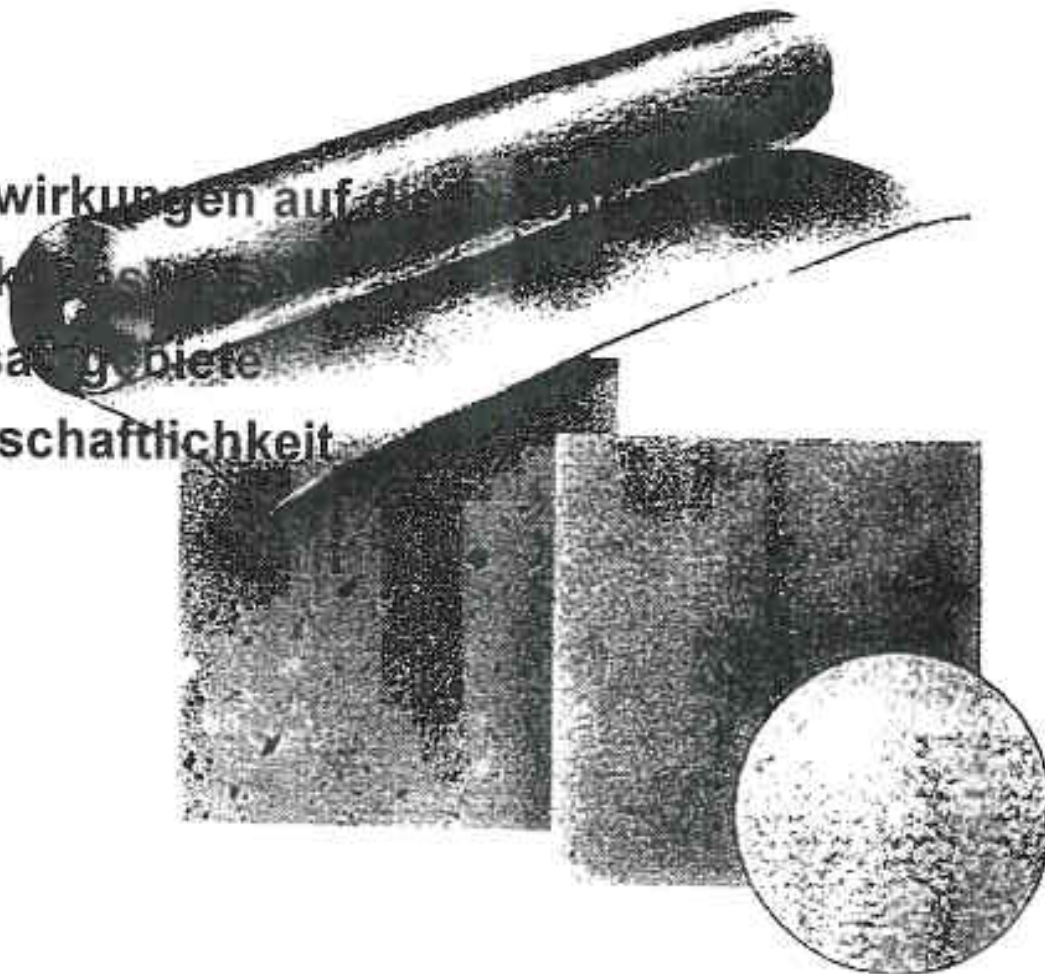




Saugende Schalungsbahnen

Eine Technik zur Verbesserung der Betonrandzone

- Auswirkungen auf die
- Funktionsweise
- Einsatzgebiete
- Wirtschaftlichkeit





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: SS 2000

vorgelegt von:

Reinhard Barnewold
Urbanstraße 99
70190 Stuttgart
Matrikel-Nr. 220327

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

Stuttgart 10. Juli 2000

Inhaltverzeichnis

	Allgemeiner Teil	Seite
1	Einleitung	1
2	Geschichte	2
3	Grundlagen der Zementerhärtung	4
3.1	Die Hydratation	4
3.1.1	Bedeutung der Nachbehandlung	6
3.2	Der Wasserzementwert	7
3.3	Porenverteilung und Porengröße	10
4	Wirkungsweise von Schalungsbahnen	12
5	Beschreibung der heutigen Situation	14
5.1	Äußere Einwirkungen auf die Betonoberfläche	17
6	Einsatzgebiete	18
6.1	Einsatz von Schalungsbahnen bei Trinkwasserbehältern	20
6.2	Einsatz von Schalungsbahn mit HOZ-Beton	22
6.3	Schalungsbahnen zur Herstellung von Sichtbetonflächen	24
6.4	Einsatz von Schalungsbahnen bei anschließender Beschichtung	26
6.5	Schalungsbahnen zur Unterstützung der Nachbehandlung	27
7	Raue Holzschalung im Vergleich zu Schalungsbahnen	28
8	Anwendung auf der Baustelle	29
8.1	Aufbringen der Schalungsbahn	30
9	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	31
10	Langzeituntersuchungen	33
11	Umweltverträglichkeit der Schalungsbahn	35

	Versuchsteil	Seite
12	Anlass und Ziel	36
13	Herstellung der Probekörper	37
13.1	Zusammensetzung der Betonsorten	39
13.2	Entnahme der Bohrkerne	40
14	Versuchsprogramm	41
14.1	Frischbetonprüfungen	43
14.1.1	Ausbreitmaß	43
14.1.1.1	Auswertung	43
14.1.2	Bestimmung der Frischbetonrohddichte	44
14.1.2.1	Auswertung	44
14.1.3	Bestimmung des Luftporengehalts im Frischbeton	45
14.1.3.1	Auswertung	46
15	Visuelle Beurteilung der Betonoberfläche	47
16	Messung der drainierten Wassermenge	49
16.1	Versuchsbeschreibung	49
16.2	Auswertung	50
16.3	Rechnungen	50
16.4	Beurteilung	52
17	Eigenschaften der Schalungsbahn	53
17.1	Ergebnisse	53
17.1.1	Beurteilung	54
17.2	Haftzugwerte der Schalungsbahn am Beton	55
17.2.1	Versuchsbeschreibung	55
17.2.2	Ergebnisse	56
17.2.3	Auswertung	57

	Seite
18 Festbetonprüfungen	58
18.1 Bestimmung der Festbetonrohddichte	58
18.1.1 Versuchsbeschreibung	58
18.1.2 Ergebnisse	58
18.1.3 Auswertung	58
18.2 Druckfestigkeit der Würfel 150 mm Kantenlänge	59
18.2.1 Versuchsbeschreibung	59
18.2.2 Beurteilung	60
18.3 Druckfestigkeit von Bohrkernen	60
18.3.1 Versuchsbeschreibung	60
18.3.2 Ergebnisse	61
18.3.3 Beurteilung	61
18.4 Festigkeitsprüfung mit dem Rückprallhammer	62
18.4.1 Versuchsbeschreibung	62
18.4.2 Ergebnisse	63
18.4.3 Auswertung	64
18.5 Wasserundurchlässigkeit	65
18.5.1 WU-Versuch mit normgerecht hergestellten Platten	65
18.5.1.1 Versuchsbeschreibung	65
18.5.1.2 Ergebnisse	66
18.5.1.3 Beurteilung	66
18.5.2 WU-Versuch mit Bohrkernen	67
18.5.2.1 Versuchsbeschreibung	67
18.5.2.2 Ergebnisse	67
18.5.2.3 Beurteilung	68

	Seite
18.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aller WU-Prüfungen	69
18.6 Verschleißprüfung nach Böhme	70
18.6.1 Versuchsbeschreibung	70
18.6.2 Rechnungen	71
18.6.3 Ergebnisse	72
18.6.4 Beurteilung	74
18.7 Oberflächenzugfestigkeit	75
18.7.1 Versuchsbeschreibung	75
18.7.2 Rechnungen	75
18.7.3 Ergebnisse	76
18.7.4 Beurteilung	80
18.8 Kapillare Wasseraufnahme	81
18.8.1 Versuchsbeschreibung	81
18.8.2 Rechnungen	82
18.8.3 Ergebnisse	83
18.8.4 Beurteilung	84
18.9 Chlorideindringung	85
18.9.1 Kritischer Chloridgehalt	86
18.9.2 Versuchsbeschreibung	87
18.9.3 Rechnung	88
18.9.4 Ergebnisse	89
18.9.5 Beurteilung	90
19 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	91
19.1 Schlussfolgerungen	91
19.2 Empfehlungen	92

Anhang	Seite
I Messwerte Druckfestigkeiten	94
II Wasserundurchlässigkeit	104
III Messwerte der Böhme Verschleißprüfung	107
IV Kapillare Wasseraufnahme	113
V Messwerte Chlorideindringung	117
VI Tabellen aus der DIN	120
Literaturverzeichnis	121
Normen	126

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 1	Hydratation eines Zementkornes	4
Abbildung 2	Hydratation bei unterschiedlichem w/z-Wert	5
Abbildung 3	Wasserundurchlässigkeit bei unterschiedl. Hydratationsgrad	7
Abbildung 4	Walz-Diagramm	9
Abbildung 5	Größenordnung verschiedener Poren	11
Abbildung 6	Wirkungsweise einer Schalungsbahn	12
Abbildung 7	Veränderung des w/z-Werts an der Schalhaut	13
Abbildung 8	Veränderung der Betonzusammensetzung an der Schalhaut	14
Abbildung 9	Mikroskopie einer Betonoberfläche	20
Abbildung 10	Art der Anwendung von Schalungsbahnen	30
Abbildung 11	Aufbau Schalung Probewände schematisch	37
Abbildung 12	Foto vom Aufbau der Schalung	38
Abbildung 13	Entnahmestellen der Bohrkerne	40
Abbildung 14	Wand-Nr. 2 direkt nach dem Ausschalen	47
Abbildung 15	Wand-Nr. 2 zwei Tage nach dem Ausschalen	48
Abbildung 16	Wand-Nr. 4 direkt nach dem Ausschalen	48
Abbildung 17	Versuchsaufbau Haftzugwerte Schalungsbahn auf Beton	55
Abbildung 18	Verschleißprüfgerät nach Böhme	70

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1	Einfluss w/z-Wert auf Festbeton	8
Tabelle 2	Porenverteilung im Beton	11
Tabelle 3	Witterungseinflüsse	17
Tabelle 4	Zusammensetzung der Betonsorten	39
Tabelle 5	Ausbreitmaße	43
Tabelle 6	Frischbetonkonsistenz nach DIN 1045	43
Tabelle 7	Frischbetonrohichte	47
Tabelle 8	Luftporengehalte	45
Tabelle 9	Drainierte Wassermenge und Wirtiefe	51
Tabelle 10	Wasseraufnahme der Schalungsbahn	53
Tabelle 11	Haftzugwerte der Schalungsbahn auf Betonoberfläche	56
Tabelle 12	Rohichte Festbeton	58
Tabelle 13	Druckfestigkeit Würfel	59
Tabelle 14	Druckfestigkeit Bohrkerne	61
Tabelle 15	Beurteilung Rückprallwerte nach DIN 1047	64
Tabelle 16	Wassereindringtiefen der WU-Platten	66
Tabelle 17	Wassereindringtiefen der Bohrkerne	67
Tabelle 18	Verschleißprüfung nach Böhme	72
Tabelle 19	Anforderung Schleifverschleiß nach DIN 17500.	74
Tabelle 20	Oberflächenhaftzug bezogen auf Stempelfläche	77
Tabelle 21	Oberflächenhaftzug bezogen auf Betonausbruchfläche	78
Tabelle 22	Oberflächenhaftzug bezogen auf Gesamtfläche	79
Tabelle 23	Kapillare Wassereindringung absolut	83
Tabelle 24	Wasseraufnahmekoeffizienten w_{24}	84
Tabelle 25	Chloridgehalte	89
Tabelle 26	Druckfestigkeiten Würfel	94
Tabelle 27	Druckfestigkeiten Bohrkerne	97
Tabelle 28 - 31	Schlagprüfung Schmidhammer nach 9 Tagen	100
Tabelle 32 - 35	Schlagprüfung Schmidhammer nach 9 Tagen	101
Tabelle 36 - 39	Schlagprüfung Schmidhammer nach 27 Tagen	102
Tabelle 40 - 43	Schlagprüfung Schmidhammer nach 27 Tagen	103
Tabelle 44	Wassereindringtiefen	104

	Seite
Tabelle 45	An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 1x _____ 107
Tabelle 46	An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 1 _____ 107
Tabelle 47	An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 2x _____ 108
Tabelle 48	An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 2 _____ 108
Tabelle 49	An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 3x _____ 109
Tabelle 50	An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 3 _____ 109
Tabelle 51	An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 4x _____ 110
Tabelle 52	An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 4 _____ 110
Tabelle 53	Mittelwerte der abgelesenen Werte _____ 111
Tabelle 54	Dickenverlust Verschleißprüfung _____ 111
Tabelle 55	Dickenverlust Verschleißprüfung auf 50 cm ² bezogen _____ 111
Tabelle 56	Masse absolut Verschleißprüfung _____ 112
Tabelle 57	Massenverlust Verschleißprüfung _____ 112
Tabelle 58	Massenverlust Verschleißprüfung auf 50 cm ² bezogen _____ 112
Tabelle 59	Masse der Probekörper kapillare Wasseraufnahme _____ 113
Tabelle 60	Wasseraufnahme absolut kapillare Wasseraufnahme _____ 114
Tabelle 61	Wasseraufnahme relativ kapillare Wasseraufnahme _____ 115
Tabelle 62	Wasseraufnahmekoeffizienten kapillare Wasseraufnahme _____ 116
Tabelle 63	Chloridgehalt in mg/l bezogen auf Prüflösung _____ 117
Tabelle 64	Chloridgehalt in % bezogen auf Beton _____ 117
Tabelle 65	Chloridgehalt in % bezogen auf Zement _____ 117
Tabelle 66	Angriffsgrade nach DIN 4030 _____ 120

Diagrammeverzeichnis

Seite

Diagramm 1	Rückprallwerte Schmidhammer nach 9 Tagen	63
Diagramm 2	Rückprallwerte Schmidhammer nach 27 Tagen	63
Diagramm 3	Wassereindringtiefen aller Probekörper im Vergleich	69
Diagramm 4	Dickenverlust Verschleißprüfung	73
Diagramm 5	Gewichtsverlust Verschleißprüfung	73
Diagramm 6	Oberflächenhaftzug bezogen auf Stempelfläche	77
Diagramm 7	Oberflächenhaftzug bezogen auf Betonausbruchfläche	78
Diagramm 7	Oberflächenhaftzug bezogen auf Gesamtfläche	79
Diagramm 9	Kapillare Wasseraufnahme aller Probekörper	83
Diagramm 10	Chlorideindringung in % bezogen auf den Zement	89
Diagramm 11	Druckfestigkeiten Würfel Beton-Nr. 1	95
Diagramm 12	Druckfestigkeiten Würfel Beton-Nr. 2	95
Diagramm 13	Druckfestigkeiten Würfel Beton-Nr. 3	96
Diagramm 14	Druckfestigkeiten Würfel Beton-Nr. 4	96
Diagramm 15	Druckfestigkeit Bohrkern Beton Nr. 1	98
Diagramm 16	Druckfestigkeit Bohrkern Beton Nr. 2	98
Diagramm 17	Druckfestigkeit Bohrkern Beton Nr. 3	99
Diagramm 17	Druckfestigkeit Bohrkern Beton Nr. 4	99
Diagramm 19	Profil Wassereindringung Beton-Nr. 1	105
Diagramm 20	Profil Wassereindringung Beton-Nr. 2	105
Diagramm 21	Profil Wassereindringung Beton-Nr. 3	106
Diagramm 22	Profil Wassereindringung Beton-Nr. 4	106
Diagramm 23	Wasseraufnahmekoeffizienten	116
Diagramm 24	Chloridgehalt in mg/l bezogen auf Prüflösung	118
Diagramm 25	Chloridgehalt in % bezogen auf Beton	118
Diagramm 26	Chloridgehalt in % bezogen auf Zement	119

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen einer Diplomarbeit an der Hochschule für Technik, Stuttgart. Der wesentliche Teil der Untersuchungen wurde im Labor der öffentlichen Baustoffprüfstelle der Fachhochschule Stuttgart - Hochschule für Technik durchgeführt.

Die Probewände wurden in Weilmendorf, auf dem Gelände der Firma Godel Karl & Söhne GmbH & Co betonierte. Für die Bereitstellung der Baustoffe, des Schalmaterials und die Nutzung sämtlicher Geräte und Maschinen möchte ich mich bei den Firmen Godel Karl & Söhne GmbH & Co und Godel Beton GmbH & Co. KG bedanken.

Besonders dankbar bin ich auch Herrn Prof. Günther Schelling für seine umfassende Unterstützung bei dieser Arbeit und seine wertvollen Anregungen sowie den Mitarbeitern der öffentlichen Baustoffprüfstelle der Fachhochschule Stuttgart - Hochschule für Technik, insbesondere Herrn Feiler für seine fachlichen Ratschläge und der tatkräftigen Hilfe bei der Durchführung der Untersuchungen.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei der Firma Fibertex aus Dänemark, die mir diese Arbeit ermöglichte, insbesondere Herrn Anderson für seine fachliche Unterstützung sowie Anregungen. Gleichfalls ein Dankeschön an die Firma Reuß aus Wuppertal, wobei mir Herrn Dietz bei der Bereitstellung der Schalungsbahnen und die Beratung bei der Ausführung der Probekörper geholfen hat.

Allgemeiner Teil

1 Einleitung

Die Bedeutung der Qualität der Betonrandzone für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken wurde schon lange erkannt. Für die Beständigkeit von Betonbauteilen gegenüber physikalischen und chemischen Beanspruchungen ist die Festigkeit und Dichtigkeit der Oberfläche gegenüber Gasen und Flüssigkeiten verantwortlich. Paradoxerweise ist die Qualität der Randzone meist viel geringer als die des Kernbetons. Dies gilt insbesondere bei der heute meist verwendeten nichtsaugenden Schalung aus beschichteten Holzwerkstoffen mit glatter undurchlässiger Oberfläche. Außerdem reagiert der Randbereich des Betons sehr anfällig bei schlechter Nachbehandlung oder unzureichender Verdichtung. Daher ist eine Technologie, welche die Oberflächenqualität von Beton verbessern kann, für den Baubetrieb von großem Interesse.

Seit ca. 10 Jahren gibt es in Europa sogenannte saugende Schalungsbahnen (im folgenden SB genannt). Sie haben im Bereich von Bauwerken der Wasserversorgung und -entsorgung schon einen festen Stellenwert eingenommen. Vielfach ist diese relativ neue Technologie aber auch noch unbekannt. Eine solche Schalungsbahn kann dazu beitragen die Qualität der Betonrandzone, die den Schutz der Bewehrung sicherstellt, zu verbessern.

Eine Schalungsbahn ist ein Textil, welches auf die Schalung aufgespannt wird und die Fähigkeit besitzt, überschüssiges Wasser und Luftblasen an der Schaloberfläche entweichen zu lassen. Dadurch entsteht eine dichtere geschlossene Oberfläche ohne sichtbare Poren und Lunker, die einen erhöhten Widerstand gegen äußere Beanspruchungen aufweist. Die Randschicht wirkt so wie eine harte Schale um den Kernbeton und schützt diesen vor schädlichen Einflüssen. Der Einsatz von SB kann so die immensen Kosten einer Sanierung vermeiden oder reduzieren, da sie die Dauerhaftigkeit der Bauwerke erhöht.

2 Geschichte

Die Idee mit der Schalung Überschusswasser vom Frischbeton abzuführen geht auf den Amerikaner John J. Early in den 30er Jahren zurück. Early stellte oberflächenvergütete Fertigteil-Fassadenelemente her, indem er trockene Gipsformen, die Wasser aus dem Beton aufsaugten, auf der Schalung aufbrachte. So entstand eine qualitativ hochwertigere Oberfläche, als es mit beschichteten Schalungen möglich war. 1938 wurde ein intensives Forschungsprogramm vom amerikanischen „Bureau of Reclamation“ initiiert, durch das ein erster Typus von permeablen Schalungen entwickelt wurde (Johnson 1941, Bidel und Blanks 1942). Diese „Schalungsauskleidung“ bestand aus 12 mm dicken Tafeln in den Abmessungen von 1,30m mal 2,60m, die aus Holzabfällen hergestellt wurden. Diese Faserplatten wurden mit Leinöl als Trennmittel eingestrichen. Bereits diese relativ einfache Schalungsauskleidung konnte Kiesnester und Lunker auf der Betonoberfläche vermindern.

Die Arbeit am Kentucky Damm (Johnson 1941) zeigte, dass die Oberfläche des Betons, der mit Schalungstafeln eingebaut wurde, weniger Wasser aufnahm und weniger Frost-Tau-Schäden aufwies, als der Beton, der mit konventioneller Holzschalung eingebaut wurde. Es wurden vergleichende Testverfahren der Verschleißfestigkeit zwischen den unterschiedlich eingebauten Betonsorten durchgeführt, indem sie sandgestrahlt wurden. Bei der Probe mit konventioneller Schalung wurde der Zuschlag freigelegt, während die Probe, die mit der Schalungstafel eingebaut wurde, praktisch keinen Verschleiß zeigte [52]. Johnson schrieb schon 1941 in seinem Untersuchungsbericht „Generell lässt sich feststellen, dass je mehr Wasser die Schalung absorbiert, desto weniger Verschleiß zeigt sich an den Probekörpern“ [52 S. 1]. Bei diesen frühen Testreihen wurde eine Portland-Zement-Mischung mit einem w/z-Wert von 0,6 verwendet. Man erkannte schnell, dass man mit den Tafeln eine dichtere und dauerhaftere Oberfläche mit weniger Lunkern herstellen konnte.

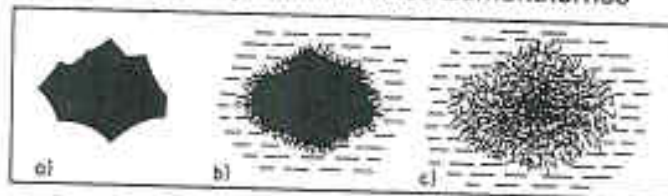
3 Grundlagen der Zement erhärtung

Im folgenden sollen die wichtigsten Grundlagen und Kennwerte für die Betonerhärtung erläutert werden, die für das Verständnis der Wirkungsweise der SB (siehe Kapitel 4) hilfreich sind.

3.1 Die Hydratation

Abbildung 1 [41] zeigt die Umwandlung eines Zementkornes in Zementgel. Dieser Vorgang wird als Hydratation bezeichnet.

Abbildung 1 Hydratation eines Zementkornes



- a) Zementkorn vor der Wasserzugabe
- b) Zementkorn kurz nach der Wasserzugabe
- c) Ende der Hydratation. Das Zementkorn hat sich in Zementgel umgewandelt

Die Erhärtung von Zement erfolgt durch Reaktion mit Wasser (Hydratation). Sie verläuft je nach Zusammensetzung des Zements, der Mahlfineinheit und Temperatur schneller oder langsamer und ist unter Umständen erst nach Jahren abgeschlossen. Hydratation bedeutet die chemische Umwandlung des Zementkornes in Zementgel unter Einfluss von Wasser. Das wesentliche Hydratationsprodukt, auf dem die Festigkeitsbildung beruht, ist das Calciumsilikathydrat (CSH). Dieses liegt im Festbeton als ein nadelförmiges Kristall vor. Während der Festigkeitsentwicklung des Betons wachsen diese Kristalle in den vorhandenen Porenraum. Daher ist der Porenraum um so größer, je unvollständiger der Hydratationsprozess ist. Ich möchte hier nicht weiter auf die chemischen Reaktionen und Umwandlungsprodukte eingehen, da dies zu weit führen würde. Im Zementstein können die Zementgele Wasser bis rund 25% chemisch und bis zu 15% physikalisch binden (diese Zahlen beziehen sich auf das Zementgewicht). Dies ergibt zusammen 40% Wasser, das der Zement binden kann. Daraus folgt der „ideale“ w/z-Wert von 0,4. (siehe auch Abbildung 2 auf der nächsten Seite).

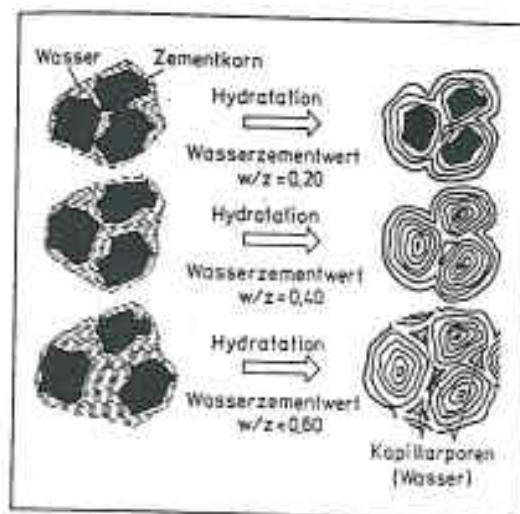


Abbildung 2 zeigt die Hydratation des Zements bei unterschiedlichem Wasserzementwert des Zementleimes [41].

Wie deutlich zu erkennen ist, bildet sich aus dem Überschusswasser im Frischbeton (Wasser welches den w/z -Wert von 0,4 übersteigt) ein Netz aus Kapillarporen im Festbeton.

In der Praxis ist es fast immer notwendig den Beton mit einem höheren Wasserzementwert herzustellen. In der Regel besitzt die Beton einen w/z -Wert von 0,5 bis 0,6 um eine Verarbeitung zu erleichtern oder überhaupt zu ermöglichen. Verschiedene Zuschläge ergeben einen mehr oder weniger steifen Beton. Der erforderliche Wassergehalt des Frischbetons hängt aber „nicht nur von der Kornzusammensetzung des Zuschlags ab [...], sondern auch von der Beweglichkeit oder der Konsistenz, die je nach Bauteilabmessung, Bewehrungsgehalt und Verdichtungsgerät für die Verarbeitung und Verdichtung des Frischbetons erforderlich ist [...]“ [34, S. 100].

Zusammenfassend lässt sich sagen:

„Wasser [...] erleichtert die Verarbeitung; wenn es aber in großer Menge zugegeben wird, [...] verschlechtert es praktisch alle Eigenschaften des Festbetons, weil es nur zum Teil vom Zement gebunden wird [...]“ [34, S. 91].

3.1.1 Bedeutung der Nachbehandlung

Der Hydratationsgrad gibt prozentual an, welcher Anteil des Zementes hydratisiert ist. Er hat einen großen Einfluss auf die Festbetoneigenschaften. Um einen guten Hydratationsgrad an der Oberfläche zu erreichen, muss der Beton ausreichend lange nachbehandelt werden. Da man die SB auch zur Nachbehandlung nutzen kann (siehe Kapitel 6.4), möchte ich hier die Auswirkungen des Hydratationsgrades auf die Festbetoneigenschaften genauer beschreiben. Bei einer zu schnellen Austrocknung oder zu geringem Wasserzementwert kann der Zement nicht vollständig in Zementgel umgewandelt werden. Alle Eigenschaften des Festbetons werden dabei verschlechtert:

Auswirkungen [34, S. 117]

- Die Hydratation kommt zum Stillstand.
- Der Zementstein wird porös.
- Die Festigkeitsentwicklung hört auf.
- Die Oberflächen sanden ab.
- Das Schwinden des Betons nimmt zu.
- Die Wasserundurchlässigkeit und die Frostbeständigkeit entwickeln sich nicht ausreichend.
- Die Karbonatisierung erfolgt schneller und tiefer.

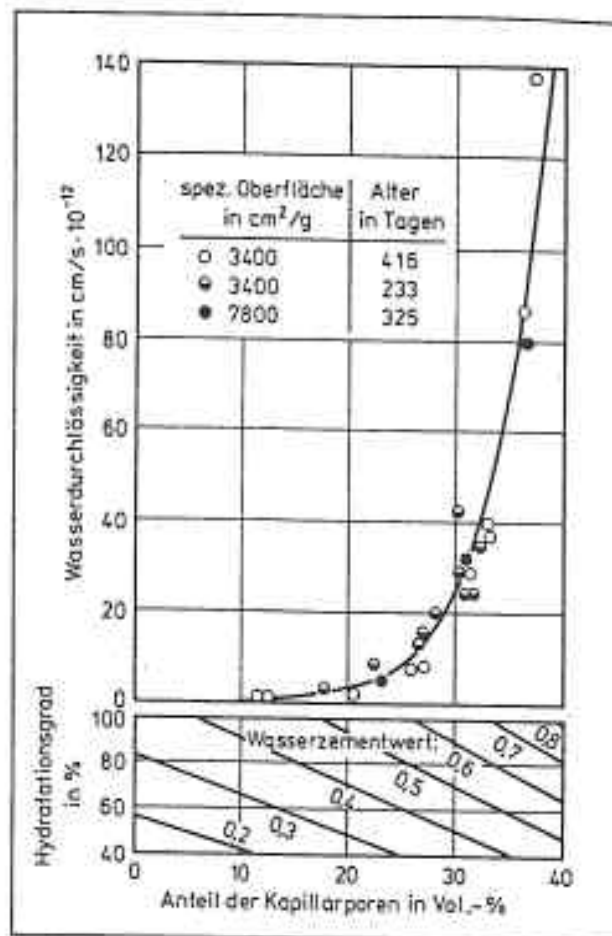


Abbildung 3 [41] stellt die Wasserundurchlässigkeit in Abhängigkeit von dem Wasserzementwert und dem Hydratationsgrad dar. Hier wird deutlich, wie ein hoher w/z-Wert und ein niedriger Hydratationsgrad die Porosität des Festbetons negativ beeinflussen. Je höher der w/z-Wert und je niedriger der Hydratationsgrad, desto mehr Poren befinden sich im Festbeton und desto höher ist die Wasserdurchlässigkeit.

3.2 Der Wasserzementwert

Der größte Teil der Verbesserungen der Betonoberfläche, beruht auf dem Effekt, dass der Wasserzementwert an der Oberfläche verringert wird. Nach [54] wird der w/z-Wert der ersten 2 cm der Betonoberfläche auf 0,4 abgesenkt. Daher soll im folgenden auf dieses Thema genauer eingegangen werden.

Eine besondere Bedeutung für die Betonherstellung kommt dem Verhältnis von Wasser zu Zement, dem sogenannten Wasserzementwert zu. Er errechnet sich folgendermaßen:

$$w/z = \frac{\text{Wassermenge [kg oder kg/m}^3\text{]}}{\text{Zementmenge [kg oder kg/m}^3\text{]}} = w$$

Der Einfluss des Wasserzementwerts auf Betoneigenschaften zeigt
Tabelle 1 [34 S. 105]:

Eigenschaft	w/z niedrig ≈ 0,4...0,5	w/z hoch ≥ 0,65
Überschusswasser (= Kapillarporen)	wenig	viel
Zementstein bzw. Beton	dicht	porös
Früh- und Endfestigkeit	hoch	gering
Schwinden, Kriechen	gering	hoch
Wasserundurchlässigkeit, chemischer Widerstand, Frostbeständigkeit, Korrosionsschutz	gut	schlecht

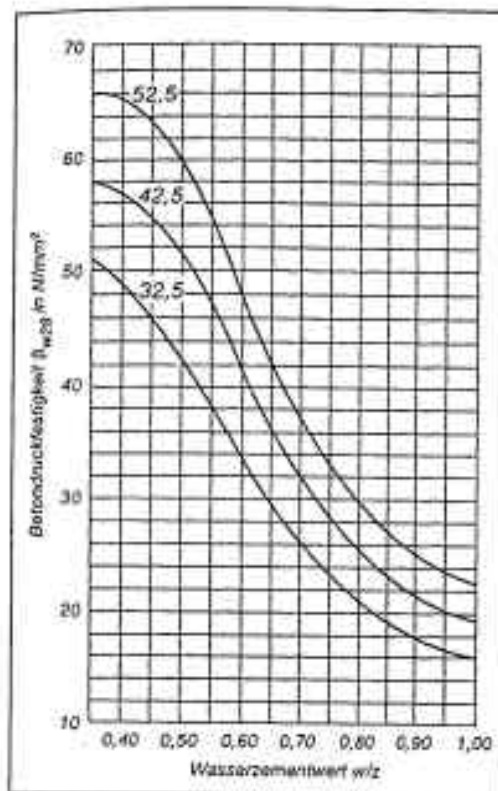


Abbildung 4, das sogenannte Walz-Diagramm, verdeutlicht nochmals die deutliche Verminderung der Druckfestigkeit bei steigendem w/z-Wert.

Es zeigt die Beziehung zwischen Wasserzementwert und der mittleren Würfeldruckfestigkeit β_{w28} von Beton im Alter von 28 Tagen nach Walz. „Je nach Zementfestigkeitsklasse kann β_{w28} unmittelbar abgelesen werden.“ [34, S. 105].

„Nach [...] Abbildung 2 des vorhergehenden Kapitels entsteht bei geringerem Wasserzementwert ein dichter, fester Zementstein. Der Zuschlag [...] ist gewöhnlich dichter und fester als der Zementstein. Somit ist -eine gute Verarbeitung und Behandlung des Betons vorausgesetzt- der Wasserzementwert der maßgebende Kennwert, auch für die Dichtigkeit und Festigkeit des Normalbetons“ [34, S. 105].

3.3 Porenverteilung und Porengröße

Spricht man von der Dichtigkeit eines Betons, so wird unterstellt, dass eine annehmbare Leckrate, z. B. bei der Prüfung von Wasserbehältern oder Rohrleitungen, toleriert wird. Somit können Flüssigkeiten und Gase in den Beton eindringen. Den entscheidenden Einfluss auf den Beton hat der Anteil der Kapillarporen. Je nach Gesamtvolumen der Kapillarporen im Zementstein sind diese mehr oder weniger miteinander verbunden. Diese offene Porosität ist der Transportweg für Flüssigkeiten und Gase. Der Transport geschieht auf unterschiedliche Art und Weise: durch Diffusion, Kapillarleitung und Permeation.

