

UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR
INSTITUT FÜR GEOTECHNIK

Stefan Gamel

Bluten von Beton: Prognosemodell zur
baustellennahen Abschätzung der Wasserabgabe



März 2009

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Wei Wu
Dipl.-Ing. Thomas Eisenhut

Diplomarbeit Nr. 340

Danksagung

Ich danke der Firma Grund- Pfahl- und Sonderbau GmbH (GPS) und der Bautechnischen Prüf- und Versuchsanstalt GmbH (BPV) für die gute Zusammenarbeit bei der Erstellung dieser Arbeit.

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Dipl.- Ing. Thomas EISENHUT, der mir mit seinem Fachwissen stets zur Seite gestanden ist. Des Weiteren darf ich ihm die Hilfestellung bei der Organisation der zahlreichen Baustellenversuche danken.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Ing. Günther KAINRATH für die unzähligen konstruktiven Gespräche und Anregungen, die ebenfalls zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren darf ich mich bei Herrn Andreas SCHABREITER, Herrn Josef SENFT sowie Herrn Ernst KALCHBRENNER für die Unterstützung während der Arbeiten im Labor sowie bei den vielen Baustellenversuchen bedanken.

Im Zusammenhang mit den Baustellenversuchen darf ich dem ausführenden Personal der Grund- Pfahl- und Sonderbau GmbH für die Unterstützung auf den Baustellen danken.

Mein weiterer Dank gilt meinen Freunden an der Universität für Bodenkultur, die mich während des Studiums stets motiviert haben. Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin für die Unterstützung in vielen Bereichen meines Lebens. Nicht zuletzt hat sie mit ihren ausgezeichneten Mathematikkenntnissen maßgeblich zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen.

Schlussendlich darf ich Herrn Prof. Dr. Ing. Wei WU für die Betreuung an der Universität für Bodenkultur danken.

Vorwort

Seit einigen Jahren treten im Spezialtiefbau bei der Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden Probleme hinsichtlich der Frischbetonstabilität auf. Durch die Wasserabsonderung des Frischbetons (Bluten) entstehen Schadensbilder in Form von Nachsackungen fertig betonierter Oberflächen (Bohrpfahlkaries), optische Mängel an Sichtflächen von Schlitzwandelementen und Verringerung der Betondeckung bis hin zum Freilegen der Bewehrung. Das Bluten von Frischbeton ist von der Betonzusammensetzung und dem im Bauteil wirkenden Frischbetondruck abhängig.

Das Prüfverfahren zur Ermittlung des Blutens von Beton unter Druck gemäß ÖNORM EN 480-4 ist ein für den Hochbau bestimmtes Prüfverfahren. Da im Spezialtiefbau höhere Frischbetondrücke auftreten und Beton mit weicher Konsistenz verwendet wird, hat die Bautechnische Prüf- und Versuchsanstalt eine Betonfilterpresse speziell für den Einsatz im Spezialtiefbau entwickelt. Die Betonfilterpresse BPV kann sowohl im Labor als auch auf Baustellen eingesetzt werden. Die Versuchsdauer des Auspressversuchs der Betonfilterpresse BPV beträgt 60 Minuten. Die ausgepresste Wassermenge wird kontinuierlich über die Versuchsdauer gesammelt und aufgezeichnet. In der jetzigen Form der Versuchsdurchführung ist eine Beurteilung des Betons auf Baustellen vor dem Einbau nur schwer möglich. Aufgrund der großen Betoniergeschwindigkeit ist der zu prüfende Beton oftmals schon eingebaut bevor ein Ergebnis des Auspressversuchs vorliegt.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Prognosemodell entwickelt, das eine Hochrechnung nach 10 bzw. 15 Minuten Versuchsdauer auf das Endergebnis nach 60 Minuten ermöglicht. Das Prognosemodell setzt sich aus einem physikalischen Ansatz in Form eines Einzellinearspeichers und empirisch ermittelten Zusammenhängen zwischen den vorkommenden Parametern zusammen.

Die Berechnungsvorgänge des Prognosemodells wurden in einem einzigen Diagramm zusammengefasst. Dies ermöglicht dem Anwender auf den Baustellen eine einfache und schnell durchführbare Hochrechnung und somit eine rasche Beurteilung des Betons hinsichtlich der Wasserabgabe unter Druck.

Abstract

In the past years, bleeding of fresh concrete has become a major concern for quality in foundation engineering particularly for bored piles and diaphragm walls. Bleeding may give rise to poor quality of foundation works, e.g. large settlement of concrete, which is known as caries in bored piles; poor surface finishing in diaphragm wall reduced concrete cover. The susceptibility of concrete to bleeding is known to depend on the composition (concrete recipe) and pressure in fresh concrete.

Concrete bleeding is also a concern in structure engineering. The testing method for concrete bleeding in structure engineering is described in the Austrian Standard EN 480-4. In foundation engineering the pressure is usually higher and the concrete softer. As a consequence, the standard EN 480-4 is not well suited for bleeding in foundation engineering. To meet the special needs in foundation engineering, a mobile testing device has been developed at BPV (Bautechnische Prüf- und Versuchsanstalt). The device consists of a pressurized chamber with a filter-outlet in the bottom. During the test, some readings of the amount of water squeezed out of the fresh concrete in the chamber are taken. A bleeding test will take about one hour. While this device presents an improvement to the testing method in EN 480-4, the testing time is still too long for some construction sites.

In the present thesis, an empirical model is discussed, which allows a reliable prediction of the susceptibility to bleeding based on the testing results in the first 10 to 15 minutes. The model is based on the relationships in a single storage. Some correlations among the parameters are worked out. The calculations are summarized in diagrams, which allow easy handling and fast calculation on site.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	1
2. Beton	2
2.1 Allgemein	2
2.2 Betonzusammensetzung	3
2.2.1 Gesteinskörnung	3
2.2.2 Bindemittel	5
2.2.3 Zugabewasser	7
2.2.4 Zusatzstoff	8
2.2.5 Zusatzmittel	8
3. Frischbeton	10
3.1 Allgemeines	10
3.2 Betonentnahme	10
3.3 Konsistenz [1]	11
3.4 Frischbetonrohichte	15
3.5 Luftporen	17
3.6 Wassergehalt	19
4. Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden	21
4.1 Bohrpfähle	21
4.1.1 Allgemeines	21
4.1.2 Bohrverfahren	21
4.1.3 Verrohrte Bohrung	23
4.1.4 Flüssigkeitsgestützte Bohrung	26
4.1.5 Bohrung mit durchgehender Bohrschnecke	27

4.2	Schlitzwände	28
4.2.1	Allgemeines	28
4.2.2	Schlitzaustrub	28
4.2.3	Stützflüssigkeiten	29
4.2.4	Abschalsysteme	30
4.2.5	Betoniervorgang	30
5.	Wasserabgabe unter Druck – Bluten	32
5.1	Bluten von Beton	32
5.1.1	Definition	32
5.1.2	Erscheinungsbild des Blutens von Beton	32
5.1.3	Einflüsse auf das Betonbluten	35
5.2	Verfahren zur Bestimmung des Blutens von Beton	39
5.2.1	Ermittlung des Blutens gemäß ÖNORM B 3303 [10]	39
5.2.2	Ermittlung des Blutens nach Josserand und de Larrard [18]	40
5.2.3	Ermittlung des Blutens nach Sawaide [19]	41
5.2.4	Ermittlung des Blutens mit der Betonfilterpresse BPV	42
5.3	Prognosemodell	46
5.3.1	Allgemeines	46
5.3.2	Grundlagen	47
5.3.2.1	Einzellinearspeicher	47
5.3.2.2	Regressionsanalyse [8]	49
5.4	Modellerstellung	52
5.4.1	Allgemeines	52
5.4.2	Ermittlung der Parameter	56
5.4.3	Zusammenhang zwischen den Parametern	57
5.4.4	Verbesserung der Aussagequalität	61
5.4.5	Zusammenfügen des Modells	63
5.5	Modellbeschreibung	68
5.5.1	Allgemeines	68
5.5.2	Anwendungsmöglichkeiten	69
5.5.2.1	Einleitung	69
5.5.2.2	Einfache Hochrechnung	69
5.5.2.3	Hochrechnung mit fixem Grenzwert	70
5.5.2.4	Hochrechnung mit gegenwärtig bestimmter Speicherkonstante	72

5.6	Anwendung des Prognosemodells	73
5.6.1	Allgemeines	73
5.6.2	Beurteilung der Zuverlässigkeit	73
5.6.3	Beurteilung der Benutzerfreundlichkeit	75
6.	Zusammenfassung	76
7.	Literaturverzeichnis	78
8.	Abbildungsverzeichnis	81
9.	Tabellenverzeichnis	83
10.	Anhang	84

1. Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Seit einigen Jahren treten im Spezialtiefbau bei der Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden Probleme hinsichtlich der Frischbetonstabilität auf. Durch die Wasserabsonderung des Frischbetons (Bluten) entstehen Schadensbilder in Form von Nachsackungen fertig betonierter Oberflächen (Bohrpfahlkaries), optische Mängel an Sichtflächen von Schlitzwandelementen und Verringerung der Betondeckung bis hin zum Freilegen der Bewehrung. Das Bluten von Frischbeton ist von der Betonzusammensetzung und dem im Bauteil wirkenden Frischbetondruck abhängig.

Das Prüfverfahren zur Ermittlung des Blutens von Beton unter Druck gemäß ÖNORM EN 480-4 ist ein für den Hochbau bestimmtes Prüfverfahren. Da im Spezialtiefbau größere Frischbetondrücke auftreten und Beton mit weicher Konsistenz verwendet wird, hat die Bautechnische Prüf- und Versuchsanstalt eine Betonfilterpresse speziell für den Einsatz im Spezialtiefbau entwickelt. Die Betonfilterpresse BPV kann im Labor als auch auf Baustellen eingesetzt werden. Die Versuchsdauer des Auspressversuchs der Betonfilterpresse BPV beträgt 60 Minuten. Die ausgepresste Wassermenge wird kontinuierlich über die Versuchsdauer gesammelt und aufgezeichnet.

In der jetzigen Form der Versuchsdurchführung ist eine Beurteilung des Betons auf Baustellen vor dem Einbau nur schwer möglich. Aufgrund der großen Betoniergeschwindigkeit ist der zu prüfende Beton oftmals schon eingebaut bevor ein Ergebnis des Auspressversuchs vorliegt.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Weg zu finden, die Betonfilterpresse BPV zur Eingangskontrolle von Transportbeton auf Baustellen heranziehen zu können. Da die ursprüngliche Versuchsdauer des Auspressversuchs von 60 Minuten nicht verändert wird, bleibt nur die Möglichkeit, nach einigen Minuten Versuchsdauer auf den Endwert hochzurechnen. Die Anwendung des Prognosemodells soll hinsichtlich des Einsatzes auf der Baustelle denkbar einfach gestaltet werden.

2. Beton

2.1 Allgemein

Beton ist ein Gemisch aus Bindemittel, Wasser und Gesteinskörnern unterschiedlicher Größe. Neben diesen Grundbestandteilen kann der Beton noch Zusatzmittel und Zusatzstoffe enthalten. Diese werden zugegeben, um die Herstellung und die Verarbeitbarkeit zu erleichtern oder die Festbetoneigenschaften zu verbessern. Der Beton wird im flüssigen Zustand mit Hilfe von Schalungen in Form gebracht, die er im erhärteten Zustand beibehält. Die Festigkeit des Betons wird durch Hydratation des Bindemittels Zement erreicht. Im Endzustand kann Beton als künstlicher Stein bezeichnet werden, der wie ein Konglomerat aus einzelnen Gesteinskörnern besteht, die miteinander verkittet sind. [1]

Beton ist ein vielseitig einsetzbarer Baustoff, der je nach Einsatzgebiet andere Anforderungen erfüllen muss. Die Zusammensetzung des Betons an die jeweils gegebenen Bedingungen anzupassen. Aufgrund der Zusammensetzung kann Beton in verschiedene Gruppen oder Arten eingeteilt werden. Diese Einteilung kann unter anderem nach folgenden Kriterien erfolgen:

- **Gesteinskörnung**

- Grobbeton: Zuschlaggrößtkorn > 32mm
- Feinbeton: Zuschlaggrößtkorn < 8mm
- Mörtel: Zuschlaggrößtkorn < 4mm

- **Druckfestigkeit**

- von C8/10 $f_{ck,cyl} = 8 \text{ N/mm}^2$ $f_{ck,cube} = 10 \text{ N/mm}^2$
- bis C100/115 $f_{ck,cyl} = 100 \text{ N/mm}^2$ $f_{ck,cube} = 115 \text{ N/mm}^2$

- **Rohdichte**

- Leichtbeton: 800 kg/m³ bis 2.000 kg/m³
- Normalbeton: 2.000 kg/m³ bis 2.600 kg/m³
- Schwerbeton: > 2.600 kg/m³

- **Verwendungszweck**
 - Unterwasserbeton
 - Pfahlbeton
 - Spritzbeton usw.

