



Saugende Schalungsbahnen

Eine Technik zur Verbesserung der Betonrandzone

- Funktionsweise
- Auswirkungen auf die Qualität der Betonrandzone
- Folgerungen für die Dauerhaftigkeit





**Fachhochschule Hochschule für
Stuttgart Technik**

Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades eines Diplom-Ingenieurs (FH)
der Fachhochschule Stuttgart Hochschule für Technik

Thema:

Saugende Schalungsbahnen

Eine Technik zur Verbesserung der Betonrandzone

Fachbereich: Bauingenieurwesen
Vertiefung: Baubetrieb
Studienjahr: WS 2000/01

vorgelegt von:

Roland Blattner
aus Stuttgart
Matrikel-Nr. 222211

Betreuende Prüfer:

- 1.) Prof. Dipl.-Ing. Günther Schelling
- 2.) Prof. Dipl.-Ing. Bernd Neubert

Stuttgart 2000



1. Einleitung.....	1
2. Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen.....	2
2.1 Betontechnologische Grundlagen für dauerhafte Beton-	
bauteile.....	3
2.1.1 Betondeckung	3
2.1.2 Hydratation	4
2.1.3 Dichtheit und Porosität	5
2.1.4 Verdichtung	7
2.1.5 Nachbehandlung	8
2.2 Schäden an Betonbauteilen durch Betonkorrosion	8
2.2.1 Schäden durch chemischen Angriff auf Beton.....	8
2.2.2 Schäden durch physikalischen Angriff auf Beton	11
2.3 Schäden an Betonbauteilen durch Betonstahl-Korrosion	14
2.3.1 Schäden durch Carbonatisierung	14
2.3.2 Schäden durch Chlorideinwirkung	16
3. Lösungsmöglichkeiten.....	18
3.1 Oberflächenschutzsysteme	18
3.2 Saugende Schalungen	21
3.2.1 Wirkungsweise von saugenden Schalungsbahnen	21
4. Was bisher geschah... ..	24
5. Gegenstand der vorliegenden Diplomarbeit	27
6. Versuche.....	28
6.1 Widerstand der Betonoberfläche gegen chemischen Angriff	28
6.1.1 Versuchsablauf.....	28
6.1.2 Ergebnisse	30
6.1.3 Auswertung.....	34
6.2 Frost-Tausalz-Beständigkeit.....	38
6.2.1 CDF-Test.....	38
6.2.2 Versuch mit stehenden Zylindern mit Randeinfassung.....	47
6.3 Wasserundurchlässigkeit	53
6.3.1 Versuchsablauf.....	53
6.3.2 Ergebnisse	54

6.3.3 Auswertung.....	55
6.4 Oberflächenzugfestigkeit.....	56
6.4.1 Versuchsablauf.....	56
6.4.2 Ergebnisse	57
6.4.3 Auswertung.....	59
6.5 Festigkeitsprüfung mit dem Rückprallhammer.....	60
6.5.1 Versuchsablauf.....	60
6.5.2 Ergebnisse	61
6.5.3 Auswertung.....	62
6.6 Permeabilität (Durchlässigkeit).....	63
6.6.1 Versuchsablauf.....	63
6.6.2 Ergebnisse	66
6.6.3 Auswertung.....	67
6.7 Carbonatisierung.....	68
6.7.1 Versuchsablauf.....	68
6.7.2 Ergebnisse	68
6.7.3 Auswertung.....	71
6.8 Verlauf des Sättigungswertes und der Rohdichte im Bauteilinneren.....	72
6.8.1 Versuchsablauf.....	72
6.8.2 Ergebnisse	74
6.8.3 Auswertung.....	75
6.9 Druckfestigkeit.....	76
6.9.1 Versuchsablauf.....	76
6.9.2 Ergebnisse	77
6.9.3 Auswertung.....	77
6.10 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Betonoberflächen	78
7. Folgerungen für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen.....	87
8. Anhang	88
9. Literaturverzeichnis	101

6.3.3 Auswertung.....	55
6.4 Oberflächenzugfestigkeit.....	56
6.4.1 Versuchsablauf.....	56
6.4.2 Ergebnisse	57
6.4.3 Auswertung.....	59
6.5 Festigkeitsprüfung mit dem Rückprallhammer.....	60
6.5.1 Versuchsablauf.....	60
6.5.2 Ergebnisse	61
6.5.3 Auswertung.....	62
6.6 Permeabilität (Durchlässigkeit)	63
6.6.1 Versuchsablauf.....	63
6.6.2 Ergebnisse	66
6.6.3 Auswertung.....	66
6.7 Carbonatisierung	68
6.7.1 Versuchsablauf.....	68
6.7.2 Ergebnisse	68
6.7.3 Auswertung.....	71
6.8 Verlauf des Sättigungswertes und der Rohdichte im Bauteilinneren.....	72
6.8.1 Versuchsablauf.....	72
6.8.2 Ergebnisse	74
6.8.3 Auswertung.....	75
6.9 Druckfestigkeit.....	28
6.9.1 Versuchsablauf.....	76
6.9.2 Ergebnisse	77
6.9.3 Auswertung.....	77
6.10 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Betonoberflächen	78
7. Folgerungen für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen.....	87
8. Anhang	88
9. Literaturverzeichnis	100

1. Einleitung

Die günstigen Eigenschaften des Betons – seine Formbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit, sowie die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten – machen ihn zu einem der wichtigsten Baustoffe der Gegenwart. Mit seiner Hilfe ist es möglich, langlebige und wartungsarme Bauwerke zu errichten.

Die Gestaltungsmöglichkeiten der Architekten wurden durch den Einsatz von Beton erheblich erweitert; Beton ermöglicht es, eine Vielzahl ingenieurtechnischer Aufgaben zu lösen, so z.B. im Bereich Turm- oder Brückenbau.

Es ist allerdings nicht zu verkennen, daß Beton-Architektur häufig als eintönig und kalt empfunden wird und daß Bauwerke existieren, bei denen bereits nach verhältnismäßig kurzer Zeit Schäden festgestellt wurden. Die Schuld hieran liegt jedoch nicht bei dem Baustoff Beton, sondern bei häufig wenig kreativen Architekten und mangelhafter Ausführung der Bauwerke. Die Gestaltung von Betonbauwerken ist eine Frage des individuellen Geschmacks und hängt vom Betrachter ab. Mängel an Betonkonstruktionen lassen sich demgegenüber durch Einhaltung der anerkannten Regeln der Technik minimieren und vielleicht in Zukunft durch neue Technologien komplett vermeiden. Während es auf die Frage, ob ein Bauwerk aus Beton schön oder häßlich ist, somit keine allgemein gültige Antwort geben kann, steht fest, daß bei sachgerechter Ausführung Beton ein Werkstoff ist, an dem wegen seiner unbestreitbaren Vorteile auch in Zukunft kein Weg vorbei führen wird. [1 S.11]

Das Thema der vorliegenden Diplomarbeit ist eine recht neue Technologie zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit. Das Ziel ist die Erfassung und Darstellung der Eigenschaften von Betonoberflächen, die mit gewöhnlicher, nicht-saugender Schalung geschalt wurden und von Betonoberflächen, die unter Einsatz von saugenden Schalungsbahnen hergestellt wurden. Die Ergebnisse werden verglichen und es wird sich zeigen, welchen Einfluß Schalungseinlagen auf den Beton haben. Eine detaillierte Übersicht über den Gegenstand der Arbeit findet sich in Kapitel 5.

2. Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen

Eine wesentliche Anforderung an ein neu erstelltes Bauwerk ist neben der Standsicherheit die Dauerhaftigkeit, wobei diese als Gleichgewichtszustand zwischen der Widerstandsfähigkeit des Systems und den äußeren Einwirkungen betrachtet werden kann, [2 S.75] was – gemäß Eurocode (DIN 18932 Teil 1) – bedeutet, daß

„ein Bauwerk so bemessen und ausgebildet sein muß, daß es

- unter Berücksichtigung der vorgesehenen Nutzungsdauer und seiner Erstellungskosten mit annehmbarer Wahrscheinlichkeit die geforderten Gebrauchseigenschaften behält.
- mit angemessener Zuverlässigkeit den Einflüssen und Einwirkungen standhält, die während seiner Ausführung und Nutzung auftreten können und eine angemessene Dauerhaftigkeit im Verhältnis zu seinen Unterhaltungskosten aufweist.“

Grundsätzlich läßt sich sagen, daß Beton bei der richtigen Wahl der Ausgangsstoffe, sachgerechter Herstellung und bei entsprechender Nachbehandlung unter den üblichen Umweltbedingungen ein dauerhafter Baustoff ist und daß – sachgerechte Herstellung vorausgesetzt – kein besonderer Schutz gegen normale Witterungsbeanspruchung notwendig ist.

Um Beständigkeit zu erreichen, muß der Beton selbst ausreichend widerstandsfähig sein und als Langzeit-Schutz der Bewehrung gegen Korrosion dienen. Für beides ist die Dichtheit des Betons maßgebend, welche entscheidend von seiner Zusammensetzung, der Verarbeitung und Nachbehandlung abhängt. [2 S.361]

Wenngleich Beton somit als ein durchaus langlebiger Baustoff angesehen werden kann, so zeigt sich doch eine erhebliche Diskrepanz zwischen Anspruch und Wirklichkeit.

Aus dem letzten Bericht der deutschen Bundesregierung über Schäden an Gebäuden von 1996 geht hervor, daß der Instandsetzungsbedarf des gesamten deutschen Wohnungsbestandes (inkl. neue Bundesländer) ca.

163 Milliarden DM beträgt, wovon ein beachtlicher Anteil auf die Betonsanierung entfällt. [3 S.59]

Dieser Betrag zeigt, wie wichtig einerseits die Erkundung der Schadensursachen, geeigneter Sanierungsverfahren und Materialien ist, andererseits aber auch, wie hoch das Einsparpotential durch Präventivmaßnahmen, welche die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen noch zusätzlich verbessern können, ist.

2.1 Betontechnologische Grundlagen für dauerhafte Betonbauteile

DIN 1045 definiert Beton als einen „künstlichen Stein, der aus einem Gemisch von Zement, Betonzuschlag und Wasser – ggf. auch mit Betonzusatzmitteln und -zusatzstoffen (...) – durch Erhärten des Zementleims (...) entsteht.“

2.1.1 Betondeckung

Die Betondeckung hat eine besondere Bedeutung für die Dauerhaftigkeit eines Gebäudes.

Sie hat im Wesentlichen drei Aufgaben zu erfüllen, die in DIN 1045 wie folgt beschrieben werden:

„Die Bewehrungsstäbe müssen zur Sicherung des Verbundes, des Korrosionsschutzes und zum Schutz gegen Brandeinwirkung ausreichend dick und dicht ummantelt sein.“

Damit sie diese Aufgaben erfüllen kann, sind die in DIN 1045 Tab.10 in Abhängigkeit von der Dicke der Bewehrungsstäbe und den Umweltbedingungen angegebenen Größen für die Betondeckung einzuhalten.

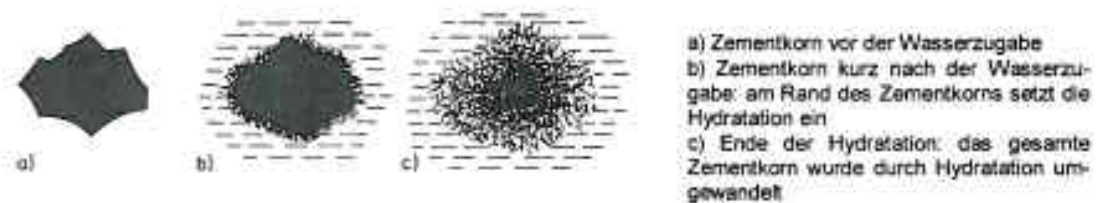
Der Korrosionsschutz der Bewehrung beruht auf dem alkalischen Milieu im Beton (pH-Wert 12 bis 13). In dieser Umgebung kommt es auf der Oberflä-

che des Stahls zur Bildung einer Passivschicht (FeO), welche ein Fortschreiten der Korrosion verhindert. [17 S.11]

2.1.2 Hydratation

Die beim Erhärtungsprozeß des Betons ablaufende chemische Reaktion von Zement mit Wasser wird Hydratation genannt. Dabei werden die im Zementleim noch gegeneinander verschiebbaren Zementkörner durch die Hydratationsprodukte fest miteinander verbunden, so daß schließlich aus Zementleim Zementstein entsteht. [15 S.82]

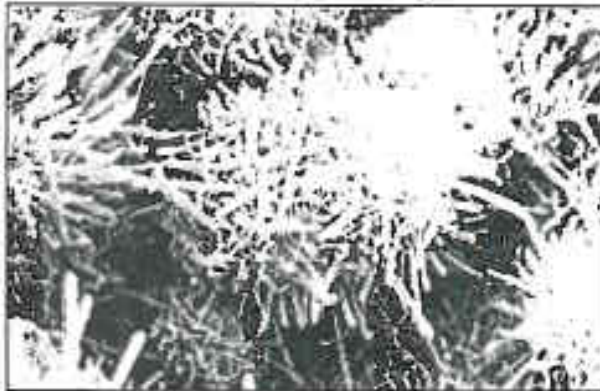
Abbildung: Schematische Darstellung der Hydratation [15 S.82]



Zement kann nur eine Wassermenge von etwa 40% seiner Masse binden (25% chemisch, 15% physikalisch), was einem „optimalen“ Wasserzementwert von 0,4 entspricht. Ein höherer Wasserzementwert führt einerseits zu einem Wasserüberschuß, andererseits zu einer besseren Verarbeitbarkeit des Betons. Bei Lagerung an Luft verdunstet dieses überschüssige Wasser und hinterläßt sehr saugfähige Kapillarporen im Beton. Ebenso hinterläßt Wasser, das vor abgeschlossener Hydratation verdunstet und eigentlich noch für diese benötigt würde, Kapillarporen [4 S.22]. Da diese, wie in Kap.2.1.3 beschrieben wird, die Eigenschaften des Betons verschlechtern, ist im Sinne der Dauerhaftigkeit ein niedriger, dem Optimum möglichst naher Wasserzementwert ($w/z \rightarrow 0,4$) anzustreben.

Ist der w/z -Wert kleiner als 0,4 so führt dies zu unvollständiger Hydratation des Zements [20 S.74].

Abbildung: Hydratation des Zements durch ein Raster-Elektronen-Mikroskop betrachtet [15 S.83]



In der Abbildung sind die aufeinander zuwachsenden Hydratationsprodukte zu erkennen. Die dunklen Bereiche sind zunächst noch mit Wasser gefüllt. Sie ergeben später beim Verdunsten des Wassers die Kapillarporen.

Durch vorzeitiges Austrocknen kann der Hydratationsvorgang unterbrochen werden. Dadurch wird die Festigkeitsentwicklung des Zementsteins beeinträchtigt und die Betonqualität schlechter. [15 S.84] Um dies zu vermeiden, muß Beton nachbehandelt werden.

Die Hydratation ist ein über einen längeren Zeitraum ablaufender Prozeß, dessen Geschwindigkeit von der Zusammensetzung des Zements, Feinheit und Temperatur abhängt und der unter Umständen erst nach Jahren abgeschlossen ist. [13 S.84]

2.1.3 Dichte und Porosität

Der Zementstein ist von einem mehr oder weniger stark ausgeprägten, zum Teil gewollten Porensystem durchsetzt. Durch den Gesamtporenraum wird die Festigkeit des Zementsteins und somit die des Betons bestimmt. [15 S.138]

Tabelle: Porenarten und -größen im Zementstein [15 S.138]

Porenart	Größe in mm
Verdichtungs-poren künstliche Luftporen Kapillarporen	10^1 bis 10^{-2} 10^0 bis 10^{-3} 10^{-1} bis 10^{-5}
Schrumpfporen Gelporen	10^{-4} bis 10^{-5} 10^{-5} bis 10^{-6}

- **Verdichtungsporen**

sind größere Lufteinschlüsse [2 S.219], die durch unvollständige Verdichtung beim Einbau entstehen. In der Praxis lassen sie sich nie ganz vermeiden und selbst ein gut verdichteter Beton hat noch 1 bis 2 Vol.-% Verdichtungsporen. Ihr Gehalt ist abhängig von der Intensität der Verdichtung, der Konsistenz des Betons, dem Größtkorn des Zuschlags und der Art des Einbaus [15 S.138] (siehe auch 2.1.4).

- **Künstliche Luftporen**

werden durch LP-Mittel (Luftporenbildner) gebildet und verbessern den Frost-Tausalz widerstand, da sie die Kapillarporen unterbrechen. Durch sie kann der durch das in den Kapillarporen gefrierende Wasser entstehende Druck abgebaut werden. [15 S.138]

- **Kapillarporen**

entstehen dort, wo noch nicht gebundenes oder zuviel vorhandenes Wasser verdunstet. Wichtige Gebrauchseigenschaften wie Druckfestigkeit, Permeabilität für Gase und wäßrige Lösungen und somit auch Carbonatisierung und Chlorideindringung hängen entscheidend von der Kapillarporosität ab. Ist sie gering, ist der Stahlbeton weniger durchlässig und somit dauerhafter. [12 S.316]

- **Schrumpfporen**

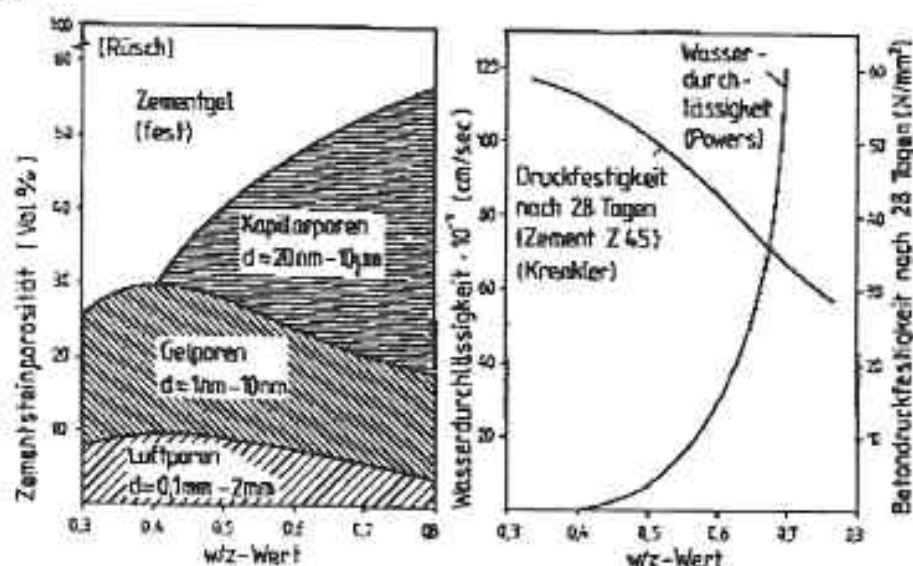
entstehen durch das Wasser, das bei der Hydratation chemisch gebunden wird und dabei etwa ein Viertel seines ursprünglichen Volumens verliert [15 S.138].

- **Gelporen**

werden durch das Wasser, das physikalisch gebunden wird – das sogenannte Gelwasser – gebildet [15 S.138].

Zusammenfassend läßt sich hierbei festhalten, daß hinsichtlich der Dauerhaftigkeit künstliche Luftporen günstig und Verdichtungs- und Kapillarporen ungünstig wirken.

Abbildung: Einfluß des Wasserzementwertes auf die Zementsteinporosität, Wasserdurchlässigkeit und Betonfestigkeit (Hydratationsgrad 100%) [12 S.317]



2.1.4 Verdichtung

Beim Einbringen von Beton ist eine möglichst vollständige Verdichtung anzustreben, da sich nur so sowohl guter Verbund zwischen Beton und Bewehrung als auch ein geschlossenes Gefüge und damit Korrosionsschutz der Bewehrung erreichen läßt.

Ein praktisch vollständig verdichteter Frischbeton hat immer noch einen Luftgehalt von 1,5 Vol.-%, welcher sich mit üblichen Verdichtungsverfahren nicht verringern läßt. Ein deutlich höherer Luftgehalt, der die Folge mangelhafter Verdichtung sein kann, verschlechtert die Eigenschaften wie Druckfestigkeit des Betons deutlich. So führt ein Luftporengehalt von 10% zu einer Abnahme der Festigkeit um 40-50%. [2 S.160]

In Abhängigkeit von der Konsistenz des Betons kann durch Stampfen, Rütteln und Stochern verdichtet werden [2 S.159].

Mangelhaftes Verdichten und Entmischen beim Einbau können zur Bildung von Kiesnestern führen, die – wenn sie an der Betonoberfläche liegen – nach dem Ausschalen sichtbar werden [8 S.162].

2.1.5 Nachbehandlung

Nachbehandlung von Beton ist notwendig, um ein vorzeitiges Austrocknen zu vermeiden und eine möglichst vollständige Hydratation (Hydratationsgrad nahe 100%) des Zements zu ermöglichen. Außerdem ist Ziel der Nachbehandlung des noch nicht ausreichend erhärteten Betons z.B. der Schutz vor großen Temperaturänderungen und mechanischen oder chemischen Beanspruchungen.

Möglichkeiten der Nachbehandlung sind das Belassen in der Schalung, dichtes Abdecken mit Folien oder wasserhaltenden Matten, Aufspritzen von Nachbehandlungsmitteln bereits auf den mattfeucht werdenden Beton oder kontinuierliches Besprühen mit Wasser. [13 S.117]

2.2 Schäden an Betonbauteilen durch Betonkorrosion

Betonkorrosion kann definiert werden als „die Wirkung äußerer Einflüsse bzw. eingedrungener Stoffe, den Beton chemisch (chemische Zusammensetzung, chemische Bindungen) und/oder physikalisch (Struktur, Festigkeit) zu verändern“ [12 S.517]. Zur Sicherung der Tragfähigkeit und des dauerhaften Korrosionsschutzes der Bewehrung durch den Beton muß vermieden werden, daß dieser geschädigt wird.

2.2.1 Schäden durch chemischen Angriff auf Beton

Kommt es bei Korrosionsreaktionen zur Bildung wasserlöslicher Reaktionsprodukte, so wird der Zementstein von der Oberfläche her gelöst. Dieser Vorgang wird „lösender Angriff“ genannt. Er kann durch Säuren, austauschfähige Salze, weiches Wasser, organische Öle und Fette bewirkt werden.

Kommt es dagegen zur Bildung schwerlöslicher, voluminöser Reaktionsprodukte, so können diese innere Spannungen verursachen und das Betonge-

füge lockern, was als „treibender Angriff“ bezeichnet wird und z.B. durch Sulfate oder Magnesium bewirkt werden kann.

Es können auch beide Angriffsarten gleichzeitig auftreten. [16 S.17]

Tabelle: Wirkung schädigender Stoffe auf Zementstein [12 S.518]

Stoff	Vorkommen	Wirkung
(annähernd) chemisch reine Wässer	Kondenswasser, Regenwasser, Schneewasser, weiches Quellwasser	lösend - auswaschend (praktisch wirksam unter 3 °d)
anorganische Säuren z.B. • Salzsäure • Schwefelsäure • Schweflige Säure • Kohlensäure	chemische Industrie, Kohlensäure auch in natürlichen Wässern	lösend (pH-abhängig), Schwefelsäure auch treibend, Kohlensäurekorrosion abhängig vom freien CO ₂
organische Säuren z.B. • Essig-, Milch-, Gerb-, Ameisensäure • Humussäure	bei Gärungsprozessen, in Molkereien, Grünfuttersilos, Färbereien u.a. in Böden	langsam lösend
Laugen • Natron-, Kalilauge	chemische Industrie	lösend in hohen Konzentrationen
pflanzliche und tierische Fette	Lebensmittelindustrie	lösend - auflockernd (Reaktion der Fettsäuren mit Ca-Salzen zu Kalkseifen)
Mineralöl und -fette	Maschinenhallen, Tankstellen, Raffinerien	nicht lösend (da säurefrei), u.U. lockernd
wässrige Lösungen mit • Mg ²⁺ -Ionen • NH ₄ ⁺ -Ionen • SO ₄ ²⁻ -Ionen saure Wässer, pH < 6,5 kalklösende Kohlensäure	in natürlichen und industriellen Wässern, landwirtschaftliche Betriebe und Kunstdüngerfabriken in natürlichen und industriellen Wässern, Böden in natürlichen und industriellen Wässern in natürlichen, besonders in weichen Wässern	aufweichend lösend treibend lösend lösend

Wie stark Beton durch Säuren angegriffen wird, hängt von deren Art und Konzentration ab. Hierbei greifen hoch konzentrierte Säuren stärker an. Schwache Säuren, wie z.B. Kohlensäure und organische Säuren (z.B. Essigsäure) verursachen erst nach längerer Zeit nachweisbare Schäden.

Durch starke Säuren (z.B. Salz- oder Salpetersäure) werden dagegen – wenn sie ständig angreifen – alle Bestandteile des Zementsteins gelöst.

Von einer Gefahr für Beton kann man bei einem pH-Wert < 6 sprechen. [12 S.518] Da Zuschläge meist aus recht korrosionsbeständigem silicatischem Material bestehen, wird vorrangig der Zementstein angegriffen [12 S.529].

Tabelle: Beurteilung des Angriffs von Wässern nach DIN 4030

	Angreifende Bestandteile	Angriffsgrad		
		schwach	stark	sehr stark
1.	Säuren pH-Wert	6,5 - 5,5	$< 5,5$ bis 4,5	$< 4,5$
2.	kalklösende Kohlen- säure CO_2 in mg/l (Marmorlöseversuch nach Heyer)	15 bis 40	> 40 bis 100	> 100
3.	Ammonium NH_4^+ in mg/l	15 bis 30	> 30 bis 60	> 60
4.	Magnesium Mg^{2+} in mg/l	300 bis 1000	> 1000 bis 3000	> 3000
5.	Sulfat ¹⁾ SO_4^{2-} in mg/l	200 bis 600	> 600 bis 3000	> 3000

¹⁾ Bei Sulfatgehalten über 600 mg SO_4^{2-} je l Wasser, ausgenommen Meerwasser, ist ein Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS) zu verwenden (siehe DIN 1164 Teil 1/03.90, Abschnitt 4.6 und DIN 1045/0788, Abschnitt 6.5.7.5).

DIN 1045 nennt die folgenden betontechnologischen Gegenmaßnahmen bei chemischem Angriff: [12 S.528]

Schwacher Angriff

- Wassereindringtiefe (DIN 1048) ≤ 50 mm
- $w/z \leq 0,60$

Starker Angriff

- Wassereindringtiefe (DIN 1048) ≤ 30 mm
- $w/z \leq 0,50$
- HS Zement bei > 600 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ (Wasser)
bei > 3000 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{kg}$ (Boden)
- Betondeckung wie Zeile 3, Tabelle 10, DIN 1045

Sehr starker Angriff

- wie starker Angriff, jedoch:
- Betondeckung wie Zeile 4, Tabelle 10, DIN 1045
- zusätzlicher Schutz (z.B. Beschichtung)

„Generell steigt die Widerstandsfähigkeit des Betons mit zunehmender Dichtheit, weil dadurch das Eindringen der angreifenden Stoffe mehr oder weniger gehemmt wird. Als Maß für die Dichtheit gilt die Wassereindringtiefe“. [12 S.528] Ist die Betonhaut dicht, kann der Angriff nur von der Betonoberfläche aus stattfinden. Je stärker die Betonhaut durch den Säureangriff geöffnet wird, desto größer wird die Angriffsfläche für die Säure und desto schneller schreitet die Zerstörung fort. [3 S.214]

2.2.2 Schäden durch physikalischen Angriff auf Beton (Frost- und Frost-Tausalz-Schäden)

Frost-Tauwechsel können bei durchfeuchteten Betonoberflächen hauptsächlich durch physikalische Prozesse Schäden verursachen. Durch Auftaumittel (Tausalze) wird die Beanspruchung der Betonoberflächen noch wesentlich intensiver. [12 S.530] Dies liegt daran, daß das vom Tausalz verursachte Schmelzen des Schnees oder des Eises auf der Oberfläche Wärme benötigt, welche dem Beton entzogen wird und zu einer schnellen und starken Temperatursenkung im Beton führt (Kälteschock) [12 S.533].

Zu schädigenden chemischen Prozessen kommt es durch den Anforderungen entsprechende Taumittel jedoch nicht [15 S.181].

Die auftretende Beanspruchung durch Frost und Taumittel hängt im Wesentlichen vom Feuchtezustand – also von der Menge an vorhandenem überhaupt gefrierfähigem Wasser im Beton – ab [15 S.181]. Ein niedriger Wasserzementwert, geringe Kapillarporosität und die daraus resultierende hohe Dichtheit der oberflächennahen Betonschicht verbessern die Resistenz gegen Frost-Taumittel-Angriff entscheidend [12 S.535]. Um diese Eigenschaften zu erreichen muß der Beton ausreichend lange und intensiv nachbehandelt werden (siehe Kap.2.1.5).

Außerdem wird der Widerstand durch künstlich erzeugte Luftporen besser, da das in den Kapillarporen gefrierende Wasser so Raum bekommt, in den es ausweichen kann (siehe Kap. 2.1.3). In normal hergestelltem Beton, d.h. ohne Zugabe von LP-Mitteln, ist der Abstand der einzelnen Luftporen zu groß. [12 S.533]

Oberflächenschutzmaßnahmen sind wirksame Methoden um den Frost-Tausalz-Widerstand zu verbessern, da durch sie das Eindringen von Wasser bzw. Taumittellösungen behindert wird. Derartige Schutzmaßnahmen werden u.a. bei Sanierungsarbeiten an älteren Betonen angewandt. [12 S.538]

„Betone aus hüttensandreichen Hochofenzementen (HOZ) zeigen stärkere anfängliche Abwitterungserscheinungen als vergleichbare Betone mit Portlandzement (PZ) und gelten vielfach als ungeeignetes Bindemittel für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand. HOZ-Beton ist nachbehandlungempfindlicher und neigt stärker als PZ-Beton zu Carbonatisierung. An carbonatisierten Oberflächen wird, bedingt durch die besondere Porenstruktur, der Frost-Tausalz-Widerstand bei HOZ-Betonen herabgesetzt und bei PZ-Betonen verbessert.“ [12 S.535]

Tabelle: Anforderungen an Beton mit besonderen Eigenschaften im Hinblick auf Frost- und Frost-Tausalzangriff (nach DIN 1045): [12 S.538]

<u>Wasserundurchlässiger Beton:</u>	
-Wassereindringtiefe (DIN 1048) ≤ 50 mm	
-w/z $\leq 0,60$ bei Dicken < 400 mm	
-w/z $\leq 0,70$ bei Dicken ≥ 400 mm	
-Bl falls $Z \geq 350$ kg/m ³	
-Sieblinie im Bereich AB, max. Korndurchmesser > 16 mm	
<u>Beton mit hohem Frostwiderstand:</u>	
-wasserundurchlässiger Beton	
-Zuschlag eF (DIN 4226, Teil 1)	
-w/z $\leq 0,60$	
-bei massigen Bauteilen	
• w/z $\leq 0,70$	
• Luftporenbildner (abhängig von Zuschlaggrößtkorn)	
d _{max} (mm)	Luftgehalt (Vol.-%)
8	$\geq 5,5$
16	$\geq 4,5$
32	$\geq 4,0$
63	$\geq 3,5$
<u>Beton mit hohem Frost- und Tausalzwiderstand:</u>	
-Zement $\geq Z 35$ (PZ), $> Z 45$ L (HOZ)	
-Zuschlag eFT (DIN 4226, Teil 1)	
-w/z $\leq 0,50$	
-Luftporenbildner (wie oben) oder w/z $< 0,40$	
-Betondeckung wie Zeile 4, Tabelle 10, DIN 1045	
-zusätzlicher Schutz (z.B. Beschichtung) u.U. erforderlich	

2.3 Schäden an Betonbauteilen durch Betonstahl-Korrosion

Voraussetzung dafür, daß es überhaupt zu Korrosion der Bewehrung im Beton kommen kann, ist das gleichzeitige Auftreten folgender Gegebenheiten: Depassivierung des Stahls (durch Carbonatisierung oder Chlorideinwirkung), Wasser und Sauerstoff [17 S.13].

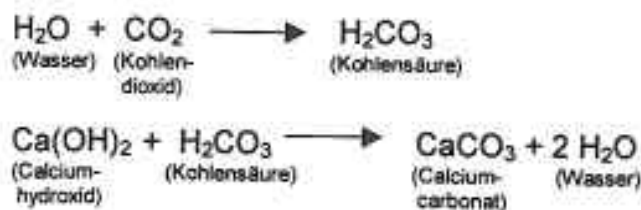
2.3.1 Schäden durch Carbonatisierung

In nicht-carbonatisiertem Beton (pH-Wert 12 bis 13) bildet sich durch das dort vorhandene Calciumhydroxid auf den Bewehrungsstählen eine Eisenoxidschicht (Passivschicht), welche den Stahl vor Korrosion schützt.

Wird Beton demgegenüber an der Luft gelagert, so kommt es zu einem langsamen Abbau seine Alkalität durch in der Luft vorhandenes CO_2 . Dieser Vorgang wird Carbonatisierung genannt.

Bei der Carbonatisierung reagiert Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat, was zu einer Abnahme der Alkalität des Betons führt (pH-Wert < 9). Dieser Vorgang ist bei völlig trockenem und bei wassergesättigtem Beton praktisch nicht möglich. Am stärksten carbonatisiert Beton bei 50-70% rel.Luftfeuchte. Deshalb carbonatisiert Beton im Freien, der den Niederschlägen ausgesetzt ist, deutlich langsamer, als Beton im Freien, der vor Niederschlägen geschützt ist. [4 S.25]

Chemisch formuliert sieht die Carbonatisierung wie folgt aus: [12 S.345]



Die schützende Passivschicht auf dem Stahl verliert in dem infolge der Carbonatisierung wenig alkalischen Milieu ihre Stabilität; bei Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff kommt es zur Korrosion des Stahls. Die entstehenden Rostprodukte nehmen ein 2-3 mal größeres Volumen wie Stahl ein; die Folge sind Abplatzungen am Beton. [4 S.24]

Darüberhinaus kommt es durch Carbonatisierung zu einer Verengung des Porengefüges im Beton, was zu einer Festigkeitssteigerung im oberflächennahen Bereich und zu einer immer langsamer werdenden Carbonatisierungsgeschwindigkeit führt [8 S.169].

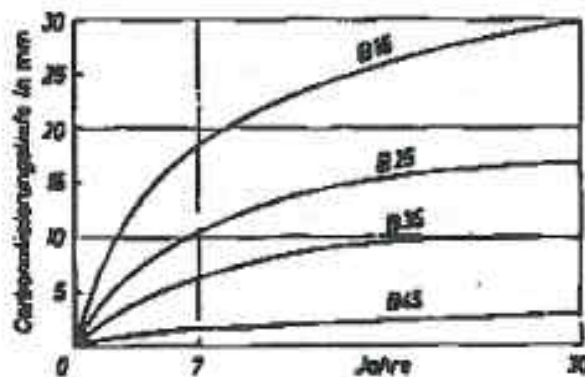
Durch die Veränderung des Zementsteins infolge Carbonatisierung kommt es somit nicht zu einer Schädigung des Betons selbst, sondern zu einer Beeinträchtigung dessen schützender Wirkung auf die Bewehrung [35 S.25].

Die Carbonatisierungsgeschwindigkeit ist hauptsächlich abhängig von: [4 S.24]

- Betonzusammensetzung (Wasserzementwert, Dichtheit, Zementgehalt)
- Hydratationsgrad (Nachbehandlung)
- Umweltbedingungen
- Zeit

Demzufolge kann davon ausgegangen werden, daß alle Maßnahmen, die zu einer dichteren Betonoberfläche führen auch zu einer Abnahme der Carbonatisierungsgeschwindigkeit führen.

Abbildung: Carbonatisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Betonfestigkeitsklasse (nach Rieche): [15 S.191]



2.3.2 Schäden durch Chlorideinwirkung

Korrosion der Bewehrung infolge Chlorideinwirkung kann sowohl in carbonatisiertem als auch in nicht-carbonatisiertem Beton stattfinden [15 S.193];

in nicht-carbonatisiertem Beton ist dazu jedoch eine größere Chloridmenge nötig [12 S.380].