- Die Diffusion beschreibt einen Stofftransport, der aufgrund eines Konzentrationsausgleichs stattfindet.
- Bei der Kapillarleitung, welche auch kapillares Saugen genannt wird, bestimmen Kapillardruck und Fließwiderstand, die von dem Porendurchmesser abhängen, den Flüssigkeitstransport.
- Bei der Permeation ist ein absoluter Druckgradient maßgebend für den Stofftransport durch den Beton.

Wie in dem Abschnitt vorher beschrieben wurde, bildet das Überschusswasser im Frischbeton die Kapillarporen im Festbeton. Nicht nur überschüssiges Wasser, sondern auch Luft ist verantwortlich für die Poren im Zementstein. Diese Poren werden Luftporen genannt.

Der Luftgehalt entsteht durch unvermeidbare Verdichtungsporen im Beton. Ihr Volumenanteil ist abhängig von der Sieblinie des Zuschlags (zunehmend mit der Feinkörnigkeit), der Rauigkeit der Kornoberflächen, der Konsistenz und der Verdichtung des Betons. In gut verdichtetem Beton beträgt der Luftgehalt $p \approx 1 - 3 \text{ Vol.-%}$ (10 bis 30 dm³/m³) [34].

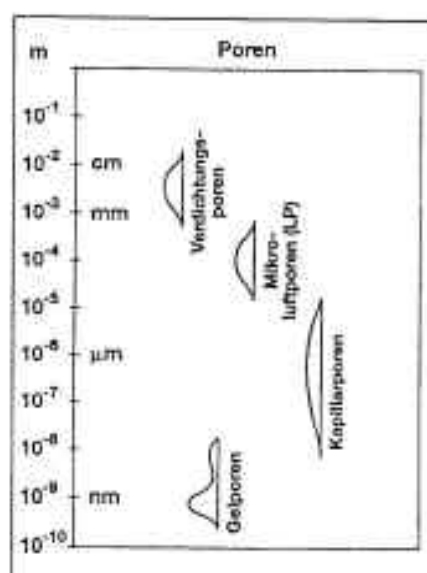
Die dritte Art der Poren im Zementstein sind die Gelporen. Sie sind durch äußere Faktoren praktisch nicht beeinflussbar. Sie entstehen, da die Hydratationsprodukte, die das Zementgel bilden, auch bei dichtester Packung den Raum nicht vollständig ausfüllen. Die verbleibenden Zwischenräume werden als Gelporen bezeichnet. Das in diesen Poren vorhandene Wasser verdampft erst bei 105 °C oder auch bei der sog. Vakuumtrocknung. D. h. unter normalen Bedingungen sind diese Poren mit Wasser gefüllt und damit für Flüssigkeiten und Gase undurchlässig.

Die folgende Tabelle [41] gibt einen Überblick über die Porenarten im Zementstein und ihre Größenbereiche.

Tabelle 2 Porenverteilung im Beton

Porenart	Porenradialen		Porenmenge Vol.-% *)
	Nanometer nm	Millimeter mm	
Gelporen	10^0 bis 10^1	10^{-8} bis 10^{-5}	26
Kapillarporen	10^1 bis 10^5	10^{-5} bis 10^{-1}	20
Luftporen	10^3 bis 10^6	10^{-3} bis 10^0	
Gesamtporosität	10^0 bis 10^6	10^{-8} bis 10^0	46

*) am Beispiel eines Zementsteins aus Portlandzement mit einem Wassermenge-
wert $w/z = 0,5$ bei annähernd vollständiger Hydratation.



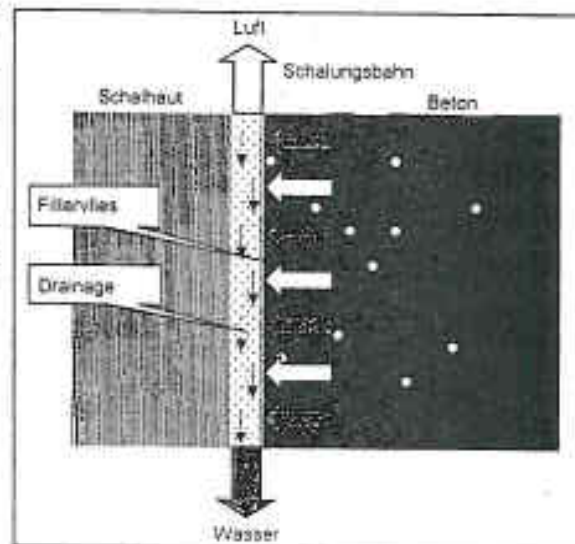
In Abbildung 5 [20] ist die Größenordnung der Poren nochmals graphisch dargestellt. In dieser Grafik werden auch die Mikroluftporen aufgeführt, die durch luftporenbildende Zusatzmittel erzeugt werden. Die Luftporen aus der Tabelle werden hier als Verdichtungs-poren bezeichnet. Die Angaben der Tabelle und die Darstellung weichen geringfügig voneinander ab, da sie aus verschiedenen Quellen stammen.

4 Wirkungsweise von SB

SB bestehen meist aus einem Polypropylenvlies. Sie gehen keine chemische Reaktionen mit dem Beton ein. Sie können auf herkömmliche Schalungselemente aufgespannt werden.

Die heute überwiegend verwendeten beschichteten Holzwerkstoffschalungen oder Stahlschalungen können so gut wie kein Wasser aufnehmen. Deshalb enthält der Randbeton mehr Wasser und Feinstteile als der Kernbeton. Dadurch nimmt der Wasserzementwert in der stark beanspruchten Betonrandzone ungünstig zu. Insbesondere bei nichtsaugenden Schalungen entstehen zudem während des Verdichtens größere Lunker in der Betonoberfläche. Um diese negativen Effekte zu vermeiden, haben sich bei geschalteten Flächen saugende SB als vorteilhaft erwiesen.

Abbildung 6 [49] zeigt anschaulich die Funktionsweise einer SB. Mit einer bestimmten Faserstruktur (bestehend aus einer Filter- und einer Drainageschicht) wird überschüssiges Wasser und Luft an der Schalung abgeführt (siehe Abb. 6).



Jetzt erweist sich der ursprüngliche Nachteil, dass beim Verdichten mit Innenrüttlern das Überschusswasser zur Schalung wandert, als Vorteil. Mit dem Wasser werden auch Zementteile mit zur Schalung geführt, die wiederum den w/z-Wert günstig beeinflussen. Die Filterschicht verhindert dabei, dass Fein- und Zementteile mit ausgeschwemmt werden. In der Drainageschicht werden das Wasser und die Luft von der Schaloberfläche abgeleitet. Dadurch wird in der Randzone ein besseres Wasser-/Zementverhältnis erreicht.

Es entsteht eine Oberfläche ohne Lunker und Schwindrisse und mit deutlich verringerter Porenzahl. Die Poren sind mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen, da sie im Schnitt wesentlich kleiner sind, als bei konventionell hergestelltem Beton [7].

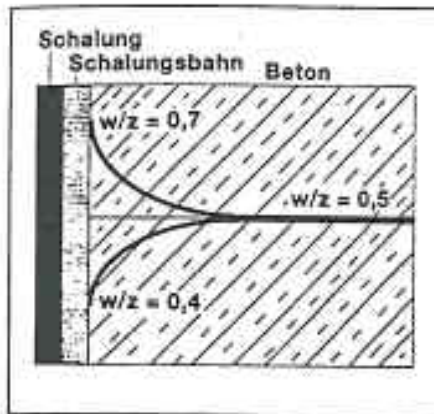


Abbildung 7 [20] zeigt die Veränderung des Wasserzementwerts an der Schalhaut in idealisierter Form. Die obere Kurve zeigt den w/z -Wert ohne SB und die untere mit SB an.

Die Gefahr, dass bei diesem Vorgang zuviel Wasser abgeführt wird, wie es z. B. beim Vakuumieren von Beton passieren kann, besteht nicht. Denn auch wenn man von saugenden SB spricht, so saugt die SB doch nur solange bis sie wassergesättigt ist. Es tritt kein Vakuumeffekt auf. Nur das nichtgebundene Wasser fließt ab. Der Begriff „saugend“ ist daher etwas missverständlich.

Dadurch, dass die Drainageschicht das Wasser speichern kann, wird in den ersten Stunden des Aushärtens Feuchtigkeit an den Beton abgegeben. So werden die Bedingungen während des Aushärtens optimiert.

5 Beschreibung der heutigen Situation

In den letzten Jahrzehnten sind die Kosten für die Betonsanierung, insbesondere im Tiefbau, auf Milliardenbeträge angestiegen [5]. Dies ist nicht nur bedingt durch Verarbeitungsfehler und mangelhafte Betondeckung, sondern nicht zuletzt auch durch wachsende schädliche Umwelteinflüsse [6]. Die Anforderungen an Betonoberflächen sind daher gerade heute sehr hoch, denn sie sind nach Papworth und Ratcliffe [51, S. 43] „die erste Verteidigungslinie gegen externe Angriffe“.

Der Oberflächenbeton kann durch Vorgänge wie Segregation, Bluten, Abglätten und Nachbehandeln, durch Mikrorissbildung und andere Einflüsse in der Zusammensetzung und den Eigenschaften erheblich von denen des Kernbetons abweichen. Gerade die heutigen Konstruktionsmethoden verringern die Qualität des Randbetons im Vergleich zum Kernbeton.

Glatte undurchlässige Schalungen und mechanisches Verdichten mit Flaschenrüttlern sind verantwortlich dafür, dass überschüssiges Wasser, Feinstteile und Luftbläschen zur Schalungsoberfläche wandern, wo sie dann verbleiben [51]. Die Luftbläschen, die nicht entweichen können, werden später zu Lunkern im Festbeton.

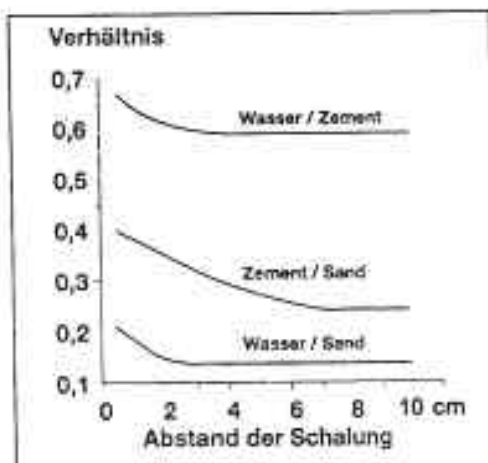


Abbildung 8 [20] zeigt die Veränderung der Betonzusammensetzung in Bezug auf den Abstand zur Schalung. Der Wasserzementwert sowie der Wassersandwert nimmt zu, gleichzeitig wird das Zement-Sand-Verhältnis in Richtung Zement verschoben.

Die Folge ist ein zusammenhängendes Kapillarporennetz im Randbeton, also ein labiles Gefüge, wobei die groben Zuschläge von innen nach außen ab- und das Mehlkorn, also Zement und Feinstsand, zunehmen. Diese Veränderung der Betonzusammensetzung ist aber nicht nur durch die Konstruktionsmethode bedingt, sondern auch dadurch, dass Zuschlagskörner tangential an der Schalautoberfläche anliegen und allein wegen diesen räumlichen Verhältnissen eine höhere Konzentration von Feinstbestandteilen vorhanden ist.

Dabei sind gerade die Dicke und Dichte der Betonrandzone hauptsächlich verantwortlich für die Dauerhaftigkeit eines Bauwerks.

Die Dichte beeinflusst stark den Flüssigkeits- und Gastransport im Zementstein des Betons. Je dichter die Betonrandzone ist, desto mehr Widerstand bringt sie eindringenden Schadstoffen entgegen. Maßgeblich für den Transportvorgang ist der Gehalt an Kapillarporen im Zementstein. Dieser kann durch geeignete Maßnahmen, wie z. B. Verringerung des Wasserzementwertes, ausreichend lange Nachbehandlung, und das Anbringen von SB positiv beeinflusst werden [20]. Insbesondere wasserabführende SB sind dazu geeignet, in der in der Betonrandzone den Wasserzementwert zu verringern und so die Dichte der Randzone und damit die Dauerhaftigkeit des Bauwerks zu erhöhen.

In DIN V ENV 1992 Teil 1-1: EC 2 sind Anforderungen nicht nur an die Standsicherheit sondern auch an die Dauerhaftigkeit eines Bauwerkes festgeschrieben:

Im Abschnitt 2.1 P (1) heißt es:

„Ein Tragwerk muss so bemessen und ausgebildet sein, dass es:

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

Weiter heißt es im Abschnitt 4.1.3.3 P (3):

- „Der Schutz der Bewehrung gegen Korrosion hängt vom ständigen Vorhandensein eines alkalischen Milieus ab, das durch eine angemessene Dicke und **gute Qualität** eines nachbehandelten Betons erzielt wird. Die erforderliche Betondeckung hängt sowohl von den Umweltbedingungen als auch von der Güte des Betons ab.“

Während die Tragfähigkeit eines Elementes in einer Betonkonstruktion auf mechanische Eigenschaften des gesamten Elementes beruht, hängt seine Dauerhaftigkeit gegenüber aggressiven Umwelteinflüssen im wesentlichen von der Qualität der relativ dünnen Oberflächenschicht (20-50 mm [32]) ab. Die Oberfläche hat den größten Einfluss auf den Widerstand gegenüber äußeren Angriffen wie z. B.:

- Abrieb
- Karbonatisierung
- Chlorideindringung
- chemischer Angriff
(Säuren, Sulfate, Nitrate usw.)
- Wassereindringung
- Frost - Tauwechsel

5.1 Äußere Einwirkungen auf die Betonoberfläche

In diesem Abschnitt sollen die Angriffsarten und -mechanismen welche auf den Beton wirken dargestellt werden, um zu zeigen, welchen unterschiedlichen Beanspruchungen der Beton ausgesetzt ist. In der Tabelle sind die chemischen Einwirkungen auf den Beton aufgelistet, die über die Atmosphäre an die Betonoberfläche gelangen können. D. h., nahezu jedes Bauwerk ist davon betroffen.

	Bestandteile der Atmosphäre	Auswirkung auf Bauwerke
natürliche Herkunft	Sauerstoff	in Verbindung mit Wasser oxydierend auf Metall
	Wasserdampf	Langfristig lösend auf silikatische Baustoffe (Verwitterung)
	Kohlendioxyd	Karbonatisierung von Beton
	nitrose Gase	Oxydierender und Säureangriff auf Metalle und silikatische Baustoffe
	Salz-Aerosole (z.B. in Küstengebieten)	Salzkorrosion von Metallen
	unlösliche Feststoffe	Absorption anderer Baustoffe und damit Konzentrationserhöhung und Verstärkung der Wirkung anderer Bestandteile (katalytische Wirkung)
industrielle Herkunft	Nitrose Gase, Chlor und Chlorverbindungen	Oxydierender und Säureangriff auf Metalle und silikatische Baustoffe
	Schwefelverbindungen	Säureangriff auf Metalle und silikatische Baustoffe
	Kohlendioxyd	Karbonatisierung von Beton
	lösliche Feststoffe (z.B. Alkali und Erdalkalioxyde)	Alkalischer Angriff nur auf Metalle, katalytische Wirkung möglich
	Unlöslich Feststoffe (z.B. Ruß und Staub)	Verunreinigung, Absorption anderer Baustoffe und damit Konzentrations-erhöhung und Verstärkung der Wirkung anderer Bestandteile (katalytische Wirkung)

Tabelle 3 Witterungseinflüsse, welche auf Stahlbeton einwirken [DIN 1045]

6 Einsatzgebiete

Wasserabführende SB werden überall dort eingesetzt, wo hohe Anforderungen an dichte, widerstandsfähige und gleichmäßige Betonoberflächen gestellt werden. „Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken, deren oberflächennahe Betonschicht durch Nutzung und Umwelt, insbesondere durch Frost- und Taumittel stark beansprucht wird, lässt sich durch Verwendung saugenden SB nennenswert verbessern“ [55 S. 1552].

Dies sind insbesondere:

I) Verkehrsbauwerke:

- Brücken und Brückenpfeiler
- Betongleitwände
- Tunnel

Besondere Vorteile:

- Verbesserter Frost-Tausalz-Widerstand
- Geringere Chlorid-Eindringung

II) Bauwerke zur Wasserversorgung und -entsorgung:

- Kläranlagen
- Trinkwasserbehälter

Besondere Vorteile:

- Verringerung der Wasseraufnahme
- Reduzierung von Poren und Lunkern an der Oberfläche
- Verbesserter chemischer und mechanischer Widerstand
- Verringerung des Wachstums von Mikroorganismen
- Zusätzlicher Vorteil bei Trinkwasserbehältern:
Keine Verunreinigung des Wassers durch Schalölreste

III) Wasserbauwerke wie:

- o - Dämme
- o - Schleusen

Besondere Vorteile:

- Verringerung der Wasseraufnahme
- Reduzierung von Poren und Lunkern an der Oberfläche
- Verbesselter chemischer und mechanischer Widerstand
- Verbesselter Frostwiderstand

Aus allen diesen Verbesserungen folgen eine erhöhte Nutzungsdauer und Einsparungen bei den Unterhaltungs- und Sanierungskosten der Bauwerke.

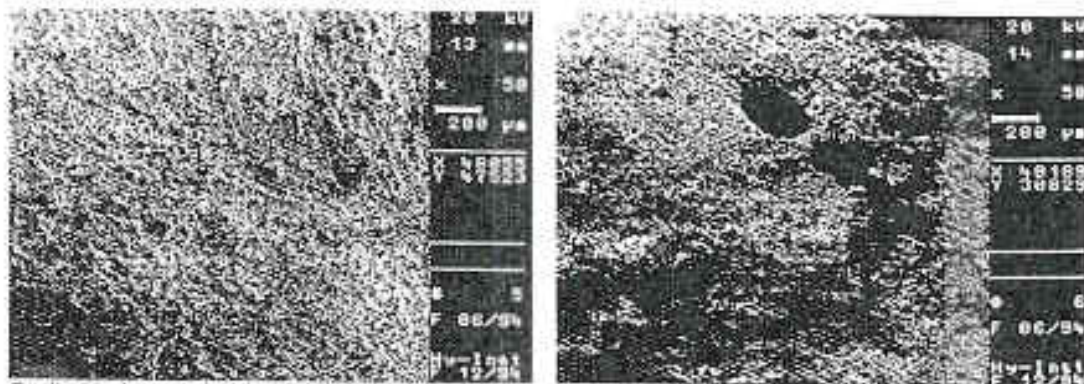
In den folgenden Kapiteln werden einzelne Einsatzgebiete und die Vor- und Nachteile der SB nochmals näher untersucht.

6.1 Einsatz von SB bei Trinkwasserbehältern

Beim Bau von Trinkwasserbehältern müssen die eingesetzten Baustoffe, Zu- und Ableitungen, Pumpen und andere Einbauten besondere Anforderungen erfüllen. Da Trinkwasser ein Lebensmittel ist, müssen sie dem Lebensmittel- und Bedarfsstän-
degesetz (LMBG) entsprechen. D. h., sie dürfen die Qualität des Trinkwassers we-
der mittelbar noch unmittelbar beeinträchtigen. Wie bereits erwähnt, wird beim Ein-
satz einer SB auf Trennmittel verzichtet. Da die Bahn fest auf die Schalung ge-
spannt wird, wirkt sie selber als „Trennmittel“. Die SB besteht zu 100% aus ther-
misch verbundenem Polypropylen, das erwiesenermaßen (unter anderem durch ein
Prüfzeugnis des Hygieneinstituts des Ruhrgebiets in Gelsenkirchen) unbedenklich
für den Kontakt mit Trinkwasser ist.

Durch verschiedene Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass
herkömmlich geschalte, offenporige Betonoberflächen an den Behälterwänden das
Wachstum von Mikroorganismen fördern [4]. Es gilt als sicher, dass in der Beton-
oberfläche verbleibende Trennmittel zu mikrobakteriellem Befall führen. Die Ober-
fläche eines mit einer SB hergestellten Betons weist bedeutend weniger und im
Schnitt deutlich feinere, mit dem bloßen Auge fast nicht mehr sichtbare Kapillaren
auf, als bei herkömmlich hergestellten Beton. Dies erschwert das Eindringen der
Mikroorganismen in tiefere Schichten, bzw. beschränkt deren Wachstum an der
Oberfläche (geprüft nach DVGW-W 270) [7].

Abbildung 9 zeigt die Vergrößerung einer Betonoberfläche - links mit, rechts ohne
SB hergestellt.



Quelle: Hygiene-Institut des Ruhrgebiets, Gelsenkirchen

Die Wandoberflächen der Wasserkammern sind porenarm herzustellen; Betonzusatzmittel, Fließmittel, Verflüssiger usw. sind grundsätzlich zu vermeiden. **Deshalb entspricht der Einsatz von Trennmitteln beim Bau von Trinkwasserbehältern nicht mehr dem Stand der Technik [5].**

Auch Beschichtungen können das Wachstum von Algen und Bakterien fördern und von diesen angegriffen und zerstört werden, so dass sie einer Reinigung mit dem Hochdruckwasserstrahl nicht mehr standhalten und weggespült werden [5]. Danach tritt ein noch stärkerer Befall mit Mikroorganismen auf dem freigelegten Beton noch stärker auf. Solche Behälter können dann nur noch stillgelegt oder saniert werden.

Für den Bau von Trinkwasserbehältern ist daher auch bedeutsam, dass die Oberfläche durch Verbesserung der mechanischen Abriebfestigkeit widerstandsfähig genug ist, um die turnusmäßige Reinigung der Behälterwände durch Hochdruckwasserstrahlen problemlos zu verkraften.

Da, bei Verwendung einer SB, eine Karbonatisierung der Betonoberflächen vor Inbetriebnahme nicht eintritt, bzw. nicht feststellbar ist, verbleibt die Betonoberfläche im alkalischen Bereich, in dem die Erstankeidung von Mikroorganismen nicht möglich ist.[7].

Bei einem Befall mit Mikroorganismen muss der Beton abgestrahlt und anschließend neu beschichtet werden. Die Kosten einer qualitativ einwandfreien mineralischen Neubeschichtung liegen - je nach Behältergröße - zwischen 50,- und 150,- DM pro m² (einschließlich Vorarbeiten, wie z. B. Sandstrahlen). Die Sanierungskosten einer schadhaften Beschichtung (z. B. durch mikrobiellen Befall) sind erheblich höher (70,- bis 350,- DM pro m²). Demgegenüber betragen die Kosten für den Einsatz einer SB etwa 35,- pro m² bei insgesamt erheblich kürzerer Ausführungszeit [4].

6.2 Einsatz von SB mit HOZ-Beton bei einer Kläranlage

Im Kläranlagenbau wird oft Hochofenzement, früher HOZ heute CEM III genannt, eingesetzt. Wegen der besseren Verständlichkeit werde ich Hochofenzement weiter mit HOZ abkürzen. Dieser Zement besteht aus 36% - 80% aus Hüttensand.

HOZ-Beton besitzt folgende Eigenschaften:

- Er hat auch ohne künstlich eingeführte Luftporen einen hohen Widerstand gegen Frost-Taumittelbeanspruchung. Diese Eigenschaft wird der geringeren Durchlässigkeit von HOZ-Zementstein zugeschrieben, die das Eindringen der Taumittellösung stark behindert.
- Im Gegensatz zu PZ-Beton führt eine Karbonatisierung bei HOZ-Beton zu einer deutlichen Verminderung des Frost-Taumittelwiderstands.
- HOZ-Beton ist jedoch sehr nachbehandlungsempfindlich. Zur Erzielung dieses hohen Frost-Taumittel-Widerstandes ist eine mehrwöchige Nachbehandlung notwendig. Das Aufsprühen von verdunstungshemmenden Nachbehandlungsmitteln reicht nicht aus.
- Die Widerstandsfähigkeit gegenüber lösendem Angriff ist beim HOZ-Beton etwas höher als bei den Betonen aus anderen Normzementen, da er einen niedrigeren CA(OH)_2 -Gehalt besitzt.
- Wegen dieses niedrigen Calciumhydroxydgehaltes ist das Risiko einer etwas tiefer reichenden Karbonatisierung von HOZ-Beton gegeben, was aber durch die höhere Dichtigkeit wieder ausgeglichen werden kann, da nicht soviel CO_2 in den Beton eindringen kann.
- Die Festigkeitsentwicklung von HOZ-Beton ist langsamer als die von PZ-Beton.

[41]

Betrachtet man diese Randbedingungen können sich der Einsatz von HOZ-Beton und SB sehr gut ergänzen.

- Der Einsatz einer SB verbessert die anfängliche Oberflächenfestigkeit des langsam erhärtenden HOZ-Betons.
- Die Dichtigkeit wird noch weiter verbessert und so die, beim HOZ-Beton doppelt schädliche, Karbonatisierung vermindert.
- Die wichtige Nachbehandlung kann mit Hilfe der SB unterstützt werden.
- Die an sich schon gute Frost-Tausatz-Beständigkeit wird weiter verbessert.
- Die geschlossene Oberfläche schränkt das Wachstum von Algen und Bakterien ein.

Neben den laufenden Unterhaltskosten der Kläranlagen entstehen zusätzlich sehr hohe Kosten, wenn Teile der Anlage zu Reparatur- und Sanierungszwecken abgeschaltet werden müssen. Evtl. können dabei sogar die gesetzlichen Anforderungen nicht mehr eingehalten werden. Hier sind große Einsparungen, durch eine längere Nutzungsdauer ohne Sanierung möglich. Dies würde auch die ständig steigenden Abwasserkosten senken.

Die Becken einer Kläranlage bestehen oft aus geneigten Wandflächen. Hier ist die Gefahr von Lunkerbildung besonders groß und kann durch den Einsatz von SB minimiert werden.

Der Beton in der Kläranlage ist naturgemäß sehr starken chemischen Angriffen ausgesetzt; zusätzlich muss mit einer starken Erosionsbelastung gerechnet werden. Beim Errichten von Bauten der Wasserversorgung und -entsorgung ist es für den öffentlichen Bauträger besonders wichtig, kostengünstig zu bauen. Großflächige Oberflächenbehandlungen kommen aus Kostengründen nicht in Frage, da sie sehr unwirtschaftlich sind. Daher bietet sich auch hier der Einsatz der SB an, um eine gute Oberflächenqualität im Bereich der Klärbecken sicherzustellen.

6.3 SB zur Herstellung von Sichtbetonflächen

Durch die Porosität von SB wird eine einheitlich strukturierte Oberfläche ohne sichtbare Poren und Lunker hergestellt. Sie ist um einiges dunkler, als die mit konventioneller Schalung hergestellte Oberfläche. Dies weist auf einen erhöhten Zementgehalt hin. Unregelmäßigkeiten in der Schalung können so kaschiert werden und es entstehen dadurch einheitliche Wandflächen.

Bei den von mir hergestellten Probewänden erschienen, vor allem im oberen Teil, hellgraue bis weiße Flecken, die ohne weitere Untersuchungen nicht genau erklärt werden können. Auch Herr Prof. Dipl.-Ing. Schelling erwähnt in einem Gutachten vom 18.07.1996 [47] solche Flecken, die im oberen Teil der damals -mit der gleichen SB- hergestellten Probewände auftauchten. Eine mögliche Erklärung wäre, dass es sich hierbei um Calciumcarbonat handelt, welches aus dem im Betonwasser gelöstem Kalkhydrat bei Zutritt von Luft entsteht. Derselbe Mechanismus wie er schon bei Ausblühungen von glattgeschalteten Betonoberflächen bekannt ist, könnte auch hier der Auslöser für diese Verfärbungen sein. Dies sind allerdings nur Vermutungen, die einer genaueren Untersuchung bedürfen. Für diese Erklärung würde sprechen, dass diese Flecken immer nur im oberen Bereich entstanden sind, wo die SB zuerst austrocknet.

Beim Aufspannen der Bahnen muss große Sorgfalt aufgebracht werden, damit keine Falten entstehen, die sich später in der Betonoberfläche abzeichnen. Auch bei Temperaturschwankungen können Falten in der SB entstehen, da das Polypropylenvlies einen viel größeren Wärmeausdehnungskoeffizient besitzt als die Trägerschalung. Besteht der Wunsch einer sichtbar bleibenden Betonoberfläche, muss daher darauf geachtet werden dass nicht zuviel Zeit zwischen Bespannen und Betonieren vergeht, wenn die Witterungsverhältnisse dies verlangen. Die verbesserten Eigenschaften der Oberfläche sind zwar auch an den Stellen der Falten gegeben; Sie stellen jedoch einen gravierenden optischen Mangel dar.

Um eine gleichmäßige Farbtönung zu bekommen, sollte genau wie bei konventioneller Schalentechnik auf folgendes geachtet werden [34, S. 128]:

- stets gleiche Mischungen
- $w/z \leq 0,55$ bzw. $z \geq 300\text{kg/m}^3$
- sauberer Zuschlag nahe der Sieblinie B
- hoher Mehlkorngesamt
- Konsistenz KP bis KR
- gleichmäßiges Einbringen
- vollständige Verdichtung
- ausreichende Deckung des Betonstahls

Bei Verwendung einer SB ergeben sich zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten. Es können gestaltgebende Elemente, wie z. B. Holzleisten oder Metallgitter (Mattenbewehrung), zwischen der Bahn und der Schalung eingelegt werden, die beim Betonieren als Negativform abgebildet werden.

Problemzonen beim sichtbar bleibenden Beton sind die Stoßbereiche der einzelnen Bahnen. Die SB werden in verschiedenen Größen bis ca. 4 m Breite angeboten. Auf Wunsch können von einigen Firmen auch Sondermaße geliefert werden, was aber natürlich mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Der Stoß kann evtl. auch mit einer Abdeckleiste aus Kunststoff kaschiert werden, welche dann als Scheinfuge auf der Wandoberfläche in Erscheinung tritt.

Ob eine solche Oberfläche gefällt, entscheidet letztendlich der individuelle Geschmack, der bekanntlich unterschiedlich ist. So sind auch in der Literatur die unterschiedlichsten Meinungen zu lesen. Auf jeden Fall geht es bei der SB primär um eine technische Verbesserung der Betoneigenschaften und weniger um eine optische Aufwertung. Im Allgemeinen sprechen die Herstellerfirmen auch keine Empfehlung zur Herstellung einer Sichtbetonwand aus, da gerade bei den heutigen Verhältnissen auf der Baustelle nicht immer davon ausgegangen werden kann, dass mit Sachverstand und der notwendigen Sorgfalt und gearbeitet wird.

6.4 Einsatz von SB bei anschließender Beschichtung

Beschichtungen, auch sehr guter Betonqualitäten, werden u.a. notwendig, wenn diese längere Zeit „sehr stark angreifenden“ Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind, die der Klasse 4 nach DIN 4030 (siehe Tabelle 66 S. 120) entsprechen. Dies ist z. B. in Abwasseranlagen gegeben, deren Abwässer biogene Schwefelsäure entwickeln. Dieses in Kläranlagen häufig entstehende Gas „verseift“ den Zement und zerstört damit die ungeschützte Betonoberfläche [5].

Ein weiterer Grund Betonoberflächen zu beschichten, ist der Wunsch der Kläranlagenbetreiber, in der Wasserwechselzone eine besonders glatte Oberfläche zu erhalten, damit diese Flächen leichter zu reinigen sind. Beschichtungen gegen Chloridkorrosion müssen auch in maritimen Betonbauwerken eingesetzt werden, wie z. B. Landungsbrücken, Hafenmauern oder Erdölplattformen.

Bestimmend für die Qualität einer Beschichtung ist vor allem die Haftzugfestigkeit des Untergrundes und unter anderem auch die Druckfestigkeit des Betons und. Dies wurde durch Untersuchungen des Readymix Institutes für Baustoffe (RIB) bestätigt.

Wasserabführende SB verbessern die Oberflächenhaftzugfestigkeit, so dass sie weit über den in den technischen Regeln (z. B. Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen) geforderten Mindestwerten, von 1,5 N/mm liegt.[5]. Die Festigkeit der Oberfläche wird ebenfalls wesentlich verbessert. Dies zeigen auch die im zweiten Teil dieser Diplomarbeit ermittelten Ergebnisse. Die mit einer SB hergestellte Betonoberfläche bietet Beschichtungen auf Mineral- und Kunstharzbasis eine sehr gute Haftung.

Da der mit einer SB hergestellte Untergrund keinerlei Vorbehandlung bedarf, (Sandstrahlen, Egalisieren und Grundieren, wie es bei einer konventionell geschalteten Oberfläche der Fall ist), ist dies auf jeden Fall eine Möglichkeit die Beschichtungskosten zu senken. Der Wegfall der Vorbehandlung führt zu Einsparungen, die in jedem Fall größer sind als die Material- und Arbeitskosten bei Einsatz einer SB [5].

6.5 SB zur Unterstützung der Nachbehandlung

„Bei ungeschützten Betonen können vor allem an großen freien Flächen «Schrumpf»- und Schwindrisse entstehen. [...] Durch die Nachbehandlung muss Beton bis zu einer ausreichenden Erhärtung vor schädigenden Einflüssen, wie z. B. vorzeitigem Austrocknen, großen Temperaturänderungen, mechanischen Beanspruchungen oder chemischen Angriffen geschützt werden. Die Nachbehandlung erfolgt durch Belassen in der Schalung, dichtes Abdecken mit Folien oder wasserhaltenden Matten [...]“ [34, S. 117]. Das Belassen in der Schalung entfällt aus wirtschaftlichen Gründen, da mit der heute oft verwendeten Systemschalung hohe Einsatzhäufigkeiten erreicht werden müssen.