Für die Herstellung von Beton ist zwischen „Beton nach Eigenschaften“ und „Beton nach Zusammensetzung“ 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 Eigenschaften und den zusätzlichen Anforderungen entspricht verantwortlich ist.“ [9]

„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 festgelegter Zusammensetzung verantwortlich ist.“ [9]

2.2 Betonzusammensetzung

2.2.1 Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung besteht aus gebrochenem oder ungebrochenem Material, das natürlichen Ursprungs ist oder industriell hergestellt wird. Des Weiteren ist es möglich, Beton- und Mauerwerkabbruch aufzubereiten und als Gesteinskörnung in der Betonproduktion zu verarbeiten. Die Gesteinskörnung nimmt etwa 70% des Betonvolumens ein und stellt damit den Hauptbestandteil des Betons dar.

Die in der Natur vorkommenden Gesteinskörnungen können bereits in der für die Betonherstellung notwendigen Form vorkommen. Üblicherweise wird die Gesteinskörnung mechanisch durch Zerkleinern, Sieben oder Waschen aufbereitet, um den gewünschten Korngrößen zu entsprechen. Grundsätzlich sind als Gesteinskörnung für Beton alle Stoffe und Materialien geeignet, die die Eigenschaften des Betons nicht nachteilig beeinflussen. [1]

Die Klassifizierung der Gesteinskörnung erfolgt über die Korngröße. Die einzelnen Korngruppen werden nach ihrem Kleinst- und Größtkorn bezeichnet. Die Bezeichnung einer Korngruppe mit 8/16 bedeutet, dass der überwiegende Teil der Gesteinskörner durch das Sieb mit einer Maschenweite von 16 mm fällt und auf dem Sieb mit 8 mm Maschenweite liegen bleibt. Die in der Betonherstellung verwendeten Korngruppen enthalten oftmals einen geringen Anteil an größeren und kleineren Gesteinskörnern. Diese werden als Über- bzw. Unterkorn bezeichnet. Der zulässige Anteil an Über- und Unterkorn einer Korngruppe ist normativ geregelt. In der Betonherstellung werden üblicherweise die Korngruppen 0/2, 0/4, 2/8, 4/8, 8/16 und 16/32 verwendet.[2]

Die verwendeten Gesteinskörnungen haben großen Einfluss auf die Qualität des hergestellten Betons. Aus diesem Grund müssen die Gesteinskörnungen den Anforderungen gemäß ÖNORM EN 12620 und ÖNORM B 3131 entsprechen. Ein Teil dieser Anforderungen sind die Kornform, der Gehalt an Feinteilen, der Gehalt an für den Beton schädlichen Stoffen und die Frostbeständigkeit des Korns. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnung, bestehend aus mehreren Korngruppen, wird in Form einer Sieblinie dargestellt. Die verwendeten Gesamtsieblinien müssen den Grenzsieblinien der ÖNORM B 4710-1 entsprechen. [2] In Abb. 2.1 sind die Grenzsieblinien für das Größtkorn 32 mm dargestellt.

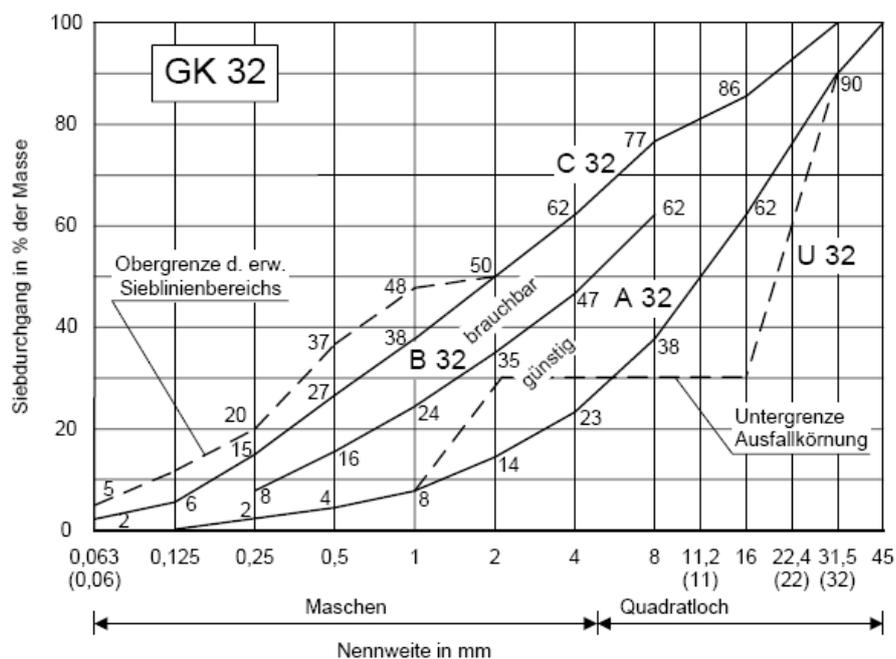


Abb. 2.1 Grenzsieblinie gem. ÖNORM B 4710-1 [9]

2.2.2 Bindemittel

Beton erreicht seine Festigkeit durch Hydratation des Bindemittels, das die einzelnen Gesteinskörner fest und dauerhaft miteinander verkittet. Zur Betonherstellung wird das Bindemittel Zement eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein anorganisches hydraulisches Bindemittel, das sowohl an der Luft als auch unter Wasser infolge Hydratation erhärtet. Zement besteht aus Haupt- und Nebenbestandteilen. Die Hauptbestandteile entwickeln die Festigkeit des Zements. Die Nebenbestandteile verbessern die Verarbeitbarkeit und das Wasserrückhaltevermögen. Als Hauptbestandteile werden jene Stoffe bezeichnet, deren Mengenanteil größer als 5% der Gesamtmasse ist. In Tab. 2.1 sind die Hauptbestandteile des Zements aufgelistet. [1]

Tab. 2.1 Hauptbestandteile des Zements [1]

Hauptbestandteile	Kurzbezeichnung
Portlandzementklinker	K
Hüttensand	S
Silicastaub	D
Puzzolane ¹	P, Q
Flugasche	V, W
Gebannter Schiefer	T
Kalkstein	L, LL

Nach ÖNORM EN 197-1 werden die Zemente in 5 Hauptarten und 27 Normalzementarten unterschiedlicher Zusammensetzung eingeteilt. Nachfolgend werden die Hauptarten genauer beschrieben:

CEM I: Portlandzement

Der Anteil an Portlandzement beträgt mindestens 95 M.-%.

¹ „Puzzolane sind kieselsäure- oder tonerdehaltige natürliche oder künstliche Stoffe ohne eigenständiges Bindevermögen. Zusammen mit Wasser und Kalk bilden sie wasserunlösliche Verbindungen mit zementartigen Eigenschaften“ [22]

CEM II: Portlandkompositzement

Neben Portlandzement enthält dieser Zement einen oder mehrere Hauptbestandteile mit einem Anteil von 6 bis 35 Massen- %. Liegen die Massenanteile der anderen Hauptbestandteile unter 20 %, werden diese zusätzlich mit dem Buchstaben A bezeichnet. Jene Hauptbestandteile deren Massenanteile zwischen 21 und 35 % liegen, werden mit dem Buchstaben B gekennzeichnet. Eine Ausnahme bildet der Hauptbestandteil Silicastaub, dessen Massenanteil maximal 10 % erreichen darf.

CEM III: Hochofenzement

Neben Hüttensand enthält Hochofenzement Portlandzementklinker mit einem Anteil von 5 bis 64 Massen- %. Liegt der Massenanteil an Portlandzementklinker zwischen 35 und 64 % wird dieser zusätzlich mit dem Buchstaben A bezeichnet. Massenanteile zwischen 20 und 34 % werden mit dem Buchstaben B, und Massenanteile zwischen 5 und 19 % mit dem Buchstaben C gekennzeichnet.

CEM IV: Puzzolanzement

Puzzolanzement enthält neben Portlandzementklinker Puzzolan, Flugasche und/oder Silicastaub als Hauptbestandteil mit 11 bis 55 Massen- %. Für Massenanteile zwischen 11 und 35 % wird zusätzlich der Buchstabe A angeführt. Massenanteile zwischen 36 und 55 % werden mit dem Buchstaben B gekennzeichnet.

CEM V: Kompositzement

Kompositzement enthält neben Portlandzementklinker Hüttensand mit einem Anteil von 31 bis 50 Massen- % und/oder kieselsäurereiche Flugasche und Puzzolan mit einem Anteil von 18 bis 50 Massen- %. Massenanteile zwischen 18 und 30 % werden zusätzlich mit dem Buchstaben A bezeichnet. Für Massenanteile zwischen 31 und 50 % wird der Buchstabe B angeführt.

Des Weiteren werden Zemente nach ihren Druckfestigkeiten nach 28 Tagen Abbindezeit bezeichnet. Die Einteilung erfolgt in 3 Klassen (siehe Tab.2.2). Diese 3 Klassen werden nochmals anhand der Druckfestigkeiten nach 2 bzw. 7 Tagen unterteilt. Normal erhärtende Zemente werden mit dem Buchstaben N (normal) und Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit mit dem Buchstaben R (rapid) bezeichnet.

Tab. 2.2 Festigkeitsklassen und Erstarrungsbeginn von Zement [1]

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit [N/mm ²]			
	Anfangsfestigkeit		Normalfestigkeit	
	2 Tage	7 Tage	28 Tage	
32,5 N	-----	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	-----		
42,5 N	≥ 10,0	-----	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-----		
52,5 N	≥ 20,0	-----	≥ 52,5	-----
52,5 R	≥ 30,0	-----		

2.2.3 Zugabewasser

Unmittelbar nach dem Kontakt von Wasser mit Zement beginnen chemische Reaktionen, die als Hydratation bezeichnet wird. Diese chemischen Reaktionen führen kontinuierlich über Ansteifen und Erstarren zum Erhärten des Zementleims. Während der Hydratation werden ca. 25% der Zementmasse umgesetzt. Der Rest des zugegebenen Wassers dient der Verarbeitbarkeit des Betons. Grundsätzlich sind alle in der Natur vorkommenden Wässer für die Betonherstellung geeignet, sofern diese nicht Bestandteile enthalten, die die Qualität des Betons verringern. Für die Ermittlung der Zugabewassermenge ist das in der Gesteinskörnung enthaltene Wasser zu berücksichtigen. [1],[2]

2.2.4 Zusatzstoff

Zusatzstoffe sind fein gemahlene Stoffe, die einzelne Eigenschaften des Betons beeinflussen. Sie werden vorwiegend zugegeben um die Verarbeitbarkeit und das Wasserrückhaltevermögen des Frischbetons zu verbessern sowie die Dichtigkeit des Festbetons zu erhöhen. Die verwendeten Zusatzstoffe dürfen Hydratation und Festigkeit nicht negativ beeinflussen. Des Weiteren darf die im Beton eingesetzte Bewehrung nicht geschädigt werden. Die zugegebenen Mengen müssen in der Stoffraumberechnung berücksichtigt werden. [1]

Die Zusatzstoffe werden in anorganisch-mineralische Stoffe, Farbstoffe und organische Stoffe unterteilt. Die anorganisch-mineralischen Stoffe können weiter in inerte, puzzolanische und latent hydraulische Stoffe aufgliedert werden. Inerte Stoffe wie zum Beispiel Quarz reagieren nicht mit Zement und Wasser. Puzzolanische Stoffe unterstützen aktiv das Erhärten des Betons. Latent hydraulische Stoffe tragen nur durch die Anwesenheit eines Erregers zur Erhärtung bei. [1]

2.2.5 Zusatzmittel

Zusatzmittel sind Stoffe, die dem Beton zugegeben werden um Eigenschaften des Frisch- und Festbetons zu verbessern. Zusatzmittel werden im Vergleich zu Zusatzstoffen nur in kleinen Mengen zugegeben und brauchen daher im Allgemeinen in der Stoffraumberechnung nicht berücksichtigt zu werden. Zusatzmittel können in flüssiger oder pulverförmiger Form beigemischt werden. [2]

Betonverflüssiger (BV)

Durch die Zugabe von Betonverflüssigern kann die Konsistenz und damit die Verarbeitbarkeit des Frischbetons ohne zusätzliche Wasserzugabe verbessert werden. Bei unveränderter Konsistenz können durch die Zugabe von Betonverflüssigern 5-15% Wasser eingespart werden, was sich positiv auf die Betonfestigkeit auswirkt. [1]

Fließmittel (FM)

Fließmittel haben ähnliche Eigenschaften wie Betonverflüssiger. Die erforderlichen Zugabemengen sind im Vergleich zu Betonverflüssigern deutlich geringer, da Fließmittel eine höhere Wirksamkeit aufweisen. Durch die Anwendung von Fließmitteln sind starke Verflüssigungen des Frischbetons möglich. Es können Betone mit sehr weicher bis flüssiger Konsistenz ohne höhere Wasserzugabe hergestellt werden. [2] Bei der Dosierung von Fließmitteln ist darauf zu achten, dass die höchst zulässigen Mengen nicht überschritten werden, um die Stabilität des Frischbetons nicht zu gefährden.

