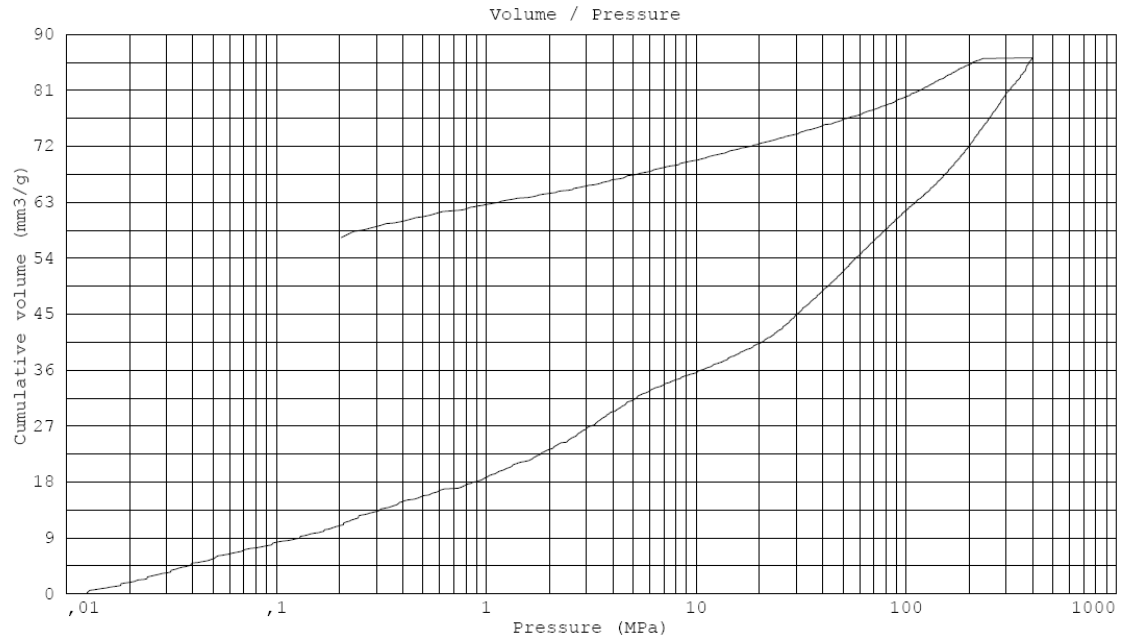


4. Baustelle: 3D_unten

nstrument type : Pascal 440

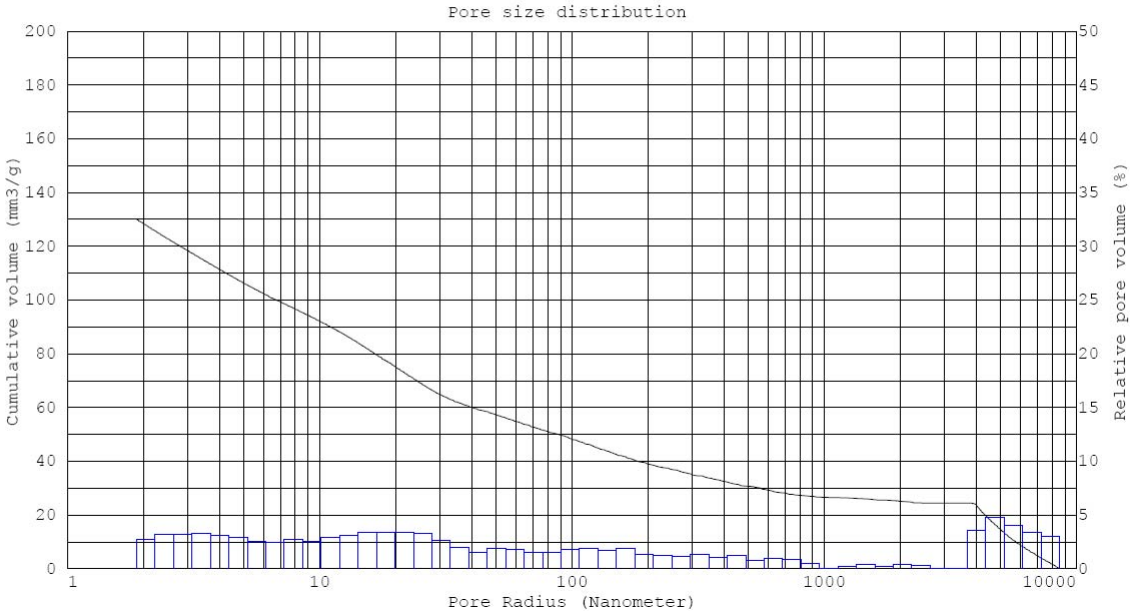


Instrument type : Pascal 440

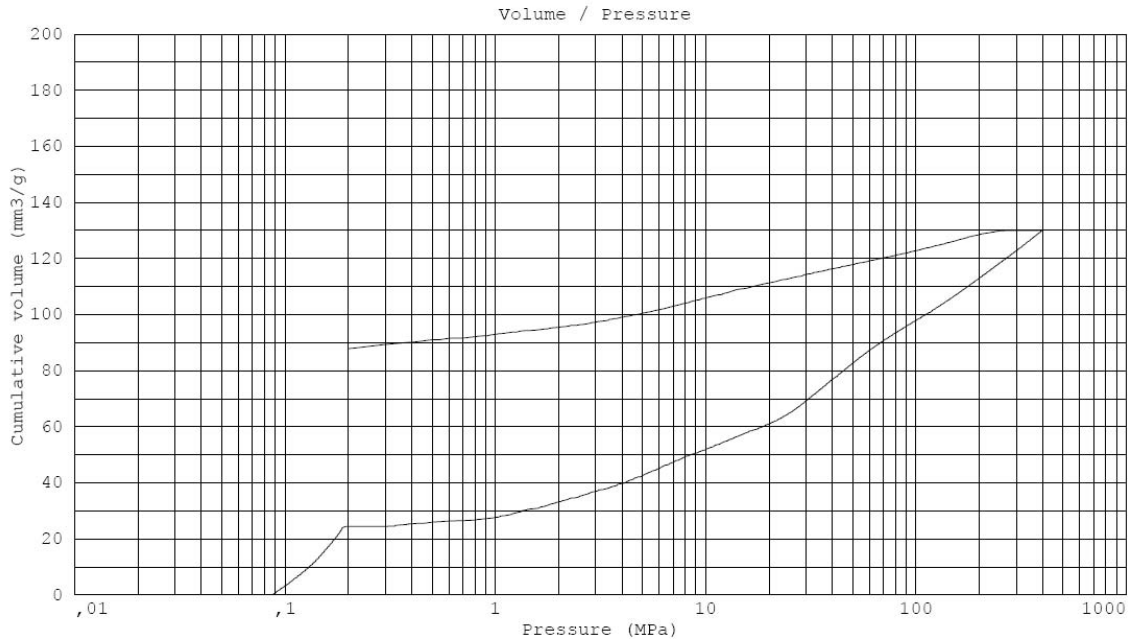


5. Baustelle: 1E_oben

ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

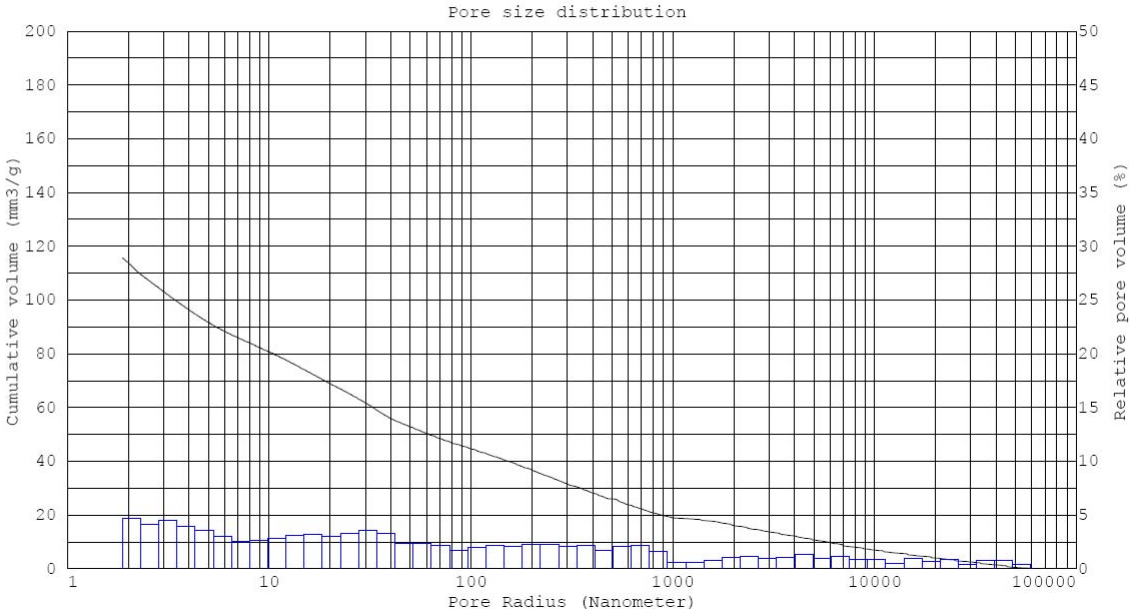


ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

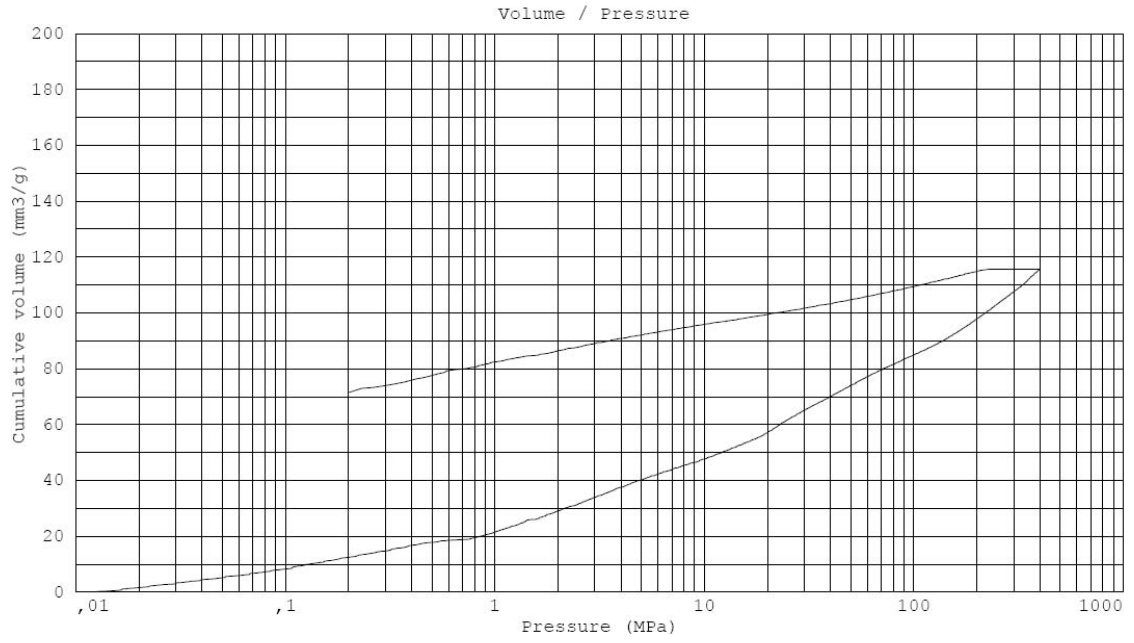


5. Baustelle: 2E_Mitte

nstrument type : Pascal 440

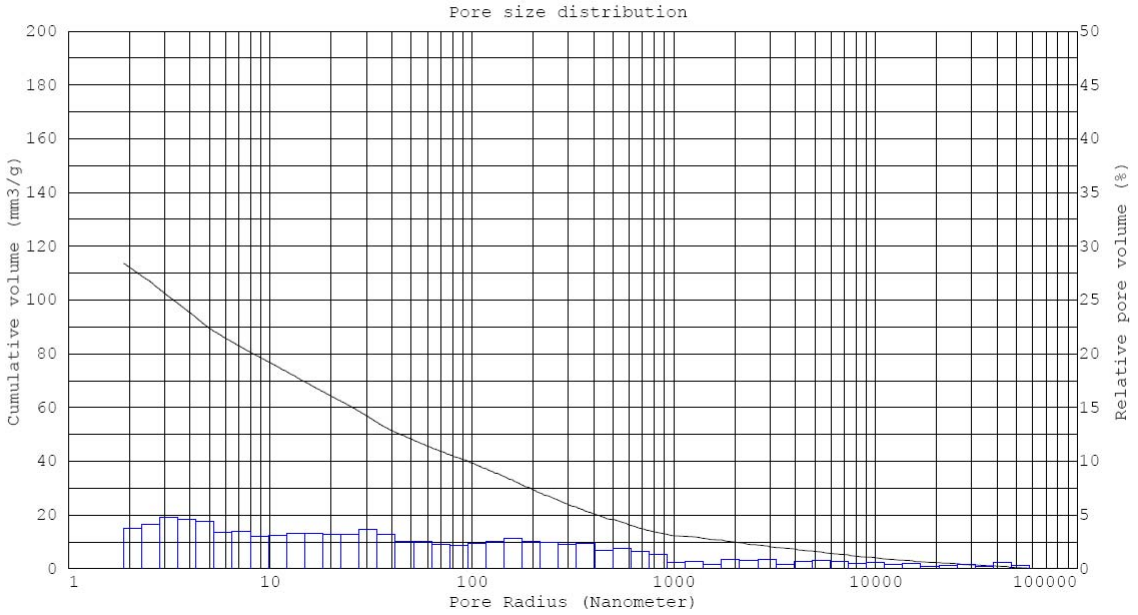


Instrument type : Pascal 440

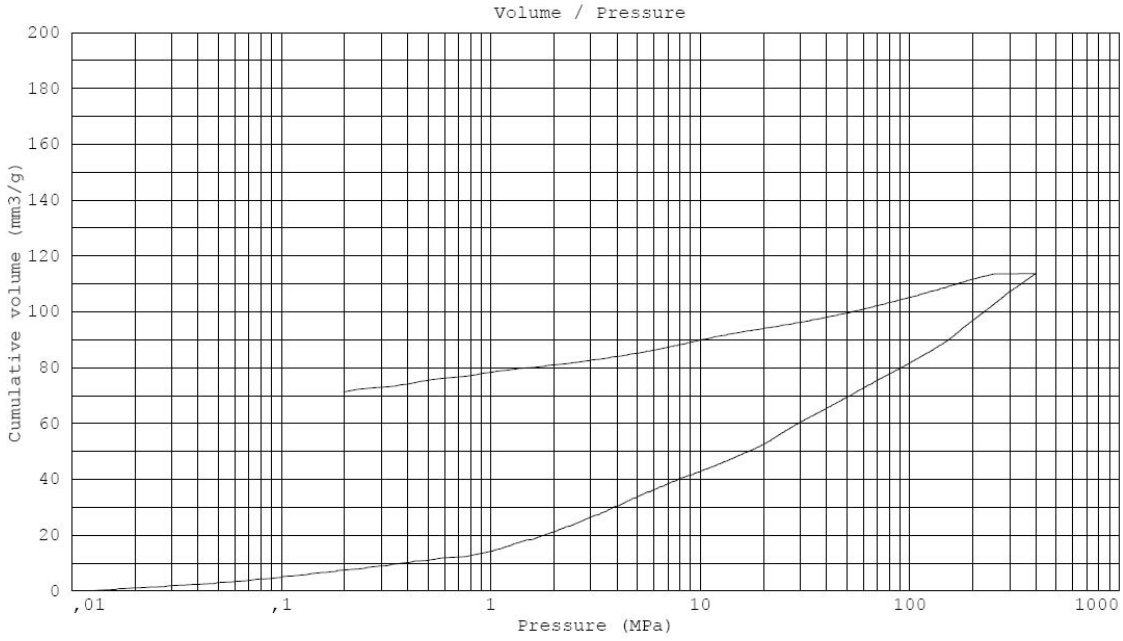


5. Baustelle: 3E_unten

Instrument type : Pascal 440

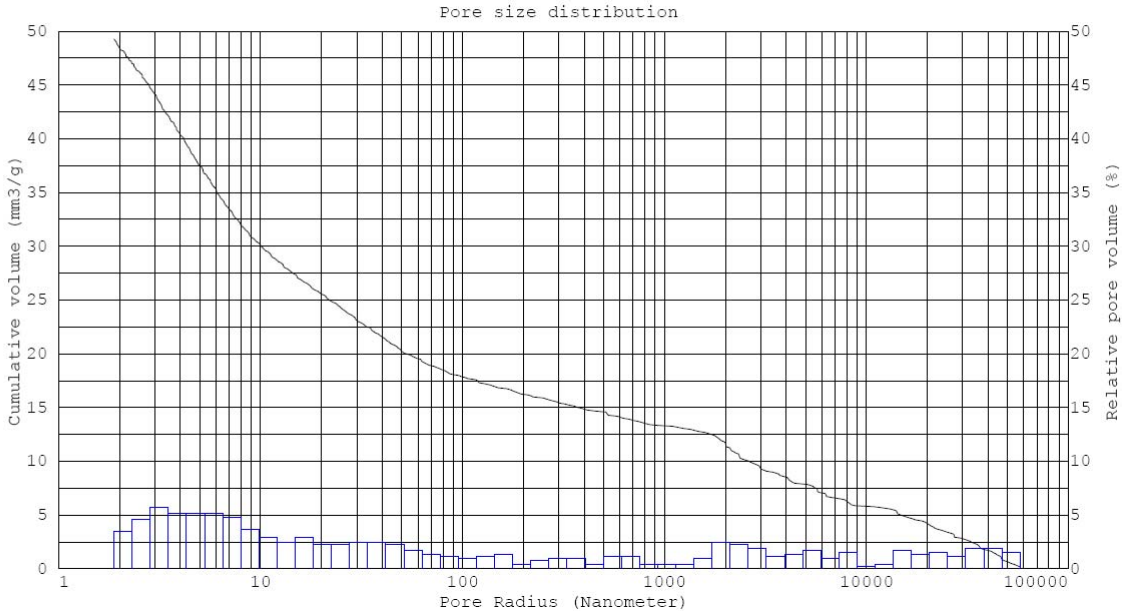