Chloride können auf die Bauteiloberfläche treffen durch: [15 S.193]

- Tausalze
- Salzhaltige Böden und Grundwässer
- Meerwasser
- Salzsäure-Dämpfe von PVC-Bränden

Die Chloride können durch Risse und Fehlstellen oder durch Diffusion ins Betoninnere gelangen. Mit zunehmender Eindringtiefe wird die Diffusionsgeschwindigkeit langsamer. [8 S.143] Wenn Chloride bis zur Bewehrung vordringen, können sie die Passivschicht durchbrechen und dort eine örtliche Korrosion des Stahls auslösen, weshalb diese Form der Korrosion auch Lochfraßkorrosion genannt wird [15 S.193]. Dabei wird das Chlorid nicht verbraucht, sondern bleibt in jedem Stadium des Korrosionsfortschritts voll wirksam [12 S.378].

Als kritischer Gehalt von Chloridionen im Stahlbeton wird in der Literatur 0,4 M% in Bezug auf den Zementgehalt angegeben. [23 S.34]

Von der Korrosion infolge von Chloridionen betroffen sind in erster Linie Verkehrsbauwerke. Nach ZTV-K 88 (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten, Bundesministerium für Verkehr) kann davon ausgegangen werden, daß alle dem öffentlichen Verkehr zugänglichen Brückenbauwerke als chloridbelastet anzusehen sind. [8 S.214]

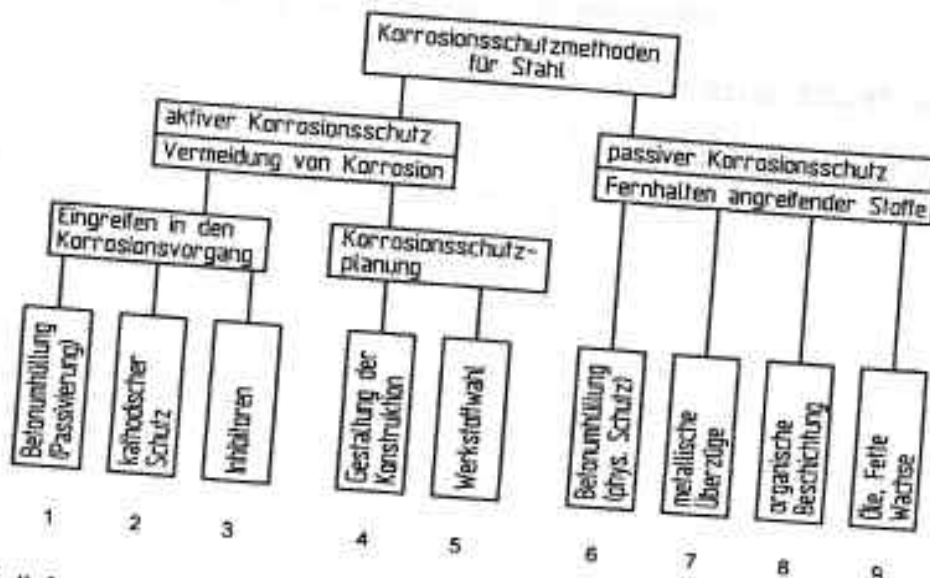
Die Chlorideindringtiefe (0,4%-Grenze) ist abhängig von: [15 S.193]

- Wasserzementwert
- Zementgehalt
- Feuchte der umgebenden Luft

Alle Maßnahmen, die zu einer Reduzierung des Porenraums führen (z.B. niedriger Wasserzementwert, gute Nachbehandlung, hoher Zementgehalt), vermindern die Mobilität der Chloridionen und verbessern den Korrosionsschutz der Bewehrung bei Chloridbeaufschlagung [8 S.214].

3. Lösungsmöglichkeiten

Abbildung: Die wichtigsten Korrosionsschutzmethoden für Stahl allgemein:
[12 S.309]



Speziell für Stahlbeton stellt eine ausreichend dichte, dicke und dauerhafte organische Beschichtung eine der wirkungsvollsten Schutzmaßnahmen dar. Durch sie wird sowohl eine Trennung der Reaktionspartner Metall und Elektrolyt (= aktiver Korrosionsschutz des Stahls), als auch Schutz des Betons erzielt. [12 S.311]

Im Weiteren soll auf Maßnahmen, die die Dichtheit erhöhen können, eingegangen werden.

3.1 Oberflächenschutzsysteme

Oberflächenschutzsysteme finden ihre Anwendung als vorbeugende Schutzmaßnahme von Beton und Bewehrung, im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen und zur Farbgebung von Betonoberflächen [12 S.547].

Die nachfolgende Tabelle nennt die im Sinne des Korrosionsschutzes zu erfüllenden Aufgaben der Oberflächenschutzsysteme.

Aufgaben von Oberflächenschutzsystemen für Beton: [12 S.548]

- Schutz des Betons vor chemischen und/oder physikalischen (Frost-Tausalz) Angriffen
- weitgehende Abdichtung der Betonoberfläche gegenüber wässrigen und gasförmigen Medien
- Schutz des Bewehrungsstahls vor Korrosion
- Erhöhung der mechanischen Widerstandsfähigkeit der Betonoberfläche
- farbliche Gestaltung und Erleichterung von Wartung und Pflege von Betonoberflächen

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, müssen Oberflächenschutzsysteme die folgenden Eigenschaften aufweisen: [12 S.548]

- hohe Alkalibeständigkeit (Verträglichkeit mit Beton)
- dauerhafte Haftung auf Beton
- eine im Hinblick auf den jeweiligen Anwendungsfall ausreichende mechanische Belastbarkeit und Abriebfestigkeit
- hohe Dehnfähigkeit bestimmter Schichten/Lagen zur Risseüberbrückung des Beschichtungssystems
- hohe Witterungsbeständigkeit: Temperatur-, Wasser-, Licht-, Alterungsbeständigkeit
- ausreichende Diffusionsdichtigkeit gegenüber Kohlendioxid und anderen Gasen sowie Dichtigkeit gegenüber wässrigen Medien
- ein ausreichend niedriger Diffusionswiderstand gegenüber Wasserdampf
- eine für den Anwendungsfall ausreichend hohe Chemikalienbeständigkeit
- keine unerwünschten Nebenwirkungen (z.B. verstärkte Carbonatisierung des Betons).

Wenn das Eindringen von CO_2 und anderen sauer reagierenden Gasen behindert wird, kann die Carbonatisierung des Betons gebremst oder komplett gestoppt werden. Dies kann sowohl mit Hilfe eines dichten Betons als auch durch bestimmte Oberflächenschutzsysteme erreicht werden. Schutzsysteme

me, die diese Wirkung zeigen, behindern meist auch die Eindiffusion von Sauerstoff, welcher zur Korrosion von Stahl notwendig ist [12 S.550].

Tabelle: Oberflächenschutzmaßnahmen an nicht befahrenen Flächen [12 S.558]

Angestrebte Wirkung		OS1 Imprägnierung	OS2 Versiegelung	OS4 Beschichtung	OS5 OS9 Beschichtung		OS6 Beschichtung
		hydrophobierend			Rißüberbrückungsfähigkeit		chem. widerstandsfähig
Anwendung		Fassaden	Fassaden, Stützwände, Brückenpfeiler		gering	erhöht	chem. belastete Flächen
Hauptbindemittel		Silan, Siloxan, Silikon	AY-D 1) AY	AY-D PUR + AY	AY-D, P-D	PUR	EP + PUR EP, PUR
Schichtdicke		~0	~50µm	~100µm	300- 500µm	≥1mm	≥300µm
Verhinderung	Wasseraufnahme	X	X	XX	XX	XX	XX
	Carbonatisierung		X	XX	XX	XX	XX
	Chloideindringung		X	X	XX	XX	XX
Rißüberbrückung					X	XX	
Chemikalienbeständigkeit							XX
Farbige Oberflächen			XX	XX	XX	XX	X

X = Gute Wirkung mit Einschränkung

XX = Gute Wirkung

X bzw. XX = Vorwiegend genutzte Eigenschaft

1) = aus Umweltgründen neuerlich im Einsatz

AY = Acrylharz

EP = Epoxidharz

PUR = Polyurethanharz

AY-D = Acrylharz-Dispersion

P-D = Propionat-Copolymere-Dispersion

Damit Schutzsysteme dauerhaft sind, muß eine gute Haftung am Untergrund erreicht werden, da es ansonsten zu großflächigen Ablösungen kommen kann. Bei den besonders dünnen Schutzsystemen kann es durch Unebenheiten auf der Betonoberfläche zu undichten und somit ungeschützten Stellen kommen. Die Oberflächenschutzmaßnahme darf außerdem die Diffusion von Wasserdampf aus dem Bauteil nicht zu stark behindern und muß die thermische Ausdehnung von Beton aushalten. [18 S.40]

Weiterführende technische Regelwerke zu Oberflächenschutzsystemen sind die Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ und die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (ZTV-SIB 90) [3 S.238].

3.2 Saugende Schalungen

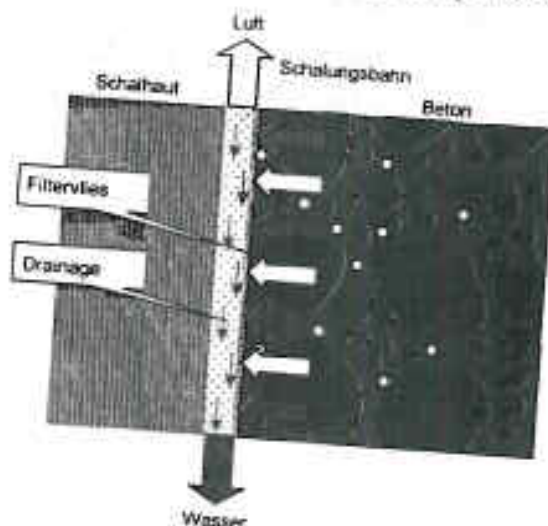
Durch die Verwendung von saugenden Schalungen läßt sich die Qualität der Betonrandzone wesentlich verbessern. Ein auf die Innenfläche der Schalung gespannter Vließ auf Polypropylenbasis – die sogenannte Schalungsbahn (SB) – hat sich zu diesem Zweck besonders bewährt. [27 S.1552]

3.2.1 Wirkungsweise von saugenden Schalungsbahnen

Durch die SB kann das für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons benötigte Überschußwasser abgeführt werden, was eine Verringerung des Wasserzementwertes und dadurch eine Verbesserung des Randbetons zur Folge hat [28 S.2]. Die Betonfeinteile werden dabei durch die dem Beton zugewandte sehr fein strukturierte Seite der SB (Filterschicht) zurückgehalten [29 S.34]. Bei nicht-saugenden Schalungen reichern sich Überschußwasser und durch dieses transportierte Feinstteile an der Betonoberfläche an und verursachen dort einen höheren Wasserzementwert und somit eine höhere Kapillarporosität und geringere Dichtheit [28 S.4] (siehe auch Kap.2.1).

Durch den Einsatz einer SB kann außerdem die Luft aus dem Randbereich entweichen und so eine praktisch lunkerfreie Oberfläche erreicht werden [30 S.22] (siehe Kap.2.1.4).

Abbildung: Prinzipielle Wirkungsweise einer SB [37 S.4]



Nach dem Entfernen der Schalung kann die SB am Beton belassen werden und dadurch wirkungsvoll die Nachbehandlung unterstützt werden. Durch sofortige Befeuchtung und Ummantelung mit einer Folie nach dem Ausschalen wirkt die SB als Feuchtespeicher [14 S.4] (siehe Kap.2.1.5).

Die durch den Einsatz einer SB erzielbare Verbesserung der Betonrandzone ist bei Betonen mit hohem Wasserzementwert bzw. weicher Konsistenz besonders groß [31 S.113].

Die auf die Schalung gespannte SB wirkt bereits als Trennschicht zwischen Schalung und Beton und macht deshalb die Verwendung von Schalöl überflüssig. Dies macht die Verwendung im Trinkwasserbereich besonders sinnvoll, da dort jegliche chemische Verunreinigung der Betonoberfläche unerwünscht ist. Zudem vermindert die glatte dichte Oberfläche das Ansiedeln bzw. Eindringen von Mikroorganismen. [32 S.2-3]

Dadurch, daß die Schalung praktisch nicht mit dem Beton in Berührung kommt, entfällt der Reinigungsaufwand [33 S.35].

Die Verwendung einer SB ist bei Betonoberflächen, die später beschichtet werden sollen, besonders sinnvoll, da die Haftung wesentlich verbessert wird [34 S.498].

Saugende Schalungsbahnen bewirken also: [39]

- erhöhten Widerstand gegen chemischen Angriff
- verringerte Wasserdurchlässigkeit
- geringere Porosität in der Randzone
- gleichmäßigere Nachbehandlung
- verringertes Chlorideindringen
- verbesserte Salz- und Frostbeständigkeit
- verbesserten Abriebwiderstand
- verringerte Carbonatisierungsgeschwindigkeit
- geringeres Algen- und Bakterienwachstum

4. Was bisher geschah...

Für die Diplomarbeit von R. Barnewold über saugende Schalungsbahnen [19] wurden am 05.04.2000 vier Betonwände unterschiedlicher Zusammensetzung und Festigkeit (siehe Tabelle auf Seite 25) mit den Abmessungen 90x110x24 cm hergestellt. Für Wand 1 bis 3 wurde Beton aus Portlandzement, für Wand 4 Beton aus Hochofenzement verwendet.

Die Nachbehandlung bestand bei allen Wänden aus dem einwöchigen Belassen der Wände in der Schalung.

Als Schalung wurde eine PERI-Rahmenschalung verwendet. Eine Seite und eine Stirnseite der Wandschalung wurde mit einer saugenden Schalungsbahn (Mod. Fomtex, Fa. Fibertex A/S, Aalborg, Dänemark) bespannt. Der Rest der Schalung – die andere Seite und die andere Stirnseite der Wandschalung – blieb unbespannt und wurde mit Schalöl behandelt.

Nach Fertigstellung wurden aus dem unteren Drittel der Wände Bohrkerne ($\varnothing$ 100mm bzw. $\varnothing$ 150mm) entnommen und bis zu den Untersuchungen für diese Diplomarbeit im Labor für Baustoffprüfung der FHT bei Normalklima (20°C und 65% rel. Luftfeuchte) gelagert.



Tabelle: Zusammensetzung der Betonsorten der Wände 1 bis 4 [19]

Wand - Nr.		1	2	3	4
Verwendungszweck		für bewehrte Innen- und Außenbauteile WU-Beton			nach ZTV-K 88 / 96 für Verkehrsbau- teilen
Betongruppe		I	II	II	II
Festigkeitsklasse		B 25	B 35	B 45	B 35
Konsistenz		KR	KR	KR	KP
Ze- ment	Art DIN 1164/1	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R	CEM III-B 32,5 NWHS
	Gehalt kg/m³	270	280	350	340
Was- ser	Gehalt kg/m³	175	175	180	170
w/z bzw. $\frac{w}{z+0,4f}$		0,60	0,58	0,50	0,50
Zu- schlag	Art Sieblini- enbereich Größtkorn	NSK A/B 22	NSK A/B 22	NSK A/B 22	NSK A/B 22"
	Gehalt trocken kg/m³	1850	1845	1805	1870
Zusatz- stoff	Art	FA	FA	FA	-
	Gehalt kg/m³	60	60	30	-
Zu- satz- mittel	Art	BV	BV	BV	BV
	Gehalt kg/m³	0,5	0,5	0,6	0,3
Festig- keitsent- wicklung		m	m	m	I

Zeichenerklärung Zuschlag

N = Natursand (eF)

S = Kalksteinsplitt (eF)

K = Kies (eF)

* eFT eQ nach DIN 4226

Zeichenerklärung Zusatzstoff und Zusatzmittel

FA = Flugasche

BV = Betonverflüssiger

Zeichenerklärung Festigkeitsentwicklung

m = mittel

I = langsam

Die folgenden Versuche wurden bereits in [19] durchgeführt; die Ergebnisse können dort nachgelesen werden:

- Ermittlung der Rückprallwerte mit dem Schmidthammer nach 9 und nach 28 Tagen
- Visuelle Beurteilung der Betonoberflächen direkt nach dem Ausschalen und nach 2 Tagen
- Wasserundurchlässigkeit an Bohrkernen mit $\varnothing$ 150 mm nach 33 Tagen
- Verschleißprüfung nach Böhme mit Würfeln von 71 mm Kantenlänge nach 36 Tagen
- Haftzugfestigkeit der Oberfläche an den Probewänden nach 28 Tagen
- Kapillare Wasseraufnahme an Bohrkernen mit $h = 65$ mm, $d = 100$ mm nach 36 Tagen
- Chlorideindringung an den Bohrkernen

Untersuchungen an und mit der SB:

- Messung der drainierten Wassermenge und Bestimmung des pH-Wertes
- Wasseraufnahme der SB in neuem und in gebrauchtem Zustand
- Aufnahme von Feinstbestandteilen sowie visuelle Beurteilung der SB nach dem Ausschalen
- Haftung der SB an der Betonoberfläche nach dem Ausschalen

Außerdem wurde untersucht:

- Frischbetonprüfungen – wie Ausbreitmaß, Luftporengehalt im LP-Topf, Temperatur und Rohdichte
- Druckfestigkeit von normgerecht hergestellten Würfeln mit Kantenlänge von 150 mm nach 28 Tagen
- Druckfestigkeit von Bohrkernen mit den Abmessungen $h = d = 100$ mm nach 33 Tagen
- Wasserundurchlässigkeit an normgerecht hergestellten WU-Platten nach 28 Tagen

5. Gegenstand der vorliegenden Diplomarbeit

Gegenstand dieser Diplomarbeit ist die vergleichende Untersuchung von Betonoberflächen, die mit bzw. ohne Einsatz einer SB geschalt wurden.

Um auf das Langzeitverhalten solcher Betonbauteile schließen zu können, werden zum Teil in [19] bereits durchgeführte Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit noch einmal wiederholt.

Die Ergebnisse der früheren und der neu durchgeführten Prüfungen können unter Umständen auch differieren, weil die Hydratation ein zeitabhängiger Prozeß ist, der über Jahre hinweg andauern kann (siehe Kap.2.1.2).

Die folgenden Untersuchungen sind Bestandteil dieser Diplomarbeit:

- Widerstand der Betonoberfläche gegen chemischen Angriff durch Essig- und Salpetersäure an Bohrkernen Ø100mm
- Frost-Tausalz-Beständigkeit der Betonoberfläche nach CDF-Test an Bohrkernen Ø100mm
- Frost-Tausalz-Beständigkeit der Betonoberfläche mit stehenden Zylindern mit Randeinfassung an Bohrkernen Ø100mm
- Wasserundurchlässigkeit an Bohrkernen Ø150mm
- Abzugfestigkeit der Betonoberfläche an den Wänden
- Festigkeitsprüfung mit dem Rückprallhammer an den Wänden
- Permeabilität (Durchlässigkeit) der Wände
- Carbonatisierung an Bohrkernen Ø100mm
- Verlauf der Rohdichte und des Sättigungswertes im Bauteilinneren mit Hilfe von Scheiben, die aus Bohrkernen Ø100mm entnommen wurden
- Druckfestigkeit von Bohrkernen Ø100mm
- Elektronenmikroskopische Untersuchung der Betonoberflächen

6. Versuche

6.1 Widerstand der Betonoberfläche gegen chemischen Angriff

Die Beurteilung der Stärke einer Säure kann anhand des pH-Wertes erfolgen. Dieser ist definiert als „der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration C_{H^+} (...). Eine 0,01N Salzsäure (N=normal) enthält 0,01g H^+ -Ionen im Liter, hat also einen pH-Wert von $-\lg 0,01 = 2$.“ [25 S.289]

6.1.1 Versuchsablauf

Der Versuch wurde 113 Tage nach dem Betonieren der Wände begonnen. Von jeder Wand wurde ein Bohrkern mit $\varnothing 100\text{mm}$ durch zwei horizontale Schnitte in drei Teile gesägt, so daß drei Zylinder – zwei mit 7cm Höhe und einer geschalteten Grundfläche und ein Mittelstück mit 10 cm Höhe – entstanden. Von den beiden 7 cm hohen Zylindern besaß jeder eine geschaltete Grundfläche; der eine eine mit SB hergestellte, der andere eine mit Holzschalung hergestellte Grundfläche. Der 10 cm hohe Zylinder wurde beiseite gelegt und für die in Kapitel 6.9 beschriebene Prüfung der Druckfestigkeit verwendet. Durch das Sägeblatt kam es bei jedem Schnitt zum Verlust eines 3 mm breiten Streifens.

Bei den beiden anderen Zylindern wurde die Mantelfläche und der äußere Rand der geschalteten Grundfläche durch zweimaliges Streichen mit zweikomponentigem Epoxidharz (MC-DUR 1200 VK, MC-Bauchemie, Bottrop) abgedichtet. Für den Säureangriff verblieb so eine kreisrunde geschaltete Fläche mit 8,5 cm Durchmesser. Die Massen (Waage: MC1, Sartorius, Karlsruhe) und die Ultraschalldurchgangszeit (Gerät: Pundit, Form + Test, Riedlingen) wurden vor der Lagerung in Säure aufgenommen. Da die Veränderung der Oberfläche untersucht werden sollte, wurde die Ultraschallmessung ohne Verwendung eines Gels durchgeführt.



Für den Versuch sollten 5%-ige Säuren verwendet werden. Deshalb mußten die ursprünglich 100%-ige Essigsäure (Merck-Schuchardt, Hohenbrunn) und die 65%-ige Salpetersäure (Merck, Darmstadt) mit destilliertem Wasser verdünnt werden. Der pH-Wert der Säuren wurde mit einem pH-Meter (HI 9025 microcomputer, HANNA instruments, Kehl am Rhein) gemessen.

Alle acht Zylinder – die mit SB und die ohne – wurden auf Abstandhaltern aus Edelstahl mit der geschalteten Fläche nach unten in die Säure gestellt; die Zylinder mit bzw. ohne SB jeweils in getrennte Behälter. Zum Schutz vor Verdunstung wurden die Kunststoffbehälter verschlossen. Die Raumtemperatur betrug konstant 20 °C.

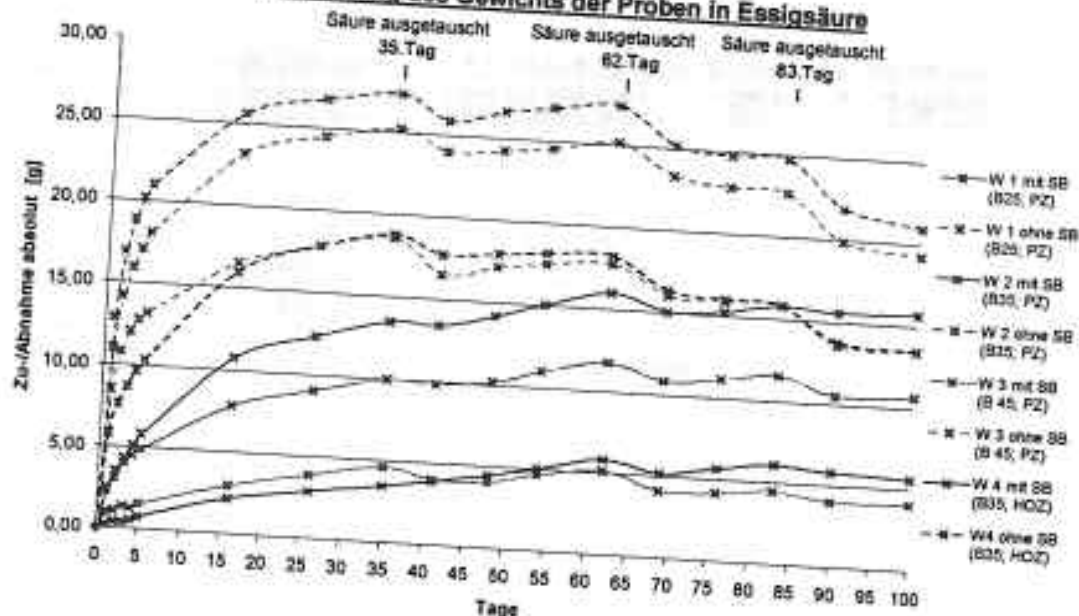
Die obige Versuchsanordnung wurde sowohl für die Lagerung in Essigsäure, als auch für die in Salpetersäure vorgenommen; insgesamt wurden für den Versuch also 16 Zylinder in zwei Säuren gelagert.

In unregelmäßigen Zeitabständen wurden die Massen, Ultraschalldurchgangszeit und die pH-Werte aufgenommen.

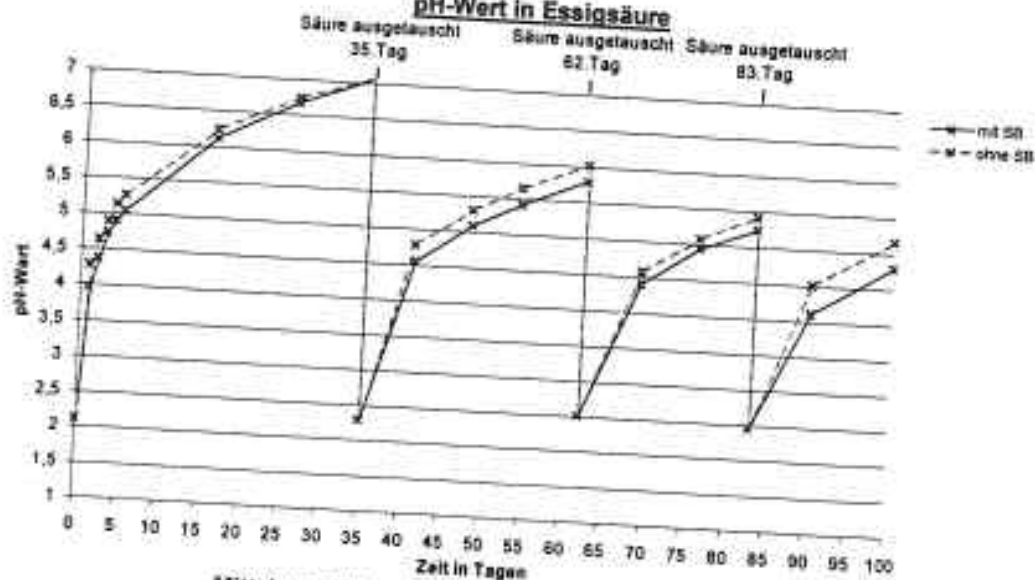
Da die Messung der pH-Werte einen allmählichen Abbau der Stärke der Essig- und Salpetersäure ergab (Abnahme der H^+ -Ionen-Konzentration), mußten die Säuren im Laufe der Versuchsdurchführung ausgewechselt werden.

6.1.2 Ergebnisse

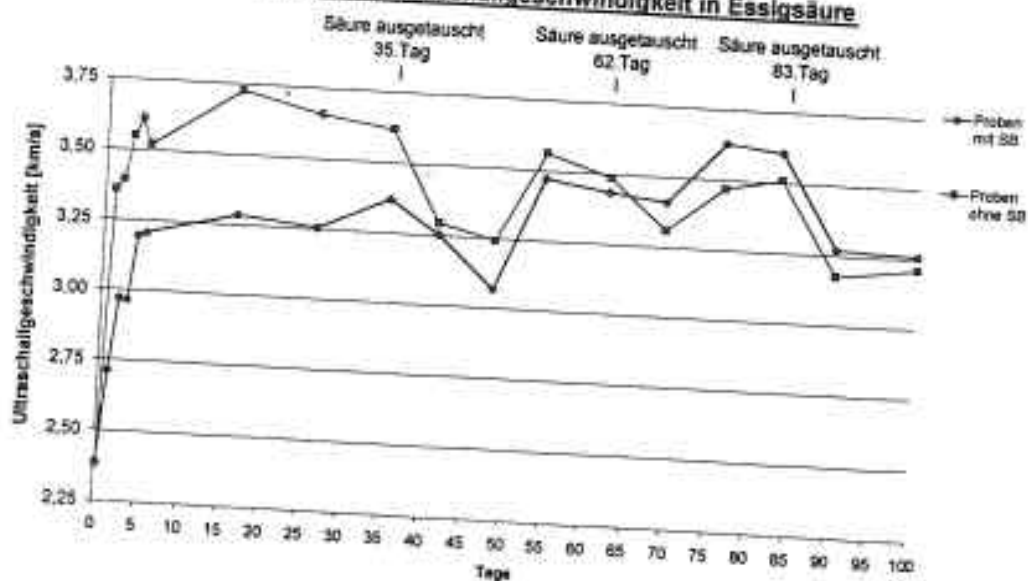
Entwicklung des Gewichts der Proben in Essigsäure



pH-Wert in Essigsäure



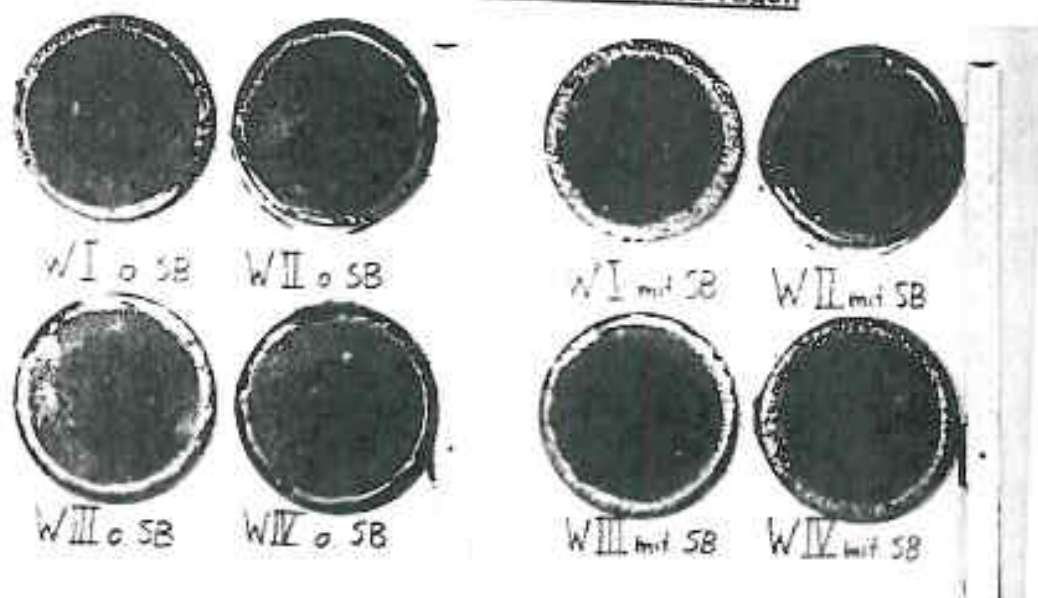
Mittelwert Ultraschallgeschwindigkeit in Essigsäure



Proben in Essigsäure nach 48 Tagen

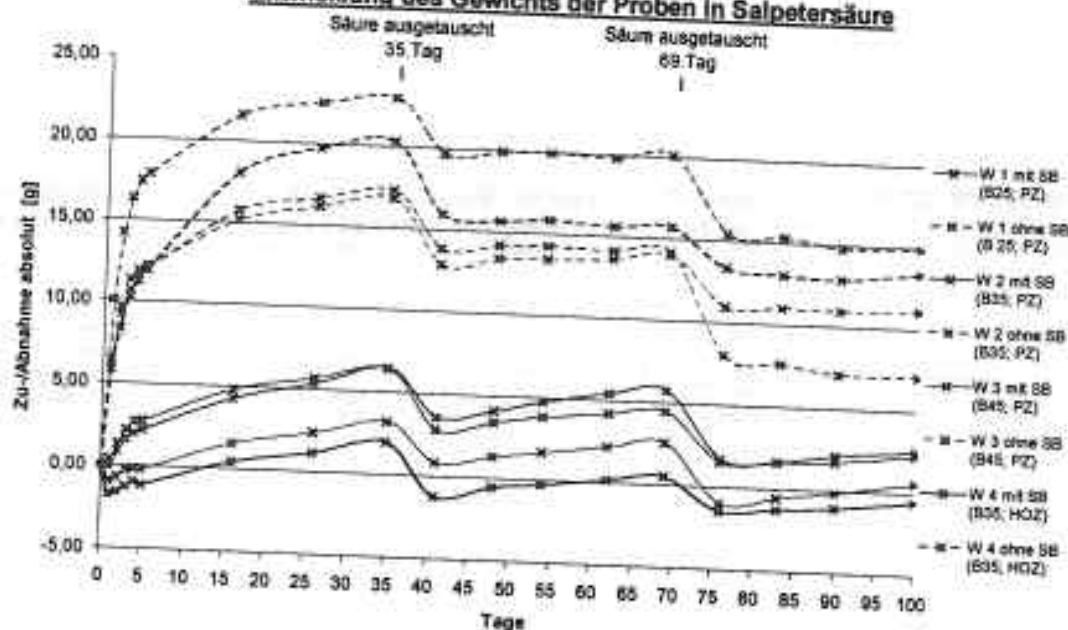


Proben in Essigsäure nach 102 Tagen

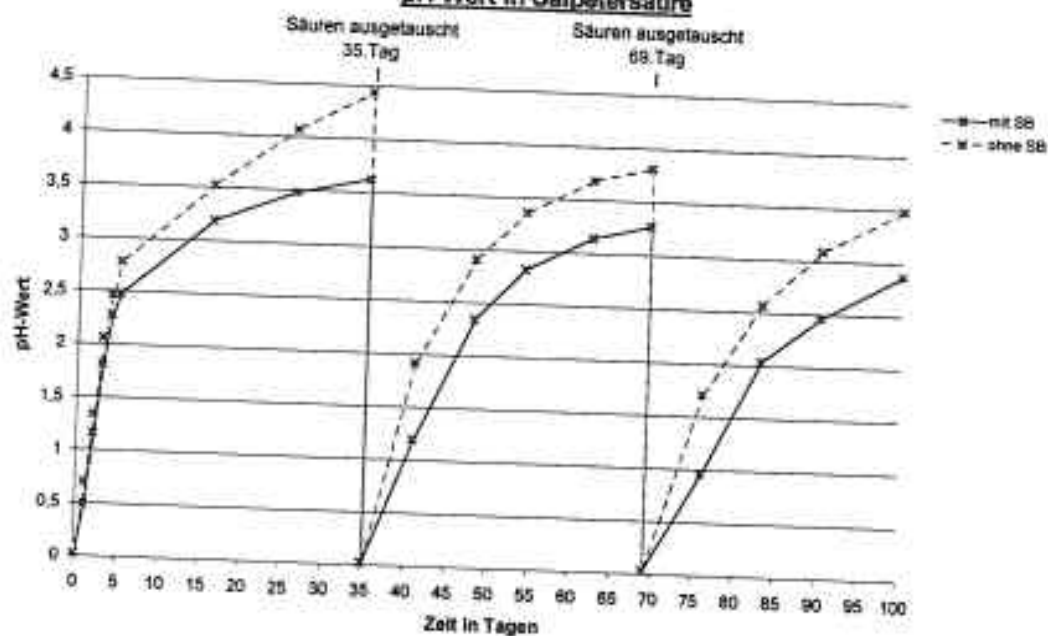


- optischer Farbunterschied aufgrund unterschiedlicher Fotoapparate

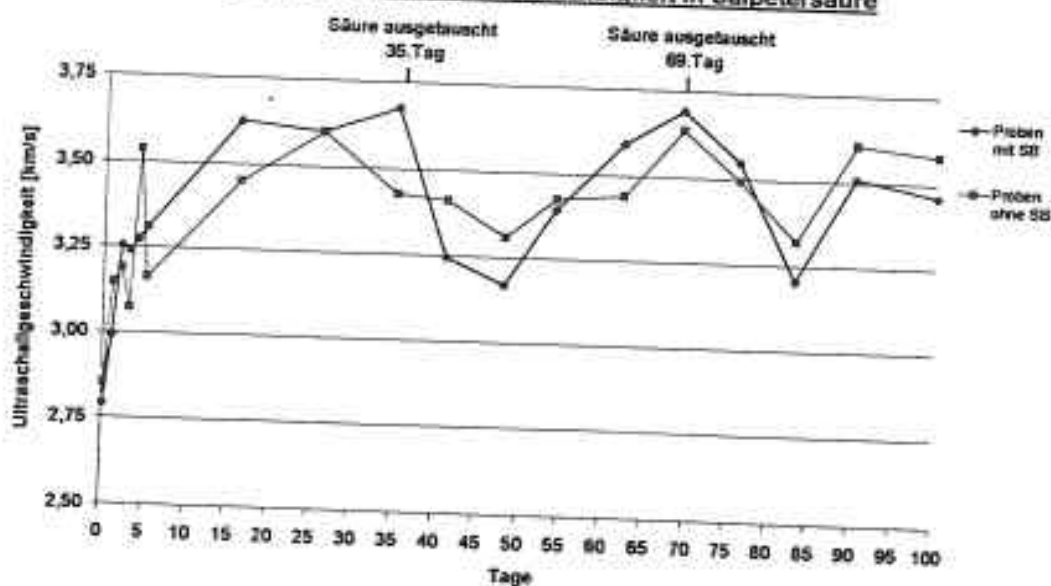
Entwicklung des Gewichts der Proben in Salpetersäure