Verzögerer (VZ)

Verzögerer werden eingesetzt, um die Zeit bis zum Erhärten des Betons zu verlängern. Somit bleibt der Beton länger verarbeitbar. Aus diesem Grund kommen Verzögerer bei Unterbrechungen im Betoniervorgang oder bei der Herstellung großvolumiger Bauteile, welche in einem Stück betoniert werden müssen, zum Einsatz. [2]

Stabilisierer (ST)

Stabilisierer werden eingesetzt, um den Zusammenhalt des Frischbetongefüges zu verbessern. Dadurch soll ein Entmischen des Frischbetons vermieden bzw. die Wasserabsonderung in Form von Bluten verringert werden. [1]

Bei gleichzeitigem Einsatz mehrerer Zusatzmittel kann die Wirkung einzelner Mittel verstärkt oder abgeschwächt werden. Des Weiteren sind unerwünschte Veränderungen der Betoneigenschaften möglich.

3. Frischbeton

3.1 Allgemeines

Frischbeton ist die Bezeichnung für Beton, solange sich dieser noch verarbeiten lässt. Um die geforderten Frischbetoneigenschaften zu gewährleisten, sind Frischbetonprüfungen durchzuführen. In der ÖNORM B 3303 sind die anzuwendenden Prüfverfahren für die Durchführung von Frischbetonprüfungen, sowie die zu verwendenden Messgeräte samt Zubehör beschrieben. Ein Teil der angeführten Prüfverfahren wurden im Zuge dieser Arbeit auf Baustellen durchgeführt. Die angewandten Prüfverfahren werden nachfolgend genauer beleuchtet.

Zur Bestimmung der Wasserabgabe unter Druck (Bluten) wurde das Verfahren der Betonfilterpresse BPV angewandt. Dieses Prüfverfahren ist nicht genormt. Die Betonfilterpresse BPV ist in Kapitel 5.1 beschrieben.

3.2 Betonentnahme

Bevor mit den einzelnen Prüfverfahren begonnen werden kann, ist zunächst eine Frischbetonprobe zu entnehmen. Die Probennahme ist in der ÖNORM EN 12350 geregelt. Es wird zwischen einer Sammelprobe und einer Stichprobe unterschieden. Eine Sammelprobe setzt sich aus mehreren Einzelproben zusammen. Die Einzelproben werden gleichmäßig über eine Mischerfüllung verteilt entnommen und anschließend durchgemischt. Eine Stichprobe hingegen besteht aus einer oder mehreren Einzelproben, die aus einem Teil der Mischerfüllung entnommen und anschließend durchgemischt werden. [11]

Auf den besuchten Baustellen wurden ausschließlich Stichproben aus Fahrmischern entnommen. Dabei ist zu beachten, dass die Probenahme aus dem Fahrmischer erst nach der Entleerung von ca. 0,1 m³ Beton und vor der Entleerung von 95% der geladenen Menge erfolgte. Die Abb. 3.1 zeigt das Entnehmen einer Betonprobe aus einem Fahrmischer. [10]



Abb. 3.1 Probenahme aus Fahrmischer

Die zu entnehmende Menge muss mindestens der 1,5 fachen Menge, die für die Betonprüfung erforderlich ist, entsprechen. Bis zur Durchführung der Betonprüfung ist die Probe gegen Verunreinigungen, Wasseraufnahme bzw. Wasserverlust und vor extreme Temperaturen zu schützen. Abschließend ist für jede entnommene Probe ein Probenahmebericht zu erstellen. In diesem sind die Eckdaten der Entnahme (Probennummer, Entnahmezeitpunkt, Entnahmestelle, usw.) anzuführen. [10]

3.3 Konsistenz [1]

Eine wesentliche Eigenschaft des Frischbetons ist die Verarbeitbarkeit. Unter Verarbeitbarkeit ist das Verhalten des Betons beim Mischen, Transportieren, Fördern, Einbauen, Verdichten und Abgleichen zu verstehen. Je nach Anforderung bei der Verarbeitung ist die Konsistenz des Frischbetons unterschiedlich. Beton, der für ein Einsatzgebiet bestens geeignet ist, kann für andere Zwecke unbrauchbar sein.

Die Verarbeitbarkeit ist jedoch kein Parameter, der sich quantitativ beschreiben lässt. Die Eigenschaft der Verarbeitbarkeit wird im Wesentlichen durch die Konsistenz ausgedrückt. Die Konsistenz beschreibt einen messbaren Zustand des Frischbetons der mit dem Ausbreitmaß bestimmt wird. Dieser Zustand kann sehr steif, steif, plastisch, weich, sehr weich, fließfähig, und sehr fließfähig. Die Einteilung des Betons erfolgt in Konsistenzklassen. Diese sind in Tab. 3.1 angeführt.

Die Konsistenz des Frischbetons ist von der Betonzusammensetzung abhängig. Die bestimmenden Faktoren sind der Wassergehalt, der Gehalt an Mehlkorn, die Kornzusammensetzung und die Art des Zuschlages sowie die Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen. Die Konsistenz des Betons wird umso weicher, je höher der Wassergehalt wird. Grundsätzlich lässt sich weicher Beton leichter einbauen und verdichten als steifer Beton. Wird die Betonmischung jedoch zu weich (fließfähig), so neigt der Beton zum Entmischen. Unter Entmischen ist der Verlust der Stabilität des Frischbetons zu verstehen. Das Entmischen des Betons kann dazu führen, dass das Wasser im eingebauten Beton infolge des Dichteunterschiedes nach oben steigt und an der Oberfläche eine Wasserschicht bildet. Dieses Wasserabsondern wird als Bluten bezeichnet. Des Weiteren setzt sich der Zuschlag als schwerer Bestandteil vom leichteren Zementleim ab. Dies führt zur Bildung einer Zementleimschicht an der Oberfläche des Bauteils und einem damit verbundenen Qualitätsverlust.



Abb. 3.2 Entmischung von Beton [2]

Grundsätzlich sollte dem Frischbeton nur soviel Wasser zugegeben werden, wie dieser für das Erreichen einer weichen Konsistenz benötigt. Die Herstellung von fließfähigem Beton erfolgt somit nicht mit höherer Wasserzugabe, sondern durch den Einsatz von Zusatzmitteln. Bei der Dosierung von Fließmitteln ist darauf zu achten, dass die höchstzulässigen Mengen nicht überschritten werden. Ein Überschreiten dieser Grenzwerte kann zum Entmischen des Betons führen. Zusätzlich zur Entmischung wird dieser noch klebrig und lässt sich nur schwer verarbeiten.

Der Anteil an Mehlkorn im Frischbeton ist ein weiterer Faktor der einen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und die Konsistenz hat. Als Mehlkorn wird die Kornfraktion mit einem Korndurchmesser von 0 bis 0,125 mm bezeichnet. Das Zusammenhaltevermögen des Frischbetons wird mit steigendem Mehlkorngehalt erhöht. Des Weiteren hat ein hoher Mehlkorngehalt positive Auswirkungen auf das Wasserrückhaltevermögen des Betons. Somit wird die Wasserabgabe verringert. Ein zu hoher Gehalt an feinen Bestandteilen führt zu einer Vergrößerung der Oberfläche. Dadurch wird der Wasseranspruch für das Erreichen einer bestimmten Konsistenz erhöht. Dies wirkt sich ungünstig auf die Festbetoneigenschaft und das Bluten aus.

Die für die Betonherstellung verwendete Gesteinskörnung hat neben den oben genannten Faktoren auch Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Konsistenz des Frischbetons. Die Oberflächenrauigkeit und die Kornform sind die bestimmenden Parameter. Das Verarbeiten von Beton mit gebrochener Gesteinskörnung rauer Oberfläche ist schwieriger als das Verarbeiten von Beton mit Rundkorn. Beton mit grobkörniger Gesteinskörnung weist aufgrund der geringeren zu benetzenden Oberfläche eine weichere Konsistenz auf als Beton mit feinkornreicher Gesteinskörnung. Jedoch wird die Verarbeitbarkeit von Beton durch grobe Gesteinskörnung erschwert. Des Weiteren neigt der Beton während des Förderns und Verarbeitens leichter zum Entmischen.

Geringe Abweichungen eines Betonbestandteils können schon große Abweichungen der Konsistenz bewirken.

Prüfverfahren [12]

Die Konsistenz des Frischbetons wird durch die Ermittlung des Ausbreitmaßes oder des Verdichtungsmaßes bestimmt. In Abhängigkeit der Konsistenz wird entweder das Ausbreitmaß oder das Verdichtungsmaß bestimmt (siehe Tab.3.1). Die Bestimmung des Ausbreitmaßes ist in der ÖNORM EN1250 Teil 5 geregelt.

Tab. 3.1 Einteilung der Konsistenzklassen nach ÖNORM B 4710-1

Konsistenzbereich	Ausbreitmaßklassen		Verdichtungsmaßklassen	
	Klasse	Ausbreitmaß [mm]	Klasse	Verdichtungsmaß
sehr steif	-	-	C0	= 1,46
steif	F1	= 340	C1	1,45 – 1,26
plastisch	F2	350 – 410	C2	1,25 – 1,11
weich	F3	420 – 480	C3	1,11 – 1,04
sehr weich	F4	490 – 550	-	-
fließfähig	F5	560 – 620	-	-
sehr fließfähig	F6	= 630	-	-
SVB ²	-	> 700	-	-

Die Ausrüstung zur Durchführung des Ausbreitversuchs besteht aus einem Ausbreittisch, einer Form aus Metall, einem Stößel und einer Messlatte mit einer Mindestlänge von 700 mm (s. Abb.3.3).



Abb. 3.3 Geräte zur Bestimmung des Ausbreitmaßes

² SVB: Selbstverdichtender Beton. Die internationale Abkürzung lautet SCC (self compacting concrete)

Für die Versuchsdurchführung ist der Ausbreittisch auf einer ebenen, horizontalen und erschütterungsfreien Oberfläche aufzustellen. Anschließend ist die Oberfläche des Ausbreittisches vorzunässen. Danach wird die Form mittig auf den Ausbreittisch aufgesetzt und über Fußrasten fixiert. Die Befüllung erfolgt in zwei gleichen Betonschichten, welche jeweils mit 10 leichten Stößen mit dem Stößel zu verdichten sind. Nach der Befüllung ist der Überstand bündig mit der Oberkante der Form abzustreichen und die freie Oberfläche des Tisches zu säubern. 30 Sekunden nach dem Abstreichen der Oberfläche ist die Form innerhalb von 3 bis 6 Sekunden vertikal zu heben. Danach wird die bewegliche Platte 15-mal bis zur definierten Höhe angehoben und frei fallengelassen. Jeder einzelne Vorgang soll zwischen 2 und 5 Sekunden dauern. Abschließend ist, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, die Ausbreitung des Betons parallel zu den Tischkanten zu messen und das Ausbreitmaß $(d_1 + d_2)/2$ zu errechnen.

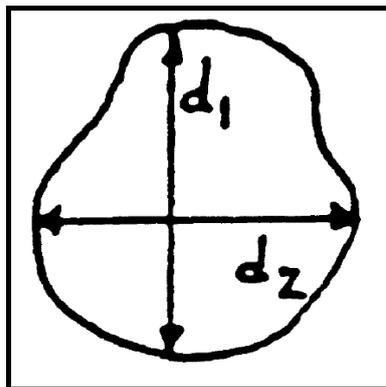


Abb. 3.4 Messung des Ausbreitmaßes [12]

Zusätzlich zur Messung der Ausbreitung ist der Beton hinsichtlich einer möglichen Entmischung zu überprüfen. Wurden Entmischungen festgestellt, ist dies im Prüfbericht zu vermerken und die Prüfung als unzureichend zu bezeichnen.

3.4 Frischbetonrohichte

Die Frischbetonrohichte beschreibt den Quotienten aus der Masse und dem Volumen des eingebauten und verdichteten Frischbetons. Die Frischbetonrohichte ist von der Dichte der einzelnen Betonbestandteile, der Betonzusammensetzung und dem Gehalt an Luftporen im Beton abhängig. Der spezifisch schwerste Stoff der einzelnen Betonbestandteile ist in der Regel der Zement.

