

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

**VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY**

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Druckverhältnisse bei Betonierarbeiten mit weichen Betonen im Spezialtiefbau

compressive stresses in concrete with thin viscosity at concreting work
in special foundation engineering

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

Univ.Prof. DI Dr.techn. Hans Georg Jodl

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

Univ. Ass. DI Ingo Heegemann

am

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Gerhard Gruber

0127155

Handelskai 102-112/4/35

A – 1200 Wien

Wien, September 2008

.....

(Gerhard Gruber)

Danksagung

Mein Dank gilt der der Grund- Pfahl und Sonderbau GmbH (GPS) und der Bundestechnischen Prüf- und Versuchsanstalt GmbH (BPV) für die gute Betreuung während der Erstellung der Diplomarbeit.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Thomas Eisenhut, der mir bei der Erstellung der Arbeit mit seinem fachlichen Know-how und seinen Ratschlägen zur Seite gestanden ist. Darüber hinaus bin ich ihm für das Korrekturlesen sehr dankbar. Weiters bedanke ich mich für seine Unterstützung bei der Durchführung der Frischbetondruckmessungen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Ing. Günther Kainrath für den Themenvorschlag, den sehr konstruktiven Gesprächen und Anregungen sowie für sein Engagement in punkto Baustellenbeschaffung zur Betondruckmessung bedanken.

Weiters möchte ich mich neben der Firma Grund- Pfahl und Sonderbau GmbH bei den Firmen Porr AG und Bilfinger Berger Baugesellschaft m.b.H. für die Ermöglichung der Durchführung der Betondruckmessungen an deren Baustellen bedanken.

Ein sehr großer Dank gilt ebenfalls dem ausführenden Personal auf den Baustellen, das mich tatkräftig bei den Arbeiten unterstützt hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir bei der Erstellung der Diplomarbeit behilflich waren.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei Herrn Univ.Prof. DI Dr.techn. Hans Georg Jodl und Herrn Univ. Ass. DI Ingo Heegemann für die Betreuung an der Universität bedanken.

Kurzfassung

Gerhard GRUBER: Druckverhältnisse bei Betonierarbeiten mit weichen Betonen im Spezialtiefbau

Seit einigen Jahren treten im Spezialtiefbau, insbesondere bei weichen Betonen, Probleme hinsichtlich der Stabilität des Frischbetons bei der Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden auf. Durch das Bluten von Beton (Auspressen von Wasser aus dem Frischbeton) kann die Betondeckung verringert werden (bis hin zur Freilegung der Bewehrung), Nachsackungen an der fertig betonierten Betonoberfläche entstehen und optische Mängel auftreten.

Da das Bluten des Betons neben der Betonzusammensetzung auch vom Frischbetondruck abhängt, wird in der vorliegenden Arbeit der Frischbetondruck mittels Baustellenversuchen ermittelt.

Messungen des Frischbetondrucks wurden bereits an Stützen und Wänden im Hochbau durchgeführt. Die Betonierhöhen liegen dort bei max. fünf Metern. Im Spezialtiefbau sind jedoch Betonierhöhen von 20 bis 40 Metern keine Seltenheit. Durch die größeren Betonierhöhen treten wesentlich höhere Frischbetondrücke auf und das Bluten kann dadurch verstärkt werden.

Zur Messung der Betondrücke kamen zwei unterschiedliche Messgerätetypen zum Einsatz. Zum einen wurde ein Druckkissen mit elektrischem Druckgeber verwendet und zum anderen wurden Flüssigkeitsdruckgeber mit piezoresistiver Messtechnik eingesetzt. Beide Messgerätetypen lieferten nahezu gleiche Daten und können somit als gleichwertig angesehen werden. Die Messaufnehmer wurden über die Tiefe in annähernd gleichen Abständen in fünf Ebenen an den Bewehrungskörben befestigt, um den Frischbetondruckverlauf über die Tiefe zu ermitteln. Beendet wurden die Messungen mit dem Abklingen des Betondrucks nach dem Betonierende.

Die Messungen ergaben, dass der Frischbetondruck von der Betonkonsistenz, der Betoniergeschwindigkeit und der Verzögerung der Anfangserhärtung abhängt. Der maximal mögliche Frischbetondruck kann mit dem hydrostatischen Flüssigkeitsdruck abgeschätzt werden.

Zur Berechnung des Frischbetondrucks kann die Erddrucktheorie nach Coulomb mit dem Sonderfall des Erdruhedrucks herangezogen werden. Da der Eingangparameter, der Reibungswinkel des Betons in Abhängigkeit vom Erstarrungszustand, nicht bekannt ist und erst im Labor mittels Versuchen bestimmt werden muss, wird die Berechnung nur exemplarisch durchgeführt.

Abstract

Gerhard GRUBER: pressure relationships at concreting work with soft stressing in special foundation engineering

For some years difficulties in the production of bored piles and diaphragm walls have appeared in special foundation engineering. These difficulties, which show most frequently with soft concrete, originate from the so-called "bleeding of concrete" (squeeze water from fresh concrete), causing the exposure of the reinforcement, optical defects and the sinking of the concreted surface. The bleeding of concrete depends on the concrete composition and its pressure. In this thesis the concrete pressure will be investigated with jobsite measurements.

Measurements of concrete pressure have already been carried out in props and walls in structural building construction. Concrete work is usually done up to a height of five metres. In special foundation engineering, however, work is carried out in a height of 20 to 40 metres. Owing to the greater heights the concrete pressure is substantially higher and thus bleeding is higher.

In the course of this study two different instrument models were employed to measure concrete pressures. A caul with an electric pressure transmitter as well as a fluid pressure transducer with piezo-resistive measurement were used. Both measuring instruments delivered almost precisely the same data and can thus be considered equivalent. The measuring instruments were fastened to the reinforcement cage on five different levels, the distances of which were nearly the same. The measurements were quit with the decay of the concrete pressures.

The measurements proved that the fresh-concrete pressure highly depended on the concrete consistency, the speed of the concreting work and the delay of the hardening. The highest possible concrete pressure can be equalled with the hydrostatic liquid pressure. The calculation of the concrete pressure can be carried out on the basis of Coulomb's earth static pressure theory (rest theory). However, the study presented in this thesis was only exemplary. The initial parameter, the frictional angle of the concrete as a function of its hardening, is unknown and must still be determined in the laboratory by means of tests.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	3
1.1	Ausgangssituation	3
1.2	Zielsetzung	3
2	HERSTELLUNG VON BOHRPFÄHLEN UND SCHLITZWÄNDEN	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Bohrpfähle	4
2.2.1	Definition und Anwendungsgebiet	4
2.2.2	Herstellung von Bohrpfählen mittels verrohrten Bohrens	5
2.3	Schlitzwände	13
2.3.1	Definition und Anwendungsgebiet	13
2.3.2	Herstellung von Schlitzwänden im Zweiphasen-Verfahren mittels Greifer	13
3	BETON	18
3.1	Allgemeines	18
3.1.1	Ausgangsstoffe von Beton	19
3.1.2	Wesentliche Eigenschaften von Frischbeton und deren Prüfungen	25
3.2	Hydratation von Beton	29
3.2.1	Hydratation des Zements	29
3.2.2	Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Beton	31
3.3	Unterschiedliche Betonarten	32
3.4	Bluten von Beton	33
3.4.1	Erscheinungsbild und Auswirkungen des Blutens von Beton	33
3.4.2	Maßnahmen zur Verringerung des Blutens von Beton	35
4	FRISCHBETONDRUCK	40
4.1	Allgemeines	40
4.2	Berechnungsverfahren	40
4.2.1	Berechnung des Schalungsdrucks laut DIN 18218	40
4.2.2	Abschätzung des Frischbetondrucks bei Schlitzwänden	42
4.3	Schalungsdruckmessungen	44
4.3.1	Schalungsdruck bei selbstverdichtendem Beton	44
4.3.2	Messung des Frischbetondrucks von SCC an einer Stützenschalung	46
4.4	Überschlägige Berechnung des Frischbetondrucks mittels Erddrucktheorie zur Auswertung der ermittelten Ergebnisse	47
5	MESSUNG DES FRISCHBETONDRUCKS	49
5.1	Ausgewählte Messverfahren zur Frischbetondruckmessung	49
5.1.1	Allgemeines	49
5.1.2	Druckkissen – DK	49
5.1.3	Flüssigkeitsdruckgeber – FDG	51
5.2	Versuchsaufbau	52
5.2.1	Bohrpfähle	52
5.2.2	Schlitzwände	54
5.3	Versuchsablauf	55

5.3.1 Bohrpfähle	55
5.3.2 Schlitzwände	57
5.4 Versuchsergebnisse	59
5.4.1 Baustelle ÖBB-Brücke, Salzburg	59
5.4.2 Baustelle Budapest – Schlitzwand	67
5.4.3 Baustelle H3-4 Brixlegg – Schlitzwand	72
6 AUSWERTUNG UND INTERPRETATION	77
6.1 Suspensionsdruck	77
6.2 Vergleich zwischen Druckkissen und Flüssigkeitsdruckgeber	78
6.3 Vergleich des Frischbetondrucks in horizontaler und vertikaler Richtung	79
6.4 Druckunterschied bei Schlitzwänden zwischen „Mitte“ und „Rand“	82
6.5 Maximaler Frischbetondruck	85
6.6 Einfluss der Betonkonsistenz auf den Frischbetondruck	87
6.7 Betondruckberechnungen mittels der Erddrucktheorie	89
6.8 Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck	91
6.9 Abfall des Betondrucks bei Unterbrechungen des Bauablaufs	94
6.10 Abfall des Betondrucks innerhalb der ersten Stunde nach Betonierende	95
7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	98
LITERATURVERZEICHNIS	101
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	105
TABELLENVERZEICHNIS	107
ANHANG A:BAUSTELLE SALZBURG, PFAHL P40.17	I
BAUSTELLE SALZBURG, PFAHL P40.17	II
BAUSTELLE SALZBURG, PFAHL P50.16	V
BAUSTELLE BUDAPEST	IX
BAUSTELLE BRIXLEGG	XIV

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangssituation

Seit einigen Jahren treten im Spezialtiefbau, insbesondere bei weichen Betonen, Probleme hinsichtlich der Stabilität des Frischbetons bei der Herstellung von Schlitzwänden und Bohrpfählen auf. Das Auspressen des Wassers aus dem Frischbeton hat unter Umständen eine Verringerung der Betondeckung (bis hin zur Freilegung der Bewehrung), Nachsackungen der Betonoberfläche am Pfahl- bzw. Schlitzwandkopf und optische Mängel zur Folge.

Etwaige Fehler in der Bauausführung der Bauteile konnten ausgeschossen werden, somit ist das Bluten auf den verwendeten Baustoff Beton zurückzuführen. Durch die im Spezialtiefbau üblichen großen Betonierhöhen kommt es zu höheren Frischbetondrücken als im Hochbau. Durch den höheren Frischbetondruck kommt es vermehrt zum Stabilitätsverlust des Betons und folglich zum Auspressen des Wassers aus dem Beton, dem so genannten „Bluten von Beton“.

In der Diplomarbeit von Pekarek Alexander mit dem Titel „Untersuchungen zum Bluten weicher Betone im Spezialtiefbau“ an der Universität für Bodenkultur in Wien wurde bereits das Bluten von Beton unter Druck untersucht. In seiner Arbeit optimierte er anhand von Blutversuchen des Frischbetons die Betonzusammensetzung in Bezug auf das Blutverhalten. In seiner Arbeit wurde der Betondruck von 3 bar anhand von den in der Literatur vorhandenen Berechnungen, die sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern, angenommen. Da neben der Betonzusammensetzung auch der Frischbetondruck eine wesentliche Rolle beim Bluten von Beton spielt, wird in dieser Arbeit der Betondruck mittels Baustellenversuchen ermittelt.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es mittels Baustellenversuchen den Frischbetondruck bei der Erstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden zu messen. Es soll der zeitliche Verlauf des Frischbetondrucks über die Tiefe bestimmt werden. Weiters soll ein möglicher Ansatz zur Berechnung des Frischbetondrucks aufgezeigt werden (siehe Abschnitt 4.4 sowie 6.7).

2 HERSTELLUNG VON BOHRPFÄHLEN UND SCHLITZWÄNDEN

2.1 Allgemeines

Es werden nur jene Herstellungsverfahren behandelt, die für die später beschriebenen Versuche relevant sind. Bei der Herstellung von Bohrpfählen kommt das Verfahren des verrohrten Bohrens mittels Zweischalengreifer unter Einsatz einer hydraulischen Verrohrungsmaschine zum Einsatz, bei den Schlitzwänden kommt das Zweiphasen-Verfahren mittels Greifer zur Anwendung.

2.2 Bohrpfähle

2.2.1 Definition und Anwendungsgebiet

Bohrpfähle werden unter anderem wie folgt definiert: „Bohrpfähle sind Ortbetonpfähle, die in einem in den Baugrund gebohrten Hohlraum durch Einbringen von Beton, gegebenenfalls mit Bewehrung, hergestellt werden. Der Hohlraum wird dabei entweder verrohrt, unverrohrt, unverrohrt mit Stützflüssigkeit oder unverrohrt mit durchgehender Bohrschnecke hergestellt.“¹

Das Anwendungsgebiet des Greiferbohrverfahrens kann wie folgt definiert werden: *„Das Greiferbohrverfahren unter Einsatz hydraulischer Verrohrungsmaschinen ist grundsätzlich in allen Bodenformationen anwendbar, besonders aber in wasserführenden, rolligen Böden mit hohem Anspruch an die Verrohrungstechnik, ferner dort, wo sehr viel Meißelarbeit erforderlich ist. Wegen der systembedingten Erschütterungen ist der Einsatz von Meißeln in unmittelbarer Nähe von Bebauungen allerdings nur unter großem Vorbehalt zu empfehlen.“*²

¹ Buja 2001, S. 48.

² Buja 2001, S. 229.

Bohrpfähle werden üblicherweise bis zu einer Tiefe von 70 m hergestellt. Die gebräuchlichsten Pfahldurchmesser liegen zwischen 60 und 120 cm.

2.2.2 Herstellung von Bohrpfählen mittels verrohrten Bohrens

2.2.2.1 Geräte zur Bohrpfahlherstellung

Zur Herstellung von verrohrten Bohrpfählen mittels Bohrgreifer und unter Einsatz einer hydraulischen Verrohrungsmaschine werden folgende Geräte benötigt:

- Seilbagger
- Hydraulisch oszillierende Verrohrungsmaschine
- Verrohrung
- Bohrgreifer und Meißel
- Betonierrohre und Schüttrohrtrichter

Üblicherweise kommen bei der Bohrpfahlherstellung Raupenseilbagger mit einem Dienstgewicht von 30 bis zu 150 t zur Anwendung. Diese erlauben den Anbau schwerer Zusatzein-



richtungen wie z.B. einer Verrohrungsmaschine. Im Normalfall stehen zwei Arbeitswinden zur Verfügung, die den Bohrbetrieb ermöglichen und somit das Heben und Senken sowie das Öffnen und Schließen des Greifers ermöglichen. Die Winden werden in der Regel hydraulisch angetrieben und besitzen Freifallbremsen. Die Freifallbremsen können vollständig gelöst werden und ermöglichen ein Ablassen mit Fallgeschwindigkeit, bei teilweise gelöster Bremse kann die Sinkgeschwindigkeit an die Arbeitsbedürfnisse angepasst werden.

Abbildung 2-1: Seilbagger mit Verrohrungsmaschine

Die Auslegerverstellung kann über hydraulische Verstellzylinder oder üblicherweise mittels hydraulisch angetriebener Verstellwinden erfolgen. Moderne Seilbagger besitzen ein teleskopierbares Raupenfahrwerk, das für den Transport zusammengefahren werden kann, um damit die Transportbreite zu verringern.

Die Verrohrungsmaschine dient zum Aufnehmen und Ausrichten sowie zum Eindrücken und Ziehen der Bohrröhre. Die Drehbewegung der Bohrröhre erfolgt oszillierend und setzt dadurch die Mantelreibung herab.

„Die Maschinen bestehen aus dem Grundrahmen, einer hydraulischen Rohrschelle mit Spannzylinder, zwei Hydraulikzylinder für die Auf- und Abwärtsbewegung sowie zwei Hydraulikzylinder für die Oszillation. Ferner ist die Ausrüstung mit einer zusätzlichen oberen Rohrführung möglich.“³

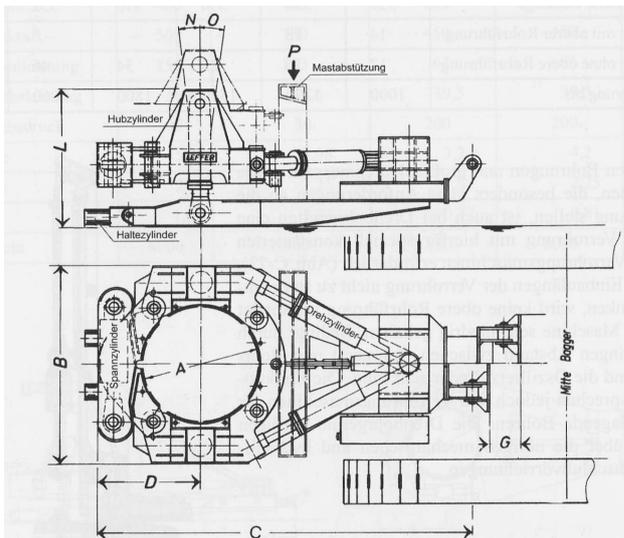


Abbildung 2-2: Hydraulische Verrohrungsmaschine System Leffer⁴

Üblicherweise ist die Verrohrungsmaschine am Raupenseilbagger montiert, um Reaktionskräfte aufnehmen zu können. Der Hydraulikantrieb erfolgt entweder über den Seilbagger oder über ein eigenständiges Hydraulikaggregat.

³ Buja 2001, S. 107.

⁴ Buja 2001, S. 112.

Die Verrohrung übernimmt im nicht ausreichend standfesten Boden die Stützung der Bohrlochwandung bis zur Einbringung des Betons. Als Rohrsysteme haben sich fast ausschließlich Rohre mit Schnellverschlüssen durchgesetzt, die so genannten Nippelrohre. Es gibt ein- sowie doppelwandige Bohrröhre, letztere können auch in starken Verrohrungsmaschinen eingesetzt werden, um die höheren Hubleistungen zu verkraften. Eines der wichtigsten Bauelemente ist eine wasserdichte Rohrverbindung, die im Normalfall aus hochfestem Vergütungsstahl hergestellt wird. Die Rohrverbindungen müssen hohe Drehmomente sowie Zug- und Druckkräfte schadlos übertragen können. Die Verbindung der Rohre erfolgt mittels Schrauben, die gleichmäßig über den Umfang verteilt sind. Zum leichteren Aufsetzen der Verrohrung sind Führungen aus Schlitzern und Nippeln angeordnet.

Zum Schutz des ersten Bohrrohres wird ein Schneidschuh am untersten Bohrrohr aufgeschraubt. Die Zahnform und Zahnart muss auf den jeweils anstehenden Boden abgestimmt werden, um ein optimales Arbeitsergebnis zu erzielen. Die Schneidzähne bestehen üblicherweise aus Hartmetall.



Abbildung 2-3: Bohrrohr mit Schneidschuh

In der Regel kommen Bohrgreifer im Zweiseilbetrieb zum Einsatz. Das erste Seil befindet sich am Schließmechanismus des Greifers, das zweite am Greifergehänge. Beim Einführen des Greifers in das Bohrrohr ist der Greifer geschlossen, damit er leichter einzufädeln ist. Danach wird der Greifer mittels des ersten Seils geöffnet und die Bremse des zweiten Seils gelöst bis der Greifer auf den Bohrlochgrund trifft. Nun werden die beiden Greiferschalen mit dem ersten Seil geschlossen. Mittels des zweiten Seils wird der Greifer nach oben gezogen und kann entleert werden.

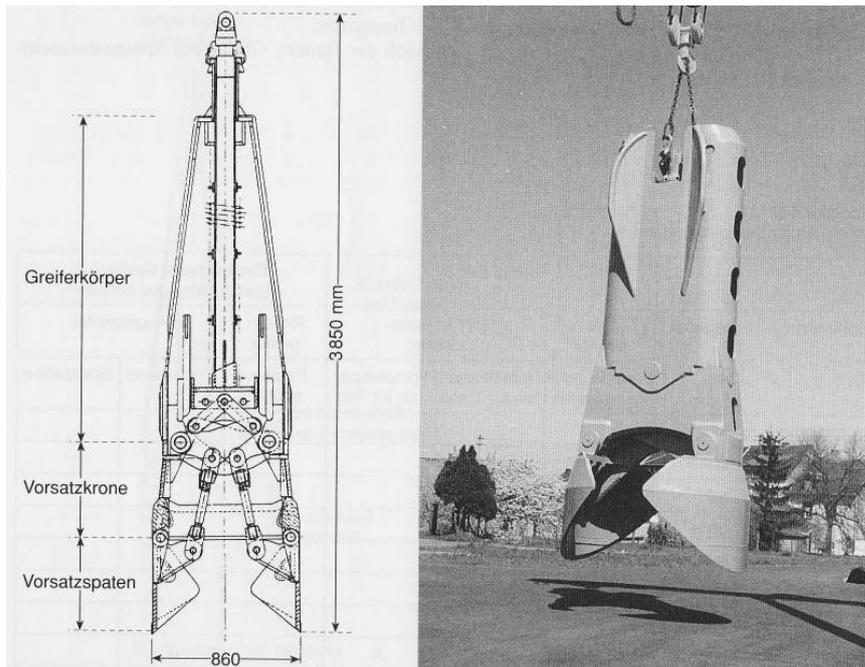


Abbildung 2-4: Vorsatzgreifer HW 90/90⁵

Um verhärtete Bodenschichten zu durchörtern, muss der Greifer gegen einen Meißel ausgetauscht werden. Er dient nur zum Lösen und nicht zum Fördern des Bodens. Es gibt eine Vielzahl von Bohrmeißeltypen, die für die unterschiedlichen Bodenarten mittels verschiedener Kronentypen angepasst werden. Es gibt auch so genannte Wendemeißel, das heißt, dass jedes Ende mit einer Schneide bestückt ist.

Um den Beton unter Wasser ordnungsgemäß einzubauen, werden so genannte Schüttrohre benötigt, um ein Vermischen des Betons mit der im Bohrloch befindlichen Flüssigkeit (Grundwasser oder Stützflüssigkeit) zu vermeiden. Die Schüttrohre werden mittels spezieller wasserdichter Kupplungen und Schnellverschlüssen miteinander verbunden und können dadurch beliebig verlängert werden. Das Ende des Schüttrohres wird nicht am Bohrlochgrund aufgesetzt, sondern knapp darüber gehalten, um das Auslaufen des Betons zu ermöglichen. Dafür wird eine eigene Abfangschelle mit beweglichen Klappen an der Bohrrohroberkante aufgesetzt. Bei geschlossenen Klappen kann das Schüttrohr auf die Abfangschelle aufgesetzt werden und vom Seil des Seilbaggers getrennt werden, um weitere Schüsse aufzusetzen oder abzunehmen. Bei geöffneter Klappe kann das Schüttrohr gezogen werden, ohne

⁵ Schmidt; Seitz 2000, S. 228.

die Abfangschelle dafür wegheben zu müssen. Zum Betonieren wird am oberen Ende des Schüttrohrs der Schüttrohrtrichter aufgesetzt, um den Beton einfüllen zu können.

2.2.2.2 Arbeitsablauf der verrohrten Bohrpfahlherstellung

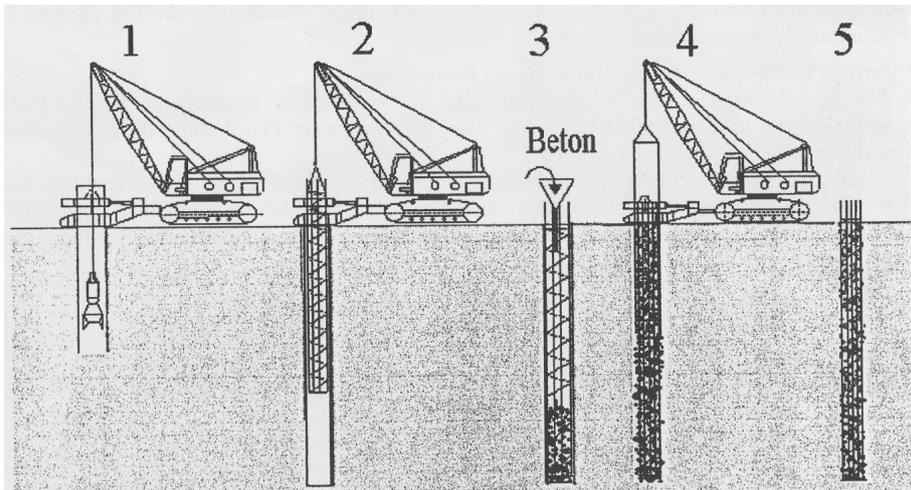


Abbildung 2-5: Herstellungsschema für die Bohrpfahlherstellung⁶

Die Bohrpfahlherstellung gliedert sich in folgende Abschnitte, siehe Abbildung 2-5:

- Ansetzen und Ausrichten der Bohreinheit
- Bodenaushub mittels Greifer
- Einbau der Bewehrung und Einstellen des Betonschüttrohrs
- Betonieren und Ziehen der Bohr- sowie der Schüttrohre
- Pfahlkopf für Anschlussarbeiten vorbereiten

⁶ Buja 2001, S. 229.

Nach dem Einmessen des Bohrpfahlansatzpunktes wird die Bohreinheit - bestehend aus Seilbagger und Verrohrungsmaschine - in Position gebracht und das erste Bohrrohr mit Schneidschuh eingesetzt. Danach wird das Bohrrohr in der vorhergesehen Neigung ausgerichtet. Mittels einer oszillierenden Drehbewegung der Verrohrungsmaschine wird das Bohrrohr in den Boden gedrückt. Der innerhalb der Verrohrung befindliche Boden wird durch den Bohrgreifer gelöst und an die Oberfläche gefördert. Parallel zum Bodenaushub wird die Verrohrung weiter in den Untergrund vorgetrieben, um ein Voreilen der Bohrrohre sicherzustellen. Andernfalls können Auflockerungszonen im Untergrund entstehen und die Tragfähigkeit des fertigen Pfahles kann reduziert werden. Im Grundwasser ist ein Überdruck innerhalb der Verrohrung mittels Wasserauflast sicherzustellen, um Auflockerungen im Bereich des Schneidschuhs durch den Strömungsdruck zu vermeiden. Der Wasserspiegel im Bohrrohr muss mindestens einen Meter über dem Außenwasserspiegel liegen.

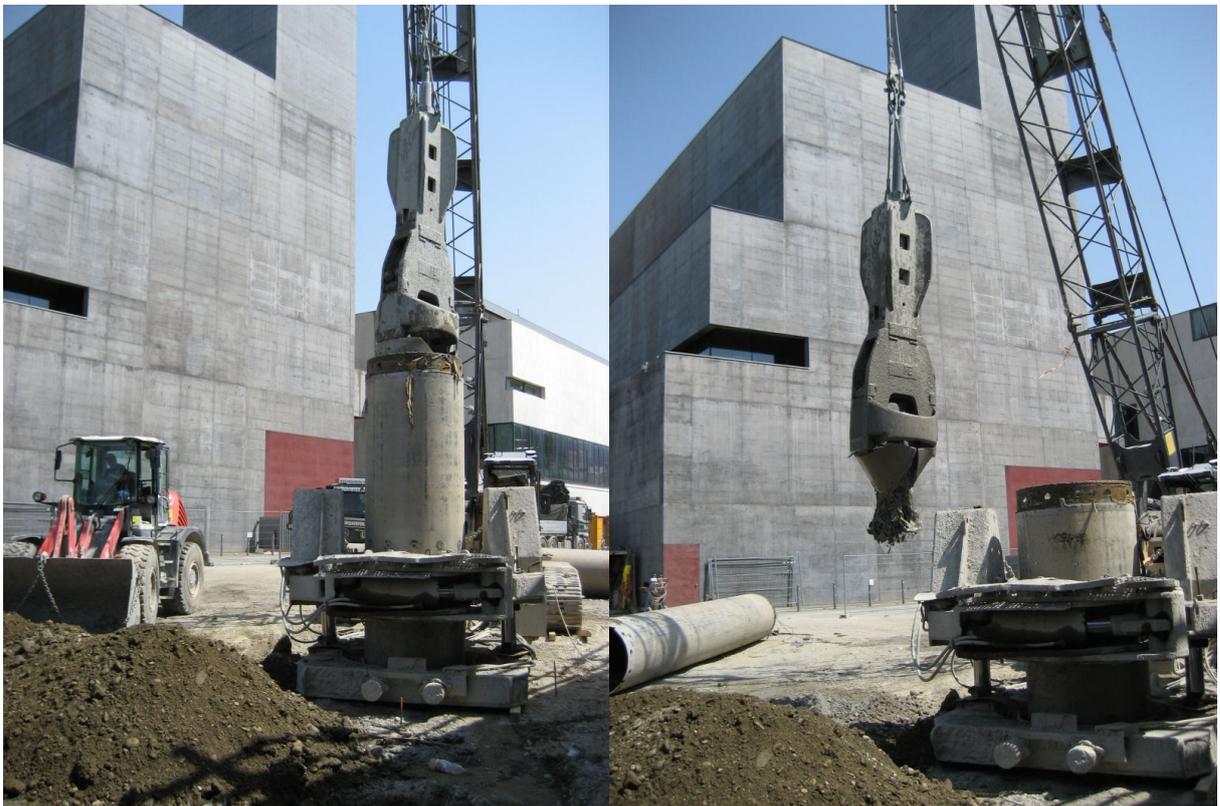


Abbildung 2-6: Aushub mittels Greifer

Nach Erreichen der gewünschten Pfahltiefe kann der Bewehrungskorb eingebaut werden. Dazu wird der Bewehrungskorb mit dem Seilbagger aufgerichtet und in das Bohrloch eingefädelt. Ist der Bewehrungskorb länger als 15 m wird er in mehrere Teile, so genannte Schüsse, unterteilt, nacheinander eingebaut und mittels Übergreifungsstoß gestoßen.

Befindet sich im Bohrloch eine Flüssigkeit (Grundwasser oder Stützflüssigkeit) muss der Beton im Kontraktorverfahren eingebracht werden. Beim Kontraktorverfahren wird der Beton mit Hilfe von Schüttröhren, die ständig im Beton eingetaucht sein müssen, am Bohrlochfuß eingebracht und dadurch vor Entmischung und Verunreinigungen mit der Flüssigkeit im Bohrloch geschützt. Die einzelnen Rohrschüsse werden mit Hilfe von Muffen gestoßen und mit Verschlussseilen verbunden. Knapp über der Bohrlochsohle wird das Betonierrohr am Pfahlkopf abgefangen und der Schüttrohrtrichter zum Betonieren aufgesetzt.

Zu Beginn der Betonierarbeiten beim Kontraktorverfahren wird das Schüttrohr mit einem Betonierball (Papierpfropfen oder Gummiball) verschlossen, um ein Vermischen des Betons mit der im Schüttrohr befindlichen Flüssigkeit zu verhindern. Der Beton muss so in den Trichter gegossen werden, dass er spiralförmig (um Lufteinschlüsse zu verhindern) ins Betonierrohr läuft. Durch den Beton im Schüttrohrtrichter wird der Betonierball nach unten gedrückt und die Stützflüssigkeit im Betonierrohr verdrängt. Nachdem der Beton im Schüttrohr den Pfahlfuß erreicht hat, wird der Betonierball aus dem Rohr gedrückt und steigt nach oben auf. Nun ist es zur Vermeidung von Betonfehlern wichtig, das Schüttrohr immer mindestens einen Meter im Frischbeton eingetaucht zu halten.

Der erste Schuss des Schüttröhres wird erst dann abgeschlagen, wenn der Beton im Schüttrohr auf Grund der großen Eintauchtiefe des selben nicht mehr nach unten fließen kann. Es sind nur soviel Schüttrohrschüsse auszubauen, dass sich nach dem Abschlag das Rohrende des Betonierrohrs noch im Frischbeton befindet. Zum Abschlagen des Schüttröhres wird zuerst das Verriegelungsseil der Muffe zwischen Rohr und Trichter gezogen, der Schüttrohrtrichter abgenommen und zur Seite gelegt. Danach können die einzelnen Schüsse des Schüttröhres ausgebaut werden. Diese sind nach dem Ausbau gründlich zu reinigen, um Verkrustungen, die einen späteren Betoniervorgang behindern könnten, zu verhindern. Nach dem Ausbau der jeweiligen Schüttrohrschüsse wird der Schüttrohrtrichter wieder aufgesetzt und der Betoniervorgang fortgesetzt.

Begleitend zum Betoniervorgang werden immer wieder Teile des Bohrrohrs gezogen. Der erste Schuss muss relativ rasch gezogen werden, um ein mit Hochziehen des am Pfahlfuß befindlichen Betons und des Bewehrungskorbes zu verhindern. Ist der Beton am Pfahlfuß bereits soweit angesteift, dass durch die hohen Reibungskräfte zwischen Beton und Bohrrohr der Beton mit nach oben gezogen wird, ist die Tragfähigkeit des Pfahls nicht mehr gegeben. Zum Ziehen der Verrohrung mittels Verrohrungsmaschine wird der Schüttrohrtrichter samt Schüttrohr mit einem Seil vom Bohrpfahlgerät leicht angehoben, um die Abfangschelle entfernen zu können. Das zweite Seil wird mittels eines Gehänges am Bohrrohrende festgemacht, um diese später wegzuheben. Danach wird ein Schuss der Verrohrung mithilfe der

Verrohrungsmaschine soweit gezogen bis die Schrauben der Rohrverbindung über die Verrohrungsmaschine hinausragen. Nun werden die einzelnen Schüsse voneinander getrennt, das Bohrrohr um ca. einen Meter angehoben und die Abfangschelle für das Schüttrohr wieder auf die Bohrröhroberkante gelegt, um das Schüttrohr samt Trichter aufzusetzen und das Seil vom Bohrpfahlgerät zu lösen. Anschließend wird der ausgebaute Schuss des Bohrrohrs seitlich abgelegt und der Betoniervorgang fortgesetzt.



Abbildung 2-7: Betoniervorgang mit Blick ins Bohrrohr

Ist der Pfahl fertig betoniert kann die restliche Verrohrung gezogen werden und das Bohrpfahlgerät auf den nächsten Ansatzpunkt umgestellt werden.



Abbildung 2-8: Fertig abgestemte Pfahlköpfe

2.3 Schlitzwände

2.3.1 Definition und Anwendungsgebiet

Schlitzwände werden unter anderem wie folgt definiert: „*Mittels Spezialgreifer oder Fräsen wird der Baugrund schlitzförmig durchörtert, wobei die Grabenwände durch eine Stützflüssigkeit kontinuierlich gesichert werden. Nach dem Erreichen der gewünschten Wandtiefe wird die Stützflüssigkeit durch Ortbeton, Stahlbetonfertigteile oder Dichtwandmassen ersetzt, so dass statisch wirksame und grundwasserrückhaltende Wände oder reine Dichtwände entstehen.*“⁷

Die Anwendungsgebiete von Schlitzwänden liegen bevorzugt bei Baugruben im städtischen Gebiet, wie zum Beispiel für Tunnelbauten in Wand-Deckel-Bauweise. Weitere Einsatzgebiete sind die Erstellung von wasserdichten Baugruben mit einer minimalen Anzahl von Fugen und Bereiche in denen eine hohe Leistung für große Bauvolumen gefordert ist.

2.3.2 Herstellung von Schlitzwänden im Zweiphasen-Verfahren mittels Greifer

2.3.2.1 Geräte zur Schlitzwandherstellung

Zur Schlitzwandherstellung werden neben dem Seilbagger und den Betonierrohren samt Schüttrohrtrichter, die bereits im Kapitel Geräte zur Bohrpfahlherstellung beschrieben worden sind, noch weitere Geräte benötigt, die sich in der folgenden Auflistung befinden:

- Schlitzwandgreifer und Meißel
- Abschalelemente
- Rohrziehmaschine
- Suspensionsaufbereitungsanlage

⁷ Buja 2001, S. 701.