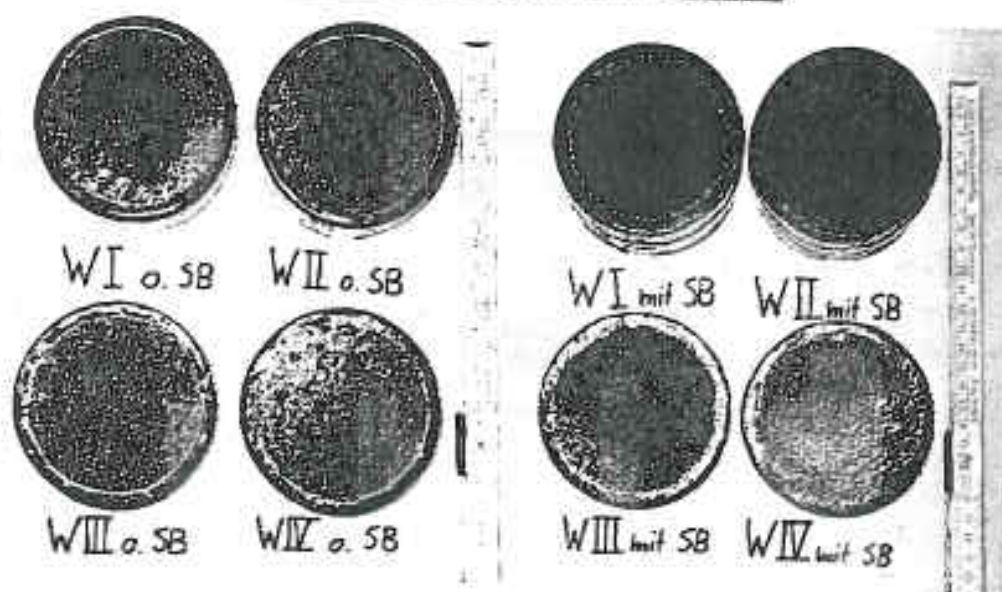
pH-Wert in Salpetersäure



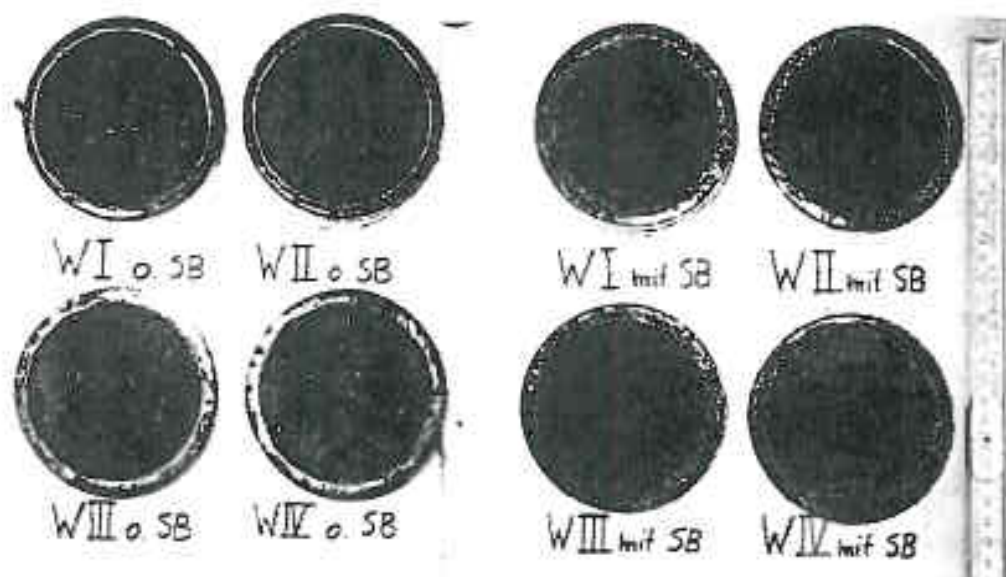
Mittelwert Ultraschallgeschwindigkeit in Salpetersäure



Proben in Salpetersäure nach 48 Tagen



Proben in Salpetersäure nach 102 Tagen

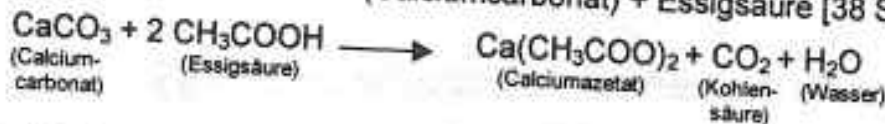


- optischer Farbunterschied aufgrund unterschiedlicher Fotoapparate

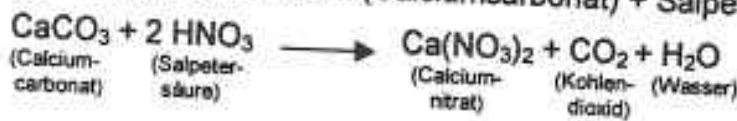
6.1.3 Auswertung

In chemischen Gleichungen ausgedrückt, läßt sich der Angriff durch Essig- bzw. Salpetersäure wie folgt darstellen:

Reaktionsgleichung von Kalkstein (Calciumcarbonat) + Essigsäure [38 S.42]:



Reaktionsgleichung von Kalkstein (Calciumcarbonat) + Salpetersäure:



- Beim Einlegen der Probekörper in die Säuren wurde Gasentwicklung wahrgenommen; es ist davon auszugehen, daß es sich dabei um CO_2 handelte.
- Am ersten Tag nach dem Einlegen der Proben und nach jedem Säureaustausch wurde eine bräunliche Färbung der anfangs farblosen Essigsäure festgestellt, die im Laufe der Zeit intensiver wurde.
Bei der Salpetersäure wurde eine leichte gelbliche Verfärbung wahrgenommen.
- Auf den Oberflächen der Proben in Salpetersäure wurde am 16.Tag die Bildung eines braunen Belages beobachtet. Dieser war - wie aus den nachfolgenden Aufnahmen ersichtlich wird - bei den Bohrkernen ohne SB wesentlich stärker. Es kann davon ausgegangen werden, daß es sich hierbei um Oxidationsprodukte aus dem Beton handelte.
- Die Proben ohne SB in Salpetersäure zeigten als erste einen optisch deutlich erkennbaren Angriff. Zu Versuchsende war die Beschädigung der Betonoberflächen bei diesen Probekörpern am weitesten fortgeschritten.

Die durchschnittliche Flüssigkeitsaufnahme bis zu diesem Zeitpunkt betrug 3,3 g bei den Proben mit SB und 16 g bei den Proben ohne SB.

Die durchschnittliche Abnahme des Gewichts infolge des Säureaustausches betrug 3,1 g bei den Proben mit SB und 4 g bei den Proben ohne SB.

Mit Hilfe der bekannten Dichte kann das Volumen der in den Proben befindlichen Flüssigkeit berechnet werden. Hieraus kann der aus dem Austausch der Säuren resultierende Gewichtsverlust ermittelt werden.

Dabei ergibt sich, daß dieser Aspekt allein als Grund für die Gewichtsabnahme nicht ausreichend ist. Außerdem fällt auf, daß der Gewichtsverlust bei den Proben mit SB und bei den Proben ohne SB nahezu gleich ist, obwohl die Körper ohne SB viel mehr Flüssigkeit aufgesaugt haben.

Ein weitere mögliche Erklärung liegt darin, daß die zur Abschwächung der Säure benötigten OH⁻-Ionen aus dem Beton selbst stammen und sich dadurch das Gewicht der Proben verringert.

Außerdem besteht die Möglichkeit, daß der Gewichtsverlust der Proben durch Osmose zustande kam. Dieser Begriff bezeichnet die einseitige Bewegung des Lösungsmittels geringerer Konzentration durch eine semipermeable Membran, welche zwei Flüssigkeitsportionen mit unterschiedlicher Konzentration eines gelösten Stoffes trennt, in den Bereich höherer Konzentration [40 S.243].

Die Betonproben könnten als eine solche Membran gewirkt haben und dadurch die schwache Säure den Proben entzogen worden sein.

Die Konzentrationsdifferenz zwischen den Lösungen beeinflußt die osmotische Flüssigkeitsaufnahme der schwachen durch die starke Säurelösung [40 S.243]. Dadurch könnte erklärt werden, weshalb die Gewichtsabnahme aller Proben in Salpeter – bzw. Essigsäure immer in etwa gleich groß war und nicht von der zuvor aufgenommenen Flüssigkeitsmenge durch die Proben abhing.

Durch den lösenden Angriff (siehe Kap.3.1.1) könnte zusätzlicher Porenraum geschaffen worden sein, der die kapillare Saugfähigkeit erhöht haben könnte.

Dies würde erklären, warum die Proben über einen solch langen Zeitraum Flüssigkeit aufsaugten.

Welche der in Betracht kommenden Erklärungen letztlich die zutreffende Lösung für den aufgetretenen Gewichtsverlust bietet, kann nicht mit abschließender Sicherheit gesagt werden.

- Der Verlauf der pH-Werte zeigt, daß bei den Proben ohne SB die „Stärke“ der Säure schneller abgebaut wird. Insgesamt befanden sich die Proben mit SB also über einen längeren Zeitraum in einer stärkeren Säure.

- Aus der Ultraschallmessung läßt sich demgegenüber verhältnismäßig wenig ablesen. Dies liegt zum Teil daran, daß bei der Messung der Druck, mit dem Sender und Empfänger des Ultraschallgerätes auf die Betonoberflächen angepreßt werden, von der prüfenden Person abhängt. Diesem Problem hätte durch eine Einspannvorrichtung, die bei jeder Messung exakt denselben Druck erzeugt, begegnet werden können.

Aber auch das Schleifen der Sägeflächen der Probekörper, das beim Frost-Tausalz-Versuch durchgeführt wurde und dort glatte Flächen lieferte, wäre von Vorteil gewesen.

Aus der Bildung des Mittelwertes über alle Proben ergibt sich, daß das starke anfängliche kapillare Saugen zu einem Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit führt. Durch die Säure im Betonkörper wurde vermutlich dessen Leitfähigkeit verbessert.

Möglicherweise hat der Austausch der Säuren eine Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit bewirkt, was daher kommen könnte, daß sich nach dem Austausch weniger die Leitfähigkeit verbessernde Flüssigkeit in den Proben befand.

Hierdurch würde die Theorie der Osmose unterstützt.

6.2 Frost-Tausalz-Beständigkeit

Für die Untersuchung der Frost-Tausalz-Beständigkeit gibt es international mehrere Normen und Richtlinien. Ein Überblick befindet sich bei Setzer [6 S.9].

Die Frost-Tausalz-Beständigkeit der Oberflächen wurde durch zwei verschiedene Prüfverfahren untersucht, die im Folgenden beschrieben werden. Bei beiden Varianten wurde gewissermaßen versucht, die Gegebenheiten in der Natur im „Zeitraffer-Verfahren“ zu simulieren, wobei davon auszugehen ist, daß die Beanspruchung des Betons im Versuch größer ist als die, die in der Praxis vorkommt. Trotzdem kann aus dem Verhalten der Proben bei den extremen Belastungen zumindest auf die Tendenz zu guter oder weniger guter Frost-Tausalz-Beständigkeit unter natürlichen Bedingungen geschlossen werden.

6.2.1 CDF-Test

(„Capillary suction of De-icing solution and Freeze thaw test“ = „Kapillares Saugen von Taumittellösung und Frost-Tau-Test“) [5 S.42]

6.2.1.1 Versuchsablauf

Der Versuch besteht aus drei Schritten: Der Trockenlagerung (diese konnte hier entfallen, da die Proben bis zur Prüfung bereits im Labor lagerten), der Vorsättigung durch kapillares Saugen und den Frost-Tau-Wechseln (FTW).

Durch ein Vorgehen wie in der Untersuchung des Säurewiderstandes (Kap.6.1.1) beschrieben, wurden 8 seitlich mit Epoxidharz beschichtete 7 cm hohe Zylinder aus Bohrkernen ($\varnothing 100\text{mm}$) der vier Wände gewonnen, jeweils vier mit und vier ohne SB geschalte. Auf der Grundfläche der Zylinder verblieb eine runde unbeschichtete Fläche mit 8,5 cm Durchmesser.

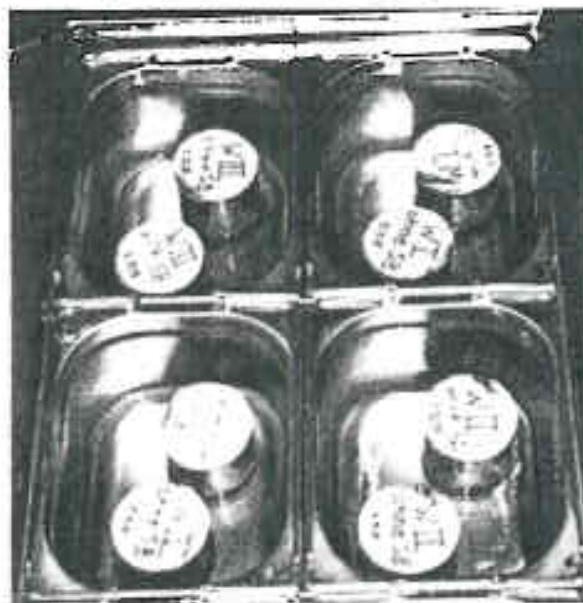
Während des Versuchs wurden die Proben mit der geschalteten Fläche nach unten (deshalb bezeichnet man diese Methode auch als „Up-Side-Down-

Methode" [11 S.51]) in verschlossenen Edelstahlbehältern gelagert - jeweils zwei Zylinder von jeder Wand in einem Behälter. In den Behältern befand sich die Prüfflüssigkeit aus 3 Massenprozent Natriumchlorid (gewöhnliches Speisesalz) und 97 Massenprozent destiliertem Wasser. Zum Auffangen der Abwitterungen dienten Uhrgläser unter den Proben. Auf diese wurden 10 mm hohe Abstandhalter eingelegt. So wurde eine definierte Höhe der Flüssigkeitsschicht zwischen der Prüfläche und den Uhrgläsern erzielt. In die Behälter wurde so viel NaCl-Lösung gefüllt, daß die Eintauchtiefe der Proben 5 mm betrug. Um diese Tiefe exakt zu erreichen, wurden zuerst 680 ml in den Behälter gefüllt und anschließend die überschüssige Flüssigkeit mit Hilfe einer Pipette mit Abstandhalterung abgesaugt.

Vor der Befrostung wurden die Proben 8 Tage lang bei einer Temperatur von 20°C mit Prüfflüssigkeit vorgesättigt. Dazu diente derselbe Versuchsaufbau. Die Gewichtszunahme wurde dabei gemessen.

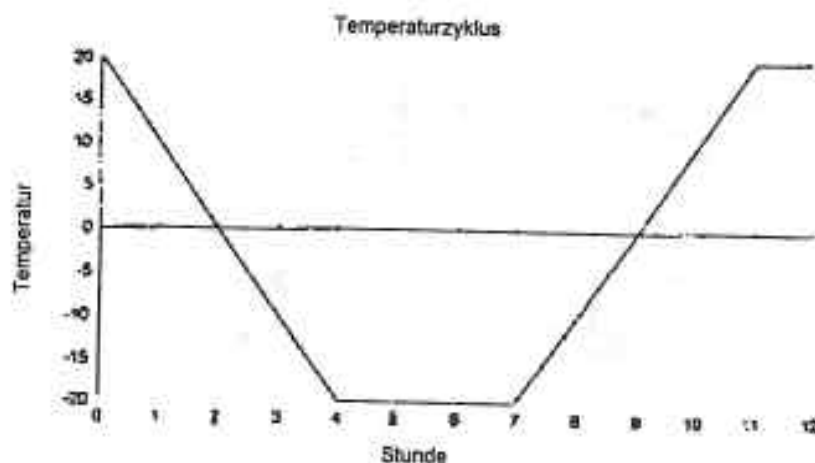
Mit der Vorsättigung wurde 165 Tage nach dem Betonieren der Wände begonnen.

Versuchsaufbau CDF



Es wurden 28 FTW in einer temperaturkontrollierten Prüfruhe (CDF-Prüfruhe, Schleibinger Geräte, Buchbach) durchgeführt.

Ein FTW-Zyklus dauerte 12 Stunden und sah folgendermaßen aus: [5 S.50]



Während des Versuchs wurden die Ist-Temperaturen im Flüssigkeitsbad, auf der Oberfläche und im Kern eines zusätzlichen Probekörpers gemessen.

Am Boden der Truhe fließt ein Flüssigkeitskühlbad aus Wasser und einem Kühlmittel (Tyfocor, Metasol Chemie GmbH, Schönebeck), dessen Temperatur von der Truhe gesteuert wird. Die Edelstahlbehälter wurden in die Halterung der Truhe eingehängt, so daß die Eintauchtiefe etwa 2 cm betrug. Da die Temperatur des Kühlbades an der Ein- und Ausflußstelle des Kühlbades nicht identisch ist, wurden die Behälter regelmäßig vertauscht.

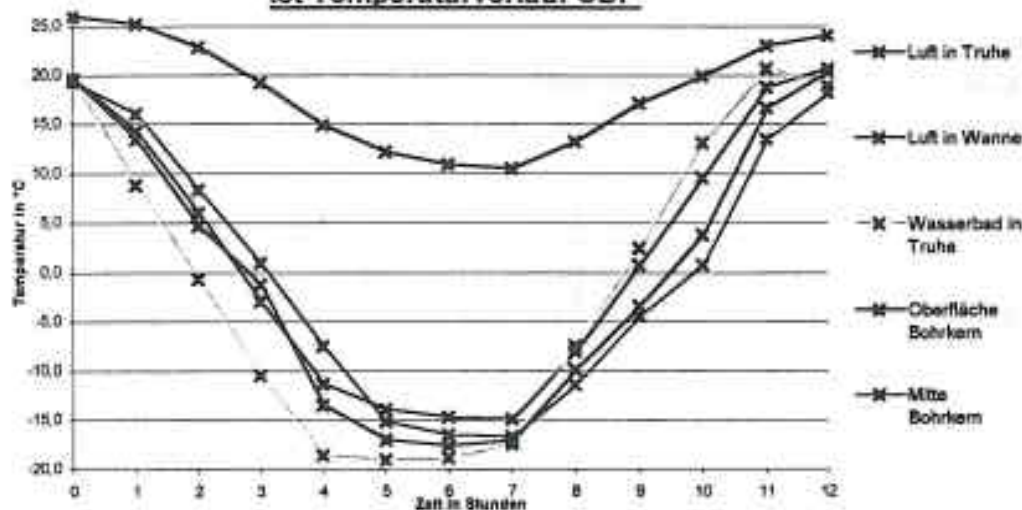
Nach 4,8,14,28 FTW wurden die Veränderungen aufgenommen.

Dazu wurden – als die Temperatur in der Truhe 20°C betrug – die Behälter entnommen. Um noch lose anhängende Teilchen zu lösen, wurden die Proben in einem Ultraschallbad (Sonorex Super RK514, Bandelin GmbH & Co KG, Berlin) drei Minuten lang gereinigt; die Abwitterungen in einem Filterpapier gesammelt, anschließend 24 Stunden bei 110°C getrocknet (Trockenofen Mod. 600, Memmert, Schwabach) und danach gewogen. Die Proben wurden oberflächlich abgetrocknet, gewogen und die Ultraschall-Durchgangszeit (Mod. Pundit, Form + Test, Riedlingen) durch die Zylinder ermittelt.

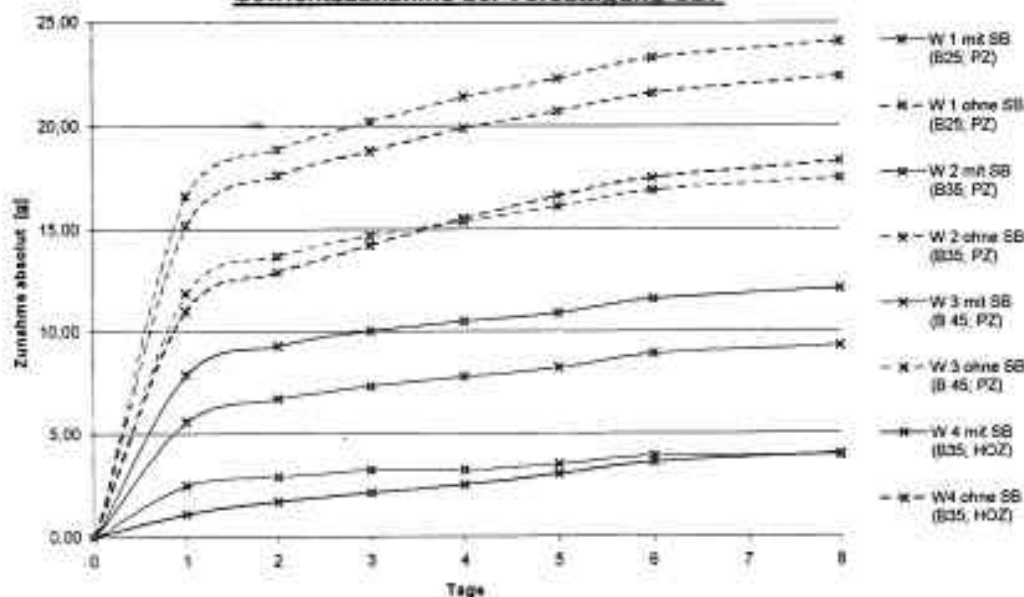
Nach jeder Aufnahme wurde neue Prüfflüssigkeit in die Behälter gegeben.

6.2.1.2 Ergebnisse

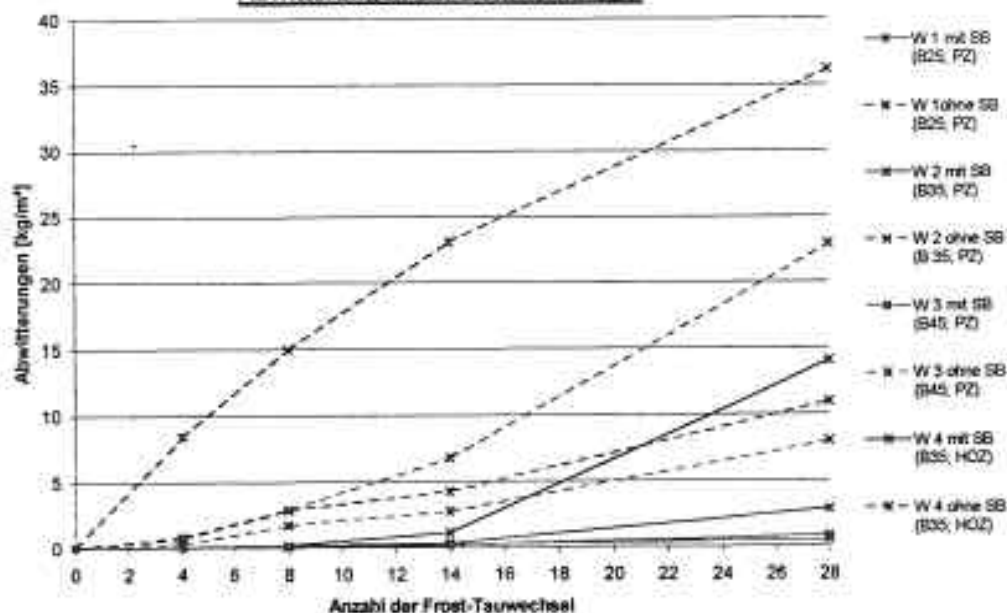
Ist-Temperaturverlauf CDF



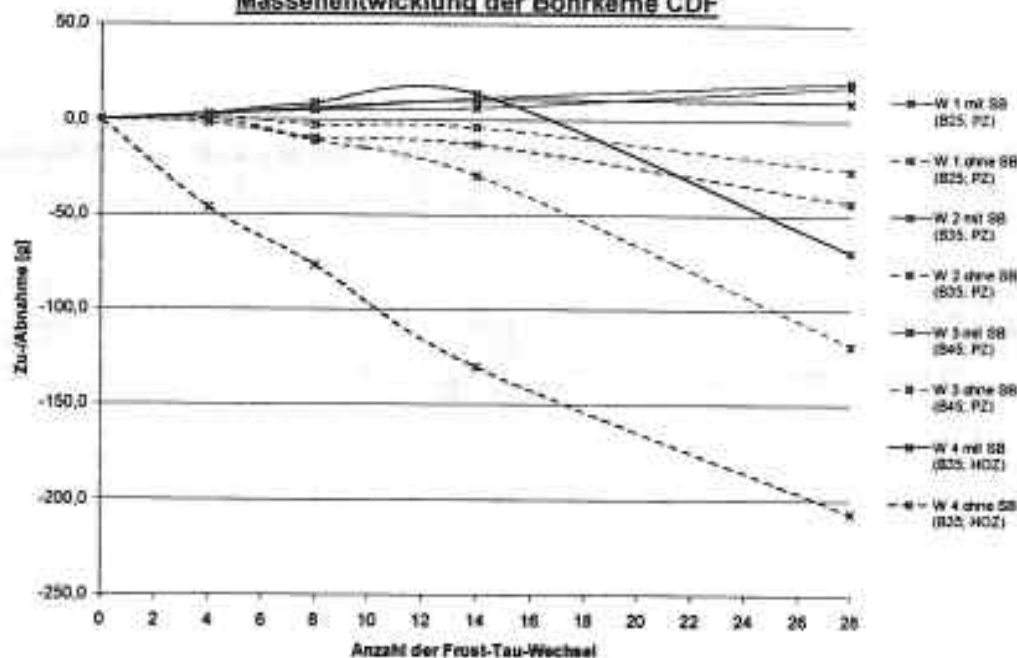
Gewichtszunahme bei Vorsättigung CDF



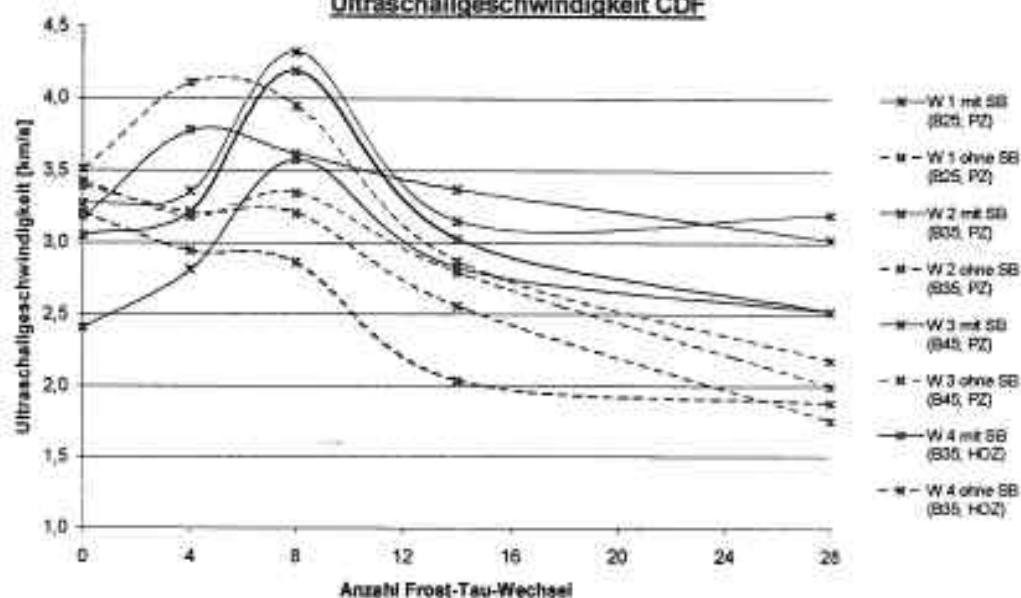
Abwitterungen der Bohrkern CDF



Massenentwicklung der Bohrkern CDF



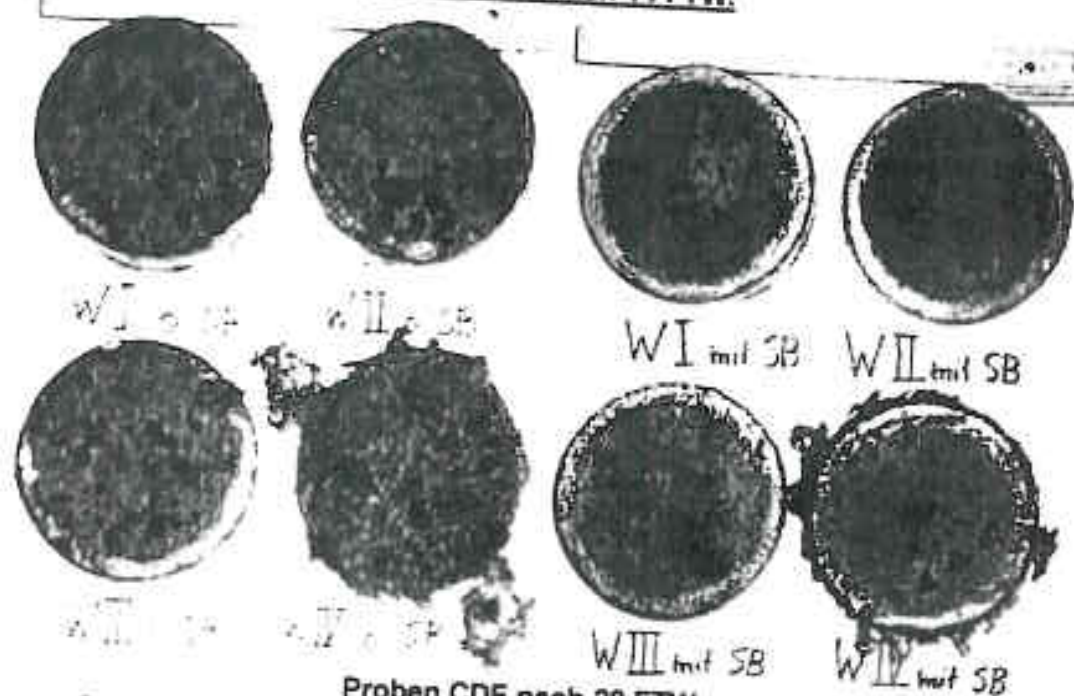
Ultraschallgeschwindigkeit CDF



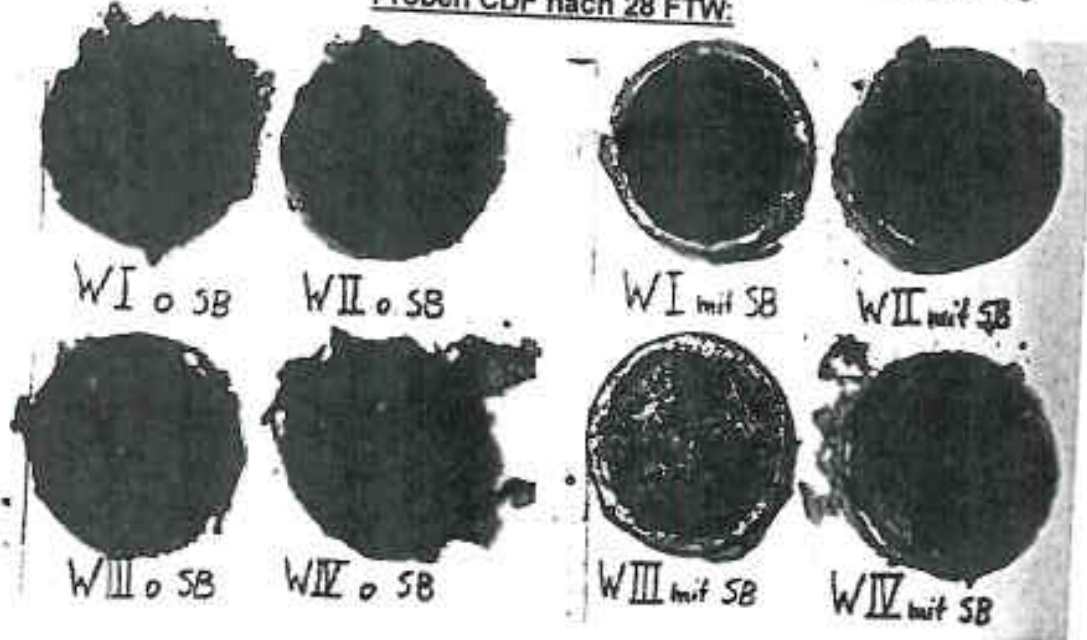
Proben CDF nach 4 FTW:



Proben CDF nach 14 FTW:



Proben CDF nach 28 FTW:



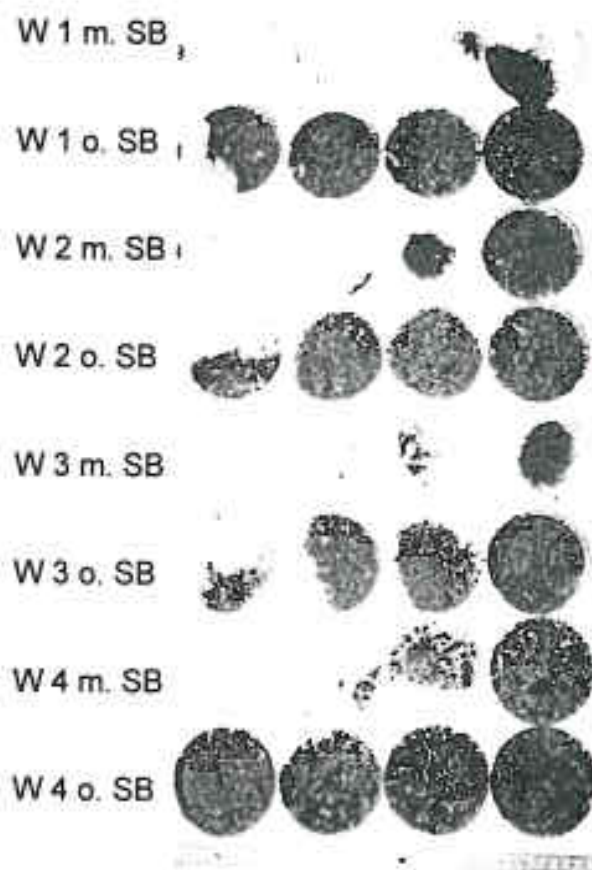
Ansicht Probekörper CDF nach 28 FTW



W 1 m. SB W 1 o. SB W 2 m. SB W 2 o. SB W 3 m. SB W 3 o. SB W 4 m. SB W 4 o. SB

In Glasschale gesammelte Abwitterungen bei CDF-Versuch:

4 FTW 8FTW 14 FTW 28 FTW



- optische Farbunterschiede aufgrund unterschiedlicher Fotoapparate

6.2.1.3 Auswertung

Das Diagramm „Gewichtszunahme bei Vorsättigung“ zeigt deutlich, daß die kapillare Saugfähigkeit der Probekörper mit SB viel geringer war, als die der Proben ohne SB, wobei die Proben der Wand 4 aus Hochofenzement am dichtesten waren.

Die Wasseraufnahme war bei allen Proben erwartungsgemäß am ersten Tag am größten.

Ausschlaggebend für die Schädigung ist nach Setzer [6 S.15] der Wassergehalt des Betons. Erst bei Erreichen eines kritischen Wassergehaltes kommt es zu Frostschäden. Dichter Beton ist somit also frostbeständiger.