Wenn die SB nach dem Ausschalen an der Wand verbleibt, kann sie zur Nachbehandlung genutzt werden. Sehr gute Resultate wurden nach Hermann [21] erreicht, wenn die auf der Betonoberfläche haftenden SB mit Wasser eingesprüht und mit Folien abgedeckt wurden. Doch allein das einfache Belassen der SB auf der Betonoberfläche reicht alleine als Mittel zur Nachbehandlung noch nicht aus. Dies gilt insbesondere bei warmer und trockener Witterung. Für die Nachbehandlungsdauer gelten die Regelungen der Nachbehandlungsrichtlinie. Die negativen Auswirkungen einer mangelhaften Nachbehandlung wurden in Kapitel 3.1.1 ausführlich dargestellt.

7 Raue Holzschalung im Vergleich zu SB

Wie bereits erwähnt, wird Beton in der Regel mit einer größeren Wassermenge hergestellt, als für die vollständige Hydratation notwendig ist (siehe Kapitel 3.1). Beim Einbringen und Verdichten wandert ein Teil dieses Überschusswassers zusammen mit Feinstteilen des Betons zur Schalung und zur freien Oberfläche.

Bei den früher meist verwendeten saugenden Holzschalungen wird zumindest ein Teil dieses Überschusswassers aufgesaugt. Nach Schuon [16] hat dies aber den entscheidenden Nachteil, dass mit einer solchen Schalhaut keine gleichbleibende Qualität erreicht werden kann, da sich die Oberfläche der Schalbretter mit Zementschlümpe zusetzt. Daher nehmen die Schalbretter bei wiederholtem Einsatz nur noch etwa $0,6 \text{ l/m}^2$ Wasser auf. Außerdem können unerwünschte Reaktionen mit Holzinhaltsstoffen, wie z. B. dem Holzzucker entstehen. Abgesehen davon wird in der Regel auf die raue Schalung auch meist eine sehr große Menge an Schalöl aufgetragen, um ein leichtes Entschalen sicherzustellen. Darunter leidet nicht nur die Qualität des Randbetons, sondern auch die Umwelt. Selbst wenn die Trennmittel der neueren Generation biologisch abbaubar sind und Wasser als Lösemittel eingesetzt wird, kann diese Art von Schalöl gerade im Trinkwasserbehälterbau (siehe Kapitel 6.1) Probleme bereiten. Mikroorganismen, die sich von Schalöl ernähren, sind im Trinkwasser ebenso wenig wie Schalölreste erwünscht.

Karl und Solacolu [26] führten vergleichende Untersuchungen am Beton der Versuchswand der Ersatzschleuse Wanne-Eickel von durch. Ein Teil des Betons wurde mit saugender SB und ein Teil mit rauer Holzschalung eingebaut.

Folgende Versuche wurden getätigt.

- Oberflächenzugfestigkeit
- Wasseraufnahme
- Chloridgehalt
- Karbonatisierungstiefe
- Frost-Tausalz-Widerstand

Bei allen Untersuchungen führte die wasserabführende SB zu besseren Ergebnissen und damit zu einer dauerhafteren Betonrandzone. Bei Einsatz von saugender Holzschalung zeigte sich bei der Karbonatisierungstiefe und beim Frost-Tausalz-Widerstand ein besonders großer Unterschied. Genauere Angaben zu den Ergebnissen wurden in dem Bericht von Karl und Solacolu [26] leider nicht gemacht.

8 Anwendung von SB auf der Baustelle

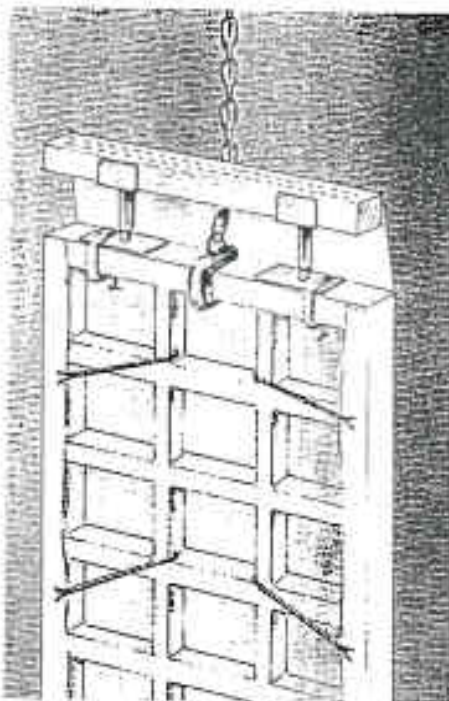
Obwohl die Anwendung recht einfach ist, sollte dennoch auf der Baustelle eine Einweisung durch den Fachmann erfolgen, an der auch die Planer und Aufsichtführenden teilnehmen sollten.

Die angebotenen Befestigungssysteme mit Klammern, Spannern und Spannhaken sind einfach zu handhaben und baustellengerecht. Allerdings muss sorgfältig gearbeitet werden, damit keine Falten entstehen, die sich nachher auf der Betonoberfläche abzeichnen. Die technischen Eigenschaften des Betons werden davon jedoch nicht beeinflusst. Beim Arbeiten mit Flaschenrüttlern muss man beachten, dass die Rüttelflasche nicht mit der SB in Kontakt kommt. Dies setzt die Wirksamkeit der SB herab oder beschädigt sie sogar. Auf jeden Fall kann man Spuren davon später auf der Betonoberfläche wiederfinden.

Alle bisher durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Betonzusammensetzungen haben keinen Hinweis auf Probleme mit bestimmten Betonsorten ergeben. Die SB kann bei nahezu allen Betonsorten verwendet werden. Es wurden auch schon Untersuchungen an hochfesten Betonen mit Silikastaub durchgeführt. Auch hier erwies sich die SB als wirksam, auch wenn dem Beton etwas weniger Wasser entzogen wurde, da sich die Poren schnell mit dem Stäuben zusetzen.

Wird die SB mit Klammern (Tacker) befestigt, sollte dies nach Möglichkeit nicht auf der Schaloberfläche geschehen, sondern an den angebrachten Spannbalken (siehe Abbildung 10 auf der folgenden Seite). Ist dies nicht möglich, wird der Einsatz von rostfreien Materialien empfohlen, da sich sonst Rostflecken auf der Betonoberfläche abzeichnen können.

8.1 Aufbringen der SB



Die Methode die wasserabführende SB über Spannbalken, die z. B. an der Oberseite der Trägerschalung befestigt sind, mit Spannschrauben und seitlichen Gummistreifen aufzuspannen hat sich bewährt. An der Unterseite und in Bereichen von Aussparungen wird die SB zusätzlich mit Klammern (Tacker) befestigt.

Das benötigte Material, wie z. B. Spanner und Spannhaken, wird als Zubehör von den entsprechenden Firmen angeboten.

Abbildung 10

Bei schwierigen Verhältnissen wie z. B. Rundungen kann die SB auch mit einem geeigneten Sprühkleber vollflächig befestigt werden. Die geeigneten Kleber werden von den Firmen in den Produktinformationsblättern angegeben.

Wie bereits in Kapitel 6.2 beschrieben kann sich die SB bei Temperaturdifferenzen zwischen dem Zeitpunkt des Aufspannens und des Betonierens ausdehnen und so Wellen bilden [35]. Wird die Bahn z. B. am frühen Morgen aufgebracht und liegt anschließend das Schalelement in der prallen Mittagssonne, dehnt sich die Kunststoffbahn mehr aus, als die Schalung und wirft deshalb Falten. Die Wellen und Falten bleiben auch beim Betonieren erhalten und zeichnen sich nach dem Ausschalen an der Betonoberfläche ab. Deshalb sollte, wenn möglich, nicht zu viel Zeit zwischen Anbringen der SB und dem Betonieren vergehen.

9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Teilweise wurde bei den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten schon auf die möglichen Einsparungen hingewiesen. Hier möchte ich noch mal ganz allgemein auf die wirtschaftliche Anwendung der SB eingehen. Denn immerhin werden für Oberflächenschutz- und Beschichtungssysteme in Deutschland 750 Millionen DM pro Jahr ausgegeben [15].

Wie in Kapitel 6.3 ausführlich beschrieben wurde, können bei Beschichtungen bereits während der Bauausführung Kosten eingespart werden. In vielen Fällen kann sogar ganz auf eine Beschichtung verzichtet werden. Frühe Instandsetzungsarbeiten, die in jüngster Zeit einen großen Umfang einnehmen, können beim Einsatz von wasserabführenden SB überflüssig werden. Bautenschutzmaßnahmen (vorbeugender Oberflächenschutz) können, entsprechend der Weisung des Bundesministeriums für Verkehr, bei Anwendung von SB in der Regel entfallen [22].

Bei einigen Fällen wird sich die Wirtschaftlichkeit erst nach Jahren durch eingesparte Sanierungskosten zeigen. Aber auch hier sei erwähnt, dass bei einer Wirtschaftlichkeitsanalyse auch die unmittelbar eingesparten Kosten berücksichtigt werden müssen.

Folgende Faktoren wirken sich kosteneinsparend aus:

- Aufwendige Reinigungsarbeiten der Schalung entfallen.
- Der hydrostatische Druck auf die Schalung und die Stützen reduziert sich.
- Die Anforderungen an die Schalhaut sind geringer.
- Dies erhöht die Einsatzhäufigkeit und die Nutzungsdauer der Schalelemente.
- Es kann eine günstigere Betonmischung verwendet werden.
- Die Kosten für das Schalöl, sowie die Arbeitszeit, das Trennmittel aufzutragen fallen weg.

Diesen Kostenreduzierungen an Material- und Lohnaufwand steht ein Kostenaufwand (Material- und Lohnkosten) von - bei großen Flächen in der Regel - ca. 25,- DM/m² [21] für die wasserabführende SB gegenüber, so dass nach Meinung von Herrmann [21] sogar Kostenneutralität erreicht werden kann.

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zum Einsatz wasserabführender SB im Kläranlagenbau hat nach Angaben von Bresch [8] ergeben, dass der Sanierungsaufwand bei Einsatz einer SB um bis zu 46% reduziert werden kann. Die Analyse wurde durchgeführt vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover. Zugrundegelegt wurde eine Nutzungsdauer des Gesamtbauwerks von 35 Jahren.

Im „normalen“ Hochbau wird sich jedoch die Anwendung von SB wahrscheinlich nicht durchsetzen. Um hier den sinnvollen Einsatz zu beurteilen, ist der Grad des zu erwartenden Angriffs, aber vor allem die vorgesehene Nutzungsdauer eines Gebäudes zu berücksichtigen. Heute scheint sich eher ein Trend zu kürzeren Nutzungszeiten von Gebäuden abzuzeichnen. Dies gilt besonders für Geschäftshäuser in teuren Stadtlagen, wo Gebäude oft schon nach weniger als 20 Jahren wirtschaftlich abgeschrieben sind und oft durch neue größere Gebäude ersetzt werden. Als Beispiele seien das in jüngster Vergangenheit abgerissene „Interio-Gebäude“, sowie eine ganze Reihe von Geschäftshäusern in der Fußgängerzone von Stuttgart genannt.

Im allgemeinen sind Hochbauten auch weniger betonangreifenden Einwirkungen ausgesetzt als Tiefbauten. Natürlich gibt es Ausnahmen, wie z. B. Parkhäuser und Bauwerke in unmittelbarer Nähe zum Meer oder in aggressiver Atmosphäre, bei denen der Einsatz von SB evtl. wirtschaftlich zu rechtfertigen wäre. Hier wären weitere Analysen sicher hilfreich.

10 Langzeituntersuchungen

Obwohl saugende SB schon in vielen Bauwerken weltweit eingesetzt wurde gibt es nur sehr wenig wissenschaftliche Langzeitstudien im freien Feld. Malone [52] beschreibt eine Untersuchung von 1995 die von P. A. M. Basheer vorgenommen wurde. An drei Brückenpfeilern in Nordirland wurde je eine Hälfte der Pfeiler mit einer SB hergestellt. Nach 6 Monaten wurde die Oberflächenhaftzugfestigkeit gemessen, die auf der Seite mit SB im Durchschnitt um 27% höher war. Die Permeabilität war ebenfalls deutlich verringert.

Malone [52] erwähnt auch eine von Wilson und Serafini untersuchte Chlorideindringung im Spritzwasserbereich des Hafens „Rashid“ in den Vereinigten Arabischen Emiraten. Ein Teil des Betons wurde unter Einsatz einer SB hergestellt. Drei Jahre nach dem Bau wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Es zeigte sich in 5 mm Tiefe eine Verringerung der Chloridkonzentration von 35% und in einer Tiefe von 17,5 mm eine Verringerung von 65%.

Beddoe beschreibt in [17] eine Langzeituntersuchung von SB. Seine Probekörper wurden zweieinhalb Jahre, auf dem Dach des Institutsgebäudes München-Pasing gelagert. Während an der Vergleichsprobe Abwitterungserscheinungen festzustellen waren, konnte an den mit der SB hergestellten Fläche keine Veränderung, abgesehen von feinen Netzkissen, erkannt werden. Die Netzkisse erschienen als dunkle Verfärbung im Feinmörtel in der Oberfläche. Ihre Tiefe betrug 1/10 mm und die Maschenweite rund 15 mm. Beddoe klassifiziert sie als Schwindrisse, die aber aufgrund ihrer geringen Tiefe, für die Dauerhaftigkeit unbedenklich sind.

Nach der 2½ jährigen Lagerung wurde ein umfangreiches Prüfprogramm durchgeführt. Es wurde u. a. untersucht:

- Karbonatisierungstiefe
- Wasserundurchlässigkeit
- Gasdurchlässigkeit
- Frost-Tausalz-Widerstand

Die Karbonatisierungstiefe der mit der SB behandelten Oberfläche betrug nach ca. 30 Monaten nur etwa 0,5 mm, die Gasdurchlässigkeit und die Wasseraufnahme wurden deutlich vermindert. Der Widerstand der Randzone gegen Frost-Tausalzeinwirkung war auch noch nach der Freibewitterung erhalten. Erwähnenswert ist die Frost-Tausalzprüfung, bei der die Probekörper unter Druck mit der Tausalzlösung gesättigt wurden. Obwohl nur die mit einer SB verbesserte Randzone bewittert wurde, zeigte sich nach 50 Frost-Tauwechseln, dass das Innere der Probe vollkommen zermürbt war, an der Oberfläche aber keine Abwitterung zu erkennen war. Wenn Flüssigkeit in das Innere des Betons gelangt wird dieser stärker angegriffen, als die verbesserte Oberfläche. Für die Praxis bedeutet das, dass man auf jeden Fall Verletzungen an der Oberfläche vermeiden muss, um die Dauerhaftigkeit des Bauwerks nicht zu beeinträchtigen.

11 Umweltverträglichkeit der SB

Die SB besteht zu 100% aus thermisch verfestigten Polypropylenfasern. Sie zerfällt bei der Verbrennung mit über 600°C zu CO, CO₂ und Wasser. Die gebrauchten Bahnen können mit dem normalen Bauschutt oder als Hausmüll entsorgt werden. Dies wird in der Praxis zwar häufig getan, ist aber eigentlich nicht wünschenswert. Es ist besser die SB nach Gebrauch als Geotextil, Schutz der Drainageschicht einer zu hinterfüllenden Kellerwand, als Gleit- oder Trennfolie, Zulage zur Sauberkeitsschicht o. ä. zu verwenden.

Bis vor einigen Jahren konnte man SB nur einmal verwenden. Entwicklungen und Forschungen zielen aber in die Richtung, die Bahnen so zu konzipieren, dass sie zwei oder sogar drei mal eingesetzt werden können, ohne dass diese viel von ihrer Wirksamkeit verlieren [47].

Für die Umweltbilanz als positiv zu bewerten ist außerdem, dass bei Einsatz einer SB auf Trennmittel verzichtet wird. Für die Deponielagerung gilt: Polypropylen ist auf jeden Fall grundwasserneutral, kann aber nicht biologisch abgebaut werden.

Versuchsteil

12 Anlass und Ziel

Seit in den 50er Jahren das Rauspundbrett als Schalmaterial durch mehrfach beschichtete nichtsaugende Holzwerkstoffschalungen mehr und mehr ersetzt wurde, wurden „die betontechnologisch nachteiligen Begleiterscheinungen [...] übersehen“ [23, S. 20]. Die Schuld an den frühen Betonschäden wurde in der zu geringen Bewehrungsüberdeckung gesucht; also korrigierte man das sog. Nennmaß in der DIN 1045 ständig nach oben.

In den 60er Jahren gab es einen Boom im Wohnungsbau. Gebäude mit sogenannter Schottenbauweise mit Sichtbetonfassaden schossen wie Pilze aus dem Boden. Nicht nur die fragwürdige Ästhetik, sondern auch die darauf folgende Sanierungswelle, deren Kosten in die Milliarden gingen, haben dem Baustoff Beton einen schlechten Ruf beschert. Dass diese Sanierungswelle noch lange nicht zu Ende ist, habe ich in meinem Praxissemester erfahren können, bei dem ich mich in einem Planungsbüro intensiv mit Betonsanierung von Gebäuden aus den 50er bis 70er Jahren beschäftigte. Ich habe auch die Erfahrung gemacht wie teuer eine solche Sanierung werden kann. All dies zeigt die Notwendigkeit, eine praktische Lösung zu finden, bei der die Vorteile von verschiedenen Schalungsmaterialien kombiniert werden können, um die Qualität der Betonrandzone zu verbessern und trotzdem wirtschaftlich zu bauen.

Da mir diese Problematik bekannt war, ich aber noch nie etwas von saugenden SB gehört hatte, war ich dieser Thematik sehr aufgeschlossen als Herr Prof. Schelling mir dieses Thema als Diplomarbeit zur Disposition stellte.

In den folgenden Kapiteln werden die durchgeführten Untersuchungen mit der SB dargestellt.

13 Herstellung der Probekörper

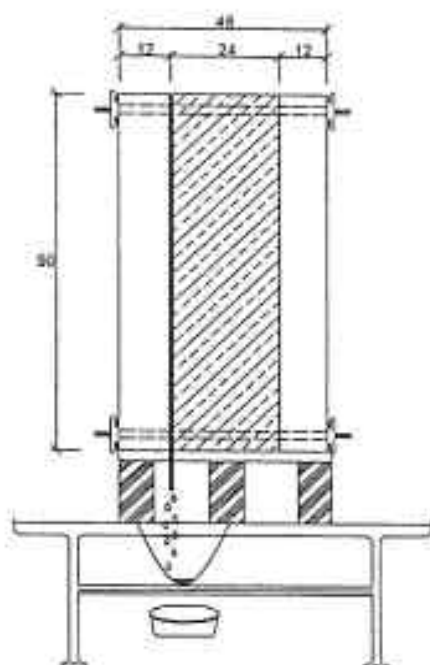


Abbildung 11 Aufbau Schalung

Es wurden vier Probewände mit verschiedenen Betonsorten mit „Peri - Rahmenschalung“ hergestellt. Die Abmessungen betrugen $h \cdot b \cdot d = 90 \cdot 110 \cdot 24$ cm. Für die Herstellung verwendete ich die saugende SB Formtex® der Firma Fibertex® aus Dänemark. In Deutschland wird diese Bahn unter dem Namen Dranovlies von der Firma Reuß aus Wuppertal vertrieben. Eine Seite der Wände, sowie eine Stirnseite wurden mit der SB belegt, während die andere Seite konventionell mit Trennmittel eingestrichen wurde. In Abbildung 11 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

Da nur gebrauchte Schalelemente zur Verfügung standen, wurde die Seite, auf der die SB angebracht wurde, vorher mit Spiritus gereinigt, damit keine Schalölrückstände die Wirkung der SB beeinflussen konnte. Die SB wurden einfach an die Schalung „getackert“, da die Wände zur Nachbehandlung 7 Tage komplett in der Schalung belassen werden konnten. Auf der Baustelle empfiehlt sich die Bahn mit Spannern und Spannhaken zu befestigen, damit die Bahn nach dem Entschalen zur Nachbehandlung auf der Wand verbleiben kann. So können die teuren Systemschalungen sofort wieder eingesetzt werden.

Abbildung 12 auf der nächsten Seite zeigt den Aufbau nochmals auf einem Foto. In jeder der beiden Schalungen wurden jeweils zwei Wände betoniert. Wie man erkennen kann wurde der gesamte Aufbau auf Stützböcken hochgestellt, um das Wasser aufzufangen. In die Schaltafel, welche als Boden diente, wurde ein Schlitz gesägt, der so breit war, dass man die SB gerade noch hindurchziehen konnte.

Die SB hing frei zwischen den Stützböcken herunter und das drainierte Wasser wurde in einer Folie (im Bild blau) im Gefälle abgeleitet. Das Wasser wurde in Plastikschüsseln aufgefangen.

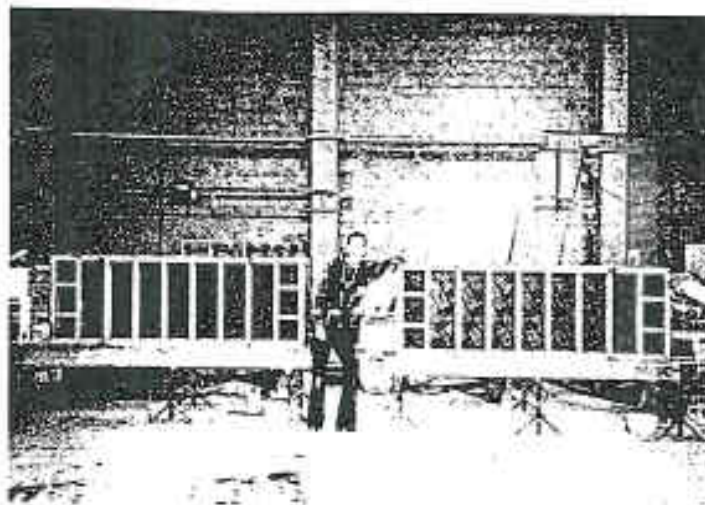


Abbildung 12

Der Beton wurde von einem Betonwerk in der Nähe hergestellt und mit Mischerfahrzeugen angeliefert. Von jeder Betonsorte wurde, um Ungenauigkeiten im Mischungsverhältnis zu vermeiden, ein Kubikmeter Beton hergestellt, von denen ca. 230 l für die Wand benötigt wurden.

Die Probewände wurden alle am 5.4.2000 nacheinander hergestellt und eine Woche zur Nachbehandlung in der Schalung belassen. Der Beton wurde in zwei Schichten zu je ca. 45 cm eingebaut und mit einem 60er Innenrüttler verdichtet.

Auf der folgenden Seite ist die Zusammensetzung der verwendeten Betonsorten tabellarisch aufgeführt.

13.1 Zusammensetzung der Betonsorten

Tabelle 4 Zusammensetzung der verwendeten Betonsorten

Beton-Nr.		1	2	3	4
Verwendungszweck		für bewehrte Innen- und Außenbauteile WU-Beton			nach ZTV-K 88 / 96 für Verkehrsbau- ten
Betongruppe		I	II	II	II
Festigkeitsklasse B		25	35	45	35
Konsistenz		R	R	R	P
Zement	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/m ³	270	280	350	340
Wasser	Gehalt kg/m ³	175	175	180	170
	w/z bzw. $\frac{w}{z + 0,4f}$	0,60	0,58	0,50	0,50
Zu- schlag	Art Sieblinien- bereich Größtkorn	NSK A/B 22	NSK A/B 22	NSK A/B 22	NSK A/B 22*
	Gehalt trocken kg/m ³	1850	1845	1805	1870
Zusatz- stoff	Art	FA	FA	FA	-
	Gehalt kg/m ³	60	60	30	-
Zusatz- mittel	Art	BV	BV	BV	BV
	Gehalt kg/m ³	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

13.2 Entnahme der Bohrkerne

Die Bohrkerne wurden mit dem Kernbohrgerät der Fachhochschule Stuttgart im Nassbohrverfahren am 11. bis 14. Tag gezogen. Es wurden fünf Bohrkerne mit dem Durchmesser 150 mm und zehn Bohrkerne mit dem Durchmesser 100 aus der Wand entnommen. Die Anzahl wurde für nachfolgende Diplomarbeiten bemessen, die z. B. Untersuchungen zum Thema Karbonatisierung und Frost-Tausalz-Bearspruchung behandeln können.

Die Bohrkerne wurden allesamt aus dem unteren Teil der Wand entnommen (siehe Abbildung 13).

Die Bohrkerne lagerten bis zu ihrer jeweiligen Prüfung im Labor der Fachhochschule Stuttgart bei Normalklima.

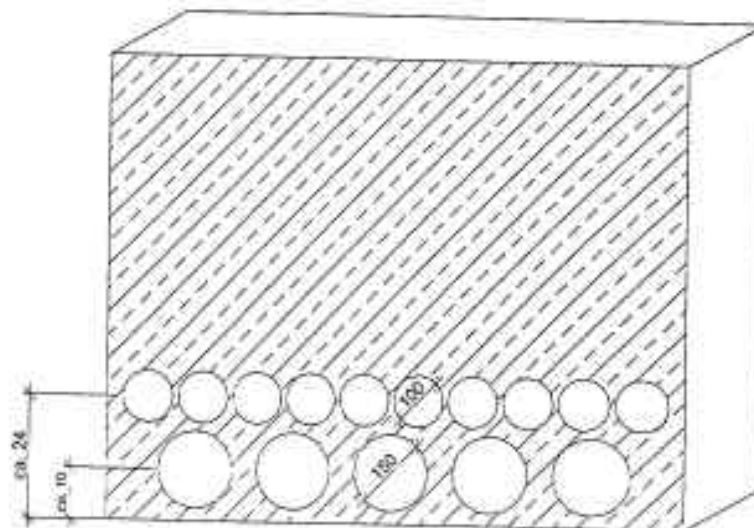


Abbildung 13 Entnahmestellen der Bohrkerne

14 Versuchsprogramm

Die folgenden Untersuchungen wurden vergleichend zwischen den unterschiedlich geschalteten Oberflächen gemacht.

- 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 im neuen und im gebrauchtem Zustand.
- Aufnahme von Feinstbestandteilen sowie visuelle Beurteilung der SB nach dem Ausschalen.
- Haftung der SB an der Betonoberfläche nach dem Ausschalen



Außerdem wurde durchgeführt

- 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

14.1 Frischbetonprüfungen

14.1.1 Ausbreitmaß

An den Betonmischungen wurde die Frischbetonkonsistenz mit Hilfe des Ausbreitmaßes nach DIN 1048 Teil 1, nach 10 und 45 Minuten bestimmt.

Tabelle 5 Ausbreitmaße

Beton-Nr.	Ausbreitmaß a in cm				Beton-temperatur [°C]	Luft-temperatur [°C]
	nach 10 min	erreichte Konsistenz nach DIN 1048	geforderte Konsistenz vom Werk	nach 45 min		
1	460	KR	KR	400	15	11
2	480	KR	KR	430	14	12
3	510	KF	KR	480	15	12
4	420	KR	KP	390	14	10

14.1.1.1 Auswertung

Beton Nr. 1 und 2 erreichen die geforderte Konsistenz. Beton Nr. 3 und 4 überschreiten das Ausbreitmaß um drei bzw. um ein Zentimeter. Sie sind damit etwas weicher als vom Werk vorgegeben.

Ausbreitmaß a in cm	Konsistenzbereich
35 bis 41	KP (plastisch)
42 bis 48	KR (weich)
49 bis 60	KF (fließfähig)

Tabelle 6 zeigt die Ausbreitmaße und ihre Beurteilung nach DIN 1045

14.1.2 Bestimmung der Frischbetonrohddichte

Die Frischbetonrohddichte wurde mit allen vier Betonsorten an den Probewürfeln mit 150 mm Kantenlänge bestimmt. Es wurden jeweils drei Probewürfel pro Beton hergestellt. In der Tabelle angegeben ist der Mittelwert der drei gemessenen Werte.

Tabelle 7 vergleicht die gemessene und die errechnete Frischbetonrohddichte

Beton-Nr.	gemessene Rohddichte ρ_{frisch}	Rohddichte ρ_{airt} nach Betonsorten- verzeichnis, angenommener Luftporengehalt 1%	Differenz $\rho_{\text{frisch}} - \rho_{\text{airt}}$
	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
1	2,393	2,332	0,061
2	2,415	2,337	0,078
3	2,391	2,342	0,049
4	2,407	2,357	0,050

14.1.2.1 Auswertung

Da Zement der spezifisch schwerste und Wasser -neben Luft- der spezifisch leichteste Bestandteil des Betons ist, nimmt die Frischbetondichte zu:

- mit steigendem Zementgehalt
- mit abnehmendem Wassermenge
- mit abnehmendem Porengehalt.

Die Frischbetondichte nimmt ab

- mit zunehmendem Wassergehalt
- mit zunehmendem Porengehalt.

Daraus folgt, wenn der gemessene Wert der Frischbetonrohddichte deutlich niedriger ist als der Sollwert, deutet dies auf eine nicht vollständige Verdichtung oder auf einen erhöhten Wasserzementwert (z. B. infolge erhöhter Zuschlagfeuchte) hin. Ist der gemessene Wert dagegen deutlich höher als der Sollwert, deutet dies im allgemeinen auf eine Entmischung hin. Wasser oder wasserreicher Feinmörtel kann z. B. durch undichte Schalungen ausgeflossen sein.

Die im Versuch gemessenen Abweichungen sind nur sehr gering und man kann davon ausgehen, dass das Mischungsverhältnis im Toleranzbereich liegt.

14.1.3 Bestimmung des Luftporengehalts im Frischbeton

Der Luftporengehalt wurde mit dem Druckausgleichsverfahren nach DIN 1048 Teil 1 festgestellt. Das Verfahren beruht auf dem Gesetz von BOYLE - MARIOTTE, wonach das Produkt aus dem Druck p und dem Volumen V eines idealen Gases bei gleichbleibender Temperatur konstant ist. Der zu messende Luftgehalt wird aus der Druckänderung bestimmt, die sich einstellt, wenn die im Beton befindlichen Luftporen durch einen äußeren Überdruck zusammengedrückt werden.

Pro Betonsorte wurde je eine Prüfung durchgeführt. Die ermittelten Werte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 8 zeigt die ermittelten Werte der Bestimmung des Luftporengehaltes

Beton-Nr.	Luftporengehalt in %
1	1,1
2	1,0
3	0,8
4	0,9

14.1.3.1 Auswertung

Auch vollständig verdichteter Beton enthält noch eine geringe Menge an Luftporenschlüssen, die Verdichtungs-poren. Sie können mit den üblichen Verdichtungsverfahren nicht entfernt werden. Sie verbleiben im Beton. In der Literatur [41] wird ein durchschnittlicher Wert von 1,5 Vol.-% angegeben (siehe auch Kapitel 3.3), den hier alle Betone unterschreiten. In den Wasserzementwertkurven von Walz (siehe Kapitel 3.2 Seite 9) ist ein Luftgehalt von 1,5% bereits berücksichtigt. Ist der Luftgehalt deutlich höher, so wirkt sich dies auf die wesentlichen Betoneigenschaften nachteilig aus. Die gemessenen Luftporengehalte liegen alle deutlich unter 1,5 % und liegen damit über dem Durchschnitt.

Normalerweise wird diese Prüfung nur für Betonsorten mit künstlich zugeführten Luftporen durchgeführt. Diese besitzen damit einen erhöhten Frost-Tausalz-Widerstand und werden z. B. im Straßenbau eingesetzt. Die von mir getesteten Betonsorten enthielten keinen Luftporenbildner.

15 Visuelle Beurteilung der Betonoberfläche

Die Oberflächen mit SB waren, wie erwartet, in der Farbe etwas dunkler und frei von sichtbaren Poren und Lunkern. Auf beiden Seiten der Wand (mit und ohne SB) traten direkt nach dem Ausschalen dunkle Flecken in Erscheinung. Wir konnten feststellen, dass die Flecken sich genau an den Stellen zeigten, an denen die Schalhaut verletzt war. Die Flecken trockneten jedoch größtenteils nach kurzer Zeit ab. Nach zwei Tagen waren immer noch kleinere Reste der Flecken zu sehen. Ich vermute, dass die Schalhaut an den verletzten Stellen Wasser aufgenommen und dann wieder an den Beton abgegeben hat. Nach fünf Tagen waren so gut wie keine Flecken mehr zu sehen.

Auffällig waren auch die weißen Verfärbungen im oberen Teil der Wand, die ich als Kalkausblühungen klassifizieren würde. Der obere Teil der SB trocknete eher aus und könnte so dieses Phänomen hervorgerufen haben könnte (siehe auch Kapitel 6.2). Dies müsste aber noch sorgfältiger untersucht werden.

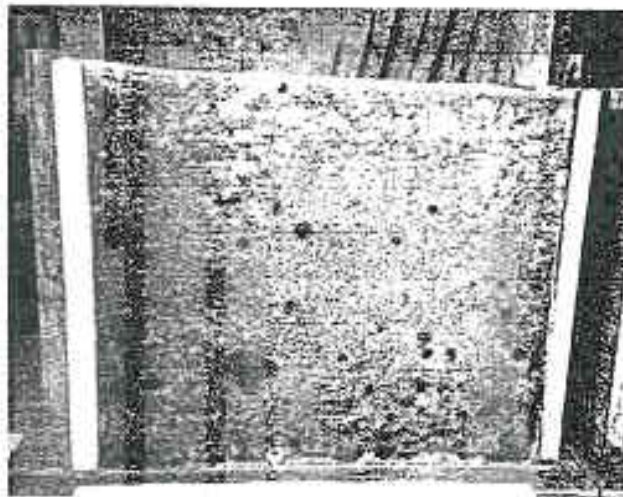
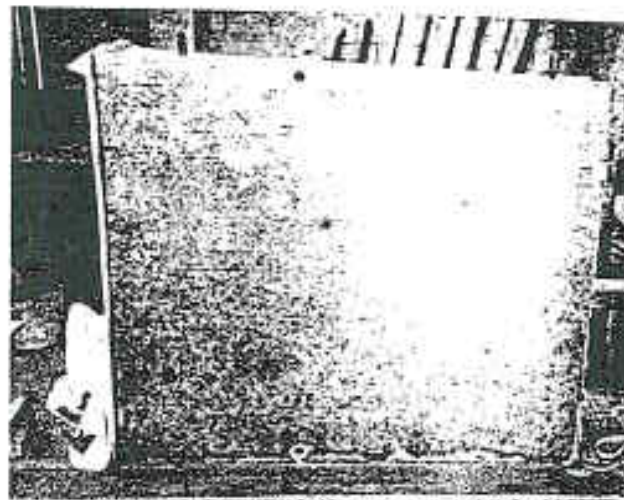


Abbildung 14 zeigt Wand 2 (Seite mit SB hergestellt) am 12.04.2000, direkt nach dem Ausschalen. Die großen dunklen Flecken sind gut zu erkennen. Im oberen Teil der Wand zeichnen sich auch schon die hellen Stellen ab.