Ein mechanischer Schlitzwandgreifer besteht aus einem Grundkörper, den auswechselbaren Greifschaufeln und einem Rollensystem für die Bewegung des Greifers. Die Greiferbreite hängt von der Schlitzwandbreite ab und ist mit dieser identisch. Gängige Greiferbreiten liegen zwischen 500 und 1200 mm bei einer Segmentlänge von 2800 bis 4200 mm und Greiferhöhen von bis zu 10 Metern. Die Funktionsweise von mechanischen Schlitzwandgreifern ist mit jener von Zweiseilgreifern bei der Bohrpfahlherstellung ident. Für das Durchröhren von Felsblöcken oder verhärtete Bodenschichten werden Meißel, die geringfügig schmaler sind als die Schlitzwandbreite, verwendet. Die Gewichte liegen zwischen ca. 6 und 10 t. Die Wahl der Schneide richtet sich nach der Art des zu lösenden Bodens.

Abschalelemente werden zur Trennung zweier benachbarter Schlitzwandlamellen benötigt. Hierfür können neben Fertigteilen, die im Baugrund verbleiben, auch Stahlrohre verwendet werden. Letztere werden vor dem Betonieren als stirnseitige Schlitzwandbegrenzung in den Schlitz gestellt und nach dem Ansteifen des Betons wieder gezogen. Die Rohre werden untereinander mit Bajonettverschlüssen schnell und einfach verbunden.

Zum Ziehen der Abschalrohre wird eine Rohrziehmaschine verwendet. Diese wird bereits beim Einbau der Abschalrohre auf die Leitwand gestellt und dient auch zum Schließen und Öffnen des Bajonettverschlusses. Die Maschine wird nur zum Ziehen und nicht zum Ablassen der Rohre verwendet und ist sehr kompakt gebaut. Die Rohrziehmaschine besitzt des Weiteren ein eingebautes Hydraulikaggregat. Die Hubkräfte liegen zwischen 130 und 150 t bei einer Abmessung von ca. 2,5 m Breite, 2,5 m Länge und einer Höhe von ca. 2 Metern.

Um die Bentonitsuspension herzustellen, zu lagern, zu pumpen und zu regenerieren wird eine Suspensionsaufbereitungsanlage benötigt. Die Suspensionsaufbereitung ist ein reines Hilfsgewerk bei der Schlitzwandherstellung. Der wichtigste Teil einer Aufbereitungsanlage ist die Entsandungsanlage. Sie dient zum Reinigen der verunreinigten Bentonitsuspension. Die Gebrauchtsuspension läuft zuerst über ein Grobsieb und anschließend durch einen oder mehreren Zyklone, wo die Bodenfeinteile von der Bentonitsuspension getrennt werden. Die ausgeschiedenen Feinteile werden danach auf einem Rüttelsieb entwässert und anschließend ausgetragen. Entsandungsanlagen können beliebig erweitert werden um das gewünschte Reinigungsziel zu erlangen.



Abbildung 2-9: Aufbereitungsanlage

Für die Lagerung des Bentonits, die vorgequollene Frischsuspension und Gebrauchtsuspension werden Vorratssilos in ausreichender Größe benötigt. Um die Stützflüssigkeit anzumischen wird ebenfalls ein Mischer benötigt. Neben Förder- und Umwälzpumpen zur Suspensionsbeförderung ist auch eine ausreichende Strom- und Wasserversorgung notwendig.

2.3.2.2 Arbeitsablauf der Schlitzwandherstellung

Die Herstellung einer Schlitzwandlamelle gliedert sich in folgende Teile:

- Herstellen der Leitwand
- Aushub der Schlitzwandlamelle
- Einbau der Abschalrohre und der Bewehrung
- Betonieren im Kontraktorverfahren
- Ziehen der Abschalrohre

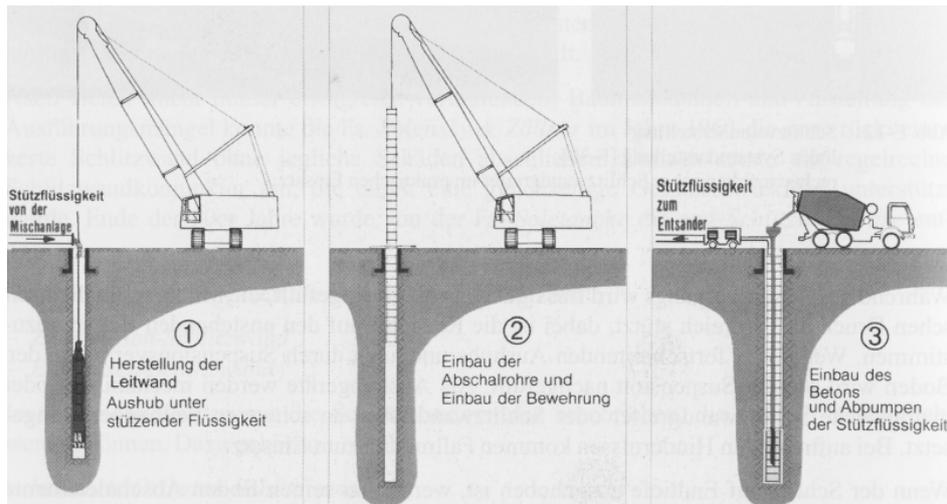


Abbildung 2-10: Herstellungsschema einer Schlitzwandlamelle⁸

Bevor die Schlitzwand mittels Greifer ausgehoben werden kann, muss die Leitwand hergestellt werden. Sie dient zur Führung des Aushubwerkzeuges und zur Stützung des oberen Bodenbereichs. Um die Schalung für die Leitwand einzustellen werden Künetten ausgehoben und außen mit Beton verfüllt.

Beim Aushub der Lamelle wird die Stützung des anstehenden Bodens über die Stützflüssigkeit sichergestellt. Diese muss in ausreichender Menge vorgehalten werden, um auch einen eventuellen Suspensionsverlust ausgleichen zu können. Während des gesamten Aushubs darf ein bestimmter Flüssigkeitsstand aufgrund der Standsicherheit des Schlitzes nicht unterschritten werden. Am Ende des Aushubes werden die Vertikalität der Schlitzwand überprüft und vorhandene Ausbrüche festgestellt und aufgezeichnet.

Nachdem der Schlitz bis zur Endtiefe ausgehoben worden ist, kann mit dem Einbau der Abschalrohre begonnen werden. Zur seitlichen Abgrenzung der Lamelle werden die einzelnen Rohrschüsse an der Rohrziehmaschine verbunden und mittels Seilbagger in die Schlitzwandlamelle abgelassen. Nachdem die Abschalrohre eingebaut wurden, wird die Bentonit-suspension in der Aufbereitungsanlage regeneriert.

Ist die Suspension ausreichend gereinigt, werden analog der Bohrpfehlherstellung die Bewehrungskörbe, Schüttrohre und Schüttrohrtrichter eingebaut.

⁸ Buja 2001, S. 730.



Abbildung 2-11: Einbau der Abschaltrohre und der Bewehrung

Bevor mit dem Betonieren begonnen werden kann, wird die Bentonitsuspension um ca. einen Meter abgesenkt, damit beim Betoniervorgang die Stützflüssigkeit nicht überläuft. Der Betoneinbau erfolgt im Kontraktorverfahren. Begleitend zum Betoniervorgang wird die vom Beton verdrängte Bentonitsuspension abgepumpt, gereinigt und in Silos zwischengelagert.

Nach dem Betoniervorgang, kurz nach dem Erstarrungsbeginn des Betons, werden die Abschaltrohre gezogen. Nach dem Ziehen der Rohre verbleibt eine halbkreisförmige Fuge an der die nächste Lamelle einbindet.

3 BETON

3.1 Allgemeines

„Beton wird aus Zement, Wasser und Gesteinskörnung (bisher als Zuschlag bezeichnet) hergestellt. Zur Beeinflussung bestimmter Betoneigenschaften können mehlfeine oder flüssige Betonzusätze zugegeben werden. Dem Frischbeton wird eine gewünschte Form gegeben, die er im erhärteten Zustand, als künstlicher Stein, beibehält.“¹

Aus den vielen Möglichkeiten der Zusammensetzung und Anwendungen des Baustoffs Beton ergeben sich mehrere Unterscheidungen, einige davon sind:

- **Druckfestigkeit**

von

- C8/10

$$f_{ck,cyl} = 8 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ck,cube} = 10 \text{ N/mm}^2$$

bis

- C100/115

$$f_{ck,cyl} = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ck,cube} = 115 \text{ N/mm}^2$$

- **Verwendungszweck**

- Unterwasserbeton
- Bohrpfahlbeton
- SCC-Beton

Weiters sind zu unterscheiden:

- **Beton nach Eigenschaften**

„Beton, für den die geforderten Eigenschaften und zusätzliche Anforderungen dem Hersteller gegenüber festgelegt sind, der für die Bereitstellung eines Betons, der den geforderten Ei-

¹ ÖNORM B 4710-1 2004, S. 16.

genschaften und den zusätzlichen Anforderungen entspricht, verantwortlich ist.“²

- **Beton nach Zusammensetzung**

„Beton, für den die Zusammensetzung und die Ausgangsstoffe, die verwendet werden müssen, dem Hersteller vorgegeben werden, der für die Lieferung eines Betons mit der festgelegten Zusammensetzung verantwortlich ist.“³

3.1.1 Ausgangsstoffe von Beton

3.1.1.1 Gesteinskörnung

Gesteinskörnung ist körniges Material für die Verwendung im Bauwesen, speziell für die Betonherstellung. Gesteinskörnungen können natürlich Ursprungs, industriell hergestellt oder recycelt sein.⁴

Da Beton zu 75 M.-% aus Gesteinskörnung, besteht, ist es wichtig dessen Eigenschaften festzulegen. Dies geschieht in der ÖNORM EN 12620 sowie in der ÖNORM B 3131.

Man unterscheidet Gesteinkörnungen für Normalbeton zwischen:

natürlichen Gesteinskörnungen:

- nicht gebrochen, Sand und Kies
- gebrochen, Brechsand, Splitt und Schotter

industriell hergestellte Gesteinkörnungen:

- Hochofensand und Hochofenschlackensplitt aus Stahlwerken

² ÖNORM B 4710-1 2004, S. 16.

³ ÖNORM B 4710-1 2004, S. 16.

⁴ Vgl. ÖNORM EN 12620 2005, S. 6.

rezyklierte Gesteinskörnungen:

- aus Beton- oder Mauerwerksabbruch

Die Gesteinskörnung wird über die Korngröße klassifiziert, siehe nachfolgende Tabelle.

Tabelle 3-1: Bezeichnung der Gesteinskörnungen⁵

Gesteinskörnungen mit		Bezeichnung
Kleinstkorn [mm]	Größtkorn [mm]	
0	≤ 0,063	Füller (Gesteinsmehl)
0	≤ 4	feine Gesteinskörnung (Sand, Brechsand)
≥ 4	z.B.: 32	grobe Gesteinskörnung (Kies, Splitt, Edelsplitt)

„Der Korngröße entsprechend werden die Gesteinskörnungen in Korngruppen unterteilt, die nach ihrem Kleinstkorn und Größtkorn bezeichnet werden. So bedeutet Korngruppe 4/8, dass der überwiegende Teil der Körnung durch das 8-mm-Quadratlochsieb fällt und auf dem 4-mm-Quadratlochsieb bleibt. (...) Die angelieferten Korngruppen enthalten häufig größere oder kleinere Einzelkörner, als sie nach den Grenzsieben aufweisen sollten. (...) Es sind bis zu 20% Unterkorn bzw. 15% Überkorn zulässig.“⁶

Die Kornzusammensetzung von Gesteinskörnungen wird durch die Sieblinie dargestellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt als Beispiel die Sieblinie eines Korngemisches mit 16 mm Größtkorn.

⁵ Weber 2005, S. 22.

⁶ Weber 2005, S. 21.

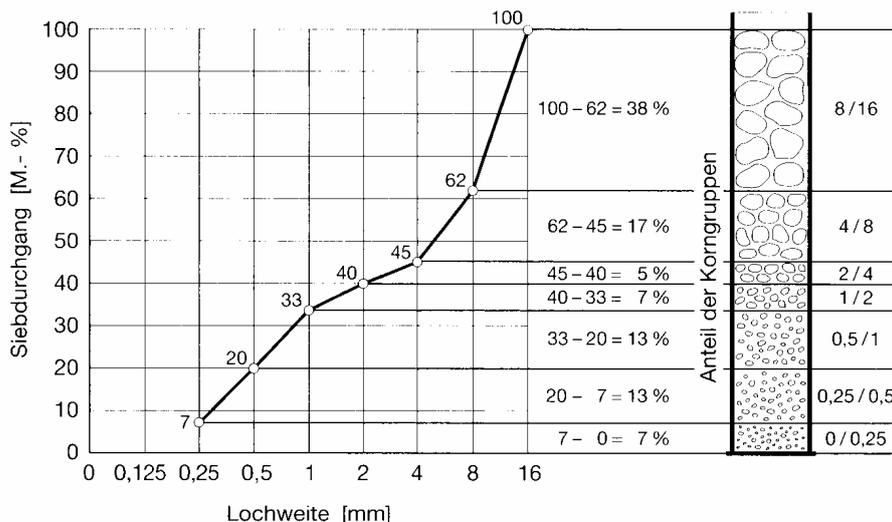


Abbildung 3-1: Siebline eines Korngemisches mit Größtkorn 16 mm⁷

3.1.1.2 Zement (hydraulisches Bindemittel)

Zement ist ein fein gemahlener, anorganischer Stoff, der mit Wasser gemischt wird. Daraus entsteht Zementleim, der durch Hydratation erstarrt und erhärtet. Nach dem Erhärten ist der Zement auch unter Wasser raumbeständig.⁸

Arten und Bezeichnung

In der ÖNORM EN 197-1 werden fünf Hauptarten unterschieden:⁹

CEM I

„CEM I ist Portlandzement mit einem Anteil an Portlandzementklinker von mindestens 95 M.-%; der Rest sind Nebenbestandteile, die der Verbesserung der Kornverteilung des Zements und damit der Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften und des Wasserrückhaltevermögens.“

⁷ Weber 2005, S. 29.

⁸ Vgl. ÖNORM B 4710-1 2004, S. 17.

⁹ Weber 2005, S. 16.

CEM II

„Die Hauptart CEM II umfasst Zemente, die außer Zementklinker einem oder mehrere Hauptbestandteile mit einem Anteil zwischen 6 M.-% und 35 M.-% enthalten. Dieser Anteil ist noch einmal unterteilt, und zwar wird der Zement mit einem Anteil bis 20 M.-% mit A, der Zement mit einem Anteil bis 35 M.-% mit B bezeichnet.“

CEM III

„CEM III ist die Benennung von drei Arten von Hochofenzement mit Hüttensandgehalten zwischen 36 M.-% und 90 M.-%.“

CEM IV

„Als CEM IV werden Puzzolanzemente mit Puzzolangehalten zwischen 11 M.-% und 55 M.-% bezeichnet.“

CEM V

„CEM V sind Kompositzemente, die außer Portlandzementklinker 36 M.-% bis 80 M.-% Hüttensand und/oder kieselsäurereiche Flugasche enthalten können.“

Festigkeitsklassen

Eine wesentliche Eigenschaft von Zement ist die Druckfestigkeit. Diese werden nach der 28-Tage-Mindestdruckfestigkeit gekennzeichnet (siehe nachfolgende Tabelle). Die drei Klassen werden neben der Anfangsfestigkeit weiter in üblich erhärtende (Kennbuchstabe N = normal) und schnell erhärtende Zemente (Kennbuchstabe R = rapid) unterteilt.

Tabelle 3-2: Festigkeitsklassen und Erstarrungsbeginn von Zement¹⁰

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit [N/mm ²]				Erstarrungsbeginn [min]
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit		
	2 Tage	7 Ta-	28 Tage		
32,5 N	----	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 R	≥ 10,0	----			
42,5 N	≥ 10,0	----	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 R	≥ 20,0	----			
52,5 N	≥ 20,0	----	≥ 52,5	----	≥ 45
52,5 R	≥ 30,0	----			

3.1.1.3 Zugabewasser

Als Zugabewasser ist das in der Natur vorkommende Wasser geeignet, soweit es nicht Bestandteile enthält, die die Eigenschaften des Betons in flüssiger und fester Form ungünstig beeinflussen. Beim Stahlbeton darf zusätzlich der Korrosionsschutz der Bewehrung nicht beeinträchtigt werden.¹¹

3.1.1.4 Betonzusätze

Zu den Betonzusätzen zählen Betonzusatzmittel sowie Betonzusatzstoffe. Letztere müssen wegen ihren großen Zugabemengen in der Stoffraumrechnung berücksichtigt werden.

Betonzusatzmittel

„Betonzusatzmittel sind flüssige oder pulverförmige Stoffe, die dem Beton zugesetzt werden, um durch chemische oder physikalische Wirkung oder durch beides Eigenschaften des

¹⁰ ÖNORM EN 197-1 2004, S. 15.

¹¹ Vgl. Weber 2005, S. 30.

Frisch- oder Festbetons zu ändern, wie Verarbeitbarkeit, Erstarren, Luftgehalt. Dabei muss gelegentlich auch die unerwünschte Änderung einer anderen Betoneigenschaft in Kauf genommen werden. Die Zugabemenge eines Betonzusatzmittels ist i. Allg. so klein, dass sie als Volumenanteil des Betons ohne Bedeutung sind.“¹²

Einige Zusatzmittel sind:

- Betonverflüssiger BV

Betonverflüssiger bewirken eine Veränderung der Konsistenz, d.h. die Verbesserung der Verarbeitbarkeit, ohne Erhöhung des Wassergehaltes. Die Wirkung erfolgt im Allgemeinen auf Basis der Herabsetzung der Oberflächenspannung des Zugabewassers.

- Fließmittel FM

Fließmitteln bewirken, dass Frischbetone mit sehr weicher bis flüssiger Konsistenz hergestellt werden können, bei einem vergleichsweise niedrigem Wassergehalt.“¹³

- Verzögerer VZ

Verzögerer bewirken ein späteres Erstarren des Betons, damit wird eine längere Verarbeitbarkeit gewährleistet.

Betonzusatzstoffe

„Betonzusatzstoffe sind fein aufgeteilte Zusätze, wie z.B. Trass, Gesteinsmehl, Steinkohlenflugasche, Silikatstaub, Pigmente zum Einfärben des Betons, die bestimmte Eigenschaften des Betons beeinflussen. Im Gegensatz zu den Betonzusatzmitteln ist die Zugabemenge i. Allg. so groß, dass sie bei der Stoffraumrechnung berücksichtigt werden muss.“¹⁴

¹² Weber 2005, S. 30.

¹³ Vgl. Weber 2005, S. 32.

¹⁴ Weber 2005, S. 33.

3.1.2 Wesentliche Eigenschaften von Frischbeton und deren Prüfungen

3.1.2.1 Konsistenz

Die Konsistenz ist ein Maß für die Steife und damit für die Verarbeitbarkeit des Betons. Sie kann durch verschiedene Prüfverfahren gemessen werden. Die gebräuchlichsten sind der Ausbreitversuch nach ÖNORM EN 12350-5 und für steifere Konsistenzen der Verdichtungsversuch nach ÖNORM EN 12350-4.¹⁵

Das Ausbreitmaß wird in so genannte Ausbreitmaßklassen unterteilt und laut folgender Tabelle gegliedert.

Tabelle 3-3: Ausbreitmaßklassen von Frischbeton laut ÖNORM B 4710-1¹⁶

Ausbreitmaßklasse	Ausbreitmaß [mm]	Beschreibung
F38	350...410	plastisch
F45	520...480	weich
F52	490...550	sehr weich
F59	560...620	fließfähig
F66	630...690	sehr fließfähig
F73	700...760	extrem fließfähig

Versuchsdurchführung

Die Ermittlung des Ausbreitmaßes ist in der ÖNORM EN 12350-5 geregelt.

Für die Aufstellung des Ausbreittisches ist eine horizontale Aufstandsfläche frei von Erschütterungen erforderlich. Vor der Versuchsdurchführung sind der Ausbreittisch und die Form (siehe Abbildung 3-2) zu reinigen und anzufeuchten. Die Form wird mittig auf dem Tisch platziert, mit jeweils zwei gleichen Betonschichten gefüllt und abschließend an der Oberkante abgezogen. Jede Schicht ist durch zehn Stöße mit dem Stößel zu verdichten. 30 Sekun-

¹⁵ Vgl. Weber 2005, S. 35.

¹⁶ ÖNORM B 4710-1 2004, S. 25.

den nach dem Abziehen der Form ist diese an den Handgriffen innerhalb von drei bis sechs Sekunden vertikal anzuheben. Anschließend wird die Tischplatte 15mal vorsichtig bis zum Anschlag angehoben und wieder fallen gelassen. Mit Hilfe einer Messlatte wird die größte Ausbreitung in zwei zueinander normalen Richtungen bestimmt (siehe Abbildung 3-2). Entmischt sich der Beton, ist die Prüfung als unzureichend zu bezeichnen. Das Ausbreitmaß ergibt sich aus dem Mittel der zuvor gemessenen Ausbreitungen und ist auf zehn Millimeter genau anzugeben.

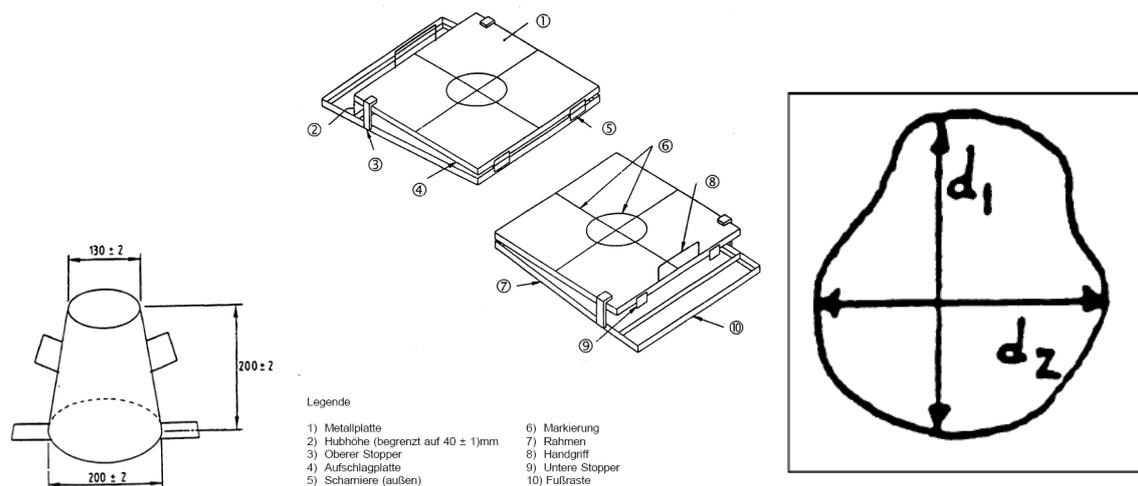


Abbildung 3-2: Form, Ausbreittisch und Bestimmung der Ausbreitung¹⁷

3.1.2.2 Frischbetonrohichte

Die Frischbetondichte beschreibt die Masse (Gewicht) in kg pro dm³ (oder t pro m³) von frischem, vorschriftsmäßig verdichtetem Beton einschließlich verbleibender Poren. Sie ermöglicht eine erste Beurteilung der Betongüte und wird durch Wiegen der Probekörper ermittelt. Bei gleicher Menge an Zement und Gesteinskörnung lässt eine niedrige Rohdichte eine geringere Betonfestigkeit erwarten, da die Rohdichte mit steigendem Wasser- und Porengehalt abfällt. Die Bestimmung der Rohdichte ist in der ÖNORM EN 12350-6 geregelt.

¹⁷ ÖNORM EN 12350-5 2000, S. 5-6.

Versuchsdurchführung

Für die Prüfung ist ein Behälter mit bekannter Masse (m_1) und Volumen (V) erforderlich. Der Behälter wird mit zwei gleichmäßigen Lagen Beton gefüllt und verdichtet. Die Verdichtung kann mittels Handverdichtung, Rütteltisch oder Innenrüttler erfolgen. Nach dem Abziehen der Behälteroberkante muss die Außenseite des Behälters mittels abwischen gesäubert werden. Anschließend ist der gefüllte Behälter zu wiegen und die Masse (m_2) zu notieren. Die Frischbetonrohddichte (D) wird laut folgender Gleichung errechnet:

$$D = (m_2 - m_1) / V \qquad \text{Gleichung 3-1}^{18}$$

D Frischbetonrohddichte [kg/m^3]

m_1 Masse des leeren Behälters [kg]

m_2 Masse des gefüllten Behälters [kg]

V Volumen des Behälters [m^3]

3.1.2.3 Ermittlung des Blutens von Beton

Die Ermittlung des Blutens von Frischbeton wird gemäß ÖNORM EN 480-4 durchgeführt. Bei diesem Versuch wird die Wasserabsonderung an der Oberfläche des Frischbetons bestimmt. Hierbei wird das Bluten des Betons für Hochbauanwendungen zuverlässig bestimmt. Im Spezialtiefbau sind jedoch weiche Betone und größere Bauteilhöhen die Regel, dadurch ist der Betondruck um ein Vielfaches größer und die Ermittlung des Blutens von Frischbeton gemäß ÖNORM EN 480-4 nicht mehr ausreichend zuverlässig. Die Versuchsdurchführung ist mit einer Dauer von über zwei Stunden zu lang für eine rasche Überprüfung.

Aufgrund der genannten Nachteile bei der Bestimmung des Blutens weicher Betone hat die Bautechnische Prüf- und Versuchsanstalt GmbH, kurz BPV, ein Verfahren zur Bestimmung des Blutens von Frischbeton unter Druck entwickelt.

Die Betonfilterpresse besteht aus einem druckdichten zehn Liter Stahltopf mit einer Höhe von ca. 19 cm (siehe folgende Abbildung). Über einen im Deckel befindlichen Anschluss wird mittels eines Manometers ein konstanter Prüfdruck über eine bestimmte Zeit aufgebracht. An der Unterseite des Topfes ist eine Öffnung, durch die das aus dem Beton ausgepresste

¹⁸ ÖNORM EN 12350-6 1999, S. 6.

Wasser entweichen kann und in einem Messzylinder aufgefangen wird.

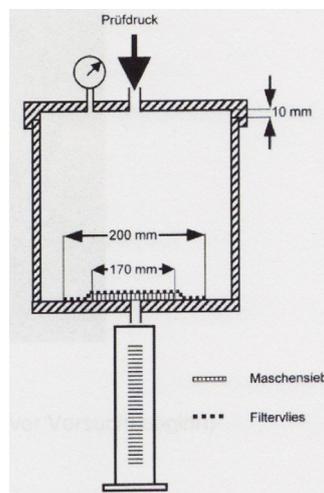


Abbildung 3-3: Betonfilterpresse BPV

Versuchsdurchführung

Die Betonfilterpresse wird mittels einer Wasserwaage und den verstellbaren Standbeinen horizontal ausgerichtet. Danach wird ein Stützsieb über der Auslassöffnung im Drucktopf platziert und mit einem Vlies bedeckt. Unter die Öffnung im Boden des Topfes wird ein Messzylinder gestellt. Der zu prüfende Frischbeton wird in die Betonfilterpresse eingebracht und händisch mittels Verdichtungsholz verdichtet. Anschließend wird die Betonoberfläche mit einem Stahllineal auf der Topfoberkante abgezogen (siehe Abb. 3-4), der Deckel aufgesetzt, verschraubt und die Druckleitungen angeschlossen. Der Prüfdruck von 3 bar wird mit Hilfe des Druckreglers innerhalb von 30 Sekunden gleichmäßig aufgebracht. Das ausgepresste Wasser im Messzylinder wird nach 3 und 5 Minuten abgelesen, danach alle 5 Minuten bis zum Ende des Versuches. Die Versuchsdauer beträgt 60 Minuten, kann aber je nach Bedarf geändert werden.

Versuchsauswertung

Das Ergebnis des Blutversuches von Frischbeton unter Druck wird nach 30 und 60 Minuten bestimmt und in kg ausgepresstem Wasser pro m^3 Beton angegeben und wie folgt berechnet:

$$B_{30} = W_{ab30} / V \quad \text{bzw.} \quad B_{60} = W_{ab60} / V \quad \text{Gleichung 3-2}$$

B_{30}	Bluten des Beton nach 30 bzw. 60 min [kg/m ³]
W_{ab30}	abgegebene Wassermenge nach 30 bzw. 60 min [ml]
V	Volumen des Drucktopfes [cm ³]

Grenzwerte

Aufgrund von Baustellenversuchen wurde von der BPV ein allgemeiner Grenzwert für das Bluten von Beton von 32 kg Wasser pro m³ Beton nach 30 min bzw. 40 kg Wasser pro m³ Beton nach 60 min festgelegt. Aufgrund der bisher durchgeführten Versuche ist davon auszugehen, dass bei der Einhaltung dieser Grenzwerte das Bluten von Beton sich nicht schädlich auf das zu erstellenden Bauteil auswirkt.

3.2 Hydratation von Beton

3.2.1 Hydratation des Zements

Durch das Anmachen des Zements mit Wasser entstehen wasserhaltige Verbindungen, die Hydratphasen genannt werden. Diese wasserhaltige Verbindung ist für das Erstarren und das anschließendes Erhärten des Zementleims zu Zementstein verantwortlich.

Die Hydratation der meisten Zemente (außer Tonerdezement) geht von den Calciumsilicathydraten aus. Sie entstehen aus den beim Brennen von Zement erzeugten Zementklinker. Entscheidend für die chemische Zusammensetzung und der damit verbundenen Größe der Hydrate ist der Wasserzementwert.

Die Hydratation des Zementleims lässt sich in vier Hydratationsphasen einteilen. Die erste Phase tritt nach dem Kontakt des Zements mit dem Anmachwasser ein. Dabei bilden sich an der Oberfläche der Klinkerpartikel kurze, hexagonale säulenförmige Kristalle. Zeitgleich kommt es zur Bildung von Calciumsilicathydraten in kolloidaler Form. Die ersten Hydratationsprodukte sind noch so klein, dass diese die Zwischenräume zwischen den einzelnen Zementpartikeln noch nicht überbrücken können. Somit kann sich kein festes Gefüge ausbilden und die Konsistenz des Zementleims wird nur gering steifer. Nach der Bildung erster Hydratationsprodukte kommt es zur Ruheperiode. Mit der Bildung einer dünnen Schicht von Hydratationsprodukten an der Oberfläche der Klinkerpartikel und der anschließender Ruheperiode endet die erste Hydratationsphase.

Der beschriebene Hydratationsprozess gilt für Zemente mit angepasstem Sulfatträger. Ohne

Sulfatträger (Erstarrungsregler) würde der Zementleim sofort erstarren (Löffelzement). Je feiner der Zement gemahlen ist und je höher die Verarbeitungstemperatur liegt, desto größer muss die Menge des Erstarrungsreglers (meist Gips) sein.

Drei bis vier Stunden nach Wasserzugabe kommt es zum Erstarren des Zementleims, dabei bilden sich sehr feine Calciumsilicathydratkristalle. Unter dem Elektronenmikroskop (ESEM) ist deren spitznadelige Form zu erkennen (siehe Abbildung 3-4 (links)). Anschließend folgt wiederum eine Ruheperiode.

Die dritte Phase beginnt etwa nach vier Stunden und endet nach 12 bis 24 Stunden. In dieser Beschleunigungsperiode kommt es zu einer sehr intensiven Hydratation des Zementklinkers. Dabei bauen sich aus den Calciumsilicathydraten Faserbündel auf und bewirken ein Grundgefüge, die die Abstände zwischen den einzelnen Zementpartikeln überbrücken können.

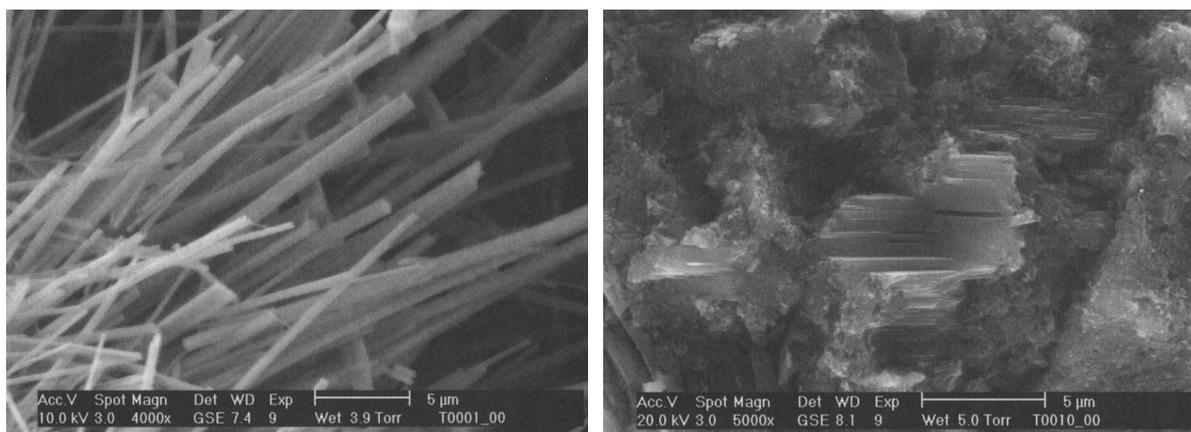


Abbildung 3-4: links: nadelförmige Kristalle, rechts: Zementstein nach 28 Tagen¹⁹

Die vierte Phase, die fortschreitende Gefügeverfestigung, wird als Erhärten bezeichnet. Dabei nimmt die Verfestigung weiter zu, bei jedoch geringer werdender Hydratationsrate. Das Gefüge verdichtet sich immer weiter und die Porenräume werden fortschreitend ausgefüllt. Die Abbildung 3-4 (rechts) zeigt das Zementgesteingefüge nach 28 Tagen.

Die Abbildung 3-5 zeigt die schematische Darstellung der Hydratphasenbildung und den Gefügaufbau bei der Hydratation des Zements.

¹⁹ Zement-Taschenbuch 2002, S. 113-117.

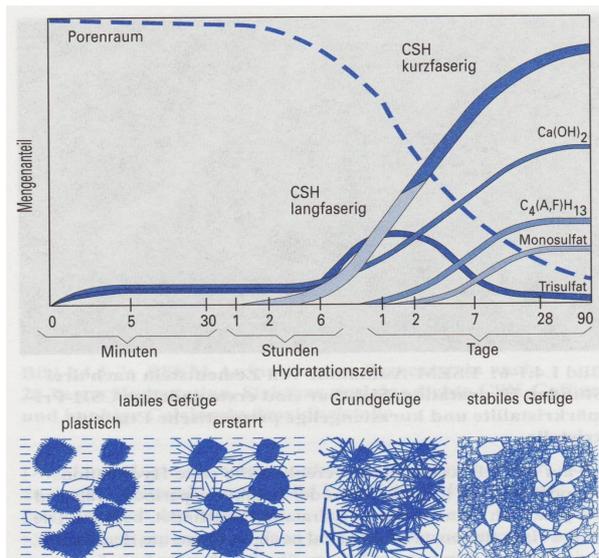


Abbildung 3-5: Bildung der Hydratphasen und der Gefügebildung²⁰

3.2.2 Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Beton

Im Beton bewirkt die Hydratation des Zements dessen Ansteifen, Erstarren und Erhärten. Die Zustandsänderungen erfolgen fließend aufeinander und können nicht genau abgegrenzt werden. Der Beton wird als Frischbeton bezeichnet solange dieser noch verarbeitbar ist. Der unmittelbar in die Schalung eingebrachte und verdichtete Beton wird als grüner Beton bezeichnet. Das Ansteifen und die damit verbundene Druckfestigkeit des grünen Betons (Gründstandsfestigkeit) erhält dieser nicht durch die Hydratation des Zements, sondern durch die Herabsetzung der Fließgrenze und die Vergrößerung der Kapillarkräfte im Zementleim. Einige Stunden nach dem Anmischen des Betons beginnt die Festigkeitsentwicklung infolge der Hydratation des Zements und die Erstarrung beginnt. Im nun „jungen“ Beton verdichtet sich das Gefüge durch die fortschreitende Hydratation des Zements. Der Übergang von „grünem“ zu „jungem“ Beton und der damit verbundene Übergang von Frisch- zu Festbeton kann nicht scharf abgegrenzt werden. Nach 28 Tagen ist das Zementsteingefüge weitgehend ausgehärtet und der Beton hat seine Mindestfestigkeit bereits erreicht. Die Hydratation des Zements ist damit jedoch nicht abgeschlossen, sie dauert ein Leben lang an.