Den leichtesten Bestandteil bilden die Luftporen und das im Beton enthaltene Wasser. Daraus resultiert, dass die Frischbetonrohddichte mit steigendem Zementgehalt zu und mit steigendem Anteil an Luftporen und Wasser abnimmt. Infolgedessen kann die Frischbetonrohddichte zur Kontrolle der Betonzusammensetzung herangezogen werden. Die Frischbetonrohddichte von entmischtem Beton liegt in den meisten Fällen über dem Sollwert. Der Grund dafür liegt darin, dass das Wasser als spezifisch leichter Bestandteil aufsteigt und mit dem überstehenden Beton abgestrichen wird. Das Aufsteigen oder Absondern von spezifisch leichterem Wasser wird als Bluten bezeichnet. [1]

Prüfverfahren [13]

Das in Österreich gültige Regelwerk zur Ermittlung der Frischbetonrohddichte ist die ÖNORM EN 12350 Teil 6 bzw. ÖNORM B3303. Zur Bestimmung der Frischbetonrohddichte werden ein wasserdichter und formstabiler Behälter, eine Einrichtung zum Verdichten des Betons und eine Waage benötigt. Der Behälter muss ein Mindestvolumen von 5 Liter aufweisen. Des Weiteren sind die erforderlichen Behälterabmessungen vom Durchmesser des Größtkorns abhängig. Die kleinste Abmessung des Behälters muss mindestens dem 4-fachen Durchmesser des Größtkorns entsprechen. In Österreich wird in der Regel die Frischbetonrohddichte mit Hilfe des Behälters zur Messung des Luftporengehalts bestimmt. Dieser erfüllt die notwendigen Kriterien und hat ein Volumen von 8 l.

Zum Verdichten des Betons können Innenrüttler, Rütteltische, Stäbe aus Metall oder Stampfer herangezogen werden. Bei der Anwendung von Rüttlern ist darauf zu achten, dass die künstlich eingeführten Luftporen des Betons nicht durch zu langes Rütteln verloren gehen.

Für die Bestimmung der Frischbetonrohddichte (D) ist zunächst der leere Behälter mit der Masse (m_1) zu wiegen. Das Volumen (V) dieses Behälters ist bekannt. Nach der Befüllung und dem Verdichten ist die Masse des Behälters (m_2) nochmals zu bestimmen. Die Dichte wird nach folgender Gleichung errechnet.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

Das Ergebnis der ermittelten Frischbetonrohddichte ist auf 10 kg/m³ genau im Prüfbericht anzugeben.

3.5 Luftporen

In der Regel enthält Beton im eingebauten und verdichteten Zustand eine geringe Menge an Luft. Die im Beton enthaltene Luft kann für das Erreichen gewünschter Betoneigenschaften auch künstlich verändert werden. Um den Widerstand gegen Frost- und Taumittelangriff zu erhöhen, werden unter der Verwendung von Luftporenbildnern Luftporen erzeugt. Auch die Verarbeitbarkeit des Betons kann durch die künstliche Steigerung des Luftporengehalts verbessert werden. [1]

Prüfverfahren [14]

Die Ermittlung des Luftgehalts ist nach den Ausführungen der ÖNORM EN 12350 Teil 7 und ÖNORM B3303 durchzuführen. In dieser Norm werden zwei Verfahren zur Bestimmung des Luftgehalts beschrieben. Es handelt sich um das Wassersäulenverfahren und das Druckausgleichsverfahren. Beide Verfahren basieren auf dem Gesetz von Boyle-Mariotte. Dieses besagt, dass das Produkt aus dem Druck (p) und dem Volumen (V) eines idealen Gases bei gleich bleibender Temperatur konstant ist. Somit ist die Volumensänderung indirekt proportional zum Druck.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (3.2)$$

Die Bestimmung des Luftgehalts im Beton erfolgt über eine Druckänderung, die sich einstellt, wenn die Luftporen durch den herrschenden Überdruck zusammengepresst werden.

Nachstehend wird die Bestimmung des Luftgehalts unter Verwendung des Druckausgleichsverfahrens genauer beschrieben. Abb. 3.4 zeigt das Prinzip des Druckausgleichsverfahrens.

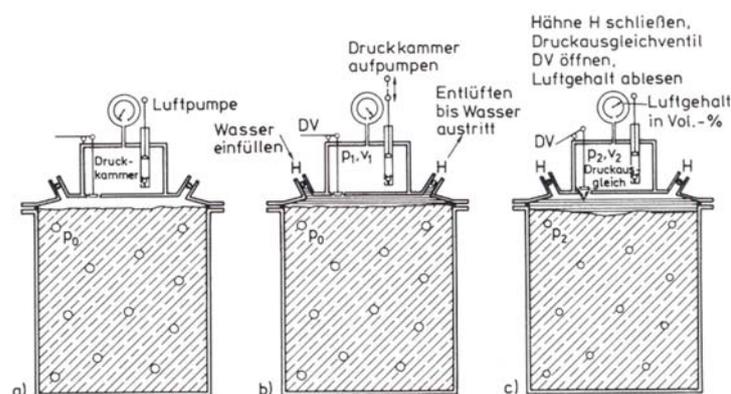


Abb. 3.5 Prinzip des Druckausgleichsverfahrens [1]

Zunächst wird der Frischbeton in einen Behälter mit bekannten Volumen (V_b) eingefüllt und verdichtet. Dabei ist darauf zu achten, dass die vorhandenen erwünschten Luftporen nicht während des Rüttelns ausgetrieben werden. Anschließend wird der Behälter luftdicht verschlossen und der vorhandene Hohlraum zwischen Beton und Deckel vollständig mit Wasser gefüllt. Im aufgesetzten Deckel befindet sich eine Luftkammer mit bekanntem Volumen (V_1), welche über ein Ventil mit dem Behälter verbunden ist. Das Ventil ist zu Versuchsbeginn geschlossen. Zunächst wird über eine Luftpumpe der Ausgangsdruck (p_1) in der Luftkammer hergestellt. Hinterher wird das Ventil zum Behälter geöffnet und die komprimierte Luft strömt unter den Deckel und drückt über das Wasser auf den Beton im Behälter. Dadurch werden die Luftporen im Beton zusammengepresst und im gesamten Behälter samt Deckel stellt sich der Ausgleichsdruck (p_2) ein. [1]

Der Luftgehalt des Betons kann mit Hilfe der folgenden Gleichung errechnet werden.

$$p = \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) \cdot \frac{V_1}{V_b} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Der ermittelte Luftgehalt wird in Prozent des Betonvolumens angegeben. Üblicherweise verfügen die Geräte zur Luftgehaltsbestimmung Manometer, die direkt den Luftgehalt des Betons anzeigen. Die folgende Abbildung 3.6 zeigt einen Luftporentopf zur Bestimmung des Luftgehalts.



Abb. 3.6 Luftporentopf [26]

3.6 Wassergehalt

Der Wassergehalt des Betons ist der wesentlichste Faktor, zur Beeinflussung der Frischbetoneigenschaften. Das Wasser liegt im Frischbeton als freies und wirksames Wasser im Zementleim und als Kornporenwasser im Zuschlag vor. Der Gesamtwassergehalt des Frischbetons kann einfach über den Masseverlust während des Trocknens bestimmt werden. Jedoch ist eine Unterscheidung in Abhängigkeit vom verwendeten Verfahren zwischen Kernfeuchte der Gesteinskörnung und wirksamem Wasser des Frischbetons schwer zu treffen. [1]

Prüfverfahren [10]

Die Wassergehaltsbestimmung im Zuge der Baustellenversuche erfolgte mit dem Mikrowellenverfahren. Mit diesem Verfahren wird der Gesamtwassergehalt, also wirksames Wasser des Frischbetons und Kernfeuchte der Gesteinskörnung ermittelt. Die Bestimmung des Wassergehalts mit dem Mikrowellenverfahren wurde nach den Vorgaben der ÖNORM B 3303 durchgeführt.

Mit einer Waage wird die Masse der Frischbetonprobe vor dem Trocknen in Mikrowellenherd und nach der Trocknung bestimmt. Die erforderlichen Trocknungszeiten der Frischbetonprobe sind aus der Abb. 3.7 zu entnehmen.

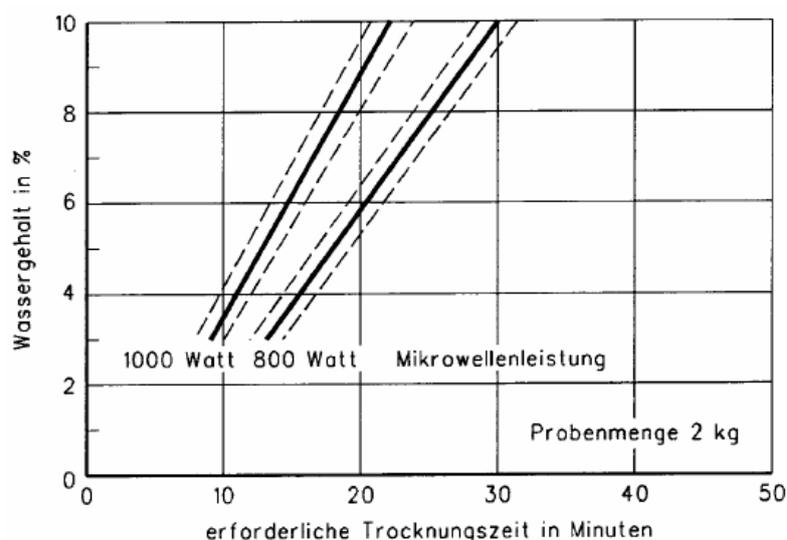


Abb. 3.7 Erforderliche Trocknungszeit [10]

Die Differenz der Masse vor und nach dem Trocknen ist die in der Frischbetonprobe enthaltene Wassermenge. Die Berechnung des Gesamtwassergehalts in % erfolgt nach Gleichung 3.4.

$$W_{\%} = \frac{m_f - t_f - m_{tr} + t_{tr}}{m_{tr} - t_{tr}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

$W_{\%}$...Wassergehalt der Probe in %

W ...Wassergehalt der Probe in l/m^3

m_f ...Masse der eingewogenen Probenmenge und des Probentellers in g vor Prüfbeginn

t_f ... Masse des Probentellers in g vor Prüfbeginn

m_{tr} ...Masse der getrockneten Probenmenge und des Probentellers nach der Trocknung in g

t_{tr} ...Masse des Probentellers nach der Trocknung in g

ρ_{FB} ...Frischbeton-Rohdichte in kg/m^3

Nachdem der Gesamtwassergehalt des Frischbetons in % errechnet wurde, kann mit der Gleichung 3.5 der Gesamtwassergehalt in l/m^3 errechnet werden.

$$W = W_{\%} \cdot \rho_{FB} \quad (3.5)$$

Die Ergebnisse der Wassergehaltsberechnungen sind auf 0,1% bzw. $1l/m^3$ genau im Prüfbericht anzugeben.

4. Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden

4.1 Bohrpfähle

4.1.1 Allgemeines

„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.“ [4]

Bohrpfähle werden als Gründungspfähle zur Ableitung von großen Zug- und Druckkräften in den Baugrund eingesetzt. Ein weiteres Einsatzgebiet von Bohrpfählen bilden Baugrubensicherungen in Form von Bohrpfahlwänden. Bohrpfahlwände können mit aufgelösten, tangierenden oder überschrittenen Pfahlreihen hergestellt werden. Letztere eignen sich für die Anwendung im Grundwasserbereich.

4.1.2 Bohrverfahren

In Abhängigkeit der Förderung des Bodens während des Aushubs wird zwischen kontinuierlicher und diskontinuierlicher Förderung des Bodens unterschieden. Bei der kontinuierlichen Förderung wird der Boden ununterbrochen gelöst und gefördert. Es kommen Bohrschnecken zum Einsatz, deren Länge der erforderlichen Pfahllänge entspricht. Im Gegensatz dazu sind bei der diskontinuierlichen Förderung die Vorgänge des Lösens und der Bodenförderung zeitlich getrennt. Die eingesetzten Bohrwerkzeuge können in drehende und schlagende Werkzeuge unterteilt werden.