Abbildung 15 zeigt Wand 2 (Seite mit SB hergestellt) am 14.04.2000 also zwei Tage nach dem Ausschalen. Die feuchten Flecken sind weitgehend verschwunden, aber die hellen Stellen im oberen Drittel der Wand treten nach dem Abtrocknen noch deutlicher hervor.



An den oberen fünf Zentimeter der Wand kam es zum Teil zu Ablöseerscheinungen des Betons. Sehr wahrscheinlich liegt es daran, dass wir die SB an dieser Stelle nicht fachgerecht befestigten. An der Stirnseite traten diese Ablösungen nicht auf. Während wir an der Frontseite die SB einfach „aufhackten“ und oben bündig abschnitten, wurde die SB an der Stirnseite richtig aufgespannt und um die Stirnabschalung umgeschlagen. So wird es auch von der Herstellerfirma empfohlen. Malone [52] berichtet von ähnlichen Problemen an den oberen 5 bis 10 cm einer Wand. Dort wies die Oberkante zahlreiche Lunker auf. Die Erklärung dafür ist, dass in diesem Bereich so gut wie kein Porenwasserdruck vorhanden ist, der das Wasser „herauspresst“. Als eine Möglichkeit dieses Problem zu beheben, wird eine Nachverdichtung nach dem ersten Ansteifen des Betons empfohlen.

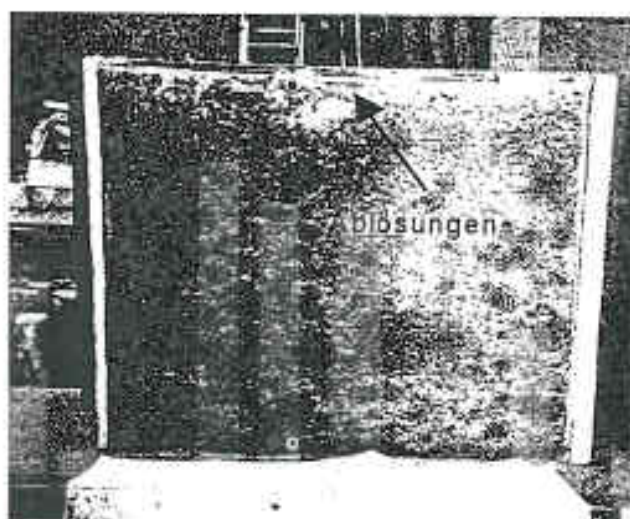


Abbildung 16 zeigt Wand 4 am 12.04.2000, direkt nach dem Ausschalen. Noch deutlicher kann man hier die dunklen feuchten Flecken erkennen, die aber nach ein paar Tagen verschwunden waren. Deutlich zu sehen sind die Ablöseerscheinungen an der Oberkante der Wand.

16 Messung der drainierten Wassermenge

16.1 Versuchsbeschreibung

Das Wasser, welches von der SB vom Beton abgeführt wurde, wurde in Plastikschüsseln aufgefangen und abgemessen. Der Schlitz in der Bodenschalung, durch den die SB nach außen geführt wurde, wurde eine Stunde vor Einbringen des Betons kräftig „gewässert“ damit die Schnittflächen kein „drainiertes Wasser“ aufnehmen.

Nach ca. vier Stunden ist bei allen Probekörpern kein Wasser mehr abgeflossen. Messungen an neuen und gebrauchten SB haben ergeben, dass die Bahn ca. 0,6 - 0,7 Liter Wasser speichern kann (siehe Kapitel 17). Allerdings muss man berücksichtigen, dass die Wasseraufnahme der SB ohne den Betonierdruck, der in der Schalung auf ihr lastet, gemessen wurde. Daher kann davon ausgegangen werden, dass beim praktischen Einsatz eher etwas weniger Wasser von der SB aufgenommen wird. In der weiteren Betrachtung bleibt dieses zur Vereinfachung aber unberücksichtigt und die ermittelten Werte werden in den Rechnungen, wie im Labor gemessen, übernommen.

16.2 Auswertung

Folgende Überlegungen sind Grundlage der nachfolgenden Rechnungen:

Beddoe [54] stellte in verschiedenen Untersuchungen fest, dass der Beton durch die SB am Rand einen w/z-Wert nahe 0,4 erreicht. Errechnet man den Wasseranspruch bei diesem w/z-Wert und zieht diesen von der tatsächlich im Beton enthaltenen Wassermenge ab, erhält man die Menge des Überschusswassers. Die Menge des Überschusswassers wird auf die Dicke der Wand bezogen. Dividiert man nun die tatsächlich entzogene Wassermenge durch die auf die Wanddicke bezogene Menge, bekommt man einen Wert, den man als die Tiefe interpretieren kann, in der die SB mindestens gewirkt haben muss. Denn wenn der w/z-Wert höher als 0,4 ist, müsste die Tiefe größer sein, um die gleiche Menge Wasser zu drainieren. Es wird davon ausgegangen, dass die SB den w/z-Wert nicht weiter als auf 0,4 reduzieren kann.

16.3 Rechnungen

Wasseranspruch bei w/z von 0,4 [$W_{0,4}$]

$$W_{0,4} = 0,4 \cdot (z + 0,4f)$$

Überschusswasser [M_0]

$$M_{W0} = M_W - W_{0,4}$$

Überschusswasser auf die Wanddicke ($d = 24\text{cm}$) bezogen [l_0]

$$l_0 = m_{W0} / d$$

Errechnete Mindestwirktiefe [l_w]

$$l_w = M_{Wg} / l_0$$

Tabelle 9 fasst die Werte und Ergebnisse der Messungen der drainierten Wassermenge und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen zusammen.

Beton-Nr.	1	2	3	4
Beladezeit	09:28	10:50	11:36	13:23
Zeit Einbau	10.15-10.30	11.00-11.10	11.45-12.00	13.35-13.45
Wasseraustritt nach	2-3 min	2-3 min	2-3 min	2-3 min
Wassermenge 06.04.2000 M_a [l]	3,00	2,82	3,10	2,76
Fläche Wand A_w [m ²]	0,95	0,95	0,96	0,96
Wassermenge pro m ² M_a [l/m ²]	3,16	2,96	3,21	2,87
Wasseraufnahme SB M_{sa} [l/m ²]	0,68	0,66	0,67	0,67
Wasser entzogen gesamt M_{Wg} [l/m ²]	3,84	3,61	3,88	3,54
ph-Wert Wasser	12,29	12,28	12,26	11,97
Betonzusammensetzung				
Wasser M_w [kg/m ³]	175,00	175,00	180,00	170,00
Zement M_z [kg/m ³]	270,00	280,00	350,00	340,00
Flugasche M_{FA} [kg/m ³]	60,00	60,00	30,00	-
w/z [-]	0,60	0,58	0,50	0,50
Wasseranspr. $W_{0,4}$ bei w/z = 0,4 [l]	117,60	121,60	144,80	136,00
Überschusswasser $M_{WÜ}$ [l]	57,40	53,40	35,20	34,00
Überschuss/cm m_0 [l/cm]	2,39	2,23	1,47	1,42
errechnete Mindestwirtiefe l_w [cm]	1,61	1,62	2,65	2,50

16.4 Beurteilung

Die Mindesteinwirktiefe ist nur ein theoretischer Wert, und man kann davon ausgehen, dass die tatsächliche Tiefe, in der die SB Auswirkungen auf den Beton hat, etwas größer ist, da der w/z-Wert mit der Tiefe sukzessive zunimmt, bis er wieder bei dem ursprünglichen Niveau angekommen ist.

Die Menge des abgeführten Wassers ist in allen Fällen größer als die von Beddoe [54] ermittelten 2,5 l. Dies kann folgende mögliche Gründe haben:

- Die von mir hergestellten Probewände waren größer und höher. Daraus folgt ein höherer Betonierdruck und damit ein höherer Porenwasserdruck, der das Wasser „herauspresste“.
- Es wurde ein anderes Fabrikat einer SB verwendet.
- Die Betonzusammensetzung war anders.
- Es wurden Fließmittel verwendet. Dies verringerte die Oberflächenspannung des Wassers, so dass es die kleinen Poren des Filtervlies leichter passieren konnte.

Das drainierte Wasser hatte eine gelbe Farbe, die durch das verwendete Fließmittel entstand. Mit dem Wasser wurden auch durchschnittlich etwa 100 g Feinstbestandteile aus dem Beton herausgespült, die sich zum Teil am Boden der Plastikschrägen absetzten. Dieser Umstand ist bedingt durch die handwerkliche Ungenauigkeit bei der Herstellung des Schlitzes, durch den die SB hindurchgeführt wurde. Beim Abbau der Schalungen konnte man erkennen, dass an dem heraushängenden Teil der SB der Beton geringfügig entlanggelaufen ist. Dies geschah aber nur an der Innenseite der SB, also vor der Filterschicht. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die SB so gut wie keine Feinstbestandteile passieren lässt.

17 Eigenschaften der SB

Die Bahn, die im Neuzustand weiß ist, sieht nach dem Gebrauch, bedingt durch die anhaftenden Zementpartikel, hellgrau aus. Es war gut zu erkennen, dass die Färbung um so dunkler war, je höher die Mahlfeinheit des Zementes war. Leider ist das entsprechende Foto ein wenig überbelichtet, so dass dort nichts zu erkennen ist.

Nach telefonischer Aussage von Herrn Beddoe [54] der Universität München bleibt die Bahn weiß, wenn sie vor dem Einbau wassergetränkt wird. Das würde bedeuten, dass Feinstbestandteile nur am Anfang „angesaugt“ werden und sobald die SB wassergesättigt ist so gut wie keinerlei Feinst- und Zementteile dem Beton entzogen werden.

Die SB wurden im Neuzustand sowie im gebrauchten Zustand gewogen. Vorher wurden sie drei Tage bei 40 °C im Trockenofen getrocknet. Für die Wägung wurde ein Stück der SB aus der Mitte der Wand von 0,5 m² Größe herausgeschnitten und die Ergebnisse auf einen Quadratmeter umgerechnet. Für die Messung der Wasseraufnahmefähigkeit wurden die SB drei Minuten unter Wasser gehalten und 60 Sekunden abtropfen lassen. Man konnte feststellen, dass die gebrauchten SB etwas länger brauchten, um sich mit Wasser vollzusaugen.

17.1 Ergebnisse

Tabelle 10 Wasseraufnahme der Schalungsbahn

Bahn	Zementsorte	Gewicht / m ² trocken [g]	Gewicht / m ² nass [g]	Wasserauf- nahme / m ² [g]	Feinstbestand- teile / m ² [g]
neu	-	238,6	890,0	651,4	0,0
1	CEM I 32,5	260,2	942,8	682,7	21,5
2	CEM I 42,5	256,2	915,4	659,2	17,6
3	CEM I 42,5	264,1	933,1	669,0	25,4
4	CEM III-B 32,5	273,9	940,9	667,0	35,2

17.1.1 Beurteilung

Wie man in der Tabelle erkennen kann, gehen etwa 20 g an Feinstbestandteilen pro m^2 aus dem Beton in die SB über. Bei der Mischung mit Hochofenzement beträgt der Anteil etwa 35 g.

In einer Schicht mit einer Dicke von einem cm innerhalb eines Quadratmeters Beton befinden sich 2,7 bis 3,5 kg Zement; im Randbereich ist es sogar noch etwas mehr. Man kann also davon ausgehen, dass dieser geringe Anteil unschädlich für den Beton ist.

Die SB kann im neuen Zustand ca. 0,65 Liter Wasser aufnehmen. Im gebrauchten Zustand erhöht sich der Anteil noch geringfügig.

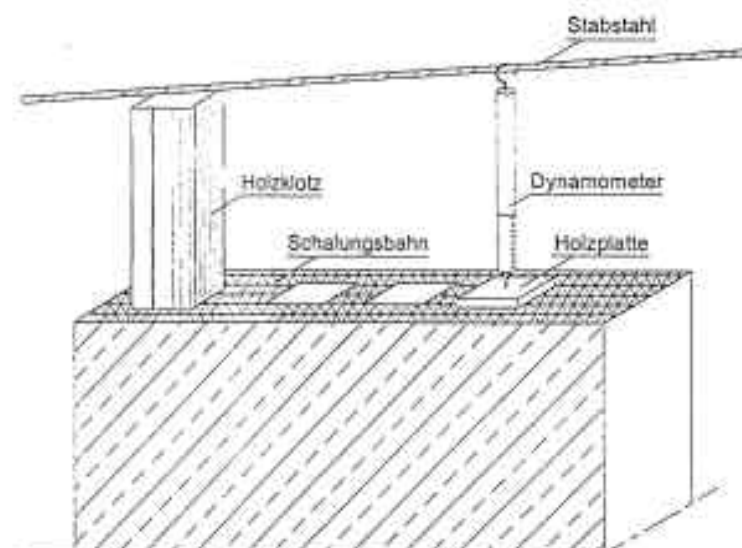
17.2 Haftzugwerte der SB am Beton

Da es in der Vergangenheit schon Probleme auf Baustellen gab, die Schalung mit SB zu entfernen, da sie zu fest am Beton haftete, sollte die Haftzugfestigkeit der SB an der Betonoberfläche festgestellt werden.

17.2.1 Versuchsbeschreibung

Die Versuche wurden am 14.04.2000, am neunten Tag, an der Stirnseite der Wand durchgeführt. Die Probewand wurde mit Hilfe eines Krans so hingestellt, dass die Stirnseite mit der SB nach oben zeigte. Die SB wurde vorher so auf die Stirnabschalung aufgebracht, dass man die Schalung leicht entfernen konnte, die SB aber auf dem Beton verblieb. Quadratische Platten aus 12 mm dickem Sperrholz mit einer Kantenlänge von 15 cm und 12 cm wurden hergestellt. Ein Haken wurde zentrisch auf der Platte befestigt. Danach wurde sie mit starkem doppelseitigem Klebeband belegt und auf die SB der Stirnseite geklebt. Mit einem scharfen Teppichmesser wurden die Konturen des Brettchens aus der SB ausgeschnitten. Mit einem Dynamometer bis 50 N und einer Ablesegenauigkeit von 2 N wurde das Brettchen mit der SB abgezogen und die Kraft abgelesen. Die ersten Abziehversuche wurden mit Hilfe des Kranes im langsamen Gang gemacht, um eine gleichmäßige Geschwindigkeit sicherzustellen. Allerdings war auch der langsame Gang immer noch so schnell, dass problematisch war die Kraft abzulesen.

Daher überlegten wir uns den in **Abbildung 17** dargestellten Aufbau. Der Stabstahl wurde von Hand langsam mit möglichst gleichbleibender Geschwindigkeit angehoben, bis sich die SB löste.



Die meisten Werte wurden mit dem Brettchen mit 15 cm Kantenlänge ermittelt. Wenn die Maximalkraft des Dynamometers von 50 kN damit überschritten wurden, nahmen wir das Brettchen mit 12 cm Kantenlänge. Trotzdem überschritten dann einige Werte auch dann noch die 50 kN (Wand 4). Bei Wand 1 wurde eine Fischwaage bis 12 kg und einer Ablesegenauigkeit von 500 g zu Hilfe genommen als das Dynamometer nicht ausreichte. Anhand einer Kontrollmessung mit dem Dynamometer und der Fischwaage konnte festgestellt werden, dass die Waage eine gute Genauigkeit besaß.

17.2.2 Ergebnisse

Tabelle 11

Wand-Nr.	Fläche Stempel	Abstand von Unterkante	Zugfestigkeit
	A	a	β
	cm ²	cm	N/cm ²
1	225	10	0,16
	225	25	0,22
	225	40	0,13
	225	55	0,15
	225	76	0,36
i. M.	-	-	0,20
2	225	13	0,20
	225	29	0,20
	225	45	0,16
	225	60	0,14
	225	75	0,12
i. M.	-	-	0,16
3	225	20	0,19
	225	35	0,10
	225	61	0,10
	225	76	0,19
i. M.	-	-	0,14
4	225	11	0,22
	144	25	0,08
	225	40	0,22
	144	56	0,25
	144	75	0,35
i. M.	-	-	0,23

17.2.3 Auswertung

Durch das schnelle Zurückschnappen des Dynamometers ist die Ablesegenauigkeit etwas eingeschränkt. Daher wurde das Eigengewicht der Brettchen von 2,5 N und 1,6 N vernachlässigt.

Die Werte streuen naturgemäß sehr stark. Es wurden auch die Abstände von der Unterkante der Wand bis zur Mitte der Abzugvorrichtung festgehalten. Entgegen der Erwartung, dass mit steigendem Betonierdruck die Bahn fester am Beton haftet, lässt sich hier kein eindeutiger Trend feststellen.

Diese Werte lassen sich nicht einfach auf größere Flächen umrechnen, da der zentrische Zug beim Entschalen eher die Ausnahme darstellt. Normalerweise sollte die SB ja auch so auf die Schalelemente aufgespannt werden, dass sie sich getrennt von dem Beton entfernen lassen. Die SB sollte sowieso zur Nachbehandlung auf der Betonoberfläche verbleiben. Wenn die Schalungsbahn „umgeschlagen“, und dann so abgezogen wird, geht dies naturgemäß sehr viel leichter.

18 Festbetonprüfungen

18.1 Bestimmung der Festbetonrohddichte

Beton, der an Luft lagert, gibt im Laufe der Zeit einen Teil des nicht durch Hydratation gebundenen Wassers durch Verdunstung ab. Deshalb ist die Frischbetonrohddichte höher als die Festbetonrohddichte. Bis zum Erreichen des praktischen Feuchtegehaltes von etwa 5 Vol.-% verdunsten, von den in 1 m³ Beton vorhandenen 160 bis 200 l Wasser etwa, 50 bis 100 l. Dies entspricht einer Verringerung der Rohddichte um 0,05 bis 0,1 kg/dm³. Die Festbetonrohddichte im lufttrockenen Zustand liegt bei den üblichen Kiessandbetonen zwischen 2,1 und 2,4 kg/dm³. Werte unter 2,2 kg/dm³ lassen auf einen großen Porenraum schließen.

18.1.1 Versuchsbeschreibung

Nach 28 Tagen wurden an lufttrockenen Würfeln die Festbetonrohddichte ermittelt. Die Würfel wurden bis dahin nach Norm bis zum 7. Tag im Wasser und danach im Normalklima gelagert. In der Tabelle sind wieder die Mittelwerte angegeben.

18.1.2 Ergebnisse

Tabelle 12

Beton-Nr.	Rohddichte ρ_{Bfest}	Differenz zu ρ_{Bfrisch}	w/z-Wert
	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	-
1	2,343	0,05	0,6
2	2,361	0,055	0,58
3	2,345	0,046	0,5
4	2,374	0,033	0,5

18.1.3 Auswertung

Alle untersuchten Betone zeigen keine Auffälligkeiten. Die Differenz der Festbetonrohddichte zur Frischbetonrohddichte ist umso geringer, je geringer der w/z-Wert ist.

18.2 Druckfestigkeit der Würfel 150 mm Kantenlänge

18.2.1 Versuchsbeschreibung

Die Druckfestigkeitsprüfung wurde gemäß DIN 1048 Teil 5 nach 28 Tagen vorgenommen. Die Würfel lagerten bis zum siebten Tag unter Wasser und bis zum Prüftermin im Labor der Fachhochschule Stuttgart im Normalklima.

Pro Betonsorte wurde je eine Serie von drei Würfeln hergestellt. Die ermittelten Werte wurden auf die Druckfestigkeit von Würfeln mit 200 mm Kantenlänge umgerechnet. Nach DIN 1045 Abschnitt 7.4.3.5.3 darf die Beziehung $\beta_{W200} = 0,95 \cdot \beta_{W150}$ verwendet werden. In der Tabelle sind die gemittelten Werte einer Serie von jeweils drei Würfeln dargestellt. Alle Einzelwerte und die Last-Verformungsdiagramme können im Anhang Kapitel I S. 94 – 103 nachgeschlagen werden.

Tabelle 13 Würfeldruckfestigkeit

Beton-Nr.	1	2	3	4
	B 25	B 35	B 45	B 35
Masse m [kg]	7,908	7,967	7,915	8,012
Dicke a [mm]	150,00	150,00	150,00	150,00
Breite b [mm]	150,00	150,00	150,00	150,00
Höhe h [mm]	150,00	150,00	150,00	150,00
Rohdichte [kg/m ³]	2343,11	2360,69	2345,19	2373,83
max. F [kN]	917,37	957,17	1114,70	962,93
β_{D150} [N/mm ²]	40,80	42,57	49,53	42,80
β_{D200} [N/mm ²]	38,76	40,44	47,06	40,66
geforderte Serienfestigkeit β_{D200} nach DIN 1045	30,00	40,00	50,00	40,00

18.2.2 Beurteilung

Außer Beton Nr. 3 erreichen alle Betone die in DIN 1045 geforderten Nenn- und Serienfestigkeiten. Beton Nr. 3 entspricht somit nur der Festigkeitsklasse B 35. Beton Nr. 2 und Nr. 4 erfüllen die Anforderungen nur sehr knapp. Beton Nr. 1 erfüllt die Anforderung sehr gut. Die Nennfestigkeiten der einzelnen Würfel sind im Anhang einzusehen.

18.3 Druckfestigkeit von Bohrkernen

Diese Prüfung wurde außerhalb der Norm vorgenommen. Die ermittelten Werte dienen dem Vergleich zu den Würfeldruckfestigkeiten, die nach Norm hergestellt wurden. Nach Schäffler, Bruy und Schelling [34], können Druckfestigkeiten von Bohrkernen mit $h = d = 100$ mm mit denen an den Würfeln ermittelten Wert β_{d200} ungefähr gleichgesetzt werden.

18.3.1 Versuchsbeschreibung

Pro Wand wurden je zwei Bohrkern mit dem Durchmesser 100 mm entnommen und ein Mittelstück von ca. 100 mm Höhe herausgeschnitten. Die Flächen wurden vor der Prüfung mit einem Nassschleifgerät planparallel abgeschliffen. Die Prüfung wurde nach 33 Tagen durchgeführt. Die Bohrkern wurden nach 12 bis 15 Tagen entnommen und lagerten anschließend in der Fachhochschule für Technik im Normklima. Die ermittelten Druckfestigkeiten, Abmessungen und Rohdichten sind in der folgenden Tabelle auf der nächsten Seite dargestellt. Alle Werte und die Last-Verformungsdiagramme sind im Anhang Kapitel I S. 97 - 99 aufgeführt.

18.3.2 Ergebnisse

Tabelle 14 Druckfestigkeiten der Bohrkern

Wand-Nr.	1		2		3		4	
Bohrkern	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2
Höhe h [mm]	104,20	103,00	104,00	103,60	105,10	103,70	104,50	105,20
Durchmesser d [mm]	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1
A [mm ²]	7713	7713	7713	7713	7713	7713	7713	7713
Gewicht M [kg]	1,924	1,892	1,909	1,899	1,933	1,911	1,940	1,951
Rohdichte [kg/m ³]	2394	2381	2380	2376	2384	2389	2407	2404
Kraft F [kN]	344,3	320,3	312,5	333,0	427,8	393,9	403,4	416,7
Druckfestigkeit f_{cc} [N/mm ²]	44,64	41,53	40,51	43,17	55,46	51,07	52,30	54,02
Mittelwert Druckfestigkeit f_{cc} [N/mm ²]	43,09		41,84		53,26		53,16	
Verhältnis zur Würfeldruckfestigkeit f_{cc} / β_{D200}	1,11		1,03		1,13		1,31	

Die Lastverformungsdiagramme sind im Anhang auf den Seiten 98 – 99 aufgeführt.

18.3.3 Beurteilung

Eine Beurteilung dieser Werte ist sehr schwierig, da kein eindeutiger Zusammenhang mit den Druckfestigkeitswerten ermittelt werden konnte und die Anzahl der Probekörper zu gering ist, um ein eindeutiges Druckfestigkeitsverhältnis zwischen Bohrkernen und den Würfeln festzulegen. Auffällig ist aber trotzdem der sehr große Unterschied des Beton Nr. 4 im Verhältnis zu der Würfeldruckfestigkeit.

Nach DIN 1045 Absatz 7.4.3.5.3 sind mindestens 6 Vergleichskörper je Probekörperart notwendig, um auf ein Druckfestigkeitsverhältnis zu β_{D200} schließen zu können.

18.4 Festigkeitsprüfung mit dem Rückprallhammer

Die Festigkeitsprüfung mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt beruht auf folgendem Prinzip. Ein Schlagbolzen wird mittels Federkraft beschleunigt, schlägt mit dem abgerundeten vorderen Ende auf die Betonoberfläche auf und prallt anschließend wieder zurück. Die Rückprallstrecke ist umso größer, je größer der Elastizitätsmodul des Betons ist, d. h. je weniger Energie von der plastischen Verformung absorbiert wird. Die Druckfestigkeit steht also nur in mittelbarem Zusammenhang zur Rückprallstrecke, da Beton ein unterschiedliches E-Modul bei gleicher Festigkeit haben kann. Außerdem hängt die Rückprallstrecke auch von Parametern wie z. B. der Querschnittsabmessung, den Einspannungsbedingungen und den Belastungsverhältnissen ab.

18.4.1 Versuchsbeschreibung

Es wurden Festigkeitsprüfungen mit dem Schmidthammer nach E. Schmidt DIN 1048 Teil 2 nach 9 und nach 28 Tagen vorgenommen. Die Prüfungen wurden an den Stirnseiten der Wände durchgeführt, um ein Schwingen der Wand weitgehend auszuschließen. Es wurden jeweils 5 Schläge an der Unterkante, in der Mitte und an der Oberkante gemacht. In das Diagramm wurden die jeweils gemittelten Ergebnisse eingetragen. Alle ermittelten Einzelwerte können im Anhang Kapitel I S. 100 - 103 eingesehen werden.

Das Diagramm ist folgendermaßen zu lesen:

- Jede Wand hat ihre jeweilige Farbe.
- Die schraffierten Balken zeigen die Werte ohne SB.
- Zusätzlich ist die Wandnummer ohne SB mit einem x gekennzeichnet.
- Die einfarbigen Balken zeigen die Werte der mit SB hergestellten Fläche.

18.4.2 Ergebnisse

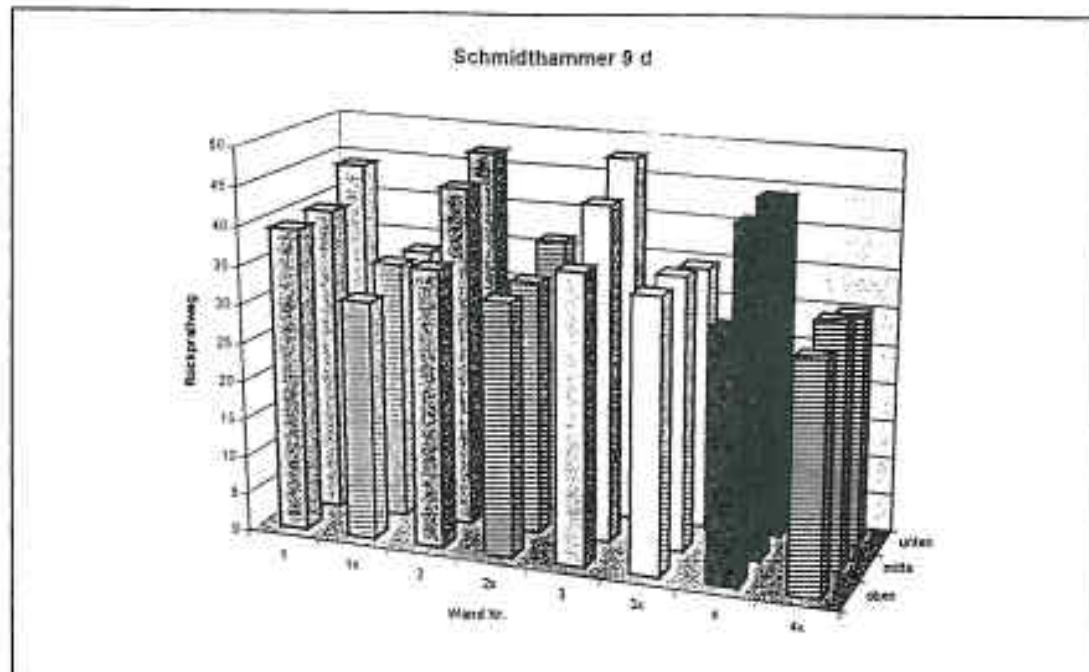


Diagramm 1 Ergebnisse der Festigkeitsprüfung mit dem Schmidthammer nach 9 Tagen

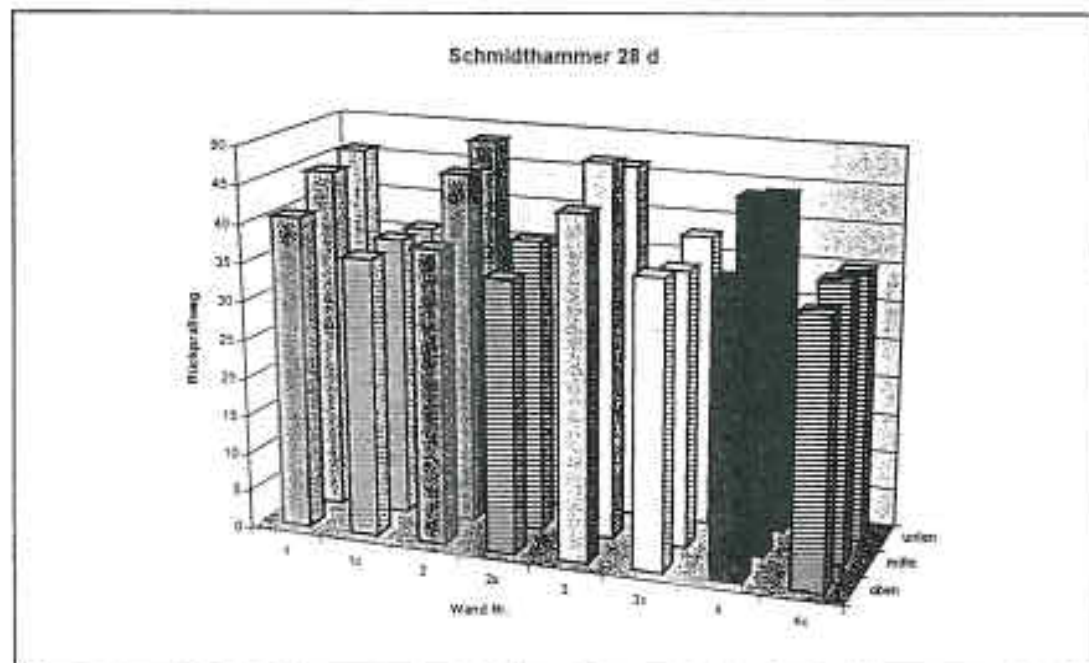


Diagramm 2 Ergebnisse der Festigkeitsprüfung mit dem Schmidthammer nach 28 Tagen

18.4.3 Auswertung

Gemäß DIN 1048 Teil 2, Abschnitt 5.3 darf Beton im Alter von 28 bis 90 Tagen für den Tragfähigkeitsnachweis, nach folgender Tabelle, einer Festigkeitsklasse nach DIN 1045 gleichgesetzt werden.

Tabelle 15

Vergleichbare Betonfestigkeits- klasse	Mindestwert für jede Messstelle R_m Skalenteile	Mindestwert für jeden Prüfbereich $\bar{R}_m$ Skalenteile
B10	26	30
B15	30	33
B25	35	38
B35	40	43
B45	44	47
B55	48	51

Diese Tabelle kommt aber nur bei fehlender Würfeldruckfestigkeitsprüfung zur Anwendung, da die Werte weit im sicheren Bereich liegen, weil sie sehr stark streuen können.

Folgendes lässt sich aus den Diagrammen ablesen:

- Die mit der SB hergestellte Seite besitzt unabhängig von der Schlagstelle eine um ca. 10 Skalenteile höhere Festigkeit, als die Seite ohne SB. Dies entspricht ca. zwei Festigkeitsklassen.
- Die Verbesserung der Festigkeit ist umso größer, je weiter unten die Schlagstelle, d. h. je höher der Betonierdruck war.
- Auf der Seite, die ohne SB hergestellt wurde, hat der Betonierdruck so gut wie keinen Einfluss auf die Festigkeit.
- An der unteren Schlagstelle sind die Rückprallwerte nach 9 und nach 28 Tagen nahezu gleich.
- Diese Beobachtungen gelten für alle Wände unabhängig von der Betonsorte.



18.5 Wasserundurchlässigkeit

Es wurden Versuche mit normgerecht hergestellten WU-Platten und mit in der Mitte gespaltenen Bohrkernen durchgeführt.