²⁰ Zement-Taschenbuch 2002, S. 115.

3.3 Unterschiedliche Betonarten

Beton ist ein Baustoff mit einer sehr großen Bandbreite an Einsatzgebieten. Dadurch haben sich eine Vielzahl von Betonzusammensetzungen entwickelt, um gewünschte Frisch- bzw. Festbetoneigenschaften zu erhalten.

Nachfolgend werden einige Betonzusammensetzungen beispielhaft dargestellt, um die Unterschiede zwischen Rüttel-, Bohrpfahl-, Schlitzwand- und SCC-Beton (self-compacting-concrete) in der Betonrezeptur aufzuzeigen.

In der folgenden Tabelle werden bewusst keine Angaben zu den Betonzusatzmitteln gemacht, da diese in der Wirksamkeit je nach Hersteller stark von der Konzentration abhängen und nicht ohneweiters von Hersteller zu Hersteller verglichen werden können.

Generell ist zu sagen, dass die Betonkonsistenz hauptsächlich über die Zudosierung von Fließmitteln und Betonverflüssigern erfolgt und nicht über die Wassermenge.

Tabelle 3-4: Betonrezeptur unterschiedlicher Betonarten laut Chargenprotokoll

Betonart		Hochbaubeton C25/30	Bohrpfahlbeton	Schlitzwandbe- ton	SCC-Beton
Größtkorn	[mm]	32	22	24 ¹	16
Ausbreitmaß	[cm]	48	56	58	71
Zement	[kg/m³]	244	365	401	280
Wasser	[kg/m³]	170	186	174	175
Zuschlag 0/4	[kg/m³]	846	1082	738	1095
Zuschlag 4/GK	[kg/m³]	1034	845	1083	748
GK....Größtkorn					
¹gemäß ungarischer Norm					

3.4 Blüten von Beton

„Als Blüten wird das Absondern von Wasser eines fertig gemischten, eingebrachten und verdichteten Mörtels oder Betons bezeichnet. Das Phänomen Blüten tritt während oder nach der Verarbeitung auf und dauert bis zum Beginn des Erstarrungs- bzw. Erhärtungsprozesses an.“²¹

3.4.1 Erscheinungsbild und Auswirkungen des Blutens von Beton

Die durch das Blüten erzeugten Schäden können wie folgt in drei Gruppen unterteilt werden.

Optische Mängel

Optische Mängel müssen, bei Bohrpfählen und/oder Schlitzwänden die später freigelegt werden und als einschalige Außenwand vorgesehen sind, saniert werden. Auch wenn diese Mängel keine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit darstellen.

Freilegung der Bewehrung

Das durch das Blüten ausgepresste Wasser bildet meist entlang der Bauteiloberfläche Wasserkanäle. Diese Wasserkanäle können von der Bauteiloberfläche bis zur Bewehrung reichen. Dadurch ist die Bewehrung vor Korrosion nicht mehr ausreichend geschützt und der Bauteil muss saniert werden, um die Tragfähigkeit längerfristig gewährleisten zu können.

Die Sanierung an der Luftseite ist relativ einfach, im Gegensatz zur erdseitigen Sanierung, wo die Fehlstellen nicht genau bekannt sind, aber ebenfalls als vorhanden angenommen werden müssen.

Nachsackungen der Betonoberfläche

Durch das Blüten des Betons kommt es zu einer Reduktion des Betonvolumens und somit zu einem Nachsacken der Betonoberfläche. Um auf einen Beton mit entsprechender Qualität zu gelangen, muss der Pfahl- bzw. Schlitzwandkopf abgeschrämt werden. Oft kann der Abtrag des Betons größer ausfallen als der dafür vorher vorgesehene Überstand. Das Nachbetonieren des Pfahles bzw. der Schlitzwand ist die Folge. Bei Bohrpfählen werden Nachsackungen der Betonoberfläche auch Bohrpfahlkaries genannt.

²¹ http://www.baunetz.de/infoline/beton/list-fs.php?page=pg_beton_ursachen&__navi=r05_01.htm

Alle drei vorher genannten Schädigungen des Betons führen oft zu erheblichen Mehrkosten, da sich die Sanierung der Schäden schwierig gestaltet.

In den folgenden Abbildungen werden typische Schadensfälle an Bohrpfählen und Schlitzwänden gezeigt.



Abbildung 3-6: li: Schlitzwand intakt und geschädigt; re: Bohrkern aus der geschädigten SW



Abbildung 3-7: li: Durch Bluten verursachte Freilegungen der Bewehrung; re: Nachsackungen des Bohrpfahlbetons (Bohrpfahlkaries)

Einfluss des Bodens auf die Auswirkungen des Blutens

Bindige und nicht bindige Böden haben aufgrund unterschiedlicher Durchlässigkeiten auch unterschiedliche Einflüsse auf die Bauteiloberfläche des zu erstellenden Bauwerks. Da in bindigen Böden, wie z.B. dem Wiener Tegel, die Durchlässigkeit sehr gering ist, kann das durch das Bluten austretende Wasser nicht seitlich in den Untergrund entweichen. Infolgedessen bilden sich Wasserkanäle an der Grenzfläche zwischen Beton und Boden in denen das Wasser nach oben steigt und an der nächsten nicht bindigen Bodenschicht seitlich entweichen kann. Im Extremfall steigt das Wasser bis zur Bauteiloberfläche auf. Diese teils erheblichen Wassermengen führen zu Auswaschungen im Beton und sind für die Schäden an den Bauteilen verantwortlich.

Das Bluten von Frischbeton tritt ebenfalls in nicht bindigen Böden auf, jedoch sind die Auswirkungen oft um ein Vielfaches geringer oder nicht erkennbar.

3.4.2 Maßnahmen zur Verringerung des Blutens von Beton

Wasser wird im Beton zur Hydratation des Zements im Ausmaß von ca. 25% des Zementgewichts benötigt. Weiters ist Wasser zur Verarbeitbarkeit des Betons notwendig. Der Großteil des Wassers haftet an der Oberfläche der festen Bestandteile (Adhäsion) des Betons, das restliche Wasser befindet sich in den Zwischenräumen der Zuschlagstoffe.

Zur Verminderung des Blutens von Beton ist es somit wichtig die Oberfläche der festen Bestandteile im Beton zu erhöhen, um möglichst viel freies Wasser zu binden, bzw. den Wassergehalt zu reduzieren. Insbesondere bei Zement und den Feinteilen der Gesteinskörnung ist es zielführend, da diese Fraktionen den größten Anteil an der Oberfläche am Beton ausmachen.

Folgende Punkte tragen zur Verringerung des Blutens von Frischbeton bei:

Optimale Packungsdichte

Je höher die Packungsdichte der festen Bestandteile im Beton ist, desto weniger Raum steht für freies Wasser zu Verfügung. Aufgabe ist es, eine Sieblinie zu entwerfen, bei der eine möglichst hohe Packungsdichte erzielt werden kann. Die optimale Packungsdichte wird sowohl von der Korngrößenverteilung der festen Bestandteile des Betons als auch von deren Kornform bestimmt.

Fuller und Thomson entwickelten bereits 1906 eine Gleichung für die optimale Packungsdichte runder Körner, die so genannte Fuller-Parabel.

Fuller-Parabel: $D_i = (d_i / d_{max})^n$ Gleichung 3-3²²

- D_i kumulativer Anteil der Korngröße d_i
- d_{max} maximale Korngröße (Größtkorn)
- n beschreibt die Kornform

Mit idealen Kugeln ($n=0,5$) erreicht man die maximale Packungsdichte von 90%, das entspricht einem Hohlraumgehalt von 10%. Die daraus resultierende Sieblinie entspricht dem Original von Fuller.

Der Kornindex beschreibt die Kornform und wird wie folgt definiert:

Kornindex = L / E Gleichung 3-4²³

- L Kornlänge (maximale Kornabmessung)
- E Kornbreite (gemessen normal zur Kornlänge)

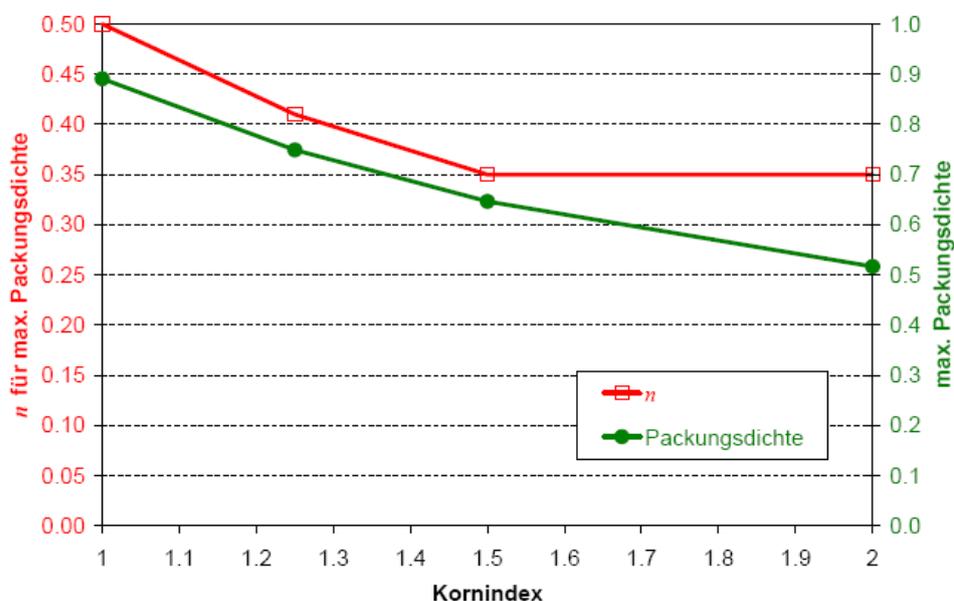


Abbildung 3-8: Zusammenhang zw. Kornindex und größtmöglicher Packungsdichte²⁴

²² Macht; Nischer 2007, S. 25.

²³ Macht; Nischer 2007, S. 25.

In der Abbildung 3-8 ist der Zusammenhang zwischen dem Kornindex, der maximal erzielbaren Packungsdichte und den dafür erforderlichen Koeffizienten n dargestellt.

Die nachstehende Abbildung zeigt die erforderliche Korngrößenverteilung für die höchstmögliche Packungsdichte für bestimmte Kornindizes.

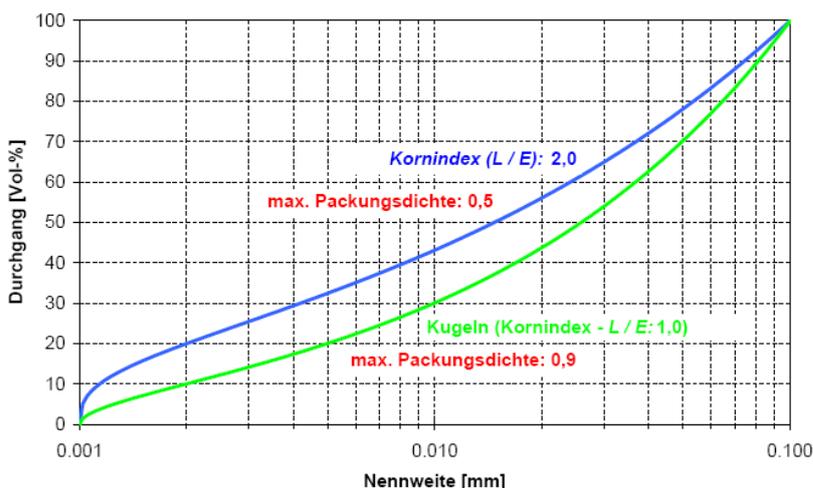


Abbildung 3-9: Korngrößenverteilung für max. Packungsdichte bei best. Kornindex²⁵

Anhand der obigen Abbildung ist zu erkennen, dass die maximal erreichbare Packungsdichte bei unregelmäßigen Körnern vor allem durch eine Erhöhung der Feinteile zu erzielen ist. Trotzdem ist die erreichbare Packungsdichte bei unregelmäßigen Körnern weit aus geringer als bei idealen Kugeln.

Optimierung des Mehlkornanteils

Durch die Erhöhung des Mehlkorngehaltes nimmt die Packungsdichte zu und im Allgemeinen sinkt der Wasserbedarf, obwohl die Oberfläche der festen Bestandteile steigt. Werden jedoch mehr Feinteile zugegeben als zum Füllen der Hohlräume notwendig sind, ist wiederum mit einem erhöhten Wasserbedarf zu rechnen. Wenn für die gleiche Konsistenz mehr

²⁴ Macht; Nischer 2007, S. 24.

²⁵ Macht; Nischer 2007, S. 24.

Wasser benötigt wird, kann dies eine Gefahr für die Stabilität des Betons darstellen. Der Mehlkorngelalt ist im Allgemeinen auf die Sieblinie der Gesteinskörnung abzustimmen, um ein Bluten zu vermeiden. Das bedeutet, dass der Mehlkorngelalt so gewählt werden sollte, dass fast alle Hohlräume gefüllt sind und die Korngrößenverteilung der Fullerkurve erreicht wird.

In der ÖNORM B 4710-1 werden Mindestmehlkorngelalte in Abhängigkeit vom Größtkorn der Gesteinskörnung empfohlen (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 3-5: empfohlener Mehlkorngelalt (< 0,125 mm) lt. ÖNORM B 4710-1²⁶ und Mindestmehlkorngelalt der Richtlinie Bohrpfähle ²⁷

ÖNORM B 4710-1		Richtlinie Bohrpfähle	
Größtkorn	empfohlener Mehlkorngelalt	BS-PF1	BS-PF2
GK 8	450 ± 25 kg/m ³		
GK 16	375 ± 25 kg/m ³		
GK 22	350 ± 25 kg/m ³	≥460 kg/m ³	≥440 kg/m ³
GK 32	325 ± 25 kg/m ³	≥450 kg/m ³	≥430 kg/m ³

Die Mehlkorngelalte in der ÖNORM B 4710-1 sind jedoch für die Anwendungsbereiche im Spezialtiefbau, aufgrund der weicheren Konsistenz, als zu gering einzustufen. In der Richtlinie Bohrpfähle sind Mindestmehlkorngelalte in Abhängigkeit vom Größtkorn der Gesteinskörnung vorgeschrieben.

Mahlfeinheit von Zement

Die Mahlfeinheit von Zement wird durch den Blaine Wert beschrieben und in cm²/g angegeben. Der Blaine Wert beschreibt die spezifische Oberfläche von einem Gramm Zement. Je höher nun die Mahlfeinheit des Zements ist, desto mehr Wasser kann an der Oberfläche ge-

²⁶ ÖNORM B 4710-1 2004, S. 45.

²⁷ Richtlinie Bohrpfähle 2005, S. 22.

bunden werden.

Im Allgemeinen gilt, je höher die Festigkeitsklasse des Zements, desto höher ist auch dessen Mahlfineinheit. Somit kann durch einen Zement mit höherer Festigkeitsklasse die Neigung zum Bluten verringert werden.

Da aber bei ein und demselben Blaine Wert unterschiedliche Korngrößenverteilungen auftreten, ist die Bestimmung der Sieblinie des Zements mittels Lasergranulometer erforderlich.

Minimierung des Wasserbindemittelgehaltes

Um den Wasser-Bindemittel-Wert zu minimieren und die geforderte Konsistenz zu erreichen, ist der Einsatz von Zusatzmitteln notwendig. Dadurch verringert sich die Neigung zum Bluten des Betons, da immer gleich viel Wasser an der Oberfläche der Gesteinskörnung haftet. Liegt der Wassergehalt an der unteren Grenze, so muss sehr viel Zusatzmittel zudosiert werden, um die gewünschte Konsistenz zu erreichen. Es besteht dadurch die Gefahr, dass der Frischbeton zäh wird und sich nur schlecht verarbeiten lässt.

Selbstverdichtender Beton

Bei der Herstellung von Bauteilen mit selbstverdichtendem Beton (SCC – self-compacting-concrete) mit einem Ausbreitmaß von über 70 cm ist es in vergangener Zeit vermehrt zu Problemen bei der Verarbeitbarkeit gekommen (Entmischungen, Bluten des Frischbetons). Das Einsatzgebiet von SCC liegt im Hochbau, wo immer öfter sehr komplexe Formen mit hohem Bewehrungsgrad und Sichtbetonoberflächen verlangt werden. Die Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton sind sehr ähnlich denen weicher Betone im Spezialtiefbau. Die Druckverhältnisse beim Betoniervorgang können bei gleichen Betonierhöhen als annähernd gleich betrachtet werden, da auch die Betoniergeschwindigkeit und die Frischbetonkonsistenz ähnlich sind.

Das Bluten von selbstverdichtendem Beton konnte jedoch gelöst werden, indem die Sieblinie optimiert wurde. Das heißt, die Stabilität des Frischbetons wurde verbessert und somit die Neigung zum Bluten verringert. Ebenfalls wurde festgestellt, dass die Gefahr der Entmischung des Betons umso größer ist, je größer der Wasser- und/oder Fließmittelgehalt ist.

Durch die oben genannten Maßnahmen konnte das Bluten von selbstverdichtendem Beton verhindert und verbesserte Festbetoneigenschaften erzielt werden.

4 FRISCHBETONDRUCK

4.1 Allgemeines

Unterschiedliche Betonkonsistenzen, Betonierhöhen und Steiggeschwindigkeiten haben einen wesentlichen Einfluss auf die Größe des Frischbetondrucks. Der Frischbetondruck wurde bisher nur im Hochbau anhand von Schalungsdruckmessungen ermittelt. Dort liegen die Betonierhöhen und Betonkonsistenzen jedoch weit unter jenen Werten, die im Spezialtiefbau üblich sind. Daher können die Frischbetondrücke, die aus dem Hochbau bereits bekannt sind, nur als Anhaltspunkte dienen.

Frischbetondrücke von SCC-Betonen mit weicher Konsistenz wurden bereits anhand von Schalungsdruckmessungen bestimmt, jedoch liegen die Betonierhöhen bei SCC-Beton nur bei ca. 5 Metern. Daher kann der Frischbetondruck von weichen Betonen im Spezialtiefbau nur bis zur einer Tiefe von ca. 5 Metern mit dem Betondruck von SCC-Beton verglichen werden. Die Werte müssten eine hohe Übereinstimmung aufweisen.

4.2 Berechnungsverfahren

4.2.1 Berechnung des Schalungsdrucks laut DIN 18218¹

Die DIN 18218 – Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen – regelt die Berechnung des Frischbetondrucks auf Schalungen in Abhängigkeit von der Betonkonsistenz und der Betoniergeschwindigkeit.

Laut DIN 18218 ist der hydrostatische Druckzustand auf lotrechte Schalungen, lt. folgender Gleichung, als obere Grenze des Frischbetondrucks anzusetzen.

$$p_b = \gamma_b \times h$$

Gleichung 4-1²

¹ DIN 18218 Sept. 1980.

² DIN 18218 1980, S. 2.

p_b ...Frischbetondruck [kN/m²] (100 kN/m² entsprechen 1 bar)

γ_b ...Frischbetonwichte [kN/m³]

h...Höhe des Frischbetons [m]

Beispiel: h.....5 m

γ_b 24 kN/m³

$$p_b = 24 \text{ kN/m}^3 \times 5 \text{ m} = 120 \text{ kN/m}^2 = 1,2 \text{ bar}$$

Die Obergrenze des Frischbetondrucks gibt die DIN 18218 mit dem hydrostatischem Druck an.

In der DIN 18218 wird der Frischbetondruck in Abhängigkeit von der Betonkonsistenz und der Steiggeschwindigkeit bestimmt (siehe folgende Abbildung). Das Diagramm gilt für maximale Steiggeschwindigkeiten von bis zu 7 m/h. Bei den Betonvorgängen von Schlitzwänden und Bohrpfehlen werden durchschnittliche Steiggeschwindigkeit von über 10 m/h erreicht. **Die von der DIN 18218 angegebenen Schalungsdrücke sind für den Spezialtiefbau als zu gering anzusehen** (vergleiche Kapitel 5.4).

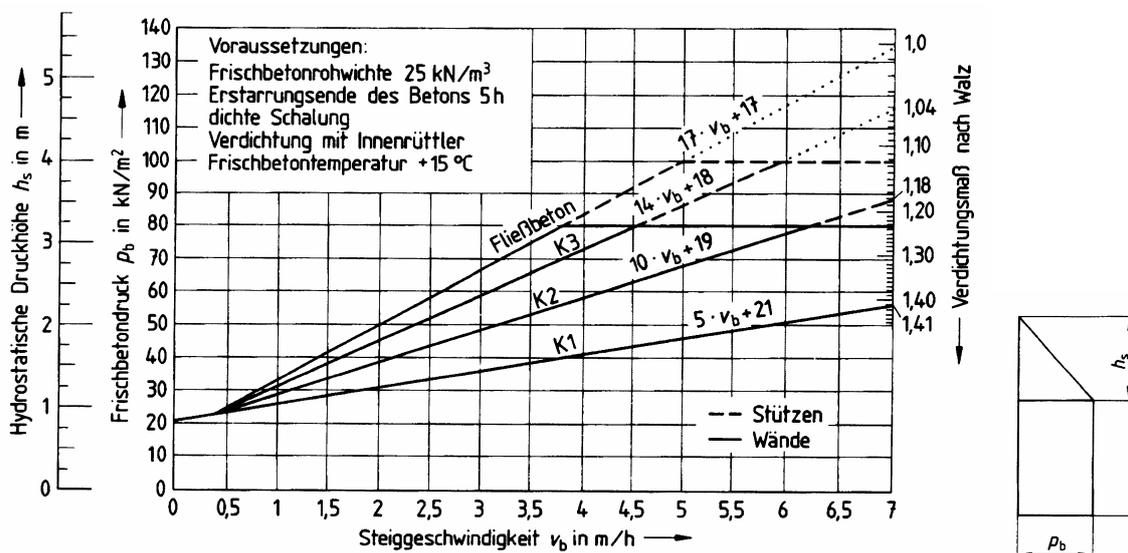


Abbildung 4-1: Diagramm zur Bestimmung des Frischbetondrucks³

³ DIN 18218 Sept. 1980, S.3

Beziehungen:

$$p_c = \gamma_c \times z \quad \text{für } z \leq h_{\text{crit}}$$

Gleichung 4-2⁵

$$p_c = \gamma_b \times z + (\gamma_c - \gamma_b) \times h_{\text{crit}} \quad \text{für } z > h_{\text{crit}}$$

γ_c Frischbetonwichte [kN/m³]

γ_b Wichte der Stützsuspension [kN/m³]

h_{crit} kritische Tiefe (30 ÷ 40% der Gesamttiefe) [m]

z Tiefe unterhalb des Betonspiegels [m]

Beispiel: Schlitztiefe z 30 m

h_{crit} 40%

γ_c 24,0 kN/m³

γ_b 10,5 kN/m³

Ergebnis für $z = h_{\text{crit}} = 12$ m:

$$p_b = 24,0 \text{ kN/m}^3 \times 12 \text{ m} = 288 \text{ kN/m}^3 = \mathbf{2,9 \text{ bar}}$$

Ergebnis für $z = 30$ m:

$$p_b = 10,5 \text{ kN/m}^3 \times 30 \text{ m} + (24,0 - 10,5 \text{ kN/m}^3) \times (40\% \times 30 \text{ m}) = 477 \text{ kN/m}^3 = \mathbf{4,8 \text{ bar}}$$

Laut vorhergehendem Rechenbeispiel steigt der Frischbetondruck bis zu einer Tiefe h_{crit} von 12 m hydrostatisch an und zwar bis zum Wert $p_b = 2,9$ bar. Darunter steigt der Betondruck linear bis zur Bauteilunterkante in Abhängigkeit der Wichte der Bentonitsuspension auf 4,8 bar an.

Bei der Ermittlung der kritischen Tiefe (h_{crit}) haben sich große Unterschiede ergeben und somit ist die Größe des Wertes noch mit Unklarheiten behaftet. Daraus ergeben sich jedoch unterschiedliche Betondrücke unterhalb der kritischen Tiefe (h_{crit}).

⁵ Schäfer; Triantafyllidis 2006, S. 188.

4.3 Schalungsdruckmessungen

4.3.1 Schalungsdruck bei selbstverdichtendem Beton

In Beton- und Stahlbetonbau 2005, 45. Forschungskolloquium, S.169-172, „Schalungsdruck bei selbstverdichtendem Beton“ untersuchte Tilo Proske den Frischbetondruck von SCC-Beton anhand von Baustellenmessungen und eines Berechnungsmodells.

Die Druckmessungen werden an 4,3 m hohen Stützen mit dem Querschnitt von 30x30 cm durchgeführt. Die Druckmessstellen befinden sich auf 1 m, 2 m, 3 m und 4 m unterhalb der Stützenoberkante. In den Versuchen wurde immer dieselbe Mischungszusammensetzung verwendet, bei jedoch unterschiedlichem Fließmittelgehalt. Bei den Messungen wurde der Einfluss der Betoniergeschwindigkeit, der Konsistenz und des Bewehrungsgehaltes untersucht.

Es wurde festgestellt dass, die Betoniergeschwindigkeit, die Betonkonsistenz, die Bauteilhöhe, die Schalungsgeometrie sowie die Einbringtechnik einen wesentlichen Einfluss auf die Größe des Frischbetondrucks haben.

Nachstehend ist ein Ergebnis der Schalungsdruckmessungen beispielhaft dargestellt (v...Betoniergeschwindigkeit, sm...Setzfließmaß).

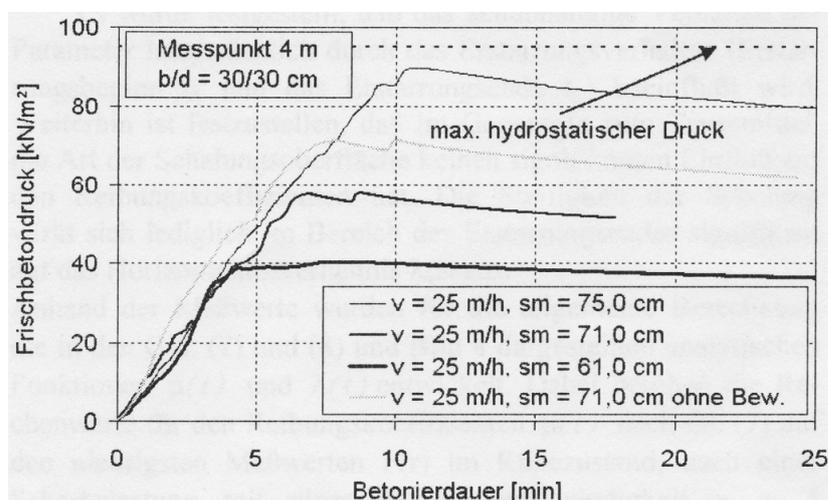


Abbildung 4-2: Schalungsdruck einer Stütze⁶

⁶ Proske 2005, S. 169.

Für die Berechnung des Betondrucks wurde die Silotheorie herangezogen und weiter verfeinert, um das zeitabhängige Erstarrungsverhalten von Beton zu erfassen. Laut Proske errechnet sich der horizontale Schalungsdruck laut folgenden Gleichungen:

$$p_b = \sigma_h = \sigma_v \times \lambda(t) \quad \text{Gleichung 4-3}^7$$

- p_b Betondruck
 σ_h Horizontaldruck
 σ_v Vertikaldruck
 $\lambda(t)$ Seitendruckbeiwert ($\lambda(t)=\sigma_h/\sigma_v$)

$$\sigma_v = e^{\int \lambda(t) \times \mu(t) \times v \times U/A \times dt} \times \left(\int \gamma_c \times v \times e^{\int \lambda(t) \times \mu(t) \times v \times U/A \times dt} \times dt + C \right) \quad \text{Gleichung 4-4}^8$$

- T_w Schubspannung zufolge Wandreibung
 $\mu(t)$ Reibungskoeffizient ($\mu(t)=T_w/\sigma_h$)
 U Umfang des Schalungsumfang
 A Schalungsquerschnittsfläche
 v Betoniergeschwindigkeit
 γ_c Betonwichte

Dieses neue Modell zur Schalungsdruckberechnung berücksichtigt den druckmindernden Einfluss der Reibung zwischen Frischbeton und Schalungsoberfläche. Um das Berechnungskonzept für eine generelle Anwendung zu nutzen, sind weitere experimentelle Untersuchungen an schlanken und gedrunenen Bauteilen mit Höhen über vier Meter erforderlich.⁹ Dieses Berechnungsmodell eignet sich nicht für die Bestimmung der Frischbetondrücke im Spezialtiefbau, da der Betondruck zu stark von der Reibung zwischen Frischbeton und Schalungsoberfläche abhängt.

Da die Größenunterschiede der Bauteilquerschnittsflächen (von 0,09 m² (Stahlbetonstützte) zu 1,13 m² (Pfahl mit 1,20 m Durchmesser)) nicht zu vernachlässigen sind. Dadurch hat die Wandreibung einen geringeren Einfluss auf den Frischbetondruck.

⁷ Proske 2005, S. 170.

⁸ Proske 2005, S. 170.

⁹ Vgl. Proske 2005, S. 172.

4.3.2 Messung des Frischbetondrucks von SCC an einer Stützenschalung

Im Buch „Selbstverdichtender Beton“ 2001, S.70, werden die Ergebnisse von Frischbetondruckmessungen an einer Stütze von SCC-Beton dargestellt.

„Der Frischbetondruck von selbstverdichtendem Beton kann im Gegensatz zu konventionellem Rüttelbeton aufgrund seiner fließfähigen Konsistenz auf der sicheren Seite liegend mit dem hydrostatischen Druck angesetzt werden. Hinsichtlich der Einbaugeschwindigkeit sind diesbezüglich Werte wie für Normalbeton bzw. sogar schnellere anzustreben. In Sonderfällen kann die Erstarrungszeit des Betons zur Abminderung des Frischbetondrucks berücksichtigt werden.“¹⁰

In folgender Abbildung wird der Unterschied zwischen dem hydrostatischem Druckzustand und dem gemessenen Schalungsdruck dargestellt.

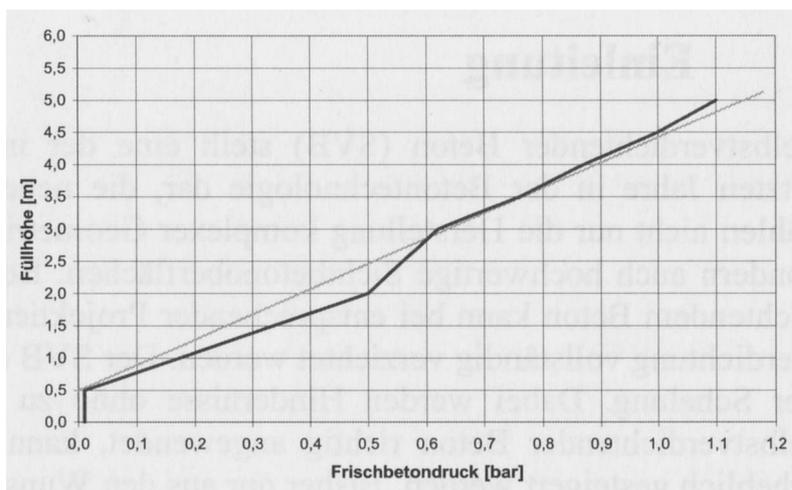


Abbildung 4-3: gemessener Frischbetondruck einer Stütze¹¹

Die dünne hellere Linie im obigen Diagramm beschreibt den hydrostatischen Druck des Betons. Die fette dunklere Linie beschreibt den tatsächlich gemessenen Schalungsdruck. Auf die Tatsache, dass der gemessene Frischbetondruck den hydrostatischen Druck übersteigt wird nicht genauer eingegangen.

¹⁰ König; Holschemacher; Dehn 2001, S. 70.

¹¹ König; Holschemacher; Dehn 2001, S. 70

4.4 Überschlägige Berechnung des Frischbetondrucks mittels Erddrucktheorie zur Auswertung der ermittelten Ergebnisse

Als Ansatz zur Betondruckberechnung dient die aus dem Grundbau bekannte Erddrucktheorie nach Mohr-Coulomb. Ziel ist es, den Betondruck mittels der Erddrucktheorie über die Bodenparameter Wichte (γ), Reibungswinkel (φ) und Kohäsion (c) zu berechnen. Die Kohäsion des Frischbetons kann jedoch vernachlässigt werden, da der flüssige Beton keine Kohäsion aufweist. Beim Festbeton ist die Zugfestigkeit des Betons mit der Kohäsion des Bodens vergleichbar. Da aber die charakteristische Zugfestigkeit (f_{ctk}) eines Betons mit der Festigkeitsklasse C25/30 nach 28 Tagen nur 1,8 N/mm² beträgt, ist die Kohäsion im Festbeton ebenfalls verschwindend klein und somit vernachlässigbar.

Für die Erddruckberechnung wird der Fall Erdruhedruck herangezogen. *„Der Ruhedruck ist streng genommen nur definiert für normalkonsolidierten Boden und eben begrenztes horizontales Gelände ohne Wand.“*¹² Beim abgeschlossenen Betoniervorgang, wenn sich das Schüttrohr nicht mehr im betrachteten Bereich des Betons befindet, kann von einer Konsolidierung des Betons ausgegangen werden, d.h. die Verdichtung oder auch Zusammendrückbarkeit ist abgeschlossen. Die Oberfläche des Betons ist annähernd eben begrenzt und horizontal und entspricht somit der Definition des Erdruhedrucks.

Der Ruhedruck besitzt in homogenen Böden eine dreieckförmige Spannungsverteilung.

Die Bestimmung des Reibungswinkels von Beton bei unterschiedlichen Betonkonsistenzen und in Abhängigkeit des Erstarrungszustandes muss im Labor erfolgen und ist nicht Teil dieser Arbeit. Es werden Reibungswinkel für die Berechnung angenommen.

Der Erdruhedruck wird mittels empirischer Formel wie folgt bestimmt:

$$e_0 = \gamma \times h \times K_0$$

Gleichung 4-5¹³

¹² Smolczyk -Teil 1 1990, S. 345.

¹³ Dörke; Dehne 1999, S. 254.

e_0	Erdruchdruck [kN/m ²]
γ	Wichte des Bodens [kN/m ³]
h	Wandhöhe [m]
K_0	Ruhedruckbeiwert []

Die Wichte des Bodens ergibt sich aus der Dichte, die mit der Erdbeschleunigung multipliziert wird.

Der Erdruchdruckbeiwert (K_0) hängt vom Reibungswinkel ab und errechnet sich laut folgender Gleichung:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad \text{Gleichung 4-6}^{14}$$

φ Reibungswinkel des Bodens [°]

folgendes Beispiel soll die Berechnung des Frischbetondrucks veranschaulichen:

<u>Beispiel:</u>	Bohrpfahl mit einer Tiefe h.....5 m
	Wichte γ von Beton24 kN/m ³
	<u>Reibungswinkel φ10°</u>

Ergebnis für K_0 :

$$K_0 = 1 - \sin \varphi = 1 - \sin(10^\circ) = 0,83$$

Ergebnis für e_0 :

$$e_0 = \gamma \times h \times K_0 = 24 \text{ kN/m}^3 \times 5 \text{ m} \times 0,83 = 99,6 \text{ kN/m}^2 \approx 1,0 \text{ bar}$$

Laut obiger Rechnung würde sich ein Betondruck von 1,0 bar in 5 m Tiefe einstellen. Der Betondruckverlauf steigt von 0 bar an der Oberfläche bis auf 1 bar am Pfahlfuß linear an.