Zu den drehenden Bohrwerkzeugen zählen der Bohreimer und die Bohrschnecke. Für die Hohlraumherstellung mittels Bohrschnecke wird diese zunächst in das Bohrloch abgelassen. Im Bohrloch wird der Boden durch die Drehbewegung der Schnecke gelöst. Die Bohrschnecke verfügt nur über eine geringe Anzahl von Gängen und somit über eine beschränkte Förderhöhe. Die Förderung des Aushubmaterials erfolgt durch das Ziehen der Bohrschnecke, sobald diese gefüllt ist. An der Oberfläche wird die Schnecke geleert und anschließend wieder ins Bohrloch abgelassen. Für das Herstellen von Bohrpfählen im Grundwasser wird der Bohreimer zur Förderung des Bodens verwendet. Dieser wird wie die Bohrschnecke ins Bohrloch abgelassen,

durch die Drehbewegung gefüllt und anschließend durch Gegendrehen geschlossen. Hinterher wird der volle Eimer gezogen und an der Oberfläche durch Aufklappen des Bodens geleert. Je Hub können mit diesen Bohrwerkzeugen Bohrfortschritte bis zum 3-fachen des Bohrdurchmessers erreicht werden. [5]

Bei der Bohrlochherstellung mit schlagenden Werkzeugen kommen Seilgreifer zum Einsatz. Die Seilgreifer werden je nach Betriebsform in Einseilgreifer und Zweiseilgreifer unterteilt. Der Bohrgreifer mit Einseilbetrieb wird am Schließmechanismus aufgehängt und im geöffneten Zustand ins Bohrloch fallen gelassen. An der Bohrlochsohle dringt der Greifer in Abhängigkeit der Bodenfestigkeit mehr oder weniger ein. Durch das Ziehen des Greifers werden die Schalen geschlossen und das Aushubmaterial an die Oberfläche gefördert. Beim Bohrgreifer mit Zweiseilbetrieb wird das erste Seil am Schließmechanismus und das zweite Seil am Greifergehänge befestigt. Der Greifer wird wie im Einseilbetrieb ins Bohrloch fallen gelassen. Anschließend wird der Greifer mit dem ersten Seil geschlossen und mit dem zweiten am Gehänge befestigten Seil gezogen. Während des Ziehens kann der Greifer wieder geöffnet und nochmals fallen gelassen werden. Durch diesen Vorgang kann mehr Boden an der Bohrlochsohle gelöst werden und eine bessere Ausnutzung der Greiferfüllung erreicht werden. Mit Seilgreifern werden Bohrfortschritte mit etwa einem Drittel des Bohrdurchmessers pro Hub erzielt. [5]

Für das Durchrörtern von harten Bodenschichten werden anstatt der Greifer Meißel eingesetzt. Diese Meißel werden im Bohrloch fallen gelassen und zertrümmern durch den Aufprall das anstehende Gestein. Ist ausreichend Material zertrümmert, wird der Greifer zur Förderung dieses Materials verwendet. Durch den andauernden Wechsel des Bohrwerkzeugs und den enormen Aufwand beim Lösen des Bodens werden nur geringe Bohrfortschritte erzielt.

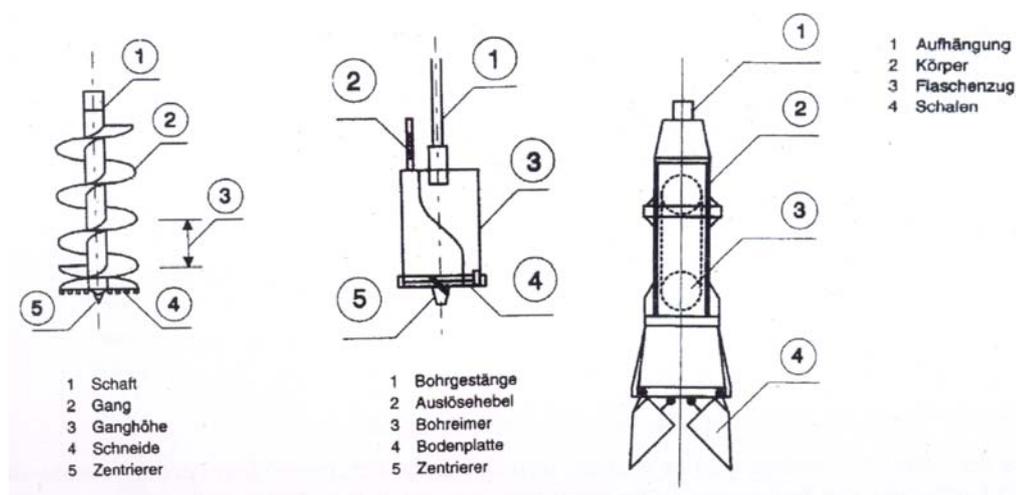


Abb. 4.1 Bohrwerkzeuge: Bohrschnecke, Bohreimer u. Greifer [5]

Das Bohrloch muss während des Aushubs bis zum Einbringen des Betons gestützt werden. Das Stützen der Bohrlochwand kann über Bohrröhre, Stützflüssigkeiten oder Endlosschnecken erfolgen.

4.1.3 Verrohrte Bohrung

Bei der Herstellung einer verrohrten Bohrung erfolgt das Stützen der Bohrlochwand über Bohrröhre. Diese werden dem Aushub vorausgehend über eine hydraulische Verrohrungsmaschine (Abb.4.2) oder über einen Drehmotor am Mäkler in den Boden eingebracht. Die Verrohrung besteht aus einzelnen Rohrschüssen, die während der Pfahlherstellung aneinander gekoppelt werden. Die Verbindung der Rohrschüsse ist sehr sorgfältig auszuführen, da über diese Verbindungen große Zug- und Druckkräfte bzw. Drehmomente übertragen werden. Reißt die Verrohrung an einen der Verbindungsstellen während des Einbringens oder Ziehens ab, so sind diese in den meisten Fällen verloren, was einen enormen Kostenaufwand bedingt.

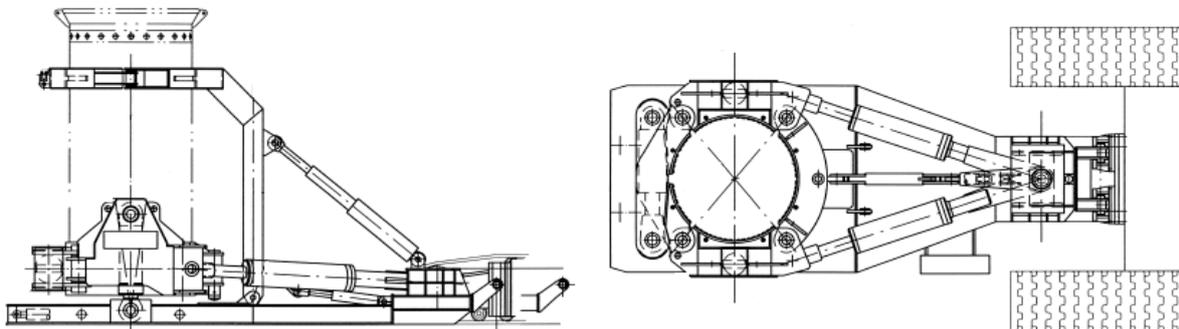


Abb. 4.2 Hydraulische Verrohrungsmaschine: Ansicht / Grundriss [Leffer Produktkatalog]

Für das leichtere Einbringen der Verrohrung befindet sich am unteren Ende ein Schneidschuh, welcher mit Schneidzähnen besetzt ist. Der Schneidschuh (Abb.4.3) hat einen etwas größeren Außendurchmesser als die Bohrröhre und erzeugt dadurch einen Hohlraum. Durch diesen Hohlraum wird die Reibung zwischen Bohrrohr und Bohrlochwand verringert, wodurch sich die Verrohrung leichter einbringen lässt.

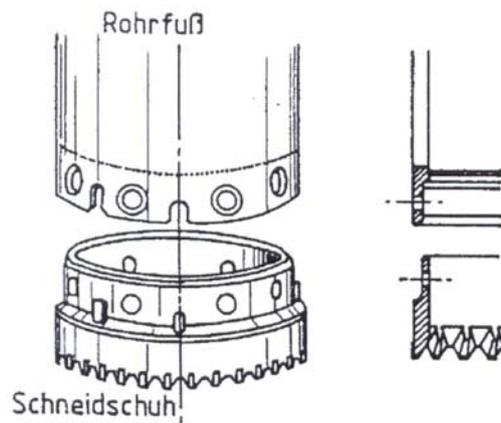


Abb. 4.3 Bohrrrohr [5]

Wird das Bohrloch im Grundwasser hergestellt, ist auf das Vorseilen des Bohrrohrs besonders zu achten. Ein zu gering vorseilendes Bohrrrohr kann dazu führen, dass die Bohrlochsohle aufreist und Material ins Bohrloch dringt. Reicht das Vorseilen der Verrohrung nicht aus, muss die Bohrlochsohle zusätzlich in Form einer Wasserauflast gestützt werden. Dabei wird Wasser bis zum Erreichen des Grundwasserspiegels in das Bohrrrohr gefüllt. Dadurch ist der Druckunterschied ausgeglichen und ein Aufbrechen der Bohrlochsohle wird verhindert. Beim Auftreten von gespanntem Grundwasser knapp unterhalb der Geländeoberkante kann es vorkommen, dass die Verrohrung samt Wasserauflast über das Gelände hochgezogen werden muss, um einen Druckausgleich herzustellen. [5]

Der Aushub des Bohrlochs kann bei der verrohrten Bohrung über Greifer- oder Drehwerkzeuge erfolgen. Abb. 4.4 zeigt die Pfahlherstellung mit Greiferbohrung und Verrohrungsmaschine, sowie die Pfahlherstellung unter Verwendung eines Drehbohrgeräts.



Abb. 4.4 Greiferbohrung / Drehbohrung [Grund-, Pfahl- und Sonderbau Archiv]

Nachdem die Bohrung hergestellt wurde, wird die Bewehrung in das Bohrloch eingebaut. Dabei dient beim Greiferverfahren der Ausleger des Arbeitsgeräts als Hubeinrichtung. Beim Drehbohrverfahren wird die Bewehrung über Hilfswinden am Mäkler eingebracht. Der anschließende Betoniervorgang erfolgt im Kontraktorverfahren. Dabei wird der Beton mit einem Schüttrohr eingebracht. Das untere Ende des Schüttrohres muss über die gesamte Dauer des Betoniervorgangs mindestens einen Meter in den eingebrachten Beton reichen, damit eine Entmischung des Betons im Pfahl vermieden werden kann. Der Betoniervorgang an sich erfolgt zügig. So werden für den Einbau einer Transportwagenfüllung von rund 8 m³ oft weniger als 15 Minuten benötigt. Diese kurzen Betonierzeiten stellen für die Durchführung von Frischbetonprüfungen schwierige Rahmenbedingungen dar. Im folgenden Kapitel 5 wird auf diese Problematik genauer eingegangen.

Nachdem die Bewehrung im Bohrloch eingebaut ist, werden die Bohrröhre während des Betoniervorgangs kontinuierlich gezogen und für die Herstellung des nächsten Bohrlochs vorbereitet.

Eine weitere Form der verrohrten Bohrung ist die Drehbohrung mit Doppelkopf. Dieses Verfahren eignet sich besonders für die Pfahlherstellung in unmittelbarer Nähe zu bestehenden Gebäuden. Beim so genannten „Vor der Wand“ (VDW)- Verfahren erfolgt das Herstellen der Bohrung mit einer Endlosschnecke, welche von einem gegenläufigen Bohrrohr umgeben ist. Nachdem die gewünschte Bohrtiefe erreicht wurde, wird die Schnecke samt Bohrrohr gezogen. Über das Seelenrohr der Schnecke wird während des Ziehens Beton in das Bohrloch gepumpt. Ist der Pfahl bis zur Geländeoberkante ausbetoniert, kann die Bewehrung eingedrückt oder eingerüttelt werden. Mit dem VDW- Verfahren sind Bohrtiefen bis etwa 20 Meter möglich.

4.1.4 Flüssigkeitsgestützte Bohrung

Mit zunehmender Pfahltiefe (> 50 m) und großen Durchmessern (>1,5m) steigt der Aufwand für das Einbringen der Verrohrung stark an. Ist das Stützen der Bohrlochwand mit der Verrohrung nicht mehr möglich, kommen Stützflüssigkeiten zum Einsatz. Je nach Anforderung werden Wasser, Bentonitsuspensionen oder Polymerlösungen als Stützmedium verwendet. [5]

4.1.5 Bohrung mit durchgehender Bohrschnecke

Bei kleinen Durchmessern und kleinen Bohrtiefen (< 20 m) kann mit durchgehender Bohrschnecke gearbeitet werden. Bei der Herstellung des so genannten Schneckenortbetonpfahls SOB (Abb.4.5) wird der Boden kontinuierlich über die gesamte Länge der Schnecke gefördert. Die Stützung des Bohrlochs erfolgt über die mit Bohrgut gefüllte Schnecke. Dieses Verfahren kann in allen Bodenarten außer in Fels und Blockwerk eingesetzt werden. Auch das Bohren im Grundwasser ist mit durchgehender Schnecke möglich. Nachdem die gewünschte Bohrtiefe erreicht wurde, wird die Schnecke gezogen. Während des Ziehens wird durch das Seelenrohr der Schnecke Beton in das Bohrloch gepumpt. Ist die Schnecke vollständig gezogen und das Bohrloch bis zur Oberfläche ausbetoniert, kann die Bewehrung eingebracht werden. Das Eindrücken oder Einrütteln der Bewehrung erfolgt mit Vibrationsbären.