18.5.1 WU-Versuch mit normgerecht hergestellten Platten

Um eine Aussage über die Qualität des Betons in bezug auf die Wasserundurchlässigkeit treffen zu können, wurden normgerechte Probekörper hergestellt.

18.5.1.1 Versuchsbeschreibung

Da nur 10 Formen zur Verfügung standen, wurden 10 WU-Platten nach DIN 1048 Teil 5 hergestellt. Von Beton Nr. 1, 2 und 4 jeweils drei Platten und von Beton Nr. 3 nur eine Platte.

Nach einem Tag wurden die WU-Platten ausgeschalt, und auf der dem Wasserdruck auszusetzenden Seite wurde mit einer Drahtbürste mittig eine Kreisfläche mit 100 mm Durchmesser aufgeraut. Die Platten wurden bis zum Prüftermin nach 28 Tagen unter Wasser gelagert.

Die Probekörper wurden drei Tage lang einem Druck von $0,5 \text{ N/mm}^2$ (= 5 bar) ausgesetzt.

Nach DIN 1045 Abschnitt 6.5.7.2 muss wasserundurchlässiger Beton mit einer Dicke von 10 bis 40 cm so dicht sein, dass die Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Probekörpern) 50 mm nicht überschreitet. Dieser Wert wurde von allen WU-Platten weit unterschritten.

Die maximalen Wassereindringtiefen aller WU-Platten sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Alle Einzelwerte und die Profile der Wassereindringungen sind im Anhang Kapitel II S. 104 - 106 aufgeführt.

18.5.1.2 Ergebnisse

Tabelle 16 Wassereindringtiefen der WU-Platten

Beton-Nr.	Probekörper-Nr.	Wassereindringtiefe [mm]
1	1.1	13
	1.2	8
	1.3	15
	Mittelwert	12
2	2.1	0
	2.2	7
	2.3	14
	Mittelwert	7
3	3.1	5
	Mittelwert	5
4	4.1	7
	4.2	15
	4.3	17
	Mittelwert	13

18.5.1.3 Beurteilung

Die gemessenen Eindringtiefen unterschreiten die 50 mm, die von der DIN 1045 vorgegeben ist. Alle getesteten Betonsorten werden vom Betonwerk als WU-Beton bezeichnet. Dies konnte durch den Versuch bestätigt werden.

18.5.2 WU-Versuch mit Bohrkernen

18.5.2.1 Versuchsbeschreibung

Es wurden acht Probekörper hergestellt. Jeweils ein Bohrkern pro Wand mit einem Durchmesser von 150 mm wurde in der Mitte so durchgeschnitten, dass zwei Zylinder mit ca. 12 cm Höhe entstanden, ein Probekörper mit „SB-Oberfläche“ und ein Probekörper mit herkömmlicher Oberfläche. Die Bohrkern wurden den selben Prüfbedingungen unterzogen, wie die WU-Platten aus dem vorhergehenden Versuch.

Die Bohrkern wurden zwischen dem 12. und 15. Tag aus der Wand entnommen und bis zum Prüftermin am 31. Tag bei Normalklima in der Fachhochschule Stuttgart gelagert.

18.5.2.2 Ergebnisse

Tabelle 17 Wassereindringtiefen der Bohrkern

Wand-Nr.	Wasser- eindringtiefe mit SB [mm]	Wasser- eindringtiefe ohne SB [mm]	Verbesserung in %
1	20	104	520,00%
2	12	65	541,67%
3	6	45	750,00%
4	20	30	150,00%

18.5.2.3 Beurteilung

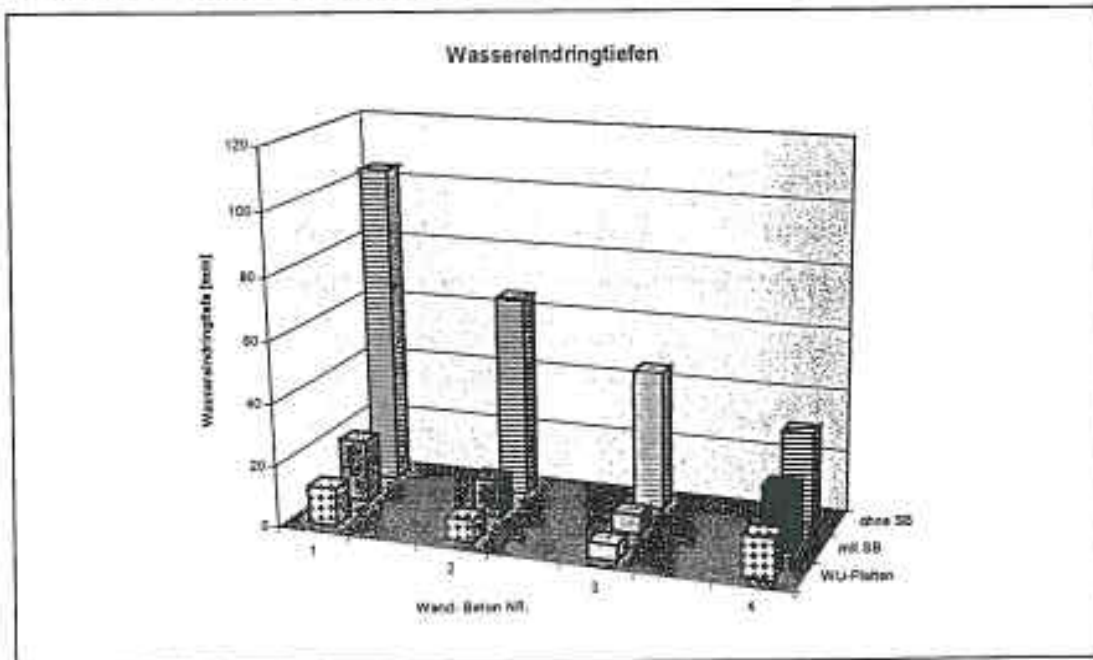
Bei dieser Prüfung wird sehr deutlich, wie sehr sich die Kapillarporen durch den Einsatz der SB reduzieren, denn die Wassereindringtiefe hängt ausschließlich mit dem Kapillarporengehalt im Zementstein zusammen (siehe auch Abbildung 3 S. 7). Der Einsatz der SB kann die Wassereindringtiefen bei den Betonsorten Nr. 1 bis 3 um mehr als das fünffache reduzieren. Bei Beton Nr. 4 der mit Hochofenzement hergestellt wurde, ist die Verbesserung nicht so stark, da Hochofenzement schon von sich aus ein dichteres Gefüge besitzt. Trotz der Tatsache, dass die Probekörper an der Luft gelagert waren, zeigen die mit der SB hergestellten Flächen ähnlich geringe Eindringtiefen wie die WU-Platten, die unter Wasser lagerten. Das nachfolgende Diagramm stellt alle Ergebnisse zusammen.

18.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aller WU-Prüfungen

Das Diagramm ist folgendermaßen zu lesen:

- Jede Wand hat ihre jeweilige Farbe.
- Die schraffierten Balken zeigen die Werte ohne SB.
- Die einfarbigen Balken zeigen die Werte der mit SB hergestellten Fläche.
- die Balken mit Rauten zeigen die Werte der WU-Platten

Diagramm 3 Wassereindringtiefen aller Probekörper im Vergleich



18.6 Verschleißprüfung nach Böhme

18.6.1 Versuchsbeschreibung

Ein Betonwürfel mit ca. 71 mm Kantenlänge wird einer Beanspruchung durch Schleifen ausgesetzt. Der Abrieb wird als Dicken- und Volumenverlust bestimmt.

Von jeder Wand wurde jeweils ein Würfel pro Seite aus einem 150er Bohrkern herausgeschnitten. Es wurden also insgesamt acht Würfel hergestellt. Vor der Prüfung wurden sie bei 105 °C bis zur Massenkonzanz getrocknet. Die jeweilige Oberfläche jeden Würfels, einmal mit und einmal ohne SB hergestellt, wurden nach DIN 52108 geprüft.

Die Prüfungen wurden ohne Vorschleifen durchgeführt. Die Dickenverluste wurden auf 1/1000 mm mit einer Messuhr an neun Messstellen sowie die Gewichtsverluste auf 1/10 Gramm genau bestimmt. Gemäß DIN-Vorschrift wurden vier Prüfzyklen mit je 88 Umdrehungen durchgeführt, wobei nach jeweils 22 Umdrehungen der Prüfkörper um 90 Grad gedreht wurde und der Normschmirgel ersetzt wurde.

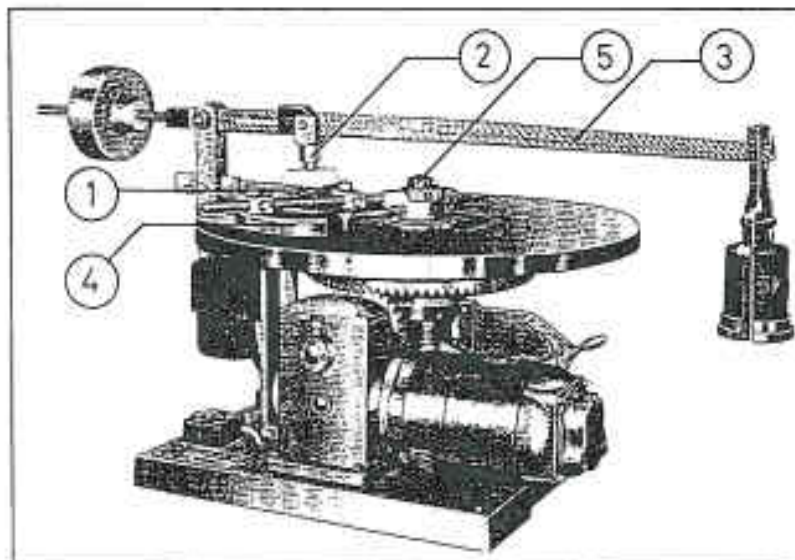


Abbildung 18 zeigt ein Verschleißprüfgerät nach Böhme (DIN 52108)

- 1) Haltevorrichtung für den Prüfkörper
- 2) Druckstück
- 3) Waagebalken
- 4) Bürsten zur Rückführung des Normschmirgels
- 5) Hauptachse

18.6.2 Rechnungen

Die Werte wurden folgendermaßen ermittelt:

Die jeweils neun Messwerte des Dickenverlusts wurden gemittelt. Um einen noch besseren Vergleich der einzelnen Werte zu bekommen, wurden sie auf 50 cm² bezogen. Wegen der geringen Abweichungen der Probestfläche von 50 cm² werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Schleifverlust verhält sich umgekehrt proportional zur Flächengröße.
- Daraus folgt dass der Volumenverlust unabhängig von der Größe der Prüf-
fläche ist.

$\Delta l'$ = Gemessener Dickenverlust

Δl = Dickenverlust auf 50 cm² bezogen

$\Delta m'$ = Gemessener Gewichtsverlust

Δm = Gewichtsverlust auf 50 cm² bezogen

$\Delta V'$ = Volumenverlust

ΔV = Volumenverlust auf 50 cm² bezogen

$$\Delta l' = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \dots + \Delta l_9}{9}$$

$$\Delta l = \Delta l' \times \frac{A}{50 \text{ cm}^2}$$

$$\Delta m = \Delta m' \times \frac{A}{50 \text{ cm}^2}$$

$$\Delta V' = \Delta V = \Delta l' \times A = \Delta l \times 50 \text{ cm}^3$$

Die Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die Tabelle mit allen gemessenen Einzelwerten sind im Anhang Kapitel III S. 107 - 112 aufgeführt.

18.6.3 Ergebnisse

Die Probekörper mit der Oberfläche, die ohne SB hergestellt wurden, sind mit einem x gekennzeichnet. Diese Kennzeichnung wird im folgenden bei allen Probekörpern angewendet.

Tabelle 18 Verschleißprüfung nach Böhme

Probe-Nr.	Fläche	Roh- dichte	Masse		Schleifverschleiß auf 50 cm ² bezogen			Ver- gleich
			vor Prü- fung	nach Prü- fung	Δm	Δl	ΔV	
	mm ²	kg/dm ³	g	g	g	mm	cm ³	%
1x	4980	2,25	784,3	745,8	38,3	3,63	18,161	100%
1	4928	2,27	772,2	743,5	28,3	2,59	12,926	71%
2x	4719	2,25	746,4	702,8	41,2	4,11	20,542	100%
2	5048	2,26	797,7	776,5	21,4	1,90	9,494	46%
3x	5009	2,24	782,2	750,1	32,2	2,98	14,919	100%
3	4886	2,28	767,9	739,1	28,1	2,51	12,572	84%
4x	5184	2,28	821,6	774,4	48,9	4,27	21,371	100%
4	5104	2,32	820,6	797,7	23,4	2,01	10,031	47%

Die folgenden Diagramme veranschaulichen die ermittelten Werte und sind folgendermaßen zu lesen:

- Jede Wand hat ihre jeweilige Farbe.
- Die schraffierten Balken zeigen die Werte ohne SB.
Zusätzlich ist die Wand-Nr. mit einem x gekennzeichnet.
- Die einfarbigen Balken zeigen die Werte der mit SB hergestellten Fläche.

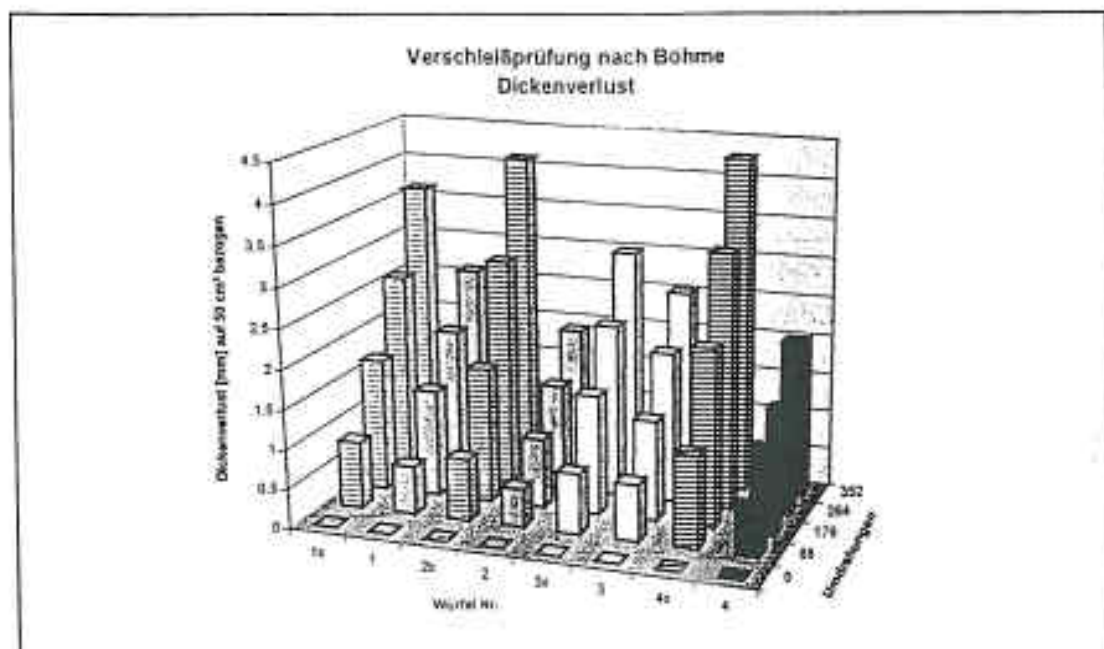


Diagramm 4 Dickenverlust der Böhmewürfel

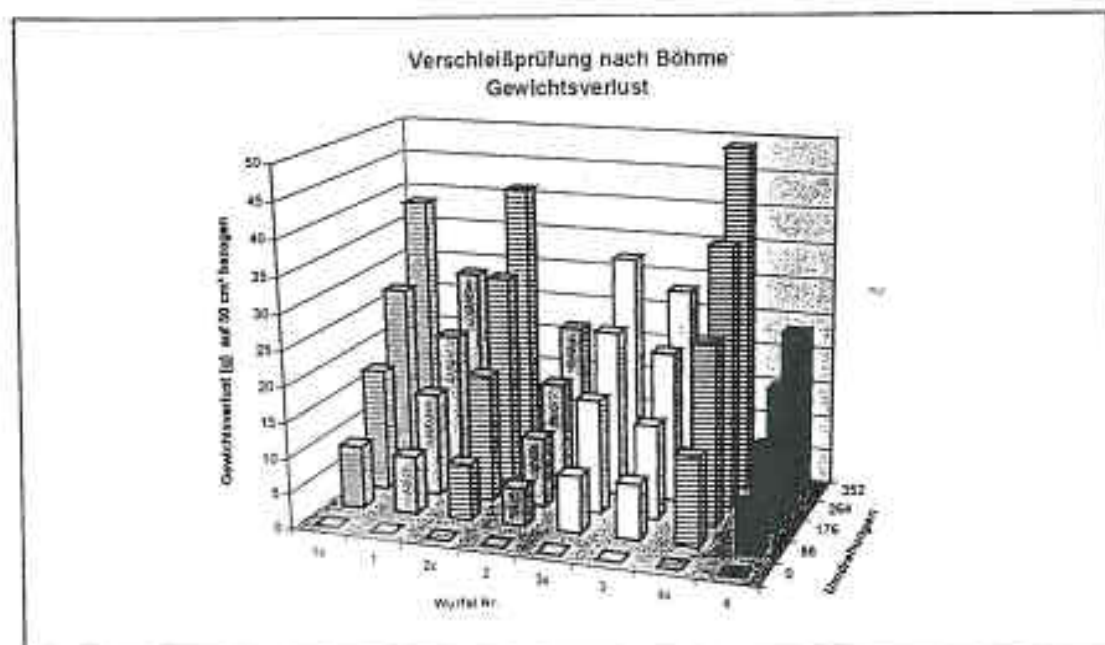


Diagramm 5 Gewichtsverlust der Böhmewürfel

18.6.4 Beurteilung

In DIN 18500 werden die Anforderungen an Betonwerkstein, der einer schleifenden Beanspruchung ausgesetzt ist folgendermaßen definiert:

Härte- klasse	Volumenverlust		Dickenverlust	
	bei Prüfung nach DIN 52108			
	Mittel- wert max.	Einzel- wert max.	Mittel- wert max.	Einzel- wert max.
	cm ³ 50 cm ²		mm	
I	15	18	3	3,6
II	26	30	5,2	6

Tabelle 19 Anforderung an den Schleifverschleiß nach DIN 18500

Die absoluten Werte und die prozentualen Verbesserungen mit verschiedenen Betonsorten schwanken stark, obwohl alle Betone mit dem selben Zuschlag und am gleichen Tag hergestellt wurden. Der absolute Gehalt an Zuschlag unterscheidet sich nur geringfügig untereinander (siehe Tabelle 4 S. 39). Es lässt sich auch anhand der Werte kein Zusammenhang zwischen Verschleiß und der Zuschlagsmenge oder der Betonfestigkeitsklasse darstellen. Der Einfluss des Zuschlags auf den Verschleißwiderstand könnte also nur durch die zufällige Verteilung an der Oberfläche gegeben sein.

Eine Verbesserung des Verschleißwiderstandes wurde in allen Fällen erreicht. Alle Oberflächen, die ohne die SB hergestellt wurden, erreichen nach DIN 18500 die Härteklasse II; Beton Nr. 3 erreicht sogar knapp Härteklasse I. Alle Oberflächen, die mit der SB hergestellt wurden erreichen die Härteklasse I.

18.7 Oberflächenzugfestigkeit

Die Qualität und Dauerhaftigkeit von aufgetragenen Beschichtungen hängt ganz entscheidend von der Qualität des Untergrundes ab (vgl. Kapitel 6.3). Ein entscheidendes Merkmal für die Qualität ist die Oberflächenzugfestigkeit.

18.7.1 Versuchsbeschreibung

Ein Prüfstempel wird mit einem schnellhärtenden Reaktionsharzkleber auf die Betonoberfläche geklebt und mit einer Zugvorrichtung abgerissen. Die Oberflächenzugfestigkeit errechnet sich aus der auf die Stempelfläche bezogene Höchstkraft und wird in N/mm^2 angegeben. Die Prüfvorschrift ist in DIN 1048 Teil 2 beschrieben. In diesem Fall wurde ein Haftzug-Gerät der Firma Herion benutzt, dessen Prüfstempel kreisförmig war und einen Durchmesser von 50 mm besaß. Die Last wurde mit 100 N/s gesteigert. Es wurde keine Nut in den Beton vorgebohrt. Die Versuche wurden am 28. Tag durchgeführt. Zwei Tage vor dem Versuch wurden die Wandflächen mit einem haushaltsüblichen Hochdruckstrahler von dem Bohrmehl der vorhergehenden Kernbohrungen befreit und trockneten bis zur Prüfung, bei Lufttemperaturen von über 20°C , wieder vollkommen ab.

18.7.2 Rechnungen

$$\beta_{\text{OZ}} = \frac{4 \times F}{\pi \times d_s^2} \quad \text{in } \text{N/mm}^2$$

Das Ergebnis wird auf $0,1 \text{ N/mm}^2$ gerundet.

18.7.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in den folgenden Tabellen und Diagrammen dargestellt. Da die Haftzugwerte ohne Vorbohren einer Nut ermittelt worden sind, ist die Ausbruchfläche bei jedem Versuch unterschiedlich. Die Profile der Ausbrüche wurden auf Transparentpapier auf der Baustelle direkt von der Wand durchgepaust und anschließend die Flächen mit einem Polarplanimeter auf 10 mm² genau bestimmt. Auf den folgenden drei Seiten wird die maximal erreichte Kraft einmal

- auf die Stempelfläche,
- auf die Ausbruchfläche des Betons
- und auf die Gesamtfläche von Beton und Adhäsionsbruchfläche (Fläche, an der die Klebefuge an der Grenzfläche Kleber / Beton gebrochen ist)

bezogen.

Ein Kohäsionsbruch (Bruch innerhalb der Klebefuge) trat nicht auf.

Das Diagramm ist folgendermaßen zu lesen:

- Jede Wand hat ihre jeweilige Farbe.
- Die schraffierten Balken zeigen die Werte ohne SB.
- die einfarbigen Balken zeigen die Werte der mit SB hergestellten Fläche.

Tabelle 20 Oberflächenzugfestigkeit auf die Stempelfläche bezogen

Probe-Nr.	Fläche	Oberflächen- zugfestigkeit mit SB	Oberflächen- zugfestigkeit ohne SB	Kommentar mit SB / ohne SB	Vergleich
	mm ²	N/mm ²	N/mm ²	B K A	%
1	1963	3,2	2,3	AB / AB	
2	1963	2,9	2,5	AB / AB	
3	1963	2,2	2,4	AB / AB	
Mittelwert	1963	2,8	2,4	-	116%
4	1963	3,5	2,0	AB / AB	
5	1963	4,6	2,4	AB / AB	
6	1963	3,9	1,6	AB / A	
Mittelwert	1963	4,0	2,0	-	200%
7	1963	3,2	1,5	AB / AB	
8	1963	4,1	3,3	AB / AB	
9	1963	4,8	4,0	B / B	
Mittelwert	1963	4,0	3,0	-	135%
10	1963	4,5	0,9	AB / B	
11	1963	4,1	0,5	AB / AB	
12	1963	4,5	0,9	AB / B	
Mittelwert	1963	4,4	0,8	-	575%

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

B = Bruch im Beton

K = Bruch innerhalb des Klebers (Kohäsionsbruch)

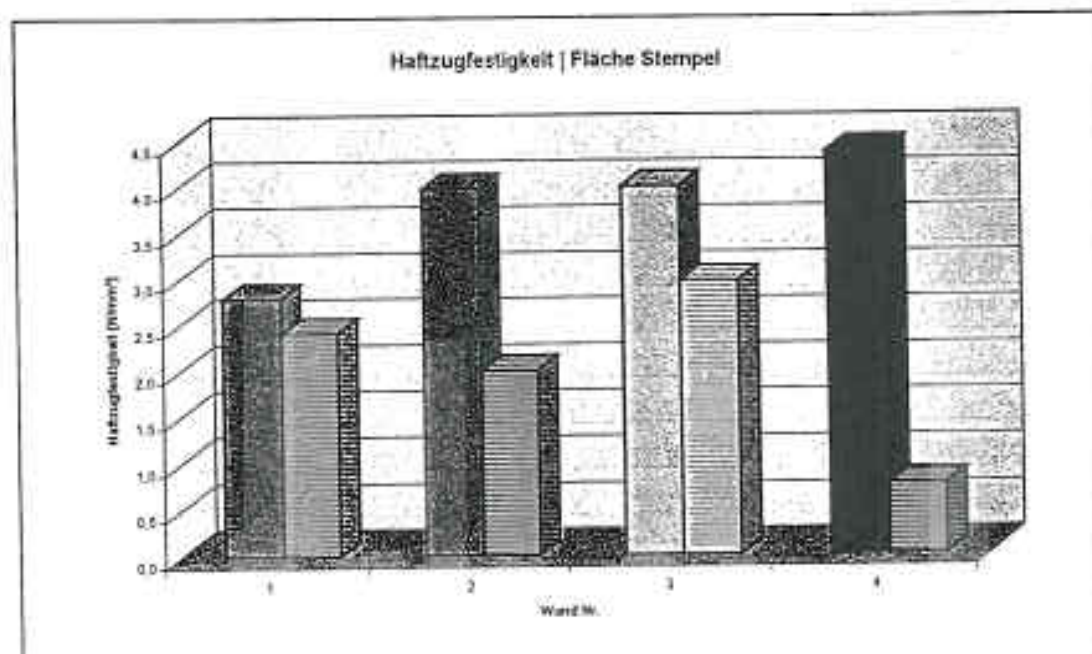


Diagramm 6 Haftzugfestigkeit auf die Stempelfläche bezogen

Tabelle 21 Oberflächenzugfestigkeit auf die Betonausbruchfläche bezogen

Probe-Nr.	Fläche Seite mit SB	Fläche Seite ohne SB	Oberflächen- zugfestigkeit mit SB	Oberflächen- zugfestigkeit ohne SB	Vergleich
	mm ²	mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
1	1460	1270	4,4	3,5	
2	120	1710	48,08 n. g.	2,9	
3	750	1720	5,7	2,8	
Mittelwert	777	1567	5,1	3,1	165%
4	1440	750	4,7	5,1	
5	1810	1770	5,0	2,7	
6	1280	0	6,0	0,0	
Mittelwert	1510	840	5,2	2,6	202%
7	1610	1070	3,9	2,8	
8	1130	2710	7,1	2,4	
9	1960	2510	4,8	3,2	
Mittelwert	1567	2097	5,2	2,8	187%
10	1500	2070	5,9	0,9	
11	1940	550	4,2	1,7	
12	2320	2010	3,8	0,9	
Mittelwert	1920	1543	4,6	1,1	404%

n. g. nicht gewertet da fast nur Kohäsionsbruch

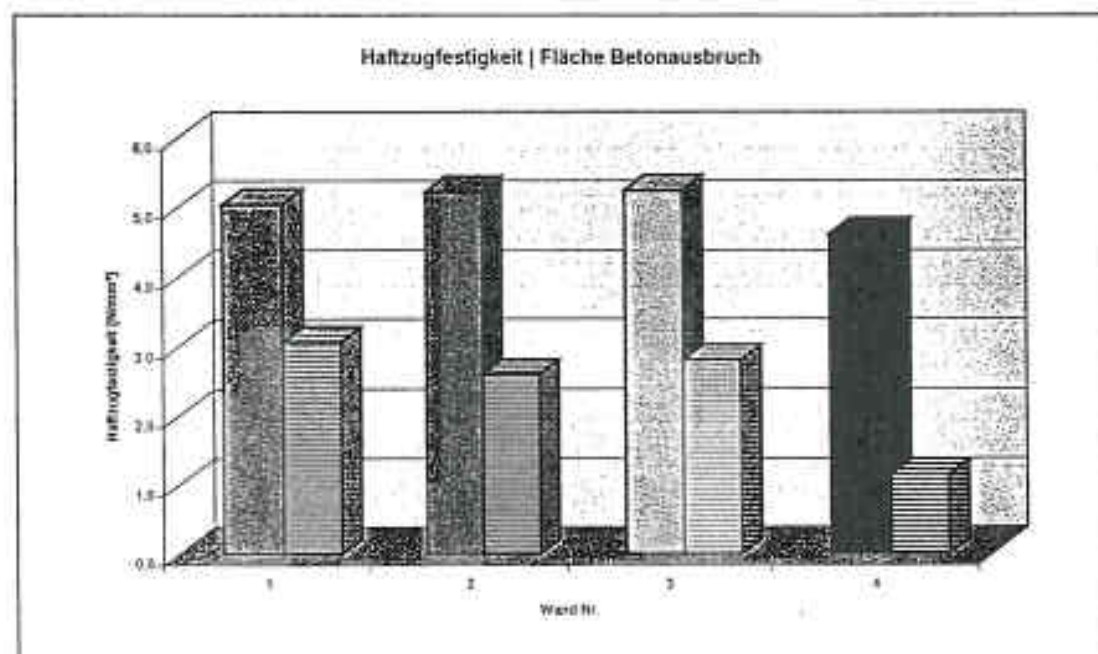


Diagramm 7 Oberflächenzugfestigkeit auf die Betonausbruchfläche bezogen

Tabelle 22 Oberflächenzugfestigkeit auf die Gesamtfläche von Adhäsionsbruch und Betonbruchfläche bezogen

Probe-Nr.	Fläche Seite mit SB	Fläche Seite ohne SB	Oberflächen- zugfestigkeit mit SB	Oberflächen- zugfestigkeit ohne SB	Vergleich
	mm ²	mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
1	2360	1960	2,7	2,3	
2	1970	2280	2,9	2,2	
3	1960	2030	2,2	2,4	
Mittelwert	2097	2090	2,6	2,3	115%
4	2060	1963	3,3	2,0	
5	2150	2150	4,2	2,2	
6	2210	1963	3,4	1,6	
Mittelwert	2140	2025	3,7	1,9	190%
7	2130	1960	2,9	1,5	
8	1960	2780	4,1	2,3	
9	1960	2510	4,8	3,2	
Mittelwert	2017	2417	3,9	2,4	167%
10	2880	2070	3,1	0,9	
11	2440	1960	3,3	0,5	
12	4640	2010	1,9	0,9	
Mittelwert	3320	2013	2,8	0,7	374%

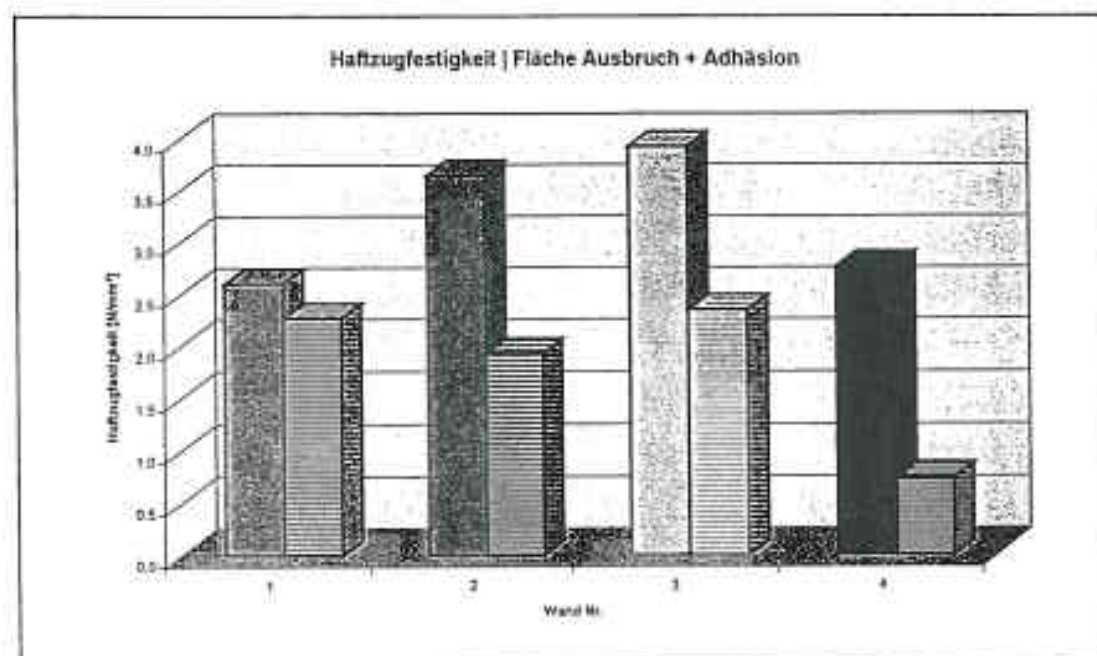


Diagramm 8 Oberflächenzugfestigkeit auf die Gesamtfläche von Adhäsionsbruch und Betonbruchfläche bezogen



18.7.4 Beurteilung

Bei allen Betonsorten tritt eine deutliche Verbesserung der Haftzugfestigkeiten auf. Die erzielten Verbesserungen streuen sehr stark zwischen den unterschiedlichen Betonwerten. Auffällig ist die sehr große Erhöhung der Haftzugfestigkeit bei Wand-Nr. 4, die mit HOZ-Beton hergestellt wurde. Die Verfünffachung des Haftzugwertes auf der Seite mit SB, liegt aber auch an den sehr geringen Haftzugwerten auf der Seite, die ohne SB hergestellt wurde. Absolut gesehen ist dieser Haftzugwert von Wand 4 auf der Seite, die mit SB hergestellt wurde, ähnlich den entsprechenden Werten der anderen Wände.

18.8 Kapillare Wasseraufnahme

Die kapillare Wasseraufnahme besagt wie viel Wasser von einem Probekörper gegen die Schwerkraft, ohne zusätzlich aufgebrachten Druck, von den Kapillarporen „aufgesaugt“ wird.