Beim Gefrieren von Wasser kommt es zu einer Volumenausdehnung von rund neun Prozent [6 S.7]. Durch die Zugabe von NaCl wird der Gefrierpunkt des Wassers abgesenkt [35 S.16]. Dies bedeutet, daß bei derselben Temperatur weniger Flüssigkeit gefriert.

Jedoch wird die Beanspruchung des Betons durch die Zugabe von Taumitteln (zum Teil durch den in Kap.2.2.2 beschriebenen Effekt) größer. Bei einer 3%-NaCl-Lösung sind besonders starke Schäden zu erwarten [6 S.8].

Die Probekörper mit SB haben – bis auf die der Wand 4 – während der Versuchsdurchführung durch kapillares Saugen an Gewicht zugenommen; dies führte zu einem stetig größer werdenden Wassergehalt der Proben und somit zu einer immer höheren Beanspruchung.

Nach dem 14. FTW hatte bei allen Proben die seitliche Abdichtung versagt, was zur Folge hatte, daß nicht mehr nur die Oberflächen beansprucht wurden, sondern die kompletten Probekörper. Dies führte auch an den Mantelflächen zu Abwitterungen und die Angabe in g/m^2 ist ab diesem Zeitpunkt eigentlich nicht mehr korrekt. Bei der Probe von Wand 4 ohne SB war dies schon nach 4 FTW der Fall. Die Werte beziehen sich also auf die anfangs

vorhandene Prüffläche. Dies erklärt den deutlich erkennbaren Knick im Diagramm „Abwitterungen“.

Besonders negativ wirkte sich die Beschädigung der seitlichen Abdichtung auf die Probe „Wand 4 mit SB“ aus. Im Bild „Proben CDF nach 28 FTW“ auf S.43 ist erkennbar, daß – wie bei den anderen Proben mit SB – die Oberfläche des Zylinders kaum angegriffen wurde. Die starken Ablösungen kamen von der Mantelfläche.

Nach Hartmann [11 S.79] ergibt sich bei Portlandzementen in der Regel ein linearer Verlauf zwischen Abwitterungen und der Anzahl der FTW. Die Ergebnisse, die sich ergeben hätten, wenn die seitliche Abdichtung nicht versagt hätte, können somit durch Fortsetzen des linearen Verlaufs bis zum 14. FTW vermutet werden.

Der HOZ-Beton hat einen sehr schlechten Frost-Tausalz-Widerstand gezeigt, was zunächst verwundert, da er – was die Vorsättigung zeigte – eine besonders dichte Struktur besitzt. HOZ scheint das weniger geeignete Bindemittel für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand zu sein (siehe Kap.2.2.2).

Die am Beton anhaftenden losen Teilchen sowie die Wassersättigung haben Einfluß auf die Ultraschallmessung des Zustandes oberflächennaher Schichten [6 S.35]. Außerdem wird die Oberfläche durch die FTW während des Versuches immer unebener, was zu ungenaueren Meßwerten führt.

Laut Setzer [6 S.36] bewirkt die Zunahme der Sättigung mit Prüfflüssigkeit eine Verbesserung der Schallübertragung; demgegenüber verursacht die fortschreitende Auflockerung des Betongefüges infolge der FTW eine Verschlechterung der Schallübertragung.

Diese Aussage paßt gut zu den hier erhaltenen Ergebnissen (siehe Diagramm „Ultraschallgeschwindigkeit CDF“, S.42). Bei den Proben mit SB, die anfangs praktisch nicht beschädigt wurden und stattdessen weiterhin Flüssigkeit aufsaugten, stieg die Ultraschallgeschwindigkeit bis zum 8.FTW an. Bei den Probekörpern ohne SB, die bereits sehr früh beschädigt wurden, kam es dagegen (mit Ausnahme der Probe „Wand 1 ohne SB“) schon zu Beginn zu einer Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit.

6.2.2 Versuch mit stehenden Zylindern mit Randeinfassung

6.2.2.1 Versuchsablauf

Durch ein Vorgehen wie in der Untersuchung des Säurewiderstandes (Kap.6.1.1) beschrieben, wurden wieder 8 seitlich mit EP beschichtete 7 cm hohe Zylinder ($\varnothing 100\text{mm}$) aus Bohrkernen der vier Wände hergestellt, jeweils vier mit und vier ohne SB geschalte. Auf der geschalten Grundfläche der Zylinder verblieb eine runde unbeschichtete Fläche mit 8,5 cm Durchmesser. Diese der Witterung ausgesetzte Fläche der Zylinder wurde mit einer Randeinfassung versehen. Dazu diente ein 2 cm hoher Gummiring (WC-Abgangsverbindung, $\varnothing 100\text{mm}$) welcher so mit einer Rohrschelle befestigt wurde, daß er 1 cm über den Zylinder hinausragte. In diesen Rahmen wurde zur Vorsättigung 12 Tage vor Beginn der Befrostung eine 5 mm dicke Schicht aus der Prüfflüssigkeit (3%-ige NaCl-Lösung) gefüllt. Zum Einfüllen diente ein Dispenser.

Während der Vorsättigung wurde die Gewichtszunahme gemessen.

Es wurden 28 Frost-Tauwechsel in einer Klimatruhe mit Luftkühlung (DU11/300/40, Weiss Umwelttechnik GmbH, Reiskirchen-Lindenstruth) durchgeführt. Ein Frost-Tauwechsel dauerte 12 Stunden. Der eingestellte Soll-Temperaturverlauf war derselbe, wie bei der CDF-Prüfung (siehe Bild S.40).

Während des Versuchs wurden die Ist-Temperaturen in der Luft, in der Prüfflüssigkeit, auf der Oberfläche und im Kern eines zusätzlichen Probekörpers gemessen.

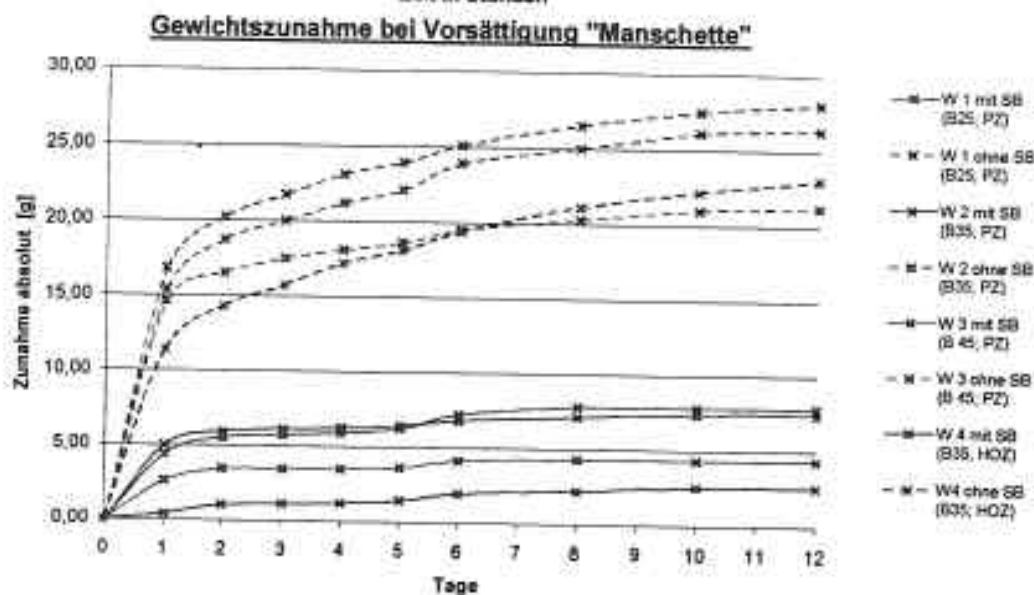
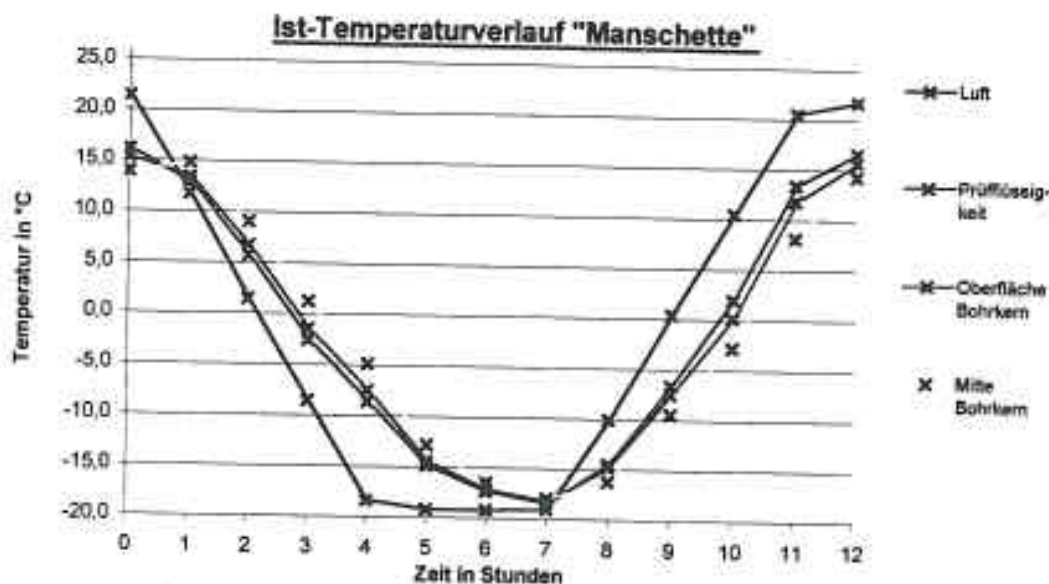
Da nur die Oberfläche befrosten werden sollte, wurden die Bohrkern rundum mit Styropor isoliert. Dazu wurden aus 10 cm hohen Styroporplatten (20 x 26 cm) in deren Ecken (2 cm vom Rand entfernt) Kreisstücke ausgesägt und so zugeschnitten und wieder eingeklebt, daß die Styroporoberfläche bündig mit der Betonoberfläche war.

Nach 4,8,14,28 Frost-Tauwechseln wurden die Veränderungen aufgenommen.

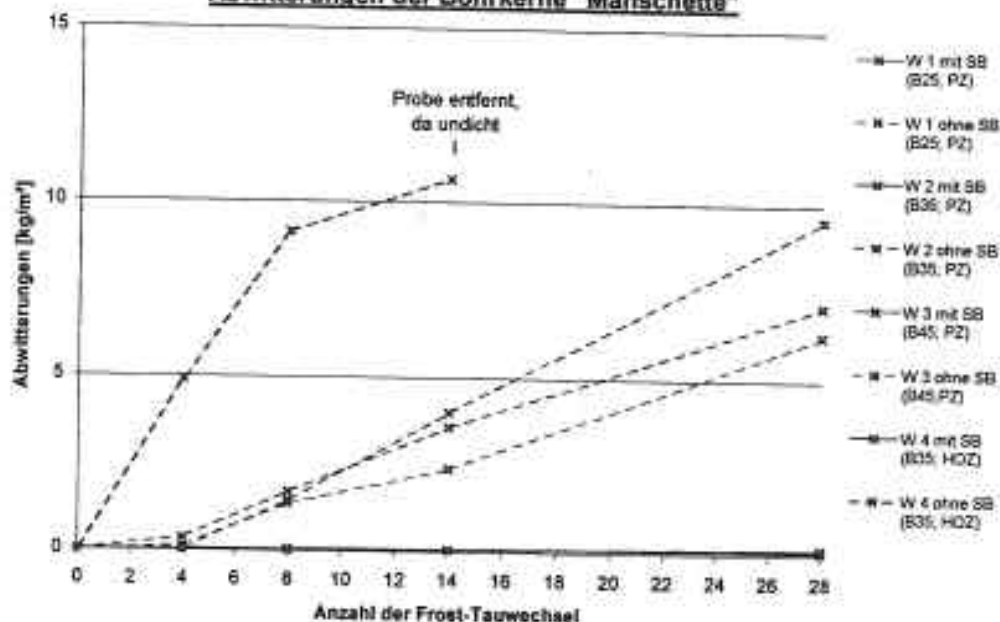
Die Proben wurden entnommen, als die Temperatur in der Truhe 20°C betrug. Um noch lose anhängende Teilchen zu lösen, wurden die Proben drei Minuten lang in einem Ultraschallbad gereinigt, die Abwitterungen in einem Filterpapier gesammelt, anschließend 24 Stunden bei 110°C getrocknet und danach gewogen. Die Proben wurden an der Oberfläche abgetrocknet, gewogen und die Ultraschall-Durchgangszeit durch die Zylinder ermittelt. Dabei wurden dieselben Geräte wie beim CDF-Test verwendet.

Nach jeder Aufnahme wurde neue Prüfflüssigkeit in die Randeinfassung gefüllt.

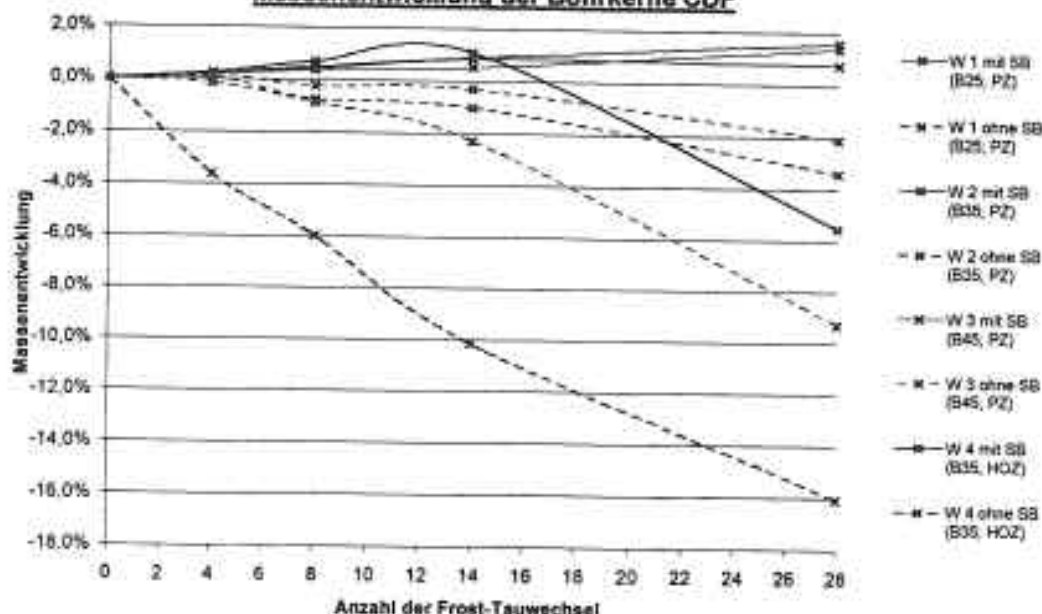
6.2.2.2 Ergebnisse



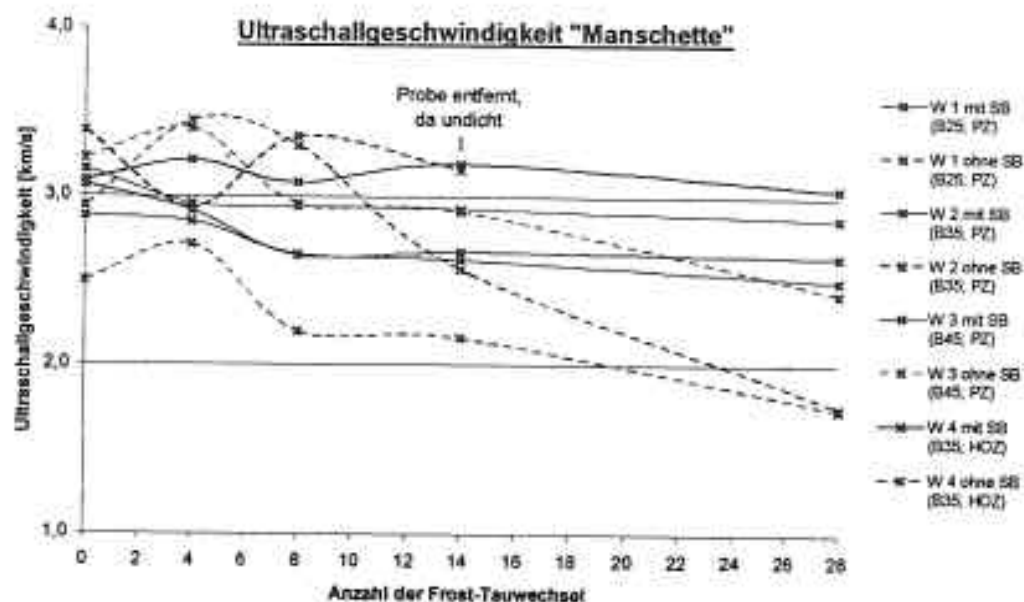
Abwitterungen der Bohrkerne "Manschette"



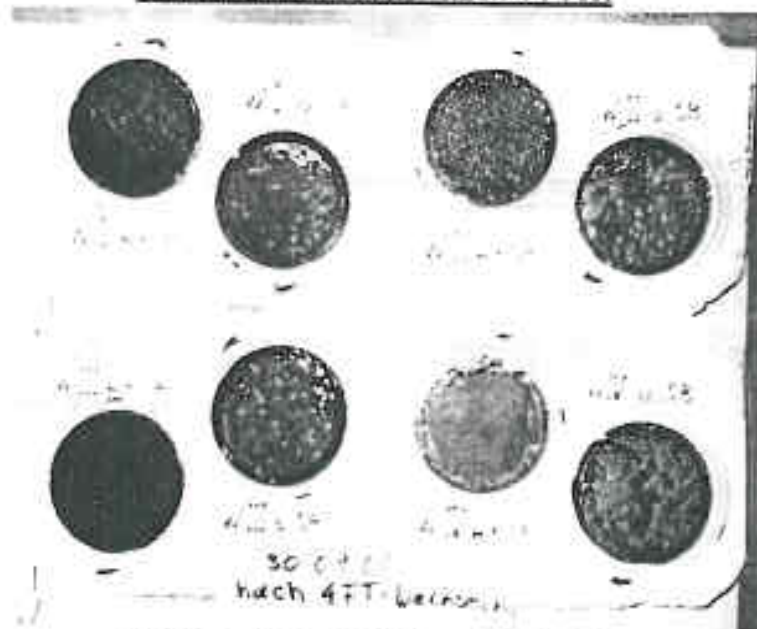
Massenentwicklung der Bohrkerne CDF



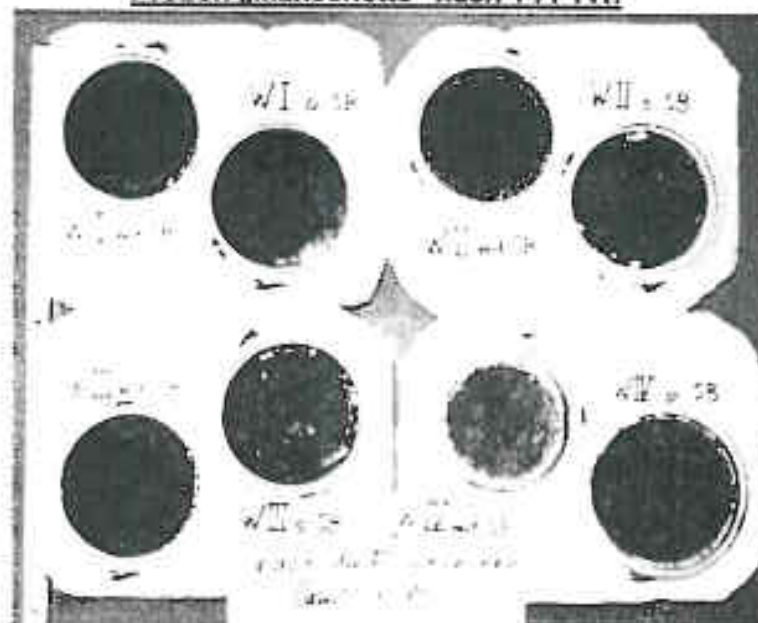
Ultraschallgeschwindigkeit "Manschette"



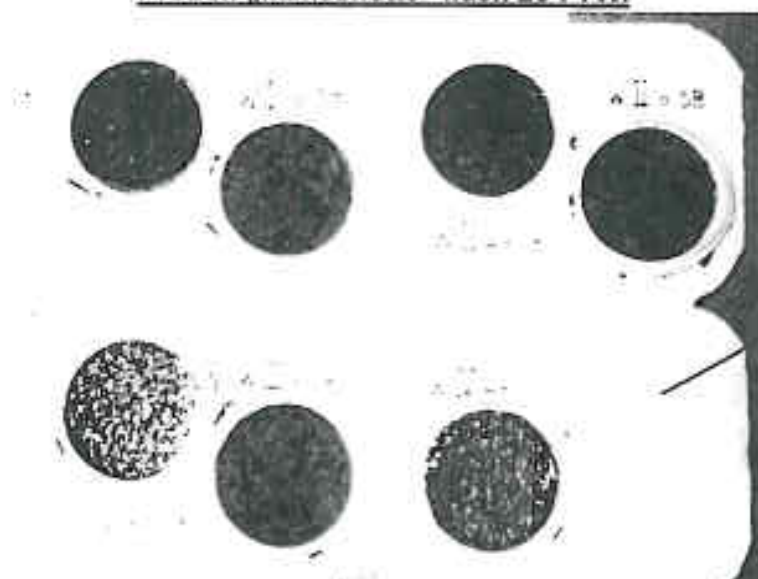
Proben „Manschette“ nach 4 FTW:



Proben „Manschette“ nach 14 FTW:



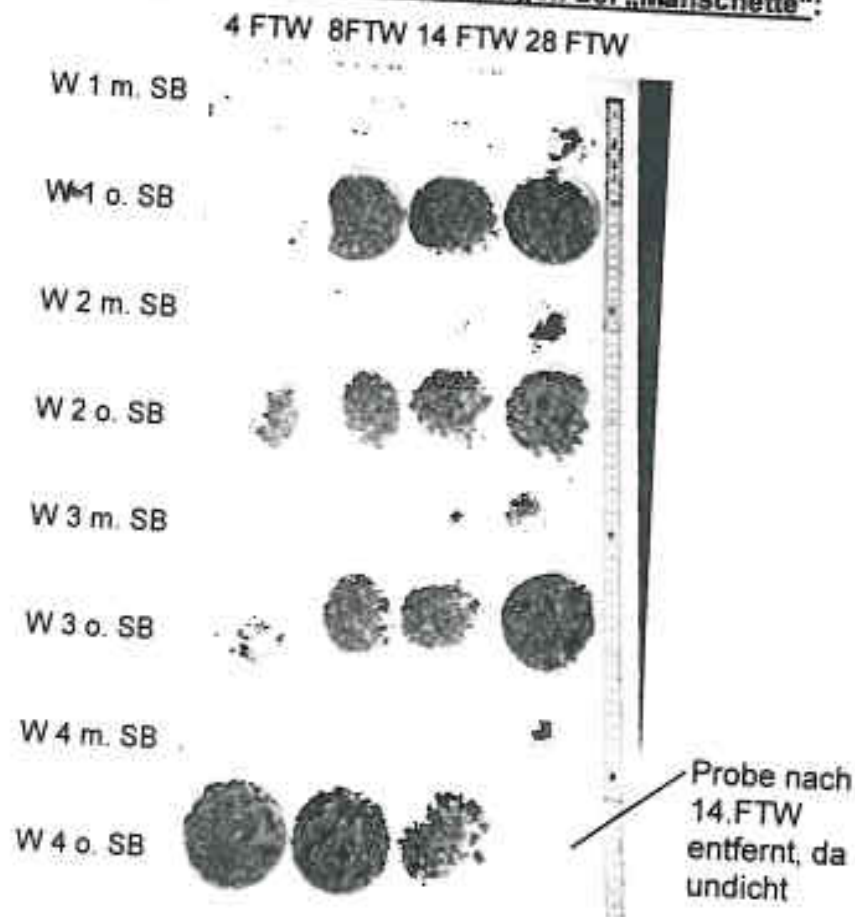
Proben „Manschette“ nach 28 FTW:



Ansicht Probekörper „Manschette“ nach 28 FTW:
(ohne Probe „W 4 o.SB“, da diese nach dem 14.FTW ausschied, weil undicht)



In Glasschale gesammelte Abwitterungen bei „Manschette“:



6.2.2.3 Auswertung

Die Vorsättigung verlief erwartungsgemäß ähnlich wie beim CDF-Versuch.

Bei der Probe „Wand 4 ohne SB“ mußte nach 14 FTW festgestellt werden, daß keine Prüfflüssigkeit mehr in der Gummimanschette vorhanden war. Sie war also zwischen dem 8. und 14.FTW undicht geworden. Deshalb flacht der

Verlauf der Abwitterung bei dieser Probe bereits nach dem 8.FTW ab. Sie war schon so rissig geworden, daß sie auch durch stärkeres Anziehen der Rohrschelle nicht mehr dicht zu bekommen war, so daß die Probe schließlich aus dem Versuch ausscheiden mußte.

Bei dieser Versuchsanordnung haben die Proben mit SB über die gesamte Dauer durch kapillares Saugen an Gewicht zugenommen. Durch die seitliche Isolierung mit Styropor wurde erreicht, daß tatsächlich vorrangig die Oberfläche der Proben beansprucht wurde. Die seitliche EP-Abdichtung versagte nicht.

Bei den Proben mit SB fielen fast keine Abwitterungen an.

Die Ultraschallgeschwindigkeiten der Proben mit SB blieben über die gesamte Versuchsdauer nahezu konstant; was dadurch erklärt werden kann, daß sie durch die FTW nur wenig angegriffen wurden und bis Versuchsende Flüssigkeit aufsaugten (vergleiche hierzu auch Kap.6.2.1.3).

Bei den Proben ohne SB kam es (bis auf „Wand 4 ohne SB“) ab dem 4.FTW – als der Grad der Zerstörung deutlich zunahm – zu einer Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeiten. Bei „Wand 4 ohne SB“ dagegen kam es nach dem 4.FTW zu einem Anstieg, welcher höchstwahrscheinlich die Folge des durch den sehr starken Angriff hervorgerufenen Höhenverlustes der Probe ist.

Den Ergebnissen kann entnommen werden, daß beide für die Untersuchung der Frost-Tausalz-Beständigkeit verwendeten Versuchsanordnungen – der CDF-Versuch und der „Manschetten“-Versuch – nicht optimal waren.

Beim CDF-Versuch wurde die seitliche Abdichtung beschädigt, während beim Versuch mit stehenden Zylindern mit Manschette eine Probe undicht wurde und dadurch die Prüfflüssigkeit auslief.

Eine optimierte Versuchsanordnung könnte aus einer Kombination der beiden Anordnungen bestehen; hierbei ist an seitlich isolierte Proben, die mit der Prüffläche nach unten in der Lösung stehen, zu denken.

6.3 Wasserundurchlässigkeit

Die Prüfung der Wasserundurchlässigkeit ist in DIN1048 Teil 5 beschrieben; hierbei wird der Widerstand gegen Eindringen von drückendem Wasser festgestellt [7].

Für die Wasserundurchlässigkeit ist der Gehalt an Kapillarporen maßgebend. Dieser ist – wie in Kap.2.1.2 beschrieben – vom Wasserzementwert und Hydratationsgrad abhängig.

Nach DIN 1045 gilt ein 10 bis 40 cm dickes Bauteil als wasserundurchlässig, sofern die größte Wassereindringtiefe 5 cm nicht überschreitet. [2 S.367]

6.3.1 Versuchsablauf

Die Wasserundurchlässigkeit wurde an Bohrkernen mit $\varnothing 150\text{mm}$ geprüft. Von jeder Wand wurde ein Bohrkern so auseinander gesägt, daß aus einem Bohrkern zwei Zylinder mit derselben Höhe entstanden; von diesen besaß einer eine mit SB geschaltete Grundfläche, der andere eine mit gewöhnlicher Holzschalung geschaltete Grundfläche. Insgesamt wurden auf diese Weise also acht 12 cm hohe Probekörper gewonnen.

Bei Versuchsbeginn waren die Proben 177 Tage alt.

Die Probekörper wurden mit der nicht vorbehandelten, geschalteten Grundfläche nach unten in die Wassereindringprüfanlage (Mod. DP6MM, Form+Test, Riedlingen) eingespannt und von unten 3 Tage lang einem konstanten Wasserdruck von 5 bar (= 50 m WS) ausgesetzt. Die Fläche wurde durch einen Gummi-Dichtring mit $\varnothing 100\text{mm}$ abgegrenzt, so daß der Wasserdruck nur auf diese Fläche einwirken konnte.

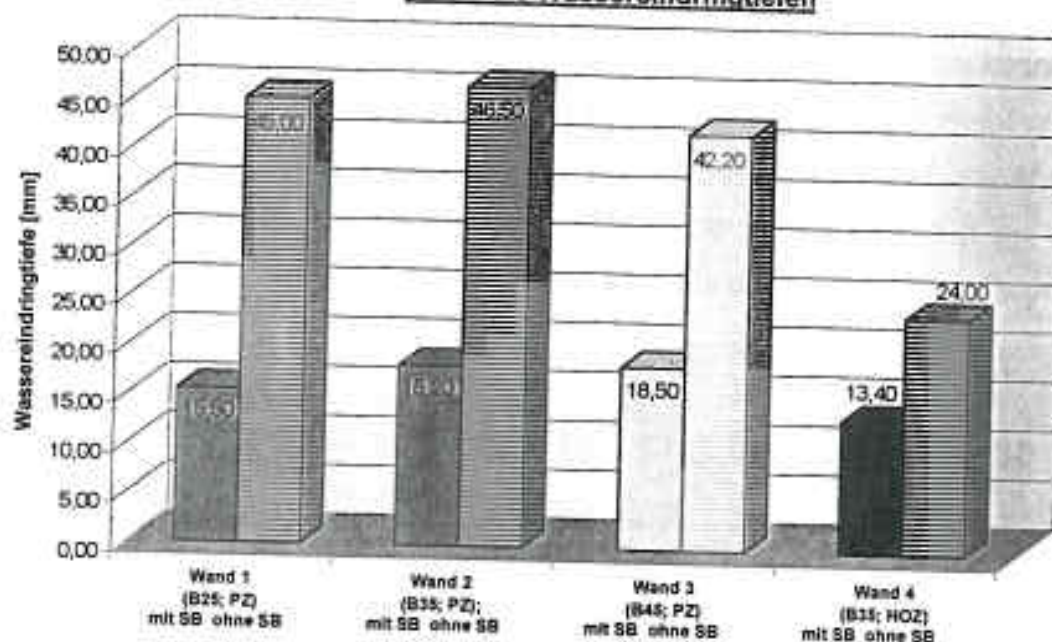
Danach wurden die Proben aus der Prüfeinrichtung ausgebaut und mittig gespalten. Etwa 5 Minuten später – nachdem die Spaltfläche etwas abgetrocknet war – wurde die Wasserfront angezeichnet und die Eindringtiefen auf 0,1 mm genau an 10 nebeneinander liegenden Stellen im Abstand von jeweils 15 mm abgemessen.

6.3.2 Ergebnisse

Wassereindringtiefen in die Bohrkerne [mm]

Wand	Beton	Seite	Mittelwert	Verbesserung Mittel	Maximum	Verbesserung Max
			[mm]		[mm]	
1	B25 PZ	mit SB	9,57	243,5%	15,50	190,3%
		ohne SB	32,88		45,00	
2	B35 PZ	mit SB	10,68	243,6%	18,20	155,5%
		ohne SB	36,70		46,50	
3	B45 PZ	mit SB	10,09	190,6%	18,50	128,1%
		ohne SB	29,33		42,20	
4	B35 HOZ	mit SB	8,15	74,8%	13,40	79,1%
		ohne SB	14,24		24,00	

Maximale Wassereindringtiefen



6.3.3 Auswertung

Bei den Bohrkernen der Wände, die mit SB geschalt wurden, war die Wassereindringtiefe wesentlich geringer, was darauf schließen läßt, daß der Gehalt an Kapillarporen durch den Einsatz der Schalungsbahn deutlich verringert wurde.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit denen der früheren Untersuchung [19] legt den Schluß nahe, daß das zeitliche Fortschreiten der Hydratation bei den Probekörpern ohne SB eine größere Rolle spielt. Bei diesen hat die Dichtheit im Laufe der Zeit zugenommen, während die Proben mit SB schon sehr früh ihre endgültige Dichtheit erreicht zu haben scheinen.

Alles in allem liegen die Wassereindringtiefen der PZ-Betone sehr nah beieinander.

Da Ungenauigkeiten bei der Messung nicht ausgeschlossen werden können, läßt sich aus den Ergebnissen nicht automatisch auf eine bestimmte Rangfolge in der Dichtheit schließen. Auch ist zu berücksichtigen, daß der Maximalwert seine Ursache in einer kleinen Pore oder undichten Stelle an der Betonoberfläche haben könnte und daß jede Wandseite nur einmal geprüft wurde.

Im Ganzen betrachtet sprechen jedoch die durch den Einsatz einer SB erzielten Verbesserungen für sich.

6.4 Oberflächenzugfestigkeit

Unter Oberflächenzugfestigkeit – auch Abreißfestigkeit genannt – versteht man die Zugfestigkeit des Betons im oberflächennahen Bereich. Aus diesem Kennwert lassen sich Rückschlüsse auf die mechanische Belastbarkeit der Betonoberfläche ziehen. [8 S.171]

Laut Schröder [8 S.200] kann im allgemeinen davon ausgegangen werden daß für Betonersatz- und Oberflächenschutzsysteme ein Mittelwert von $1,5 \text{ N/mm}^2$ (kleinster Einzelwert mindestens $1,0 \text{ N/mm}^2$) ausreichend ist. Die Prüfung ist in DIN 1048 Teil 2 beschrieben.

6.4.1 Versuchsablauf

Zu Beginn der Prüfung waren die Wände 202 Tage alt und lagerten bis dahin im Trockenen. Die Prüfung fand im Baustofflabor der FHT statt. Die Oberfläche wurde nicht vorbehandelt.

Um die Prüfung an einer horizontalen Fläche durchführen zu können, wurden die Wände flach hingelegt.

Es wurden Prüfstempel aus Stahl mit einer runden Klebefläche von 5 cm Durchmesser verwendet. Diese wurden mit einem zweikomponentigen Schnellklebstoff (X60, HBM Wägetechnik GmbH, Darmstadt) aufgeklebt. Es wurde Kleber sowohl auf den Stempel, als auch auf die Betonoberfläche aufgetragen. Nach dem Aufsetzen wurden die Stempel etwa 10 Minuten mit einem Gewicht angepreßt. Der überschüssige herausgedrückte Kleber wurde entfernt. Es wurde keine Ringnut gebohrt. Die Meßstellen befanden sich in einem Abstand von etwa 4 cm von denen der früheren Prüfung.

Nach 24 Stunden Trockenzeit wurden die Stempel mit einer Kraftsteigerung von 100 N/s mit einem Haftzug-Prüfgerät (HP850 FluidTronik, Herion-Werke KG, Fellbach) abgezogen; dabei wurde die für das Abziehen benötigte Maximalkraft aufgenommen und die Ausbruchfläche des Betons auf Transparenzpapier durchgepaust. Die Größe der Ausbruchfläche wurde anschließend

auf dem Transparentpapier mit einem Polar-Planimeter (Mod.330E Gebrüder HAFF GmbH, Pfronten) ausgemessen.