Für tiefere Bauteile müsste weiters die Veränderung der Betonkonsistenz über die Betonierdauer berücksichtigt werden.

Zum Vergleich des obigen Beispiels liegt der Erdruchdruck bei gleicher Tiefe eines sandigen Kieses mit einem Reibungswinkel von 35° bei ca. 0,5 bar.

¹⁴ Dörke; Dehne 1999, S. 254.

5 MESSUNG DES FRISCHBETONDRUCKS

5.1 Ausgewählte Messverfahren zur Frischbetondruckmessung

5.1.1 Allgemeines

Im Bereich der Frischbetondruckmessungen bei Schlitzwänden und Bohrpfählen gibt es noch keine Erfahrungen. Die meisten Druckaufnehmer weisen eine sehr empfindliche Membran zur Messung des Drucks auf. Beim Betonieren fließt der Beton am Druckmesssensor vorbei. Daraus resultiert dass die Sensoren sehr widerstandsfähig und erschütterungsresistent ausgeführt sein müssen. Es muss ebenfalls die baustellentaugliche Handhabung der Messgeräte und der Aufzeichnungshardware gegeben sein.

Zur Bestimmung des Betondrucks wurden folgende Gerätetypen gewählt:

- Druckkissen und
- Flüssigkeitsdruckgeber

5.1.2 Druckkissen – DK

Allgemeines

Druckkissen werden unter anderem zum Messen von Spannungen in Tunnelschalen in radialer und tangentialer Richtung verwendet. Zum Ablesen des gemessenen Drucks können elektrische Geber oder Manometer mit Druckleitungen verwendet werden.

Funktionsweise

Bei einem Druckkissen handelt es sich um einen plattenförmigen rechteckigen Körper, der mit einer Flüssigkeit (Öl) gefüllt ist. Sobald ein Druck auf die Oberfläche des Druckkissens wirkt, wird dieses zusammengedrückt und die darin befindliche Flüssigkeit übt eine Kraft auf den daran angeschlossenen elektrischen Druckgeber aus.



Abbildung 5-1: Hydraulisches Druckkissen vom Typ Behensky

Der elektrische Druckgeber wandelt den aufgebrauchten Druck in eine elektrische Spannung um und gibt diese über ein geschirmtes Kabel an das Auslesegerät weiter. Die Höhe dieser Spannung ist vom anstehenden Druck abhängig und wird mittels einer Kalibrierkurve umgerechnet.

Mittels eines digitalen Auslesegerätes werden die Signale der elektrischen Geber in Drücke umgewandelt. Das Auslesegerät wird an einen Rechner angeschlossen, womit die Einstellungen und Auswertungen vorgenommen werden. Im vorliegenden Fall wurden die elektrischen Druckgeber über ein Netzteil mit Gleichstrom versorgt, um Signale zum Auslesegerät senden zu können.

Zur Anwendung kam ein Messsystem mit den Druckkissen, der Größe 150 x 150 mm, und elektrischen Gebern der Firma Behensky. Sowie der digitale Meßverstärker Spider 8 der Firma Hottinger Baldwin mit der dazugehörigen Software.

5.1.3 Flüssigkeitsdruckgeber – FDG

Allgemeines

Piezoresistive Druckaufnehmer werden seit über 30 Jahren eingesetzt. Die Anwendungsgebiete sind die Niveaumessstechnik, Pneumatik, Hydraulik und Luftfahrt. Da diese Aufnehmer aufgrund der sehr dünnen Metallmembrane sehr empfindlich sind, müssen sie durch geeignete vorgelagerte Konstruktionen geschützt werden.

Funktionsweise

Bei diesem Geber zur Frischbetondruckmessung handelt es sich um einen Frontmembran-geber, der in ein Gehäuse eingebaut wird. Zum Schutz der Membran gegen mechanische Beschädigungen ist eine Silikongel-Füllung vorgelagert. Hinter der Membran befindet sich ein in Silikonöl gebetteter piezoresistiver Siliziumchip, der den Druck in eine Spannung umwandelt.

Wenn nun der flüssige Beton über die Silgenvorlage auf die metallische Membran wirkt, erzeugt der Druck des Silikongels im Siliziumchip eine Spannung, die über den ebenfalls im Gehäuse befindlichen Verstärker zur Messstation weitergeleitet wird.

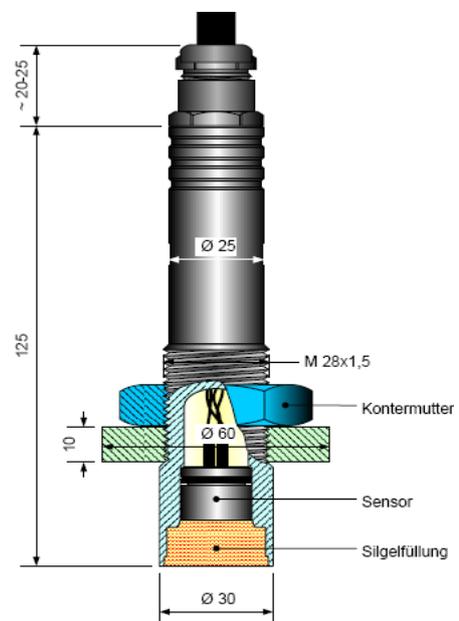


Abbildung 5-2: Flüssigkeitsdruckgeber

Die Messstation versorgt die Sensoren mit Strom und ist mit einem Datalogger ausgestattet, der später mittels PC und geeigneter Software ausgelesen werden kann. Vor der Messung

muss die Messstation per PC programmiert werden, um damit Messbeginn und -ende, Steckerbelegung sowie das Zeitintervall der einzelnen Messungen usw. festzulegen.

Zur Anwendung kam ein von der Firma Glötzl Baumesstechnik entwickeltes Messsystem, das aus dem Flüssigkeitsdruckgeber und der Messstation MDL 20 mit geeigneter Software bestand.

5.2 Versuchsaufbau

5.2.1 Bohrpfähle

Die Anordnung der Messstellen wird durch die tiefste Position am Bewehrungskorb und dem Pfahlkopf vorgegeben. Die tiefste Position liegt ca. 50cm oberhalb des Pfahlfußes. Die oberste Messstelle wird fünf Meter unterhalb des Pfahlkopfes angeordnet. Fünf Meter werden deshalb gewählt, weil bis zu dieser Tiefe Ergebnisse von Betondruckmessungen im Hochbau vorliegen. Dazwischen werden weitere drei Messebenen eingefügt, um den Betondruckverlauf kontinuierlich über die Tiefe messen zu können. Die Aufteilung dieser Messpunkte erfolgt in nahezu gleichen Abständen. Etwaige Stöße der Bewehrungskörbe müssen berücksichtigt werden, da an diesen Stellen das Montieren der Sensoren nicht möglich ist.

Die Messstellen werden entlang einer vertikalen Linie an einem Bewehrungsstabes befestigt, um den Betoniervorgang mittels Schüttrohr nicht zu beeinträchtigen und die Drucksensoren vor etwaigen Beschädigungen zu schützen.

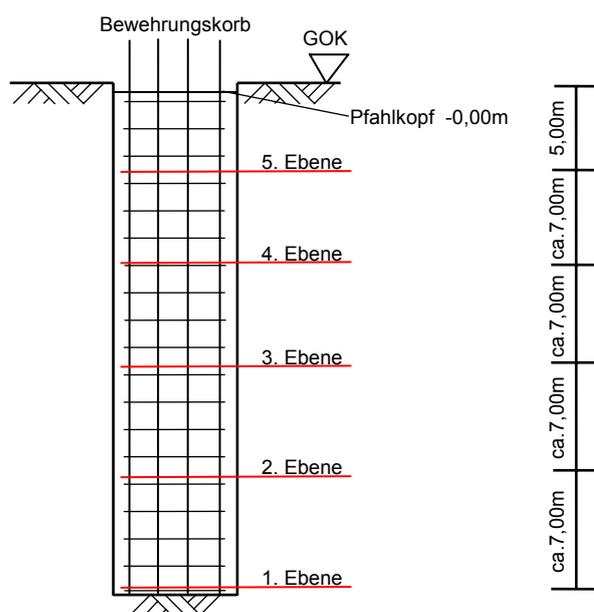


Abbildung 5-3: Messanordnung Pfahl

Die Messaufnehmer werden an der Innenseite des Bewehrungskorbes montiert. Da erstens der Platz zwischen Bohrrohr und Bewehrungskorb zu gering ist und zweitens die Aufnehmer vor Beschädigungen aus herstellungstechnischen Gründen zu vermeiden ist.

Zum Schutz der Messaufnehmer werden Schutzhülsen auf den Bewehrungskorb aufgeschweißt und die Flüssigkeitsdruckgeber darin eingebaut. Um ein direktes Anstoßen der Schutzhülsen durch das Schüttrohr sowie ein eventuelles Abschlagen der Schutzhülsen zu vermeiden, werden des weiteren Abweiser aus Bewehrungsstahl in Kegelform aufgeschweißt (siehe Abbildung 5-4).

Die Druckkissen werden ca. 25 cm unterhalb der Schutzhülsen mittels Kabelbindern befestigt und sind somit vor Beschädigungen durch das Schüttrohr ausreichend geschützt.

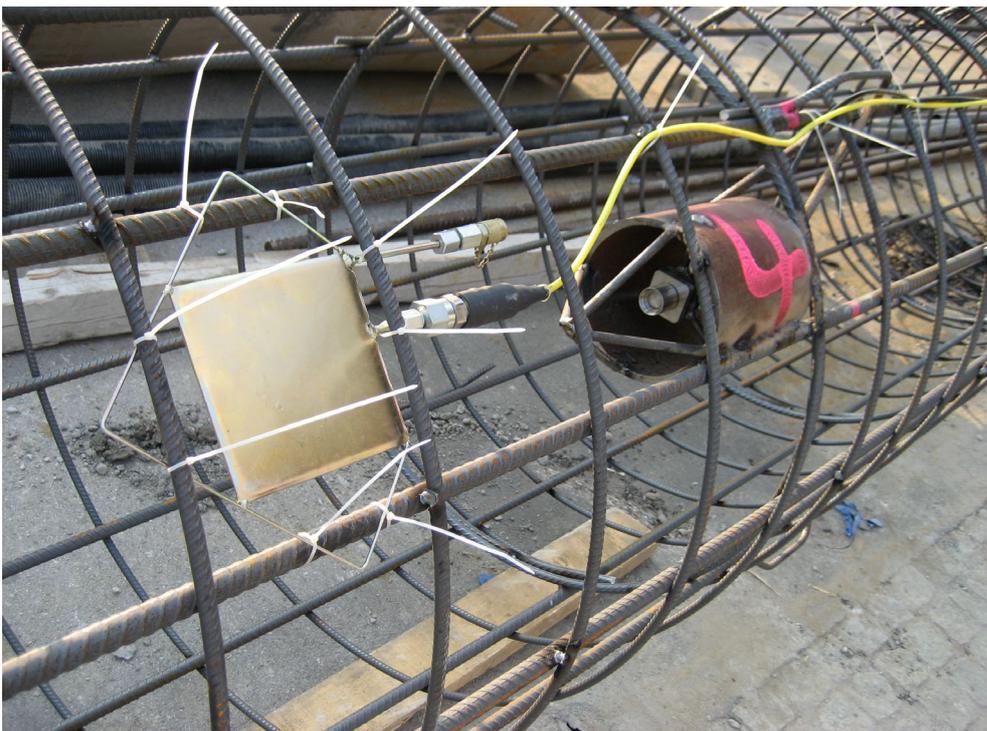


Abbildung 5-4: Bewehrungskorb mit Druckmesssensoren

Die Verlegung der elektrischen Leitungen erfolgte außen am Bewehrungskorb, um Schäden durch das Schüttrohr zu vermeiden. Die Leitungen werden ca. alle 80 cm an den Längsisen der Bewehrungskörbe befestigt.

5.2.2 Schlitzwände

Die Aufteilung der Messebenen erfolgt wie bei den Bohrpfählen, zusätzlich zu den Messpunkten in der Mitte der Schlitzwand wird der Betondruck in drei Ebenen am Rand gemessen.

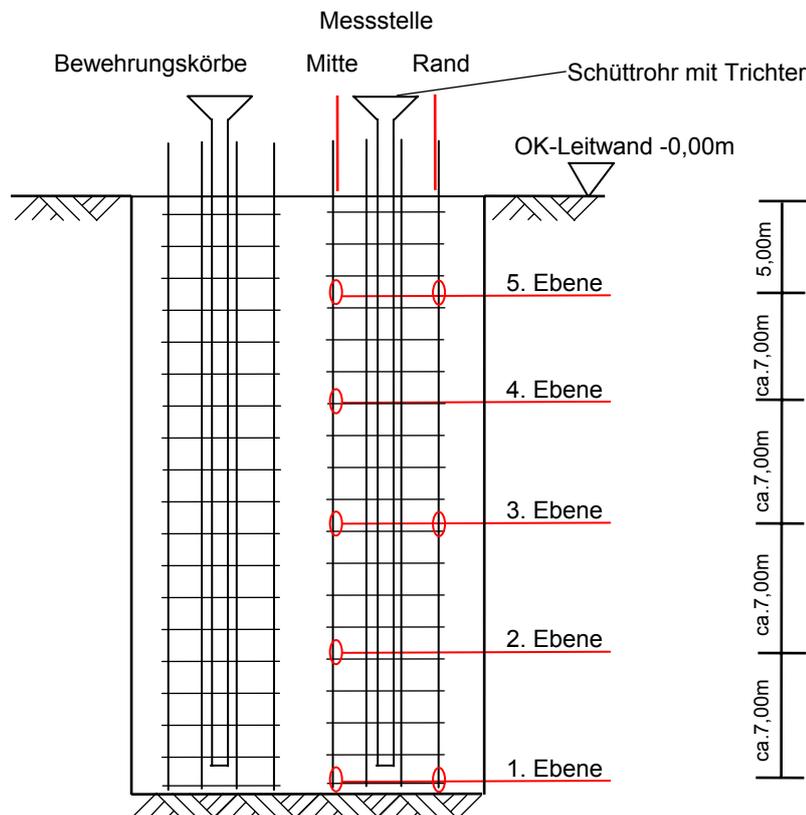


Abbildung 5-5: Messanordnung Schlitzwand

Da die Bewehrungskörbe der Schlitzwände in unserem Fall drei Unterteilungen aufweisen (mittlerer Bereich für Schüttrohr, seitliche Bereiche für Messaufnehmer siehe Abb. 7-5), ist kein Schutz der Messaufnehmer notwendig. Die Messaufnehmer werden auch hier aus den bereits genannten Gründen im Inneren des Bewehrungskorbes montiert. Die Verlegung der elektrischen Kabel erfolgt ebenfalls im Inneren des Bewehrungskorbes.



Abbildung 5-6: Bewehrungskorb mit Unterteilungen und Messaufnehmern

5.3 Versuchsablauf

5.3.1 Bohrpfähle

Vor dem Einbau der Bewehrungskörbe wird eine Nullmessung durchgeführt, um eventuelle Beschädigungen der Messgeräte festzustellen.

Nach Abschluss der Nullmessung kann mit dem Einbau der Bewehrungskörbe begonnen werden. Zuerst wird der untere Korbteil vorsichtig im Bohrrohr abgelassen bis noch etwa zwei Meter davon heraus schauen. Dann wird der Korb mittels einer Eisenstange abgefangen, damit der mittlere Korbteil aufgesetzt und mittels Seilklemmen verbunden werden kann.

Beim weiteren Ablassen des Bewehrungskorbes müssen die elektrischen Leitungen des unteren Korbes am darüber befindlichen Bewehrungskorb mittels Kabelbinder befestigt werden. Der oberste Korbteil kann dann ebenfalls mit dem bereits im Bohrrohr befindlichem Korb aufgesetzt und verbunden werden. Der zusammengesetzte Bewehrungskorb wird auf den Boden des Bohrloches abgestellt.



Abbildung 5-7: eingebauter Bewehrungskorb mit elektrischen Leitungen

Danach werden die elektrischen Leitungen an den Messverstärker angeschlossen und eine Kontrollmessung durchgeführt. Anschließend kann mit dem Betonieren des Pfahles und dem Messen des Betondrucks begonnen werden.

Mit Beginn der Messung wird alle zehn Sekunden der Betondruck aufgezeichnet. Die Messung wird beim Ziehen und Wegheben der Bohrrohre unterbrochen. Dazu werden die elektrischen Leitungen abgeschlossen und in den Schüttrohrtrichter gelegt um ein Wegheben der Verrohrung zu ermöglichen. Nach dem das Bohrrohr weggehoben ist wird die Betondruckmessung fortgesetzt.

Die Messung wird nach Abschluss der Betonierarbeiten mit dem Abklingen des Betondrucks beendet.



Abbildung 5-8: Ablauf beim Ziehen der Verrohrung

5.3.2 Schlitzwände

Wie bei den Bohrpfählen wird auch hier zuerst eine Nullmessung durchgeführt um eventuelle Beschädigungen zu erkennen.

Der Einbau der Bewehrungskörbe funktioniert nach demselben Prinzip wie bei den Bohrpfählen, jedoch werden die elektrischen Leitungen vom unteren Korb in den oberen Korb innen hinauf gefädelt.

Im Gegensatz zu den Bohrpfählen wird bei den Schlitzwänden der Bewehrungskorb nicht am Schlitzwandfuß abgestellt, sondern mittels Stahlträgern auf der Leitwand abgefangen (siehe Abbildung 6-5).



Abbildung 5-9: Einbau des Bewehrungskorbes

Nach dem Einbau der Bewehrung und dem Anschließen der Kabel an den Computer kann mit der Messung begonnen werden. Die Messintervalle liegen bei zehn Sekunden. Da bei der Schlitzwand keinerlei Bohrröhre gezogen werden, muss die Messung nicht unterbrochen werden.

Die Beendigung der Messung erfolgt mit dem Abklingen des Druckabfalls nach dem Betonierende.

5.4 Versuchsergebnisse

5.4.1 Baustelle ÖBB-Brücke, Salzburg

Angaben zur Baustelle

Bei dieser Baustelle handelte es sich um die Gründung des Widerlagers mittels Bohrpfählen für die neu zu errichtende ÖBB-Brücke über die Salzach in Salzburg.

Baugrundsituation:

Unterhalb einer ca. 1,50 m dicken Anschüttung befindet sich eine Kiesschicht mit einer Mächtigkeit von ca. 10 m. Darunter befindet sich Salzburger Seeton, der sich bis zu einer Tiefe von ca. 30 m erstreckt. Die für die Gründung der Brücke notwendigen Bohrpfähle binden in die darunter liegende Moräne ein.

5.4.1.1 Pfahl P40.17

Tabelle 5-1: Messanordnung, P40.17

Pfahlnummer	P40.17	Datum der Betondruckmessung	19.07.2007
Pfahldurchmesser x Pfahltiefe		Ø 1,20 x 34,00m	
Messebene	Tiefe unter GOK	Aufnehmertyp	
5. Ebene	-5,25 m	Druckkissen + Flüssigkeitsdruckgeber	
4. Ebene	-12,25 m	Druckkissen + Flüssigkeitsdruckgeber	
3. Ebene	-20,45 m	Druckkissen + Flüssigkeitsdruckgeber	
2. Ebene	-27,45 m	2 Flüssigkeitsdruckgeber, nach unten bzw. oben gerichtet, um lagebedingte Druckunterschiede zu erfassen (kein DK aus Platzgründen möglich)	
1. Ebene	-33,45 m	Druckkissen + Flüssigkeitsdruckgeber	

Ablauf des Betoniervorgangs

Aus jedem auf der Baustelle ankommenden Betonmischwagen wurde eine Betonprobe entnommen, um das Ausbreitmaß, die Frischbetondichte und die Betontemperatur zu bestimmen. Beim ersten Transportbetonmischwagen wurde ebenfalls das Bluten des Frischbetons unter Druck mit der Betonfilterpresse ermittelt.

Messergebnisse

Tabelle 5-2: Ausbreitmaß und Frischbetondichte, P40.17

	Ausbreitmaß	Frischbetonrohhdich-	Temperatur [°C]	
	[cm]	[kg/m ³]	Luft	Beton
1	51	2430	23	26
2	51	2420	25	24
3	57	2410	26	27
4	57	2420	27	28
5	57	2430	27	28
6	54	2380	27	29
Minimum	51	2380		
Maximum	57	2430		
Durchschnitt	55	2420		

Auffallend bei der obigen Tabelle ist die große Schwankungsbreite der Betonkonsistenz. Die vereinbarte Konsistenzklasse F59 wurde zum Teil deutlich unterschritten.

Tabelle 5-3: Ergebnis der Betonfilterpresse BPV, P40.17

Nr.	Ausbreitmaß	Zementmenge	Wassermenge	Bluten nach [kg/m ³]	
	[cm]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	30 min	60 min
1	51	368	185	34,26	39,60

Die von der BPV festgesetzte Grenze für das Bluten von Beton unter Druck bei 3 bar liegt nach 30 min bei 32 kg/m³ Wasser, bzw. nach 60 min bei 40 kg/m³. Die Grenzwerte wurden bei zu geringer Konsistenz annähernd eingehalten. Die Untergrenze der geforderten Konsistenzklasse F59 liegt bei 56 cm.

Die mittlere Steiggeschwindigkeit des Betons während des Betoniervorgangs lag bei ca. 13,1 m/h.

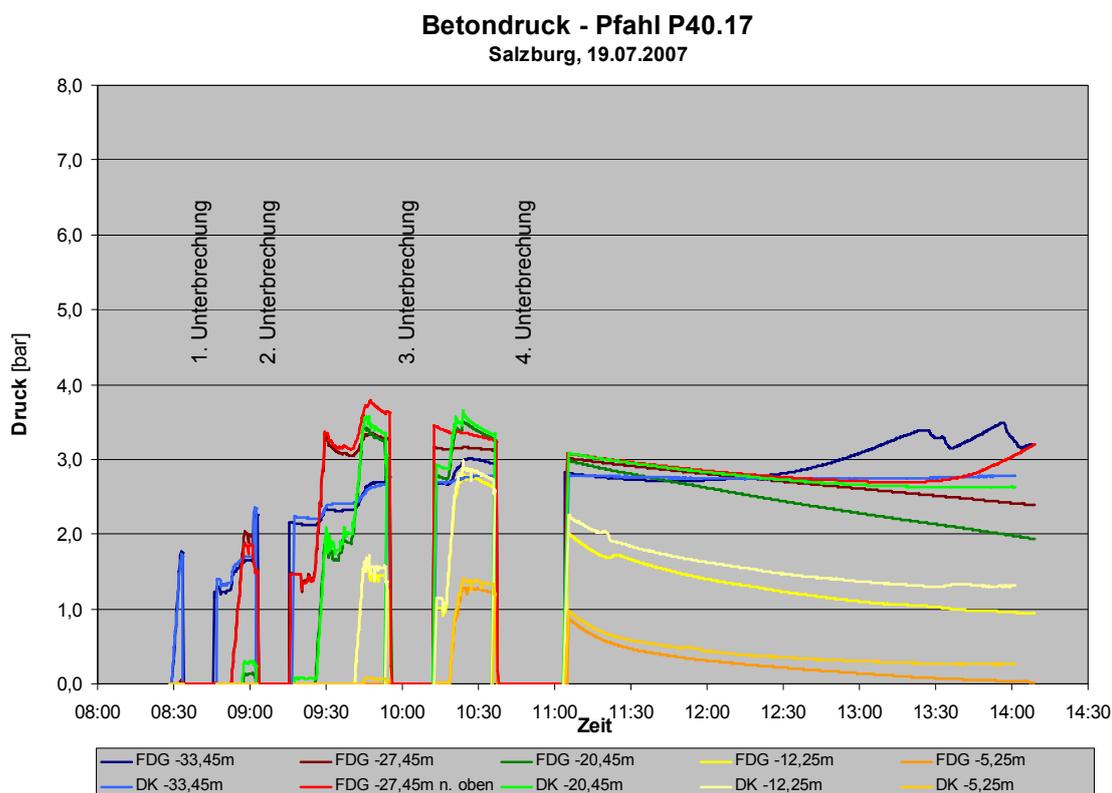


Abbildung 5-10: Betondruck, P40.17

Nach dem Einbau des Betons des ersten Transportbeton-LKWs wurden 3 m Verrohrung und 4 m Schüttröhr gezogen (1. Unterbrechung, siehe Abbildung 5-10). Danach wurde der zweite Transportbeton-LKW verarbeitet, anschließend wurden 6 m Verrohrung und 4 m Schüttröhr ausgebaut (2. Unterbrechung). Nachdem der Beton des dritten LKWs eingebaut wurde, sind wiederum 7 m Schüttröhr gezogen worden. Nach dem vierten Transportbeton-LKW wurden 10 m Bohrröhr und 5 m Schüttröhr gezogen (3. Unterbrechung). Darauf folgend wurde der fünfte Transportbeton-LKW verarbeitet. Wiederum wurden 8 m Bohrröhr und das restliche Schüttröhr ausgebaut (4. Unterbrechung). Der letzte und sechste LKW wurde ohne Beton-

druckmessung verarbeitet und danach das restliche Bohrrohr ausgebaut (ebenfalls 4. Unterbrechung).

In der folgenden Tabelle ist der Betondruck mit der Höhe der Betonsäule, die über dem jeweiligen Drucksensor liegt, zu sehen. Die Betondrücke sind relativ gering, da die Betonkonsistenz bei den ersten beiden Transportbeton-LKWs sehr niedrig war ($F = 51 \text{ cm}$).

Tabelle 5-4: Betondrucktabelle mit Überlagerungshöhe, P40.17

Betondrucktabelle zur Abbildung 5-10										
Messebene	BD	HB	BD	HB	BD	HB	BD	HB	BD	HB
DK -33,45	1,58	6,20	1,67	13,20	2,42	21,50	2,69	28,60	2,78	33,45
FDG -20,45	1,61		1,63		2,34		2,69		2,82	
FDG -27,45 nach unten			1,85	7,20	3,07	15,50	3,13	22,60	3,01	27,45
FDG -27,45 nach oben			1,72		3,21		3,36		3,08	
DK -20,45					2,26	8,50	2,96	15,60	2,92	20,45
FDG -20,45					2,27		2,92		2,98	
DK -12,25							1,76	7,40	2,25	12,25
FDG -12,25							1,74		2,01	
DK -5,25									0,98	5,25
FDG -5,25									0,87	
Zeit nach Betonierbeginn	00:03:30		00:27:49		01:12:20		01:49:50		02:36:20 Betonierende	
BD...Betondruck [bar]		HB...Höhe der Betonsäule die über dem Drucksensor liegt [m]								

5.4.1.2 Pfahl P50.16

Tabelle 5-5: Messanordnung, P50.16

Pfahlnummer	P50.16	Datum der Betondruckmessung	09.08.2007
Pfahldurchmesser x Pfahltiefe		Ø 1,20 x 33,00m	
Messebene	Tiefe unter GOK	Aufnehmertyp	
5. Ebene	-4,25 m	Druckkissen + Flüssigkeitsdruckgeber	
4. Ebene	-11,25 m	Druckkissen	
3. Ebene	-19,45 m	Druckkissen + Flüssigkeitsdruckgeber	
2. Ebene	-26,45 m	Druckkissen	
1. Ebene	-32,45 m	Druckkissen + Flüssigkeitsdruckgeber	

Ablauf des Betoniervorgangs

Es wurde ein Pfahlbeton mit einer Konsistenzklasse von F59 an der oberen Grenze (über 60 cm) und einer Verzögerung der Anfangserhärtung des Betons von vier Stunden bestellt und verarbeitet.

Aus jedem auf der Baustelle ankommenden Betonmischwagen wurde eine Betonprobe entnommen, um das Ausbreitmaß, die Frischbetondichte und die Betontemperatur zu bestimmen. Beim ersten und vierten Transportbetonmischwagen wurde ebenfalls das Bluten des Frischbetons mit der Betonfilterpresse BPV ermittelt.

Messergebnisse

Tabelle 5-6: Ausbreitmaß und Frischbetondichte, P50.16

	Ausbreitmaß	Frischbetonrohddich-	Temperatur [°C]	
	[cm]	[kg/m³]	Luft	Beton
1	62	2370	15,5	19,7
2	56	2380	14,9	19,5
3	64	2450	15,7	20,3
4	64	2360	15,7	21,3
5	64	2410	15,4	20,4
6	63	2450	16,2	22,4
7	64	2440	16,3	20,9
Minimum	56	2360		
Maximum	64	2450		
Durchschnitt	62	2410		

Tabelle 5-7: Ergebnis der Betonfilterpresse BPV, P50.16

Nr.	Ausbreitmaß	Zementmenge	Wassermenge	Bluten nach [kg/m³]	
	[cm]	[kg/m³]	[kg/m³]	30 min	60 min
1	62	366	192	53,47	62,38
5	64	368	190	39,60	50,50

Die von der BPV festgesetzte Grenze für das Bluten des Frischbetons unter Druck bei 3 bar liegt nach 30 min bei 32 kg/m³ Wasser, bzw. nach 60 min bei 40 kg/m³. Die Grenzwerte wurden bei Weitem überschritten und zwar um 56% beim ersten und um 26% beim zweiten Blutversuch.

2,5 Stunden nach Betonierende hatte sich Wasser mit einer Tiefe von 25 cm am Pfahlkopf angesammelt.

Die mittlere Steiggeschwindigkeit des Betons während des Betoniervorgangs lag bei ca.

10,8 m/h.

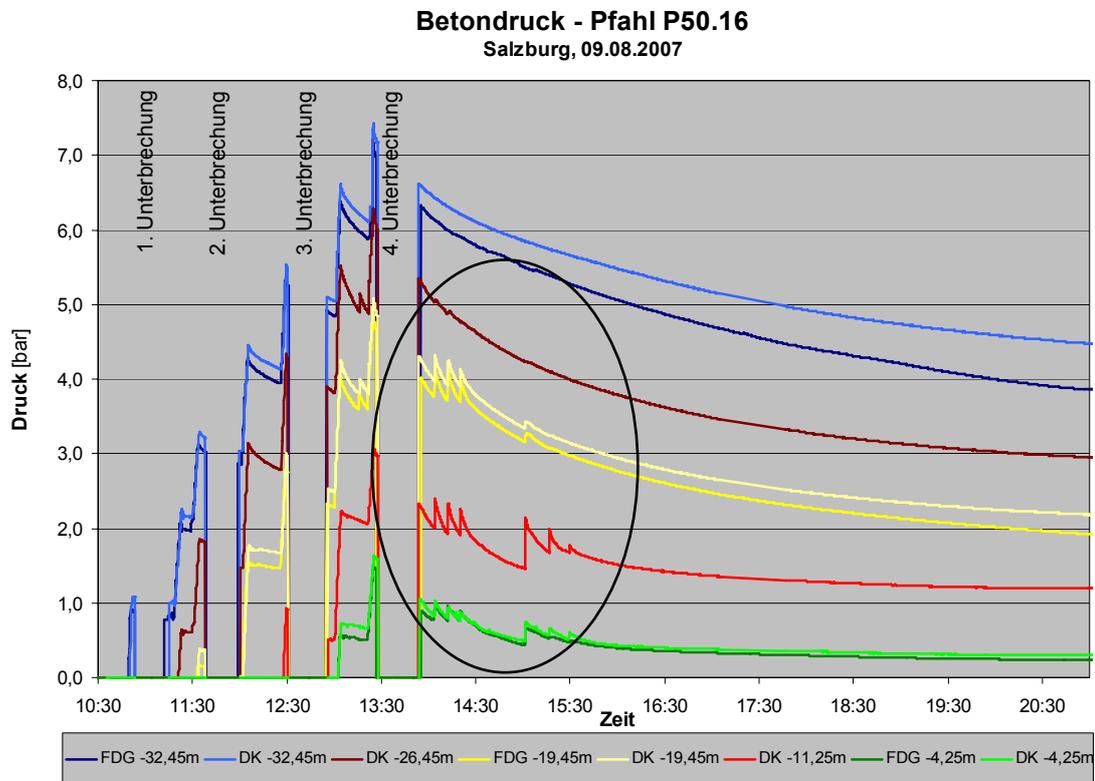


Abbildung 5-11: Betondruck, P50.16

Nach dem Einbau des Betons des ersten Transportbeton-LKWs wurden 4 m Verrohrung gezogen (1. Unterbrechung, siehe Abbildung 5-11). Danach wurde der zweite Transportbeton-LKW verarbeitet und 8 m Schüttrohr ausgebaut. Nachdem der Beton des dritten LKWs eingebaut worden war, sind 4 m Schüttrohr und 6 m Bohrrrohr gezogen worden (2. Unterbrechung). Nach dem vierten Transportbeton-LKW wurden 4 m Schüttrohr gezogen, nach dem fünften Transportbeton-LKW 4 m Schüttrohr und 10 m Verrohrung ausgebaut (3. Unterbrechung). Danach wurde der Beton des sechsten Transportbeton-LKWs eingebaut und das restliche Schüttrohr ausgebaut. Nachdem der siebente LKW verarbeitet worden ist, wurde das restliche Bohrrrohr gezogen und der Seilbagger mit Verrohrungsmaschine zur Seite gestellt. (4. Unterbrechung)

Die Zacken im Betondruckdiagramm nach der vierten Unterbrechung (schwarze Markierung)

wurden durch das Umstellen des Bohrpfahlerätes erzeugt, um den Grund für die Entstehung der Zacken sicherzustellen wurde ca. eine halbe Stunde später nochmals die Verrohrungsmaschine angehoben und wieder abgestellt.

Tabelle 5-8: Betondrucktabelle mit Überlagerungshöhe, P50.16

Betondrucktabelle zur Abbildung 5-11										
Messebene	BD	HB	BD	HB	BD	HB	BD	HB	BD	HB
DK -32,45	1,63	6,20	3,06	13,20	4,44	21,40	5,72	28,60	6,60	32,45
FDG -32,45	1,73		2,97		4,62		5,77		6,32	
DK -26,45			1,58	7,20	3,41	15,40	4,79	22,60	5,33	26,45
DK -19,45					2,08	8,40	3,53	15,60	4,29	19,45
FDG -19,45					2,20		3,53		4,01	
DK -11,25							1,54	7,40	2,32	11,25
DK -4,25									1,06	4,25
FDG -4,25									0,90	
Zeit nach Betonierbeginn	00:30:50		00:43:20		01:37:20		02:12:30		03:04:00 Betonierende	
BD...Betondruck [bar] HB...Höhe der Betonsäule die über dem Drucksensor liegt [m]										

Der maximale Betondruck wurde kurz vor dem Ziehen der letzten Bohrröhre gemessen. Zu diesem Zeitpunkt war der gesamte Beton verarbeitet.

5.4.2 Baustelle Budapest – Schlitzwand

Allgemeines

Bei dieser Baustelle handelt es sich um die Errichtung einer U-Bahnstation im Stadtgebiet von Budapest. Die Schlitzwand dient zur Baugrubensicherung.

Baugrundsituation:

Bis zu einer Tiefe von ca. 10 m stehen Ausande mit Schluffeinlagerungen an. Darunter wechseln sich Ton- und Mehlsandschichten bis zu einer Tiefe von ca. 20 m ab. Unterhalb dieser Schichten ist Schluff anzutreffen.