Abb. 4.5 Schneckenortbetonpfahl SOB [Grund-, Pfahl- und Sonderbau Archiv]

Das System des Schneckenortbetonpfahls stellt eine sehr wirtschaftliche Form der Pfahlherstellung dar. In Abhängigkeit des anstehenden Bodens und der Betonlieferung ist die Herstellung von bis zu 150 Metern Bohrpfahl in einer 10 Arbeitsstunden umfassenden Schicht möglich. Der große Nachteil der Schneckenortbetonpfähle ist, dass jeder Pfahl bis an die Geländeoberkante ausbetoniert werden muss, da der Beton anstatt der gezogenen Schnecke die Stützfunktion der Bohrlochwand übernimmt.

4.2 Schlitzwände

4.2.1 Allgemeines

„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.“ [4]

Schlitzwände werden vorwiegend zur Baugrubensicherung von großen innerstädtischen Baugruben eingesetzt. Im Vergleich zur tangierenden Bohrpfahlwand hat das System der Schlitzwand als Baugrubensicherung im Grundwasserbereich aufgrund der geringeren Anzahl von Arbeitsfugen Vorteile. Ein weiteres Einsatzgebiet von Schlitzwänden bilden reine Dichtwände ohne statische Funktion.

4.2.2 Schlitzaushub

Bevor mit dem Schlitzaushub begonnen werden kann, ist ein Voraushub samt Leitwand herzustellen. Die Leitwand ist eine gering bewehrte Stahlbetonwand mit einer Höhe von rund 1,5 m und einer Wandstärke von 20 – 30 cm. Sie dient während des nachfolgenden Schlitzaushubs den Aushubwerkzeugen zur Führung. Des Weiteren übernimmt die Leitwand die Stützfunktion für den oberflächennahen Bereich, da der hydrostatische Druck der Stützflüssigkeit für das Erfüllen der Stützfunktion nicht ausreicht und der Spiegel der Stützflüssigkeit durch das Ein- und Ausfahren der Aushubwerkzeuge stark schwankt.

Für den Aushub des Schlitzes können Greifer oder Fräser verwendet werden. Beim Greiferverfahren wird der Seilgreifer zunächst in den Schlitz abgelassen. An der Aushubsohle wird das Aushubmaterial durch das Eigengewicht des Greifers und die schließenden Greiferschalen gelöst. Mit geschlossenen Schalen wird der Greifer samt Aushub an die Oberfläche befördert. Das Schließen der Greiferschalen kann je nach System hydraulisch oder mechanisch über Seile erfolgen. [5] Abb. 4.6 zeigt seilbetriebene Schlitzwandgreifer.



Abb. 4.6 Schlitzwand- Seilgreifer [Grund-, Pfahl- und Sonderbau Archiv]

Bei der Schlitzwandfräse erfolgt das Lösen des Bodens im Schlitz durch Schneidräder. Diese werden entweder hydraulisch oder elektrisch angetrieben. Das Aushubmaterial wird über die Stützflüssigkeit gefördert. Durch diese Arbeitsweise sind Schlitz mit einer Tiefe von bis zu 150 Metern möglich. Im Vergleich zum Seilgreifer hat die Schlitzwandfräse den Vorteil, dass auch beim Durchrörtern harter Bodenschichten hohe Leistungen erzielt werden können. Weitere Vorteile der Schlitzwandfräse sind das nahezu erschütterungsfreie Arbeiten und die höhere Genauigkeit des hergestellten Schlitzes. [5]

4.2.3 Stützflüssigkeiten

Das Stützen der offenen Schlitz erfolgt durch Stützflüssigkeiten. Bei der Schlitzwandherstellung kommen Bentonitsuspensionen, Bentonit-Zementsuspensionen und Polymerflüssigkeiten zum Einsatz. Die Bentonit-Zementsuspensionen werden nur im Einphasenverfahren zur Herstellung von Dichtwänden ohne statische Anforderungen herangezogen.

Die Schlitzwandsuspension muss nach 3- bis 4-maligem Gebrauch gegen eine frische Suspension ausgetauscht werden. Die mehrfach gebrauchte Suspension verliert durch Feinteilanreicherungen ihre Stützfunktion und ist zu entsorgen. Während der Schlitzwandherstellung muss der Zustand der verwendeten Suspension laufend überprüft werden. Es werden Dichte, Sandgehalt, Fließgrenze und pH-Wert zur Bestimmung des Zustands gemessen. Der Sandgehalt der Suspension kann über eine Aufbereitungsanlage während des Aushubs reduziert werden. Meist wird für den Betoniervorgang die aufbereitete Suspension gegen eine frische ausgetauscht, um die Qualität der Schlitzwand zu verbessern. [5]

4.2.4 Abschalsysteme

Die Schlitzwand wird für die Herstellung in einzelne Elemente aufgeteilt. Diese Schlitzwandelemente sind üblicherweise zwischen 2,8 und 8 Meter breit. Um eine hohe Dichtigkeit der gesamten Schlitzwand zu erreichen, wird versucht, den Sickerweg der einzelnen Arbeitsfugen zwischen den Elementen möglichst groß zu gestalten. Aus diesem Grund werden vor dem Betoniervorgang jeweils am seitlichen Ende eines Elements Abschalelemente eingebaut. Als Abschalelement kommen Fugenrohre, Fugenfertigteile und Fugenbandelemente zum Einsatz. [5] Eine Schwierigkeit beim Arbeiten mit Abschalelementen besteht darin, dass diese nach dem Ansteifen des Betons wieder gezogen werden müssen. Wird das Abschalelement zu früh gezogen, kann sich die ausgebildete Fuge verformen. Erfolgt das Ziehen zu spät, bleibt das Abschalelement stecken, worauf es einbetoniert werden muss. Dies verursacht zusätzlichen Arbeitsaufwand und Kosten.

4.2.5 Betoniervorgang

Nachdem das Schlitzwandelement bis zur gewünschten Tiefe ausgehoben ist und das Abschalelement eingesetzt wurde, kann der Bewehrungskorb eingebaut werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Bewehrungskorb einen entsprechenden Abstand zur Aushubwand beibehält, damit die erforderliche Betonüberdeckung eingehalten werden kann. Das Ausbetonieren des Schlitzwandelements erfolgt wie bei der Bohrpfahlherstellung im Kontraktorverfahren. Dabei wird der Beton durch ein Schüttrohr eingebracht. Während des Betonierens ist laufend die Stützsuspension abzupumpen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Flüssigkeitspegel nicht unter die Leitwandunterkante sinkt bzw. die Suspension nicht überläuft. In Abb.4.8 sind die Arbeitsschritte der Schlitzwandherstellung graphisch dargestellt.

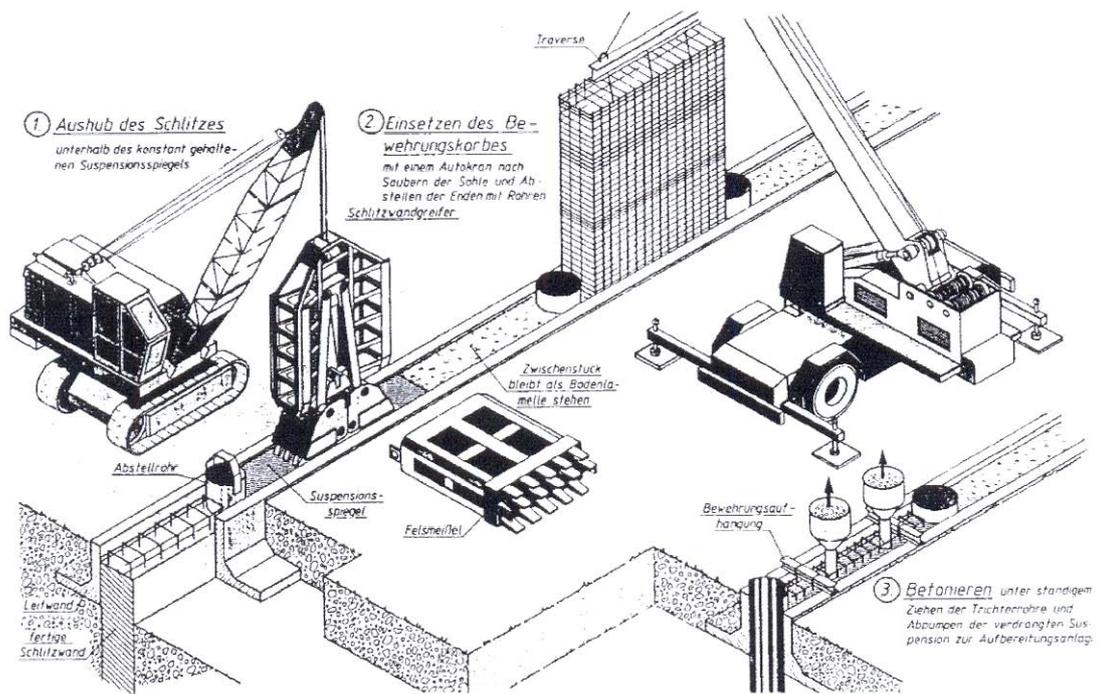


Abb. 4.7 Schlitzwandherstellung [5]

5. Wasserabgabe unter Druck – Bluten

5.1 Bluten von Beton

5.1.1 Definition

„Als Bluten wird das Abstoßen oder Absondern von Wasser eines fertig gemischten, eingebrachten und verdichteten Mörtels oder Betons bezeichnet. Das Phänomen Bluten tritt während oder nach der Verarbeitung eines Mörtels oder Betons auf und dauert bis zum Beginn des Erstarrungs- bzw. Erhärtungsprozesses an.“ [24]

5.1.2 Erscheinungsbild des Blutens von Beton

Durch die Absonderung von Wasser in Form von Bluten treten unterschiedliche Schadensbilder auf. Diese Schadensbilder können in 3 Gruppen unterteilt werden:

Freilegen der Bewehrung

In den meisten Fällen steigt das durch das Bluten ausgepresste Wasser an der Bauteiloberfläche aufgrund des Dichteunterschieds auf. An der Bauteiloberfläche bilden sich bei starkem Bluten Wasserkanäle. Durch das Ausbilden der Wasserkanäle wird die für den Korrosionsschutz notwendige Betonüberdeckung reduziert. Im Extremfall kann die Bewehrung vollständig freigelegt werden. Um die langfristige Tragfähigkeit dieser Bauteile zu gewährleisten, müssen diese saniert werden. Die Sanierung der Bauteile kann nach dem Freilegen der luftzugewandten Seite relativ einfach erfolgen. Die Schadstellen an der Erdseite des Bauteils können nur unter enormem Aufwand festgestellt und anschließend durch Injektionen saniert werden. [2], [3]

Optische Mängel

Wie zuvor beschrieben können sich an der Bauteiloberfläche Wasserkanäle ausbilden. Werden diese Bauteile anschließend freigelegt, kommen diese Erscheinungen zum Vorschein. Bei Bohrpfahlwänden oder Schlitzwänden, die eine Außenwand einer Tiefgarage bilden, stellen die Wasserkanäle einen Qualitätsverlust dar. Daher müssen diese Mängel saniert werden. [2], [20]

Nachsackungen der Betonoberfläche

Durch das Auspressen von Wasser kommt es im Bauteil zu einer Reduktion des Betonvolumens. Aufgrund der Volumenreduktion wird die Oberfläche des Bauteils nach unten verschoben. Nachdem die oberste verunreinigte Schicht abgeschrämt wird, liegt auf der Sollhöhe des Bauteils noch kein qualitativ ausreichender Beton vor. Dadurch muss der Beton an der Oberfläche weiter abgeschrämt werden, bis Beton mit entsprechender Qualität vorliegt. Die Differenz bis zur Sollhöhe muss anschließend wieder nachbetoniert werden. Bei Bohrpfählen erfolgen die Nachsackungen in der Regel innerhalb der Bewehrung. Diese Erscheinungen werden als Bohrpfählkaries bezeichnet. [2]

Die Auswirkungen der Wasserabsonderungen stellen oft erhebliche Mängel dar, die aufwendig und somit auch kostenintensiv zu sanieren sind. Die folgenden Abb. 5.1- 5.3 zeigen die zuvor beschriebenen Schadensfälle an Bohrpfählen und Schlitzwänden.