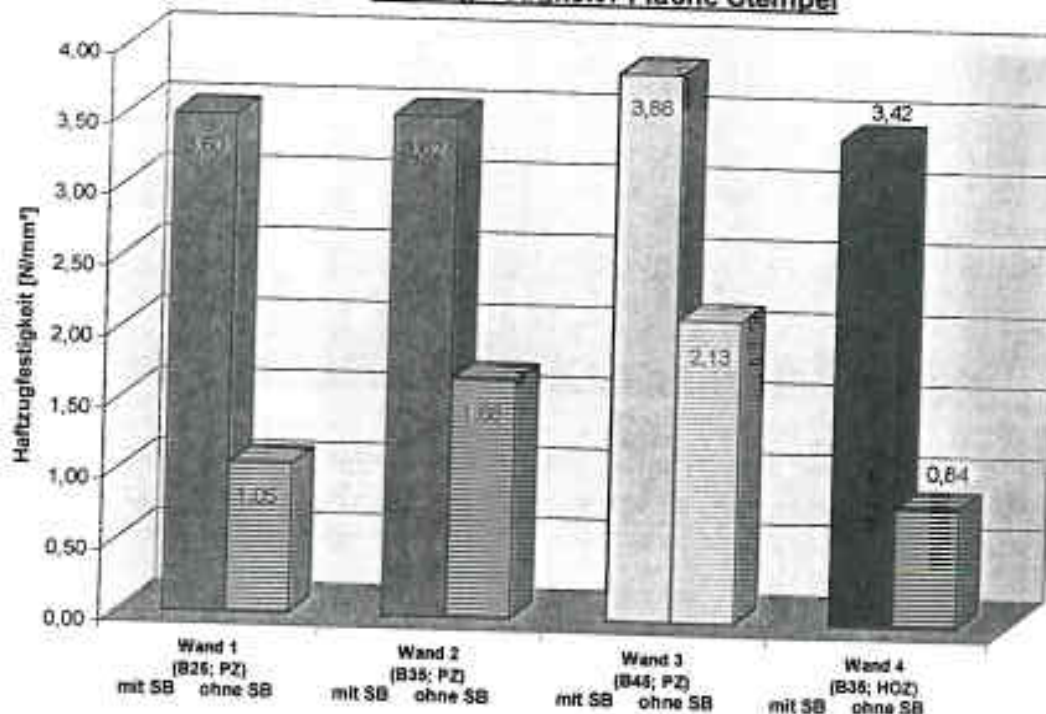
6.4.2 Ergebnisse

Oberflächenzugfestigkeit auf die Stempelfläche (1963 mm^2) bezogen:

Wand Nr.	Meßstelle Nr.	Stempel- fläche mm^2	Höchst- last mit SB KN	Oberflächen- zugfestigkeit mit SB N/mm^2	Bruch	Höchst- last ohne SB	Oberflächen- zugfestigkeit ohne SB N/mm^2	Bruch	Vergl. der Zug- festig- keit %
1	1.	1963	6,58	3,35	B	2,80	1,43	B	233%
	2.	1963	6,40	3,26	B	1,18	0,60	B	
	3.	1963	7,64	3,89	B	2,22	1,13	B	
	Mittel	1963	6,87	3,50		2,07	1,05		
2	1.	1963	6,39	3,25	B	2,88	1,47	B	109%
	2.	1963	6,77	3,45	B	3,75	1,91	B	
	3.	1963	7,56	3,85	B	3,27	1,67	B	
	Mittel	1963	6,91	3,52		3,30	1,68		
3	1.	1963	8,37	4,26	B	4,46	2,27	B	81%
	2.	1963	7,09	3,61	B	4,33	2,21	B	
	3.	1963	7,25	3,69	B	3,73	1,90	B	
	Mittel	1963	7,57	3,86		4,17	2,13		
4	1.	1963	6,11	3,11	B	1,19	0,61	B	306%
	2.	1963	6,97	3,55	B	1,78	0,91	AB	
	3.	1963	7,04	3,59	B	1,99	1,01	B	
	Mittel	1963	6,71	3,42		1,65	0,84		

A = Bruch an der Grenzfläche Kleber / Beton (Adhäsionsbruch)
B = Bruch im Beton

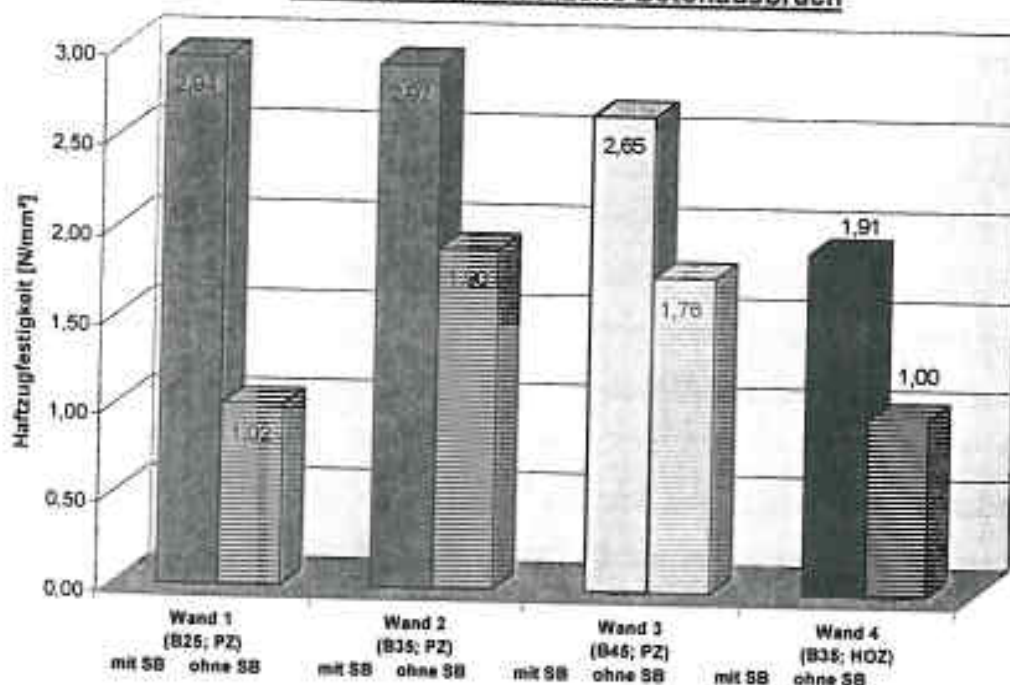
Haftzugfestigkeit / Fläche Stempel



Oberflächenzugfestigkeit auf die gemessene Ausbruchfläche im Beton bezogen:

Wand Nr.	Meßstelle Nr.	Fläche Seite mit SB	Höchstlast mit SB	Oberflächenzugfestigkeit mit SB	Fläche Seite ohne SB	Höchstlast ohne SB	Oberflächenzugfestigkeit ohne SB	Vergl.
		mm ²	KN	N/mm ²	mm ²		N/mm ²	%
1	1.	2400	6,58	2,74	2030	2,80	1,38	
	2.	2490	6,40	2,57	1980	1,18	0,60	
	3.	2170	7,64	3,52	2060	2,22	1,08	
	Mittel			2,94			1,02	189%
2	1.	2440	6,39	2,62	1960	2,88	1,47	
	2.	2460	6,77	2,75	1970	3,75	1,90	
	3.	2230	7,56	3,39	1400	3,27	2,34	
	Mittel			2,92			1,90	53%
3	1.	3210	8,37	2,61	2380	4,46	1,87	
	2.	2880	7,09	2,46	2240	4,33	1,93	
	3.	2510	7,25	2,89	2520	3,73	1,48	
	Mittel			2,65			1,76	51%
4	1.	3780	6,11	1,62	1790	1,19	0,66	
	2.	3590	6,97	1,94	1380	1,78	1,29	
	3.	3240	7,04	2,17	1920	1,99	1,04	
	Mittel			1,91			1,00	92%

Haftzugfestigkeit / Fläche Betonausbruch



6.4.3 Auswertung

Mit Ausnahme von „Wand 4 ohne SB“ kamen bei allen Messungen reine Brüche im Beton zustande. Ein Kohäsionsbruch (Bruch im Kleber [7]) trat nicht auf.

Auch durch mehrmaliges Wiederholen konnten an Wand 4 ohne SB keine befriedigenden Ausbrüche im Beton erzielt werden. Die Bruchebene war der Oberfläche sehr nah und es schien, als ob der Klebeverbund zwischen Beton und Prüfstempel nicht ausgereicht hätte. Die Tatsache, daß die Klebewirkung an allen anderen Betonoberflächen aber sehr gut war, deutet auf einen hohen Gehalt an Feinstbestandteilen an der Oberfläche von Wand 4 ohne SB hin. Die Bruchstücke, die von der Wand abgelöst wurden und am Stempel hafteten waren extrem fein. Wie in Kap.3.2.1 beschrieben, kommt es bei der Verwendung von nichtsaugenden Schalungen zwar zu einer Ansammlung von Feinstteilen an der Betonoberfläche; hier konnte jedoch eine Schädigung des Betons von Wand 4 nicht ausgeschlossen werden.

Die Prüfung zeigte, daß die Oberflächenzugfestigkeit durch den Einsatz einer SB deutlich erhöht wird. Dabei scheint die erzielbare Verbesserung umso höher zu sein, je niedriger die Festigkeitsklasse des Betons ist.

Außerdem fällt auf, daß die Haftzugfestigkeiten der Wände mit SB alle in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Dies deutet darauf hin, daß durch die Verwendung einer SB der Einfluß der Betondruckfestigkeit auf die Oberflächenzugfestigkeit zweitrangig wird und daß der Wasserzementwert immer im selben günstigen Bereich liegt (siehe Kap.3.2.1).

Bei den Proben ohne SB waren mit Ausnahme von Wand 4 die Ergebnisse dagegen um so besser, je höher die Festigkeitsklasse des Betons war.

Bei Wand 4 mit SB waren die Ausbruchflächen recht groß, was sich im Diagramm „Haftzugfestigkeit / Fläche Betonausbruch“ widerspiegelt.

6.5 Festigkeitsprüfung mit dem Rückprallhammer

Bei der Rückprallprüfung handelt es sich um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das in DIN 1048 Teil 2 genormt ist. Der von der Elastizität des Betons abhängende Rückprall eines gegen den Beton prallenden Schlaggewichtes gibt dabei Aufschluß über die Druckfestigkeit des Betons; je größer die in Skalenteilen abgelesene Rückprallstrecke des Gewichtes ist, desto höher ist die Betondruckfestigkeit. [7]

Nach der Norm ist die Prüfung nur bis zu einem Betonalter von 90 Tagen möglich, da älterer Beton durch Carbonatisierung häufig zu günstig beurteilt wird [8 S.114].

6.5.1 Versuchsablauf

Die Schlagprüfung mit dem Rückprallhammer (Mod.N, Suspa Spannbeton GmbH, Königsbrunn) – nach dem Erfinder auch Schmidthammer genannt – wurde 180 Tage nach dem Betonieren der Wände durchgeführt.

Die Funktionstüchtigkeit des Rückprallhammers wurde zuvor an einem Prüfamboß überprüft.

Bis zur Prüfung lagerten die Wände im Baustofflabor der FHT im Trockenen.

Geprüft wurde an den Stirnseiten der stehenden Wände, da die Wände in diese Richtung besonders standsicher waren und ein Rückfedern praktisch nicht möglich war. An jeder Wand wurden jeweils auf der Seite mit SB und auf der Seite ohne SB fünf Schläge oben, in der Mitte und unten durchgeführt und aus den Rückprallstrecken der Mittelwert gebildet.

Von den früheren Prüfungen waren noch die Schlagabdrücke – leichte Einkerbungen an der Betonoberfläche – erkennbar. Es wurde darauf geachtet, daß die Meßstellen etwas neben diesen Einkerbungen lagen. Außerdem wurde darauf geachtet, daß die Schlagstellen nicht auf sichtbaren Poren oder Zuschlagkörnern lagen.

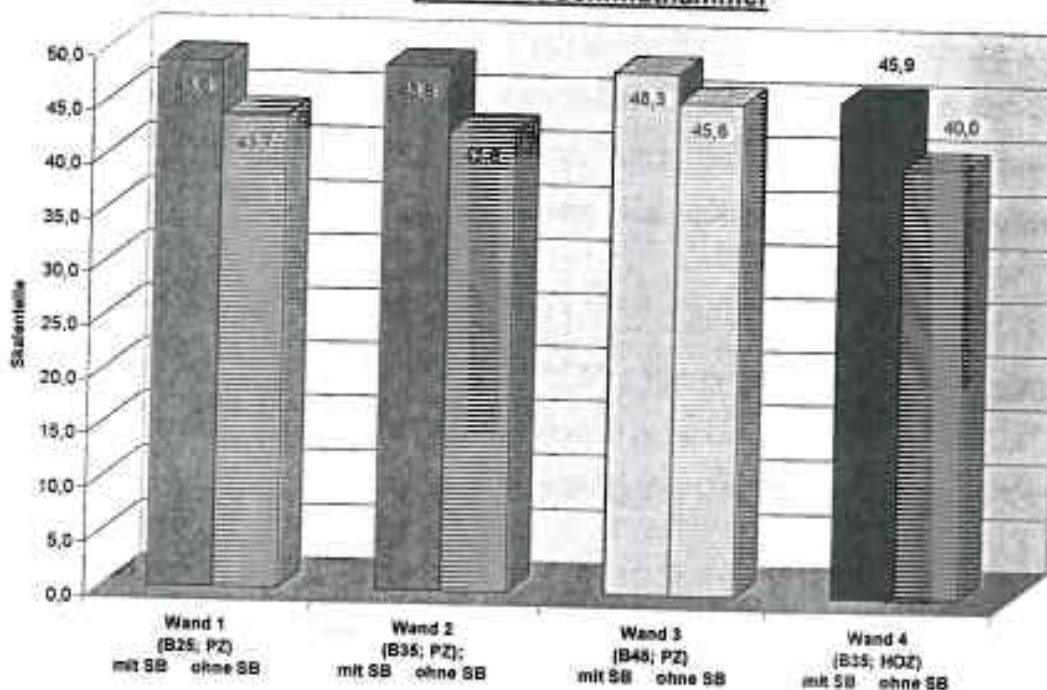
Bei der Prüfung wurde der Rückprallhammer mit herausragendem Schlagbolzen auf die Meßstelle aufgesetzt und gleichmäßig rechtwinklig gegen die Betonoberfläche gedrückt bis der Schlag ausgelöst wurde. Die Rückprallstrecke wurde in Skalenteilen aufgenommen.

6.5.2 Ergebnisse

Rückprallwerte:

Wand Nr.	Mittelwert	Differenz
1 mit SB	48,6	4,9
1 ohne SB	43,7	
2 mit SB	48,5	5,9
2 ohne SB	42,6	
3 mit SB	48,3	2,7
3 ohne SB	45,6	
4 mit SB	45,9	5,9
4 ohne SB	40,0	

Mittelwert Schmidthammer



6.5.3 Auswertung

An allen Wänden wurden auf der mit SB geschalteten Seite höhere Rückprallwerte gemessen.

Dabei ist zu bedenken, daß das Fortschreiten der Carbonatisierung zu einer Steigerung der Festigkeit im oberflächennahen Bereich führt (siehe Kap.3.2.1). Im folgenden Kapitel wird sich zeigen, daß die ohne SB geschalteten Seiten deutlich schneller carbonatisieren und sich somit das zunehmende Alter für die Seiten ohne SB auf deren Rückprallwerte positiv ausgewirkt haben dürfte.

Dennoch führte die weiter fortgeschrittene Carbonatisierung und die damit verbundene Zunahme der Festigkeit der Seiten ohne SB nicht dazu, daß diese bei der Rückprallprüfung gleich gut oder besser als die mit SB hergestellten Wandseiten abschnitten.

Außerdem ist die ohne SB geschaltete Betonoberfläche glatter. Durch die Verwendung einer SB kommt es zu einem Abdruck der Strukturierung der SB, was zu einer rauheren Oberfläche führt. Nach Schelling [36] kann davon ausgegangen werden, daß eine solche Betonoberfläche zu geringeren Rückprallstrecken führt.

„Wand 2 ohne SB“ und „Wand 4 ohne SB“ zeigten weniger gute Rückprallwerte, was auf eine geringere Druckfestigkeit hindeutet.

Bei Wand 2 wurde dies auch bei der Prüfung der Druckfestigkeit in 6.9.2 bestätigt.

Wand 4 dagegen ergab eine sehr gute Druckfestigkeit; diese wurde an einer Probe aus der Mitte des Bohrkerns geprüft. Daß die Rückprallwerte auf der Seite ohne SB trotzdem so schlecht waren, könnte durch eine Schädigung des Betons im oberflächennahen Bereich erklärt werden. Diese Hypothese wird auch durch die Ergebnisse der Oberflächenzugfestigkeit (Kap.6.4.2) gestützt.

6.6 Permeabilität (Durchlässigkeit)

Das in diesem Kapitel beschriebene Prüfverfahren dient der Bestimmung der Luftdurchlässigkeit des Überdeckungsbetons.

„Obwohl Beton mit einer hohen Festigkeit in den meisten Fällen dauerhafter ist, als Beton mit einer niedrigen Festigkeit, so kann die Druckfestigkeit per se nicht als vollkommenes Maß für die Betondauerhaftigkeit angesehen werden, da die Dauerhaftigkeit in erster Linie von den Eigenschaften der Oberflächenschichten eines Bauteils abhängt, die nur einen begrenzten Einfluß auf die Betondruckfestigkeit ausüben“ [10 S.2].

Durch die Messung der Permeabilität mit dem Torrent Permeability Tester ist es laut Herstellerangaben möglich, „schnell und zerstörungsfrei die Qualität des Überdeckungsbetons in Bezug auf seine Dauerhaftigkeit“ festzustellen [10 S.2].

6.6.1 Versuchsablauf

Die Messung der Permeabilität wurde an den Stirnseiten der stehenden Wände durchgeführt. Dabei wurden jeweils auf der Seite mit SB und ohne SB eine Messung oben und eine unten – 15 cm von der Ober- bzw. Unterkante der Wand entfernt – durchgeführt.

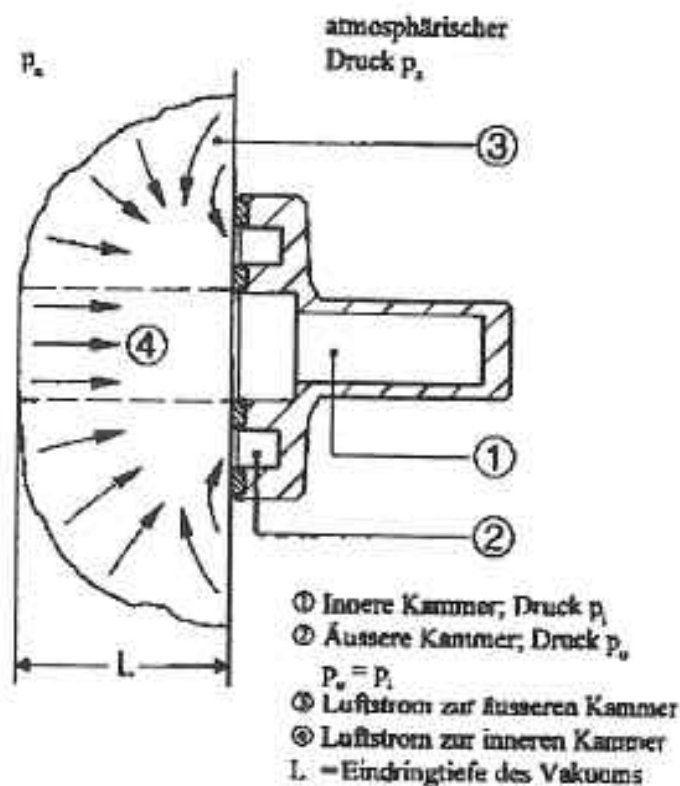
Die Prüfung an jeder Meßstelle dauerte 720 Sekunden.

Zum Zeitpunkt des Beginns der Prüfung waren die Wände 190 Tage alt und lagerten zuvor im Baustofflabor der FHT bei Normalklima im Trockenen.

In dem Prüfverfahren nach der TORRENT-Methode (Torrent Permeability Tester, PROCEQ SA, Zürich) wurde auf die zu untersuchende Betonoberfläche eine Zweikammer-Saugglocke gesetzt und in dieser ein Vakuum erzeugt (Vakuumpumpe: Vacobox, Leistung: 0,15 KW, KNF Neuberger GmbH, Freiburg-Munzingen).

Das Gerät mißt dann nach einem bestimmten Ablauf den Druckanstieg über die Zeit und die Eindringtiefe L des Vakuums in das Betonbauteil. Aus dem rechtwinklig zur Oberfläche gerichteten Luftstrom zur inneren Kammer der Saugglocke wird auf Basis eines einfachen theoretischen Modells der Permeabilitäts-Koeffizient k_T berechnet. Die äußere Kammer der Saugglocke erzeugt dabei eine Art Schutzring.

Abbildung: Zweikammer-Vakuumzelle [24 S.1]



Anhand des kT -Wertes kann die Qualitätsklasse des Überdeckungsbetons der folgenden Tabelle entnommen werden: [24 S.2]

Überdeckungsbeton- qualität	$kT (10^{-16} \text{ m}^2)$
sehr schlecht	> 10
schlecht	$1,0 - 10$
mittelmäßig	$0,1 - 1,0$
gut	$0,01 - 0,1$
sehr gut	$< 0,01$

Laut Herstellerangaben werden die Meßwerte kT und L geräteintern nach den folgenden Formeln berechnet:

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

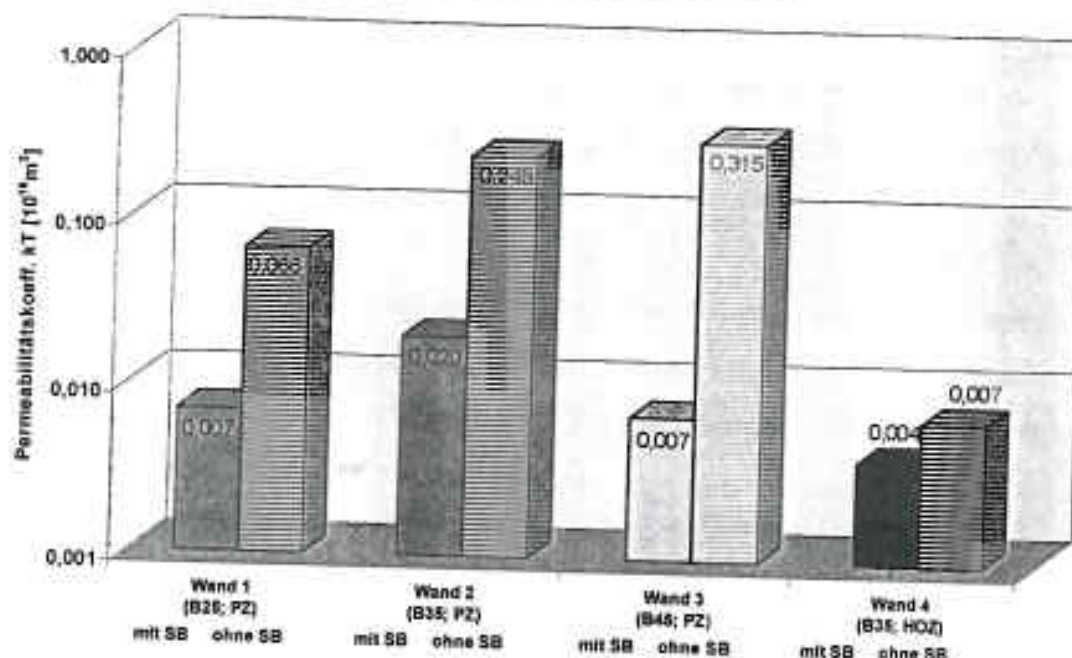
- V_c = Volumen der inneren Kammer plus der Elemente (Schläuche), durch die Luft geleitet wird [m^3]
 A = durchströmte Querschnittsfläche des Probekörpers (= Fläche der inneren Kammer) [m^2]
 μ = dynamische Viskosität der Luft [Ns/m^2]
 ε = Porosität des Betons [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]
 P_a = Atmosphärendruck [Nm^{-2}]
 ΔP_t = Druckzunahme zum Zeitpunkt t [Nm^{-2}]
 t = Versuchsdauer [s]
 t_0 = 60s

Nach den Angaben des Herstellers des Permeabilitätsmeßgeräts werden die genauesten Werte an trockenem Beton erzielt. Eine Messung des elektrischen Widerstandes sei in diesem Fall überflüssig und wurde deshalb auch nicht durchgeführt.

6.6.2 Ergebnisse

Wand		Stelle	p_a [mbar]	t_{max} [s]	Δp_{max} [mbar]	kT [$\times 10^{-10} m^2$]	L [mm]	Mittelw.	Qualitätskl.
1	mit SB	oben	973,6	720	3,0	0,009	6,5	0,007	sehr gut
		unten	975,8	720	2,3	0,004	4,6		
	ohne SB	oben	982,4	720	9,7	0,093	21,0	0,066	gut
		unten	984,6	720	6,3	0,039	13,6		
2	mit SB	oben	974,1	720	4,6	0,020	9,6	0,020	gut
		unten	984,1	720	4,4	0,019	9,5		
	ohne SB	oben	981,7	720	16,4	0,267	35,5	0,245	mittelmäßig
		unten	974,9	720	14,8	0,222	32,2		
3	mit SB	oben	983,7	720	2,8	0,008	6,0	0,007	sehr gut
		unten	972,2	720	2,4	0,005	4,6		
	ohne SB	oben	983,1	720	17,5	0,302	37,8	0,315	mittelmäßig
		unten	983,1	720	18,2	0,327	39,3		
4	mit SB	oben	974,6	720	2,3	0,004	4,1	0,004	sehr gut
		unten	978,9	720	2,2	0,004	4,1		
	ohne SB	oben	974,6	720	2,9	0,007	5,9	0,007	sehr gut
		unten	981,8	720	2,6	0,006	5,4		

Permeabilitätskoeffizient kT



6.6.3 Auswertung

Wie sich aus der Tabelle auf S.64 ergibt, sind die Permeabilitätskoeffizienten an den Meßstellen an den Wänden unten meist niedriger als oben; dies ist auf den höheren Betonierdruck unten zurückzuführen.

Die k_T -Werte sind bei den Portlandzementbetonen (Wand 1-3) auf den Wandseiten, die mit SB geschalt wurden, wesentlich geringer; auch bei Wand 4 aus Hochofenzement wurde die Dichtheit durch den Einsatz einer SB noch etwas gesteigert, obwohl der HOZ-Zementstein von Hause aus schon eine besonders dichte Struktur besitzt [12 S.357]. Dies wird durch die sehr guten Meßwerte auf der Seite ohne SB belegt.

Laut Beddoe [31 S.112] ist die durch eine SB erzielbare Verbesserung um so größer, je weicher die Konsistenz des Frischbetons ist. Bei der Frischbetonprüfung in [19] ergab die Messung des Ausbreitmaßes die Reihenfolge (der Beton mit der steifsten Konsistenz zuerst genannt): 4,1,2,3.

Die Ergebnisse der Permeabilitätsmessung passen zu dieser Aussage.

Die Permeabilität gegenüber Gasen kann nicht direkt mit der Wasserdurchlässigkeit verglichen werden, da für beides unterschiedliche Porenbereiche entscheidend sind [35 S.129].

Ebenso muß die Sauerstoffdurchlässigkeit des Betons nicht zwangsläufig mit der Kohlendioxiddurchlässigkeit übereinstimmen. Dies könnte den Unterschied in den Ergebnissen bei der Prüfung der Permeabilität und der Carbonatisierung (Kap.6.7) erklären.

6.7 Carbonatisierung

Die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe erfolgt über den Nachweis der pH-Wert-Änderung mit Hilfe einer Indikatorlösung. Dazu hat sich alkoholische Phenolphthaleinlösung bewährt. Diese ist zunächst farblos und färbt sich im Bereich von $\text{pH} > 9$ violett. Nichtcarbonatisierter Beton verfärbt sich beim Aufsprühen violett, während der carbonatisierte Bereich unverfärbt bleibt. [9] Der bei der Carbonatisierung ablaufende Vorgang und dessen Auswirkungen wurden in Kapitel 2.3.1 näher beschrieben.

6.7.1 Versuchsablauf

Von jeder Wand wurde ein Bohrkern mit $\varnothing 100\text{mm}$ mittig in Richtung der Längsachse mit einer Presse (Mod.1216, Zwick, Ulm) gespalten. Dazu wurden die Bohrkern entlang zweier gegenüberliegender Mantellinien bis zum Bruch belastet. Das Spalten geschah mit Hilfe von Hartfilzstreifen, welche zwischen den horizontal liegenden Bohrkern und die Platte der Presse eingelegt wurden.

Die Proben waren bei Versuchsbeginn 209 Tage alt und lagerten bis zur Prüfung im Baustofflabor der FHT bei Normalklima im Trockenen.

Nach dem Spalten wurde auf die frische Betonbruchfläche die Indikatorlösung Phenolphthalein (1% Lsg. in Äthanol) gleichmäßig aufgesprüht. Einen Tag später wurden die minimalen und die maximalen Carbonatisierungstiefen gemessen.

6.7.2 Ergebnisse

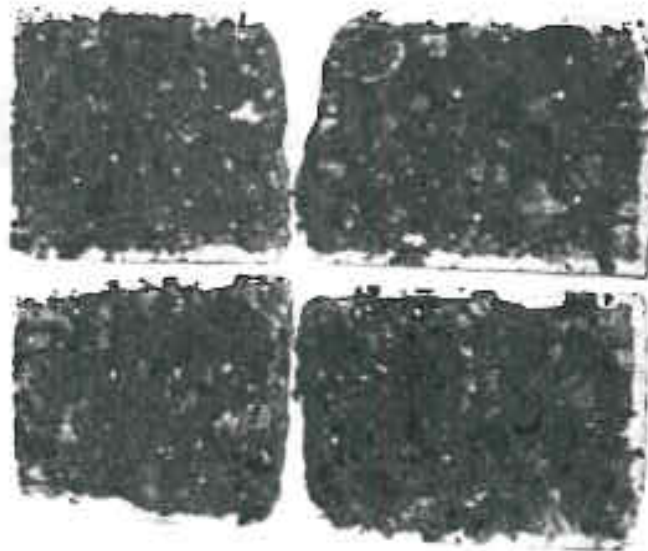
Carbonatisierungstiefen [mm]:

	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	B25; PZ		B35; PZ		B45; PZ		B35; HOZ	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
min	0,0	4,0	0,0	3,5	0,0	2,5	0,0	4,0
max	1,5	7,5	0,5	7,5	1,5	7,0	1,5	8,5

Gespaltene Probekörper nach dem Besprühen mit Phenolphthalein:

Wand 1

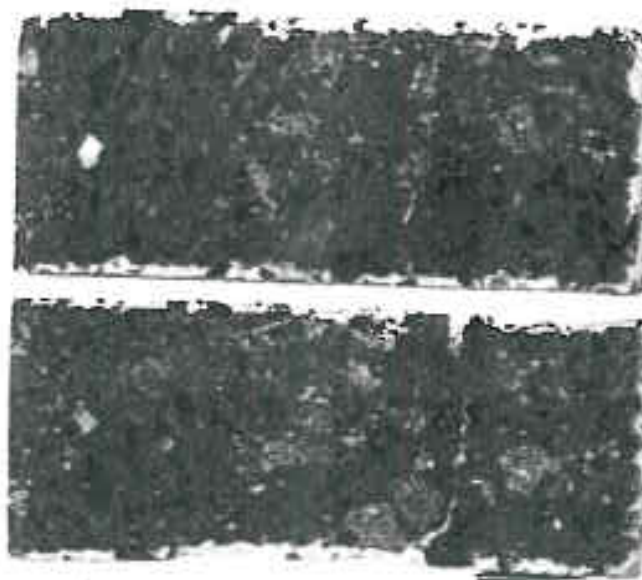
W 1 mit SB
(B25; PZ)



W 1 ohne SB
(B25; PZ)

Wand 2

W 2 mit SB
(B35; PZ)



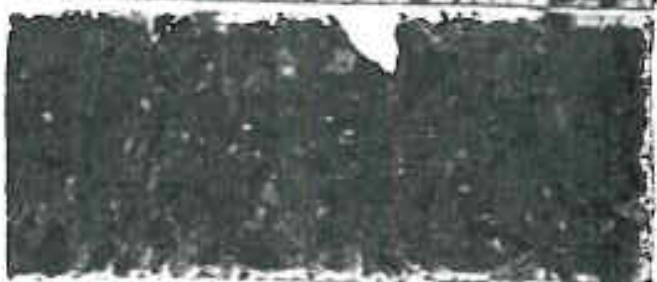
W 2 ohne SB
(B35; PZ)

Wand 3

W 3 mit SB
(B45; PZ)



W 3 ohne SB
(B45; PZ)



Wand 4

W 4 mit SB
(B35; HOZ)



W 4 ohne SB
(B35; HOZ)



6.7.3 Auswertung

Auf den mit SB geschalteten Seiten der Bohrkerne ist die Carbonatisierungstiefe deutlich geringer und die Carbonatisierungsfront verläuft viel geradliniger.

Die an den Proben ohne SB erkennbaren Carbonatisierungsspitzen deuten auf undichte Stellen an den Betonoberflächen hin.

Durch die höhere Dichtheit der Betonoberfläche, die mit SB hergestellt wurde, wurde das Eindringen von für die Carbonatisierung benötigtem CO_2 stark behindert und der Fortschritt der Carbonatisierung wesentlich verlangsamt. Durch die praktisch lunkerfreie Oberfläche gab es keine so deutlichen Carbonatisierungsspitzen wie bei den Proben ohne SB.

Nach Nürnberger [12 S.335+347] neigen PZ-Betone gegenüber HOZ-Betonen auf Grund ihres großen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Überschusses im Zementstein nur in geringem Maße zur Carbonatisierung. Dies erklärt, warum der Bohrkern aus HOZ (Wand 4), der sich bei anderen Prüfungen als besonders dicht erwiesen hat und einer relativ hohen Festigkeitsklasse (B35) entstammt, eine größere Carbonatisierungstiefe aufweist.

Bemerkenswert ist auch, daß die Carbonatisierungstiefen insgesamt – dafür, daß die Proben unter Normalklima lagerten und nicht etwa unter CO_2 -Beaufschlagung – recht hoch sind.

Nach der Abbildung „Carbonatisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Betonfestigkeitsklasse“ in Kapitel 2.3.1 wären geringere Werte zu erwarten gewesen.

Alle Scheiben wurden beschriftet und dann 48 Stunden im Trockenofen (Modell 600, Memmert, Schwabach) bei 110 °C getrocknet. Zu diesem Zeitpunkt waren die Proben 194 Tage alt. Danach wurden die Proben eine Stunde im Exsikkator abgekühlt und das Trockengewicht m_t der Scheiben aufgenommen. Die Lagerung im Exsikkator verhinderte dabei die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit während des Abkühlens [25 S.126].

Anschließend wurden die Proben bis zur Gewichtskonstanz 45 Stunden unter Atmosphärendruck bei 20 °C in destilliertem Wasser gelagert; nach Abtupfen der Oberfläche mit einem feuchten Tuch wurde das Gewicht $m_{w,s}$ festgehalten.

Zur Ermittlung des Volumens der Scheiben wurden die zuvor in Wasser gelagerten Proben zusätzlich noch unter Wasser gewogen; die Differenz aus den Massen der wassergesättigten Proben an Luft ($m_{w,s}$) und den Massen der wassergesättigten Proben unter Wasser (m_{uw}) in g ergab dann das Volumen in cm^3 [26] (= Unterwasserwägung nach DIN1996 Teil 7).