Schlitzwandlamelle Nr.107 im Grundriss – 7,50 x 1,00 x 28,80 m - Schließerlamelle

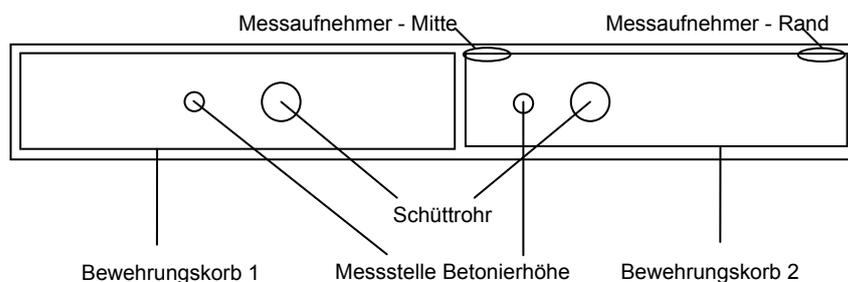


Tabelle 5-9: Messanordnung, Budapest SW

Elementnummer	107	Datum der Betondruckmessung	28.08.2007
Schlitzwandabmessungen		7,50 x 1,00 x 28,80	
Messebene	Tiefe unter GOK	Aufnehmertyp	
5. Ebene	-5,00 m	Druckkissen – Mitte + Rand	
4. Ebene	-13,50 m	Druckkissen – Mitte	
3. Ebene	-18,30 m	Druckkissen – Mitte + Rand	
2. Ebene	-24,00 m	beim Einbau beschädigt – lieferte keine Daten	
1. Ebene	-28,40 m	Druckkissen – Mitte + Rand	

Ablauf des Betoniervorgangs

Beim Einbau des unteren Bewehrungskorbes und dem damit verbundenem Aufrichten in die Vertikale kam es zur Beschädigung des Druckkissens auf der Ebene -24,00 m. Dadurch lieferte der Geber keine verwertbaren Messdaten, die restlichen Messaufnehmer erlitten keine Beschädigungen.

Es wurde jedem auf der Baustelle ankommenden Betonmischwagen eine Betonprobe entnommen, um das Ausbreitmaß zu ermitteln. Die ermittelten Konsistenzen (siehe Tabelle 5-11) müssen jedoch abgemindert werden, da die Zeitspanne von der Bestimmung des Ausbreitmaßes bis zum Einbau des Betons in die Schlitzwandlamelle bis zu 50 Minuten betrug. Weiters wurde bei drei Transportbeton-LKWs die Frischbetondichte, Betontemperatur und das Bluten des Frischbetons mit der Betonfilterpresse bestimmt.

Messergebnisse

Tabelle 5-10: Ergebnis der Betonfilterpresse BPV, SW Budapest

Nr.	Ausbreitmaß	Zementmenge	Wassermenge	Bluten nach [kg/m ³]	
	[cm]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	30 min	60 min
3	60	400	170	37,62	44,95
19	57	400	170	27,33	32,67
27	58	400	170	28,71	34,75

Dem Wagen 27 wurde eine Frischbetonprobe zur Bestimmung des Blutens unter Druck ca. 40 min nach der Bestimmung des Ausbreitmaßes entnommen. Die Grenzwerte für das Bluten von Frischbeton unter Druck wurden bis auf den ersten Wagen eingehalten.

Die mittlere Steiggeschwindigkeit des Betons während des Betoniervorgangs lag bei ca. 9,5 m/h.

In der folgenden Tabelle ist ein sehr einheitliches Ausbreitmaß zu erkennen, da jene Betonlieferungen mit zu geringem Ausbreitmaß mit Hilfe von Fließmittel auf das gewünschte Ausbreitmaß eingestellt wurden.

Tabelle 5-11: Ausbreitmaß und Frischbetondichte, SW Budapest

	Lamellen Nr.	Ausbreitmaß	Frischbetonrohhdich- [kg/m³]	Temperatur [°C]	
		[cm]		Luft	Beton
1	1	60			
2	2	58			
3	2	60	2380	24,6	29,3
4	1	57			
5	2	59			
6	1	59			
7	2	55			
8	1	56			
9	2	58			
10	1	57			
11	2	60			
12	1	59			
13	1	60			
14	2	56			
15	2	58			
16	1	58			
17	2	58			
18	1	58			
19	2	57	2360	27,1	28,0
20	2	58			
21	1	56			
22	2	57			
23	1	58			
24	1	58			
25	2	56			
26	1	57			
27	1	58	2380	28,4	28,5
Minimum		55	2360		
Maximum		60	2380		
Durchschnitt		58	2370		

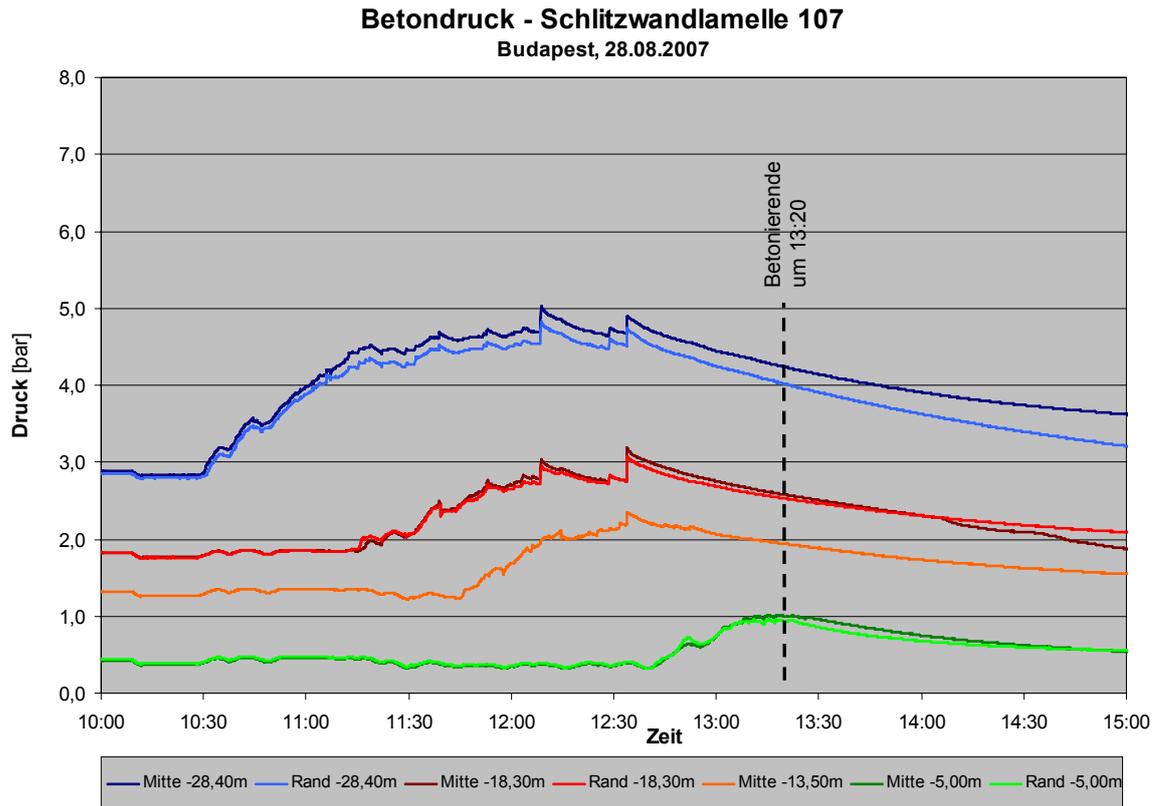


Abbildung 5-12: Suspension- und Betondruck, SW Budapest

In der obigen Abbildung ist zu Beginn der Messung des Suspensionsdrucks der Bentonit-suspension zu sehen. Der anschließend leichte Abfall des Suspensionsdrucks hängt mit dem Absenken des Suspensionsspiegels für den darauf folgenden Betonvorgang zusammen. Es sind ebenfalls Schwankungen des Suspensionsspiegels zu erkennen. Besonders gut ist dies bei den Messaufnehmern auf der Ebene -5,00 m zu erkennen, da diese bis zur Berührung mit dem Beton die Schwankungen sehr gut wiedergeben.

Tabelle 5-12: Betondrucktabelle mit Überlagerungshöhe, SW Budapest

Betondrucktabelle zur Abbildung 5-12										
Messebene	SD	HS	BD	HB	BD	HB	BD	HB	BD	HB
DK -28,40 M	2,89	27,50	4,48	10,10	4,59	15,00	4,73	23,50	4,24	27,80
DK -28,40 R	2,85		4,30		4,43		4,54		4,02	
DK -18,30 M	1,82	17,40			2,43	4,90	3,01	13,40	2,58	18,30
DK -18,30 R	1,82				2,42		2,92		2,53	
DK -13,50 M	1,32	12,6					2,21	8,60	1,94	13,5
DK -5,00 M	0,42	4,10							1,00	5,00
DK -5,00 R	0,42						0,92			
Zeit nach Betonierbeginn	Suspensionsdruck		00:46:30		01:16:10		02:11:10		03:04:00 Betonierende	
BD...Betondruck [bar] HB...Höhe der Betonsäule die über dem Drucksensor liegt [m] SD...Suspensionsdruck [bar] HS...Höhe der Suspensionssäule die über dem Drucksensor liegt [m]										

In der obigen Tabelle ist zu erkennen, dass sich ein hydrostatischer Suspensionsdruck einstellt. Auch hier ist wieder der Betondruck bei der jeweiligen Überlagerung durch den Beton zu sehen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Stützflüssigkeit ebenfalls Druck auf den Beton ausübt.

5.4.3 Baustelle H3-4 Brixlegg – Schlitzwand

Allgemeines

Bei diesem Bauvorhaben handelt es sich um die Erstellung von Rettungsschächten mittels Schlitzwänden entlang der Zulaufstrecke Nord der Eisenbahnachse München – Verona.

Baugrundsituation:

Unterhalb einer ca. 2,50 m mächtigen Anschüttung befinden sich Fein- bis Grobsande und teilweise Fein- bis Mittelkiese bis zu einer Tiefe von 32,00 m. Darunter ist glimmerhältiger Feinsand anzutreffen.

Schlitzwandlamelle im Grundriss – 2 x (3,00 x 0,80 x 31,20)m

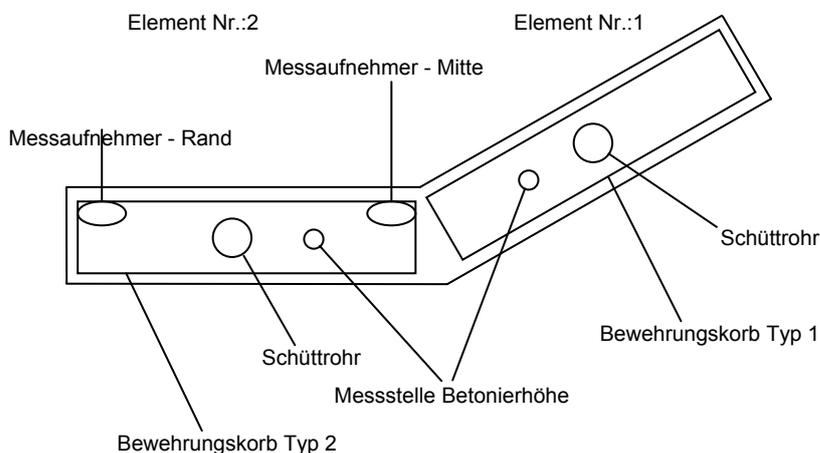


Tabelle 5-13: Messanordnung, SW Brixlegg

Elementnummer	1 + 2	Datum der Betondruckmessung	11.10.2007
Schlitzwandabmessungen		2 x (3,00 x 0,80 x 31,20)m	
Messebene	Tiefe unter GOK	Aufnehmertyp	
5. Ebene	-5,00 m	Druckkissen – Mitte + Rand	
4. Ebene	-13,60 m	Druckkissen – Mitte	
3. Ebene	-21,60 m	Druckkissen – Mitte	
2. Ebene	-25,80 m	2 Druckkissen – Mitte, vertikal u. horizontal einge-	
1. Ebene	-30,40 m	Druckkissen – Mitte + Rand	

Ablauf des Betoniervorgangs

Am Bewehrungskorb der Schlitzwand wurde ein Aussparungskasten angebracht um die Einbindung der Unterwasserbetonsohle sicherzustellen.

Es wurden auf der Messebene -25,80 m je ein Druckkissen in vertikaler und horizontaler Lage (siehe folgende Abbildung) ca. 20 cm unterhalb des Aussparungskastens montiert, um die Frischbetondruckunterschiede zwischen vertikal und horizontal wirkendem Druck zu bestimmen.



Abbildung 5-13: Aussparungskasten am Bewehrungskorb der SW-Brixlegg

Es wurde jedem auf der Baustelle ankommenden Betonmischwagen eine Betonprobe entnommen, um das Ausbreitmaß, die Frischbetondichte und die Betontemperatur zu ermitteln. Des weiterem wurden bei zwei Betonproben das Bluten des Frischbetons mittels Betonfilterpresse bestimmt.

Messergebnisse

Tabelle 5-14: Ausbreitmaß und Frischbetondichte, SW Brixlegg

	Werk	Lamellen Nr.	Ausbreitmaß	Frischbetonrohdi- chte	Temperatur [°C]	
			[cm]	[kg/m ³]	Luft	Beton
1	12	2	68	2380	8,2	17,6
2	7	1	56	2380	8,5	20,3
3	12	2	62	2370	8,6	18,2
4	12	1	60	2360	8,6	18,8
5	12	1	58	2390	9,0	19,8
6	7	2	50	2400	10,6	21,2
7	12	2	65	2390	11,5	18,5
8	7	1	52	2390	12,2	17,6
9	12	2	51	2390	13,4	19,1
10	7	1	56	2380	12,3	21,2
11	12	2	63	2400	11,0	19,6
12	12	1	65	2420	12,3	19,6
13	7	2	54	2420	12,5	20,9
14	12	1	59	2400	12,3	20,2
15	7	2	62	2400	15,3	19,9
16	12	1	57	2400	15,3	20,0
17	7	2	61	2380	15,4	21,2
18	12	1	65	2410	15,4	20,2
Minimum			50	2360		
Maximum			68	2420		
Durchschnitt			59	2390		

Bei den Betonanlieferungen war eine sehr große Streuung der Betonkonsistenz festzustellen

(siehe obige Tabelle).

Tabelle 5-15: Ergebnis der Betonfilterpresse BPV, SW Brixlegg

Nr.	Ausbreitmaß	Zementmenge	Wassermenge	Bluten nach [kg/m ³]	
	[cm]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	30 min	60 min
1	62	298	197	36,29	51,25
2	54	302	228	34,41	46,06

Die Grenzwerte für das Bluten des Frischbetons unter Druck wurden um 28% bzw. 15% überschritten.

Die mittlere Steiggeschwindigkeit des Betons während des Betoniervorgangs lag bei ca. 13,6 m/h.

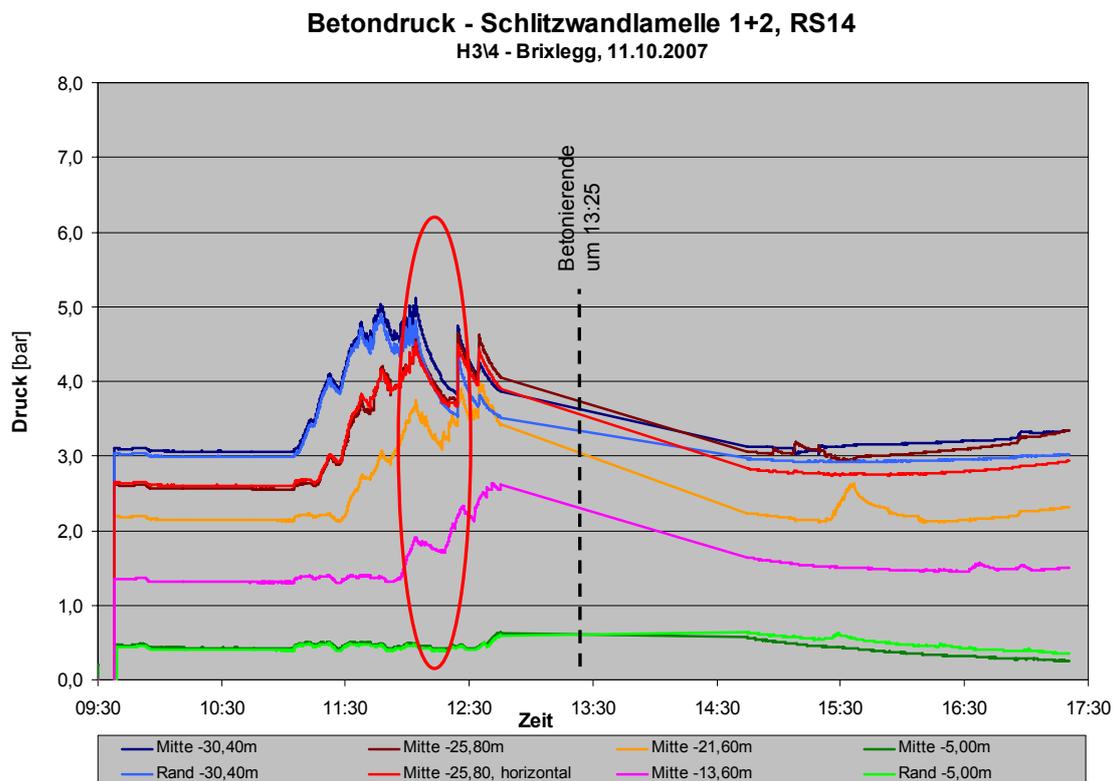


Abbildung 5-14: Suspensions- und Betondruck, SW Brixlegg

Im Zeitraum zwischen 12 Uhr und 12 Uhr 15 (rote Markierung) ist der Betondruck auf allen Ebenen gefallen da es bei der Anlieferung des Transportbetons Verzögerungen gab.

Aufgrund eines Ausfalls des Messsystems konnte der Frischbetondruck zwischen 12 Uhr 45 und 14 Uhr 45 nicht gemessen werden. In dieser Zeit ist der im Diagramm angezeigte Betondruck linear interpoliert worden (Zeit des Ausfalls). Das Betonierende um 13 Uhr 25 und der damit verbundene Druck konnte ebenfalls nicht aufgezeichnet werden.

Tabelle 5-16: Betondrucktabelle mit Überlagerungshöhe, SW Brixlegg

Betondrucktabelle zur Abbildung 5-14												
Messebene	SD	HS	BD	HB	BD	HB	BD	HB	BD	HB	BD	HB
DK -30,40 M	3,11	29,90	3,62	3,70	4,00	8,90	4,54	16,90	4,04	25,50		30,40
DK -30,40 R	3,04		3,56		3,94		4,35		3,64			
DK -25,80 M	2,62	25,30			2,96	4,30	3,95	12,30	4,29	20,90		25,80
DK -25,80 M h	2,66				3,00		3,95		4,14			
DK -21,60 M	2,20	21,6					3,17	8,10	3,69	16,7		21,6
DK -13,60 M	1,37	13,6							2,56	8,70		13,6
DK -5,00 M	0,48	4,50										5,00
DK -5,00 R	0,45											
Zeit nach Betonierbeginn	Suspensionsdruck		00:11:24		00:23:18		00:51:48		01:34:18		02:20:00	Betonierende
BD...Betondruck [bar]			HB...Höhe der Betonsäule die über dem Drucksensor liegt [m]									
SD...Suspensionsdruck [bar]			HS...Höhe der Suspensionssäule die über dem Drucksensor liegt [m]									

6 AUSWERTUNG UND INTERPRETATION

6.1 Suspensionsdruck

Bei den Frischbetondruckmessungen an den Schlitzwandelementen kann keine absolute Nullmessungen der Druckkissen im eingebauten Zustand aufgrund der Bentonitsuspension durchgeführt werden, daher erfolgt eine relative Nullmessung der Messaufnehmer über den Suspensionsdruck in der jeweiligen Tiefe.

Der ermittelte Suspensionsdruck entspricht gemäß den Messungen exakt dem hydraulischen Flüssigkeitsdruck der Bentonitsuspension. Wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist, (gelbe Markierung) nimmt der Betondruck vor Betonierbeginn ab, weil die Stützflüssigkeit abgepumpt wird, um ein Überlaufen beim Betonieren zu verhindern. Die Suspensionsspiegelnabsenkung um ca. 0,50 m entspricht einem Druckabfall von 0,05 bar. Dies wiederum dem hydraulischen Flüssigkeitsdruck bei einer Wichte der Suspension von 10,50 kN/m³ entspricht (vor Betonierbeginn mit 1,054 kN/m³ gemessen).

Betondruck - Schlitzwandlamelle 1+2, RS14
H3\4 - Brixlegg, 11.10.2007

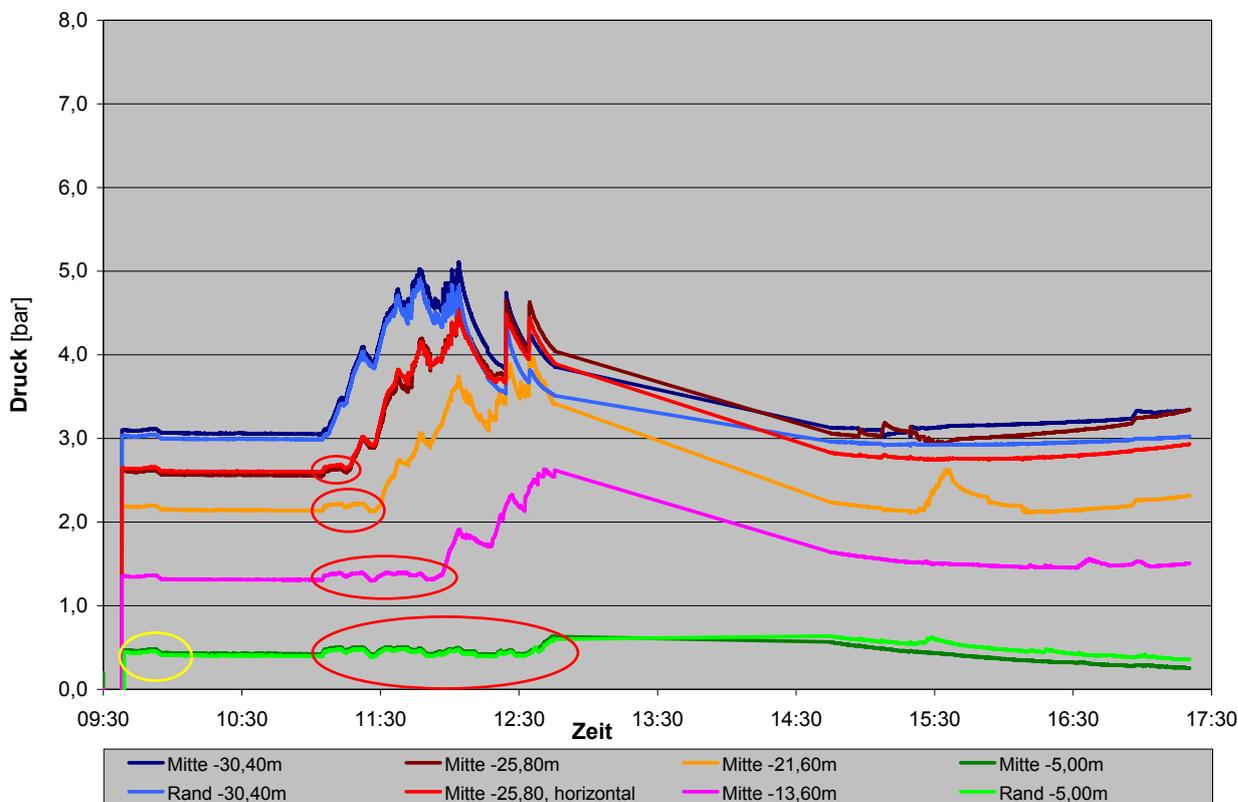


Abbildung 6-1: Betondruck, SW-Brixlegg

Die roten Markierungen zeigen die Schwankungen des Suspensionsspiegels, bedingt durch zeitweises Abpumpen der Suspension während des Betoniervorgangs. Fast bis zum Schluss der Betonierarbeiten ist dies deutlich an den Sensoren auf der Messebene -5,00 m zu erkennen, da diese am längsten von der Suspension umgeben waren. Die sehr hohe Messgenauigkeit der Druckkissen ist an den exakt gleichen Druckschwankungen auf den unterschiedlichen Messebenen zu erkennen.

6.2 Vergleich zwischen Druckkissen und Flüssigkeitsdruckgeber

Tabelle 6-1: Druckunterschied zwischen den Messsystemen DK und FDG

Pfahl	Betonhöhe [m]	Betondruck [bar]		Druckdifferenz [%]	Korrigiert FDG	Druckdifferenz [%]
		DK	FDG			
P 40.17	6,20	1,58	1,61	1,9	1,67	5,5
	13,20	1,67	1,63	-2,4	1,69	1,2
	21,50	2,42	2,34	-3,4	2,40	-0,8
	8,50	2,26	2,27	0,4	2,33	3,1
	28,60	2,69	2,69	0,0	2,75	2,2
	15,60	2,96	2,92	-1,4	2,98	0,7
	7,40	1,76	1,74	-1,1	1,80	2,2
	33,45	2,78	2,28	1,4	2,88	3,5
	20,45	2,92	2,98	2,0	3,04	4,0
	12,25	2,25	2,01	-11,3	2,07	-8,3
	5,25	0,98	0,87	-11,9	0,93	-5,2
P 50.16	6,20	1,63	1,73	6,0	1,79	9,4
	13,20	3,06	2,97	-3,0	3,03	-1,0
	21,40	4,4	4,62	4,0	4,68	5,3
	8,40	2,08	2,20	5,6	2,26	8,3
	28,60	5,72	5,77	0,9	5,83	1,9
	15,60	3,53	3,53	0,0	3,59	1,7
	32,45	6,60	6,32	-4,3	6,38	-3,4
	19,45	4,29	4,01	-6,7	4,07	-5,3
	4,25	1,06	0,90	-16,3	0,96	-9,9
	Durchschnittliche Abweichung				-2,0	

In der obigen Tabelle ist der gemessene Druckunterschied zwischen den Messsystemen

Druckkissen (DK) und Flüssigkeitsdruckgeber (FDG) zu sehen. In der Spalte „Betondruck [bar]“ ist der Betondruck der jeweiligen Druckgeber auf denselben Messebenen eingetragen bei zugehöriger Überlagerung der Messebene mit Beton (Spalte „Betonhöhe“), die Werte stammen aus der Tabelle 5-4 bzw. Tabelle 5-8 und wurden chronologisch eingetragen. Zu beachten ist, dass die Flüssigkeitsdruckgeber um ca. 25 cm höher als die Druckkissen eingebaut wurden (siehe Abb. Abbildung 5-4: Bewehrungskorb mit Druckmesssensoren). Aus diesem Grund wurde der Betondruck des FDG in der Spalte „Korrigiert“ um 0,06 bar - entsprechend dem hydrostatischem Druck zufolge der unterschiedlichen Höhe - angepasst ($0,25\text{m} \times 24\text{kN/m}^3 / 100 = 0,06\text{bar}$). Die Anpassung des Flüssigkeitsdruckgebers mit dem hydrostatischen Frischbetondruck ist nicht absolut genau, aber der Fehler gegenüber der Rückrechnung über den gemessenen Frischbetondruck ist verschwindend klein.

Im Durchschnitt liegt der Betondruck am Flüssigkeitsdruckgeber um 0,8% über dem des Druckkissens. Große Druckunterschiede zwischen den beiden Messaufnehmertypen sind nur am Betonierende auf den oberen Messebenen zu verzeichnen und betragen maximal 9,9%. Dies entspricht einem Druckunterschied von 0,10 bar (zu sehen in der Abbildung 5-10 sowie in der Abbildung 5-11).

Es kann somit angenommen werden, dass beide Messsysteme gleichwertige Ergebnisse liefern.

6.3 Vergleich des Frischbetondrucks in horizontaler und vertikaler Richtung

Bis zum Versuch in Brixlegg wurden die Druckkissen nur in vertikaler, also stehender Lage eingebaut. Es wurde der Betondruck in horizontaler Richtung gemessen. Um den Betondruck in vertikaler Richtung zu bestimmen, wurde zusätzlich zum vertikalen Druckkissen eines in horizontaler Lage auf der Messebene -25,80 m eingebaut (siehe folgende Abbildung).

Wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist, wird der Messaufnehmer für die Bestimmung des Vertikaldrucks um ca. 30 cm über dem für die Bestimmung des Horizontaldrucks befestigt. Aus diesem Grund wird der Horizontaldruck angeglichen und zwar um +0,03 bar bei Überlagerung mit Suspension ($0,30\text{ m} \times 10,54\text{ kN/m}^3 / 100 = 0,03\text{ bar}$) und um +0,07 bar bei einer Überlagerung durch Beton ($0,30\text{ m} \times 24\text{ kN/m}^3 / 100 = 0,07\text{ bar}$).



Messung des Betondrucks in vertikaler Richtung (zu Vergleichszwecken)

Messung des Betondrucks in horizontaler Richtung (Normalfall)

Abbildung 6-2: Anordnung der Druckkissen, SW Brixlegg

Die Angleichung über den hydrostatischen Frischbetondruck beinhaltet zwar einen Fehler, der aber minimal ist und somit vernachlässigt werden kann.

Tabelle 6-2: Vergleich von horizontalem und vertikalem Betondruck

Betonhöhe [m]	Betondruck [bar]		Differenz [bar]	Zeit nach Betonier- beginn [hh:mm]
	horizontal	vertikal		
0,00	2,65	2,66	+0,01	00:00
4,30	2,99	3,00	+0,01	00:23
12,30	4,02	3,95	-0,07	00:52
14,70	4,69	4,51	-0,18	00:58
20,90	4,36	4,14	-0,22	01:34
25,80	3,13	2,83	-0,30	03:40
	3,09	2,76	-0,33	04:20
	3,15	2,79	-0,36	05:20
	3,42	2,93	-0,49	06:20
Betonierende: 2:20 Stunden nach Betonierbeginn				

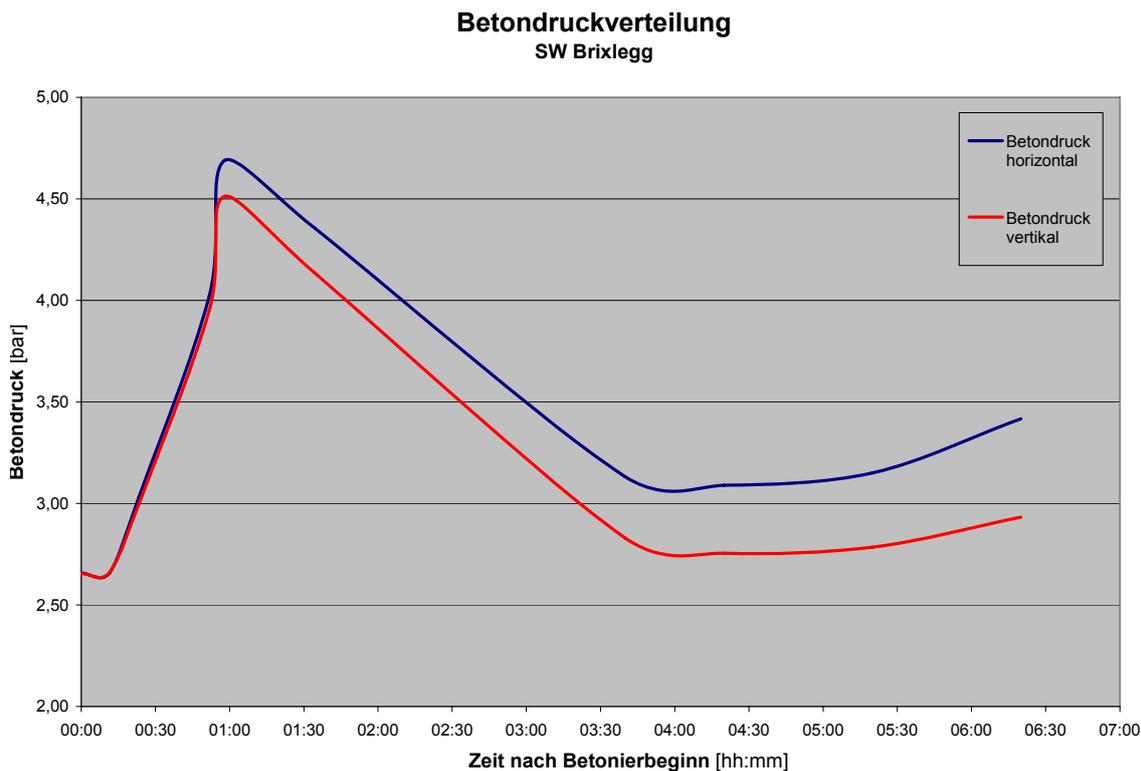


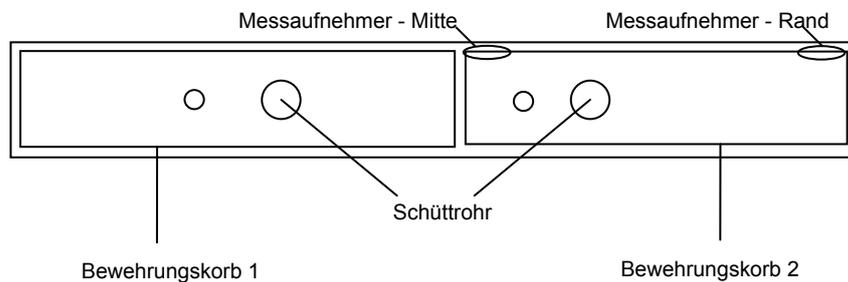
Abbildung 6-3: Vergleich von horizontalem und vertikalem Betondruck

In Abbildung 6-3 und Tabelle 6-2 ist zu Beginn der Suspensionsdruck zu sehen, dabei ist der vertikale Druck um 0,01 bar höher als der Horizontaldruck. Danach ist der Frischbetondruck inklusive dem Suspensionsdruck aus der Überlagerung zu sehen. Nach dem Betonierende, nach 2,33 Stunden, ist der reine Betondruck im Diagramm aufgetragen.

Das Ansteifen des Frischbetons bewirkt die Aktivierung der Gewölbewirkung im Betongefüge. Bei der Gewölbewirkung werden die Kräfte im Beton von Korn zu Korn unter einem Winkel von 45° abgeleitet. Im Fall eines schlanken Bauteils (wie z.B. einer Schlitzwand oder eines Pfahles) wird ein Teil der Druckkräfte durch die Gewölbewirkung seitlich in den Baugrund abgeleitet. Aus diesem Grund wird weniger Druck in die Tiefe weitergeleitet.

Diese Theorie wird durch den immer größer werdenden Unterschied zwischen horizontalem und vertikalem Betondruck mit fortschreitender Erstarrung des Betons untermauert.

6.4 Druckunterschied bei Schlitzwänden zwischen „Mitte“ und „Rand“



Mit „Mitte“ wird jene Position bezeichnet, die im Grundriss gesehen in der Mitte der Schlitzwandlängsseite liegt. Mit „Rand“ wird jene Stelle bezeichnet, die die Grenze zum nächsten Schlitzwandelement bildet (siehe obige Abbildung). Die genauen Positionen der Sensoren sind den Kapiteln Baustelle Budapest – Schlitzwand und Baustelle H3-4 Brixlegg – Schlitzwand zu entnehmen.

Bei der Schlitzwand der Baustelle Budapest und Brixlegg lagen die Messaufnehmer am Rand jeweils an einer Schlitzwandfuge zu einem bereits fertig betonierten Element. Der Frischbeton drückte somit gegen den bereits erhärteten Beton und nicht wie üblich gegen das Erdreich.

In den folgenden Abbildungen ist der Betondruckverlauf über die Tiefe zu sehen, getrennten für die Sensoren „Mitte“ und „Rand“, der Baustellen Budapest und Brixlegg.