Instrument type : Pascal 440

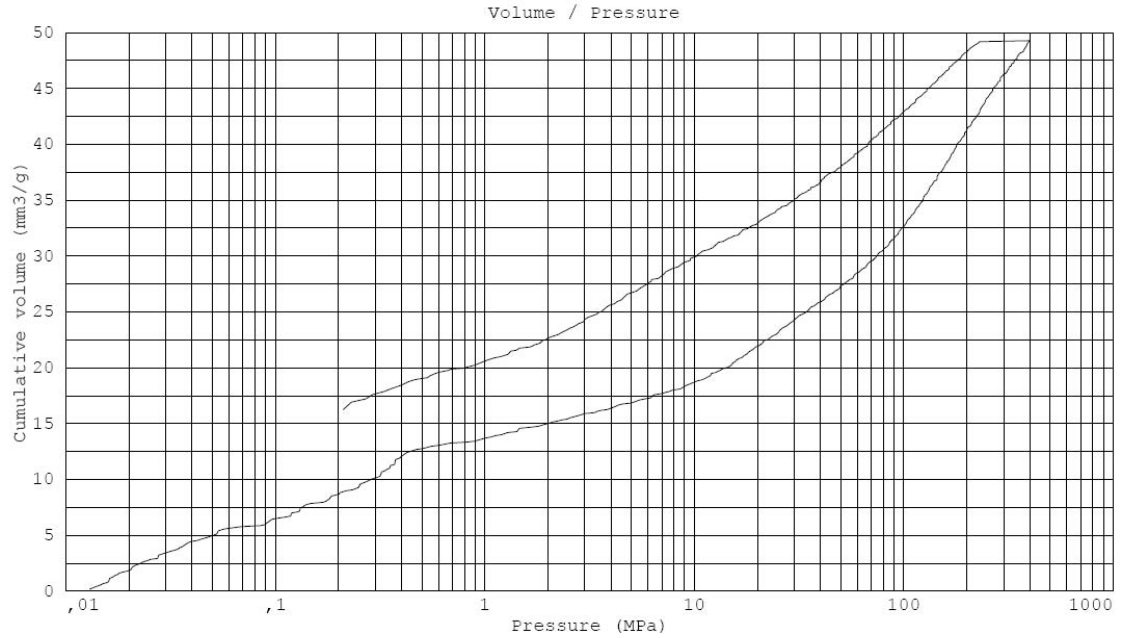


6. Baustelle: 1HHG_oben

ThermoQuest
Instrument type : Pascal 440

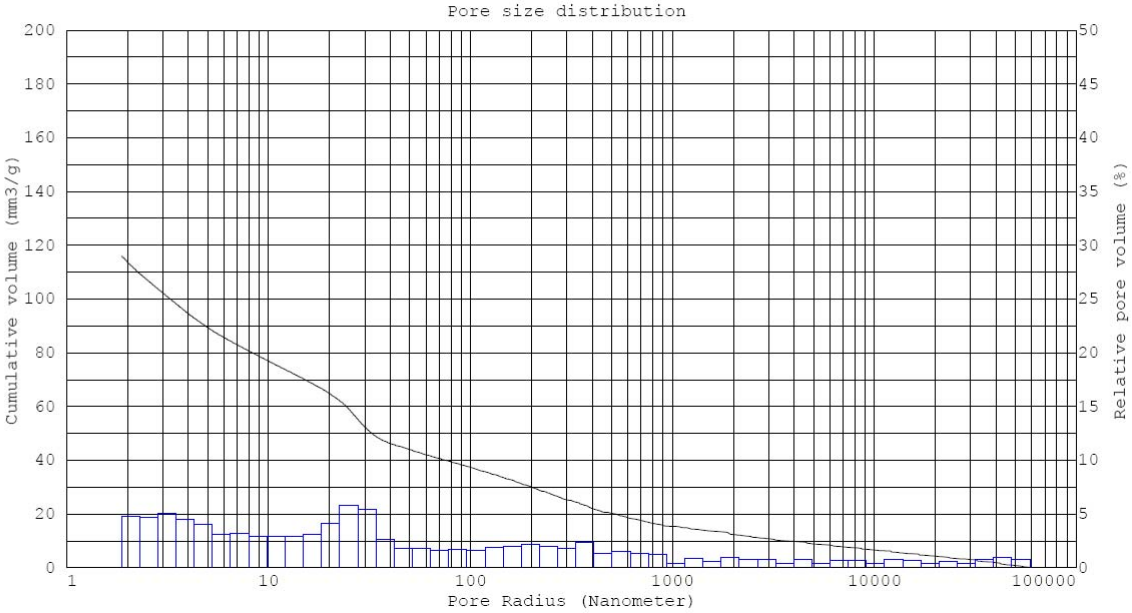


ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

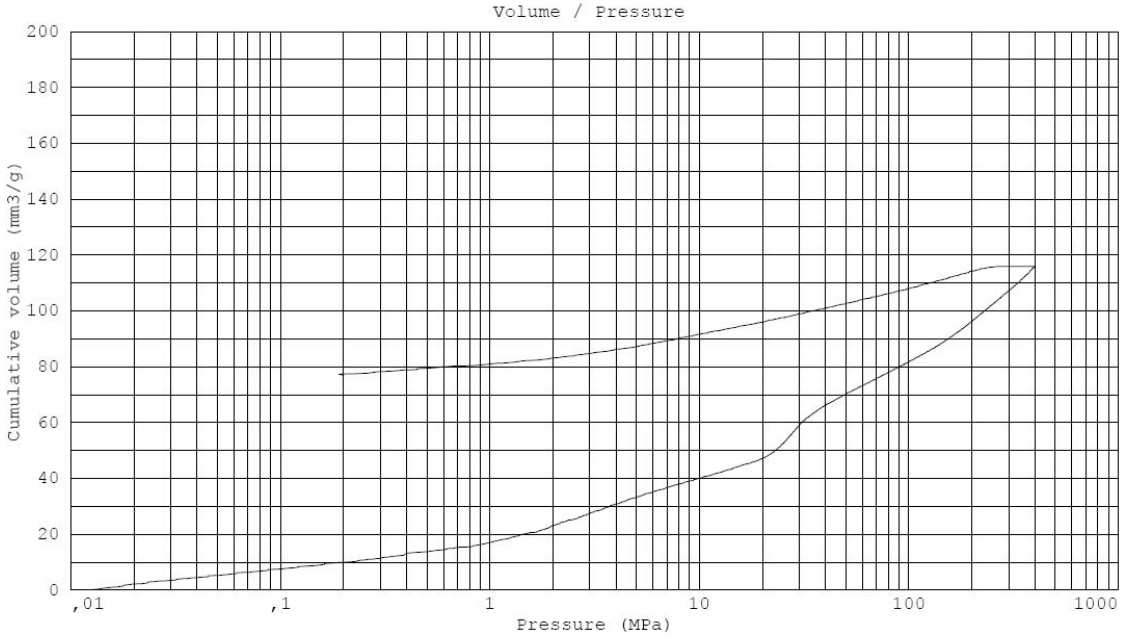


6. Baustelle: 2HHG_Mitte

ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