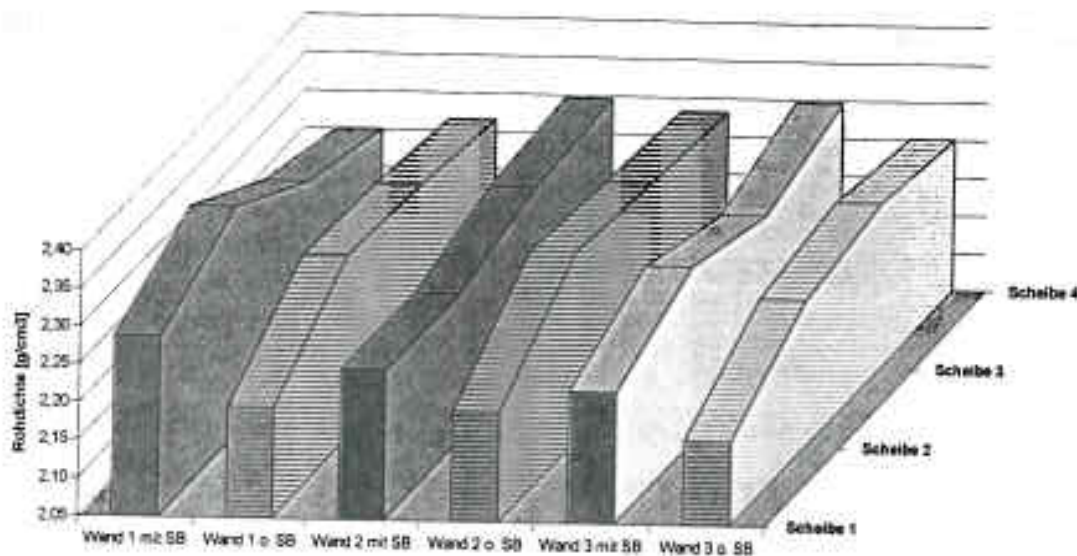
Danach wurde die Wasseraufnahme unter Druck ermittelt. Hierzu wurden die Proben in eine mit destilliertem Wasser gefüllte Druckkammer (J.Freund Maschinen u. Gerätebau, Wenningsen) gegeben. Diese wurde zunächst zur Entlüftung zwei Stunden mit Hilfe einer Vakuumpumpe (Vacobox, Leistung: 0,15 KW, KNF Neuberger GmbH, Freiburg-Munzingen) mit einem Unterdruck von 20 Torr beaufschlagt. Anschließend wurde die Druckkammer mit den in entlüftetem Wasser liegenden Proben 24 Stunden einem Überdruck von 150 kp/cm^2 ausgesetzt. Danach wurde – nach Abtupfen der Oberfläche mit einem feuchten Tuch – das Gewicht $m_{w,d}$ bestimmt.

Für alle Proben wurde die Rohdichte und der Sättigungswert berechnet und so der Verlauf dieser Größen im Bauteilinneren der Wände ermittelt.

6.8.2 Ergebnisse

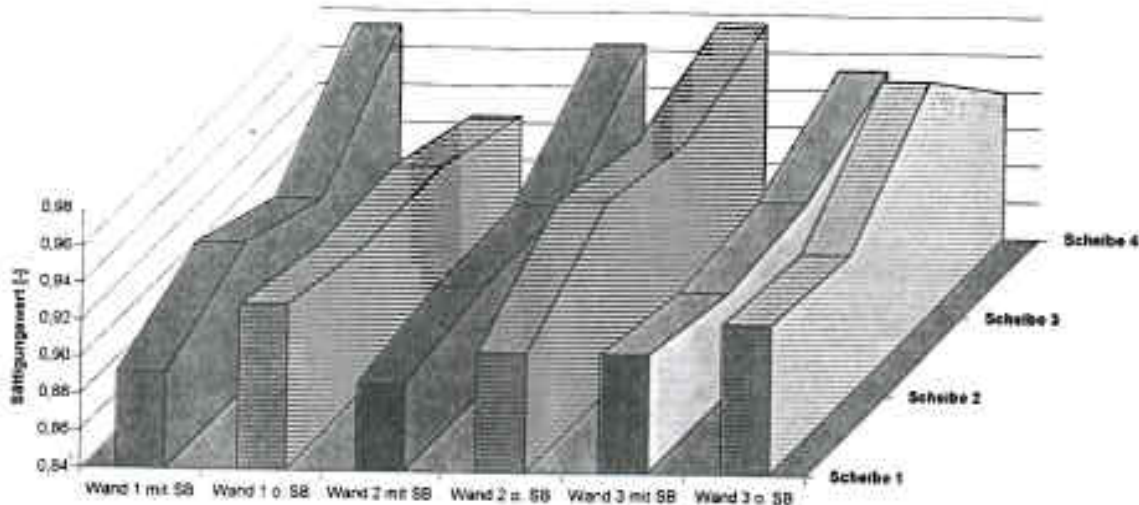
Rohdichte ρ [g/cm ³] $\rho = m_v/V_R$	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Mittelwert	
	B25; PZ		B35; PZ		B45; PZ			
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	2,29	2,20	2,25	2,20	2,22	2,16	2,25	2,18
Scheibe 2	2,36	2,29	2,25	2,30	2,29	2,25	2,30	2,28
Scheibe 3	2,29	2,28	2,28	2,29	2,25	2,27	2,27	2,28
Scheibe 4	2,25	2,27	2,30	2,28	2,30	2,25	2,28	2,27

Verlauf der Rohdichte



Sättigungswert S [-] $S = W_s/W_d$	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Mittelwert	
	B25; PZ		B35; PZ		B45; PZ			
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	0,89	0,93	0,89	0,90	0,90	0,92	0,89	0,92
Scheibe 2	0,92	0,92	0,90	0,94	0,90	0,92	0,90	0,93
Scheibe 3	0,90	0,92	0,90	0,93	0,90	0,97	0,90	0,94
Scheibe 4	0,95	0,90	0,94	0,96	0,93	0,92	0,94	0,93

Verlauf des Sättigungswertes



6.8.3 Auswertung

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß durch die Anwendung der SB bei der ersten Scheibe, also im äußersten und für die Dichtheit entscheidenden Bereich der Betonrandzone, die Rohdichte höher und der Sättigungswert etwas niedriger wurden. Dies spricht dafür, daß durch die SB eine dichtere Struktur des Zementsteins und all die damit verbundenen, in Kap.2.1. beschriebenen Vorteile erreicht wurden. Der niedrigere Sättigungswert der Proben der Seite mit SB läßt von diesen ein besseres Verhalten bei Frostbeanspruchung erwarten.

Bei der Rohdichte ändern sich die Werte der Bohrkerne ohne SB bereits ab Scheibe 2 nicht mehr merklich.

Außerdem ist bei den Proben der Seite ohne SB im Verlauf der Rohdichte eine deutlich größere Differenz zwischen Scheibe 1 und Scheibe 2 zu erkennen. Dies deutet auf den unter 3.2.1 beschriebenen Effekt bei Verwendung einer nichtsaugenden Schalung hin: Die höhere Kapillarporosität im Randbereich verursacht eine geringere Rohdichte.

Der Unterschied im Verlauf der Rohdichte zwischen Scheibe 1 und 2 kann auch dadurch zustande kommen, daß Scheibe 1, also die Randschicht des Betons, im allgemeinen weniger Zuschlagkörner enthält.

Der Sättigungswert dagegen scheint sich bei den Proben der Seite mit SB erst in tieferen Zonen (Scheibe 4) auf einen Wert einzupendeln. Er war bei den Scheiben 1-3 geringer als bei Scheibe 4.

Demgegenüber lassen die Proben der Seite ohne SB keine einheitliche Tendenz erkennen.

Der Mittelwert legt den Schluß nahe, daß die Verwendung einer SB zu einer Absenkung des Sättigungswertes in der Randzone führt, wohingegen sich der Wert auf der Seite ohne SB nahezu konstant auf relativ hohem Niveau bewegt.

6.9 Druckfestigkeit

Für die Bestimmung der Druckfestigkeit gilt DIN 1048 Teil 5.

Damit ein Beton einer Festigkeitsklasse zugerechnet werden darf, muß

- a) jede Probe die Nennfestigkeit und
- b) der Mittelwert aus drei Proben die Serienfestigkeit

erreichen. Angaben zu diesen Größen enthält DIN 1045.

Die in DIN 1045 aufgeführten Festigkeitsklassen beziehen sich auf Würfel mit 200 mm Kantenlänge. Druckfestigkeiten, die an Bohrkernen mit $\varnothing 100\text{mm}$ und $h=100\text{ mm}$ ermittelt wurden, können etwa den Werten solcher Würfel gleichgesetzt werden. [13 S.120]

6.9.1 Versuchsablauf

Die Druckfestigkeit des Betons wurde an Zylindern mit $\varnothing 100\text{mm}$ ermittelt. Dazu wurden die verbliebenen etwa 10 cm hohen Mittelstücke der Bohrkern aus den Untersuchungen des Frost-Tausalz-Widerstandes und des chemischen Widerstandes verwendet. Von jeder Wand wurden drei Zylinder geprüft – insgesamt also 12 Probekörper. Die durch das Sägen verursachten Unebenheiten auf den Grundflächen der Zylinder wurden mit einem Naßschleifgerät (WSM 3/340, Form+Test, Riedlingen) entfernt. So wurde sichergestellt, daß die bei der Prüfung belasteten Flächen parallel und eben waren. Nach dem Schleifen wurden die Probekörper 24 h trocken gelagert.

Die Prüfung wurde an der Druckprüfmaschine (Mod.1216, Zwick, Ulm) im Baustofflabor der FHT durchgeführt; hierbei wurden die Lastverformungsdiagramme aufgezeichnet (siehe im Anhang Diagramme 8.5 – 8.8). Zum Zeitpunkt der Druckfestigkeitsprüfung waren die Proben 196 Tage alt und lagerten zuvor im Baustofflabor der FHT bei Normalklima.

6.9.2 Ergebnisse

		Höhe h	Durch- messer d	Fläche A	Gewicht m	Dichte ρ	Kraft F	Druck- festigkeit f_{cc}	mittl. Druck- festigk.	erf. Nenn- festigk.	erf. Serien- festigk.
		[mm]	[mm]	[mm ²]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1	B25 PZ	91,9	99,1	7713,2	1,652	2330,0	349,0	45,2	52,6	25	30
		91,6	99,1	7713,2	1,641	2322,7	395,4	51,3			
		90,8	99,1	7713,2	1,630	2326,8	473,6	61,4			
2	B35 PZ	89,2	99,1	7713,2	1,607	2335,1	380,7	49,4	41,4	35	40
		91,5	99,1	7713,2	1,645	2331,0	271,6	35,2			
		90,1	99,1	7713,2	1,628	2342,7	306,3	39,7			
3	B45 PZ	90,4	99,1	7713,2	1,647	2361,5	511,4	66,3	65,2	45	50
		92,1	99,1	7713,2	1,671	2351,7	510,3	66,2			
		91,0	99,1	7713,2	1,642	2339,9	487,7	63,2			
4	B35 HOZ	92,2	99,1	7713,2	1,687	2371,8	445,7	57,8	60,3	35	40
		92,1	99,1	7713,2	1,685	2372,5	480,7	62,3			
		92,1	99,1	7713,2	1,681	2366,3	469,9	60,9			

6.9.3 Auswertung

Alle Betone konnten die an sie gestellten Anforderungen an die Nenn- und Serienfestigkeit erfüllen, wenngleich Beton 2 recht schlecht abschnitt.

Beton 3 konnte bei der in [19 S. 59] durchgeführten Prüfung der Würfel-druckfestigkeit die an einen B45 gestellten Anforderungen nicht erfüllen; daß die Anforderungen nunmehr erfüllt wurden, kann durch das Fortschreiten der Hydratation erklärt werden. Auch die anderen Betone schnitten besser als in [19] ab.

Insgesamt zeigte Wand 4 (B35; HOZ) – besonders die Seite ohne SB – in den anderen durchgeführten Versuchen auffallend schlechte Eigenschaften. Die Tatsache, daß diese Wand bei der Prüfung der Druckfestigkeit – bei der nur die mittleren Stücke der Bohrkerne verwendet wurden – so gut abschnitt, deutet darauf hin, daß – wenn überhaupt – nur eine Schädigung im oberflächennahen Bereich der Wand vorliegt.

Der Grund für eine solche Schädigung könnte möglicherweise mangelhafte Nachbehandlung oder ein Fehler in der Wasserzugabe bei der Herstellung sein.

Der entwässernde und der die Nachbehandlung unterstützende Effekt der SB könnten die Auswirkungen solcher Fehler auf der mit SB hergestellten Seite reduziert haben.

6.10 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Betonoberflächen

Die nachfolgenden Aufnahmen wurden an einem Rasterelektronenmikroskop (Hitachi S800 Scanning Electron Microscope) gefertigt.

Für die Untersuchung von Wand 1 bis 3 wurden die äußersten Scheiben der Bohrkerne aus Versuch 6.8 verwendet. Dazu wurden etwa 1 cm² große Stücke von den Proben abgebrochen. Da von Wand 4 keine Scheiben vorhanden waren, wurden von einem Bohrkern abgeschlagene Teile verwendet.

Sämtliche Bruchstücke – von jeder Wand zwei, jeweils eines mit SB und eines ohne SB hergestellt – wurden mit der geschalteten Fläche nach oben auf eine Halterung geklebt. Um eine gute Reflexion der auf die Oberfläche treffenden Elektronen zu erreichen, wurde auf die Proben eine 10 nm dicke Schicht aus Goldpalladium (Au/Pd) aufgetragen.

Als die Aufnahmen gefertigt wurden, waren die Probekörper 238 Tage alt und lagerten zuvor im Baustofflabor der FHT im Trockenen.

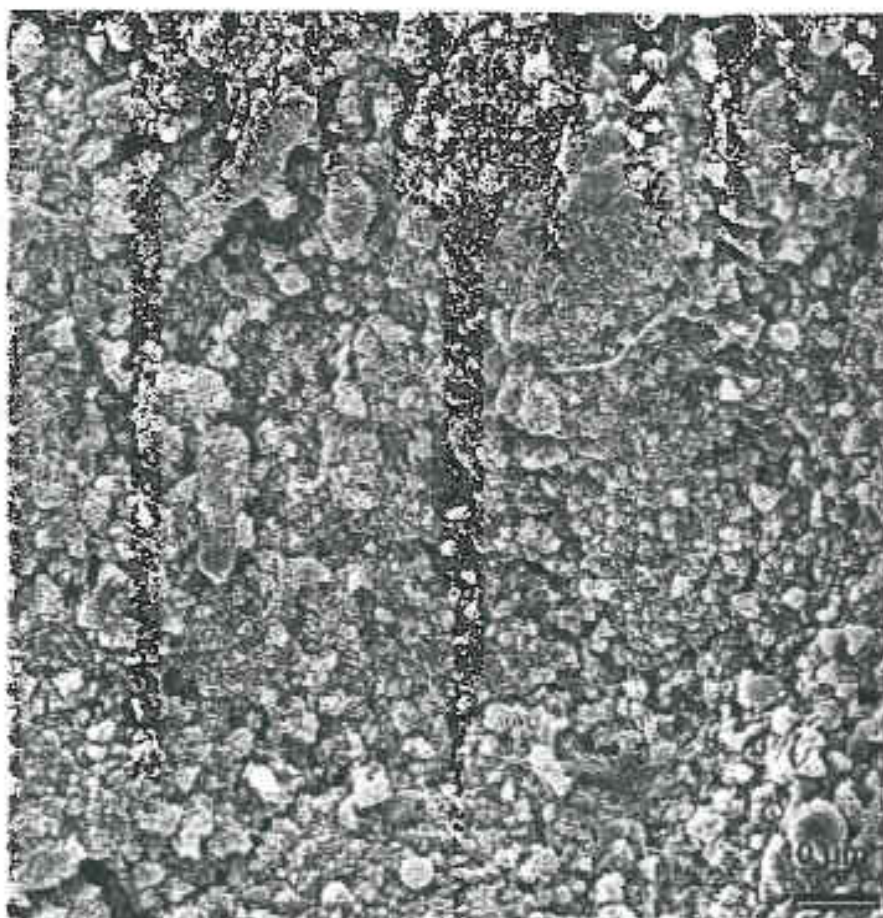
Von jeder Probe wurden Aufnahmen mit 1.000 facher Vergrößerung und mit 10.000 facher Vergrößerung angefertigt.

Es wurde festgestellt, daß die Oberflächenstruktur von Stelle zu Stelle sehr unterschiedlich sein kann. So könnten die Ergebnisse dadurch beeinflußt werden, daß einmal eine besonders dichte und dann eine sehr poröse Betrachtungsstelle gewählt wird. Um eine derartige Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden, wurden die Stellen der Aufnahmen dem Zufall überlassen und ohne langes Suchen direkt nach dem Einbringen der Proben die dann sichtbare Stelle aufgenommen. Bei dieser Vorgehensweise kann es allerdings auch passieren, daß bei einer Aufnahme eine für die Oberfläche atypische Stelle getroffen wird (z.B. undichte Stelle auf ansonsten dichter Oberfläche). Trotzdem gewährleistet diese Vorgehensweise eine objektive und unvoreingenommene Betrachtung der Proben.

Den Aufnahmen kann entnommen werden, daß durch die Verwendung einer SB dichtere Betonoberflächen erreicht wurden.

1000 fache
Vergrößer-
ung:

Wand 1
ohne SB
(B25; PZ)



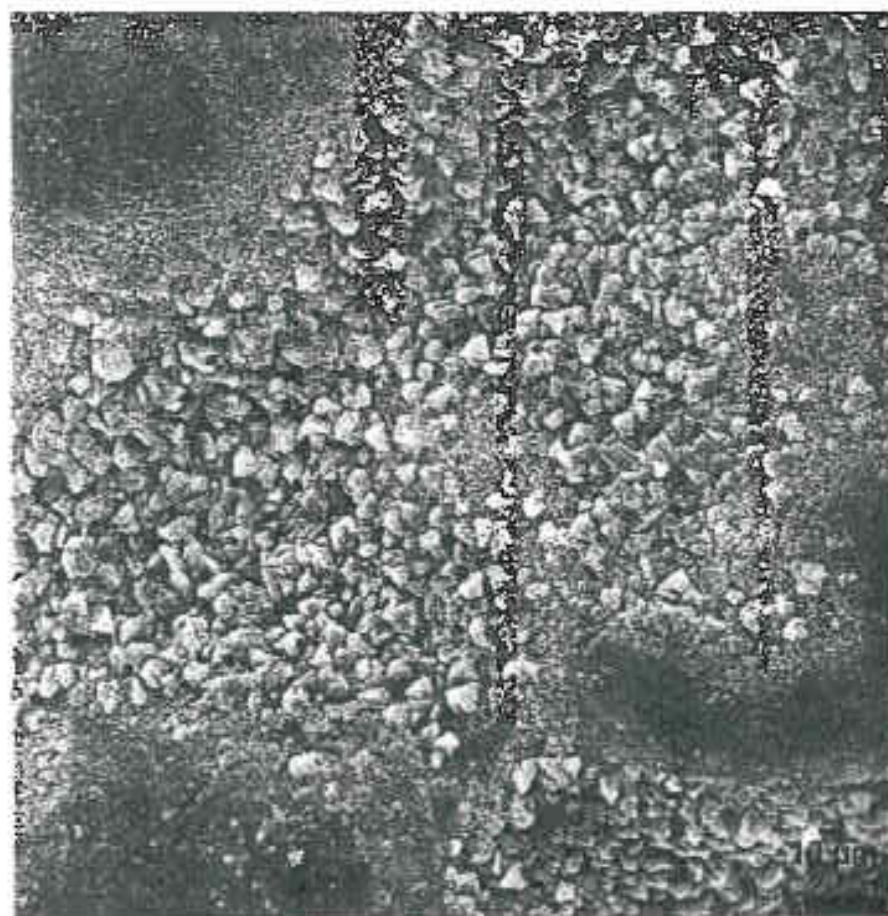
Wand 1
mit SB
(B25; PZ)



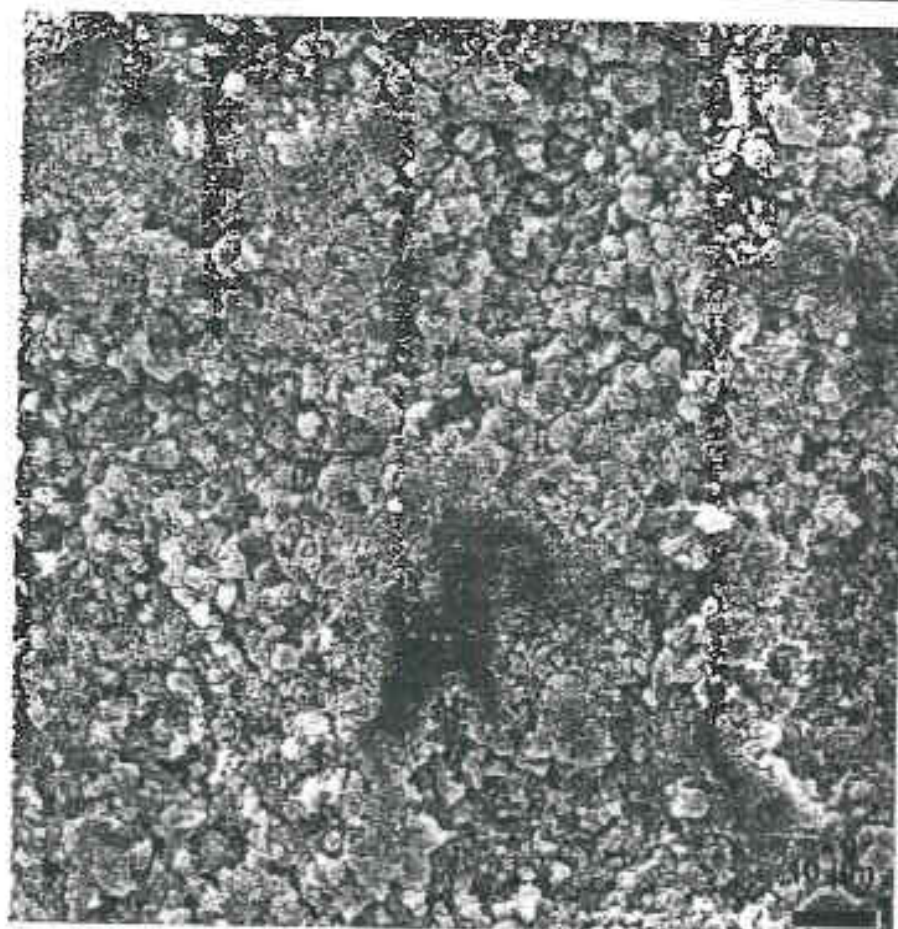
Wand 2
ohne SB
(B35; PZ)



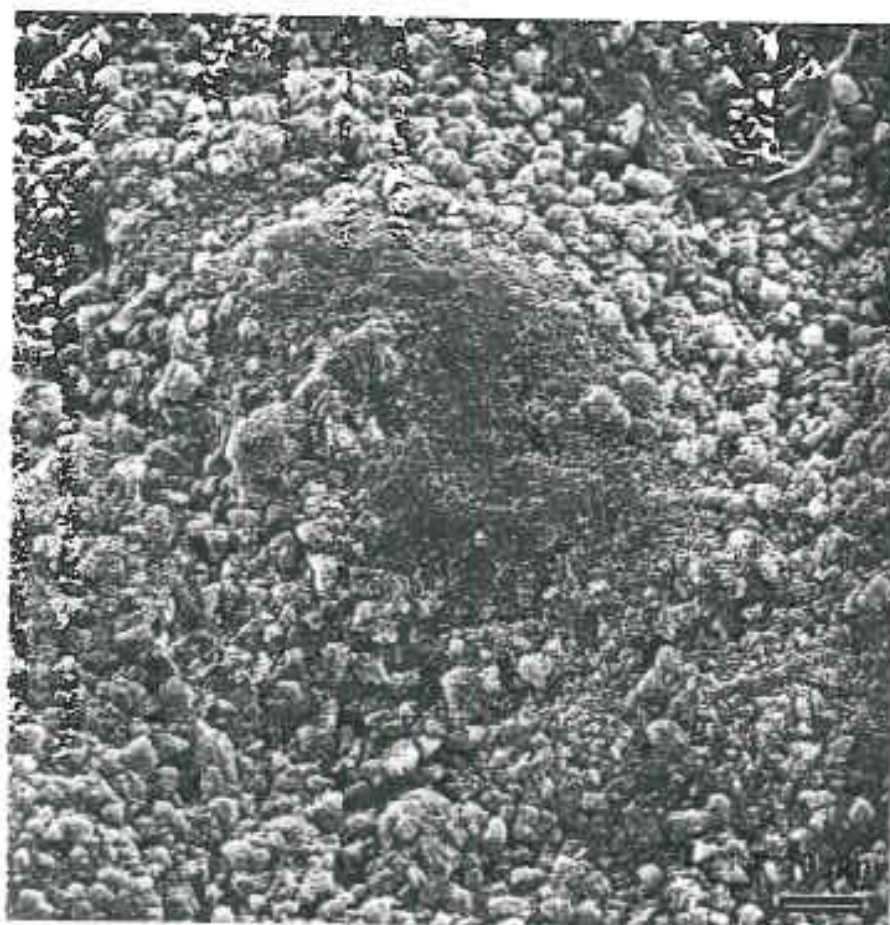
Wand 2
mit SB
(B35; PZ)



Wand 3
ohne SB
(B45; PZ)



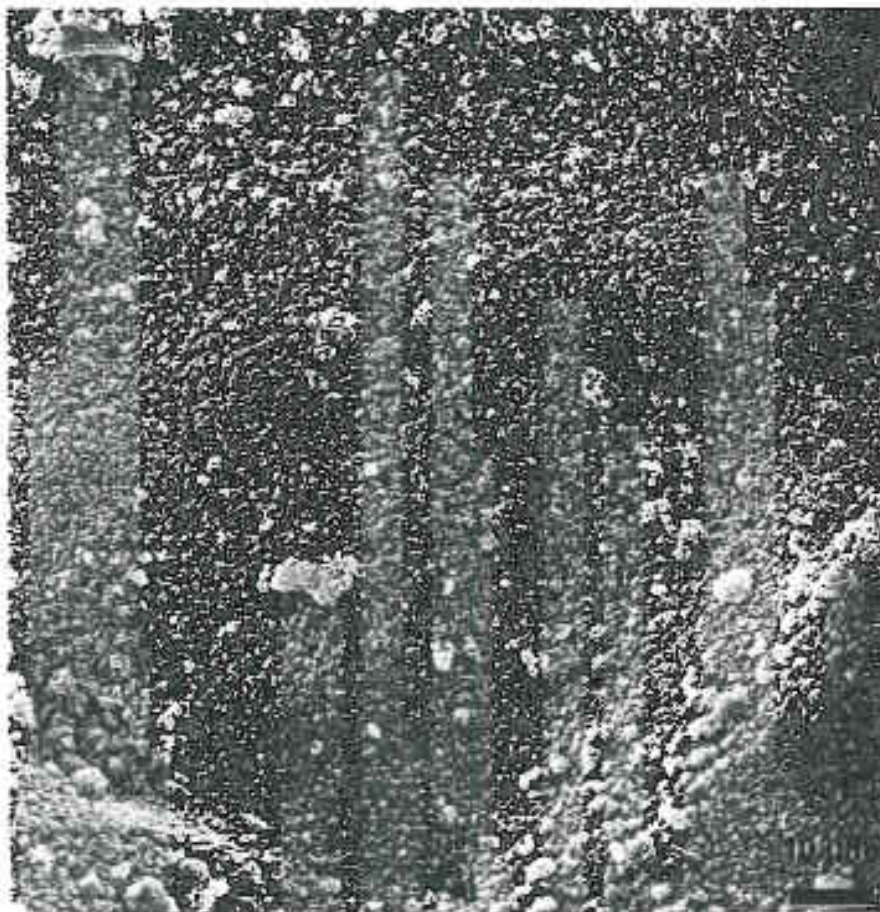
Wand 3
mit SB
(B45; PZ)



Wand 4
ohne SB
(B35; HOZ)



Wand 4
mit SB
(B35; HOZ)



10 000 fache
Vergrößer-
ung:

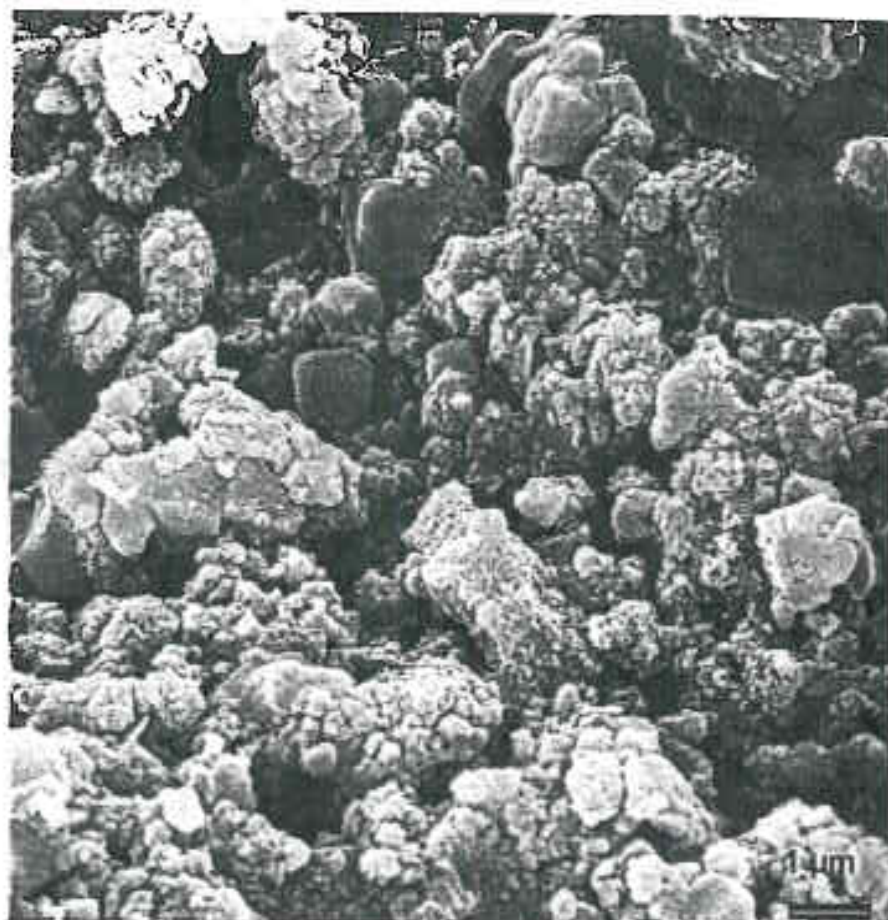
Wand 1
ohne SB
(B25; PZ)



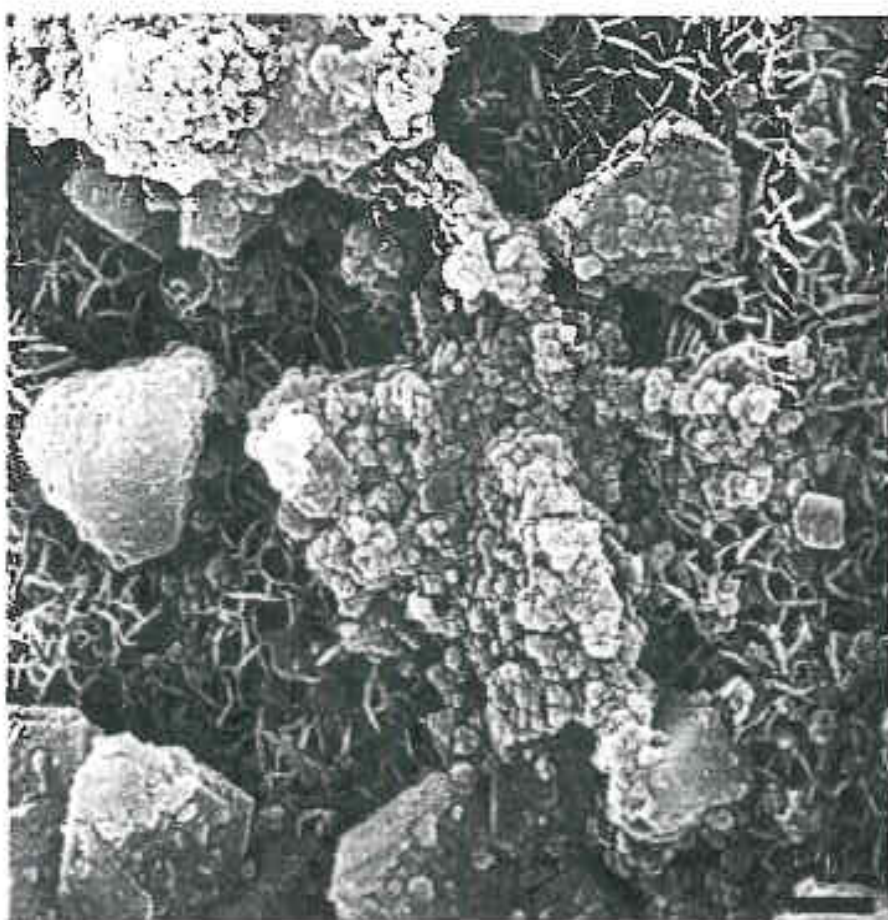
Wand 1
mit SB
(B25; PZ)



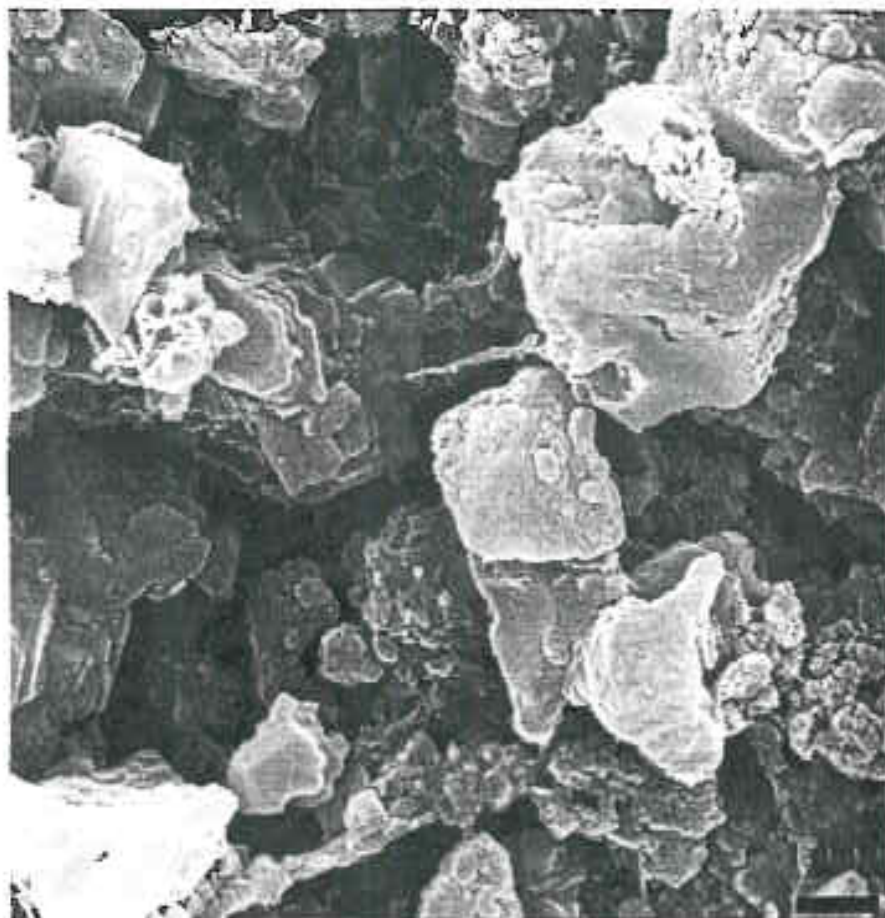
Wand 2
ohne SB
(B35; PZ)



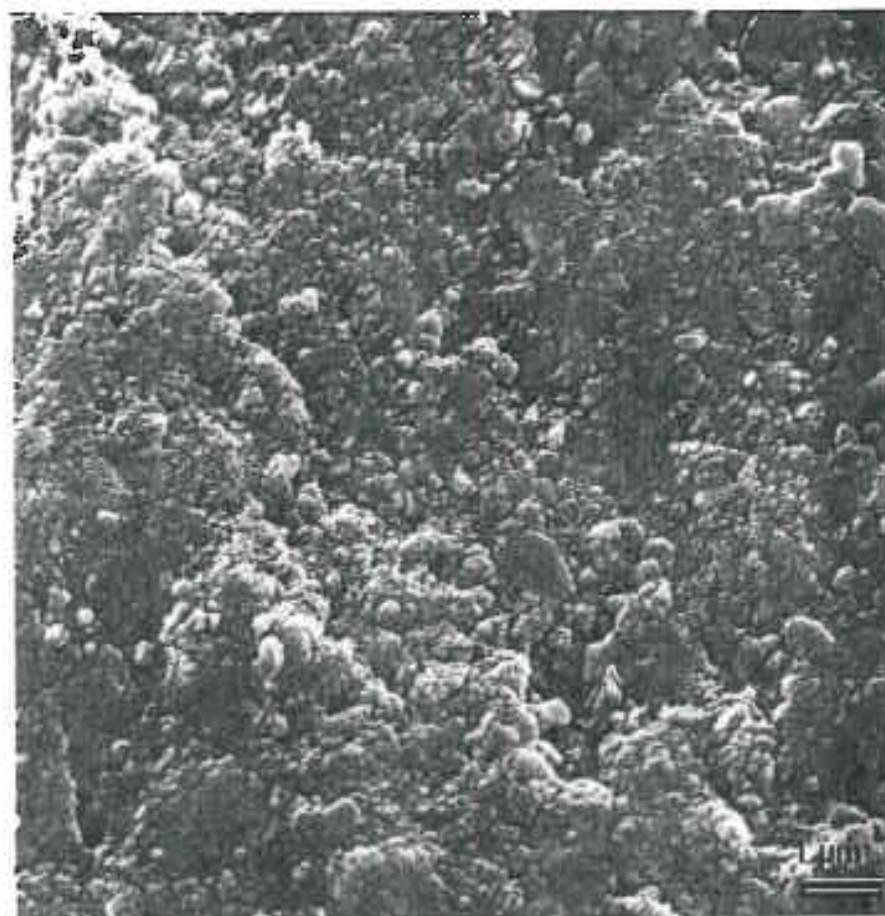
Wand 2
mit SB
(B35; PZ)



Wand 3
ohne SB
(B45; PZ)



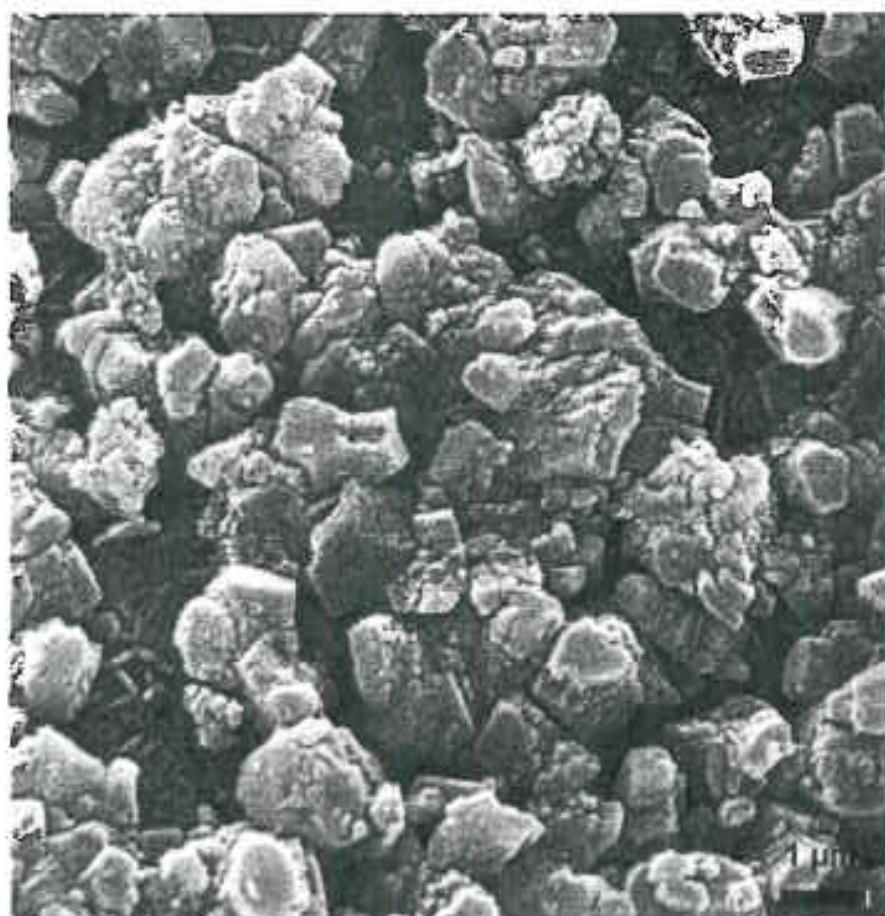
Wand 3
mit SB
(B45; PZ)



Wand 4
ohne SB
(B35; HOZ)



Wand 4
mit SB
(B35; HOZ)



7. Folgerungen für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen

In der vorliegenden Arbeit wurden die Eigenschaften von Betonoberflächen, die mit gewöhnlicher, nicht-saugender Schalung geschalt wurden und von Betonoberflächen, die unter Einsatz von saugenden Schalungsbahnen hergestellt wurden, durch verschiedene Prüfverfahren miteinander verglichen.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß durch den Einsatz einer saugenden SB auf recht einfache Art und Weise praktisch alle Eigenschaften der Randzone, die für die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken von Bedeutung sind (siehe Kap.2), verbessert werden können.