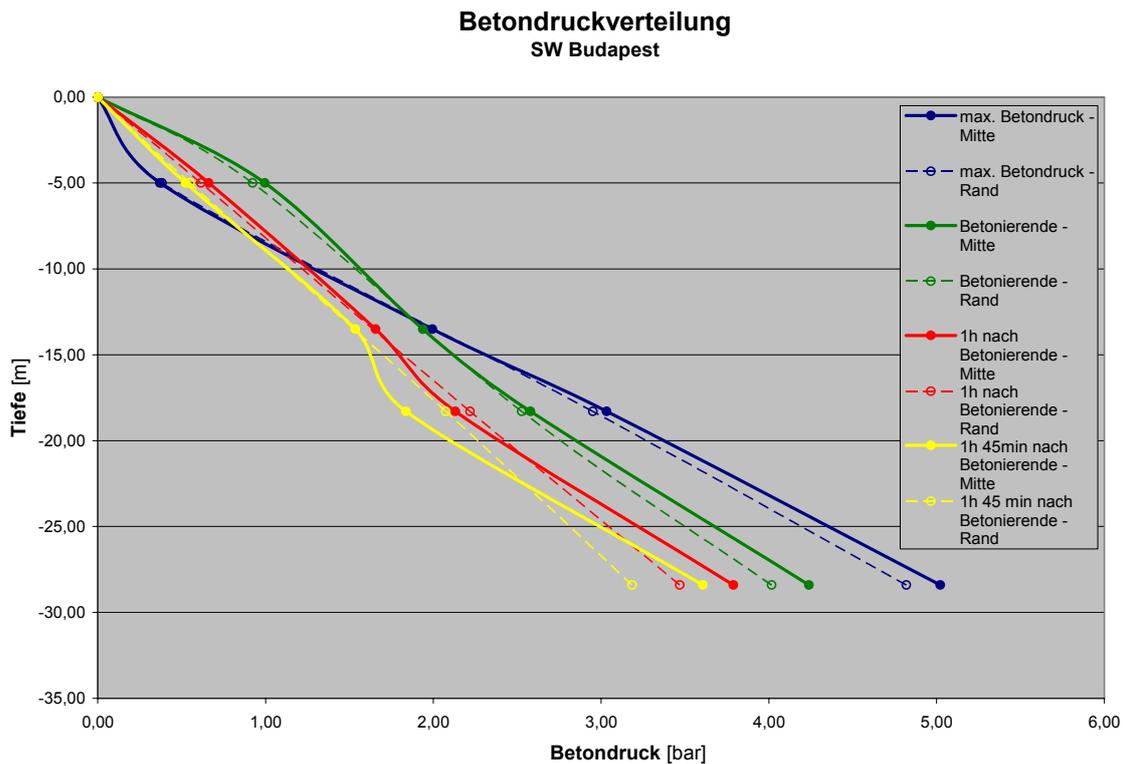


Abbildung 6-4: Betondruckvergleich Mitte – Rand zu unterschiedlichen Zeiten, SW Budapest

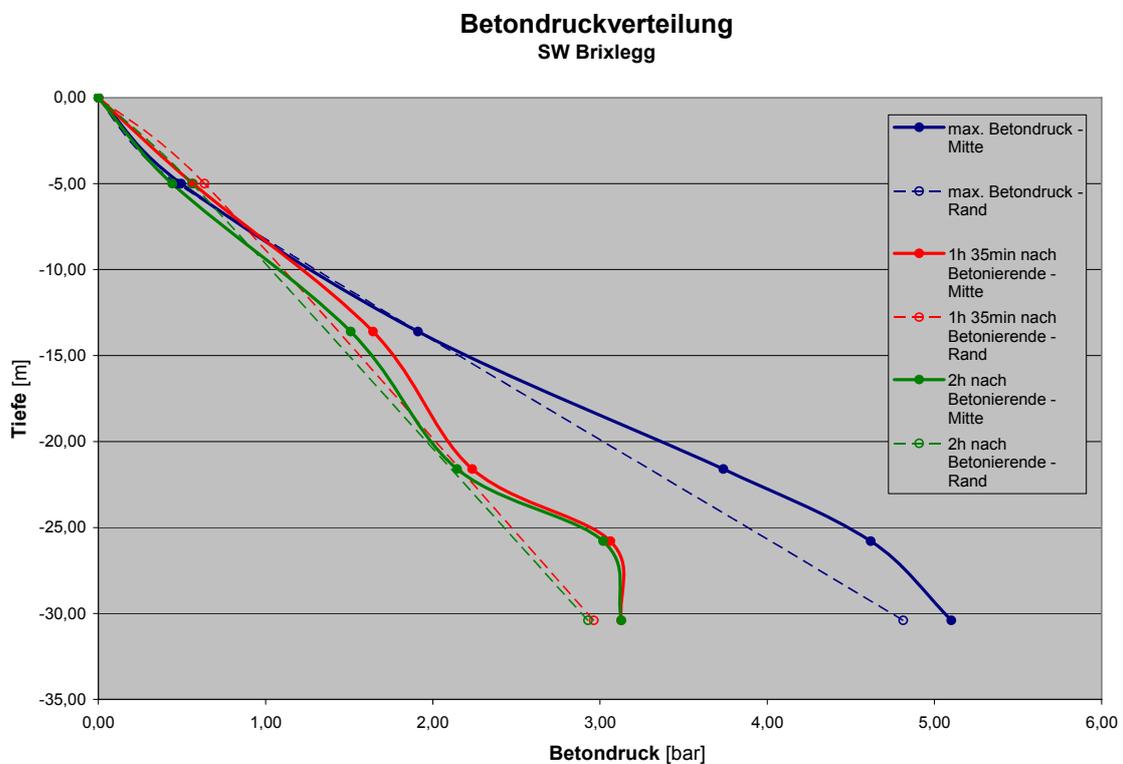


Abbildung 6-5: Betondruckvergleich Mitte – Rand zu unterschiedlichen Zeiten, SW Brixlegg

Die folgende Tabelle ist eine Zusammenfassung der Messergebnisse der Schlitzwandmessungen in Budapest und in Brixlegg.

Tabelle 6-3: Betondruckvergleich Mitte - Rand

Schlitzwand Budapest				Schlitzwand Brixlegg			
Betondruck [bar]		Differenz [%]	Zeit nach Betonierbeginn	Betondruck [bar]		Differenz [%]	Zeit nach Betonierbeginn
Mitte	Rand			Mitte	Rand		
4,48	4,30	-1,03	00:46	3,62	3,56	-0,42	00:11
4,59	4,43	-0,83	01:16	4,00	3,94	-0,38	00:23
2,43	2,42	-0,10		4,54	4,35	-0,51	00:51
5,02	4,82	-1,02	01:40	5,10	4,81	-1,46	00:59
3,03	2,95	0,67		3,13	2,96	-1,40	1h 20min
4,73	4,54	-1,02	02:11	0,57	0,63	2,50	nach Beto-
3,01	2,92	-0,76		3,13	2,93	-1,65	2h nach
4,24	4,02	-1,33	03:04	0,44	0,56	6,00	Betonierende
2,58	2,53	-0,49		3,19	2,95	-1,95	3h nach
1,00	0,92	-2,08	Betonierende	0,33	0,44	7,14	Betonierende
3,79	3,47	-1,45	1 h nach Betonierende				
2,13	2,22	1,03					
0,66	0,62	-1,56					
3,61	3,19	-3,09	1h 45min nach Betonierende				
1,84	2,07	2,94					
0,52	0,55	1,40					
Mittelwert		-0,80	Werte bis einschl. Betonierende			-0,69	
Mittelwert		-0,12	Werte nach Betonierende			1,77	
Mittelwert		-0,54	Mittelwert aller Werte			0,79	

Auffällig ist dabei, dass der Betondruck am Rand bis zum Betonierende immer geringer ist als in der Mitte und zwar um ca. ein Prozent. Nach dem Betonierende verschiebt sich der Betondruckunterschied im oberen Bereich des Bauteils so, dass die Randsensoren einen höheren Betondruck verzeichnen als die Sensoren in der Mitte. Im unteren Bereich der Schlitzwandlamelle ist dies nicht der Fall. Dort ist der Betondruck in der Mitte höher als am Rand. Im Durchschnitt gesehen waren bei der Schlitzwand in Budapest die Drücke am Rand um 0,54% minimal niedriger als in der Mitte. In Brixlegg lag der Durchschnitt der Betondruckdifferenz am Rand um 0,79% minimal höher als in der Mitte.

Bei beiden Versuchen wurde der maximale Frischbetondruck in der „Mitte“ gemessen.

6.5 Maximaler Frischbetondruck

Der maximal auftretende Frischbetondruck ist in erster Linie von der Betonkonsistenz und vom Erstarrungsverhalten des eingebauten Betons abhängig.

Bei einem nicht verzögerten Beton ist für den maximalen Frischbetondruck entscheidend, wie lange es dauert bis das Maximum erreicht wird. Denn ab dem Zeitpunkt des maximalen Frischbetondrucks, steigt der Betondruck nicht weiter an, obwohl der Betoniervorgang fortgesetzt wird und der Betonspiegel im Pfahl oder der Schlitzwand weiter steigt. Zur Abschätzung dieses Zeitpunkts dienen als Grundlage die Messergebnisse, die in der Tabelle 6-4 zusammengefasst sind. Der Frischbetondruck der Baustelle in Salzburg, des Pfahles P50.16, ist hierbei nicht von Bedeutung, da der Beton um vier Stunden verzögert war.

In der folgenden Abbildung ist die Betondruckverteilung der Baustellen Budapest, Brixlegg und Salzburg Pfahl P40.17 bei jeweils maximal auftretendem Frischbetondruck (Pfahl P50.16 zu Vergleichszwecken des annähernd hydrostatischen Flüssigkeitsdrucks).

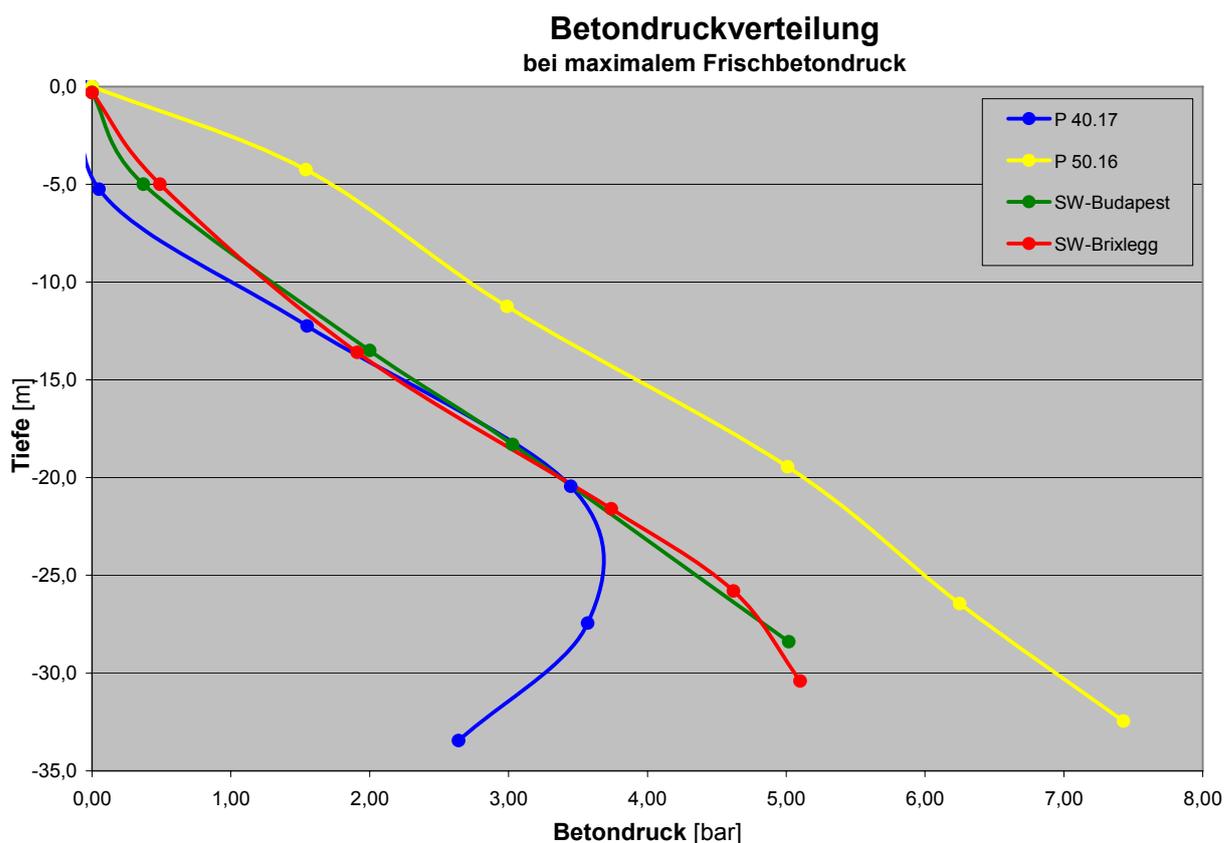


Abbildung 6-6: Betondruckverteilung bei maximalem Frischbetondruck

Tabelle 6-4: Zeitpunkt des maximalen Betondrucks

Maximaler Betondruck				
Baustelle	max. Betondruck [bar]	Betonhöhe [m]	Zeit nach Betonier- beginn [hh:mm]	∅ Ausbreitmaß [cm]
Salzburg, P40.17	3,79	ca. 22	01:19	55
SW-Budapest	5,02	ca. 20	01:39	58
SW-Brixlegg	5,10	ca. 20	00:58	59

Wie im Kapitel Messergebnisse bereits erwähnt, ist das Ausbreitmaß von der Baustelle Budapest etwas verfälscht (etwas zu hoch), da zwischen der Messung des Ausbreitmaßes und dem Einbau des Betons bis zu 50 Minuten lagen.

Der maximale Frischbetondruck auf der Baustelle Brixlegg wurde bereits 58 Minuten nach Betonierbeginn erreicht, weil danach eine 15 minütige Unterbrechung des Betoniervorgangs stattfand. Ohne diese Unterbrechung wäre der Betondruck vermutlich noch etwas weiter angestiegen und der Maximaldruck später erreicht worden.

Aus der Tabelle 6-4 geht hervor, dass der Maximaldruck frühestens 58 Minuten nach Betonierbeginn erreicht wurde, jedoch spätestens nach 1:39 Stunden. Auffällig ist, dass bei den drei Baustellen der maximale Frischbetondruck bei einer Höhe der Betonsäule von 20 bis 22 m über dem Drucksensors erreicht wurde (Bauteiltiefe ca. 30m).

Der maximal auftretende Frischbetondruck, bei *Betonen ohne Verzögerung*, von Bauteilen mit großer Höhe ist somit je nach Betonkonsistenz bei einer etwa 20 Meter hohen Betonsäule erreicht. Der Flüssigkeitsdruck aus einer eventuell darüber liegenden Bentonitsuspension müsste ebenfalls berücksichtigt werden.

Bei *verzögerten Beton*en sehr weicher Konsistenz (Ausbreitmaß über 60 cm) tritt eine annähernd hydrostatische Druckverteilung auf. Diese Randbedingungen waren bei dem Versuch in Salzburg beim Pfahl P50.16 gegeben. Die Verzögerung betrug 4 Stunden und das durchschnittliche Ausbreitmaß lag bei 62 cm. Bei diesem Versuch war die Dauer der Betonverzögerung länger als die Betonierdauer. Somit kann angenommen werden, dass der gesamte Beton zu Betonierende im Pfahl noch nicht angesteift war und sich der beinahe hydrostatische Flüssigkeitsdruck über die gesamte Tiefe ausbilden konnte. Für den Fall, dass die Betonierdauer länger als die Dauer der Betonverzögerung ist, müssten weitere Versuche durchgeführt werden um die Druckverhältnisse genau zu ermitteln.

6.6 Einfluss der Betonkonsistenz auf den Frischbetondruck

Entscheidend für die Höhe des Betondrucks bei einer bestimmten Betonierhöhe ist die Betonkonsistenz. Deutlich zu sehen ist dies bei den Betondruckmessungen in Salzburg. Beim Pfahl P 40.17 wurde ein Frischbetondruck von 1,67 bar bei einer Höhe der darüber liegenden Betonsäule von 13,20 m bei einem Ausbreitmaß von 51 cm gemessen. Beim Pfahl P50.16 hingegen wurde ein Betondruck von 3,02 bar bei gleicher Höhe der Betonsäule und einem Ausbreitmaß von 62 bzw. 56 cm (59 cm durchschnittlich) gemessen (siehe folgende Abbildungen).

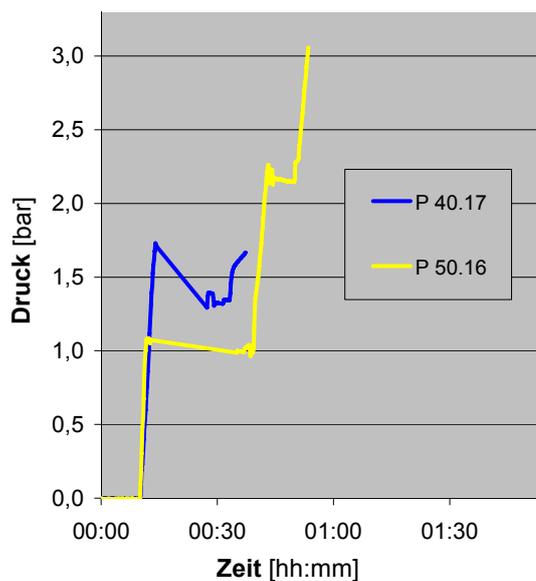


Abbildung 6-7: Betondruckvergleich - P40.17 zu P50.16 bei gleicher Betonierhöhe

Die obige Abbildung zeigt den Betondruckverlauf von Betonierbeginn bis zum Erreichen der Betonierhöhe von 13,20 Metern. Trotz deutlich höherer Betoniergeschwindigkeit beim Pfahl P40.17 ist der Betondruck um 1,35 bar geringer (Die Verzögerung des Betons des Pfahls P50.16 sollte in der kurzen Zeitspanne von 27 Minuten in der der Pfahl P40.17 die Betonierhöhe erreicht nur eine minimale Rolle spielen).

In der Abbildung 6-8 sind die Auswirkungen der geringeren Betonkonsistenz beim Pfahl P40.17 deutlich erkennbar. Im unteren Bereich des Pfahls steigt der Betondruck nur bis auf maximal 2,78 bar an. Im oberen Bereich des Pfahls (bei ca. -20m) wurde jedoch ein maximaler Frischbetondruck von 3,08 bar erreicht. Das durchschnittliche Ausbreitmaß bei den letzten vier Betonanlieferungen lag bei etwa 56 cm (5 lcm größer als zu Betonierbeginn). Der Frischbetondruckunterschied vom Pfahl P40.17 zum Pfahl P50.16 in einer Tiefe von ca. 20 m ist deutlich zu erkennen. Das Ausbreitmaß beim Pfahl P50.16 war um 8 cm über dem des Pfahles P40.17. Dadurch kam ein Druckunterschied von 1,22 bar zu stande.

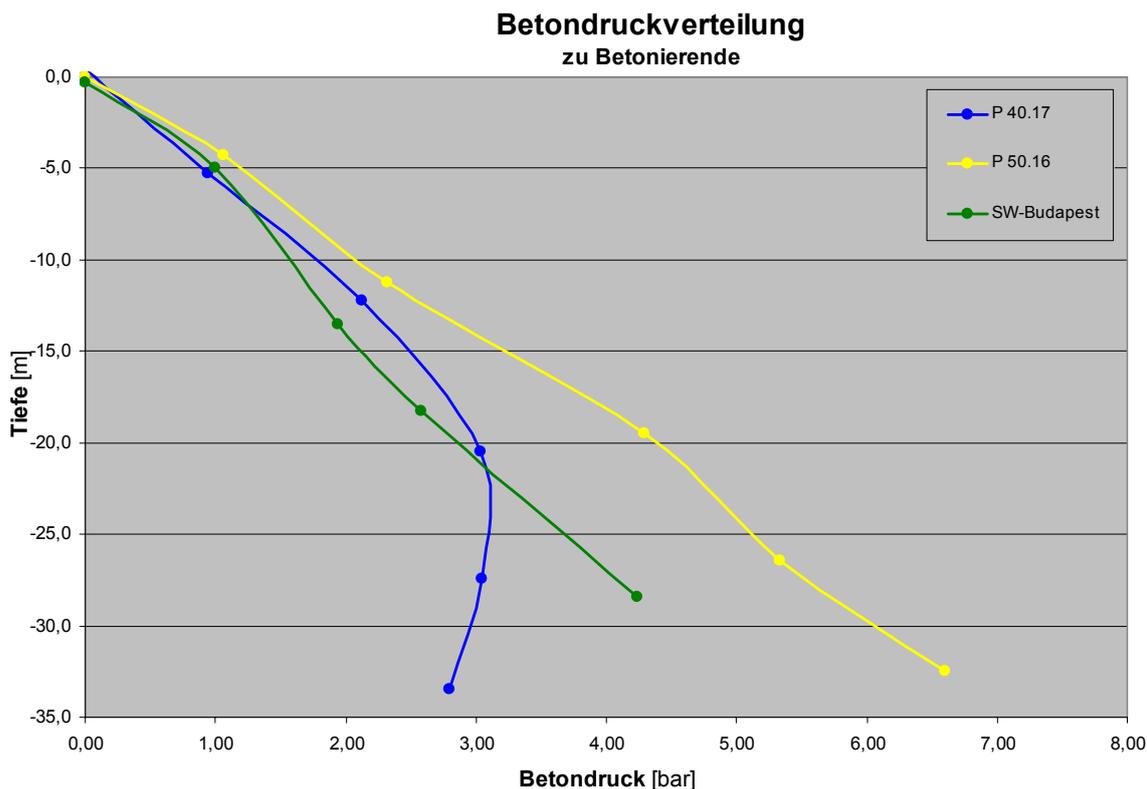


Abbildung 6-8: Betondruckverteilung zu Betonierende

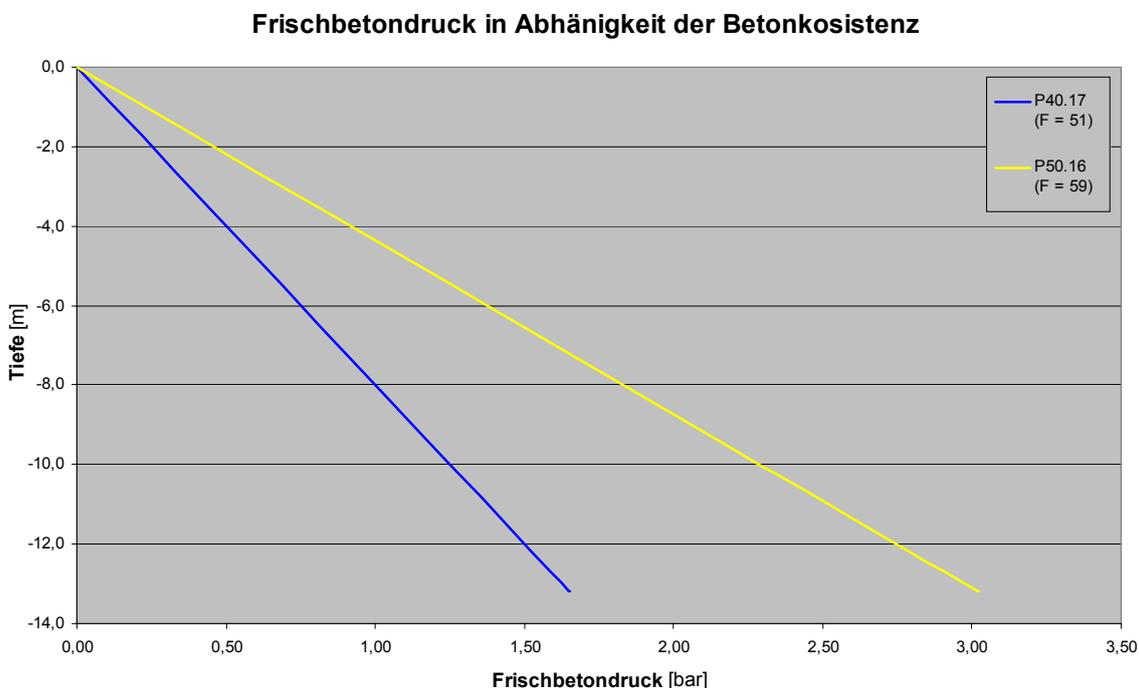


Abbildung 6-9: Frischbetondruck bei unterschiedlichen Konsistenzen

Die Abbildung 6-9 verdeutlicht den Frischbetondruckunterschied von 1,35 bar (57%) bei einem Unterschied im Ausbreitmaß von 8 cm.

6.7 Betondruckberechnungen mittels der Erddrucktheorie

In Kapitel 4.4 wurde bereits der Ansatz zur Berechnung des Betondrucks mittels Erddrucktheorie vorgestellt. Nun wird eine Parameterstudie zur Abschätzung des hierbei erforderlichen Reibungswinkels des Frischbetons durchgeführt. Im nächsten Kapitel wird diese Studie mit den Messergebnissen der von mir durchgeführten Versuche verglichen.

Bei Schlitzwänden (oder Pfählen mit Stützflüssigkeit oder Wasserauflast) muss der Druck aus dem über dem Beton liegenden Medium ebenfalls berücksichtigt werden. Der Frischbetondruck errechnet sich somit aus dem Betondruck (Erdrudruck) und dem Flüssigkeitsdruck des darüber liegenden Mediums.

Für die Berechnung entscheidend sind die Bestimmung des Reibungswinkels und jene Zeit, in der der maximale Frischbetondruck auftritt. Die Bestimmung des Reibungswinkels in Abhängigkeit vom Erstarrungszustand kann nur im Labor erfolgen und wird hier nicht weiter behandelt. Es wird aber eine Parameterstudie durchgeführt und somit eine Bandbreite für den Reibungswinkel des Frischbetons festzulegen. Die Zeit, in der der maximale Frischbetondruck auftritt kann durch die bereits gewonnenen Daten aus den Baustellenversuchen abgeschätzt werden.

Folgende Annahmen werden für die Parameterstudie ohne Stützflüssigkeit getroffen:

Höhe der Betonsäule.....ca. 20 m

Wichte des Betons.....23,70 kN/m³

K_0Ruhedruckbeiwert []

$$K_0 = 1 - \sin \varphi$$

e_0Frischbetondruck (Erdrudruck) [bar]

$$e_0 = \frac{\gamma_B \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right] \times h_B \left[\text{m} \right] \times K_0 \left[\right]}{100}$$

Folgende Annahmen werden für die Parameterstudie mit Stützflüssigkeit getroffen:

Höhe der Betonsäule.....ca. 20 m

Wichte des Betons.....23,70 kN/m³

Wichte der Stützflüssigkeit.....10,05 kN/m³

Höhe der Stützflüssigkeit..... ca. 10 m

K_0Ruhedruckbeiwert []

$$K_0 = 1 - \sin \varphi$$

e_0Frischbetondruck (Erdruchdruck) [bar]

$$e_0 = \frac{\gamma_B \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right] \times h_B \left[\text{m} \right] \times K_0 \left[\right]}{100}$$

p_{Susp} ...Suspensionsdruck der Stützflüssigkeit [bar]

$$p_{\text{Susp}} = \frac{\gamma_{\text{Susp}} \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right] \times h_{\text{Susp}} \left[\text{m} \right]}{100}$$

p_bresultierender Frischbetondruck aus e_0 und p_{Susp} [bar]

$$p_b = e_0 + p_{\text{Susp}}$$

Tabelle 6-5: Parameterstudie über den Reibungswinkel von Frischbeton

Reibungswinkel des Frischbetons [°]	Frischbetondruck bei 20 Metern		Suspensionsdruck bei 10 Metern	Frischbetondruck aus $e_0 + p_{\text{Susp}}$	Frischbetondruck bei 30 Metern
	$h_B=20\text{m};$ $\gamma_B=23,70 \text{ kN/m}^3$		$h_{\text{Susp}}=10\text{m};$ $\gamma_{\text{Susp}}=10,05 \text{ kN/m}^3$	$h_B=20\text{m};$ $h_{\text{Susp}}=10\text{m}$	$h_B=30\text{m};$ $\gamma_B=23,70 \text{ kN/m}^3$
	K_0 []	e_0 [bar]	p_{Susp} [bar]	p_b [bar]	e_0 [bar]
5	0,91	4,3	1,005	5,3	6,5
10	0,83	3,9		4,9	5,9
15	0,74	3,5		4,5	5,3
20	0,66	3,1		4,1	4,7
25	0,58	2,7		3,7	4,1
30	0,50	2,4		3,4	3,6
35	0,43	2,0		3,0	3,0
40	0,36	1,7		2,7	2,5
45	0,29	1,4		2,4	2,1
50	0,23	1,1		2,1	1,7

In der Tabelle 6-5 wird der Frischbetondruck in Abhängigkeit vom Reibungswinkel berechnet. In der Spalte „Frischbetondruck bei 20 Metern“ wird der Erddruckbeiwert und der Erdruehdruk bzw. Frischbetondruck bei einer Höhe der Betonsäule von 20 Metern und einer Frischbetonwichte von $23,70 \text{ kN/m}^3$ berechnet. Diese Werte sind mit den Messergebnissen der Baustelle Salzburg der Pfähle P40.17 und P50.16 vergleichbar. Denn bei diesen Versuchen herrschte nur der Frischbetondruck im Pfahl.

In der Spalte „Suspensionsdruck bei 10 Metern“ wird der Flüssigkeitsdruck einer 10 m tiefen Stützflüssigkeit berechnet die bei den Schlitzwänden in Budapest und Brixlegg auftraten. In der Spalte „Frischbetondruck aus $e_0 + p_{\text{susp}}$ “ wird der resultierende Frischbetondruck einer 30 m tiefen Schlitzwand berechnet, bei einer Füllung mit 20 m Beton und 10 m Stützflüssigkeit. In der letzten Spalte werden die Frischbetondrücke eines 30 m tiefen Bauteils ohne Flüssigkeitsstützung berechnet (P40.17 und P50.16).

6.8 Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck

In den folgenden Tabellen werden die berechneten Werte des Frischbetondrucks mit den Messergebnissen aus den Versuchen verglichen. Der fett markierte Wert (z.B. $\Rightarrow \varphi \approx 36,5^\circ$) in den folgenden vier Tabellen ist der interpolierte Reibungswinkel des Frischbetons infolge der Erdruehdrukberchnung.

Tabelle 6-6: Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck, P40.17

Pfahl P40.17		
Höhe der Betonsäule = 20 m		
berechnet		gemessen
φ [°]	e_0 [bar]	p_B [bar]
30	3,4	2,91 bei F= 56 cm $\Rightarrow \varphi \approx 36,5^\circ$
35	3,0	
40	2,7	
45	2,4	2,25 bei F= 54 cm
50	2,1	$\Rightarrow \varphi \approx 47,5^\circ$

In der Tabelle 6-6 stammt das Messergebnis von 2,25 bar bei einem durchschnittlichen Ausbreitmaß von 54 cm bei einer Betonierhöhe von 20 Metern. Der Wert 2,91 bar wurde am Messaufnehmer auf -20,45 m des fertig betonierten Pfahls gemessen.

In der Tabelle 6-7 ist der Wert 4,14 bar wieder bei einer Betonierhöhe von 20 Metern gemessen worden, der Wert 4,41 ist zu Betonierende vom Messaufnehmer auf -19,45 m aufgezeichnet worden. In der Spalte „Höhe der Betonsäule = 30 m“ ist der Wert 6,10 bar zu Betonierende gemessen worden.

Tabelle 6-7: Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck, P50.16

Pfahl P50.16					
Höhe der Betonsäule = 20 m			Höhe der Betonsäule = 30 m		
berechnet		gemessen	berechnet		gemessen
φ [°]	e_0 [bar]	p_B [bar]	φ [°]	e_0 [bar]	p_B [bar]
5	4,3	4,14 bei F= 62 cm	5	6,5	6,10 bei F= 62 cm => $\varphi \approx 9,2^\circ$
10	3,9	=> $\varphi \approx 7,0^\circ$	10	5,9	
15	3,5	4,41 bei F= 64 cm	15	5,3	
20	3,1	=> $\varphi \approx 3,8^\circ$	20	4,70	

In der Tabelle 6-8 gibt die linke Spalte den Zeitpunkt an, zu dem die Höhe der Betonsäule in der Schlitzwand 20 m entsprach und von einer 10 m hohen Suspensionssäule überlagert war. Die rechte Spalte gibt den Frischbetondruck zu Betonierende an.

Tabelle 6-8: Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck, SW-Budapest

SW-Budapest					
Höhe der Betonsäule = 20 m			Höhe der Betonsäule = 30 m		
Höhe der Bentonitsuspension = 10 m					
berechnet		gemessen	berechnet		gemessen
φ [°]	e_0 [bar]	p_B [bar]	φ [°]	e_0 [bar]	p_B [bar]
15	4,5	4,02 bei F= 58 cm => $\varphi \approx 21,0^\circ$	15	5,3	4,57 bei F= 58 cm => $\varphi \approx 21,1$
20	4,1		20	4,7	
25	3,7		25	4,1	
30	3,4		30	3,6	

In der Tabelle 6-9 wird der Zeitpunkt angegeben, in dem die Höhe der Betonsäule in der Schlitzwand 20 m entsprach und von einer 10 m hohen Suspensionssäule überlagert war.

Tabelle 6-9: Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck, SW-Brixlegg

SW-Brixlegg		
Höhe der Betonsäule = 20 m		
Höhe der Bentonitsuspension = 10 m		
berechnet		gemessen
φ [°]	e_0 [bar]	p_B [bar]
10	4,9	4,11 bei F= 59 cm => $\varphi \approx 19,9^\circ$
15	4,5	
20	4,1	
25	3,7	
30	3,4	

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Größe des Reibungswinkels in Abhängigkeit vom Ausbreitmaß aufgrund der Vergleiche von berechnetem zu gemessenem Betondruck.

Tabelle 6-10: Reibungswinkel des Frischbetons in Abhängigkeit der Konsistenz

Ausbreitmaß	F 54	F 56	F 58	F 59	F 62	F 64
Reibungswinkel	48°	37°	21°	20°	8°	4°

Parallel zu dieser Arbeit wurden bereits erste Scherversuche im Labor zur Ermittlung des Reibungswinkels von Frischbeton durchgeführt. Die Ergebnisse ergaben einen Reibungswinkel des Betons von ca. 20° bei einem Ausbreitmaß von ca. 59 cm. Die Ergebnisse zeigen eine relativ gute Korrelation und bestätigen die Annahme, dass der Frischbetondruck mit der Erdruhedrucktheorie berechnet werden kann.

6.9 Abfall des Betondrucks bei Unterbrechungen des Bauablaufs

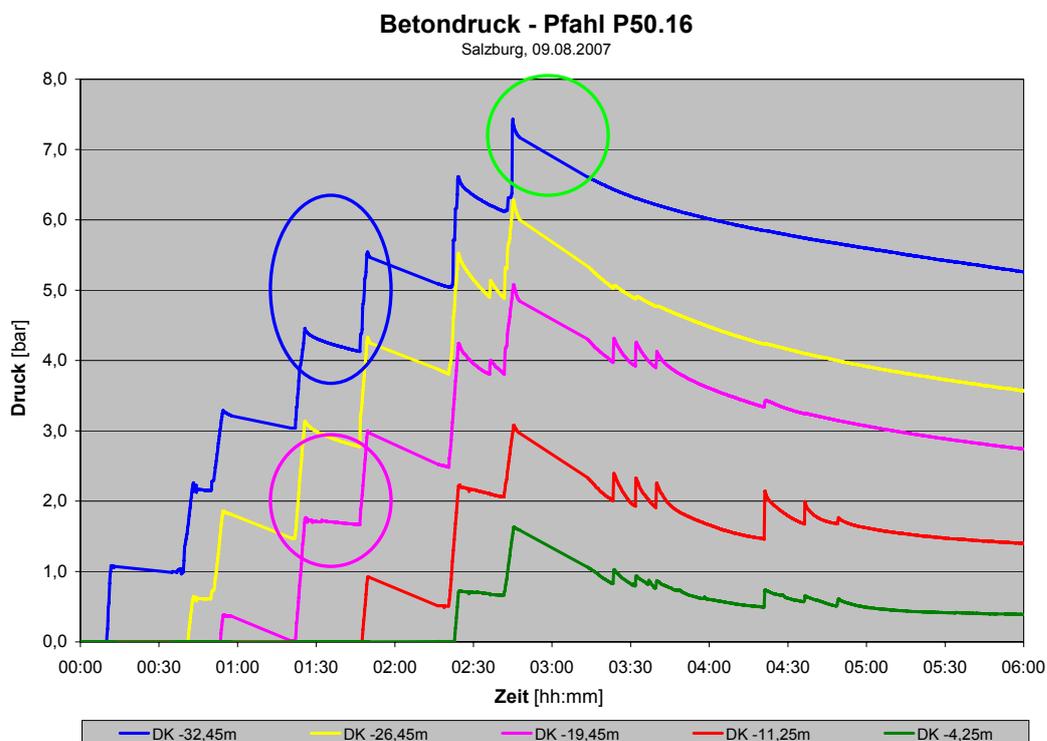


Abbildung 6-10: Betondruckdiagramm, P50.16

In der Abbildung 6-10 ist der Betondruckverlauf des Pfahles P50.16 zu sehen, bei dem der Beton eine Verzögerung der Anfangserhärtung von vier Stunden aufwies. Es sind nur die Werte der Druckkissen dargestellt. Außerdem sind die Unterbrechungen am Diagramm, die durch das Abstecken der elektrischen Leitungen verursacht wurden, interpoliert worden.