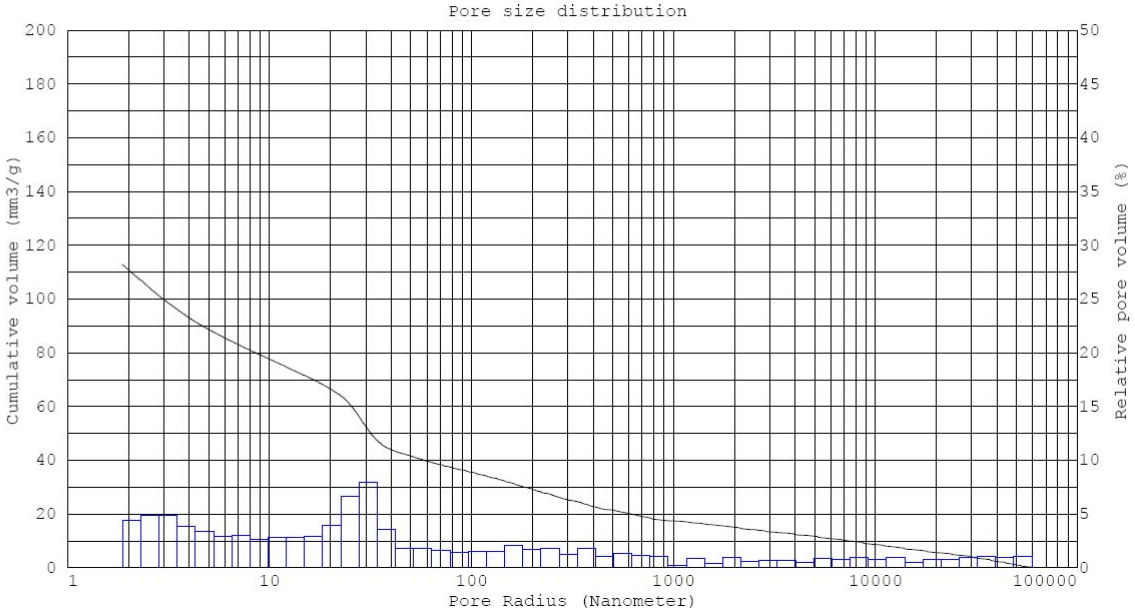


ThermoQuest
Instrument type : Pascal 440

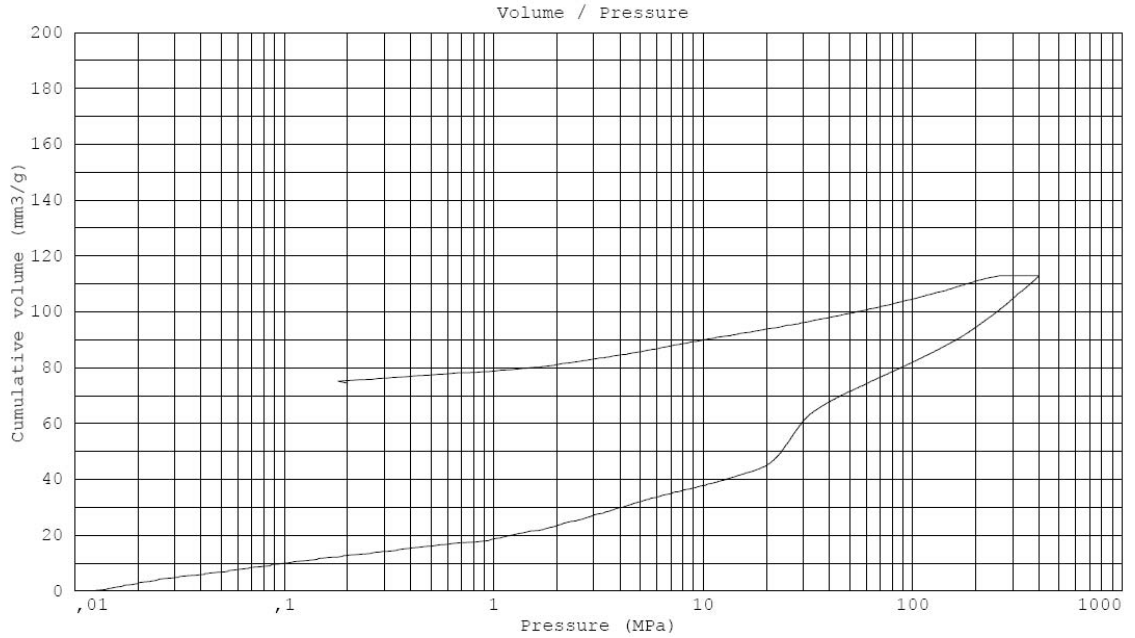


6. Baustelle: 3HHG_unten

ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

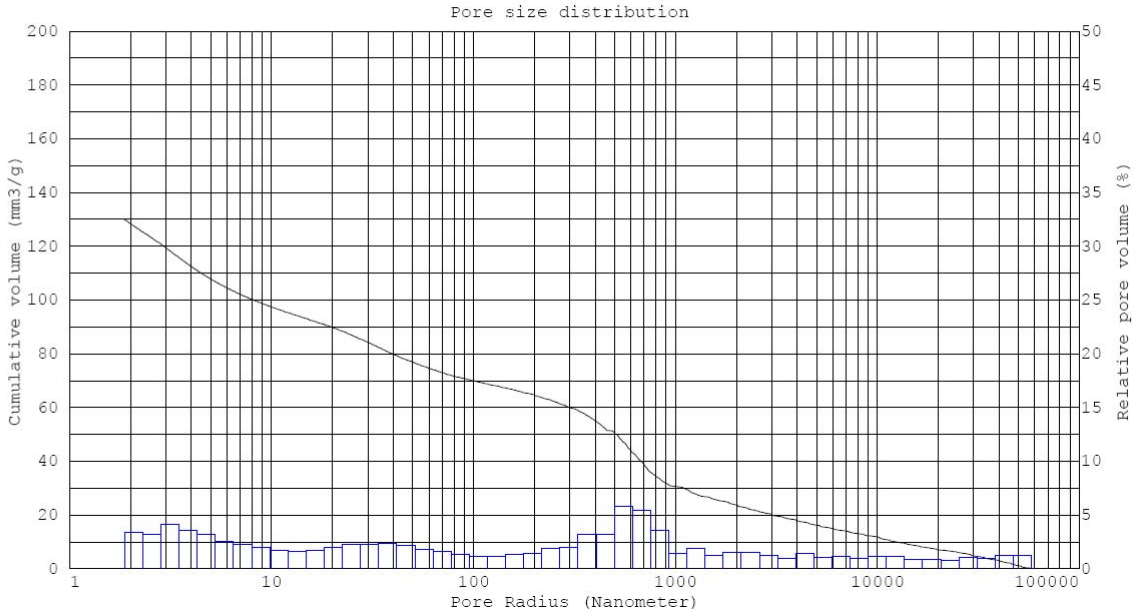


ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

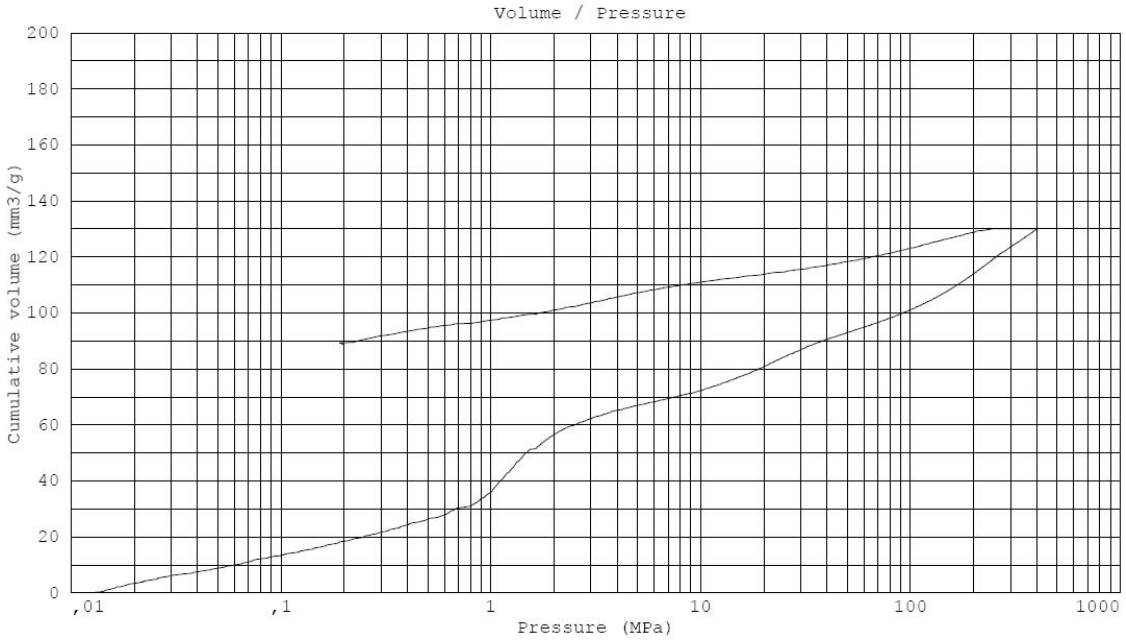


Würfel 1.1:

ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

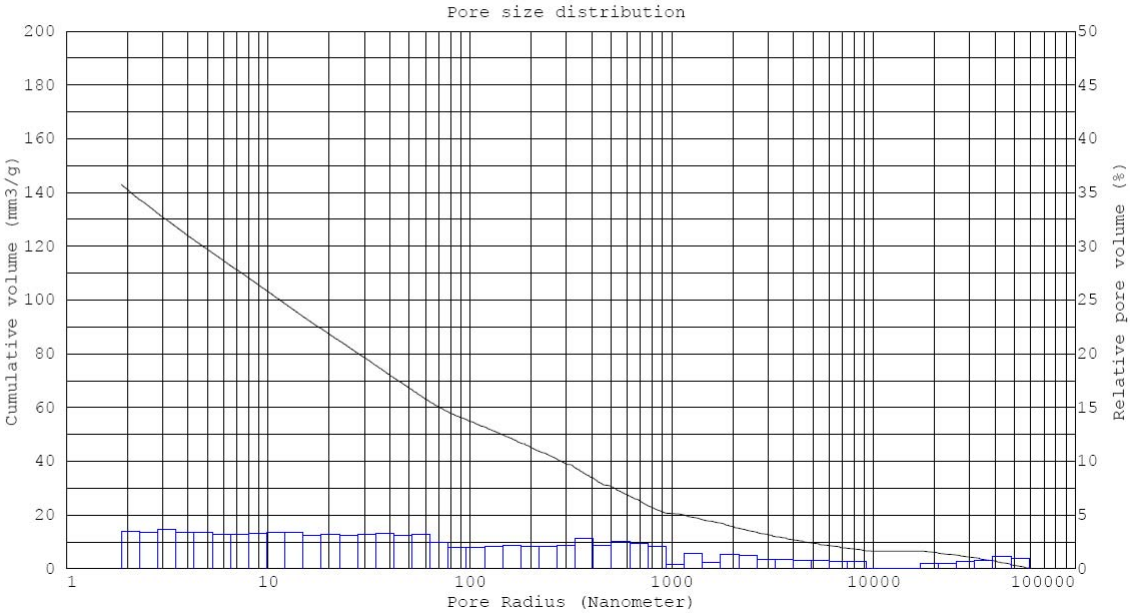


ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

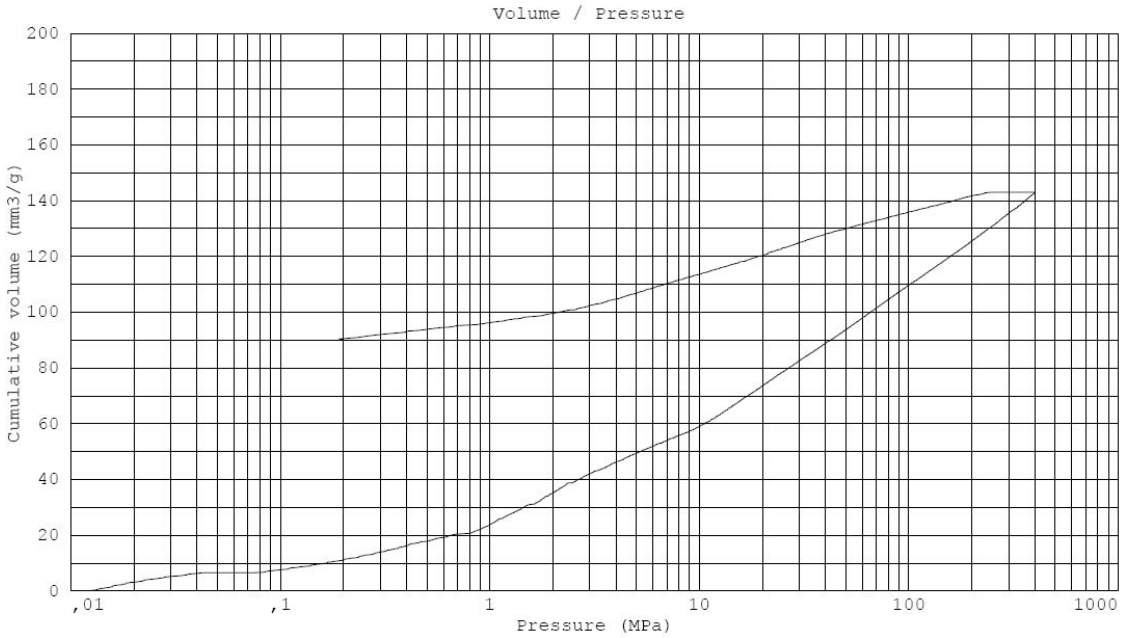


Würfel 1.2:

ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

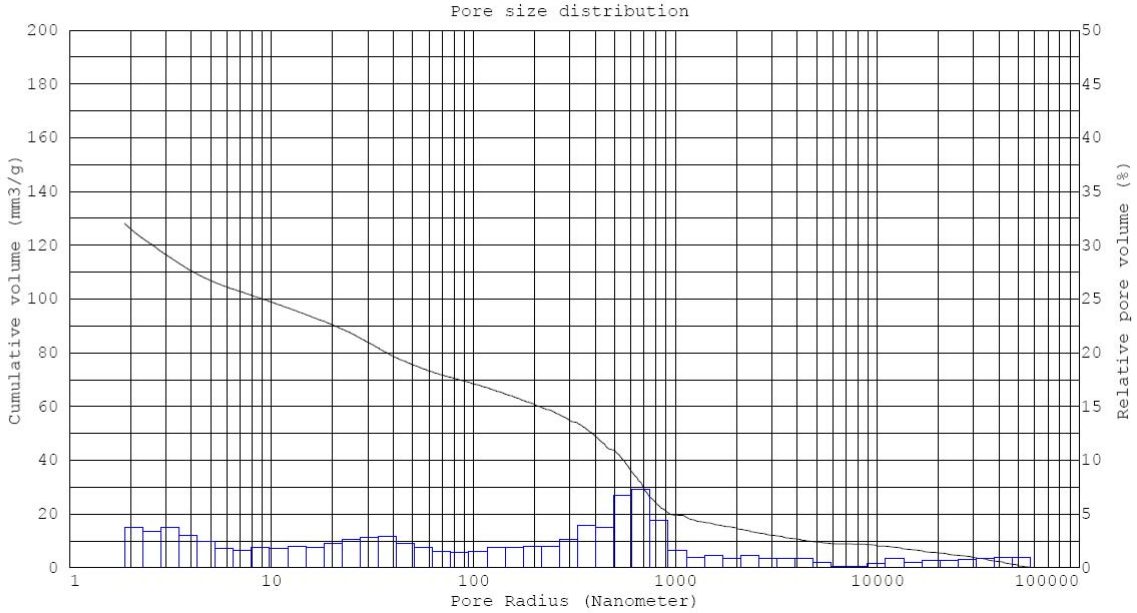


ThermoQuest
Instrument type : Pascal 440

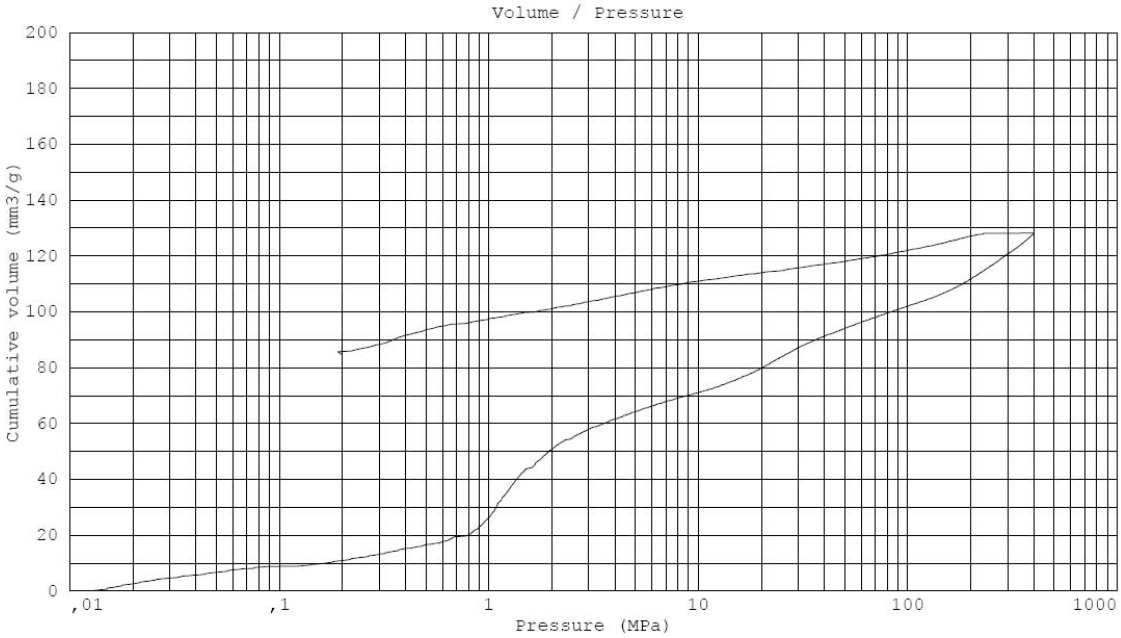


Würfel 2.1:

ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

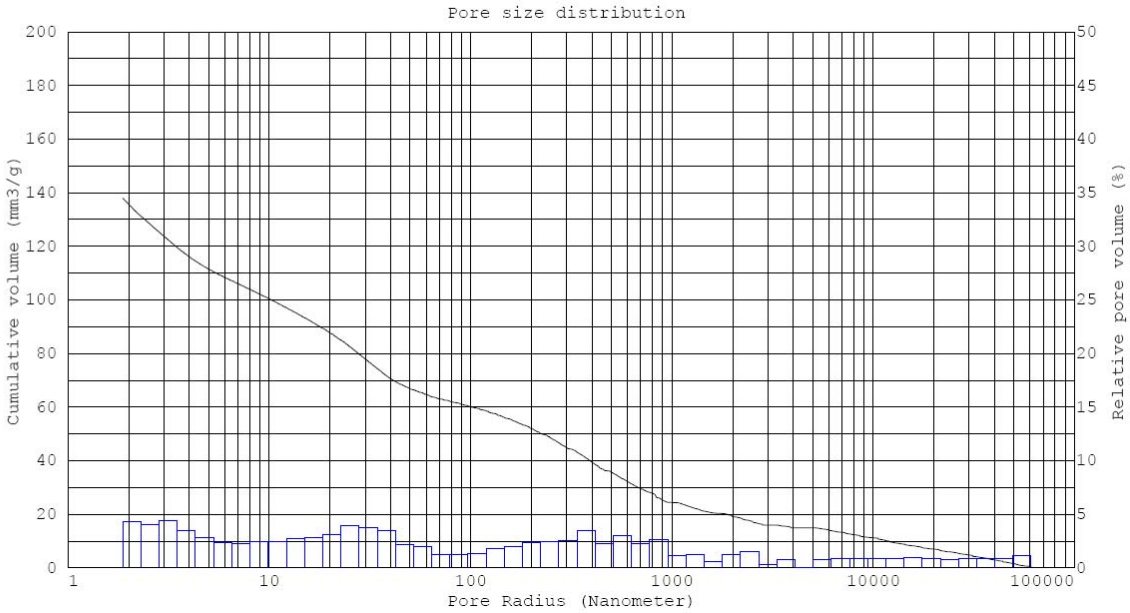


ThermoQuest
nstrument type : Pascal 440

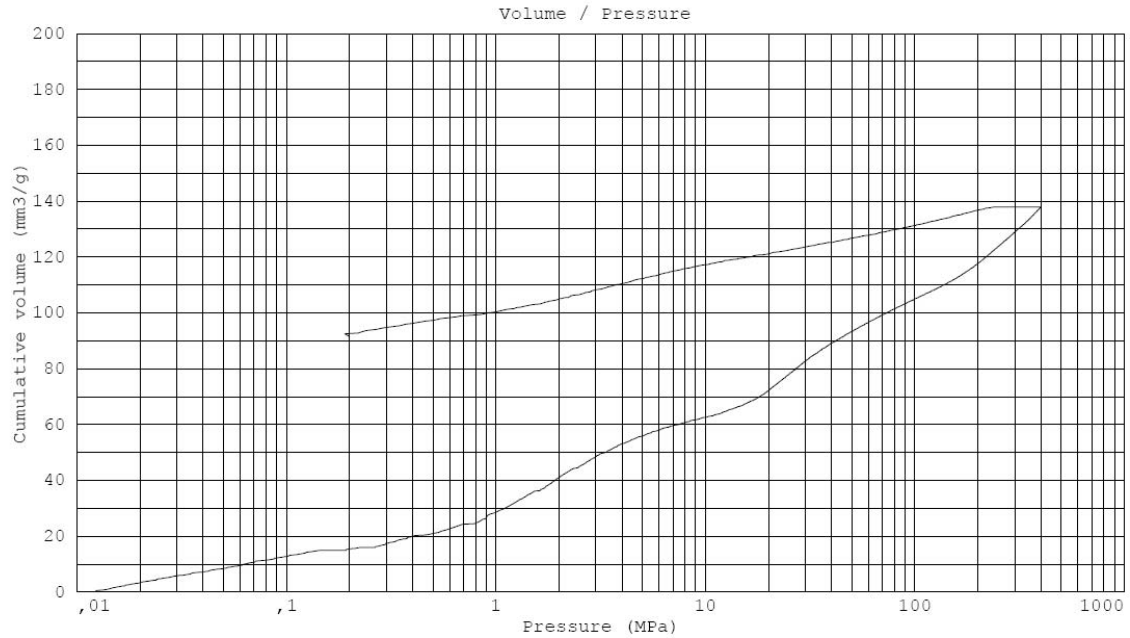


Würfel 2.2:

Instrument type : Pascal 440

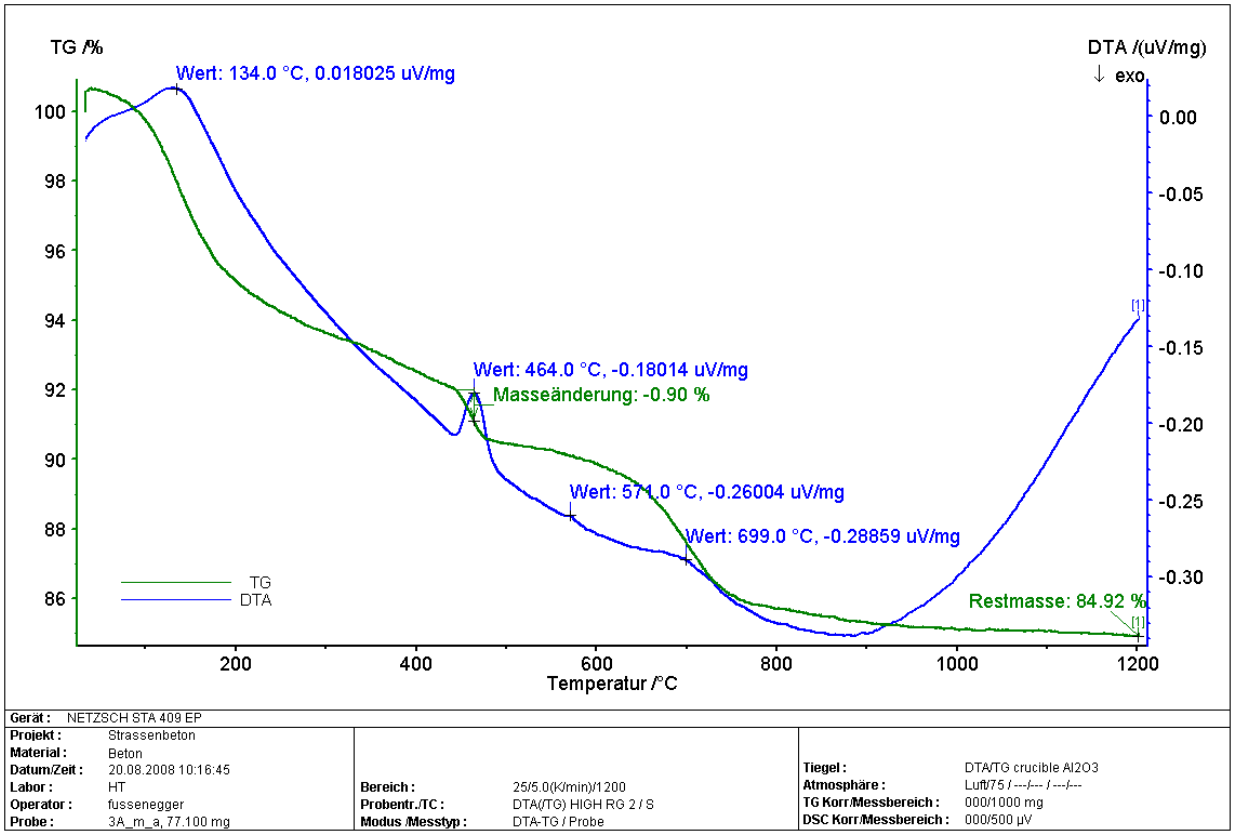


Instrument type : Pascal 440



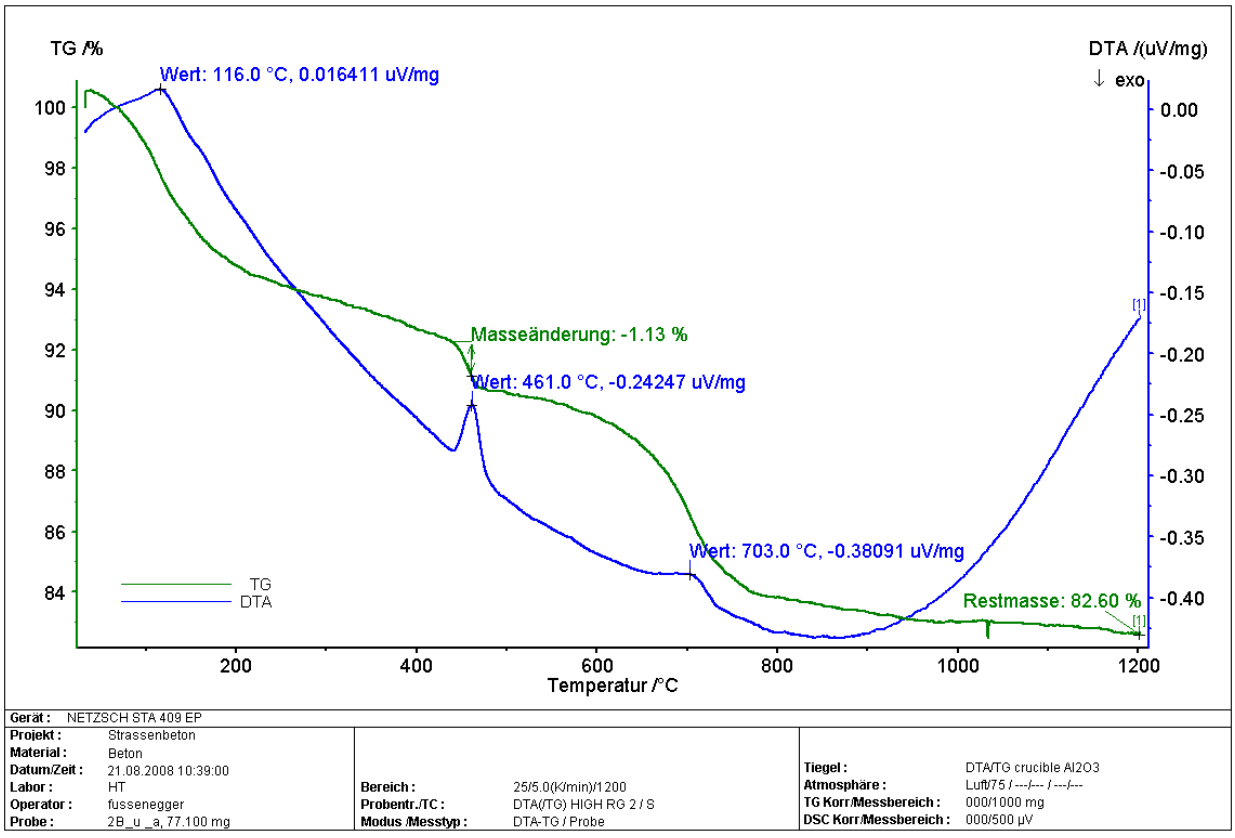
Prüfprotokolle von der DTA und TG:

1. Baustelle: 3A_Mitte



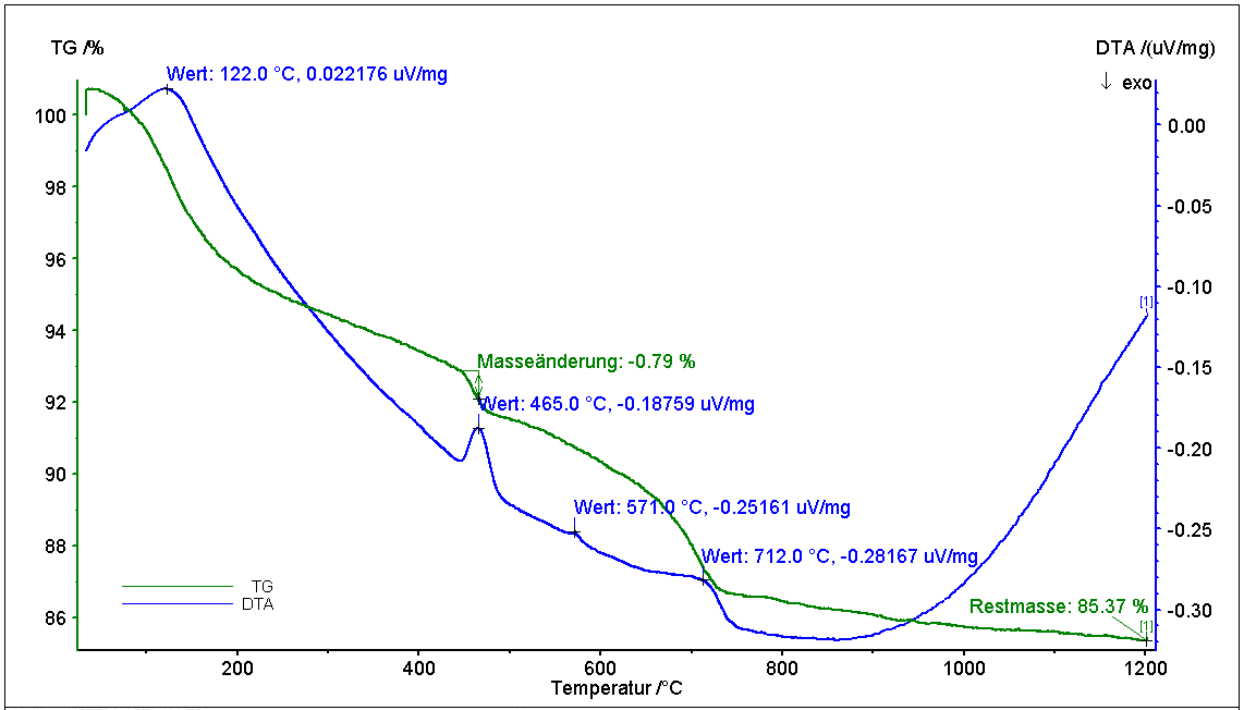
Gerät :	NETZSCH STA 409 EP				
Projekt :	Strassenbeton				
Material :	Beton				
Datum/Zeit :	20.08.2008 10:16:45			**Tiegel :**	DTA/TG crucible Al2O3
Labor :	HT	**Bereich :**	25/5.0(K/min)/1200	**Atmosphäre :**	Luft/75 / ---/--- / ---/---
Operator :	fussenegger	**Probentr./TC :**	DTA(/TG) HIGH RG 2 / S	**TG Korr/Messbereich :**	000/1000 mg
Probe :	3A_m_a, 77.100 mg	**Modus /Messtyp :**	DTA-TG / Probe	**DSC Korr/Messbereich :**	000/500 µV

2. Baustelle: 2B_unten



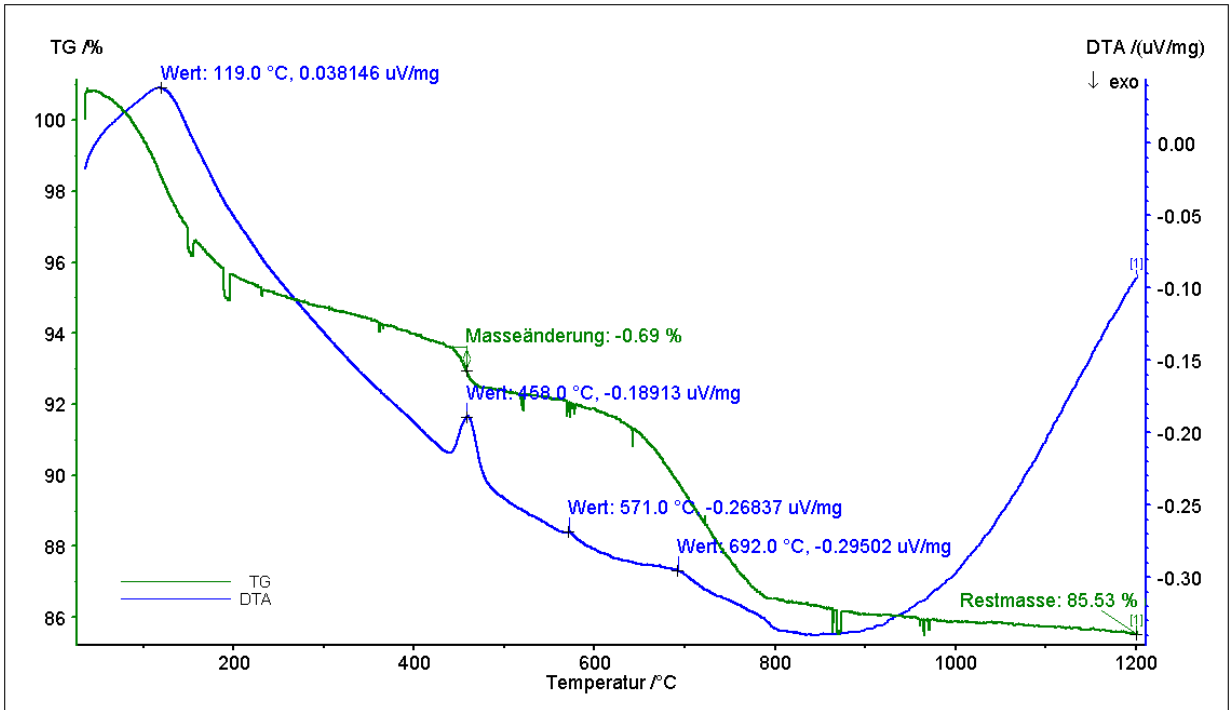
Gerät :	NETZSCH STA 409 EP				
Projekt :	Strassenbeton				
Material :	Beton				
Datum/Zeit :	21.08.2008 10:39:00			**Tiegel :**	DTA/TG crucible Al2O3
Labor :	HT	**Bereich :**	25/5.0(K/min)/1200	**Atmosphäre :**	Luft/75 / ---/--- / ---/---
Operator :	fussenegger	**Probentr./TC :**	DTA(/TG) HIGH RG 2 / S	**TG Korr/Messbereich :**	000/1000 mg
Probe :	2B_u _a, 77.100 mg	**Modus /Messtyp :**	DTA-TG / Probe	**DSC Korr/Messbereich :**	000/500 µV