Abb. 5.1 Bohrpfählkaries [BPV- Archiv]



Abb. 5.2 Freilegen der Bewehrung [BPV- Archiv]



Abb. 5.3 Geschädigtes Schlitzwandelement [BPV- Archiv]

5.1.3 Einflüsse auf das Betonbluten

Für die Hydratation des Zements im Beton wird etwa ein Viertel der Zugabewassermenge benötigt. Der restliche Anteil des zugegebenen Wassers dient der besseren Verarbeitbarkeit. Die nicht für die Hydratation benötigte Wassermenge wird über Adhäsion an der Oberfläche der festen Bestandteile gebunden oder liegt frei im Porenraum vor. Um das Wasserrückhaltevermögen des Betons zu erhöhen, ist es erforderlich, die Oberfläche der festen Bestandteile des Betons zu maximieren. Den größten Oberflächenanteil der festen Bestandteile liefern das Bindemittel, der Zusatzstoff (falls vorhanden) und der Mehlkorngelhalt (<0,125 mm) der Gesteinskörnung. [2],[3],[16]

Packungsdichte der festen Bestandteile

Die Packungsdichte der festen Bestandteile des Betons spielt für die Verringerung des Blutens eine wesentliche Rolle. Je dichter die festen Bestandteile gepackt sind, desto weniger Porenraum steht für das Zugabewasser zur Verfügung, das durch den Druck des überlagernden Betons ausgepresst wird. Zur Verringerung des Blutens ist es erforderlich, eine Sieblinie der festen Bestandteile zu finden, die eine möglichst hohe Packungsdichte ergibt. Der Mehlkorngelhalt ist in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung, da diese Körner den Porenraum zwischen den größeren Körnern ausfüllen. [2],[17]

Im Zuge der Bestrebungen, eine möglichst hohe Packungsdichte zu erreichen, entwickelten Fuller und Thomson Anfang des 20. Jahrhunderts die so genannte Fullerparabel. Diese beschreibt eine stetig verlaufende Sieblinie, die mit Körnern in Form einer Kugel eine Packungsdichte von 90% erreicht.

Die Packungsdichte wird nicht allein durch die Kornverteilung, sondern auch durch die Kornform beeinflusst. Die Kornform wird über den Kornindex beschrieben.

Kornindex = L / E

L... Kornlänge (maximale Kornabmessung)

E... Korndicke (90° Projektion der maximalen Kornabmessung)

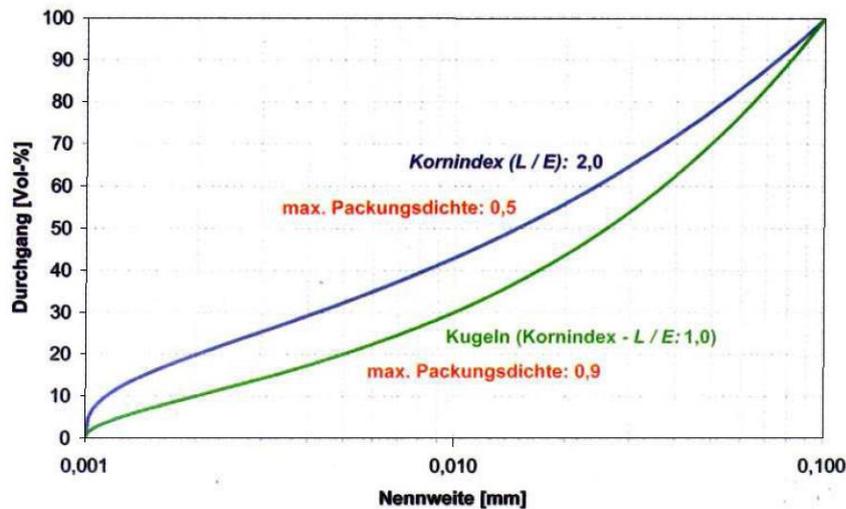


Abb. 5.4 Vergleich der erforderlichen Kornverteilung für höchstmögliche Packungsdichte [22]

Die Abb.5.4 zeigt, dass für das Erreichen einer möglichst großen Packungsdichte bei unregelmäßigen Körnern der erforderliche Gehalt an Feinteilen wesentlich größer ist als bei ideal runden Körnern. [22]

Mehlkorngehalt

Für die Verringerung des Blutens stellt der Mehlkorngehalt einen der wichtigsten Parameter dar. Ein Teil des nicht für die Hydratation erforderlichen Wassers kann über Adhäsion an die Körner gebunden werden. Des Weiteren ist für das Erreichen einer möglichst großen Packungsdichte ein hoher Mehlkorngehalt erforderlich. Dieser ist auf die Sieblinie der gesamten Gesteinskörnung abzustimmen. Ein zu hoher Mehlkorngehalt führt bei gleicher Konsistenz zu erhöhtem Wasserbedarf, was sich ungünstig auf die Stabilität des Betons und das Bluten auswirkt.

In der ÖNORM B 4710 Teil 1 sind empfohlene Mehlkorngehalte in Abhängigkeit des Größtkorns angeführt. Diese sind für den Bereich des Spezialtiefbaus als zu gering einzustufen. Deshalb sind nach der Richtlinie Bohrpfähle höhere Mindestmehlkorngehalte in Abhängigkeit des Größtkorns vorgesehen (Tab.5.1).

Tab. 5.1 Mehlkorngelalte nach ÖNORM B 4710-1 und Bohrfahrlichtlinie

ÖNORM B4710 Teil1		Bohrfahrlichtlinie	
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

Mahlfeinheit des Zements

Die Mahlfeinheit des Zements wird durch den Blaine- Wert beschrieben. Dabei handelt es sich um die spezifische Oberfläche, ausgedrückt in cm²/g. Je höher der Blaine Wert des Zements, desto mehr Oberfläche steht für die Bindung des Wassers zur Verfügung. Grundsätzlich gilt, dass die Festigkeit des Zements mit höherer Mahlfeinheit zunimmt. Somit bewirkt eine höhere Festigkeitsklasse des Zements eine Verringerung des Blutens. [2]

Boden

Der Boden ist im Zusammenhang mit Bluterscheinungen in bindige und nichtbindige Böden zu unterteilen. Bei bindigen Böden kann das ausgepresste Wasser aufgrund der geringen Durchlässigkeit nicht seitlich in den Baugrund abgegeben werden. Infolge des Dichteunterschieds steigt das Wasser entlang der Bauteilgrenze, der Bewehrung oder in gebildeten Wasserkanälen auf. Liegt der gesamte Bauteil in bindigem Boden, kann das ausgepresste Wasser im Extremfall bis an die Oberfläche aufsteigen und Schäden am Bauteil verursachen (siehe 5.1.1). Bei Wechsellagerungen von bindigen und nichtbindigen Böden steigt das ausgepresste Wasser bis zur nichtbindigen Schicht auf und entweicht aufgrund der großen Durchlässigkeit dieser Böden in den Baugrund. Grundsätzlich gilt, dass die Auswirkungen des Blutens bei nichtbindigen Böden weniger problematisch sind als bei bindigen Böden. [3]

Frischbetondruck

Im Hochbau werden weitgehend nur Bauteile mit geringen Höhen von wenigen Metern hergestellt. Die dafür erforderliche Schalungsdimensionierung geht von einer bilinearen Druckverteilung aus. Dabei nimmt der Druck bis zu einer Grenztiefe zu und bleibt danach konstant. Die Ermittlung der Grenztiefe erfolgt anhand der Frischbetonkonsistenz und der Betoniergeschwindigkeit. Im Vergleich zum Hochbau herrschen im Spezialtiefbau andere Rahmenbedingungen zur Bestimmung des Frischbetondrucks. Die Betoniergeschwindigkeit bei der Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden ist höher als jene im Hochbau. Des Weiteren sind Bauteilhöhen von mehr als 30 Metern im Spezialtiefbau keine Seltenheit. Daraus resultieren im Allgemeinen größere Frischbetondrücke als im Hochbau. [2]

Gerhard Gruber konnte im Rahmen einer Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien bei der Bohrpfählherstellung Frischbetondrücke von über 7 bar in einer Tiefe von 32,5 m nachweisen. Dies entspricht beinahe dem hydrostatischen Druck von Frischbeton mit einer Wichte von ca. 24 kN/m³.

Neben der Bauteilhöhe hängt der Frischbetondruck von der Betonkonsistenz ab. Der Frischbetondruck wird umso größer, je weicher die Konsistenz des Betons ist. Geringe Abweichungen der Konsistenz haben bereits enormen Einfluss auf die Größe des Frischbetondrucks.

Des Weiteren ist der Frischbetondruck von der Betoniergeschwindigkeit bzw. der Steiggeschwindigkeit abhängig. Je schneller der Betonspiegel ansteigt, desto höher ist der Bereich, in dem sich der Frischbetondruck ausbilden kann. Wird die Anfangserhärtung des Betons verzögert, kann sich beinahe der volle hydrostatische Druck des Frischbetons einstellen. Dieser stellt die Obergrenze des maximal möglichen Frischbetondrucks dar. [3]

Die Berechnung des Frischbetondrucks kann mittels Erddrucktheorie erfolgen. Für diese Berechnung sind die Reibungswinkel des Frischbetons in Abhängigkeit der Konsistenz und des Erstarrungszustands zu ermitteln.

5.2 Verfahren zur Bestimmung des Blutens von Beton

5.2.1 Ermittlung des Blutens gemäß ÖNORM B 3303 [10]

Für die Durchführung des Versuchs werden folgende Geräte benötigt:

- Stahlzylinder: Innendurchmesser 250 (± 10)mm, Höhe 280 (± 10)mm
- Waage (Genauigkeit 0,1% der Gesamtmasse)
- Pipette
- Messzylinder
- Stoppuhr
- Schaufel
- Glättkelle
- Abdeckplatte

Der Stahlzylinder wird mit einer Probe des zu prüfenden Betons bis zu einer Höhe von 250 (± 10)mm gefüllt und verdichtet. Anschließend wird die Oberfläche der Betonprobe geglättet und die Masse der Probe ohne Stahlzylinder bestimmt. Danach wird der Stahlzylinder mit der Abdeckplatte verschlossen, um einen Wasserverlust durch Verdunstung zu vermeiden. Die Abdeckplatte darf nur zur Entnahme des angesammelten Wassers abgenommen werden. Die Entnahme erfolgt in den ersten 40 Minuten im 10- Minuten- Intervall, anschließend im 30- Minuten- Intervall bis das Bluten beendet ist. Das zu jedem Zeitpunkt entnommene Wasser ist in einem Messzylinder zu sammeln und die Menge zu vermerken. Zur Erleichterung der Wasserentnahme darf der Stahlzylinder 2 Minuten vor der Entnahme leicht schräg gestellt werden. Dazu wird ein Block mit einer maximalen Höhe von 50 mm auf einer Seite unter den Zylinder geschoben.

Das Versuchsergebnis wird folgendermaßen errechnet:

$$B_w = (m_w / m_{FB}) \cdot \rho_{FB} \quad (5.1)$$

m_{FB} ... Masse des Frischbetons im Zylinder

m_w ... Masse des abgesonderten Wassers des Frischbetons in kg

ρ_{FB} ... Frischbeton-Rohdichte aus der Frischbetonprüfung in kg/m^3

B_w ... Masse des abgesonderten Wassers in kg je m^3 Frischbeton

5.2.2 Ermittlung des Blutens nach Josserand und de Larrard [18]

Josserand und de Larrard entwickelten 2004 ein Verfahren zu Ermittlung des Blutens, das große Ähnlichkeiten mit dem Verfahren der ÖNORM B 3303 besitzt. Für die Versuchsdurchführung werden folgende Geräte benötigt:

- Stahlzylinder
- Zwei Waagen
- Pipette
- Stahllineal
- Stoppuhr
- Dämmplatte
- Spachtel zum Kerbenziehen

Der Stahlzylinder wird mit einer Probe des zu prüfenden Betons bis knapp unter die Oberkante gefüllt und verdichtet. Anschließend wird der gefüllte Stahlzylinder auf eine Waage gestellt. Zwischen Waage und Stahlzylinder wird eine Dämmplatte eingelegt, um Erschütterungen zu vermeiden. In die horizontal glatt gestrichene Oberfläche werden mit einer Spachtel zwei Kerben gezogen. Der tiefste Punkt der Kerben liegt in der Mitte des Zylinders und stellt den Schnittpunkt der beiden Kerben dar. Das aufsteigende Wasser sammelt sich in den Kerben und kann mit der Pipette abgezogen werden. Das abgezogene Wasser wird in einer Schale, die auf der zweiten Waage platziert ist, über die Versuchsdauer gesammelt. Durch das Wiegen beider Behälter kann die während des Versuchs verdunstete Wassermenge ermittelt und berücksichtigt werden. Es wird die gesamte Wassermenge in der Schale gesammelt, bis das Bluten beendet ist.

Das Versuchsergebnis bilden die errechnete maximale Blutraten in mm pro min sowie die Gesamtwassermenge ausgedrückt in mm.

Josserand und de Larrard versuchten im Zuge ihrer Forschungsarbeit ein Modell zur Beschreibung des Blutens zu entwickeln. Die Konsolidationstheorie der Bodenmechanik bildet dabei den Kern des Modells. Es wird versucht, das Bluten des Betons als Konsolidationsprozess zu beschreiben. Auch das Ansteifen des Betons während der Versuchsdurchführung wird in der Modellierung berücksichtigt. Des Weiteren werden der Transport von Feinteilen innerhalb der Betonstruktur und der Temperatureinfluss erfasst. Für das Auffinden der Parameter des sehr komplex aufgebauten Modells müssen weitere Versuche durchgeführt werden.