18.8.1 Versuchsbeschreibung

Von jeder Wand wurden jeweils zwei Bohrkern in drei Teile gesägt. Die beiden Endstücke haben eine Höhe von 65 mm und wurden für diesen Versuch genutzt. Der Mittelteil mit 100 mm Höhe wurde zur Druckfestigkeitsprüfung (siehe Kapitel 18.3) genutzt. Auf diese Weise wurden also 16 Probekörper hergestellt, jeweils zwei pro Wand und Oberfläche. Die Proben wurden 7 Tage lang bei 40 °C getrocknet, da nur das Wasser in den Kapillar- und den Luftporen ausgetrieben werden sollte. Das Wasser in den Gelporen verbleibt bei dieser Temperatur im Beton. Dies soll die Verhältnisse unter „realen“ Bedingungen widerspiegeln.

Nach der Trocknung wurden die Proben mit einem zweikomponentigen Epoxydharz an den Seitenflächen beschichtet. Die Beschichtung wurde auf einer Breite von 0,5 - 1,0 cm um die Kante herumgezogen, so dass von der zu testenden Oberfläche eine kreisförmige Fläche mit 8,5 cm Durchmesser übrig blieb. So wurde sichergestellt, dass das Wasser nur über die Betonoberflächen in den Beton eindringen konnte. Die Proben wurden mit der zu testenden Oberfläche nach unten auf Dreikantleisten in einen Kunststoffbehälter gestellt. Der Behälter wurde mit einer dreiprozentigen Salzlösung gefüllt, so dass die Probekörper ca. 5 mm im Wasser standen. Es wurde deshalb eine Salzlösung verwendet, um anschließend die Chlorideindringung (siehe Kapitel 18.9) an den Probekörpern zu bestimmen. Die Probekörper wurden vor dem Versuch und jeweils nach den Zeitintervallen 1,5 h, 3 h, 6 h, 12h, 1d, 2 d, 3d und 4d, gewogen.

18.8.2 Rechnungen

Die flächenbezogene kapillare Wasseraufnahme wird nach Heft 422 [57] mit der Formel:

$$W_{ak} = \frac{m_{wak} - m_{kd}}{A} \quad \text{berechnet.}$$

W_{ak} = Kapillare Wasseraufnahme

m_{wak} = Masse des Probekörpers nach Versuchsbeginn zu o. a. Zeiten

m_{kd} = Masse des Probekörpers vor Versuchsbeginn

A = Grundfläche der Probe

Die Grundfläche der Probekörper beträgt ca. $\frac{\pi \times 8,5^2}{4} = 56,75 \text{ cm}^2$

Der Wasseraufnahmekoeffizient ergibt sich aus der flächenbezogenen Wasseraufnahme w_{akt} bis zur Zeit t und der Zeit t .

$$w = \frac{W_{akt}}{\sqrt{t}}$$

Da sich nicht immer eine lineare Abhängigkeit zwischen Wasseraufnahme und der Quadratwurzel aus der Zeit ergibt, wird für Beton der Wasseraufnahmekoeffizient nach 24 Stunden berechnet.

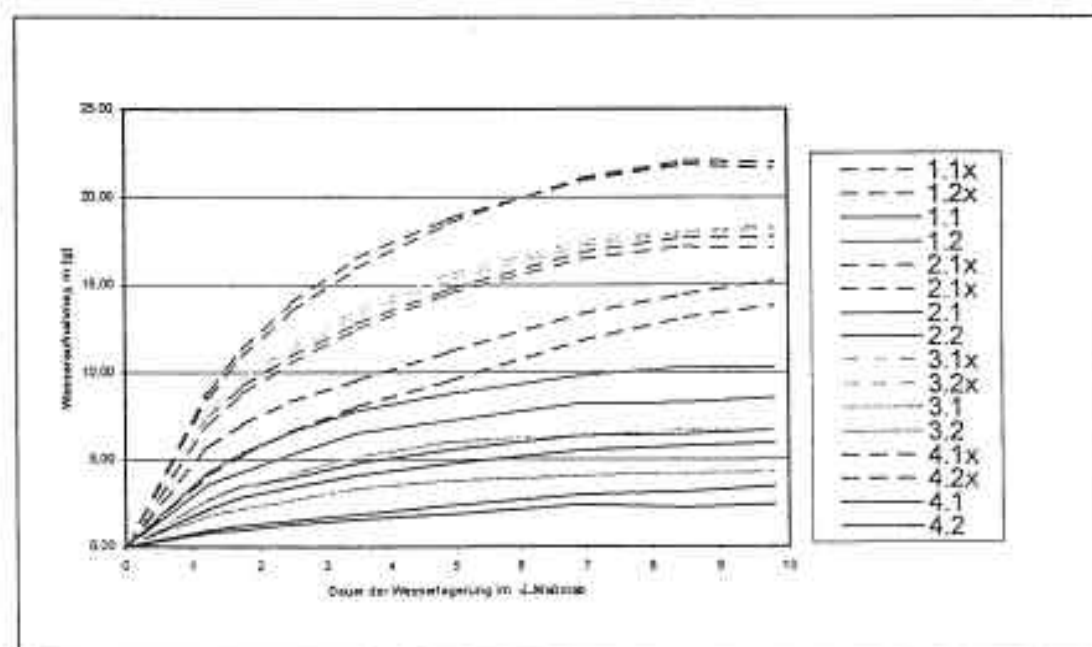
$$w_{24} = \frac{W_{ak24}}{\sqrt{24}}$$

18.8.3 Ergebnisse

Tabelle 23 Wasseraufnahme kapillare Wassereindringung absolut

Zeit	0 h	1,5 h	3 h	6 h	12 h	24 h	2 d	3 d	4 d
Zeit im $\sqrt{t}$ -Maßstab	0,00	1,22	1,73	2,45	3,46	4,90	6,93	8,49	9,80
1.1x	0,00	6,96	8,82	10,50	12,46	14,48	16,44	17,14	17,08
1.2x	0,00	7,44	9,22	10,88	12,78	14,72	16,82	17,68	17,74
1.1	0,00	3,56	4,30	5,30	6,54	7,24	8,24	8,28	8,56
1.2	0,00	4,28	5,44	6,56	7,82	8,78	9,82	10,30	10,26
2.1x	0,00	8,58	10,90	13,46	15,94	18,52	21,06	22,02	22,00
2.2x	0,00	8,88	11,30	13,94	16,52	18,76	20,92	21,82	21,64
2.1	0,00	2,18	2,88	3,44	4,12	4,78	5,56	5,80	5,98
2.2	0,00	2,70	3,50	3,98	4,82	5,58	6,42	6,48	6,74
3.1x	0,00	7,44	9,32	11,18	13,26	15,28	17,18	17,92	18,12
3.2x	0,00	7,66	9,56	11,46	13,56	15,60	17,48	18,00	18,34
3.1	0,00	2,70	3,46	4,22	5,18	6,02	6,46	6,72	6,74
3.2	0,00	1,80	2,20	2,68	3,36	3,78	4,08	4,24	4,28
4.1x	0,00	4,10	5,26	6,62	8,06	9,50	11,78	13,10	13,82
4.2x	0,00	5,72	7,04	8,34	9,54	11,16	13,32	14,44	15,24
4.1	0,00	0,96	1,22	1,50	1,86	2,36	3,00	3,16	3,48
4.2	0,00	0,80	0,98	1,30	1,58	1,86	2,42	2,28	2,44

Diagramm 9 Kapillare Wasseraufnahme aller Probekörper



18.8.4 Beurteilung

Aufgrund der geringen Höhe der Probekörper, war die kapillare Wasseraufnahme nach 4 Tagen nahezu abgeschlossen. Es war sehr deutlich zu erkennen, dass die Wasseraufnahme mit der SB auf mindestens die Hälfte, bei Beton Nr. 4 (HOZ-Beton) sogar auf $\frac{1}{4}$ gesenkt wurde. Im nachfolgenden Diagramm ist auch wieder deutlich zu erkennen, dass der HOZ-Beton weniger Kapillarporen besitzt, wie PZ-Betone. Die Wasseraufnahme verläuft nicht linear zur Quadratwurzel der Zeit. Daher sind die Wasseraufnahmekoeffizienten auch nicht konstant (siehe Tabelle 62 und Diagramm 23 S. 116). Nachfolgende Tabelle zeigt nur den Wasseraufnahmekoeffizient nach 24 h.

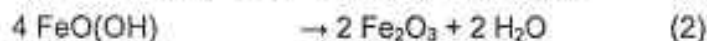
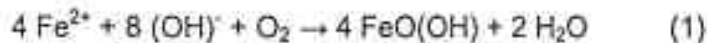
Probekörper	Wasseraufnahme- koeffizient w_{24}
1x	0,05
1	0,03
2x	0,07
2	0,02
3x	0,06
3	0,02
4x	0,04
4	0,01

Tabelle 24 Wasseraufnahmekoeffizient nach 24 Stunden = w_{24} (Mittelwerte der zwei Probekörper)

Alle Messwerte sind im Einzelnen im Anhang S. 113 – 116 aufgeführt.

18.9 Chlorideindringung

Chloride im Stahlbeton können den Korrosionsschutz des Betons aufheben, indem sie die Passivierung der Bewehrung abbauen. Unter den alkalischen Bedingungen des Frischbetons bildet sich an der Bewehrung eine Schutzschicht aus Eisenhydroxyden und -oxyden aus.



Der Fe-Oxydfilm ruft einen Ausgleich des elektrochemischen Potentials hervor. Dieser Zustand schützt den Stahl vor Oxydierung, trotz der Gegenwart von Wasser (Elektrolyt) und Sauerstoff (Oxydant). Freie Chloride in der Nähe des Stahls wirken in mehrfacher Hinsicht korrosionsfördernd. Sie durchdringen die Passivschicht und reagieren mit Eisen zu leichtlöslichen Eisenchloriden, die dann weiter zu Eisenhydroxyd unter Freisetzung der Chloridionen reagieren (Gleichung 3 und 4). Das heißt, die Chloridionen stehen für eine erneute Reaktion wieder zur Verfügung. Außerdem kann durch Hydrolyse von Eisenchlorid, Salzsäure entstehen (Gleichung 5), welche den Stahl zusätzlich angreift.



18.9.1 Kritischer Chloridgehalt

Für die Aufhebung des Korrosionsschutzes ist vorrangig das Verhältnis von $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$ -Ionen in der Porenlösung maßgebend. Als unbedenklich werden Werte bis 1,2 angesehen [41]. Für die baupraktische Anwendung wird der auf den Zement bezogene Chloridgehalt angegeben. Damit sind folgende Schwierigkeiten verbunden:

- Das Verhältnis von $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$ -Ionen wird durch den Gehalt an freien Chloriden und durch die Alkalität (pH-Wert) bestimmt, der von der Zementart und von dem Alter des Betons (Karbonatisierung) abhängt.
- Es ist nur der Gesamtchloridgehalt bekannt; ein Teil der Chloride kann aber vom Zementstein gebunden werden und ist damit ungefährlich. Der Anteil der gebundenen Chloridionen am Gesamtchloridgehalt hängt wiederum von der Zementsorte bzw. vom C_3A -Gehalt des Zementes ab. Er beträgt (auf den Zement bezogen) aber im ungünstigsten Fall immer noch 0,6 M.-% Cl.

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass das Verhältnis von 1,2 $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$ einem Anteil von 0,6 bis 1,0 M.-% Cl (bezogen auf den Zementanteil) entspricht.[41]. Daher geht man davon aus, dass ein Gesamtchloridanteil 0,6 M.-% Cl unbedenklich ist und bei Gehalten von 1,0 M.-% nur eine bedingte Gefährdung besteht. Dabei wird vorausgesetzt, dass die vorgeschriebenen Betondeckungen eingehalten sind und ein dichter Beton (Betonfestigkeitsklasse ≥ 35) vorliegt [41].

18.9.2 Versuchsbeschreibung

Es wurde jeweils ein Probekörper pro Wand und Oberfläche, also insgesamt acht Probekörper des Versuchs aus Kapitel 18. 8 untersucht. Die dreiprozentige Salzlösung für den Versuch wurde mit handelsüblichem Salz, ohne Jod- oder Fluorzusätze hergestellt.

Die Proben wurden 48 h bei 105 °C getrocknet. Anschließend wurden sie in einen Eisenring eingespannt. Mit einer Schlagbohrmaschine, Absaugvorrichtung und einem Bohrer mit axialem Absaugkanal wurden Bohrmehlproben aus verschiedenen Tiefen gewonnen. Das Bohrmehl wurde von der Absaugvorrichtung in kleinen Plastikdosen aufgefangen. Der Bohrer hatte einen Durchmesser von 26 mm und es wurden zwei Bohrlöcher je Probekörper eingebracht. Durchschnittlich wurde so ca. 10 g Bohrmehl gewonnen. Nach jeder Bohrmehlentnahme wurde die Apparatur auseinandergebaut und mit Druckluft gereinigt um ein Vermischen der einzelnen Proben zu verhindern.

Zur nasschemischen Bestimmung des Chloridgehalts von Beton müssen die Chloridionen aus diesem herausgelöst werden. In diesem Fall wurde dies mit Hilfe einer Kaltaufschlusslösung der Firma Dr. Lange, die 18% Salpetersäure enthält durchgeführt. Mit dieser Methode werden etwa 80 % der Chloridionen aus dem Beton gelöst. Zur photometrischen Bestimmung des Chloridgehalts wurde das „POCKET Photometer LASA® Chlorid“ mit den dazugehörenden Küvetten der Firma Dr. Lange verwendet.

Es wurden $2 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$ Bohrmehl abgewogen, in eine 100 ml Plastikflasche mit 25 ml Kaltaufschlusslösung gegeben und unter gelegentlichem Schütteln ca. 10 min stehen lassen. Die so aufgeschlossene Lösung wurde mit einem Filtervorsatz in eine Spritze gezogen. Die so gewonnene Lösung, die frei von Fein- und Schwebteilen ist, wurde zur weiteren Analyse eingesetzt. 1 ml dieser Lösung wurde in die, mit Quecksilber(II)thiocyanatlösung gefüllte Testküvette, pipettiert. Dabei entsteht das wenig dissoziierte Quecksilber(I)chlorid. Gleichzeitig wird eine äquivalente Menge Thiocyanationen freigesetzt, die mit Eisen(III)-Salzen, Eisen(III)-Thiocyanat bilden.

Die so entstehende Rotfärbung wurde bei 470 nm photometriert. Mit einem eingebauten Mikroprozessor wird, die durch die rote Lösung hervorgerufene Lichtschwächung, in die Chloridionenkonzentration umgerechnet. Wird der Messbereich überschritten, so wird die Analyselösung verdünnt. Hierzu werden 0,2 ml Analyselösung und 0,8 ml bidestilliertes Wasser in die Testküvette pipettiert.

18.9.3 Rechnung

Die Umrechnung der Chloridionenkonzentration der Aufschlusslösung in den Chloridgehalt in % bezogen auf den Beton, erfolgt nach folgender Gleichung.

A in mg/l	= Chloridionenkonzentration
V_{ges} in ml	= Volumen der salpetersauren chloridionenhaltigen Aufschlusslösung
m_B	= Betonmehleinwaage beim HNO_3 - Aufschluss
F	= Faktor 1 (ohne Verdünnung) 5 (mit Verdünnung 1 : 4)
Cl_B	= Chloridgehalt in % bezogen auf den Beton

$$\text{Cl}_B = \frac{A \times V_{\text{ges}} \times F \times 100}{1000 \times m_B}$$

Um den prozentualen Anteil der Chloride auf den Zementgehalt zu beziehen, wurden die auf den Beton bezogenen Gehalte folgendermaßen berechnet:

Die Dichte des Betons wurde mit Hilfe der gemessenen Werten der Zylinder des vorangegangenen Druckversuchs. Der Zementgehalt wurde aus dem Betonsortenverzeichnis entnommen.

M_B	= Masse Beton pro m^3
M_Z	= Masse Zement pro m^3
Cl_Z	= Chloridgehalt in % bezogen auf den Zement

$$\text{Cl}_Z = \frac{\text{Cl}_B}{M_Z / M_B}$$

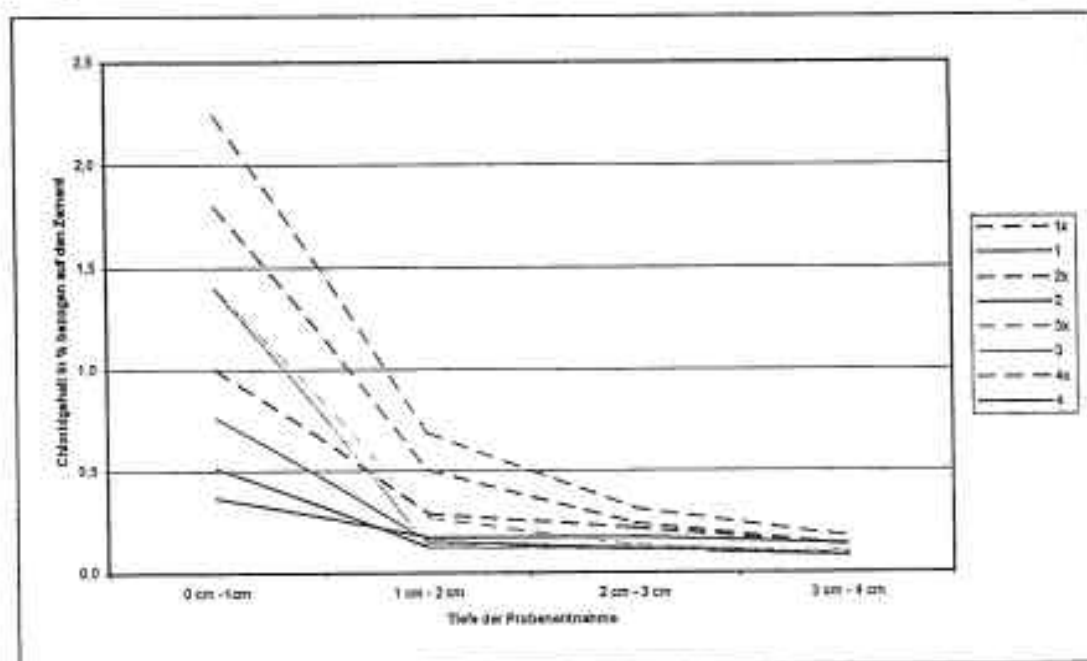
In der folgenden Tabelle und dem dazugehörigen Diagramm sind die Chloridkonzentrationen auf den Zementgehalt dargestellt. Alle gemessenen und errechneten Einzelwerte und dazugehörige Diagramme können im Anhang Kapitel V S. 117 - 119 nachgeschlagen werden.

18.9.4 Ergebnisse

Tabelle 25 Chloridgehalte bezogen auf den Zement

Probe Tiefe	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
0 cm - 1 cm	2,236	0,763	1,791	0,516	1,394	1,394	1,006	0,368
1 cm - 2 cm	0,687	0,153	0,506	0,126	0,270	0,127	0,289	0,175
2 cm - 3 cm	0,316	0,120	0,242	0,116	0,135	0,110	0,219	0,175
3 cm - 4 cm	0,174	0,098	0,137	0,084	0,093	0,101	0,131	0,140

Diagramm 10 Chlorideindringung in % bezogen auf den Zement



18.9.5 Beurteilung

Wie schon aufgrund der geringeren kapillaren Wasseraufnahme zu erwarten war, kann man in dem Diagramm deutlich erkennen, dass die Chlorideindringung bei Einsatz der SB deutlich vermindert wird. Allerdings dringen die Chloride nicht nur durch Konvektion, d. h. mit dem Wasser als Trägerlösung, sondern auch durch Diffusion, d. h. Ausgleich gegen das Konzentrationsgefälle, in den Beton ein.

Der „Ausreißerwert“ der Probe Nr. 3 wurde von mir zweimal geprüft und bestätigt. Er ist evtl. durch dem Probekörper anhaftendes Salz zu erklären. Die Werte verhalten sich nach dem ersten Zentimeter wieder erwartungsgemäß.

19 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

19.1 Schlussfolgerungen

- Fachgerecht angebrachte SB reduzieren den Wasserzementwert bis auf 0,4 in einer Tiefe von 25 bis zu 50 mm.
- Zwei Faktoren verringern Wasserzementwert. Erstens kann Überschusswasser abfließen und zweitens werden Zementteile mit dem abfließenden Wasser zur Schalung transportiert.
- Die Fähigkeit der SB, die Luft entweichen zu lassen, ermöglicht die Herstellung einer Oberfläche, die frei von Lunkern und sichtbaren Poren ist und weniger zu Netzrissen neigt.
- Der erniedrigte Wasserzementwert der Oberfläche, führt zu einer Verbesserung aller Betoneigenschaften und damit zu einem erhöhten Widerstand gegen äußere Einwirkungen.
- Die SB sollte für eine Nachbehandlung auf der Betonoberfläche verbleiben und feuchtgehalten werden. Optimale Ergebnisse werden erzielt, wenn die Oberfläche zusätzlich mit Folien abgehängt wird.
- Die Kosten variieren stark, je nach Einsatzort und -zweck.
- Kosteneinsparungen sind möglich durch: längere Standzeit, höhere Einsatzhäufigkeit der Schalung, Einsparen der Trennmittel und der damit verbundenen Arbeitszeit, Einsparen der Beschichtung oder aufwendiger Vorarbeiten bei anschließender Beschichtung und eine erhöhte Lebensdauer ohne Sanierung
- Wenn SB eingesetzt werden, muss zusätzlicher Planungsaufwand bei der Terminfestlegung des Schalungseinsatzes betrieben werden, damit die Schalungen mit den aufgespannten SB keiner Witterung ausgesetzt werden, welche die SB faltig oder wellig werden lassen könnten.

- Beim Aufspannen der SB und beim Verdichten des Betons sollte -besonders an der Oberkante der Schalung- sehr sorgfältig gearbeitet werden, weil dort, aufgrund des fehlenden Porenwasserdrucks, die SB am wenigsten effektiv arbeiten kann. Nach einem ersten Ansteifen sollte im oberen Teil evtl. nochmals nachverdichtet werden.
- Saugende SB funktionieren mit allen bisher getesteten gängigen Betonsorten.
- Die Vorteile von SB und HOZ-Beton ergänzen und verstärken sich gegenseitig. HOZ-Beton -der sehr nachbehandlungsempfindlich ist- erreicht mit der SB eine noch dichtere Zementsteinmatrix als er sowieso schon „von Natur aus“ besitzt. Zusätzlich kann die SB zu einer optimalen Nachbehandlung beitragen.
- Die SB eignet sich, um der Forderung nach einer definierten und einheitlichen Qualität der Betonoberfläche nachzukommen.

19.2 Empfehlungen

- Die verbesserten Oberflächeneigenschaften, welche durch den Einsatz von SB zu erreichen sind, sollten genau spezifiziert und in einer Richtlinie oder später der Euronorm aufgenommen werden. Die bisher in der DIN definierten Oberflächeneigenschaften sind dafür nicht geeignet, da sie diese Art der Oberfläche nicht ausreichend genau beschreiben.
- Um eine bessere Aussage über die Wirkungen von SB treffen zu können, müssen weitere Langzeitstudien durchgeführt werden. Dies geschieht am besten an Bauwerken, bei denen ein Teil der Oberfläche mit und ein Teil ohne SB hergestellt werden müsste, um praxisnahe Ergebnisse zu erhalten.
- Es sollte eine Richtlinie erarbeitet werden, welche die Rahmenbedingungen einer sinnvollen Verwendung der SB beschreibt und Regeln definiert, wann eine zusätzliche Beschichtung bei Gebrauch einer SB entfallen kann.
- Außerdem sollte eine Richtlinie für anschließende Beschichtungen auf der, mit einer SB behandelten, Oberfläche entwickelt werden.

- Es sind weitere Forschung ist nötig, um auch neue Einsatzmöglichkeiten der SB zu erschließen, wie z. B. die Sanierung von bestehenden Bauwerken.
- Weitere Untersuchungen über die Eignung von SB, zur Herstellung von sichtbar bleibenden Beton sollten durchgeführt werden.
- Gleichfalls sollten weitere Untersuchungen der Wirtschaftlichkeit unter lang- und kurzfristigen Gesichtspunkten bei verschiedenen Einsatzmöglichkeiten unternommen werden.

Schlussbemerkung:

Unter Berücksichtigung sämtlicher Untersuchungen, ist die SB ein empfehlenswertes Produkt, welches fachgerecht eingesetzt, die Dauerhaftigkeit insbesondere von hochbeanspruchten Betonbauteilen erhöht und somit eine nachhaltige Kostenersparnis bedeutet.

Parallel zu den wirtschaftlichen Einigungsbestrebungen Europas, ergeben sich logischerweise auch Bemühungen einer technischen Annäherung. Dabei spielen auch betontechnologische Gesichtspunkte eine maßgebende Rolle. Die SB kann zur Sicherstellung einer einheitlichen Qualität vom Rand bis zum Kern beitragen, und diese Entwicklung unterstützen.

Dabei wäre es nötig eine einheitliche Normung aufzustellen, die auch den Planern und Ausführenden Sicherheit bei der Anwendung geben. Auch wenn DIN-Normen keinen Gesetzescharakter besitzen, repräsentieren sie doch im allgemeinen den sogenannten „Stand der Technik“ an dem sich die meisten Planer und Gutachter orientieren.

Anhang

I Messwerte Druckfestigkeit

Tabelle 26 Druckfestigkeit der Würfel

Würfel- Nr.	Masse M	Dicke a	Breite b	Höhe h	Rohdichte ρ	Kraft max.F	β_0 150	β_0 200
-	kg	mm	mm	mm	kg/m ³	kN	N/mm ²	N/mm ²
1.1	7.858	150.0	150.0	150.0	2328	926.4	41.2	39,10
1.2	7.903	150.0	150.0	150.0	2342	904.1	40.2	38,20
1.3	7.963	150.0	150.0	150.0	2359	921.6	41.0	38,90
2.1	7.955	150.0	150.0	150.0	2357	955.6	42.5	40,30
2.2	7.996	150.0	150.0	150.0	2369	942.4	41.9	39,80
2.3	7.951	150.0	150.0	150.0	2356	973.5	43.3	41,10
3.1	7.913	150.0	150.0	150.0	2345	1136.6	50.5	48,00
3.2	7.950	150.0	150.0	150.0	2356	1156.1	51.4	48,80
3.3	7.882	150.0	150.0	150.0	2335	1051.4	46.7	44,40
4.1	8.006	150.0	150.0	150.0	2372	962.2	42.8	40,60
4.2	8.000	150.0	150.0	150.0	2370	959.1	42.6	40,50
4.1	8.029	150.0	150.0	150.0	2379	967.5	43.0	40,90

Diagramm 11 Druckfestigkeit der Würfel Beton Nr. 1

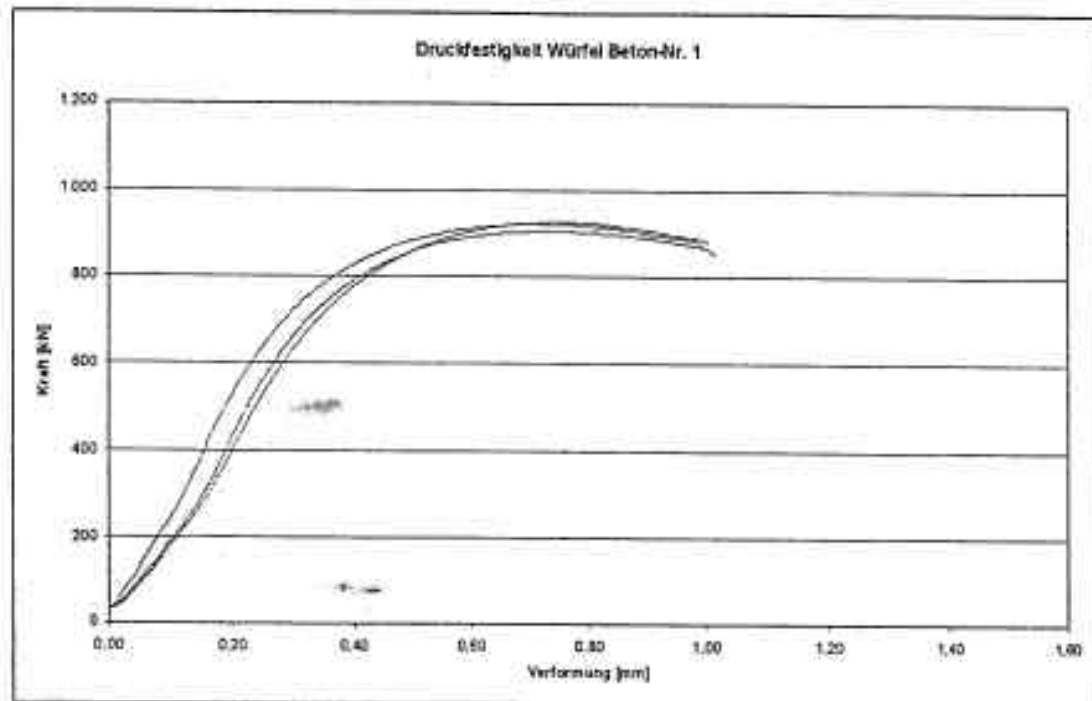


Diagramm 12 Druckfestigkeit der Würfel Beton Nr. 2

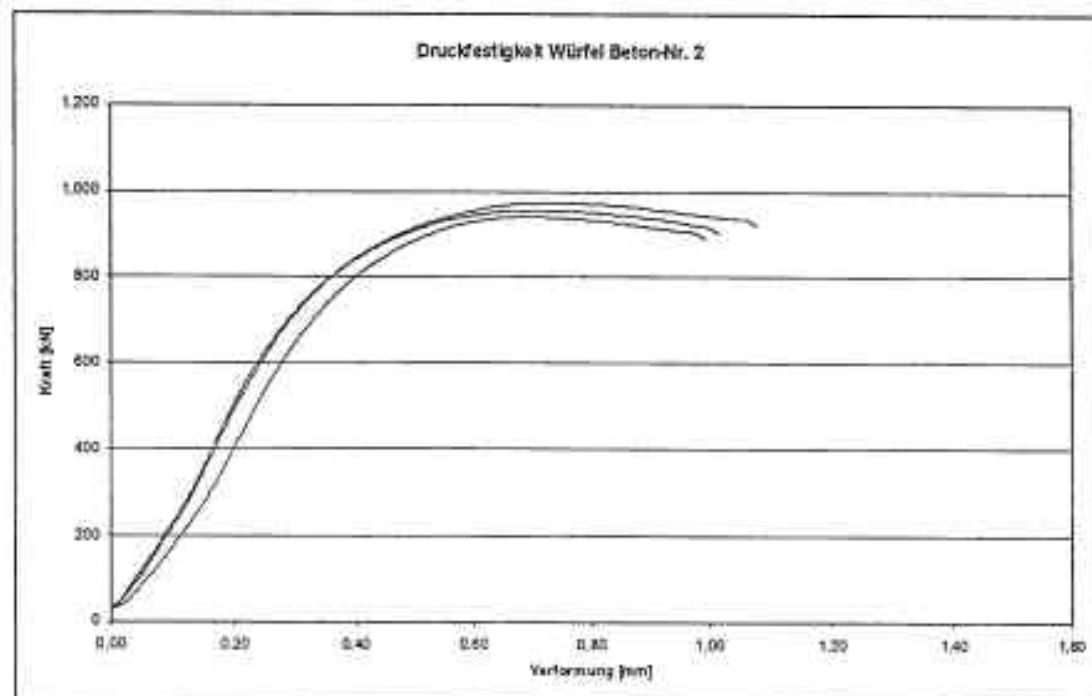


Diagramm 13 Druckfestigkeit der Würfel Beton Nr. 3

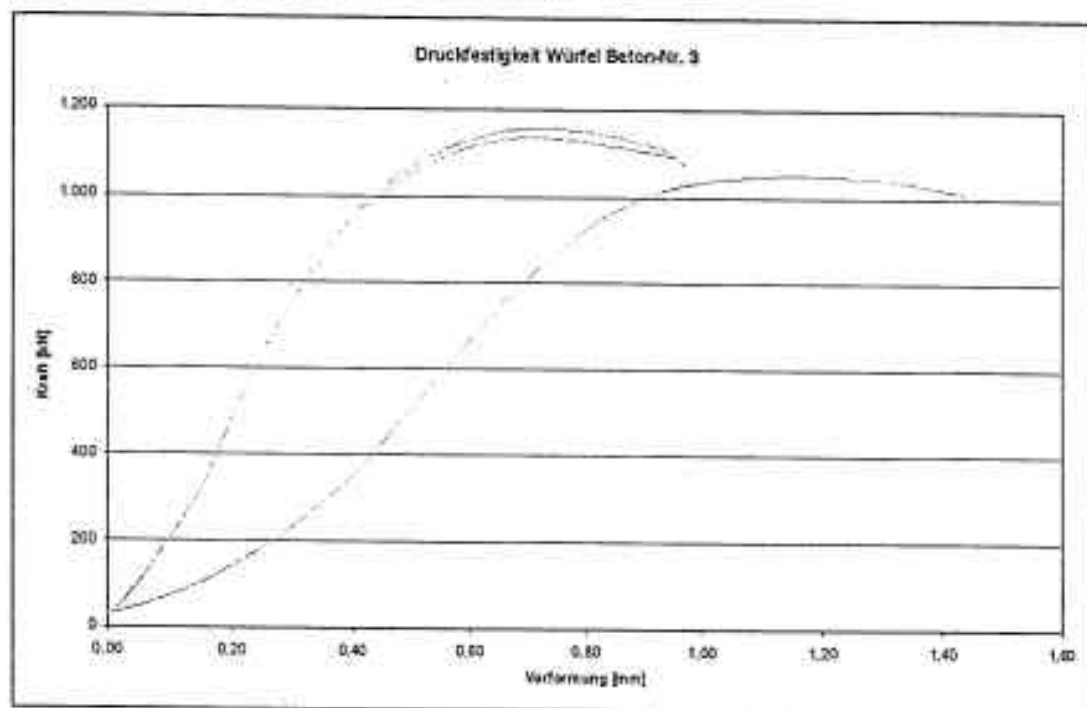


Diagramm 14 Druckfestigkeit der Würfel Beton Nr. 4

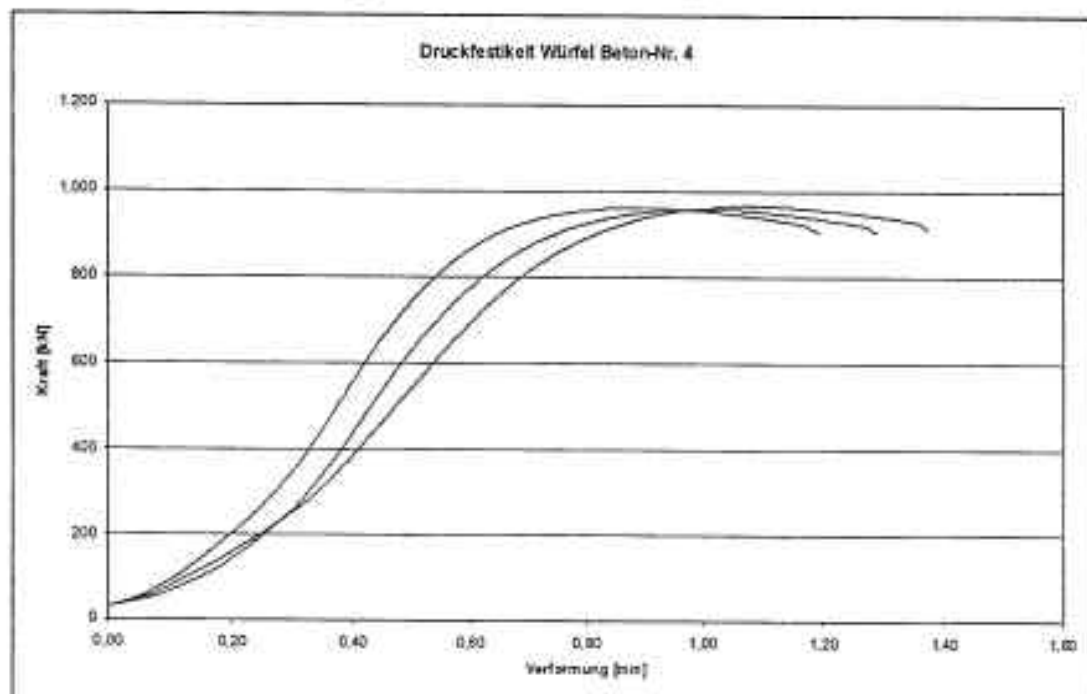


Tabelle 27 Druckfestigkeit der Bohrkern

Bohrkern	Höhe h	Durch- messer d	Fläche A	Volumen V	Gewicht M	Dichte ρ	Kraft F	Druck- festigkeit f_{cc}
-	[mm]	[mm]	[mm ²]	[cm ³]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[N/mm ²]
1.1	104,20	99,1	7713,25	803,72	1,924	2393,87	344,3	44,64
1.2	103,00	99,1	7713,25	794,46	1,892	2381,48	320,3	41,53
2.1	104,00	99,1	7713,25	802,18	1,909	2379,77	312,5	40,51
2.2	103,60	99,1	7713,25	799,09	1,899	2376,45	333,0	43,17
3.1	105,10	99,1	7713,25	810,66	1,933	2384,47	427,8	55,46
3.2	103,70	99,1	7713,25	799,86	1,911	2389,16	393,9	51,07
4.1	104,50	99,1	7713,25	806,03	1,940	2406,85	403,4	52,30
4.2	105,20	99,1	7713,25	811,43	1,951	2404,39	416,7	54,02