Die Verwendung einer SB führte zu folgenden positiven Effekten:

- Verbesserung des Widerstandes gegen Säureangriff (siehe Kap.6.1)
- Verbesserung der Frost-Tausalzbeständigkeit (siehe Kap.6.2)
- Verminderung der Wasserdurchlässigkeit (siehe Kap.6.3)
- Erhöhung der Haftzugfestigkeit (siehe Kap.6.4)
- Verbesserung der Rückprallwerte (siehe Kap.6.5)
- geringere Permeabilität gegenüber Gasen (siehe Kap.6.6)
- Verringerung der Carbonatisierungsgeschwindigkeit (siehe Kap.6.7)
- Reduzierung des w/z-Wertes (siehe z.B. Kap.6.8)

Es stellte sich heraus, daß Betonoberflächen durch die Verwendung einer saugenden SB lunkerfrei und wesentlich dichter werden.

Das Eindringen sämtlicher zur Korrosion der Bewehrung benötigten Substanzen (siehe Kap.2.3) läuft bei allen verwendeten Betonsorten erheblich langsamer ab.

Sogar bei HOZ-Beton, der im allgemeinen schon von Hause aus eine besonders dichte Struktur besitzt, wurde durch die SB eine noch undurchlässigere Randzone erreicht. Die Kombination HOZ-Beton und SB ist also dort sinnvoll, wo Wert auf eine besonders dichte Oberfläche gelegt wird.

Anhand der vorgestellten Versuche konnte somit die Wirksamkeit von Schalungsbahnen eindrucksvoll belegt werden.

8. Anhang

Meßwerte Säureversuch

Tabelle 8.1: Massen [g] der Probekörper und pH-Werte der Essigsäure

Alter [Tage]	Wand 1 (B25; PZ)		Wand 2 (B35; PZ)		Wand 3 (B45; PZ)		Wand 4 (B35; HOZ)		pH-Wert	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	1277,28	1267,46	1275,08	1321,14	1315,22	1306,60	1332,04	1301,14	2,12	2,12
1	1279,78	1278,48	1277,36	1333,98	1316,22	1315,06	1332,24	1306,94	3,96	4,28
2	1280,78	1281,62	1278,16	1338,00	1316,30	1317,40	1332,46	1308,80	4,37	4,84
3	1281,28	1283,36	1279,40	1339,98	1316,60	1318,64	1332,44	1309,82	4,73	4,90
4	1281,78	1284,54	1280,18	1341,28	1316,48	1319,36	1332,56	1310,80	4,91	5,13
5	1282,16	1285,52	1280,88	1342,12	1316,76	1319,78	1332,78	1311,46	5,05	5,26
16	1285,12	1290,62	1285,84	1348,74	1318,16	1323,12	1334,20	1317,08	6,12	6,24
28	1286,32	1291,54	1287,40	1347,88	1319,08	1324,40	1334,90	1318,92	6,68	6,74
35	1287,26	1292,68	1288,58	1348,48	1319,82	1325,14	1335,50	1319,92	7,05	7,06
35	am 35. Tag Essigsäure ausgetauscht								7,29	7,29
41	1287,12	1291,42	1288,48	1347,00	1319,24	1323,08	1335,94	1318,84	4,55	4,79
48	1287,46	1291,70	1289,26	1347,78	1319,28	1323,74	1336,48	1319,08	5,09	5,31
54	1288,28	1292,00	1290,10	1348,14	1319,90	1324,08	1337,06	1319,28	5,42	5,65
62	1289,02	1292,80	1291,04	1348,54	1320,36	1324,32	1337,00	1319,38	5,79	6,02
62	am 62. Tag Essigsäure ausgetauscht								2,51	2,51
69	1288,10	1290,76	1290,10	1346,28	1319,32	1322,82	1337,22	1317,46	4,41	4,58
76	1288,44	1290,36	1290,32	1345,88	1319,42	1322,46	1337,70	1317,14	4,94	5,08
83	1288,62	1290,12	1290,84	1345,84	1319,88	1322,44	1338,12	1316,94	5,24	5,42
83	am 83. Tag Essigsäure ausgetauscht								2,46	2,46
90	1287,78	1287,32	1290,62	1343,00	1319,22	1320,18	1337,84	1314,92	4,12	4,52
100	1287,54	1286,70	1290,75	1342,08	1319,30	1320,00	1337,66	1314,62	4,80	5,17

Tabelle 8.2: Ultraschalldurchgangszeiten [μs] und -wege [cm] und Mittelwert der berechneten Ultraschallgeschwindigkeit [km/s] der Probekörper in Essigsäure

Alter [Tage]	Wand 1 (B25; PZ)		Wand 2 (B35; PZ)		Wand 3 (B45; PZ)		Wand 4 (B35; HOZ)		Mittelwert v [km/a]	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	29,0	29,8	28,8	30,3	31,5	27,5	29,8	31,5	2,4	2,4
1	35,4	23,6	27,2	19,9	19,3	18,6	27,3	23,7	2,7	3,4
2	22,8	22,5	22,8	19,3	23,6	19,4	26,5	23,3	3,0	3,4
3	23,3	19,7	23,2	18,9	22,7	18,7	26,2	23,5	3,0	3,5
4	23,2	19,2	22,3	18,3	19,4	17,9	24,7	24,7	3,2	3,6
5	24,6	19,6	23,1	18,8	18,8	18,7	23,3	24,9	3,3	3,5
16	24,3	18,3	20,1	18,2	18,6	17,8	24,7	23,2	3,3	3,7
26	23,2	18,5	21,2	18,3	19,1	17,4	24,3	23,6	3,3	3,7
35	23,5	19,8	19,1	18,1	19,6	18,7	22,3	22,6	3,4	3,5
36	am 35. Tag Essigsäure ausgetauscht									
41	23,3	21,5	18,7	19,6	24,2	21,2	21,8	24,2	3,3	3,3
48	23,8	22,1	22,0	22,0	23,6	20,0	23,1	24,1	3,1	3,2
54	21,1	20,6	19,4	19,7	19,4	19,5	22,1	20,0	3,5	3,6
62	22,1	20,5	19,5	19,1	18,5	21,0	23,0	21,1	3,4	3,5
62	am 62. Tag Essigsäure ausgetauscht									
69	22,8	20,7	19,4	20,9	18,9	22,9	22,8	21,5	3,4	3,3
76	21,1	21,2	18,6	18,5	18,9	20,0	19,6	22,3	3,6	3,5
83	20,0	21,4	19,3	20,2	17,5	19,7	22,4	19,9	3,6	3,5
83	am 83. Tag Essigsäure ausgetauscht									
90	21,6	23,8	22,6	23,1	20,6	20,6	22,1	22,4	3,3	3,2
100	23,2	22,2	21,7	24,2	21,7	21,8	20,5	20,9	3,3	3,2
h [cm]	6,97	6,98	7,06	7,25	7,16	7,17	7,18	7,04		

Tabelle 8.3: Massen [g] der Probekörper und pH-Werte in Salpetersäure

Alter [Tage]	Wand 1 (B25; PZ)		Wand 2 (B35; PZ)		Wand 3 (B45; PZ)		Wand 4 (B35; HOZ)		pH-Wert	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	1291,98	1309,18	1308,22	1286,62	1302,60	1283,36	1306,52	1297,90	0,02	0,02
1	1292,34	1315,30	1308,18	1276,62	1301,66	1289,84	1304,76	1303,70	0,49	0,70
2	1293,32	1318,34	1309,10	1280,76	1301,92	1292,90	1304,94	1306,18	1,18	1,34
3	1294,16	1319,82	1309,84	1282,94	1302,34	1294,84	1306,26	1308,14	1,81	2,06
4	1294,66	1320,74	1310,20	1284,04	1302,44	1296,22	1305,58	1308,10	2,28	2,47
5	1294,74	1321,18	1310,44	1284,48	1302,42	1296,54	1305,40	1309,76	2,48	2,78
16	1296,78	1324,92	1312,46	1288,20	1304,14	1298,50	1306,94	1315,94	3,19	3,32
26	1297,62	1325,84	1313,54	1289,14	1304,94	1299,50	1307,66	1317,60	3,48	4,07
35	1298,38	1326,40	1314,64	1289,58	1305,78	1300,16	1308,48	1318,20	3,62	4,44
35	am 35. Tag Salpetersäure ausgetauscht								0,02	0,02
41	1294,82	1323,00	1311,80	1286,26	1303,42	1296,20	1305,30	1313,86	1,20	1,92
48	1295,36	1323,32	1312,30	1286,52	1303,92	1296,70	1306,00	1313,54	2,35	2,91
54	1295,80	1323,40	1312,98	1286,94	1304,28	1296,76	1306,24	1313,72	2,83	3,36
62	1296,18	1323,28	1313,62	1286,40	1304,80	1296,94	1306,70	1313,48	3,14	3,68
69	1296,42	1323,30	1313,94	1286,68	1305,16	1297,34	1307,08	1313,62	3,27	3,81
69	am 69. Tag Salpetersäure ausgetauscht								0,03	0,03
76	1293,50	1317,16	1309,92	1282,02	1301,60	1294,30	1305,06	1311,22	0,96	1,71
83	1293,58	1316,74	1309,86	1281,92	1302,06	1294,36	1305,28	1310,90	2,04	2,57
90	1293,74	1316,24	1310,34	1281,42	1302,48	1294,28	1305,46	1310,76	2,46	3,09
100	1294,26	1316,24	1310,74	1281,50	1303,20	1294,42	1305,96	1311,24	2,67	3,49

Tabelle 8.4: Ultraschalldurchgangszeiten [μs] und -wege [cm] und Mittelwert der berechneten Ultraschallgeschwindigkeit [km/s] der Probekörper in Salpetersäure

Alter [Tage]	Wand 1 (B25; PZ)		Wand 2 (B35; PZ)		Wand 3 (B45; PZ)		Wand 4 (B35; HOZ)		Mittel v [km/s]	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	21,8	27,7	25,6	23,9	26,3	23,1	29,5	24,5	2,8	2,9
1	24,2	24,1	26,9	22,7	25,4	24,3	19,9	19,3	3,0	3,1
2	20,7	24,2	24,0	23,4	24,0	20,9	19,5	20,4	3,3	3,2
3	21,1	25,1	24,9	21,0	23,4	21,7	18,3	24,5	3,2	3,1
4	19,5	22,6	23,4	19,4	24,5	20,5	20,4	17,8	3,3	3,5
5	21,3	25,0	21,0	20,5	24,9	26,4	19,5	18,9	3,3	3,2
16	18,9	23,4	19,7	18,1	21,8	20,4	18,4	20,4	3,6	3,4
26	18,4	21,7	18,1	18,3	22,8	20,8	19,4	18,1	3,6	3,6
35	17,4	21,8	19,0	23,3	23,7	21,5	18,5	16,9	3,7	3,4
35	am 35. Tag Salpetersäure ausgetauscht									
41	21,3	24,1	25,9	19,7	22,8	21,3	18,9	18,4	3,2	3,4
48	22,8	23,4	24,7	19,4	23,8	24,3	19,3	19,0	3,2	3,3
54	19,3	22,0	24,4	19,1	23,1	22,0	18,3	19,5	3,4	3,4
62	19,1	22,8	19,9	18,5	22,4	20,8	18,4	20,2	3,6	3,4
69	18,8	21,2	18,8	18,7	22,0	18,3	18,1	19,6	3,7	3,6
69	am 69. Tag Salpetersäure ausgetauscht									
76	19,0	22,0	21,0	18,8	22,5	20,3	18,3	19,8	3,5	3,5
83	22,1	24,8	23,1	20,1	23,8	21,0	20,2	19,7	3,2	3,3
90	20,7	23,0	20,1	19,6	22,2	18,6	18,5	17,8	3,5	3,6
100	19,3	23,8	20,0	19,8	22,4	19,9	21,0	18,7	3,5	3,6

h [cm]	7,09	7,14	7,2	6,96	7,13	7,05	7,07	7,04
--------	------	------	-----	------	------	------	------	------

Meßwerte CDF-Versuch

Tabelle 8.5: Ist-Temperaturverlauf [°C] CDF

Stunde	Luft in Truhe	Luft in Wanne	Wasserbad in Truhe	Oberfläche Bohrkern	Mitte Bohrkern
0	26,0	19,6	19,4	19,6	19,3
1	25,2	14,2	8,8	13,4	16,0
2	22,8	6,0	-0,7	4,7	8,3
3	19,2	-2,9	-10,5	-1,2	1,0
4	14,9	-11,3	-18,6	-13,5	-7,5
5	12,2	-13,9	-19,1	-17,0	-15,2
6	10,9	-14,7	-18,9	-17,6	-16,5
7	10,5	-14,9	-17,5	-17,1	-16,7
8	13,2	-8,0	-7,4	-9,9	-11,4
9	17,1	0,8	2,5	-3,4	-4,4
10	19,9	9,6	13,1	3,8	0,8
11	23,0	18,8	20,7	16,7	13,5
12	24,1	20,7	18,9	20,4	18,2

Tabelle 8.6: Massen [g] der Probekörper bei Vorsättigung CDF

Alter [Tage]	Wand 1 (B25; PZ)		Wand 2 (B35; PZ)		Wand 3 (B45; PZ)		Wand 4 (B35; HOZ)	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	1261,3	1258,4	1259,3	1260,5	1279,4	1255,5	1253,8	1268,7
1	1266,9	1275,0	1267,2	1275,7	1281,9	1267,4	1254,9	1279,7
2	1268,0	1277,3	1268,6	1278,1	1282,3	1269,2	1255,5	1281,6
3	1268,6	1278,6	1269,3	1279,3	1282,6	1270,2	1255,9	1282,9
4	1269,1	1279,8	1269,8	1280,4	1282,6	1270,9	1256,3	1284,2
5	1269,5	1280,7	1270,2	1281,2	1282,9	1271,6	1256,8	1285,3
6	1270,2	1281,7	1270,9	1282,1	1283,3	1272,4	1257,4	1286,2
8	1270,6	1282,5	1271,4	1282,9	1283,3	1273,0	1257,8	1287,0

Tabelle 8.7: Massen [g] der Probekörper während FT-Beanspruchung CDF

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	1270,6	1282,5	1271,4	1282,9	1283,3	1273,0	1257,8	1287,0
4	1273,3	1280,7	1274,4	1283,5	1285,7	1275,0	1261,0	1240,3
8	1276,1	1271,1	1277,5	1273,1	1288,0	1269,9	1266,6	1210,0
14	1281,9	1253,0	1281,9	1269,8	1289,8	1269,0	1271,4	1156,5
28	1290,9	1163,4	1280,9	1239,3	1301,1	1246,3	1188,2	1080,0

Tabelle 8.8: Massen der Abwitterungen [g] (relativ) bei CDF

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
4	0,05	4,62	0,08	3,78	0,03	1,51	0,10	47,71
8	0,48	11,78	0,54	12,33	0,67	8,21	0,98	37,15
14	0,34	22,12	1,02	7,93	0,71	5,83	5,14	46,04
28	3,67	91,49	14,19	38,00	1,55	29,72	73,25	74,28

Tabelle 8.9: Massen der Abwitterungen [g] (absolut) bei CDF

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
4	0,05	4,62	0,08	3,78	0,03	1,51	0,10	47,71
8	0,53	16,40	0,62	16,11	0,70	9,72	1,08	84,86
14	0,87	38,52	1,64	24,04	1,41	15,55	6,22	130,90
28	4,54	130,01	15,83	62,04	2,96	45,27	79,47	205,18

Tabelle 8.10: Abwitterungen auf die Prüffläche $A=0,0057\text{m}^2$ bezogen $[\text{kg}/\text{m}^2]$ (absolut) bei CDF

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
4	0,01	0,81	0,01	0,67	0,01	0,27	0,02	8,41
8	0,09	2,89	0,11	2,84	0,12	1,71	0,19	14,95
14	0,15	6,79	0,29	4,24	0,25	2,74	1,10	23,07
28	0,80	22,91	2,79	10,93	0,52	7,98	14,00	36,16

Tabelle 8.11: Ultraschalldurchgangszeiten $[\mu\text{s}]$ bei CDF

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	21,8	19,9	28,9	20,7	21,3	20,4	22,4	21,6
4	18,4	17,0	24,7	21,9	20,8	21,9	21,2	23,5
8	19,2	17,7	19,5	21,9	16,1	20,9	16,3	24,2
14	20,6	24,3	24,6	27,5	22,1	25,0	22,6	33,9
28	23,0	32,0	27,7	40,1	21,8	34,9	27,1	36,8

Tabelle 8.12: Ultraschalldurchgangszeiten $[\text{km}/\text{s}]$ und -wege $[\text{cm}]$ bei CDF

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4		Mittelwert	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB		
0	3,2	3,5	2,4	3,4	3,3	3,4	3,0	3,2	3,0	3,4
4	3,8	4,1	2,8	3,2	3,4	3,2	3,2	2,9	3,3	3,4
8	3,6	3,9	3,6	3,2	4,3	3,3	4,2	2,9	3,9	3,3
14	3,4	2,9	2,8	2,6	3,1	2,8	3,0	2,0	3,1	2,6
28	3,0	2,2	2,5	1,8	3,2	2,0	2,5	1,9	2,8	2,0
Weg [cm]	6,94	6,97	6,96	7,02	6,97	6,97	6,83	6,92		

Meßwerte „Manschetten“-Versuch

Tabelle 8.13: Ist-Temperaturverlauf [°C] „Manschette“

Stunde	Luft in Truhe	Prüf- flüssigkeit	Oberfläche Bohrkern	Mitte Bohrkern
0	21,4	16,1	15,3	13,9
1	11,7	12,8	13,4	14,8
2	1,4	5,7	6,7	9,0
3	-8,6	-2,6	-1,5	1,2
4	-18,4	-8,6	-7,5	-4,9
5	-19,2	-14,9	-14,4	-12,8
6	-19,2	-17,4	-17,2	-16,5
7	-19,1	-18,5	-18,3	-18,0
8	-10,1	-14,5	-14,8	-16,2
9	0,4	-6,7	-7,5	-9,5
10	10,4	2,0	0,1	-2,8
11	20,5	13,4	11,8	8,1
12	21,7	16,6	15,7	14,3

Tabelle 8.14: Massen [g] der Probekörper bei Vorsättigung „Manschette“

Alter [Tage]	Wand 1 (B25; PZ)		Wand 2 (B35; PZ)		Wand 3 (B45; PZ)		Wand 4 (B35; HOZ)	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	1421,0	1387,3	1392,6	1387,3	1397,0	1401,5	1411,2	1416,5
1	1425,4	1402,7	1397,6	1404,1	1399,6	1416,1	1411,6	1427,9
2	1426,5	1406,0	1398,5	1407,5	1400,4	1418,0	1412,2	1430,8
3	1426,7	1407,3	1398,7	1409,0	1400,4	1419,0	1412,3	1432,2
4	1426,9	1408,5	1398,8	1410,4	1400,5	1419,6	1412,4	1433,7
5	1427,2	1409,4	1399,0	1411,2	1400,6	1420,1	1412,6	1434,6
6	1428,2	1411,2	1399,4	1412,4	1401,1	1421,0	1413,1	1435,9
8	1428,8	1412,3	1399,7	1413,8	1401,3	1421,8	1413,4	1437,6
10	1428,8	1413,4	1400,0	1414,8	1401,3	1422,5	1413,7	1438,7
12	1428,8	1413,6	1400,0	1415,3	1401,3	1422,7	1413,7	1439,5

Tabelle 8.15: Massen [g] der Probekörper während FT-Beanspruchung „Manschette“

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	1428,8	1413,6	1400,0	1415,3	1401,3	1422,7	1413,7	1439,5
4	1430,4	1417,3	1400,9	1416,6	1402,6	1425,3	1415,0	1414,3
8	1430,6	1410,9	1401,1	1411,1	1402,5	1418,1	1415,6	1390,3
14	1431,9	1400,5	1401,9	1403,3	1404,0	1416,3	1417,3	1380,8
28	1439,7	1373,6	1406,1	1390,6	1407,5	1404,9	1424,7	-

Tabelle 8.16: Massen der Abwitterungen [g] (relativ) bei „Manschette“

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
4	0,13	0,2	0,13	2,01	0,05	0,68	0,16	27,78
8	0,13	8,1	0,13	7,65	0,09	6,99	0,06	23,92
14	0,08	14,53	0,08	10,61	0,16	5,81	0,01	8,80
28	0,46	31,51	0,55	20,04	0,61	22,16	0,29	-

Tabelle 8.17: Massen der Abwitterungen [g] (absolut) bei „Manschette“

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
4	0,13	0,16	0,13	2,01	0,05	0,68	0,16	27,78
8	0,26	8,25	0,26	9,66	0,14	7,67	0,22	51,70
14	0,34	22,78	0,34	20,27	0,30	13,48	0,23	60,50
28	0,80	54,29	0,89	40,31	0,91	35,64	0,52	-

Tabelle 8.18: Abwitterungen auf die Prüffläche $A=0,0057\text{m}^2$ bezogen $[\text{kg}/\text{m}^2]$ (absolut) bei „Manschette“

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
4	0,02	0,03	0,02	0,35	0,01	0,12	0,03	4,90
8	0,05	1,45	0,05	1,70	0,02	1,35	0,04	9,11
14	0,06	4,01	0,06	3,57	0,05	2,38	0,04	10,66
28	0,14	9,57	0,16	7,10	0,16	6,28	0,09	-

Tabelle 8.19: Ultraschalldurchgangszeiten $[\mu\text{s}]$ bei „Manschette“

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4	
	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB	mit SB	ohne SB
0	24,8	27,9	23,1	24,0	22,5	22,0	22,8	20,8
4	25,1	25,7	24,3	20,4	24,0	20,9	21,9	24,0
8	26,9	31,7	26,7	21,4	24,1	24,0	22,9	21,0
14	27,2	32,2	26,5	27,5	24,2	24,4	22,1	22,3
28	28,6	40,1	26,8	40,3	24,7	29,3	23,2	-

Tabelle 8.20: Ultraschalldurchgangszeiten $[\text{km}/\text{s}]$ und -wege $[\text{cm}]$ bei „Manschette“

FTW	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Wand 4		Mittelwert	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB		
0	2,9	2,5	3,1	2,9	3,2	3,2	3,1	3,4	3,0	3,0
4	2,8	2,7	2,9	3,5	3,0	3,4	3,2	2,9	3,0	3,1
8	2,7	2,2	2,6	3,3	2,9	3,0	3,1	3,4	2,8	3,0
14	2,6	2,2	2,7	2,6	2,9	2,9	3,2	3,2	2,9	2,7
28	2,5	1,7	2,6	1,7	2,9	2,4	3,0	-	2,8	2,0
Weg [cm]	7,14	6,96	7,06	7,05	7,09	7,10	7,05	7,05		

Meßwerte und Wasserfronten WU-Versuch

Tabelle 8.21: Wassereindringtiefen [mm]

Probe	Wassereindringtiefe an Meßstelle in mm											Mittelwert [mm]	Verbesserung Mittel	Maximum [mm]	Verbesserung Max
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	mit SB	4,50	10,60	11,00	9,80	11,80	8,20	10,40	15,00	12,50	8,00	3,50	9,57	15,50	190,3%
	ohne SB	21,00	19,00	31,50	40,20	40,00	43,50	45,00	42,30	35,00	25,40	18,80	32,88	45,00	
2	mit SB	6,50	8,20	10,00	13,00	12,20	10,50	18,20	13,50	10,20	10,00	5,20	10,68	18,20	155,5%
	ohne SB	28,80	33,50	37,00	35,80	40,20	36,00	41,20	38,20	41,80	40,20	31,00	36,70	46,50	
3	mit SB	11,50	11,80	6,50	15,00	16,80	16,80	7,50	6,10	6,00	7,50	5,50	10,09	18,50	128,1%
	ohne SB	18,80	18,00	19,20	26,80	41,00	42,10	30,50	28,40	33,80	32,00	32,00	29,33	42,20	
4	mit SB	0,00	8,50	9,80	11,20	11,50	12,20	10,60	7,80	5,00	8,00	5,00	8,15	13,40	79,1%
	ohne SB	5,50	7,20	14,00	17,10	18,00	23,80	24,00	19,20	15,80	9,00	3,00	14,24	24,00	

Diagramm 8.1:

Wassereindringtiefen Wand 1 (B25; PZ)

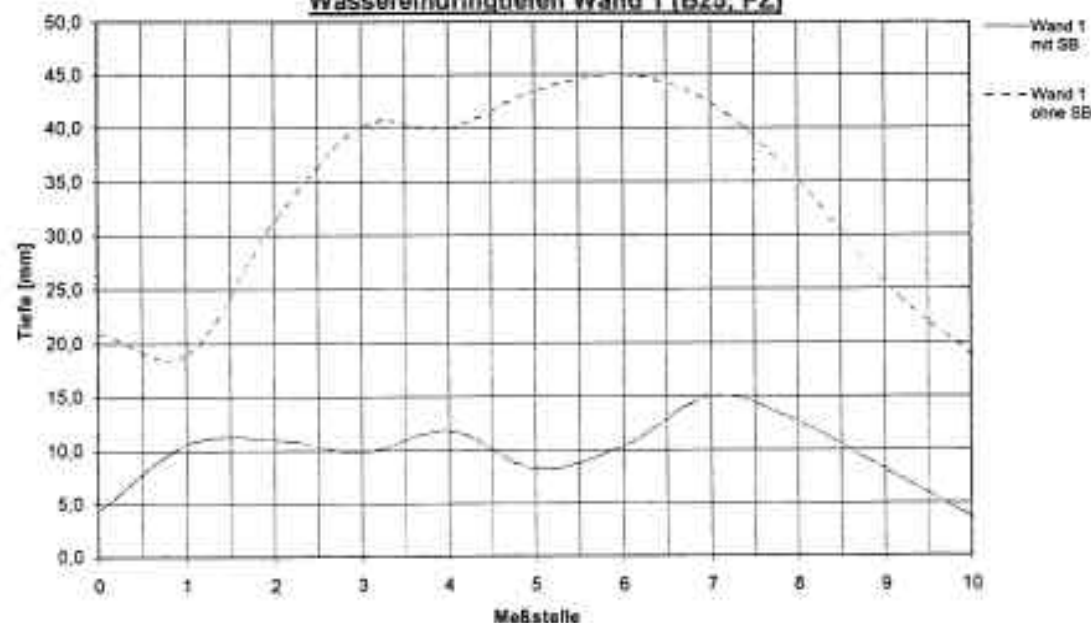


Diagramm 8.2:

Wassereindringtiefen Wand 2 (B35; PZ)

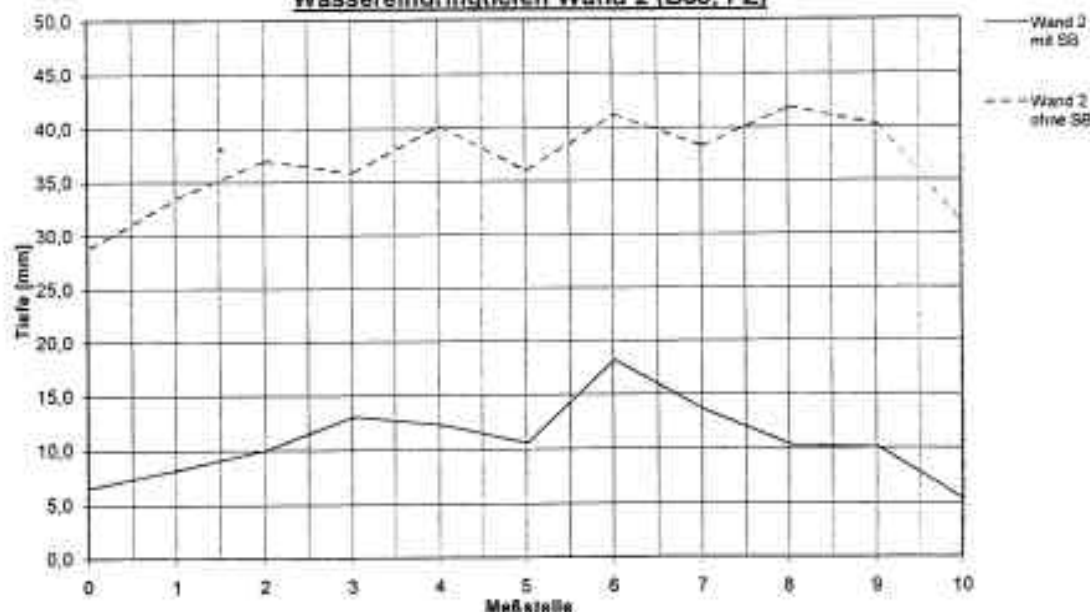


Diagramm 8.3:

Wassereindringtiefen Wand 3 (B45; PZ)

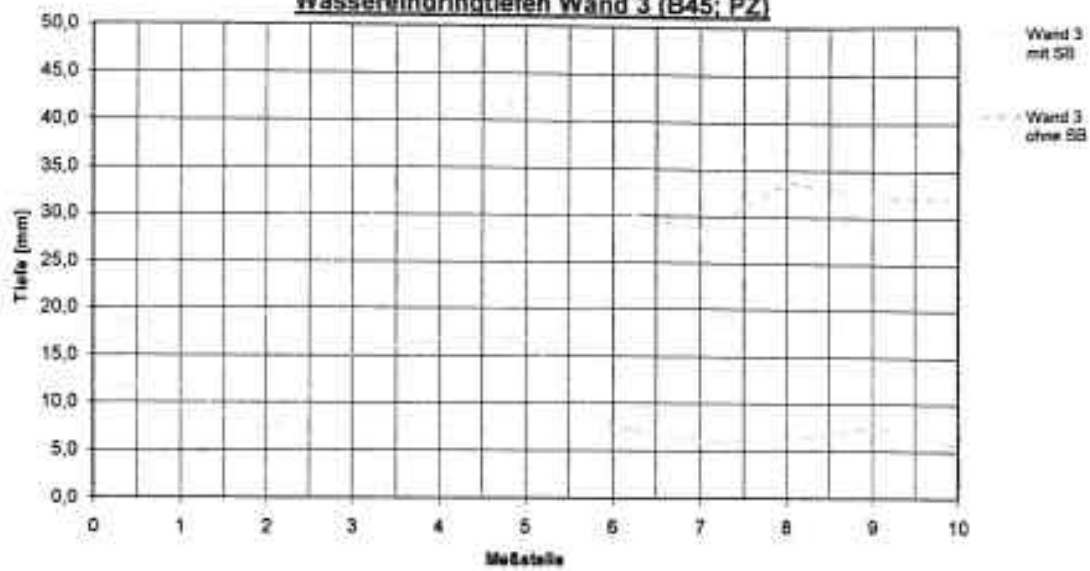
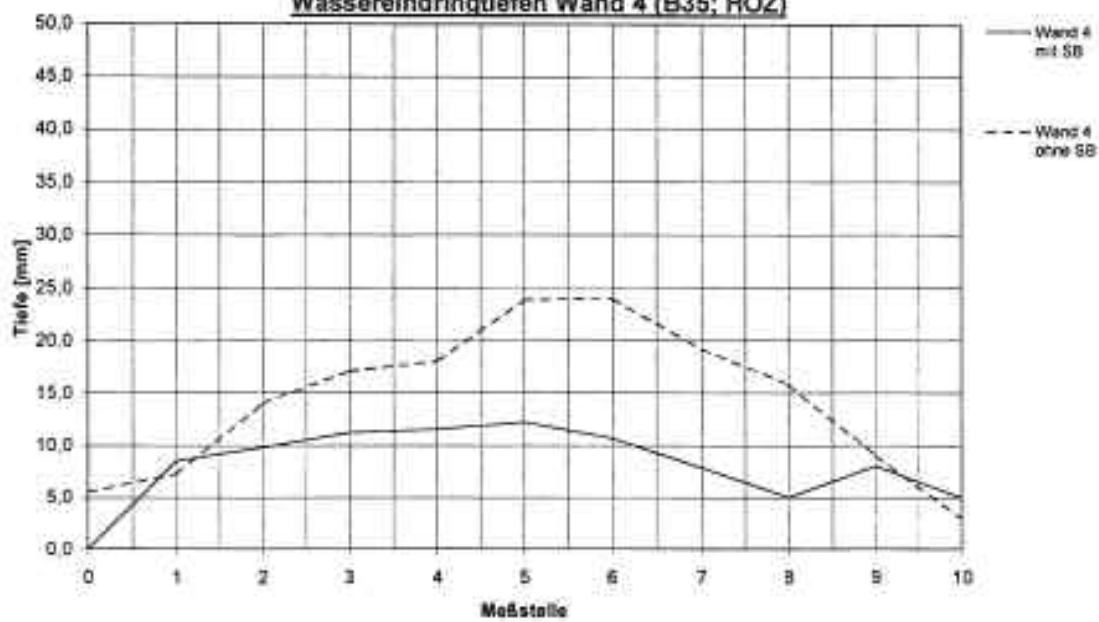