Um kurze Unterbrechungen im Bauablauf zu beurteilen sind die blaue und die rosa Markierung gesetzt worden. Die blaue Markierung zeigt den Betondruck des Druckkissens (hellblaue Linie im Diagramm) auf der Ebene -32,45 m. Der erste Zacken zeigt einen Betondruck von 4,46 bar an – dies entspricht dem Einbau des Betons vom vierten Transportbeton-LKW, danach sinkt der Druck während einer kurzen Pause auf 4,13 bar ab. In dieser kurzen Unterbrechung von 20 Minuten, wird das Schüttrohr gekürzt und zwar von 20 auf 16 Meter Länge, damit befindet sich das Ende des Schüttrohres nun auf der Höhe -16,00 m. Der Beton beim Messaufnehmer auf -32,45 m ist durch das Ziehen des Schüttrohres nicht in Bewegung versetzt worden. Der Betondruck am Druckkissen auf der Ebene -19,45 m (rosa Markierung) ist hingegen von 1,77 bar auf nur 1,67 bar gefallen. Das hängt mit dem Ziehen des Schüttrohres zusammen, da der Beton an dieser Stelle immer in Bewegung war. Der Unterschied von 0,10 bar ist durch das Absinken des Betonspiegels in Verbindung mit dem Kürzen des Schüttrohres zustande gekommen. Der Betondruck auf der Messebene -32,45 m fiel während der Unterbrechung um 0,23 bar ab.

Die rote Markierung in der obigen Abbildung zeigt die ersten 20 Minuten nach Betonierende. Der Druckabfall am Druckkissen innerhalb der ersten 20 Minuten nach Betonierende beträgt 0,33 bar. Ein Vergleich mit der Blauen Markierung zeigt, dass hier der Betondruck um 0,10 bar mehr abnimmt. Hier verursacht das Ziehen des Schüttrohres keine Bewegung des Betons, da das Schüttrohr sich bereits weiter oben befindet.

6.10 Abfall des Betondrucks innerhalb der ersten Stunde nach Betonierende

Die Daten des Versuchs auf der Baustelle Brixlegg können hier nicht mit einbezogen werden, da die Betondrücke nach dem Betonierende nicht erfasst wurden (Der Vergleich des Pfahles P50.16 mit den restlichen Baustellen muss ebenfalls sehr kritisch gesehen werden, weil der Beton vier Stunden verzögert war und somit eine anderes Erstarrungsverhalten aufweist und sich dadurch die Frischbetondrücke anders entwickeln).

Exemplarisch werden in der Abbildung 6-11 die Kurven der Messaufnehmer der Baustellen Salzburg Pfahl P40.17 und Budapest auf der Messebene -20 m dargestellt. Die Kurve des Pfahls P50.16 dient nur als Vergleich.

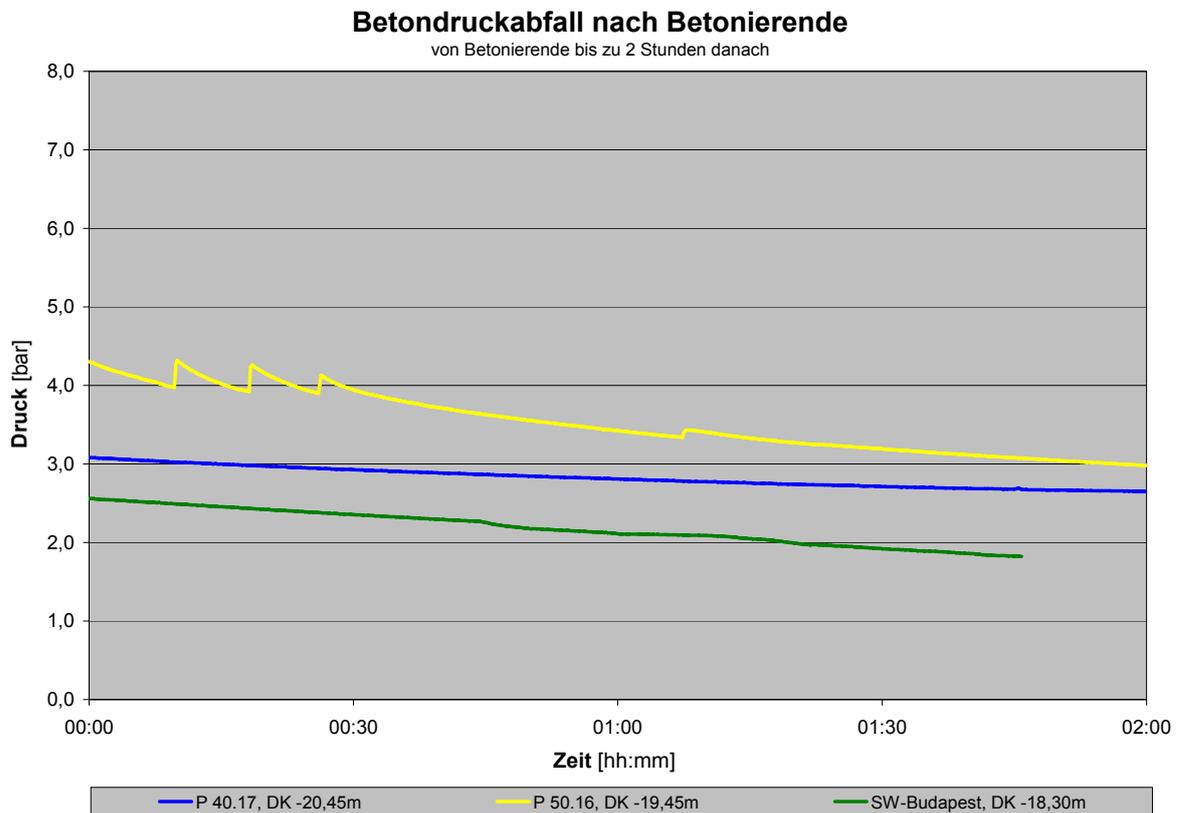


Abbildung 6-11: Betondruckabfall nach Betonierende

Die nachfolgende Tabelle 6-11 zeigt ebenfalls den Abfall des Betondrucks, wobei der Abfall des Betondrucks zwischen Betonierende und einer Stunde danach in Prozent angegeben ist. In der ganz rechten Spalte ist der durchschnittliche Abfall des Betondrucks des jeweiligen Versuches in Prozent angegeben.

Speziell bei P40.17, ist gut zu sehen, wie die Abnahme des Betondrucks nach Betonierende stark vom Erhärtungszustand des Betons abhängt. Auf der untersten Messebene nimmt der Betondruck um nur mehr ca. 2% ab, wobei am Drucksensor auf der Ebene -5,25 m der Druck um ca. 60% abnimmt. Das resultiert daraus, dass der Beton am Pfahlkopf noch sehr frisch ist und noch keine Erstarrungserscheinungen zeigt. Vergleichbar sind die Ergebnisse mit dem vorherigen Punkt „Abfall des Betondrucks bei Unterbrechungen des Bauablaufs“. Dort ist ein erstes Ansteifen des Betons erkennbar, nachdem dieser zu Ruhe gekommen ist.

Tabelle 6-11: Abfall des Betondrucks nach Betonierende

Abfall des Betondrucks innerhalb einer Stunde nach Betonierende						
Messebene		Zeit [hh:mm] bzw. Betondruck [bar]				Abfall des Betondrucks in %
		zu Betonierende		1h n. Betonierende		
P40.17	-33,45m	11:05	2,80	12:05	2,74	2,14%
	-27,45m		3,05		2,81	7,87%
	-20,45m		3,03		2,70	10,89%
	-12,25m		2,13		1,48	30,52%
	-5,25m		0,93		0,36	61,29%
Budapest	-28,40m	13:20	4,13	14:20	3,63	12,11%
	-18,30m		2,56		2,18	14,84%
	-13,50m		1,94		1,66	14,43%
	-5,00m		0,96		0,64	33,33%
P50.16	-32,45m	13:55	6,46	14:55	5,74	11,15%
	-26,45m		5,33		4,31	19,14%
	-19,45m		4,15		3,33	19,76%
	-11,25m		2,32		1,51	34,91%
	-4,25m		0,98		0,50	48,98%

Die Tendenz, dass der Betondruck am Bauteilfuß weniger stark abnimmt, weil die Erhärtung des Betons schon weiter fortgeschritten ist, ist auch in Budapest und in Salzburg deutlich zu sehen.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurden insgesamt vier Messungen durchgeführt, um den Betondruckverlauf in Bohrpfählen und Schlitzwänden zu ermitteln. Neben den Frischbetondruckmessungen wurden begleitend die Frischbetonrohddichte, das Ausbreitmaß und das Bluten des Frischbetons unter Druck bestimmt.

Bei den beiden Versuchen in Salzburg wurden sowohl Druckkissen als auch Flüssigkeitsdruckgeber eingesetzt. Die Messergebnisse beider Typen wurden miteinander verglichen und auf die Baustellentauglichkeit beider Messgerätetypen geprüft. Beide Typen lieferten nahezu idente Ergebnisse und sind somit als gleichwertig anzusehen. Aus Kostengründen wurden in weiterer Folge nur noch Druckkissen zur Frischbetondruckmessung eingesetzt.

Bei der Frischbetondruckmessung in Salzburg beim Pfahl P40.17 wurde ein maximaler Frischbetondruck von 3,79 bar in einer Tiefe von 27,45 m gemessen. Das durchschnittliche Ausbreitmaß des Betons lag bei 55 cm.

Beim Pfahl P50.16 wurde ein um vier Stunden verzögerter Pfahlbeton mit einem durchschnittlichen Ausbreitmaß von 62 cm eingebaut, um im vorliegenden Fall den maximal möglich auftretenden Frischbetondruck zu bestimmen. Es wurde ein maximaler Frischbetondruck von 7,43 bar in einer Tiefe von 32,45 m gemessen. Die entspricht in etwa dem hydrostatischen Druck des Frischbetons mit einer Wichte von ca. 24 kN/m³.

Auf der Baustelle in Budapest wurde im Schlitzwandelement ein maximaler Frischbetondruck von 5,02 bar in einer Tiefe von 28,40 m bei einem durchschn. Ausbreitmaß von 58 cm gemessen.

Bei dem Schlitzwandelement in Brixlegg wurde ein maximaler Frischbetondruck von 5,10 bar in einer Tiefe von 30,40 m bestimmt, bei einem durchschn. Ausbreitmaß von 59 cm.

Die Höhe des Frischbetondrucks hängt neben der Bauteiltiefe von folgenden Einflüssen ab: der Betonkonsistenz, der Betoniergeschwindigkeit und der Verzögerung des Erhärtungsverlaufs des Betons.

Die Konsistenz ist der wesentliche Einflussfaktor auf den Frischbetondruck. Wie in Kapitel 6

unter „Einfluss der Betonkonsistenz auf den Frischbetondruck“ beschrieben wurde, stieg der Betondruck bei einem Ausbreitmaß von 51 cm auf 1,67 bar an, bei einer Höhe der Betonsäule von 13,20 m. Bei gleicher Höhe der Betonsäule und einem Ausbreitmaß von 59 cm wurde ein Betondruck von 3,02 bar gemessen. Daraus folgt, dass in diesem Fall ein um 8 cm größeres Ausbreitmaß eine Frischbetondruckerhöhung von 81% bewirkt. Um den Betondruck zu verringern, kann jedoch die Konsistenz nicht beliebig weit abgesenkt werden, da ansonsten eine technisch einwandfreie Herstellung des Bauteils nicht mehr gewährleistet werden kann.

Des Weiteren hängt der Frischbetondruck im zu erstellenden Bauteil von der Betoniergeschwindigkeit bzw. der Steiggeschwindigkeit ab. Denn je schneller der Betonspiegel im Bauteil ansteigt, desto höher ist jener Bereich im Pfahl oder der Schlitzwand, in dem sich der Frischbetondruck ausbilden kann. Die Zeitspanne in der sich der maximale Frischbetondruck ausbildet, kann aufgrund der durchgeführten Versuche mit bis zu 1:40 Stunden abgegrenzt werden.

Die Verzögerung der Anfangserhärtung des Betons bewirkt, dass beinahe der volle hydrostatische Flüssigkeitsdruck erreicht wird. Somit ist die Verzögerung des Betons ein wesentlicher Faktor in Bezug auf den maximal auftretenden Frischbetondruck.

Bei Pfählen, die mit Wasserauflast oder Suspensionsstützung hergestellt werden, und ebenso Schlitzwänden hängt der maximale Frischbetondruck auch von der Bauteiltiefe ab. Denn die im Bauteil stehende Suspension übt den vollen Flüssigkeitsdruck auf den darunter liegenden Frischbeton aus. Das heißt, je tiefer der Bauteil ist, desto höher ist auch der maximal auftretende Frischbetondruck. Somit ist der Betondruck bei einer z.B. 50 m tiefen Schlitzwand aufgrund des erhöhten Suspensionsdrucks um 2 bar größer als bei einer Schlitzwand mit 30 m Tiefe (gleiche Randbedingungen vorausgesetzt).

Wie die Messungen gezeigt haben, bildet der hydrostatische Flüssigkeitsdruck die Obergrenze des Frischbetondrucks, der unter bestimmten Umständen wie z.B. beim Pfahl P50.16 (verzögerter Beton mit sehr weicher Konsistenz) tatsächlich fast erreicht wurde.

Die Berechnung des Frischbetondrucks mittels der Erddrucktheorie erwies sich als sehr einfach und praxistauglich. Dafür muss jedoch der Reibungswinkel des Betons in Abhängigkeit von der Konsistenz und dem Erstarrungszustand ermittelt werden. Dies kann wiederum nur im Labor erfolgen und erfordert eine Vielzahl von Versuchen, um diesen zu bestimmen. Auf Basis von Ergebnissen aus den Laborversuchen könnte der Frischbetondruck im Spezialtiefbau zuverlässig berechnet, der Beton an die Anforderungen anpasst, das Bluten des Frisch-

betons und die daraus folgenden Schäden verhindert werden.

Es sind weitere Messungen des Frischbetonsdrucks in Pfählen und Schlitzwänden erforderlich, um den Druckverlauf bei Bauteilen mit einer Tiefe von weit über 30 Metern zu klären, und die Annahme über den maximal auftretenden Frischbetondruck bezüglich der Bauteiltiefe zu bestätigen. Ebenfalls ist es wichtig, Frischbetondruckmessungen an verzögerten Pfahlbetonen durchzuführen um die Auswirkungen der Verzögerung zu bestimmen und um weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Maximaldrucks zu erlangen.

Weiters ist der Betondruck an Bauteilen mit unterschiedlich großen Bauteilquerschnitten (z.B.: Pfahl mit 60 cm Durchmesser) zu messen um deren Einfluss genau zu erfassen.

Die Auswirkungen des Bewehrungsgrades auf den Frischbetondruck (unterschiedlicher Bewehrungsgrad und ohne Bewehrung) zu messen, wäre ebenfalls noch zu untersuchen, um daraus etwaige Auswirkungen auf den Frischbetondruckverlauf zu erhalten.

LITERATURVERZEICHNIS

Bücher:

BRAMESHUBER Wolfgang: Selbstverdichtender Beton- Schriftenreihe Spezialbetone
Band 5, Düsseldorf: Bau+Technik, 2004

BUJA Heinrich Otto: Handbuch des Spezialtiefbaus-Verfahren und Geräte, 2. Auflage – Düs-
seldorf: Werner, 2001

BUJA Heinrich Otto: Spezialtiefbau-Praxis von A-Z, 1. Auflage – Berlin: Bauwerk, 2002

DÖRKE Wolfram; DEHNE Erhard: Grundbau in Beispielen-Teil1, 2. Auflage – Düsseldorf:
Werner-Verlag, 1999

EICHLER Klaus: Spezialtiefbau, 2. Auflage – Renningen: expert-Verlag, 2002

KLADENSKY Martin: Selbstverdichtender Beton – Self compacting concrete (SCC), Diplom-
arbeit – Technische Universität Wien, 2000

KÖNIG Gert; Holschermacher Klaus; Dehn Frank: Selbstverdichtender Beton, 1. Auflage –
Berlin: Bauwerk, 2001

PEKAREK Alexander: Untersuchungen zum Bluten weicher Betone im Spezialtiefbau, Dip-
lomarbeit – Universität für Bodenkultur Wien, 2007

SCHMIDT H.G.; SEITZ J.M.: Bohrpfähle, 1. Auflage – Berlin: Ernst & Sohn, 2000

SCHMIDT H.G.; SEITZ J.M.: Grundbau, Sonderdruck aus dem Beton-Kalender – Berlin:
Ernst & Sohn, 1998

SCHNELL Wolfgang: Verfahrenstechnik der Pfahlgründungen, 1. Auflage – Stuttgart: Teub-
ner, 1996

SMOLTCZYK Ulrich: Grundbau-Taschenbuch Teil 1, 4. Auflage – Berlin: Ernst & Sohn, 1990

SMOLTCZYK Ulrich: Grundbau-Taschenbuch Teil 3:Gründungen, 6. Auflage – Berlin: Ernst
& Sohn, 2001

TEGELAAR Rudolf; BÖHLING Eike; GIESBERT, Peter: Unterwasserbeton, Bohrpfahlbeton,
Düsseldorf, Schriftenreihe Spezialbetone Band 1, 1998

TRIANTAFYLLIDIS Theodoros, Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau, Teil1:Schlitz- und Dichtwand, 1. Auflage – Berlin: Ernst & Sohn, 2004

Verein Deutscher Zementwerke e.V., Zement-Taschenbuch, 50. Ausgabe – Düsseldorf: Bau+ Technik GmbH, 2002

WEBER Robert, Guter Beton, 21. Auflage – Düsseldorf: Bau+ Technik GmbH, 2006

Zeitschriftenartikel:

MACHT Jürgen, NISCHER Peter, Mehlkornoptimierung für Beton höchster Güte, In: Zement & Beton Handels- und Werbeges.m.b.H – Wien, 2007, Expertenforum Beton 2007, S. 24 – 27

PROSKE Tilo, Schalungsdruck bei Selbstverdichtendem Beton – Ein neues Konzept für die Berechnung, In: Beton- und Stahlbetonbau – Wien 100.Jg., 2005, 45. Forschungskolloquium des DAfStb, S. 169 - 172

SCHÄFER René, TRIANTAFYLLIDIS Theodor, Spannungs- und Porenwasserdruckentwicklung infolge Schlitzwand-Herstellung in weichen bindigen Böden, In: Bautechnik 83 – Berlin, 2006, Heft 3, S. 186 – 201

Internet:

Homepage der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie VÖZ, www.zement.at, 4.12.2007

Homepage der Salzburger Sand und Kieswerke SSK, www.ssk.cc/main.htm, 13.09.2007

Homepage der Betontechnik, www.betontechnik.at, 4.12.2007

Homepage der Lafarge-Perlmooser GmbH, www.lafarge.at, 10.10.2007

Homepage der BauNetz Online-Dienst GmbH & Co. KG, www.baunetz.de/infoline/beton/index.htm, 17.12.200

Homepage der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, [www.zement.at/Service/literatur/fileupl/Weiche Betone Macht Nischer 1 06.pdf](http://www.zement.at/Service/literatur/fileupl/Weiche_Betone_Macht_Nischer_1_06.pdf), 17.12.2007

Normen & Richtlinien:

- ÖNORM EN 197-1 Zement Teil 1 Zusammenfassung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzement (konsolidierte Fassung) , Ausgabe: 2004-09-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 206-1: Beton - Teil 1 Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (konsolidierte Fassung), Ausgabe: 2005-11-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 450-1: Flugasche für Beton - Teil 1 Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien, Ausgabe: 2005-0801, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 450-2: Flugasche für Beton - Teil 2 Konformitätsbewertung, Ausgabe: 2005-08-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 480-1: Teil 1 Referenzbeton und Referenzmörtel für Prüfungen, Ausgabe: 2007-01-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 480-2: Teil 2 Bestimmung der Erstarrungszeit, Ausgabe: 2006-10-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 480-4: Teil 4 Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten), Ausgabe: 2006-02-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 934-2: Teil 2 Betonzusatzmittel - Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung, Ausgabe: 2006-03-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 1536: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Bohrpfähle, Ausgabe: 1999-08-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 1538: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Schlitzwände, Ausgabe: 2007-07-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 12350-1: Prüfung von Frischbeton - Teil 1 Probenahme, Ausgabe: 2000-04-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 12350-2: Prüfung von Frischbeton - Teil 2 Setzmaß, Ausgabe: 2000-04-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 12350-3: Prüfung von Frischbeton - Teil 3 Vebe-Prüfung, Ausgabe: 2000-04-01,

ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 12350-4: Prüfung von Frischbeton - Teil 4 Verdichtungsmaß, Ausgabe: 2000-04-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 12350-5: Prüfung von Frischbeton - Teil 5 Ausbreitmaß, Ausgabe: 2000-04-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 12350-6: Prüfung von Frischbeton - Teil 6 Frischbetonrohddichte, Ausgabe: 2000-04-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton (konsolidierte Fassung) , Ausgabe: 2005-04-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 3131: Gesteinskörnungen für Beton Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620, Ausgabe: 2006-10-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 3303: Betonprüfung, Ausgabe: 2002-09-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4710-1: Beton – Teil1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis, Ausgabe: 2004-04-01, ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien

DIN 1536: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Bohrpfähle, Ausgabe: Juni 1999, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1538: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Schlitzwände, Ausgabe: Juli 2000, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 18218: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen, Ausgabe: September 1980, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

Richtlinie Bohrpfähle, Ausgabe 2005, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), Wien

Richtlinie Dichte Schlitzwände, Ausgabe 2002, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), Wien

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Seilbagger mit Verrohrungsmaschine	5
Abbildung 2-2: Hydraulische Verrohrungsmaschine System Leffer	6
Abbildung 2-3: Bohrrohr mit Schneidschuh	7
Abbildung 2-4: Vorsatzgreifer HW 90/90	8
Abbildung 2-5: Herstellungsschema für die Bohrpfahlherstellung	9
Abbildung 2-6: Aushub mittels Greifer	10
Abbildung 2-7: Betoniervorgang mit Blick ins Bohrrohr	12
Abbildung 2-8: Fertig abgestemmte Pfahlköpfe.....	12
Abbildung 2-9: Aufbereitungsanlage.....	15
Abbildung 2-10: Herstellungsschema einer Schlitzwandlamelle	16
Abbildung 2-11: Einbau der Abschalrohre und der Bewehrung.....	17
Abbildung 3-1: Sieblinie eines Korngemisches mit Größtkorn 16 mm	21
Abbildung 3-2: Form, Ausbreittisch und Bestimmung der Ausbreitung	26
Abbildung 3-3: Betonfilterpresse BPV	28
Abbildung 3-4: links: nadelförmige Kristalle, rechts: Zementstein nach 28 Tagen	30
Abbildung 3-5: Bildung der Hydratphasen und der Gefügebildung	31
Abbildung 3-6: li: Schlitzwand intakt und geschädigt; re: Bohrkern aus der geschädigten SW	34
Abbildung 3-7: li: Durch Bluten verursachte Freilegungen der Bewehrung; re: Nachsackungen des Bohrpfahlbetons (Bohrpfahlkaries)	34
Abbildung 3-8: Zusammenhang zw. Kornindex und größtmöglicher Packungsdichte.....	36
Abbildung 3-9: Korngrößenverteilung für max. Packungsdichte bei best. Kornindex.....	37
Abbildung 4-1: Diagramm zur Bestimmung des Frischbetondrucks.....	41
Abbildung 4-2: Schalungsdruck einer Stütze.....	44
Abbildung 4-3: gemessener Frischbetondruck einer Stütze	46
Abbildung 5-1: Hydraulisches Druckkissen vom Typ Behensky.....	50
Abbildung 5-2: Flüssigkeitsdruckgeber.....	51

Abbildung 5-3: Messanordnung Pfahl.....	52
Abbildung 5-4: Bewehrungskorb mit Druckmesssensoren	53
Abbildung 5-5: Messanordnung Schlitzwand.....	54
Abbildung 5-6: Bewehrungskorb mit Unterteilungen und Messaufnehmern.....	55
Abbildung 5-7: eingebauter Bewehrungskorb mit elektrischen Leitungen.....	56
Abbildung 5-8: Ablauf beim Ziehen der Verrohrung	57
Abbildung 5-9: Einbau des Bewehrungskorbes.....	58
Abbildung 5-10: Betondruck, P40.17	61
Abbildung 5-11: Betondruck, P50.16	65
Abbildung 5-12: Suspension- und Betondruck, SW Budapest	70
Abbildung 5-13: Aussparungskasten am Bewehrungskorb der SW-Brixlegg.....	73
Abbildung 5-14: Suspensions- und Betondruck, SW Brixlegg.....	75
Abbildung 6-1: Betondruck, SW-Brixlegg	77
Abbildung 6-2: Anordnung der Druckkissen, SW Brixlegg	80
Abbildung 6-3: Vergleich von horizontalem und vertikalem Betondruck.....	81
Abbildung 6-4: Betondruckvergleich Mitte – Rand zu unterschiedlichen Zeiten, SW Budapest	83
Abbildung 6-5: Betondruckvergleich Mitte – Rand zu unterschiedlichen Zeiten, SW Brixlegg	83
Abbildung 6-6: Betondruckverteilung bei maximalem Frischbetondruck.....	85
Abbildung 6-7: Betondruckvergleich - P40.17 zu P50.16 bei gleicher Betonierhöhe	87
Abbildung 6-8: Betondruckverteilung zu Betonierende.....	88
Abbildung 6-9: Frischbetondruck bei unterschiedlichen Konsistenzen	88
Abbildung 6-10: Betondruckdiagramm, P50.16	95
Abbildung 6-11: Betondruckabfall nach Betonierende.....	96

TABELLENVERZEICHNIS

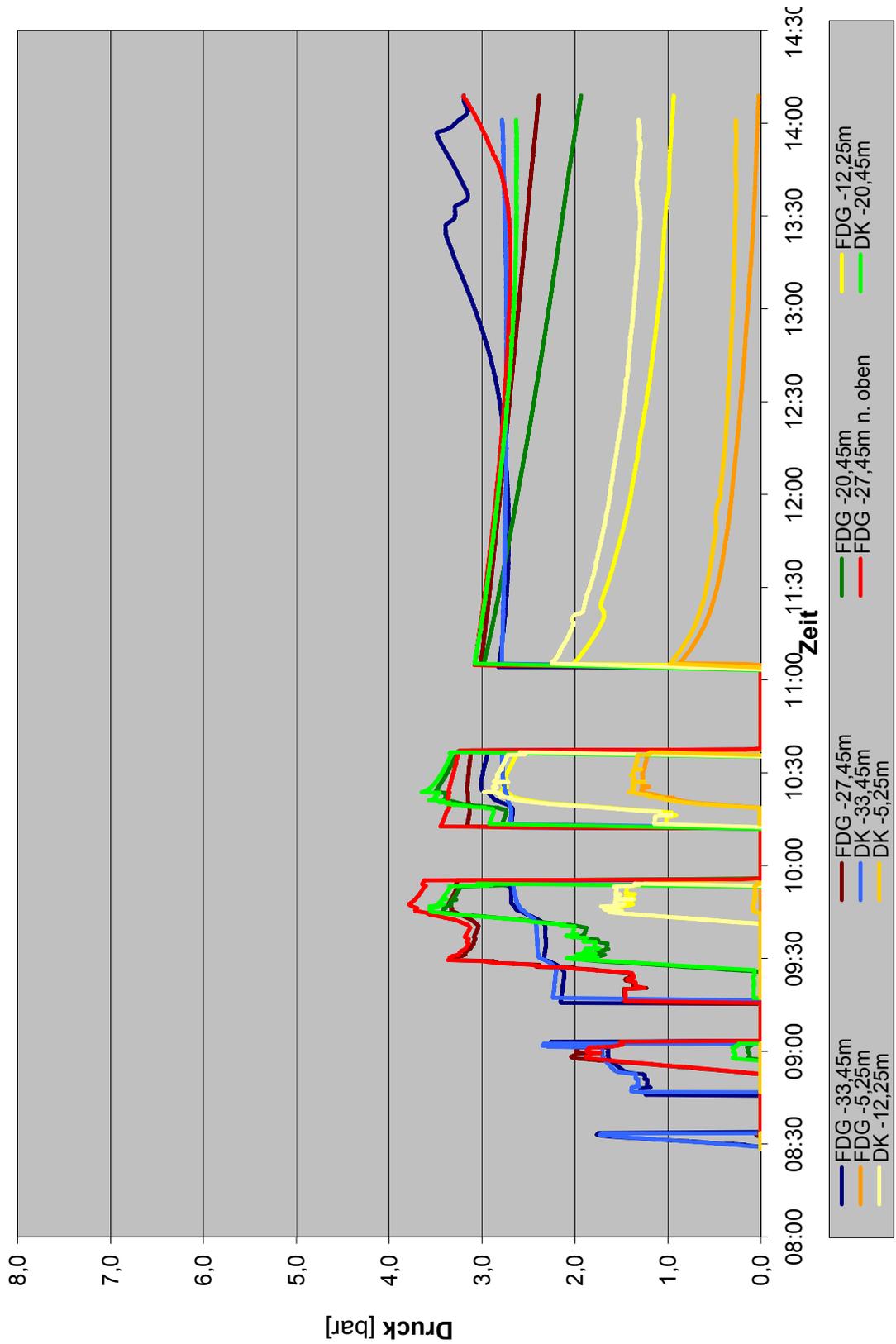
Tabelle 3-1: Bezeichnung der Gesteinskörnungen.....	20
Tabelle 3-2: Festigkeitsklassen und Erstarrungsbeginn von Zement.....	23
Tabelle 3-3: Ausbreitmaßklassen von Frischbeton laut ÖNORM B 4710-1	25
Tabelle 3-4: Betonrezeptur unterschiedlicher Betonarten laut Chargenprotokoll	32
Tabelle 3-5: empfohlener Mehlkorngesamt (< 0,125 mm) lt. ÖNORM B 4710-1 und Mindestmehlkorngesamt der Richtlinie Bohrpfähle	38
Tabelle 5-1: Messanordnung, P40.17.....	59
Tabelle 5-2: Ausbreitmaß und Frischbetondichte, P40.17.....	60
Tabelle 5-3: Ergebnis der Betonfilterpresse BPV, P40.17.....	60
Tabelle 5-4: Betondrucktabelle mit Überlagerungshöhe, P40.17	62
Tabelle 5-5: Messanordnung, P50.16.....	63
Tabelle 5-6: Ausbreitmaß und Frischbetondichte, P50.16.....	64
Tabelle 5-7: Ergebnis der Betonfilterpresse BPV, P50.16.....	64
Tabelle 5-8: Betondrucktabelle mit Überlagerungshöhe, P50.16	66
Tabelle 5-9: Messanordnung, Budapest SW	67
Tabelle 5-10: Ergebnis der Betonfilterpresse BPV, SW Budapest	68
Tabelle 5-11: Ausbreitmaß und Frischbetondichte, SW Budapest.....	69
Tabelle 5-12: Betondrucktabelle mit Überlagerungshöhe, SW Budapest.....	71
Tabelle 5-13: Messanordnung, SW Brixlegg	72
Tabelle 5-14: Ausbreitmaß und Frischbetondichte, SW Brixlegg	74
Tabelle 5-15: Ergebnis der Betonfilterpresse BPV, SW Brixlegg	75
Tabelle 5-16: Betondrucktabelle mit Überlagerungshöhe, SW Brixlegg.....	76
Tabelle 6-1: Druckunterschied zwischen den Messsystemen DK und FDG	78
Tabelle 6-2: Vergleich von horizontalem und vertikalem Betondruck.....	80
Tabelle 6-3: Betondruckvergleich Mitte - Rand.....	84
Tabelle 6-4: Zeitpunkt des maximalen Betondrucks.....	86

Tabelle 6-5: Parameterstudie über den Reibungswinkel von Frischbeton	90
Tabelle 6-6: Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck, P40.17	91
Tabelle 6-7: Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck, P50.16	92
Tabelle 6-8: Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck, SW-Budapest	93
Tabelle 6-9: Vergleich von berechnetem zu gemessenen Betondruck, SW-Brixlegg	93
Tabelle 6-10: Reibungswinkel des Frischbetons in Abhängigkeit der Konsistenz.....	94
Tabelle 6-11: Abfall des Betondrucks nach Betonierende.....	97

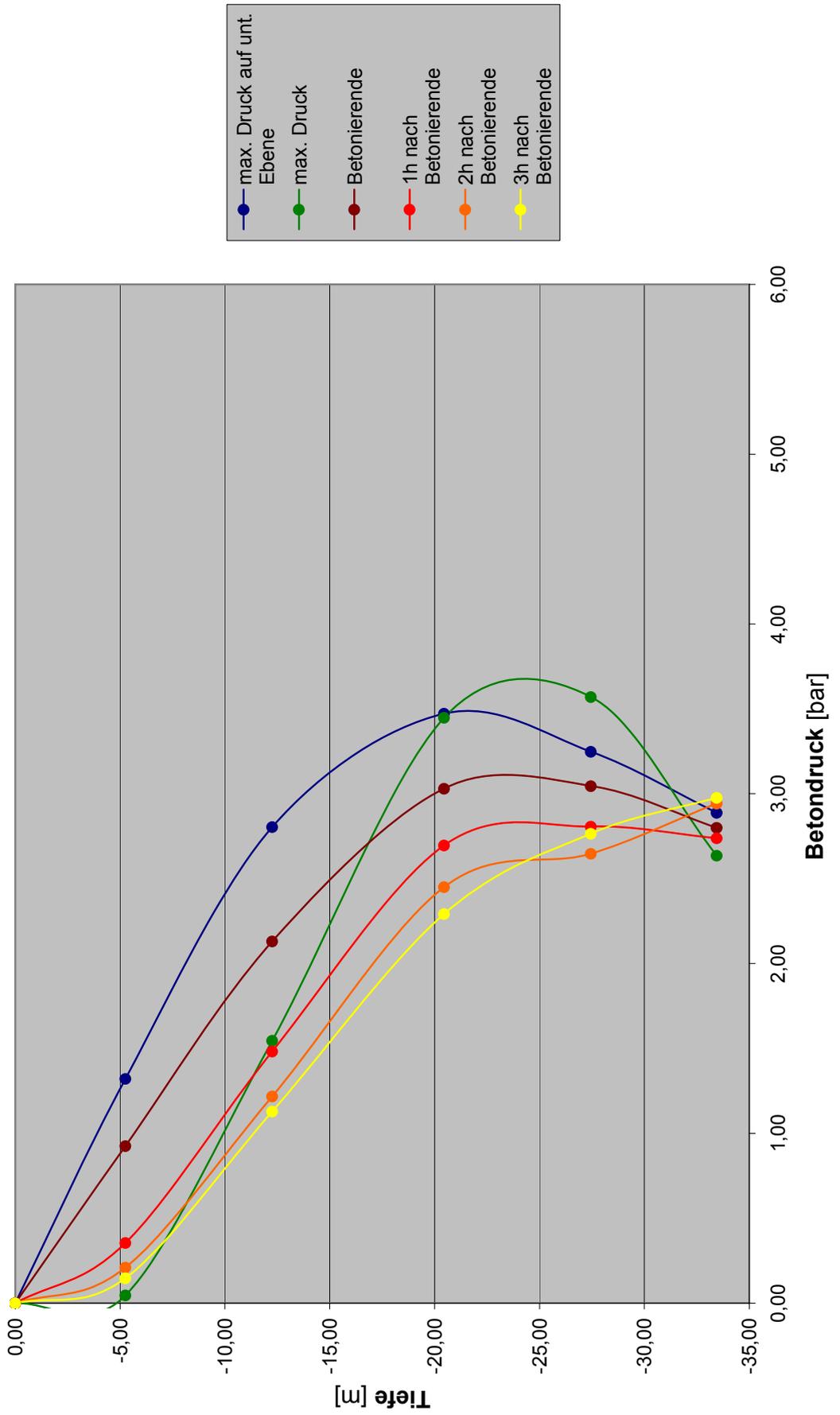
ANHANG A:

BAUSTELLE SALZBURG, PFAHL P40.17

Betondruck - Pfahl P40.17 Salzburg, 19.07.2007



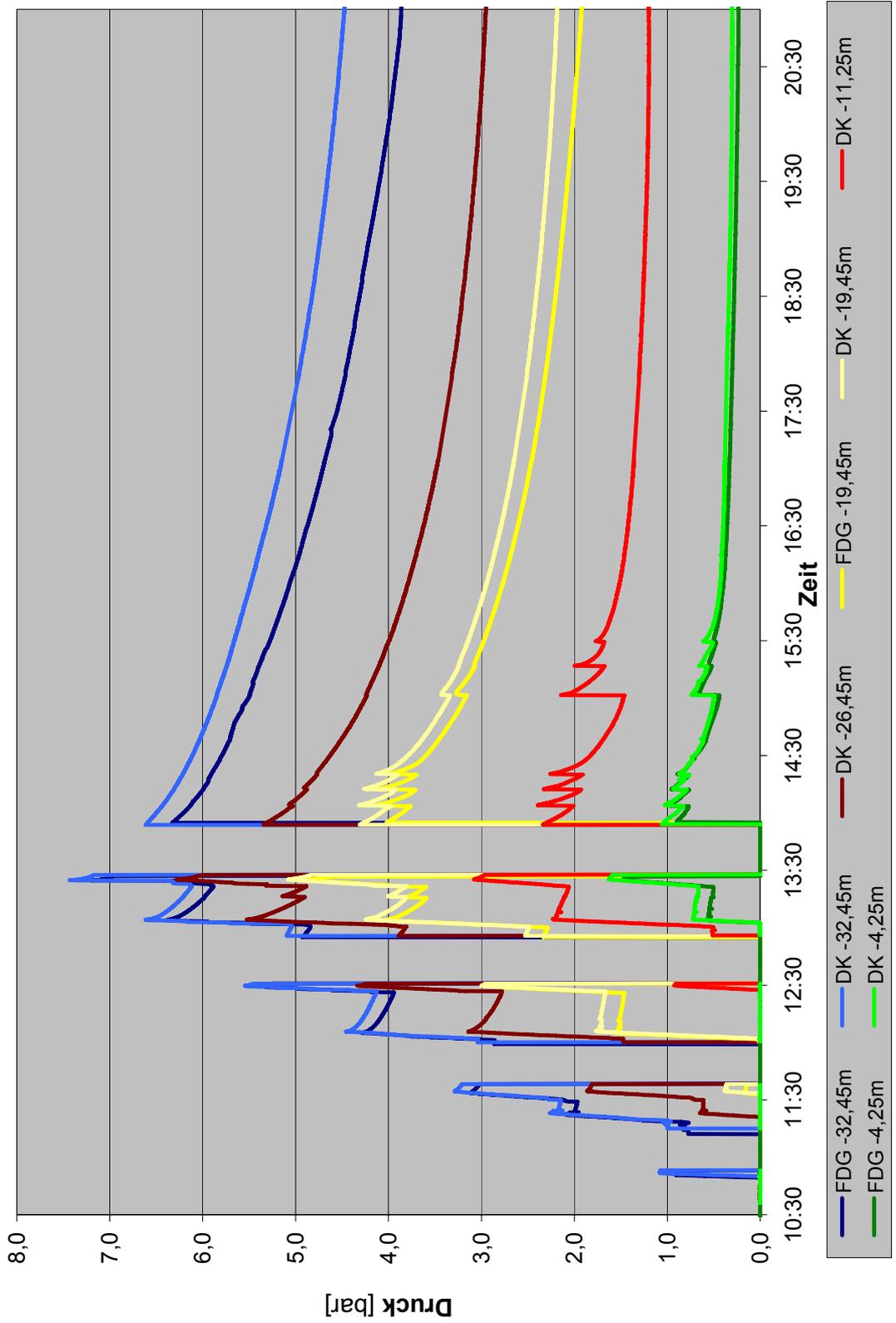
Betondruckverteilung Pfahl P40.17



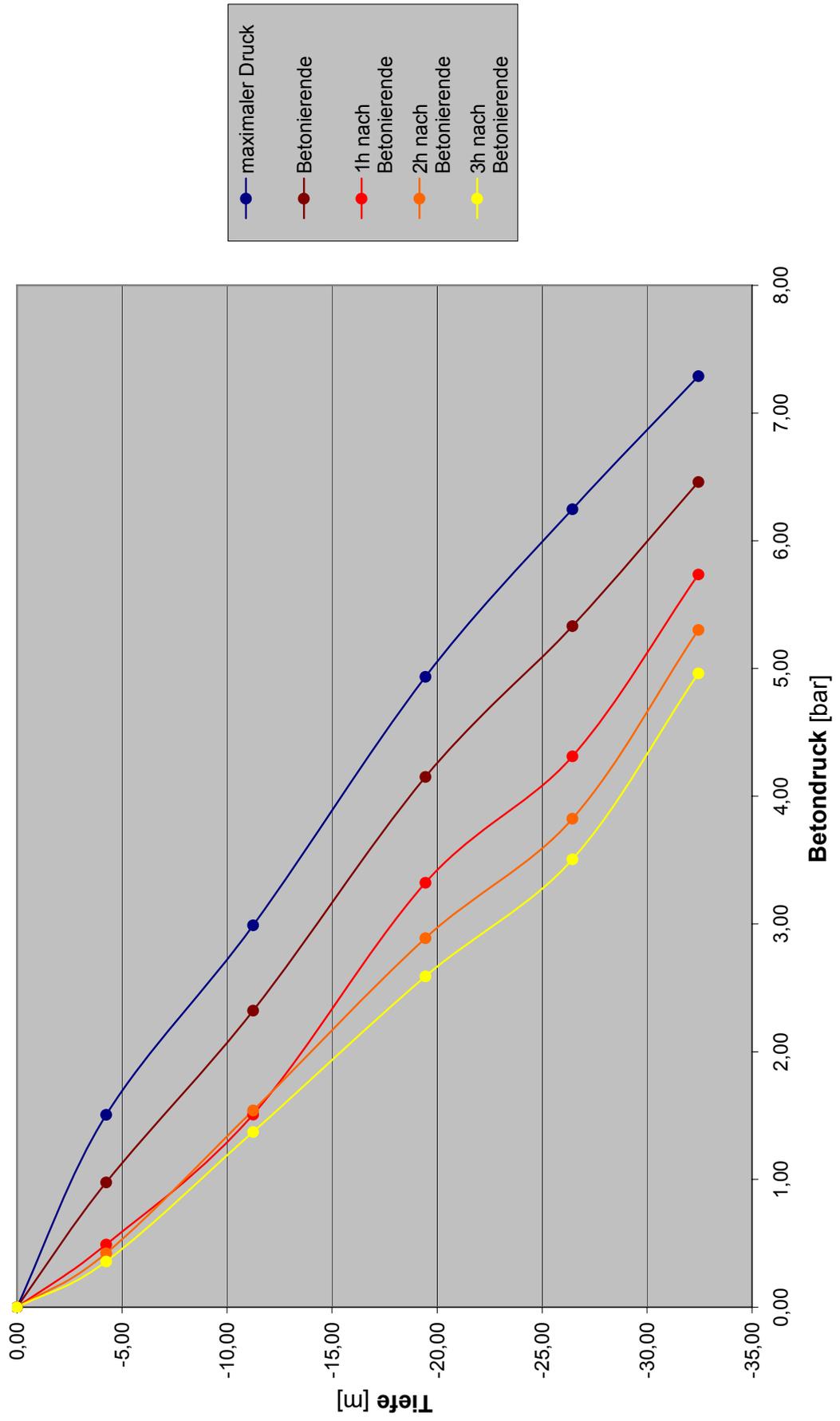
Bestimmung des Blutens von Beton unter Druck				
Bauvorhaben	Bohrpfahl P40.17, Ø1200, Salzburg	Datum	19.07.2007	
		Uhrzeit	08:40	
Betonart	Pfahlbeton / Schlitzwandbeton			
Betonsorte	C25/30 B11 UB2 BS-PF1 F59 GK22	Wasser W	185,3	kg/m ³
Cem-Sorte	Cem II/B-S 42,5 N		368	kg/m ³
Zusatzstoff 1	Fluasit (puzzolanische oder latenthydraulische ZS TypII)		40	kg/m ³
Zusatzstoff 2				kg/m ³
Zusatzmittel 1	Viscocrete 3088 (Fließmittel)		2,37	kg/m ³
Zusatzmittel 2				kg/m ³
Zuschlag			1813,3	kg/m ³
Feinanteil des Zuschlages < 0,063 mm				
Ausbreitmaß	10 Min	51 cm	Frischbetontemperatur	26,1 °C
	90 Min	cm	Lufttemperatur	23,2 °C
Zeit	ml	Bluten nach 30 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V	Druck	3,00 bar
3	90		Gefäßvolumen V	10,10 cm ³
5	129		<u>Bemerkungen:</u>	
10	205			
15	260			
20	320			
25	330	Frischbetondichte	2430 kg/m ³	
30	346	34,26		
35	360	Bluten nach 60 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V		
40	370			
45	380			
50	390			
55	396			
60	400		39,60	

BAUSTELLE SALZBURG, PFAHL P50.16

Betondruck - Pfahl P50.16
Salzburg, 09.08.2007



Betondruckverteilung Pfahl P50.16

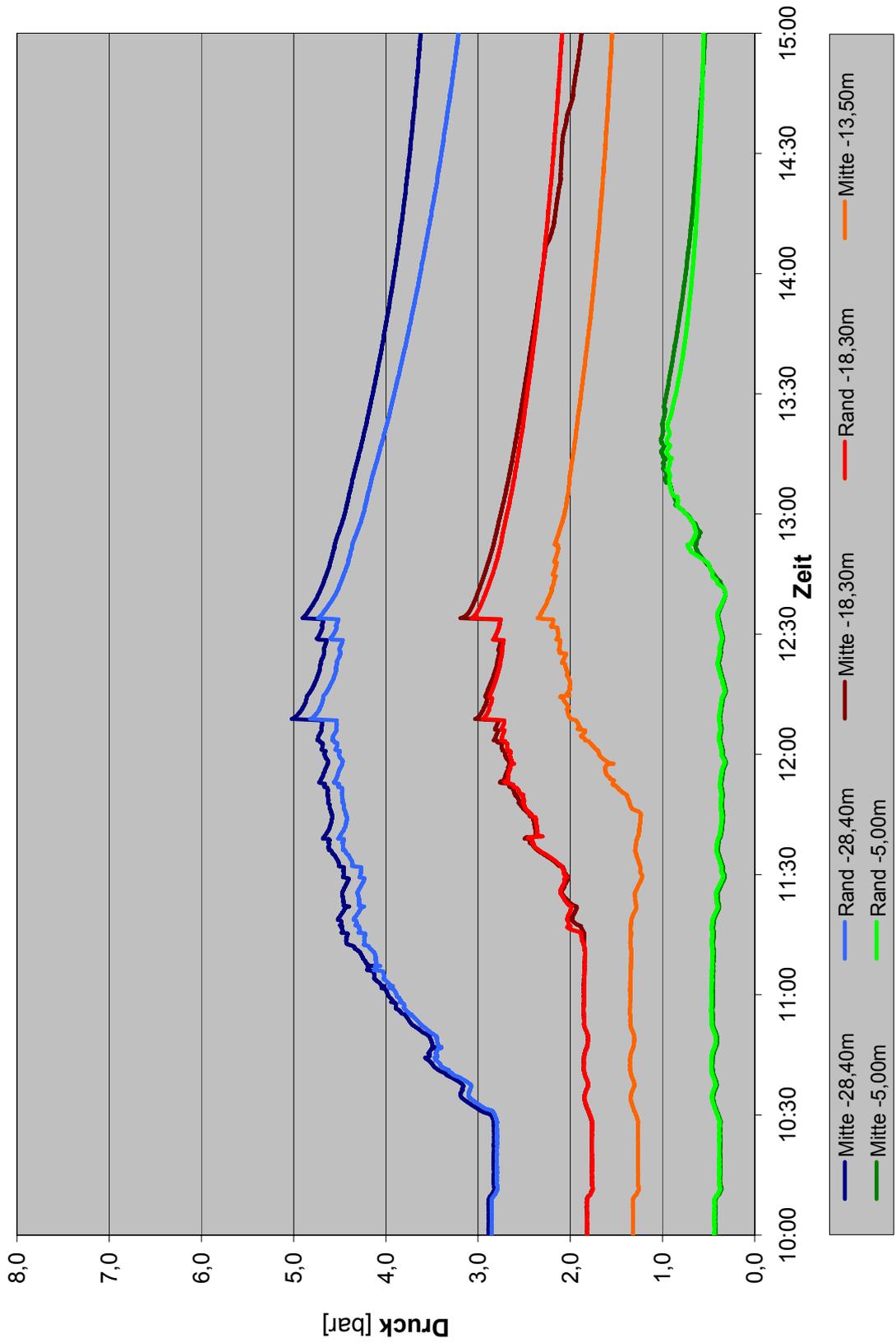


Bestimmung des Blutens von Beton unter Druck				
Bauvorhaben	Bohrpfahl P50.16, Ø1200, Salzburg	Datum	09.08.2007	
		Uhrzeit	10:59	
Betonart	Pfahlbeton / Schlitzwandbeton			
Betonsorte	C25/30 B11 UB2 BS-PF1 F59 GK22	Wasser W	191,5	kg/m ³
Cem-Sorte	Cem II/B-S 42,5 N		366	kg/m ³
Zusatzstoff 1	Flusait (puzzolanische oder latenthydraulische ZS TypII)		42	kg/m ³
Zusatzstoff 2				kg/m ³
Zusatzmittel 1	Viscocrete 3088 (Fließmittel)		4,76	kg/m ³
Zusatzmittel 2	Retarder (Verzögerer)		1,44	kg/m ³
Zuschlag			1889,2	kg/m ³
Feinanteil des Zuschlages < 0,063 mm				
Ausbreitmaß	10 Min	62 cm	Frischbetontemperatur	19,7 °C
	90 Min	cm	Lufttemperatur	15,5 °C
Zeit	ml		Druck	3,00 bar
3	100		Gefäßvolumen V	10,10 cm ³
5	160			
10	275			
15	400	Bluten nach 30 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V	<u>Bemerkungen:</u>	
20	480		Frischbetondichte	2370 kg/m ³
25	500			
30	540	53,47		
35	560			
40	590			
45	595	Bluten nach 60 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V		
50	600			
55	620			
60	630	62,38		

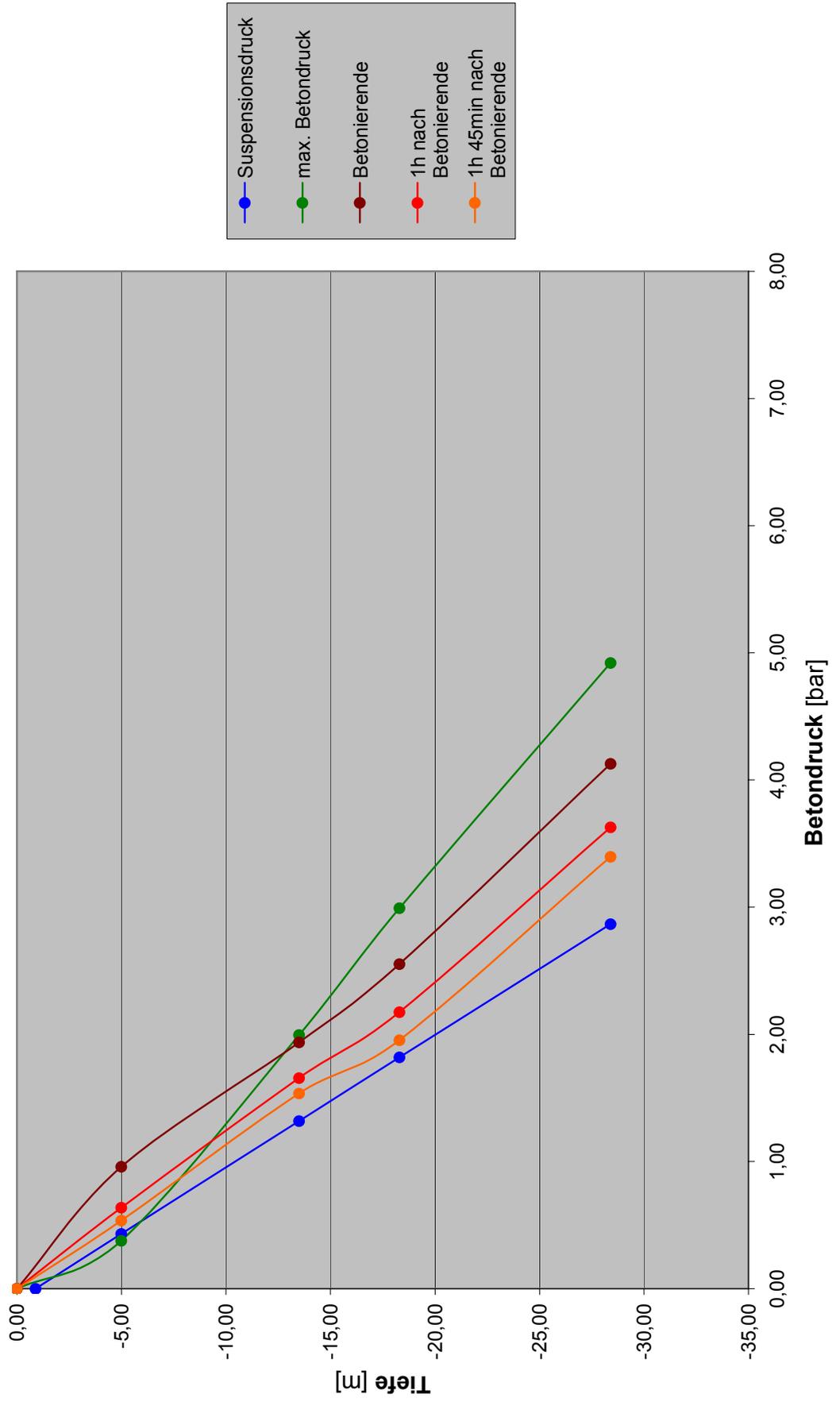
Bestimmung des Blutens von Beton unter Druck				
Bauvorhaben	Bohrpfahl P50.16, Ø1200, Salzburg	Datum	09.08.2007	
		Uhrzeit	12:15	
Betonart	Pfahlbeton / Schlitzwandbeton			
Betonsorte	C25/30 B11 UB2 BS-PF1 F59 GK22	Wasser W	190,4	kg/m ³
Cem-Sorte	Cem II/B-S 42,5 N		368	kg/m ³
Zusatzstoff 1	Fluasit (puzzolanische oder latenthydraulische ZS TypII)		41	kg/m ³
Zusatzstoff 2				kg/m ³
Zusatzmittel 1	Viscocrete 3088 (Fließmittel)		2,38	kg/m ³
Zusatzmittel 2	Retarder (Verzögerer)		1,45	kg/m ³
Zuschlag			1860,2	kg/m ³
Feinanteil des Zuschlages < 0,063 mm				
Ausbreitmaß	10 Min	64 cm	Frischbetontemperatur	21,3 °C
	90 Min	cm	Lufttemperatur	15,7 °C
Zeit	ml	Bluten nach 30 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V	Druck	3,00 bar
3	90		Gefäßvolumen V	10,10 cm ³
5	140		<u>Bemerkungen:</u>	
10	230			
15	285			
20	335			
25	370	Frischbetondichte	2360 kg/m ³	
30	400	39,60		
35	430	Bluten nach 60 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V		
40	445			
45	470			
50	500			
55	505			
60	510		50,50	

BAUSTELLE BUDAPEST

Betondruck - Schlitzwandlamelle 107 Budapest, 28.08.2007



Betondruckverteilung SW Budapest



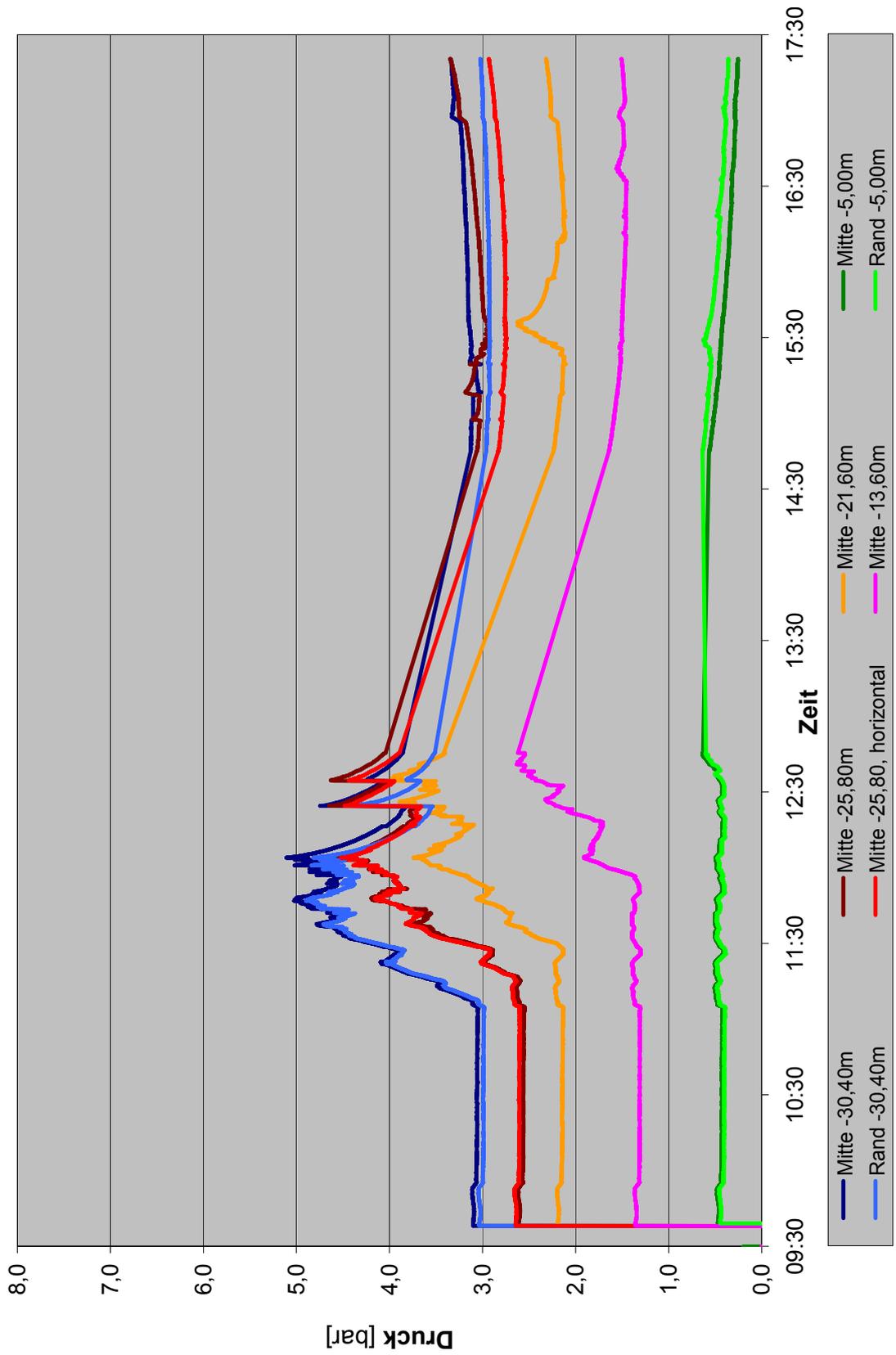
Bestimmung des Blutens von Beton unter Druck				
Bauvorhaben	Schlitzwand DN1000, Budapest		Datum	28.08.2007
			Uhrzeit	10:35
Betonart	Pfehlbeton / Schlitzwandbeton			
Betonsorte	C 30 -24 /F vz4	Wasser W	175	kg/m ³
Cem-Sorte	Cem III/A 32,5		400	kg/m ³
Zusatzstoff 1				kg/m ³
Zusatzstoff 2				kg/m ³
Zusatzmittel 1	Sky Glenium 851 (Fließmittel)		3,6	kg/m ³
Zusatzmittel 2	Pozzolith-20 (Verzögerer)		1,6	kg/m ³
Zuschlag			1820	kg/m ³
Feinanteil des Zuschlages < 0,063 mm				
Ausbreitmaß	10 Min	60 cm	Frischbetontemperatur	29,3 °C
	90 Min	cm	Lufttemperatur	24,6 °C
Zeit	ml		Druck	3,00 bar
3	93		Gefäßvolumen V	10,10 cm ³
5	174		<u>Bemerkungen:</u> Frischbetondichte 2380 kg/m ³	
10	250			
15	300	Bluten nach 30		
20	323	min		
25	362	in kg/m ³		
30	380	(ml _{30min} × 10) /		
35	401	V		
40	417			
45	428	Bluten nach 60		
50	438	min		
55	446	in kg/m ³		
60	454	(ml _{30min} × 10) /		
		V		
		37,62		
		44,95		

Bestimmung des Blutens von Beton unter Druck				
Bauvorhaben	Schlitzwand DN1000, Budapest		Datum	28.08.2007
			Uhrzeit	10:35
Betonart	Pfehlbeton / Schlitzwandbeton			
Betonsorte	C 30 -24 /F vz4	Wasser W	175	kg/m ³
Cem-Sorte	Cem III/A 32,5		400	kg/m ³
Zusatzstoff 1				kg/m ³
Zusatzstoff 2				kg/m ³
Zusatzmittel 1	Sky Glenium 851 (Fließmittel)		3,6	kg/m ³
Zusatzmittel 2	Pozzolith-20 (Verzögerer)		1,6	kg/m ³
Zuschlag			1820	kg/m ³
Feinanteil des Zuschlages < 0,063 mm				
Ausbreitmaß	10 Min	57 cm	Frischbetontemperatur	28,0 °C
	90 Min	cm	Lufttemperatur	27,1 °C
Zeit	ml		Druck	3,00 bar
3	70		Gefäßvolumen V	10,10 cm ³
5	98		<u>Bemerkungen:</u> Frischbetondichte 2360 kg/m ³	
10	148			
15	186			
20	214			
25	260	Bluten nach 30 min in kg/m ³ (ml _{30min} × 10) / V		
30	276	27,33		
35	276			
40	292			
45	304	Bluten nach 60 min in kg/m ³ (ml _{30min} × 10) / V		
50	314			
55	326			
60	330		32,67	

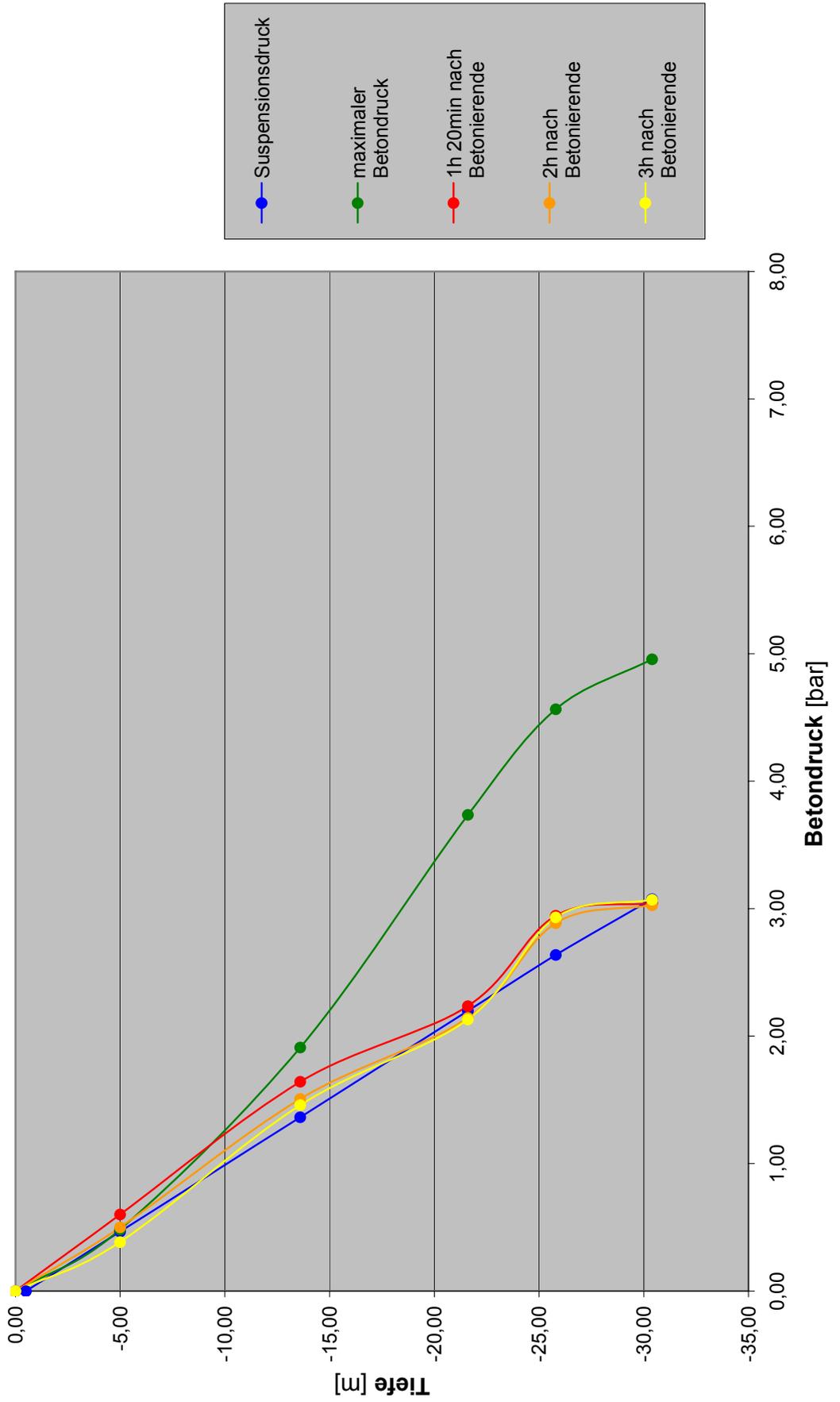
Bestimmung des Blutens von Beton unter Druck				
Bauvorhaben	Schlitzwand DN1000, Budapest		Datum	28.08.2007
			Uhrzeit	10:35
Betonart	Pfehlbeton / Schlitzwandbeton			
Betonsorte	C 30 -24 /F vz4	Wasser W	175	kg/m ³
Cem-Sorte	Cem III/A 32,5		400	kg/m ³
Zusatzstoff 1				kg/m ³
Zusatzstoff 2				kg/m ³
Zusatzmittel 1	Sky Glenium 851 (Fließmittel)		3,6	kg/m ³
Zusatzmittel 2	Pozzolith-20 (Verzögerer)		1,6	kg/m ³
Zuschlag			1820	kg/m ³
Feinanteil des Zuschlages < 0,063 mm				
Ausbreitmaß	10 Min	58 cm	Frischbetontemperatur	28,5 °C
	90 Min	cm	Lufttemperatur	28,4 °C
Zeit	ml		Druck	3,00 bar
3	70		Gefäßvolumen V	10,10 cm ³
5	93		<u>Bemerkungen:</u> Frischbetondichte 2380 kg/m ³	
10	164			
15	228	Bluten nach 30		
20	250	min		
25	282	in kg/m ³		
30	290	(ml _{30min} x 10) /		
35	302	V		
40	314			
45	324	Bluten nach 60		
50	332	min		
55	343	in kg/m ³		
60	351	(ml _{30min} x 10) /		
		V		
		28,71		
		34,75		

BAUSTELLE BRIXLEGG

Betondruck - Schlitzwandlamelle 1+2, RS14 H3/4 - Brixlegg, 11.10.2007



Betondruckverteilung SW Brixlegg



Bestimmung des Blutens von Beton unter Druck				
Bauvorhaben	Schlitzwand DN800, H3-4 Brix- legg		Datum	11.10.2007
			Uhrzeit	
Betonart	Pfehlbeton / Schlitzwandbeton			
Betonsorte	C25/30 UB2 BS-PF1 F59 GK22	Wasser W	197	kg/m ³
Cem-Sorte	Cem 42,5 N		298	kg/m ³
Zusatzstoff 1	Fluasit (puzzolanische oder latenthdraulische ZS TypII)		74	kg/m ³
Zusatzstoff 2				kg/m ³
Zusatzmittel 1	Duriment 4710 (Betonverflüssiger)		3,23	kg/m ³
Zusatzmittel 2				kg/m ³
Zuschlag			1890	kg/m ³
Feinanteil des Zuschlages < 0,063 mm				
Ausbreitmaß	10 Min	62	cm	Frischbetontempera- tur
	90 Min		cm	18,2 °C
				Lufttemperatur
				10,5 °C
Zeit	ml			Druck
3	78			3,00 bar
5	114			Gefäßvolumen V
10	192			11,16 cm ³
15	248	Bluten nach 30 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V	<u>Bemerkungen:</u>	
20	298		Frischbetondichte	2360 kg/m ³
25	352			
30	405		36,29	
35	444			
40	472			
45	510	Bluten nach 60 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V		
50	538			
55	556			
60	572		51,25	

Bestimmung des Blutens von Beton unter Druck				
Bauvorhaben	Schlitzwand DN800, H3-4 Brix- legg		Datum	11.10.2007
			Uhrzeit	12:40
Betonart	Pfehlbeton / Schlitzwandbeton			
Betonsorte	C25/30 UB2 BS-PF1 F59 GK22	Wasser W	228	kg/m ³
Cem-Sorte	Cem 42,5 N		302	kg/m ³
Zusatzstoff 1	Fluasit (puzzolanische oder latenthdraulische ZS TypII)		77	kg/m ³
Zusatzstoff 2				kg/m ³
Zusatzmittel 1	Duriment 4710 (Betonverflüssiger)		3,21	kg/m ³
Zusatzmittel 2				kg/m ³
Zuschlag			1866	kg/m ³
Feinanteil des Zuschlages < 0,063 mm				
Ausbreitmaß	10 Min	54	cm	Frischbetontempera- tur
	90 Min		cm	Lufttemperatur
				20,9 °C
				12,5 °C
Zeit	ml		Druck	3,00 bar
3	90		Gefäßvolumen V	11,16 cm ³
5	124			
10	188			
15	244	Bluten nach 30 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V	<u>Bemerkungen:</u>	
20	292		Frischbetondichte	2420 kg/m ³
25	342			
30	384		34,41	
35	416			
40	440			
45	464	Bluten nach 60 min in kg/m ³ (ml _{30min} x 10) / V		
50	482			
55	498			
60	514		46,06	