Diagramm 15 Druckfestigkeit Bohrkern Beton Nr. 1

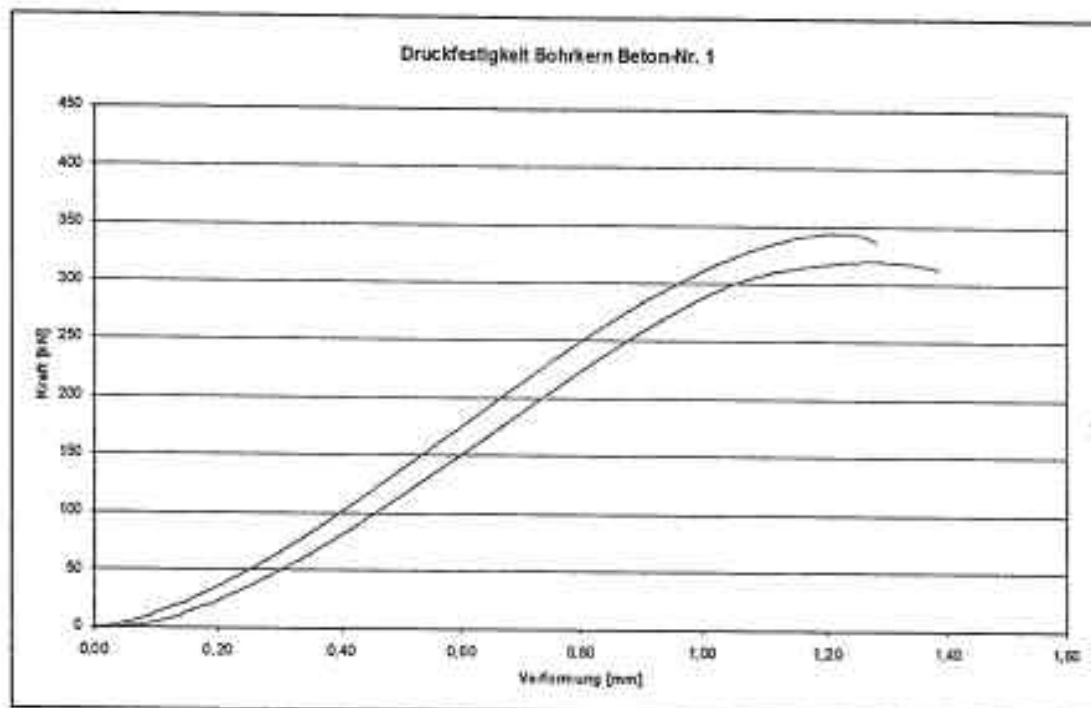


Diagramm 16 Druckfestigkeit Bohrkern Beton Nr. 2

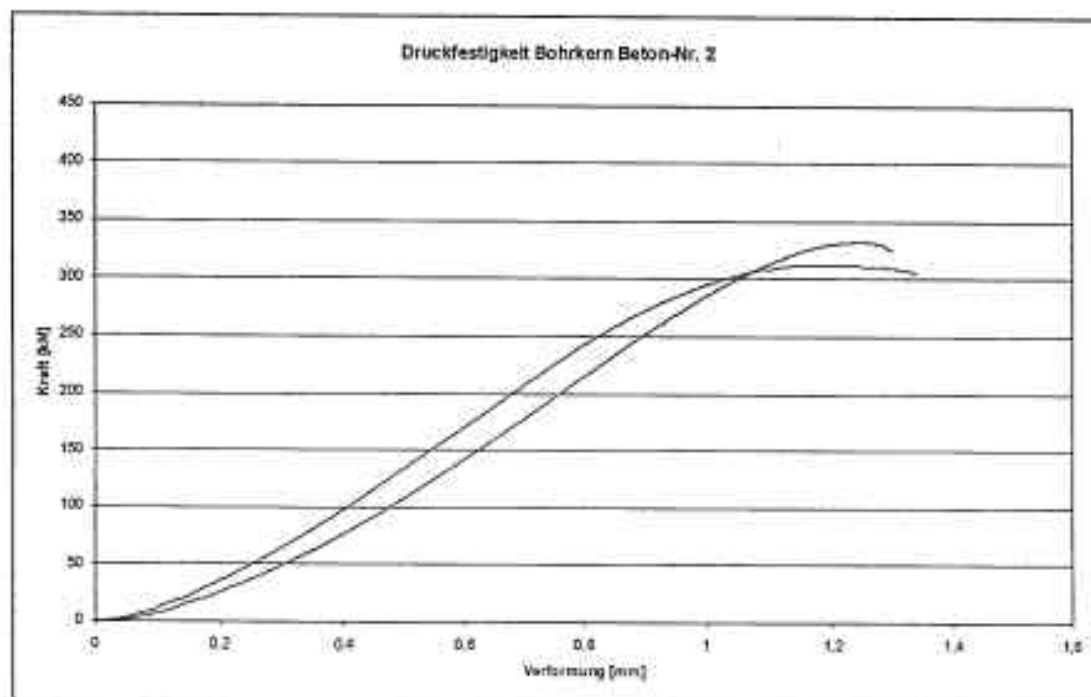


Diagramm 17 Druckfestigkeit Bohrkern Beton Nr. 3

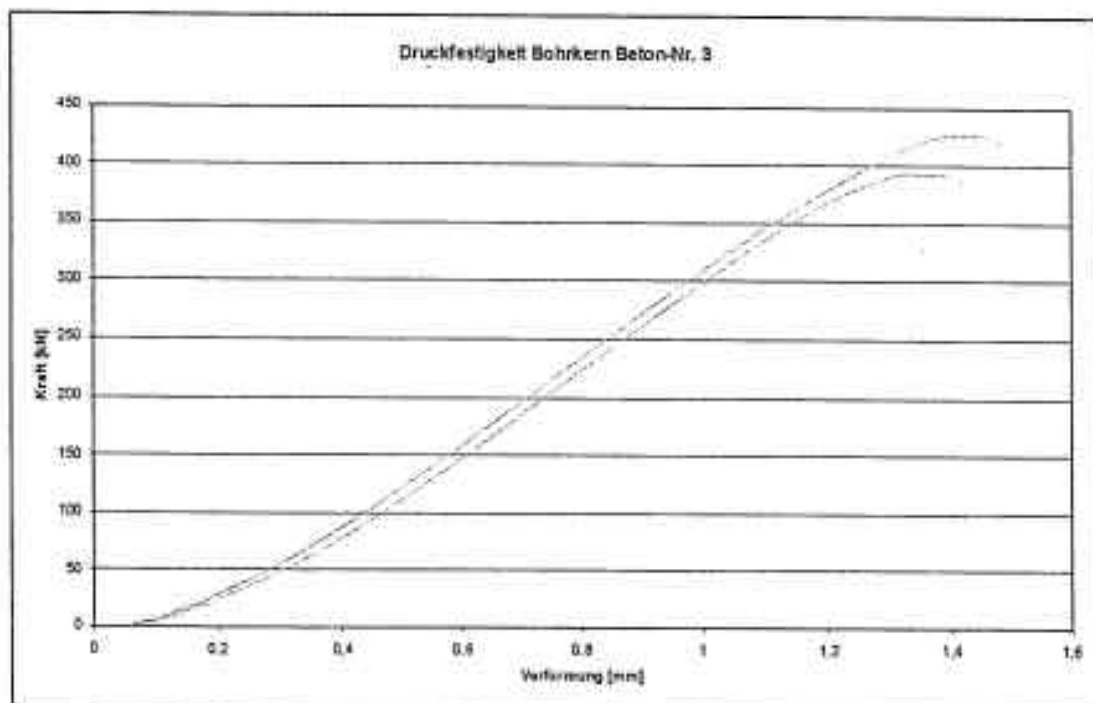


Diagramm 18 Druckfestigkeit Bohrkern Beton Nr. 4

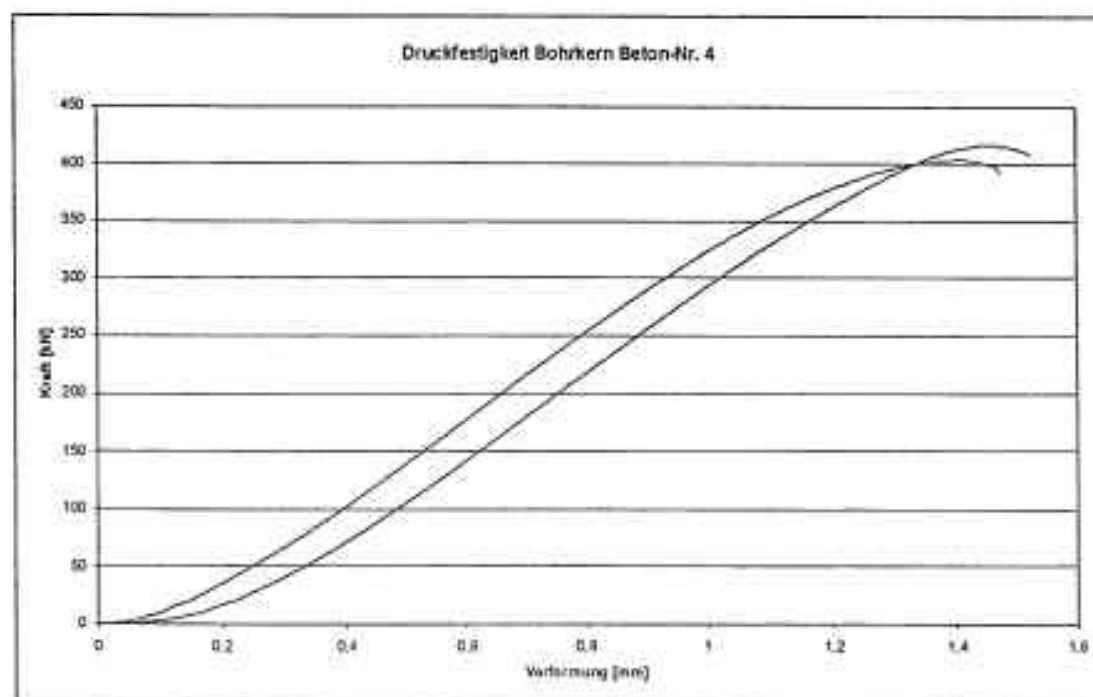


Tabelle 28 bis 35 Schlagprüfung Schmidhammer nach 9 Tagen

Tab. 28 Wand 1 ohne Dranovlies

unten	mitte	oben
32	36	30
34	32	31
34	34	28
34	33	30
33	34	37
Mittelwerte		
33,4	33,8	31,2
100,00%	100,00%	100,00%

Tab. 29 Wand 1 mit Dranovlies

unten	mitte	oben
44	43	40
46	40	40
46	40	38
44	39	42
41	38	38
Mittelwerte		
44,2	40	39,6
132,34%	118,34%	126,92%

Tab. 30 Wand 2 ohne Dranovlies

unten	mitte	oben
41	36	33
36	35	36
34	30	32
38	33	30
33	32	34
Mittelwerte		
36,4	33,2	33
100,00%	100,00%	100,00%

Tab. 31 Wand 2 mit Dranovlies

unten	mitte	oben
49	46	35
43	48	36
46	42	38
48	43	37
50	43	35
Mittelwerte		
47,2	44,4	36,2
129,67%	133,73%	109,70%

Tab. 32 Wand 3 ohne Dranovlies

unten	mitte	oben
36	35	32
34	34	35
34	38	38
34	38	37
35	34	36
Mittelwerte		
34,6	35,8	35,6
100,00%	100,00%	100,00%

Tab. 33 Wand 3 mit Dranovlies

unten	mitte	oben
47	46	40
49	43	36
49	48	36
47	42	38
47	40	38
Mittelwerte		
47,8	43,8	37,6
138,15%	122,35%	105,62%

Tab. 34 Wand 4 ohne Dranovlies

unten	mitte	oben
30	33	31
31	32	30
31	32	30
30	29	30
29	33	28
Mittelwerte		
30,2	31,8	29,8
100,00%	100,00%	100,00%

Tab. 35 Wand 4 mit Dranovlies

unten	mitte	oben
44	42	33
45	44	31
46	41	32
44	43	34
42	45	32
Mittelwerte		
44,2	43	32,4
146,36%	135,22%	108,72%

Tabelle 36 bis 43 Schlagprüfung Schmidhammer nach 28 Tagen

Tab. 36 Wand 1 ohne Dranovlies

unten	mitte	oben
42	36	41
36	38	35
34	37	35
33	36	35
35	36	35
Mittelwerte		
36	36,6	36,2
100,00%	100,00%	100,00%

Tab. 37 Wand 1 mit Dranovlies

unten	mitte	oben
46	46	42
46	46	38
46	44	39
46	44	42
46	44	43
Mittelwerte		
46	44,8	40,8
127,78%	122,40%	112,71%

Tab. 38 Wand 2 ohne Dranovlies

unten	mitte	oben
40	42	38
35	40	36
34	34	34
32	36	35
36	38	33
Mittelwerte		
35,4	38	35,2
100,00%	100,00%	100,00%

Tab. 39 Wand 2 mit Dranovlies

unten	mitte	oben
50	42	38
49	48	39
50	47	40
46	44	36
47	48	38
Mittelwerte		
48,4	45,8	38,2
136,72%	120,53%	108,52%

Tab. 40 Wand 3 ohne Dranovlies

unten	mitte	oben
34	34	36
37	38	38
35	34	37
39	35	35
45	38	40
Mittelwerte		
38	35,8	37,2
100,00%	100,00%	100,00%

Tab. 41 Wand 3 mit Dranovlies

unten	mitte	oben
44	50	41
48	50	46
50	50	46
44	47	43
46	46	45
Mittelwerte		
46,4	48,6	44,2
122,11%	135,75%	118,82%

Tab. 42 Wand 4 ohne Dranovlies

unten	mitte	oben
34	37	34
31	34	36
38	34	34
36	39	35
36	36	33
Mittelwerte		
35	36	34,4
100,00%	100,00%	100,00%

Tab. 43 Wand 4 mit Dranovlies

unten	mitte	oben
46	48	38
46	48	36
40	44	38
46	43	38
42	45	38
Mittelwerte		
44	45,6	37,6
125,71%	126,67%	109,30%

II Wasserundurchlässigkeit

Tabelle 44 Wassereindringtiefen

Stelle Probek.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
WU-Platten											
1.1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	0,00
1.2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00
1.3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	1,50	0,60	0,00
2.1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.2	0,00	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,30	1,40	0,80	0,00
3.1	0,00	0,00	0,50	0,30	0,00	0,00	0,00	0,40	0,40	0,00	0,00
4.1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,70	0,00	0,00
4.2	0,00	0,00	0,00	1,20	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.3	0,00	0,40	0,50	0,60	0,90	1,00	0,90	0,90	0,90	1,70	1,20
Bohrkerne											
1x	9,00	9,20	9,30	10,00	10,20	10,30	10,30	10,40	8,50	7,30	5,20
2x	3,00	3,80	5,00	5,80	6,50	6,50	6,00	5,60	5,40	5,00	2,50
3x	1,70	2,30	3,00	3,60	4,50	4,50	4,30	4,10	4,00	1,80	1,30
4x	1,70	1,80	1,40	1,00	0,80	1,20	1,80	2,20	3,00	2,20	1,50
1	0,30	0,50	1,00	1,30	1,70	1,50	1,20	0,80	0,60	0,30	0,20
2	0,50	0,60	0,70	1,00	1,20	1,10	0,80	0,60	0,60	0,70	0,60
3	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
4	0,80	1,30	1,50	1,80	2,00	0,90	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70

Diagramm 19 Profil Wassereindringung Beton Nr. 1

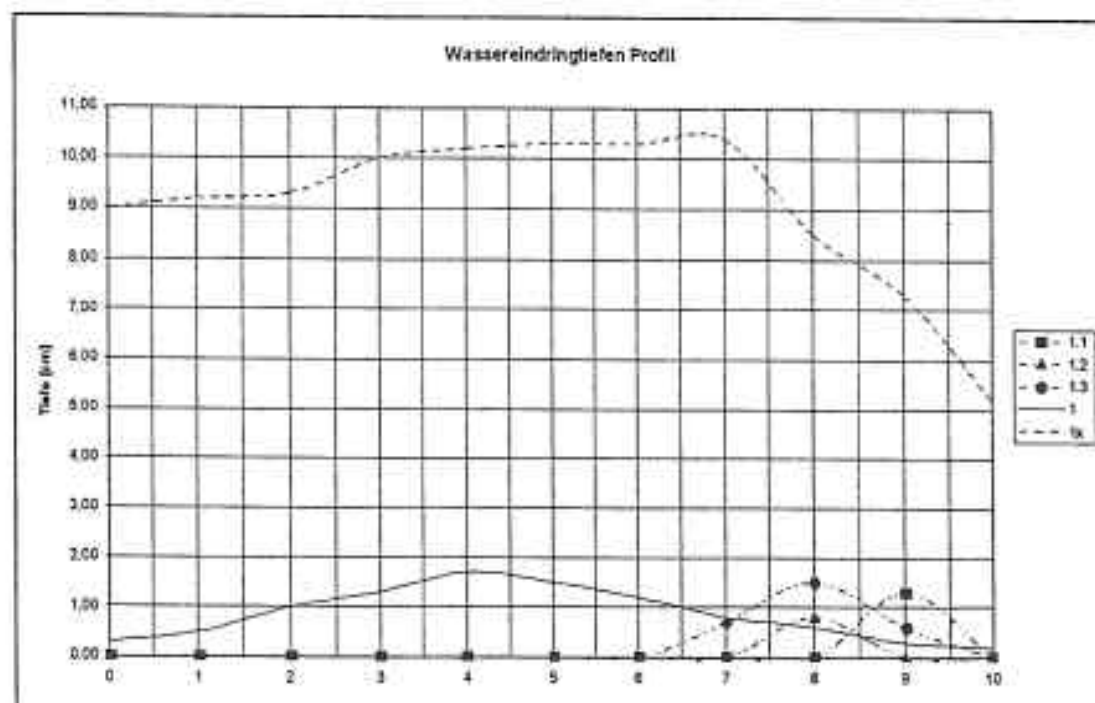


Diagramm 20 Profil Wassereindringung Beton Nr. 2

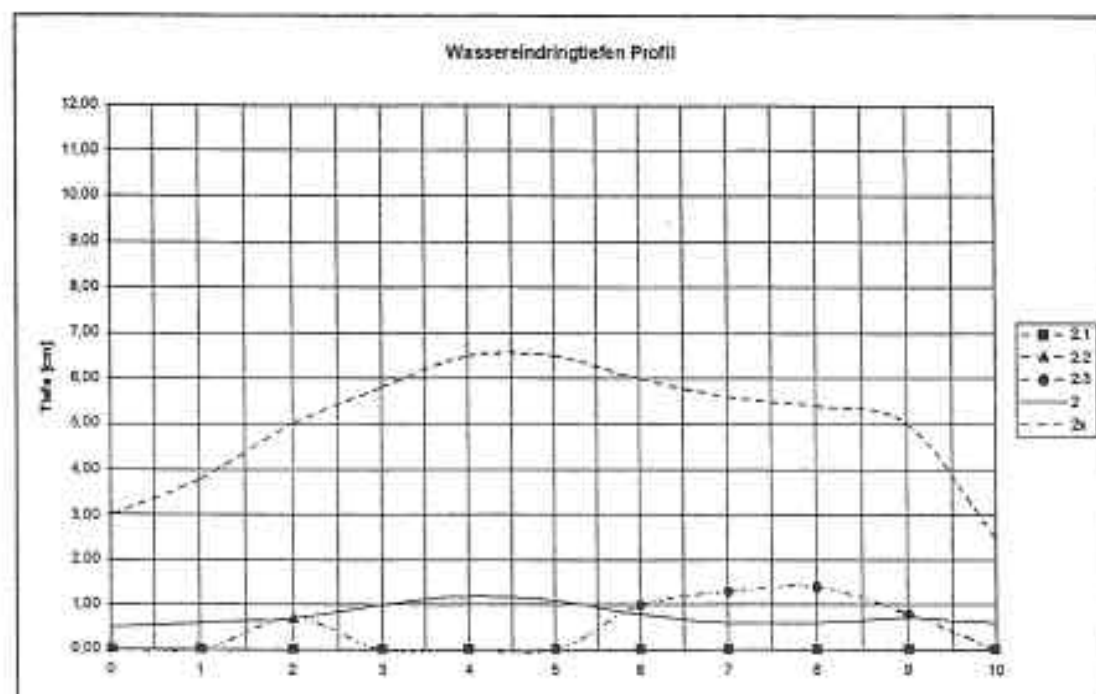


Diagramm 21 Profil Wassereindringung Beton Nr. 3

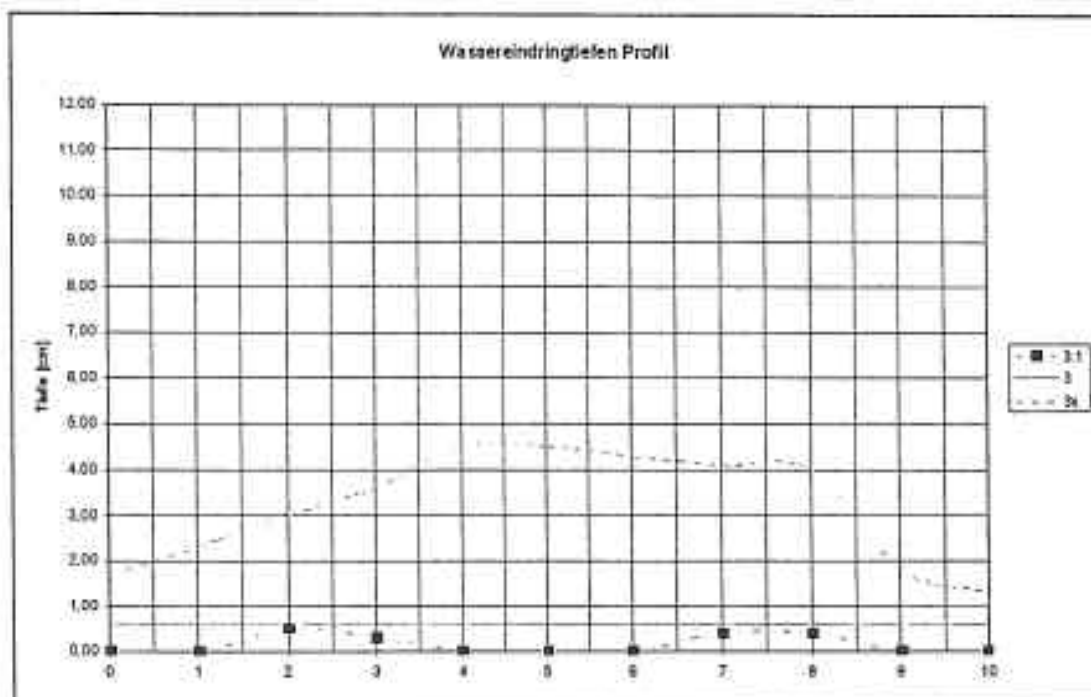
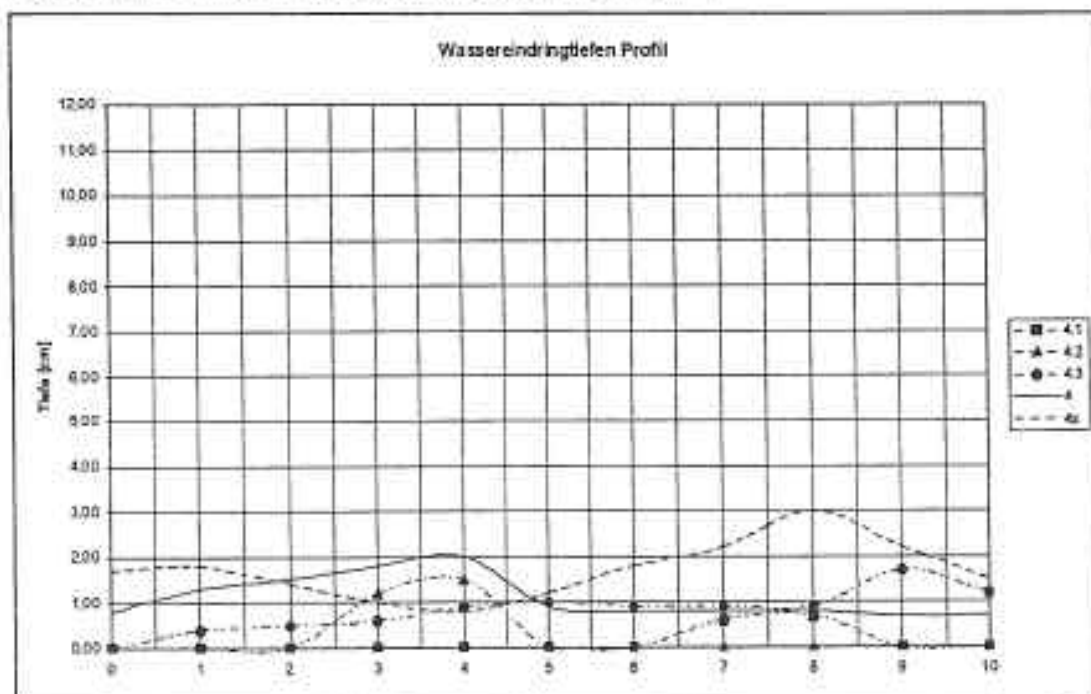


Diagramm 22 Profil Wassereindringung Beton Nr. 4



III Messwerte der Verschleißprüfung nach Böhme

Tabelle 45 An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 1x

0 Umdr.	88 Umdr.	176 Umdr.	264 Umdr.	352 Umdr.
17,775	16,666	15,771	14,828	13,796
17,779	Luftpore	Luftpore	Luftpore	14,010
17,811	16,898	16,100	15,092	14,130
17,713	16,807	15,929	15,026	13,988
17,764	16,894	16,058	15,174	14,182
17,753	17,020	16,252	15,295	14,319
17,764	16,891	15,980	15,114	14,066
17,737	16,971	16,118	15,268	14,186
17,705	17,115	16,242	15,348	14,305

Umdr. = Umdrehungen

Tabelle 46 An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 1

0 Umdr.	88 Umdr.	176 Umdr.	264 Umdr.	352 Umdr.
16,868	16,122	15,225	14,681	14,010
16,804	16,172	15,414	14,818	14,119
16,841	16,204	15,417	14,839	14,161
16,783	16,171	15,409	14,844	14,648
16,868	16,302	15,543	14,964	14,202
16,839	16,338	15,556	14,966	14,246
16,763	16,123	15,434	14,811	14,138
16,912	16,252	15,531	14,919	14,193
16,839	16,269	15,567	14,913	14,194

Umdr. = Umdrehungen

Tabelle 47 An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 2x

0 Umdr.	88 Umdr.	176 Umdr.	264 Umdr.	352 Umdr.
17,828	16,969	15,902	14,346	13,567
17,839	17,058	15,939	14,487	13,422
17,815	16,715	15,598	14,547	13,149
17,823	17,179	16,062	14,722	13,735
17,807	17,217	16,082	14,816	13,519
17,821	16,776	16,648	14,790	13,231
17,798	17,178	16,219	14,836	13,840
17,805	17,137	15,996	14,959	13,505
17,822	16,686	15,542	14,953	13,215

Umdr. = Umdrehungen

Tabelle 48 An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 2

0 Umdr.	88 Umdr.	176 Umdr.	264 Umdr.	352 Umdr.
17,298	16,820	16,360	15,791	15,195
17,513	17,049	16,531	16,053	15,440
17,715	17,138	16,622	16,104	15,452
17,552	16,992	16,604	16,125	15,643
17,509	17,181	16,804	16,330	15,835
17,591	17,190	16,770	16,321	15,796
17,550	16,933	16,645	16,196	15,695
17,550	17,141	16,838	16,485	15,975
17,569	17,118	16,837	16,369	15,889

Umdr. = Umdrehungen

Tabelle 49 An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 3x

0 Umdr.	88 Umdr.	176 Umdr.	264 Umdr.	352 Umdr.
17,466	16,617	15,641	14,968	14,116
17,389	16,520	15,684	15,058	14,198
17,303	16,243	15,542	14,813	14,064
17,468	16,829	16,049	15,353	14,513
17,439	16,785	16,043	15,372	14,575
17,353	16,497	15,755	15,085	14,344
17,490	16,922	16,373	15,604	14,818
17,426	16,859	16,169	15,474	14,840
17,368	16,610	15,845	15,130	14,428

Umdr. = Umdrehungen

Tabelle 50 An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 3

0 Umdr.	88 Umdr.	176 Umdr.	264 Umdr.	352 Umdr.
16,867	15,915	15,434	14,337	13,541
16,798	15,962	15,686	14,501	13,652
16,724	16,034	15,746	14,709	13,755
16,879	16,082	15,286	14,715	14,111
16,683	16,089	15,535	14,878	14,300
16,712	16,194	15,629	15,116	14,411
16,886	16,062	15,202	14,915	14,463
16,865	16,131	15,444	15,075	14,861
16,782	16,170	15,519	15,254	14,944

Umdr. = Umdrehungen

Tabelle 51 An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 4x

0 Umdr.	88 Umdr.	176 Umdr.	264 Umdr.	352 Umdr.
17,086	15,802	14,890	13,757	12,567
17,097	15,799	14,816	13,665	12,706
17,116	15,756	14,695	13,610	12,697
17,109	16,049	15,138	14,062	13,066
17,111	16,022	14,965	13,981	13,028
17,104	16,049	14,859	13,976	13,062
17,104	16,118	15,151	14,228	13,195
17,086	16,091	14,975	14,174	13,209
17,025	16,118	14,811	14,138	13,205