Diagramm 8.4:

Wassereindringtiefen Wand 4 (B35; HOZ)



Meßwerte Rückprallprüfung

Tabelle 8.22: Rückprallwerte in Skalenteilen

Wand 1 (B25; PZ)								
ohne SB				mit SB				
unten	mitte	oben		unten	mitte	oben		
38	48	45		50	48	48		
42	42	44		52	46	46		
43	43	42		50	50	48		
40	47	46		49	51	47		
46	46	44		50	47	47		
Mittelwerte				Mittelwerte				
41,8	45,2	44,2		50,2	48,4	47,2		
100,00%	100,00%	100,00%		120,10%	107,08%	106,79%		
Mittelwert insgesamt			Mittelwert insgesamt					
43,7			48,6					

Wand 2 (B35; PZ)								
ohne SB				mit SB				
unten	mitte	oben		unten	mitte	oben		
40	48	47		48	54	47		
40	43	44		46	53	44		
40	40	39		50	54	44		
41	42	42		50	49	50		
43	44	46		49	46	44		
Mittelwerte				Mittelwerte				
40,6	43,4	43,6		48,6	51,2	45,8		
100,00%	100,00%	100,00%		119,12%	117,97%	105,05%		
Mittelwert insgesamt			Mittelwert insgesamt					
42,6			48,5					

Wand 3 (B45; PZ)								
ohne SB				mit SB				
unten	mitte	oben		unten	mitte	oben		
46	40	46		48	51	44		
48	46	43		53	50	49		
48	42	47		46	49	44		
48	44	47		52	51	45		
47	46	46		52	44	47		
Mittelwerte				Mittelwerte				
47,4	43,6	45,8		50,2	49,0	45,8		
100,00%	100,00%	100,00%		105,91%	112,39%	100,00%		
Mittelwert insgesamt			Mittelwert insgesamt					
45,6			48,3					

Wand 4 (B35; HOZ)								
ohne SB				mit SB				
unten	mitte	oben		unten	mitte	oben		
46	40	39		46	50	46		
43	39	43		46	51	46		
38	40	40		45	50	42		
37	39	38		44	48	42		
39	41	38		45	48	39		
Mittelwerte				Mittelwerte				
40,6	39,8	39,6		45,2	49,4	43,0		
100,00%	100,00%	100,00%		111,33%	124,12%	108,59%		
Mittelwert insgesamt			Mittelwert insgesamt					
40,0			45,9					

Meßwerte Verlauf Sättigungswert und Rohdichte

Tabelle 8.23: Massen der Proben nach 48 h im Trockenofen

Masse m_{tr} [g] nach 48 h Trocknen	Wand 1		Wand 2		Wand 3	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	91,75	88,03	91,87	88,17	90,28	85,15
Scheibe 2	100,68	93,17	93,10	90,28	97,35	88,10
Scheibe 3	95,31	90,02	89,83	91,77	92,39	70,31
Scheibe 4	63,79	69,28	77,66	75,18	69,09	73,17

Tabelle 8.24: Massen der Proben nach 45 h Wasserlagerung unter Atmosphärendruck

Masse $m_{w,s}$ [g] nach 45 h in H_2O	Wand 1		Wand 2		Wand 3	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	96,95	94,48	97,69	94,72	96,52	92,13
Scheibe 2	105,62	98,70	99,13	95,54	102,98	94,06
Scheibe 3	100,94	95,59	95,13	97,27	98,35	74,91
Scheibe 4	68,15	73,69	82,29	79,88	73,25	78,08

Tabelle 8.25: Berechnete Wasseraufnahme der Proben unter Atmosphärendruck

H_2O -Aufnahme W_s [g] $W_s = m_{w,s} - m_{tr}$	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Mittelwert	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	5,20	6,45	5,82	6,55	6,24	6,98	5,75	6,66
Scheibe 2	4,94	5,53	6,03	5,26	5,63	5,96	5,53	5,58
Scheibe 3	5,63	5,57	5,30	5,50	5,96	4,60	5,63	5,22
Scheibe 4	4,36	4,41	4,63	4,70	4,16	4,91	4,38	4,67

Tabelle 8.26: Massen der Proben unter Wasser bei Unterwasserwägung

Masse $m_{w,s}$ [g] nach 45 h in H_2O	Wand 1		Wand 2		Wand 3	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	96,95	94,48	97,69	94,72	96,52	92,13
Scheibe 2	105,62	98,70	99,13	95,54	102,98	94,06
Scheibe 3	100,94	95,59	95,13	97,27	98,35	74,91
Scheibe 4	68,15	73,69	82,29	79,88	73,25	78,08

Tabelle 8.27: Berechnete Volumina der Proben

Volumen V_R [cm ³] $V_R = m_{w,s} - m_{uw}$	Wand 1		Wand 2		Wand 3	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	40,10	40,08	40,86	40,15	40,60	39,39
Scheibe 2	42,75	40,60	41,46	39,17	42,56	39,23
Scheibe 3	41,71	39,42	39,35	40,03	41,04	30,96
Scheibe 4	28,35	30,58	33,82	32,95	30,09	32,51

Tabelle 8.28: Berechnete Rohdichten der Proben

Rohdichte ρ [g/cm ³] $\rho = m_v/V_R$	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Mittelwert	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	2,29	2,20	2,25	2,20	2,22	2,16	2,25	2,18
Scheibe 2	2,36	2,29	2,25	2,30	2,29	2,25	2,30	2,28
Scheibe 3	2,29	2,28	2,28	2,29	2,25	2,27	2,27	2,28
Scheibe 4	2,25	2,27	2,30	2,28	2,30	2,25	2,28	2,27

Tabelle 8.29: Massen der Proben nach 24 h Wasserlagerung unter Druck

Masse $m_{w,d}$ [g] nach 24h Druck	Wand 1		Wand 2		Wand 3	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	97,58	94,97	98,43	95,41	97,18	92,73
Scheibe 2	106,05	99,19	99,82	95,85	103,64	94,60
Scheibe 3	101,56	96,08	95,73	97,66	99,00	75,06
Scheibe 4	68,37	74,16	82,57	80,10	73,56	78,51

Tabelle 8.30: Berechnete Wasseraufnahme der Proben unter Druck

H ₂ O-Aufnahme W_d [g] $W_d = m_{w,d} - m_{tr}$	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Mittelwert	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	5,83	6,94	6,56	7,24	6,90	7,58	6,43	7,25
Scheibe 2	5,37	6,02	6,72	5,57	6,29	6,50	6,13	6,03
Scheibe 3	6,25	6,06	5,90	5,89	6,61	4,75	6,25	5,57
Scheibe 4	4,58	4,88	4,91	4,92	4,47	5,34	4,65	5,05

Tabelle 8.31: Berechnete Sättigungswerte der Proben

Sättigungswert S $S = W_s/W_d$	Wand 1		Wand 2		Wand 3		Mittelwert	
	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB	mit SB	o. SB
Scheibe 1	0,89	0,93	0,89	0,90	0,90	0,92	0,89	0,92
Scheibe 2	0,92	0,92	0,90	0,94	0,90	0,92	0,90	0,93
Scheibe 3	0,90	0,92	0,90	0,93	0,90	0,97	0,90	0,94
Scheibe 4	0,95	0,90	0,94	0,96	0,93	0,92	0,94	0,93

Last-Verformungsdiagramme der Druckfestigkeitsprüfung

Diagramm 8.5:

Druckfestigkeit Bohrkern Wand-Nr. 1 (B25; PZ)

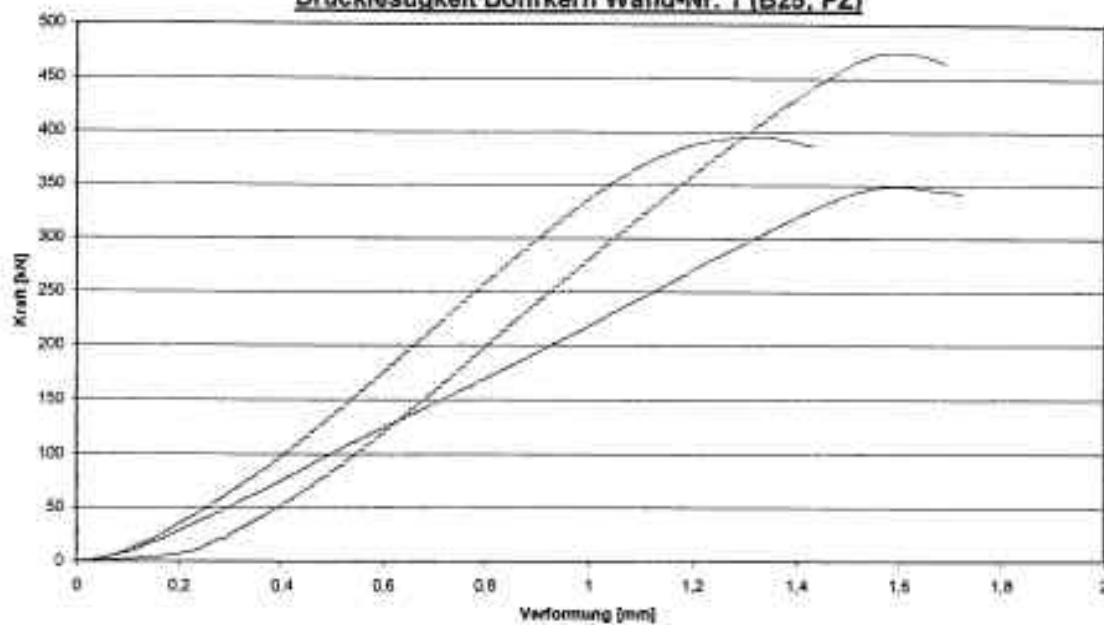


Diagramm 8.6:

Druckfestigkeit Bohrkern Wand-Nr. 2 (B35; PZ)

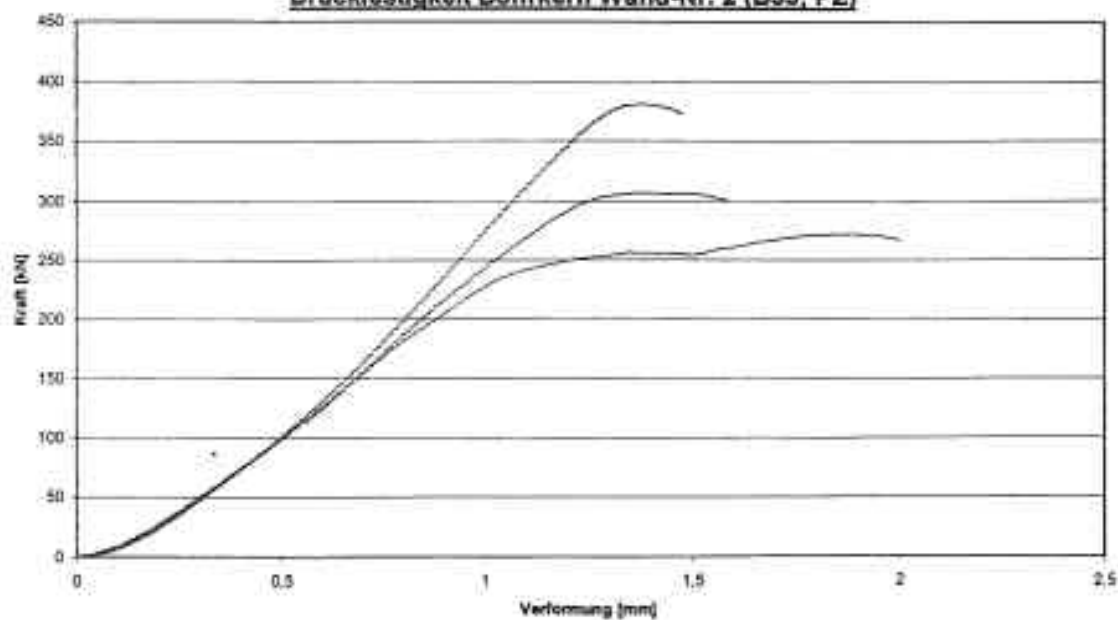


Diagramm 8.7:

Druckfestigkeit Bohrkern Wand-Nr. 3 (B45; PZ)

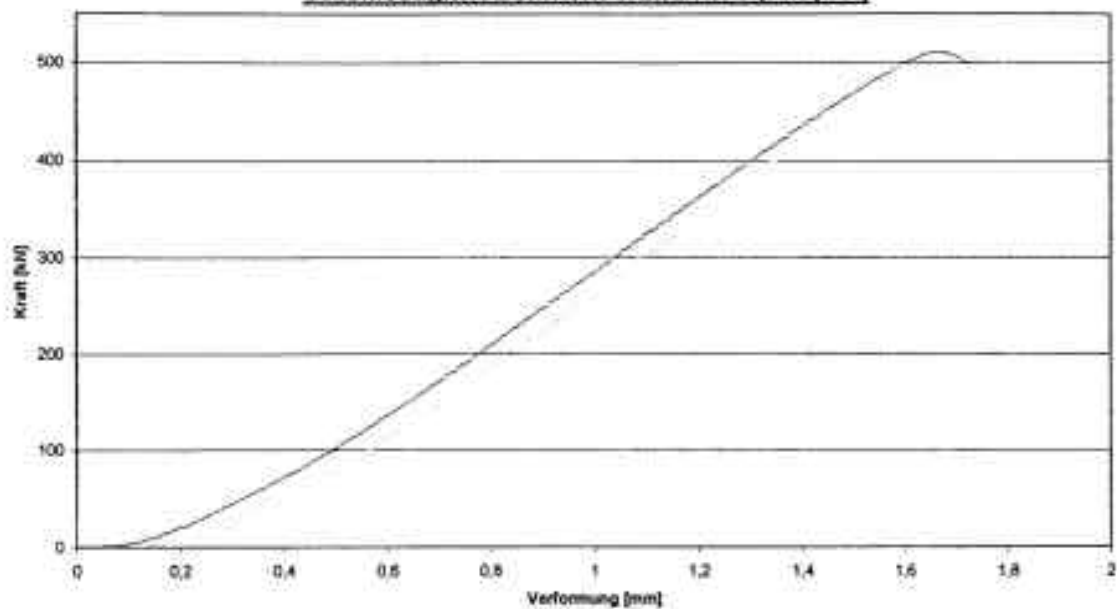
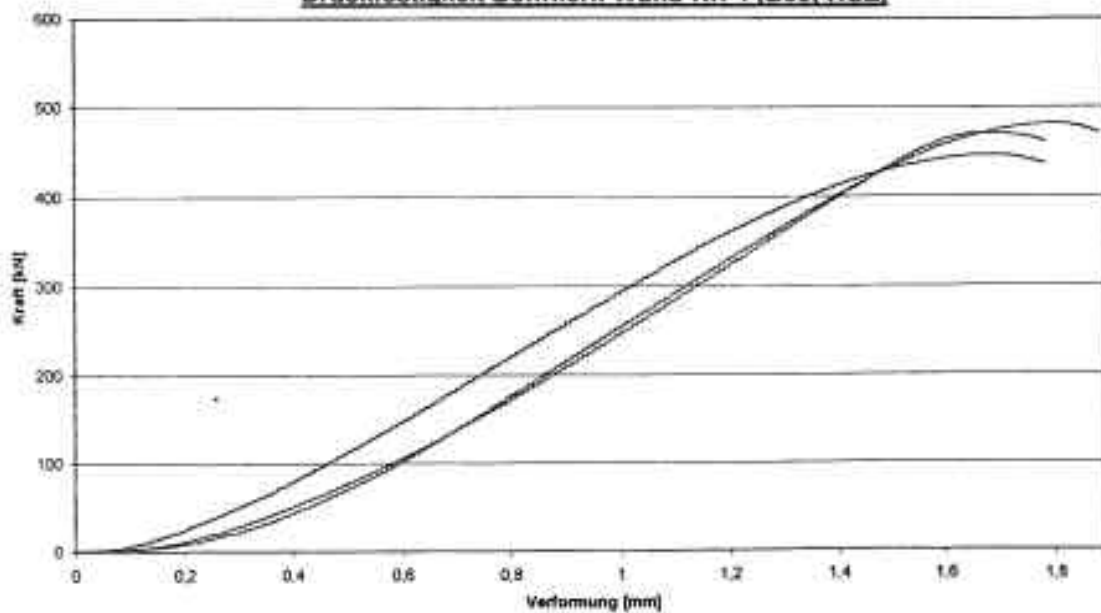


Diagramm 8.8:

Druckfestigkeit Bohrkern Wand-Nr. 4 (B35; HOZ)



9. Literaturverzeichnis

- [1] Konermann, Reinhard: Betonoberflächen: Schützen und Instandsetzen, Stuttgart 1988
- [2] Weigler, Helmut / Karl, Sieghart: Beton: Arten, Herstellung, Eigenschaften (Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau), Berlin 1989
- [3] Ruffert, Günther: Lexikon der Betoninstandsetzung, Stuttgart 1999
- [4] Bayer, Edwin / Kampen, Rolf: Beton-Praxis, Ein Leitfaden für die Baustelle, Hrsg. Bundesverband der deutschen Zementindustrie, 7.Aufl., Düsseldorf 1997
- [5] Setzer, Max J.: RILEM-Empfehlung CDF, aus Bedienungsanleitung CDF-Prüfanlage, Essen 1996
- [6] Setzer, Max J.: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonwaren, in: Forschungsberichte aus dem FB Bauwesen Heft Nr.49, Essen 1990
- [7] DIN 1048 Prüfverfahren für Beton Teil 1-4, Juni 1991, DIN
- [8] Schröder, Manfred u.a.: Schutz und Instandsetzung von Stahlbeton: Anleitung zur sachkundigen Planung und Ausführung, Renningen-Malmsheim 1999
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 422: Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, Berlin 1991
- [10] Torrent, R. J. / Frenzer, G.: Über die Permeabilität des Überdeckungsbetons, aus: Bedienungsanleitung Torrent Permeability Tester, Zürich, o.J.
- [11] Hartmann, Volker: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton CDF-Test, Hattingen 1992
- [12] Nürnberger, Ulf: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen, Wiesbaden 1995
- [13] Schäffler, Hermann / Bruy, Erhard / Schelling, Günther: Baustoffkunde: Aufbau und Technologie, Arten und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung der Baustoffe, 7.Auflage, Würzburg 1996
- [14] Karl, Jürgen-Henning / Solacolu, Cornelia: Verbesserung der Betonrandzone: Wirkung und Einsatzgrenzen der saugenden Schalungsbahn, Zeitschrift „Beton“, Heft 5, Düsseldorf 1993, S.222-225

- [15] Lohmeyer, Gottfried: Beton-Technik: Handbuch für Planer und Konstrukteure, Düsseldorf 1989
- [16] Knöfel, Dietbert: Stichwort: Baustoffkorrosion, Wiesbaden 1975
- [17] Luley, Hanspeter / Kampen, Rolf / Kind-Barkauskas, Friedbert / Klose, Norbert / Tegelaar, Rudolf: Instandsetzen von Stahlbetonoberflächen: Ein Leitfaden für den Auftraggeber, Hrsg. Bundesverband der deutschen Zementindustrie, 7. Auflage, Düsseldorf 1997
- [18] Jungwirth, Dieter / Beyer, Erwin / Grübl, Peter: Dauerhafte Betonbauwerke: Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis, Düsseldorf 1986
- [19] Barnewold, Reinhard: Saugende Schalungsbahnen: Eine Technik zur Verbesserung der Betonrandzone, Diplomarbeit, Stuttgart 2000
- [20] Härig, Siegfried / Günther, Karl / Klausen, Dietmar: Technologie der Baustoffe: Handbuch für Studium und Praxis, 13. Auflage, Heidelberg 1996
- [21] DIN 52113: Bestimmung des Sättigungswertes
- [22] Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“, Deutscher Ausschuß für Stahlbetonbau (Hg.), Berlin 1990 ff
- [23] Grunau, Edvard B.: Stahlbeton - Instandsetzung und Schutz, Köln 1986
- [24] Proceq SA: Bedienungsanleitung Torrent Permeability Tester, Zürich, o.J.
- [25] Borucki, H. / Fischer, W. / Resseguier, P. / Stadelmann, W.: „Die Chemie“, Mannheim 1984
- [26] DIN 1996 Teil7: Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete
- [27] Solacolu, Cornelia / Karl, Jürgen-Henning: Einfluß saugender Schalung auf die Qualität der Betonrandzone, Philipp Holzmann AG, Zentrales Baustofflabor, Neu-Isenburg 1993 S.1552-1558
- [28] Vißmann, Heinz-Werner: Qualität der Betondeckung: Dichte der Betonrandzone, Zeitschrift „Beton“, Heft 5, Dortmund 1994, S.260-268
- [29] Betonqualität verbessern - wirtschaftlich schalen: Ein Bollwerk gegen Stoffe, die den Beton im äußeren Bereich durchdringen, Zeitschrift „Bau Kurier 2000“, Heft 7-8/99 S. 34-36
- [30] Schmidt-Morsbach, Jürgen: So wird Sichtbeton (noch) besser, Zeitschrift „Baugewerbe“, Heft 20, 1993, S. 18-23

- [31] Beddoe, Robin E.: Der Einfluss von Schalungseinlagen auf die Betonrandzone, in: Beiträge zum 28. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, TU München, 1993, S. 109-113
- [32] Zeniti, Malik / Hornung, Werner: Die Anforderung an Trinkwasserbehälter preiswert und sicher erfüllen, Zeitschrift „Wasserwirtschaft“, Heft 2, 1997, S. 100-102
- [33] Bresch, Carl-M.: Erfahrungen mit Schalungsbahnen, Zeitschrift „Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau TIS“, Heft 8, 1995, S. 34-36
- [34] Zeniti, Malik / Mayr, Hans-Peter: Beton kostengünstig beschichten: Wasserabführende Schalungsbahnen sparen Material, Arbeitszeit und Kosten, Zeitschrift „Die Bauverwaltung + Bauamt & Gemeindebau“, Heft 10, 1997, S. 498-499
- [35] Schönlin, Klaus F.: Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton, Schriftreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Heft 8, Karlsruhe 1989
- [36] Schelling, Günther: Der Einfluß von Schalungseinlagen auf die Qualität von Betonoberflächen, Stuttgart 1995
- [37] Anderson, Lars: Controlled Permeability Formwork: A method to improve the quality of concrete; Präsentation der Firma Fibertex ; Dänemark an der „Fakulty of the Slovak University“, März 2000
- [38] Liesche, Helmut / Paschke, Karl-Horst: Beton in aggressiven Wässern, 5. Auflage, Berlin 1969
- [39] Du Pont, Produktinformation zu Zemdrain: Dauerhafter Beton in Klärbauwerken, 1999
- [40] Cuny, Karl-Heinz / Weber, Walter: Chemie: Welt der Stoffe, Hannover 1975

Zur Zitierweise:

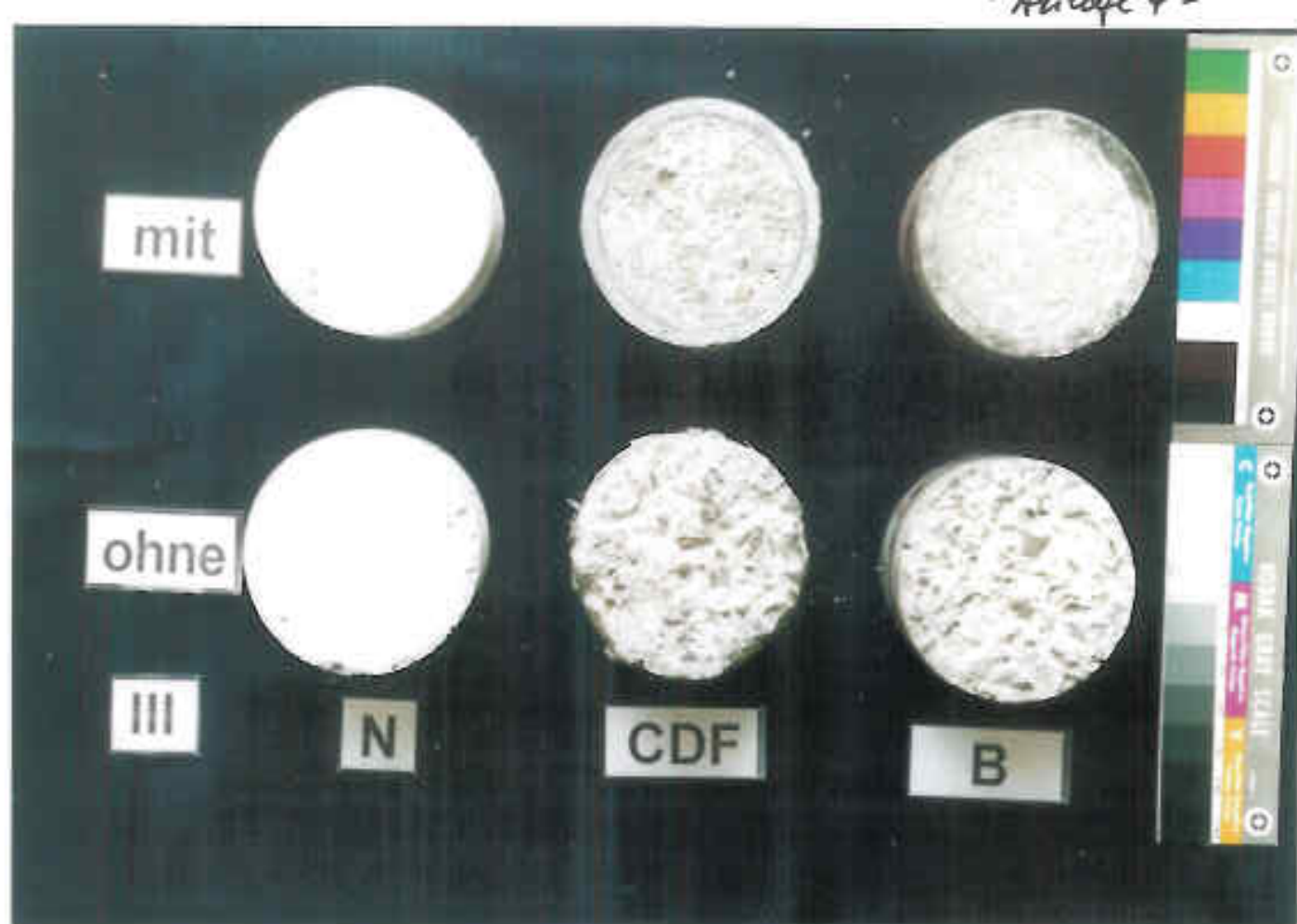
Wenn nur ein Satz aus der betreffenden Quelle entnommen wurde, so steht die Literaturangabe vor dem Punkt. Wurden dagegen mehrere Sätze hintereinander aus demselben Buch entnommen, so steht die Quellenangabe stets hinter dem letzten Satz nach dem Punkt.

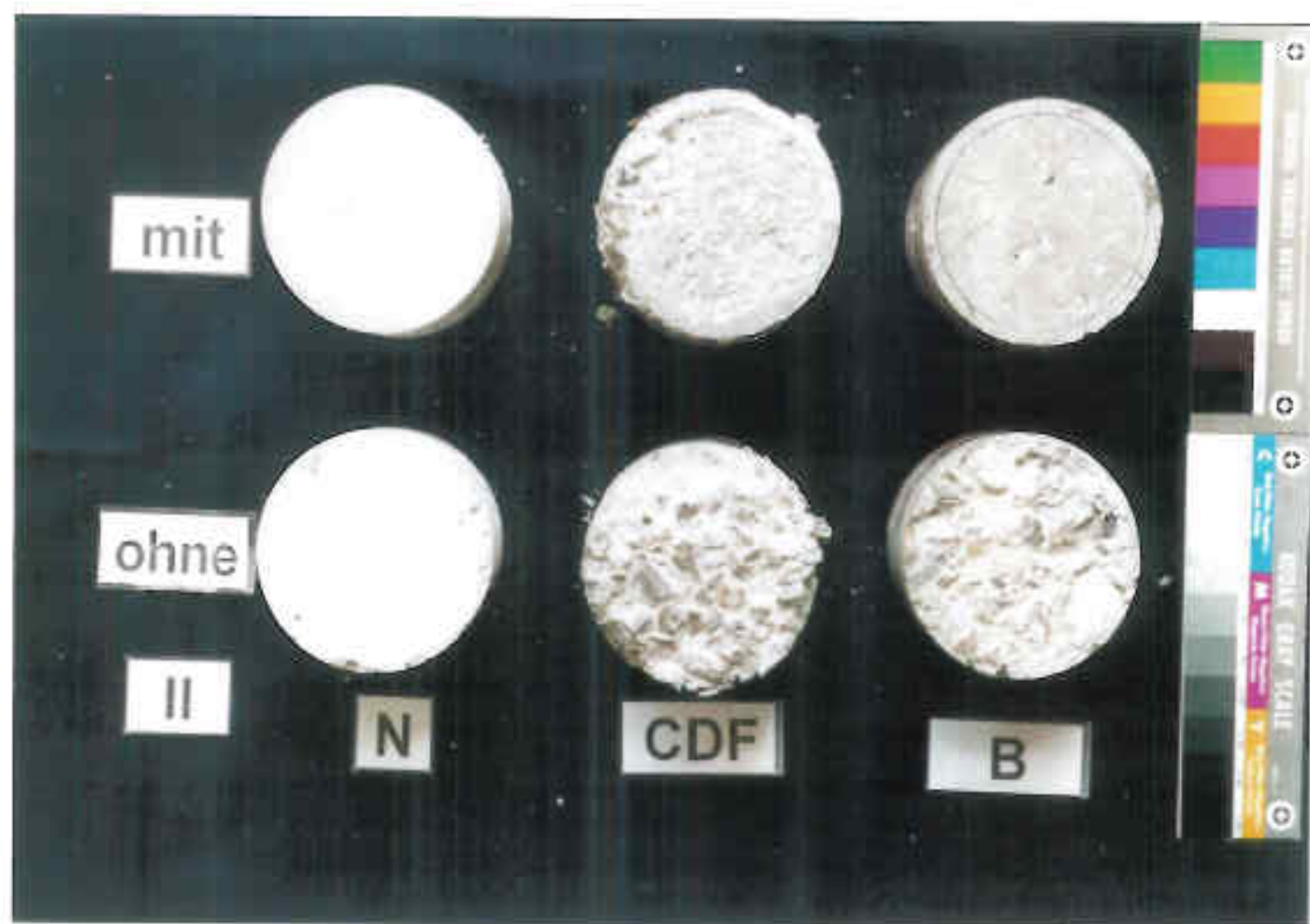
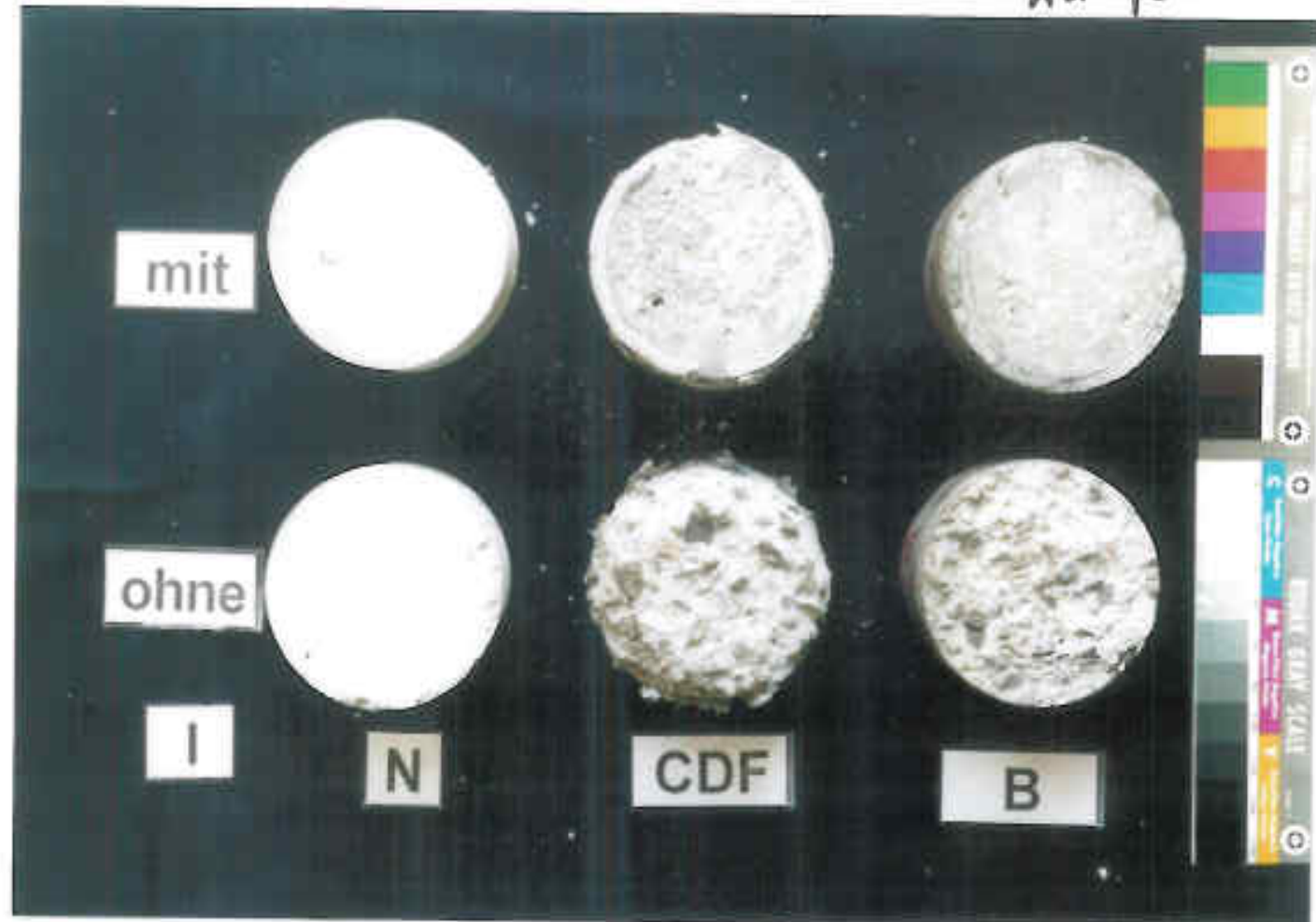
Legende zu Anlagen 3 und 4: Frostversuche

mit	mit saugender Schalungsbahn FIBERTEX
ohne	Holzschalung, ohne SSB
I bis IV	Nr. der Wand, der Betonsorte
N	Nullbeton, ohne Frost-Tau-Wechsel
CDF	CDF - Prüfverfahren
B	Boras - Prüfverfahren

Legende zu Anlagen 1 und 2: Chemischer Angriff

mit	mit saugender Schalungsbahn FIBERTEX
ohne	Holzschalung, ohne SSB
I bis IV	Nr. der Wand, der Betonsorte
N	Nullbeton, ohne chem. Angriff
E	Essigsäure
S	Salpetersäure





- Aufg. 2 -