3. Baustelle: 2C_Mitte



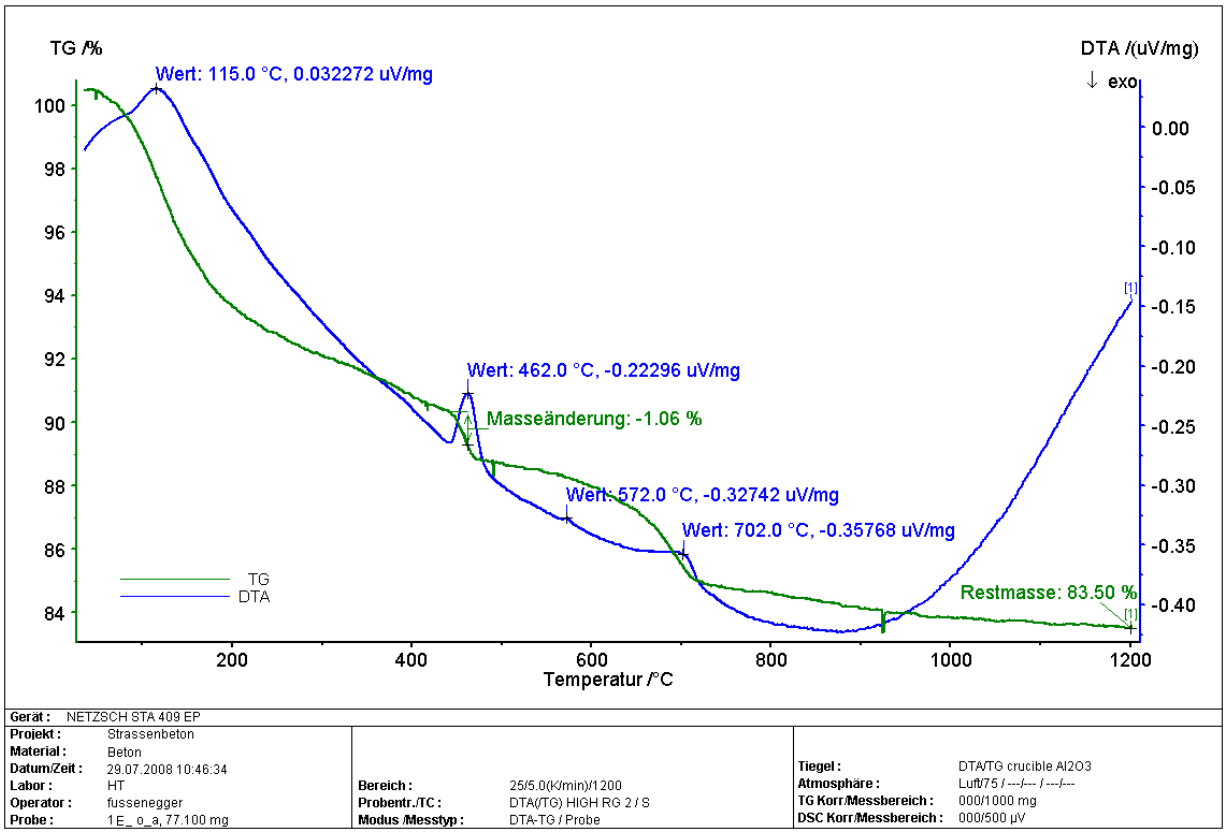
Gerät :	NETZSCH STA 409 EP				
Projekt :	Strassenbeton				
Material :	Beton				
Datum/Zeit :	22.08.2008 09:47:17			**Tiegel :**	DTA/TG crucible Al2O3
Labor :	HT	**Bereich :**	25/5.0(K/min)/1200	**Atmosphäre :**	Luft/75 / ---/--- / ---/---
Operator :	fussenegger	**Probentr./TC :**	DTA(/TG) HIGH RG 2 / S	**TG Korr/Messbereich :**	000/1000 mg
Probe :	2C_m_a, 77.100 mg	**Modus /Messtyp :**	DTA-TG / Probe	**DSC Korr/Messbereich :**	000/500 µV

4. Baustelle: 1D_oben



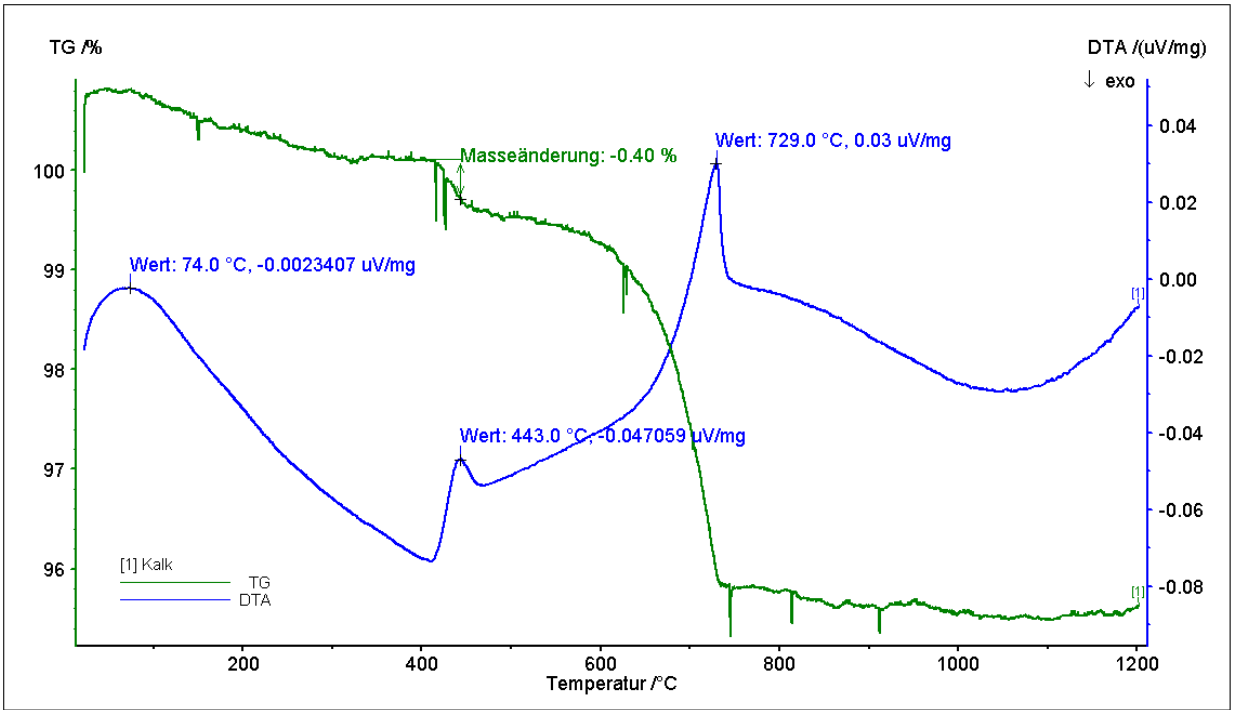
Gerät :	NETZSCH STA 409 EP				
Projekt :	Strassenbeton				
Material :	Beton				
Datum/Zeit :	05.08.2008 10:13:17			**Tiegel :**	DTA/TG crucible Al2O3
Labor :	HT	**Bereich :**	25/5.0(K/min)/1200	**Atmosphäre :**	Luft/75 / ---/--- / ---/---
Operator :	fussenegger	**Probentr./TC :**	DTA(/TG) HIGH RG 2 / S	**TG Korr/Messbereich :**	000/1000 mg
Probe :	1D_o_a, 77.100 mg	**Modus /Messtyp :**	DTA-TG / Probe	**DSC Korr/Messbereich :**	000/500 µV

5.Baustelle: 1E_oben



Gerät :	NETZSCH STA 409 EP				
Projekt :	Strassenbeton				
Material :	Beton				
Datum/Zeit :	29.07.2008 10:46:34			**Tiegel :**	DTA/TG crucible Al2O3
Labor :	HT	**Bereich :**	25/5.0(K/min)/1200	**Atmosphäre :**	Luft/75 / ---/--- / ---/---
Operator :	fussenegger	**Probentr./TC :**	DTA(/TG) HIGH RG 2 / S	**TG Korr/Messbereich :**	000/1000 mg
Probe :	1E_ o_a, 77.100 mg	**Modus /Messtyp :**	DTA-TG / Probe	**DSC Korr/Messbereich :**	000/500 µV

Kalk:



Gerät :	NETZSCH STA 409 EP				
Versuchs-ID :	Kalk_a	**Material :**	Kalk	**Segmente :**	1/1
Datum/Zeit :	22.09.2008 11:22:49	**Tempkal./Empf. Datei :**	Tcalzero.tcx / Senszero.exx	**Tiegel :**	DTA/TG crucible Al2O3
Labor :	HT	**Bereich :**	25/5.0(K/min)/1200	**Atmosphäre :**	Luft/75 / ---/--- / ---/---
Operator :	fussenegger	**Probentr./TC :**	DTA(/TG) HIGH RG 2 / S	**TG Korr/Messbereich :**	000/1000 mg
Probe :	Kalk_a, 70.000 mg	**Modus /Messtyp :**	DTA-TG / Probe	**DSC Korr/Messbereich :**	000/500 µV