Umdr. = Umdrehungen

Tabelle 52 An der Messuhr abgelesene Werte Probekörper 4

0 Umdr.	88 Umdr.	176 Umdr.	264 Umdr.	352 Umdr.
17,106	16,479	16,039	15,617	15,152
17,165	16,607	16,205	15,745	15,305
16,979	16,475	16,036	16,643	15,181
17,159	16,604	16,128	15,673	15,199
17,051	16,650	16,224	15,707	15,249
17,038	16,543	16,057	15,578	15,123
17,163	16,503	15,991	15,992	15,068
17,114	16,544	16,045	15,738	15,042
17,150	16,433	15,875	15,389	14,918

Umdr. = Umdrehungen

Tabelle 53 Mittelwerte der an der Messuhr abgelesenen Werte

Probe-Nr.	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
Fläche cm ²	49,80	49,28	47,19	50,48	50,09	48,86	51,84	51,04
Umdrehungen								
0	17,76	16,84	17,82	17,54	17,41	16,80	17,09	17,10
88	16,91	16,22	16,99	17,06	16,65	16,07	15,98	16,54
176	16,06	15,46	16,00	16,67	15,90	15,50	14,92	16,07
264	15,14	14,86	14,72	16,20	15,21	14,83	13,95	15,79
352	14,11	14,21	13,46	15,66	14,43	14,23	12,97	15,14

Tabelle 54 Dickenverlust

Probe-Nr.	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
Fläche cm ²	49,80	49,28	47,19	50,48	50,09	48,86	51,84	51,04
Umdrehungen								
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
88	0,85	0,62	0,83	0,48	0,76	0,73	1,11	0,57
176	1,70	1,38	1,82	0,87	1,51	1,30	2,17	1,04
264	2,61	1,97	3,10	1,34	2,21	1,97	3,14	1,32
352	3,65	2,62	4,35	1,88	2,98	2,57	4,12	1,97

Tabelle 55 Dickenverlust auf 50 cm² bezogen

Probe-Nr.	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
Fläche cm ²	49,80	49,28	47,19	50,48	50,09	48,86	51,84	51,04
Umdrehungen								
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
88	0,84	0,61	0,78	0,48	0,76	0,71	1,16	0,58
176	1,69	1,36	1,72	0,88	1,51	1,27	2,25	1,06
264	2,60	1,95	2,93	1,35	2,21	1,92	3,25	1,34
352	3,63	2,59	4,11	1,90	2,98	2,51	4,27	2,01

Tabelle 56 Masse absolut

Probe-Nr.	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
Fläche cm ²	49,80	49,28	47,19	50,48	50,09	48,86	51,84	51,04
Umdrehungen								
0	784,3	772,2	746,4	797,7	782,2	767,9	821,6	820,6
88	775,4	763,9	738,1	792,4	774,2	759,9	809,5	814,2
176	766,8	757,3	727,2	787,9	766,1	754,2	796,9	808,8
264	757	750,9	714,6	782,6	758,7	746,1	786	803,4
352	745,8	743,5	702,8	776,5	750,1	739,1	774,4	797,7

Tabelle 57 Massenverlust

Probe-Nr.	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
Fläche cm ²	49,80	49,28	47,19	50,48	50,09	48,86	51,84	51,04
Umdrehungen								
0	0	0	0	0	0	0	0	0
88	8,9	8,3	8,3	5,3	8	8	12,1	6,4
176	17,5	14,9	19,2	9,8	16,1	13,7	24,7	11,8
264	27,3	21,3	31,8	15,1	23,5	21,8	35,6	17,2
352	38,5	28,7	43,6	21,2	32,1	28,8	47,2	22,9

Tabelle 58 Massenverlust auf 50 cm² bezogen

Probe-Nr.	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
Fläche cm ²	49,80	49,28	47,19	50,48	50,09	48,86	51,84	51,04
Umdrehungen								
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
88	8,87	8,185	7,83	5,35	8,015	7,82	12,55	6,53
176	17,43	14,69	18,12	9,89	16,13	13,39	25,61	12,04
264	27,19	20,99	30,01	15,25	23,54	21,30	36,91	17,56
352	38,35	28,29	41,15	21,40	32,16	28,14	48,94	23,38

IV Kapillare Wasseraufnahme

Tabelle 59 Absolute Masse der Probekörper während des Versuchs

	0 h	1,5 h	3 h	6 h	12 h	24 h	2 d	3 d	4 d
1.1x	1145,62	1152,58	1154,44	1156,12	1158,08	1160,10	1162,06	1162,76	1162,7
1.2x	1145,42	1152,86	1154,64	1156,30	1158,20	1160,14	1162,24	1163,10	1163,16
1.1	1157,20	1160,76	1161,50	1162,50	1163,74	1164,44	1165,44	1165,48	1165,76
1.2	1162,18	1166,46	1167,62	1168,74	1170,00	1170,96	1172,00	1172,48	1172,44
2.1x	1147,14	1155,72	1158,04	1160,60	1163,08	1165,66	1168,20	1169,16	1169,14
2.2x	1155,06	1163,94	1166,36	1169,00	1171,58	1173,82	1175,98	1176,88	1176,70
2.1	1135,88	1138,06	1138,76	1139,32	1140,00	1140,66	1141,44	1141,68	1141,86
2.2	1154,40	1157,10	1157,90	1158,38	1159,22	1159,98	1160,82	1160,88	1161,14
3.1x	1146,96	1154,40	1156,28	1158,14	1160,22	1162,24	1164,14	1164,88	1165,08
3.2x	1134,56	1142,22	1144,12	1146,02	1148,12	1150,16	1152,04	1152,56	1152,90
3.1	1161,86	1164,56	1165,32	1166,08	1167,04	1167,88	1168,32	1168,58	1168,60
3.2	1160,30	1162,10	1162,50	1162,98	1163,66	1164,08	1164,38	1164,54	1164,58
4.1x	1168,60	1172,70	1173,86	1175,22	1176,66	1178,10	1180,38	1181,70	1182,42
4.2x	1175,90	1181,62	1182,94	1184,24	1185,44	1187,06	1189,22	1190,34	1191,14
4.1	1181,40	1182,36	1182,62	1182,90	1183,26	1183,76	1184,40	1184,56	1184,88
4.2	1186,10	1186,90	1187,08	1187,40	1187,68	1187,96	1188,52	1188,38	1188,54

Tabelle 60 Wasseraufnahme absolut

	0 h	1,5 h	3 h	6 h	12 h	24 h	2 d	3 d	4 d
1.1x	0,00	6,96	8,82	10,50	12,46	14,48	16,44	17,14	17,08
1.2x	0,00	7,44	9,22	10,88	12,78	14,72	16,82	17,68	17,74
1.1	0,00	3,56	4,30	5,30	6,54	7,24	8,24	8,28	8,56
1.2	0,00	4,28	5,44	6,56	7,82	8,78	9,82	10,30	10,26
2.1x	0,00	8,58	10,90	13,46	15,94	18,52	21,06	22,02	22,00
2.2x	0,00	8,88	11,30	13,94	16,52	18,76	20,92	21,82	21,64
2.1	0,00	2,18	2,88	3,44	4,12	4,78	5,56	5,80	5,98
2.2	0,00	2,70	3,50	3,98	4,82	5,58	6,42	6,48	6,74
3.1x	0,00	7,44	9,32	11,18	13,26	15,28	17,18	17,92	18,12
3.2x	0,00	7,66	9,56	11,46	13,56	15,60	17,48	18,00	18,34
3.1	0,00	2,70	3,46	4,22	5,18	6,02	6,46	6,72	6,74
3.2	0,00	1,80	2,20	2,68	3,36	3,78	4,08	4,24	4,28
4.1x	0,00	4,10	5,26	6,62	8,06	9,50	11,78	13,10	13,82
4.2x	0,00	5,72	7,04	8,34	9,54	11,16	13,32	14,44	15,24
4.1	0,00	0,96	1,22	1,50	1,86	2,36	3,00	3,16	3,48
4.2	0,00	0,80	0,98	1,30	1,58	1,86	2,42	2,28	2,44

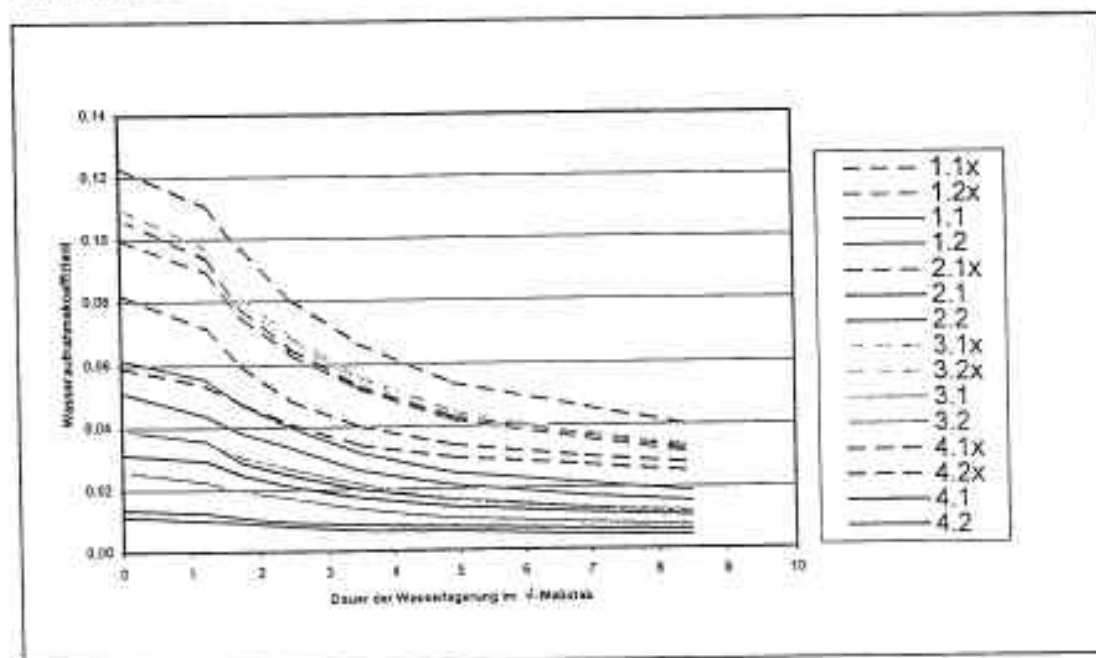
Tabelle 61 Wasseraufnahme relativ

	0 h	1,5 h	3 h	6 h	12 h	24 h	2 d	3 d	4 d
1.1x	0,00	6,96	1,86	1,68	1,96	2,02	1,96	0,70	-0,06
1.2x	0,00	7,44	1,78	1,66	1,90	1,94	2,10	0,86	0,06
1.1	0,00	3,56	0,74	1,00	1,24	0,70	1,00	0,04	0,28
1.2	0,00	4,28	1,16	1,12	1,26	0,96	1,04	0,48	-0,04
2.1x	0,00	8,58	2,32	2,56	2,48	2,58	2,54	0,96	-0,02
2.2x	0,00	8,88	2,42	2,64	2,58	2,24	2,16	0,90	-0,18
2.1	0,00	2,18	0,70	0,56	0,68	0,66	0,78	0,24	0,18
2.2	0,00	2,70	0,80	0,48	0,84	0,76	0,84	0,06	0,26
3.1x	0,00	7,44	1,88	1,86	2,08	2,02	1,90	0,74	0,20
3.2x	0,00	7,66	1,90	1,90	2,10	2,04	1,88	0,52	0,34
3.1	0,00	2,70	0,76	0,76	0,96	0,84	0,44	0,26	0,02
3.2	0,00	1,80	0,40	0,48	0,68	0,42	0,30	0,16	0,04
4.1x	0,00	4,10	1,16	1,36	1,44	1,44	2,28	1,32	0,72
4.2x	0,00	5,72	1,32	1,30	1,20	1,62	2,16	1,12	0,80
4.1	0,00	0,96	0,26	0,28	0,36	0,50	0,64	0,16	0,32
4.2	0,00	0,80	0,18	0,32	0,28	0,28	0,56	-0,14	0,16

Tabelle 62 Wasseraufnahmekoeffizienten

	1,5 h	3 h	6 h	12 h	24 h	2 d	3 d	4 d
1.1x	0,10	0,09	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03
1.2x	0,11	0,09	0,08	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03
1.1	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
1.2	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
2.1x	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04
2.2x	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04
2.1	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
2.2	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
3.1x	0,11	0,09	0,08	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03
3.2x	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,04	0,04	0,03
3.1	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
3.2	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
4.1x	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
4.2x	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
4.1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
4.2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00

Diagramm 23 Wasseraufnahmekoeffizienten



V Messwerte Chlorideindringung

Tabelle 63 Chloridgehalt in mg/l bezogen auf Prüflösung

Probe Tiefe	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
0 cm - 1cm	205	70	170	49	165	165	115	42
1 cm - 2 cm	63	14	48	12	32	15	33	20
2 cm - 3 cm	29	11	23	11	16	13	25	20
3 cm - 4 cm	16	9	13	8	11	12	15	16

Tabelle 64 Chloridgehalt in % bezogen auf Beton

Probe Tiefe	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
0 cm - 1cm	0,256	0,088	0,213	0,061	0,206	0,206	0,144	0,053
1 cm - 2 cm	0,079	0,018	0,060	0,015	0,040	0,019	0,041	0,025
2 cm - 3 cm	0,036	0,014	0,029	0,014	0,020	0,016	0,031	0,025
3 cm - 4 cm	0,020	0,011	0,016	0,010	0,014	0,015	0,019	0,020

Tabelle 65 Chloridgehalt in % bezogen auf Zement

Probe Tiefe	1x	1	2x	2	3x	3	4x	4
0 cm - 1cm	2,236	0,763	1,791	0,516	1,394	1,394	1,006	0,368
1 cm - 2 cm	0,687	0,153	0,506	0,126	0,270	0,127	0,289	0,175
2 cm - 3 cm	0,316	0,120	0,242	0,116	0,135	0,110	0,219	0,175
3 cm - 4 cm	0,174	0,098	0,137	0,084	0,093	0,101	0,131	0,140

Diagramm 24 Chloridgehalt in mg/l bezogen auf Prüflösung

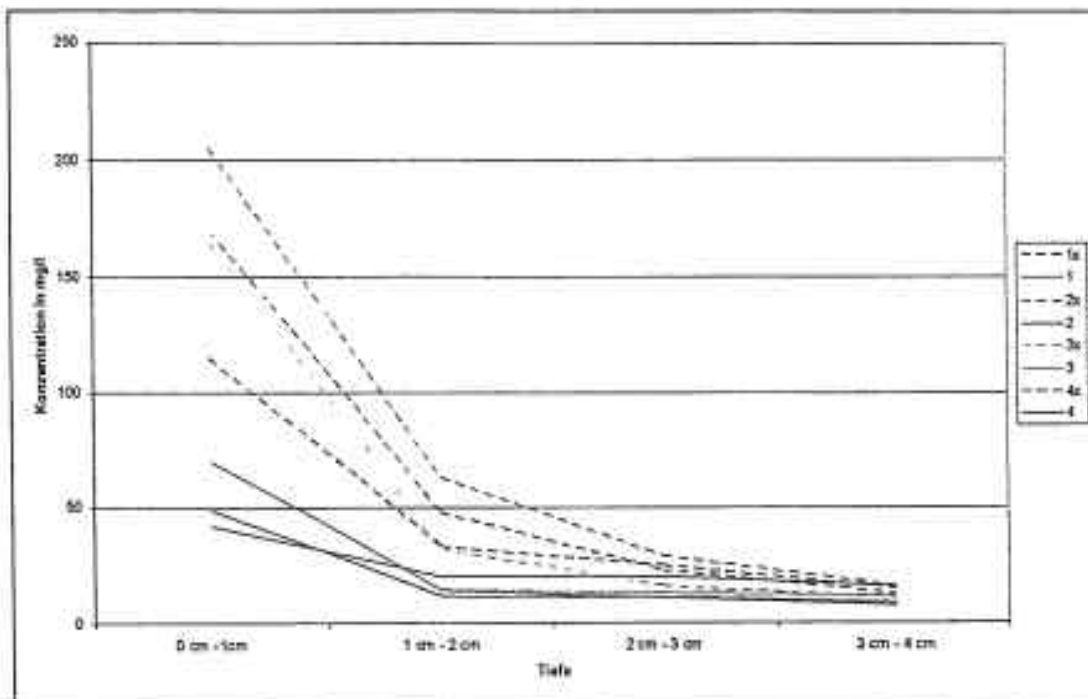


Diagramm 25 Chloridgehalt in % bezogen auf Beton

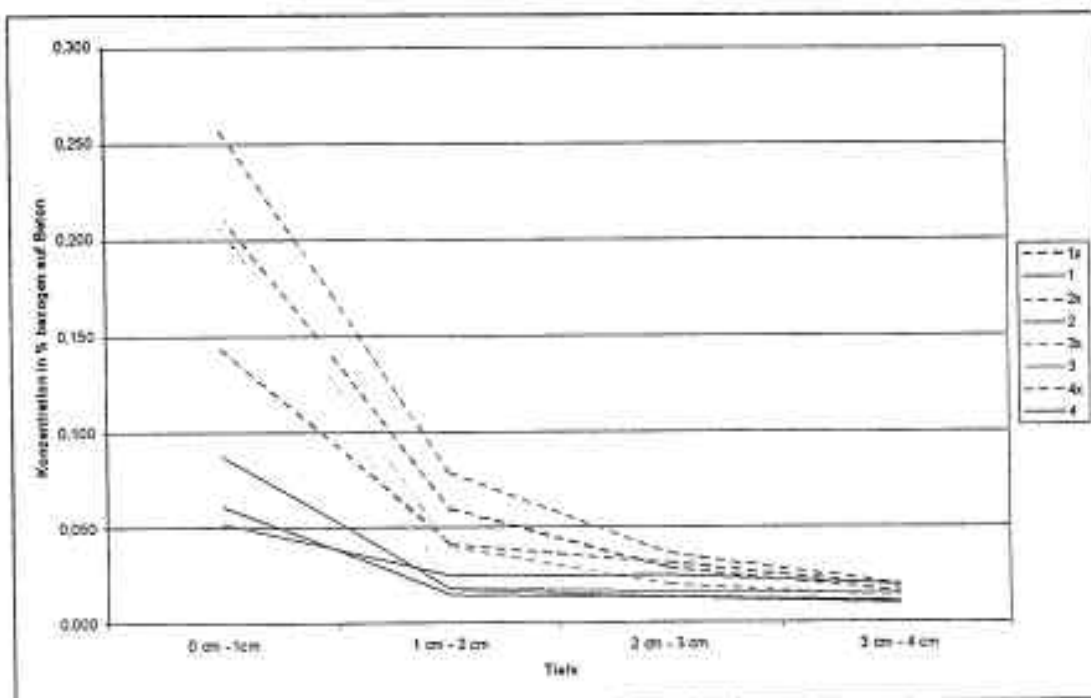
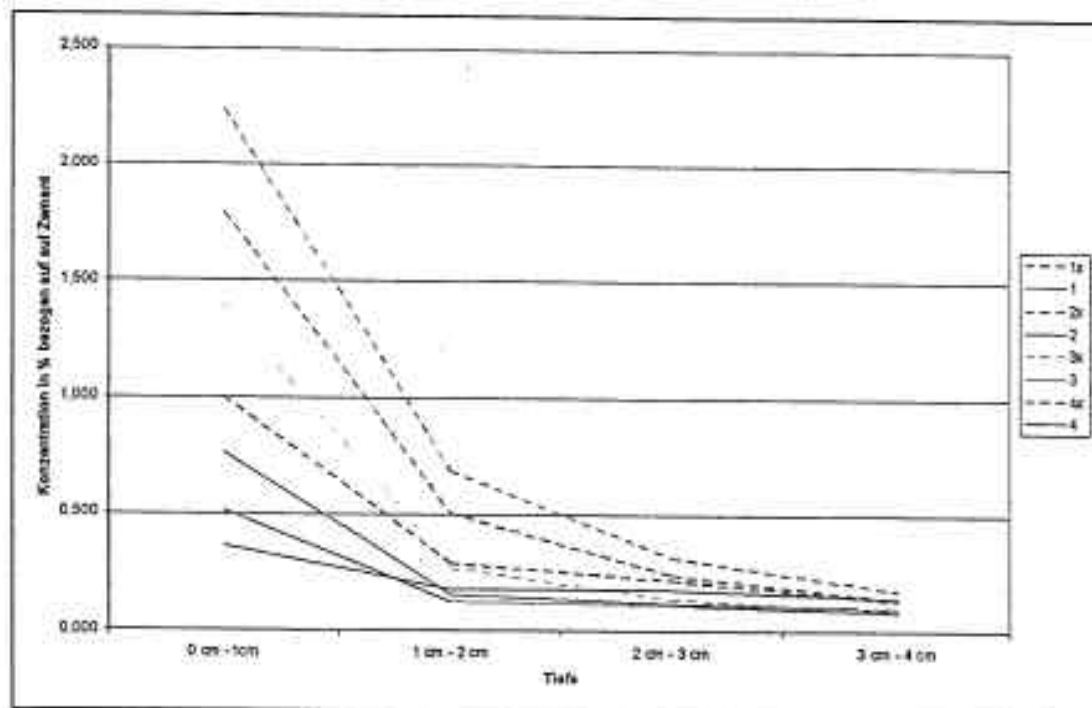


Diagramm 26 Chloridgehalt in % bezogen auf Zement



VI Tabellen aus der DIN

Tabelle 66 Angriffsgrade nach DIN 4030

	1	2	3	4
	Untersuchung	Angriffsgrad		
		schwach angreifend	stark angreifend	sehr stark angreifend
1	pH-Wert	6,5 - 5,5	<5,5 bis 4,5	< 4,5
2	kalklösende Kohlen- säure (CO ₂) mg/l (Marmorlöse- versuch nach Heyer)	15 bis 40	> 40 bis 100	> 100
3	Ammonium (NH ₄ ⁺) mg/l	15 bis 30	> 30 bis 60	> 60
4	Magnesium (Mg ²⁺) mg/l	300 bis 1000	> 1000 bis 3000	> 3000
5	Sulfat ¹⁾ (SO ₄ ²⁻) mg/l	200 bis 600	> 600 bis 3000	> 3000
¹⁾ Bei Sulfatgehalten über 600 mg SO ₄ ²⁻ je l Wasser, ausgenommen Meer- wasser, 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).				

Literaturverzeichnis

- [1] Ein Bollwerk gegen Stoffe, die den Beton im äußeren Bereich durchdringen - Betonqualität verbessern - wirtschaftlich schalen Bau, Kurier 2000 10 (1999) H. 7/8, S. 34-36
- [2] Zeniti, Malik: Bau von Trinkwasserbehältern. Bauausführung. Der Einsatz von wasserabführenden, saugenden Schalungsbahnen, Beton 49 (1999) H. 4, S. 228-229
- [3] Neue Schalungsbahn mit verbesserten Eigenschaften, Wasserwirtschaft 88 (1998) H. 9, S. 453
- [4] Hornung, Werner; Zeniti, Malik: Gegen die „Mikros“. Korrosion. Schalungsbahn vermindert Zersetzungsrisiko von Trinkwasserbehältern, Bautenschutz-Bausanierung 21 (1998) H. 1, S. 40-42
- [5] Zeniti, Malik; Mayr, Hans-Peter: Beton kostengünstig beschichten. Wasserabführende Schalungsbahnen sparen Material, Arbeitszeit und Kosten, Die Bauverwaltung mit Bauamt und Gemeindebau 70 (1997) H. 10, S. 498-499
- [6] Schalungsbahn erhöht Qualität und Lebensdauer. Du Pont, Österreichische Bauzeitung 36 (1997) H. 36, S. 6-8
- [7] Zeniti, Malik; Hornung, Werner: Die Anforderung an Trinkwasserbehälter preiswert und sicher erfüllen, Wasserwirtschaft 87 (1997) H. 2, S. 100-102
- [8] Bresch, Carl-M.: Im Kläranlagenbau erhöhen Schalungsbahnen die sanierungsfreie Lebensdauer, Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau TIS 38 (1996) H. 6, S. 45
- [9] Bresch, Carl-M.: Keine Randerscheinung, Hoch- und Tiefbau 49 (1996) H. 4, S. 40-43
- [10] Müller, Wolfgang: Widerstandsfähige Betonoberflächen. Praxisversuch mit wasserabführenden Schalungsbahnen beim Berliner Brückenbau, bau zeitung 48 (1994) H. 12, S. 62-64
- [11] Bresch, Carl-M.: Schalungsbahnen für homogen-porigen, widerstandsfähigen Beton, Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau TIS 37 (1995) H. 12, S. 51-52

- [12] Betonieren mit Schalungsbahn. Neues Belebungsbecken in der Kläranlage Bad Homburg, Beton 45 (1995) H. 11, S. 824
- [13] Wasserabführende Schalungsbahn senkt Sanierungskosten von Kläranlagen, Wasserwirtschaft 85 (1995) H. 9, S. 464-465
- [14] Zeniti, Malik; Mayr, Hans-Peter: Bessere und kostengünstigere Beschichtung von Beton, Straßen- und Tiefbau 49 (1995) H. 7/8, S. 26-28
- [15] Bresch, Carl-M.: Erfahrungen mit Schalungsbahnen, Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau TIS 37 (1995) H. 8, S. 34-36
- [16] Schuon, Helmut: Glatte Sachen. Inwieweit ist saugende oder nichtsaugende Schalung für die Betonoberfläche verantwortlich, Baumaschinendienst bd 31 (1995) H. 3, S. 376-378
- [17] Beddoe, Robin-E.; Springenschmidt, Einfluss von Schalungseinlagen auf die Dauerhaftigkeit von Beton. (The influence of formwork inserts on the durability of concrete), Betonwerk und Fertigteiltechnik, (Concrete Precasting Plant) BFT 61 (1995) H. 2, S. 80-88
- [18] Müller, Wolfgang: Einfluss von wasserabführenden Schalungsbahnen auf den Beton. Versuche im Labor und in der Praxis, Beton 44 (1994) H. 10, S. 598-599
- [19] Hohmann, Walter; Lehmann, Klaus: Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Betonrandzone bei Wasserbauwerken am Beispiel der 1. Ersatzschleuse Wanne-Eickel, Beton Informationen 34 (1994) H. 2, S. 19-25
- [20] Vißmann, Heinz-Werner: Qualität der Betondeckung. Dichte der Betonrandzone, Beton 44 (1994) H. 5, S. 260-264
- [21] Hermann, Kurt: Verbesserung der oberflächennahen Betonschichten, Cement bulletin 62 (1994) H. 4, S. 3-7
- [22] Müller, Wolfgang: Vorbeugen vor Sanierung. Praxisversuch mit wasserabführenden Schalungsbahnen, Hoch- und Tiefbau 47 (1994) H. 4, S. 50-53
- [23] Schmidt-Morsbach, Jürgen: So wird Sichtbeton - noch - besser, Baugewerbe 93 (1993) H. 20, S. 18-23
- [24] Schmidt-Morsbach, Jürgen: Randbeton aus europäischer Sicht, Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau TIS 35 (1993) H. 8, S. 568-570

- [25] Ein direkter Weg zum Qualitätsbeton, Neues vom Bau 39 (1993) H. 5/6, S. 11
- [26] Karl, Jürgen-Henning; Solacolu, Cornelia: Verbesserung der Betonrandzone. Wirkung und Einsatzgrenzen der saugenden Schalungsbahn, Beton 43 (1993) H. 5, S. 222-225
- [27] Mehr Qualität am Rand, Hoch- und Tiefbau 45 (1992) H. 6, S. 34-36
- [28] Schalungsbahn wirkt gegen Betonschäden, Deutsche Bauzeitschrift 40 (1992) H. 6, S. 930
- [29] Saugfähige Schalungsbahn verbessert Betonflächen. Neue Methode zur Vermeidung von Betonschäden, Element und Bau 28 (1991) H. 4, S. 10-11
- [30] Neue Schalungsbahn für leistungsfähigen Randbeton, Österreichische Bauzeitung 44 (1991) S. 8-10
- [31] Verbesserung am Rande, Hoch- und Tiefbau 44 (1991) H. 9, S. 62
- [32] Torrent, R.J.; Frenzer, G.: Über die Permeabilität des Überdeckbetons, Unterlagen der Firma proceq, Zürich
- [33] Iken, Hans-W.; Lackner, Roman-R.; Zimmer, Uwe-P: Handbuch der Betonprüfung. Anleitungen und Beispiele, 4. Auflage (1994) Beton-Verlag
- [34] Schäffler, Hermann; Bruy, Erhard; Schelling, Günther: Baustoffkunde. Aufbau und Technologie, Arten und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung der Baustoffe; 7. Auflage (1996), Vogel Buchverlag
- [35] Deutscher Betonverein e. V.: Beton-Handbuch. Leitsätze für Bauüberwachung und Bauausführung, 3. Auflage (1995), Bauverlag GmbH
- [36] Bauberatung Zement Bundesverband der deutschen Zementindustrie: Guter Beton. Ratschläge für die richtige Betonherstellung, 19. Auflage (1995), Beton-Verlag
- [37] Diem, Paul: Zerstörungsfreie Prüfmethoden für das Bauwesen, (1982), Bauverlag
- [38] Verein deutscher Zementwerke e. V.: Zement Taschenbuch, 48. Ausgabe (1984), Bauverlag GmbH.

- [39] Wendehorst, Reinhard: Baustoffkunde, 23. Auflage (1992), Vincentz Verlag
- [40] Scholz, Wilhelm; Hiese, Wolfram: Baustoffkenntnis, 14. Auflage (1999), Werner Verlag
- [41] Weigler, Helmut; Karl, Sieghart: Beton. Arten - Herstellung - Eigenschaften, (1998) Ernst & Sohn Verlag
- [42] Ebeling, Karsten; Knopp, Wolfgang; Pickhardt, Roland: Beton. Herstellung nach Norm, 10. Auflage (1995), Beton Verlag
- [43] Mängel, Siegfried; Seeling, Reinhard: Betonherstellung und Betonverarbeitung. Mischen, Transportieren, Einbauen, Verdichten, Spezialbetone und Sondertechniken, (1973) Bauverlag
- [44] Verein deutscher Zementwerke e. V.: Betontechnische Berichte 1995-1997, (1997) Verlag Bau+Technik
- [45] Wittmann, F. H. (Hrsg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3 - Materials science and restoration, Vol 3, (1993), Expert Verlag
- [46] Luley, Hanspeter; Kampen, Rolf; Kind-Barkauskas, Friedbert; Klose, Norbert; Tegelaar, Rudolf: Instandsetzen von Stahlbetonoberflächen - Ein Leitfaden für den Auftraggeber, 7. Auflage, (1997), Beton-Verlag
- [47] Schelling, Günther: Untersuchung an Betonrandzonen mit / ohne FT-Schalungseinlagen, FHT Stuttgart (1995)
- [48] Hygiene-Institut des Ruhrgebiets, Gelsenkirchen, Prüfbericht gemäß KTW-Empfehlung der Arbeitsgruppe „Trinkwasserbelange“ der Kunststoff-Kommission des Bundesgesundheitsamtes, (1997)
- [49] 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
- [50] Zeniti, Malik: Gleichmäßige Betonoberfläche durch Wasser abführende Schalungsbahnen, Betonwerk und Fertigteiltechnik,- Concrete Precasting Plant BFT 65 (1999), H. 12, S. 48-55
- [51] Papworth, Frank; Ratcliffe, Royce: High performance concrete - The concrete future, Concrete international, (1994) H. 10, S. 39-44
- [52] Malone, Philip G.: Use of permeable formwork in placing and curing concrete, US Army Corps of Engineers, (1999), http://www.wes.army.mil/SL/HPMS/tr_sl_99_12.pdf

- [53] Cairns, J.: Enhancements in surface quality of concrete through use of controlled permeability formwork liners, Magazine of concrete research 51 (1999) H. 2, S. 73-86
- [54] Beddoe, R. E.: Der Einfluss von Schalungseinlagen auf die Betonrandzone, Beiträge zum Forschungskolloquium des DafStb, TU München, Oktober (1993), S. 109-113
- [55] Solacolu, Cornelia; Karl, Jürgen Henning: Einfluss saugender Schalung auf die Qualität der Betonrandzone, Philipp Holzmann AG, Zentrales Baustofflabor, Neu-Isenburg (1993)
- [56] Richardson, Mark: Controlled Permeability Formwork, „Meeting of the Structures and Construction Section of the Civil Division and the Irish Concrete Society“, November (1994)
- [57] Suryavanshi, A. K.; Swamy, R. N.: An evaluation of controlled permeability formwork for long-term durability of structural concrete elements, Cement and Concrete Research 27, (1997), H. 7, S. 1047-1060
- [58] Deutscher Beton-Verein, Hrsg.: Arbeitstagung - DafStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“, (1990), Sonderdruck aus Bundesbaublatt
- [59] Binder G. Über den Chlorideinbau und dessen Nachweis in tausalzbeaufschlagten Betonen Zement-Kalk-Gips 46, Nr. 12 (1993) S. 784-791
- [60] Volkwein Andreas Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton, Beton und Stahlbetonbau 88, (1993), Heft 8, S. 223-226
- [61] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Heft 400, (1990), Beuth Verlag
- [62] Dorner, Horst; Kleiner Günther: Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehalts von Beton, DafStb, Heft 401 (1989), Beuth Verlag
- [63] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Prüfung von Beton - Empfehlungen und hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, Heft 422, (1991), Beuth Verlag

Normen

DIN 1045	Beton und Stahlbeton - Bemessung und Ausführung, Juli 1988
DIN 1048	Prüfverfahren für Beton, Teil 1-4, Juni 1991
DIN 18500	Betonwerkstein Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Überwachung, April 1991
DIN 52108	Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe; Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme; Schleifscheiben-Verfahren, August 1988
DIN 4235-2	Verdichten von Beton durch Rütteln; Verdichten mit Innenrüttlern, Dezember 1978
DIN V ENV1992 Teil 1-1 EC 2	Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Juni 1992