5.2.3 Ermittlung des Blutens nach Sawaide [19]

In einzelnen Betrachtungsweisen wird das Bluten des Betons in zwei zum Teil parallel ablaufende Vorgänge unterteilt. Dabei wird zwischen „normalem Bluten“ und „kanalisiertem Bluten“ unterschieden. Das normale Bluten beschreibt die Absonderung von Wasser an der Oberfläche ohne Transport von Feinteilen. Unter kanalisiertem Bluten ist der Transport von Wasser und Feinteilen an die Oberfläche zu verstehen. Dieser Transport erfolgt in ausgebildeten Kanälen.

Das Verfahren nach Sawaide wurde in Frankreich eingesetzt um die Stabilität von Pumpbeton zu überprüfen und in weiterer Folge Verstopfungen in den Pumpleitungen zu vermeiden. Dazu wird eine Probe des zu prüfenden Betons in einen Zylinder gefüllt und verdichtet. Nachdem der Zylinder vollständig gefüllt ist, wird der Messkopf aufgesetzt. Dieser Messkopf besteht aus einem oben und unten offenen Messzylinder und einem darunter liegenden Hohlraum. Dieser Hohlraum wird mit einer Flüssigkeit gefüllt, die schwerer ist als Wasser. Dadurch steigt das durch das Bluten abgesonderte Wasser über die Flüssigkeit hoch bis in den Messzylinder. Im Messzylinder wird die gesamte Wassermenge gesammelt, bis das Bluten beendet ist.

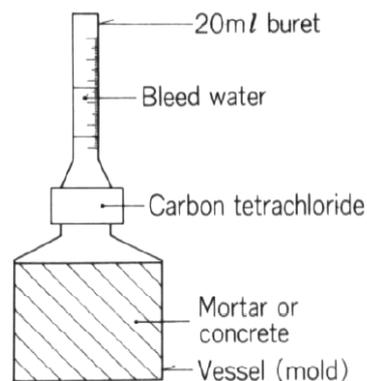


Abb. 5.5 Messverfahren nach Sawaide [18]

Mit dem Verfahren nach Sawaide wird im Messzylinder nur die tatsächlich abgegebene Wassermenge ohne Feinteile gemessen. Eine Unterscheidung, ob normales Bluten oder kanalisiertes Bluten vorliegt, kann nur näherungsweise über den zeitlichen Verlauf der Wasserabsonderung getroffen werden.

5.2.4 Ermittlung des Blutens mit der Betonfilterpresse BPV

Die Ermittlung des Blutens von Beton unter Druck gemäß ÖNORM EN 480-4 ist ein für den Hochbau bestimmtes Prüfverfahren. Dabei wird die Wasserabsonderung an der Oberfläche des Frischbetons bestimmt. Da im Spezialtiefbau größere Frischbetondrücke auftreten und Beton mit weicher Konsistenz verwendet wird, hat die Bautechnische Prüf- und Versuchsanstalt in Himberg bei Wien eine Betonfilterpresse speziell für den Einsatz im Spezialtiefbau entwickelt. Die Betonfilterpresse BPV kann sowohl im Labor als auch auf Baustellen eingesetzt werden. [15]

Die Filterpresse besteht aus einem druckdichten Stahltopf mit einem Volumen von 10 Litern. Über einen Anschluss am Deckel wird Druckluft in den Stahltopf gepresst. Mit Hilfe eines Manometers wird über die Versuchsdauer von 60 Minuten ein konstanter Druck von 3 bar eingestellt. Aus Sicherheitsgründen ist ein Überdruckventil am Deckel installiert. An der Topfunterseite befindet sich eine Öffnung, durch die das aus dem Beton ausgepresste Wasser entweichen kann. Die ausgepresste Wassermenge wird über den Versuchszeitraum in einem Messzylinder gesammelt. [3]

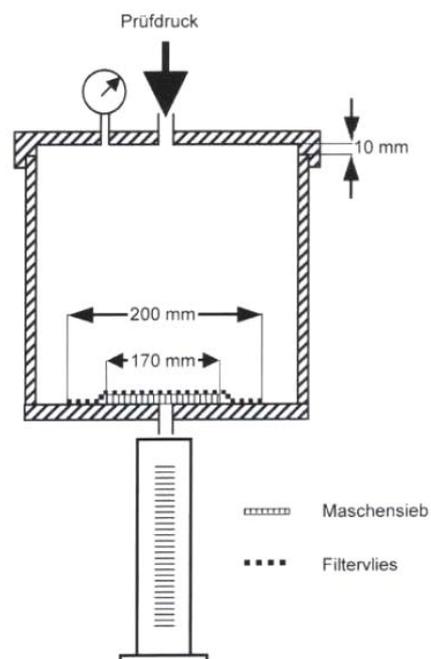


Abb. 5.6 Betonfilterpresse BPV

Versuchsdurchführung

Für die Durchführung des Auspressversuchs werden folgende Geräte benötigt:

- Filterpresse
- Stützsieb Ø 170mm
- Filtervlies Ø 200mm
- Messzylinder (Volumen: 1000ml)
- Stoppuhr
- Schaufel
- Stahllineal
- Verdichtungsholz
- Wasserwaage
- Kompressor (mind. 3,5 bar)

Die Betonfilterpresse wird mit Hilfe einer Wasserwaage und den verstellbaren Standbeinen horizontal aufgestellt. Anschließend werden das Stützsieb und das Filtervlies zentrisch über die Öffnung am Boden gelegt. Nachdem der Messzylinder unter die Öffnung gestellt wurde kann mit dem händischen Einbau der zu prüfenden Frischbetonprobe begonnen werden. Der Topf wird bis zur Oberkante mit Beton befüllt und mit dem Verdichtungsholz verdichtet. Danach wird der Beton bündig an der Oberkante mit einem Stahllineal abgezogen. Bevor der Deckel aufgesetzt wird, ist der obere Rand des Topfs zu reinigen, um einen luftdichten Verschluss zu gewährleisten. Die Vorbereitungsarbeiten werden mit dem Festziehen der drei Verschlusschrauben und der Herstellung der Verbindung zwischen Lufteinlass und Druckregler abgeschlossen.



Abb. 5.7 Betonfilterpresse BPV gefüllt – Vor Versuchsbeginn

Die eigentliche Versuchsdurchführung beginnt mit dem Aufbringen des Prüfdrucks. Dieser ist innerhalb von 30 Sekunden mit Hilfe des Druckreglers auf 3 bar einzustellen. Das ausgepresste Wasser wird im Messzylinder nach 3 Minuten, nach 5 Minuten und anschließend im Intervall von 5 Minuten bis zum Ende des Versuchs nach 60 Minuten abgelesen und in das Prüfprotokoll eingetragen.



Abb. 5.8 Betonfilterpresse BPV nach Versuchende



Abb. 5.9 Volumenreduktion infolge der Wasserabgabe

Die Auswertung des Auspressversuchs erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird für die Versuchszeitpunkte 30 und 60 Minuten die Wasserabgabe pro m^3 Beton nach Gleichung 5.1 errechnet und in das Prüfprotokoll eingetragen.

$$B_{30} = W_{30} \cdot 1000 / V \quad \text{bzw.} \quad B_{60} = W_{60} \cdot 1000 / V \quad (5.1)$$

B_{30} Bluten nach 30 bzw. 60 Minuten [kg/m^3]

W_{30} Wasserabgabe nach 30 bzw. 60 Minuten [ml]

V Volumen der Betonfilterpresse [cm^3]

Im zweiten Schritt wird die Auspresskurve zur besseren Beurteilung graphisch dargestellt. Die ausgepresste Wassermenge in kg/m^3 wird auf der Ordinate, die Versuchszeitpunkte in min auf der Abszisse aufgetragen. Oft ist es zweckmäßig, mehrere Auspresskurven in einem Diagramm abzubilden, um die einzelnen Versuchsergebnisse leichter miteinander vergleichen zu können. (Abb.5.10)

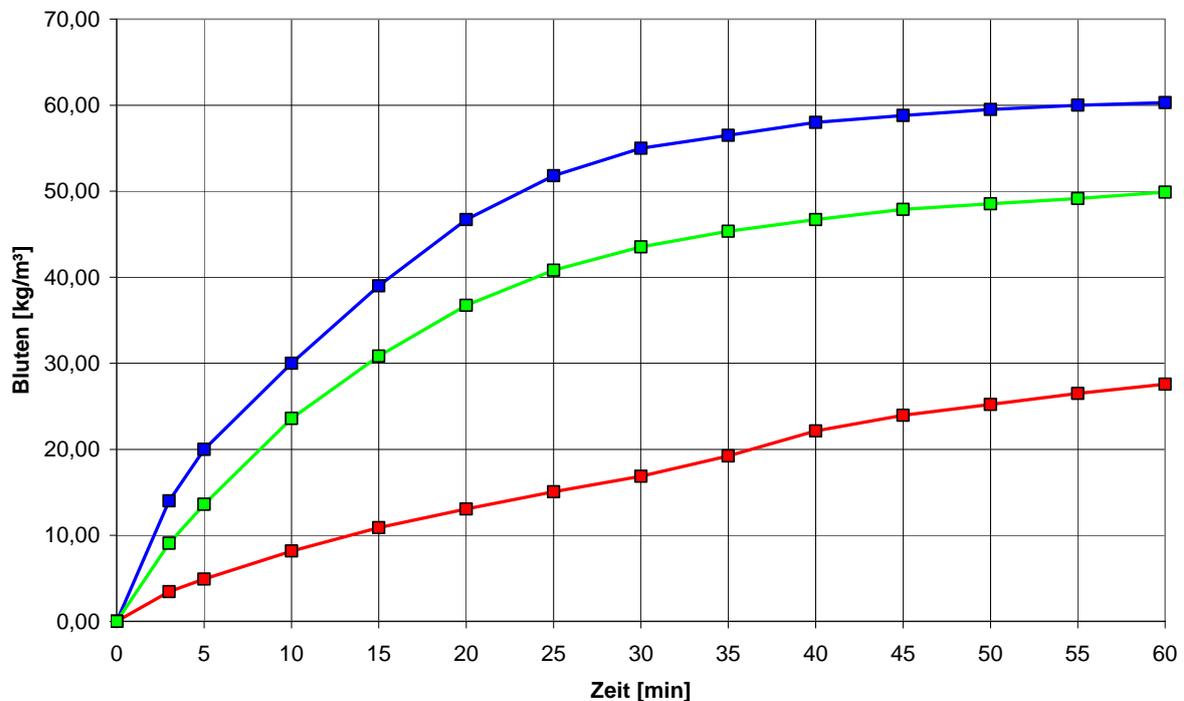


Abb. 5.10 Auspresskurven

Aufgrund von zahlreichen Baustellenversuchen konnte von der Bautechnischen Prüf- und Versuchsanstalt ein allgemeiner Grenzwert für das Bluten festgelegt werden. Die ausgepresste Wassermenge soll die Grenzwerte $32\text{kg}/\text{m}^3$ nach 30 Minuten bzw. $40\text{kg}/\text{m}^3$ nach 60 Minuten nicht überschreiten. Bei Einhaltung dieser Grenzwerte ist davon auszugehen, dass Schadensbilder aufgrund von Wasserabsonderungen vermieden werden können. [3]

5.3 Prognosemodell

5.3.1 Allgemeines

Das Ziel des Prognosemodells ist es, eine möglichst qualifizierte Aussage nach einem kurzen Zeitraum des Auspressversuchs treffen zu können. Durch den Einsatz dieses Modells soll es möglich sein, schon nach 10 bis 15 Minuten Versuchszeit die Überschreitung eines festgelegten Grenzwertes der Wasserabgabe nach 60 Minuten vorauszusagen. Damit kann die Betonfilterpresse BPV zur Eingangskontrolle von Transportbeton auf Baustellen herangezogen werden. Auf diese Weise kann die Anwendung der Betonfilterpressen BPV auf Baustellen noch effizienter gestaltet werden, um Qualitätsmängel und Schäden an Bauteilen zu verhindern. In der jetzigen Form der Versuchsdurchführung ist eine Beurteilung des Betons hinsichtlich der Wasserabgabe unter Druck vor dem Einbau nur schwer möglich. Bei der Bohrpfahl- und Schlitzwandherstellung werden im Mittel Steiggeschwindigkeiten von mehr als 10 Meter pro Stunde erreicht. Das entspricht bei der Herstellung von Großbohrpfählen mit einem Durchmesser von 150 cm einem Betonverbrauch von etwa 20 m³ pro Stunde. Ein durchschnittliches Transportfahrzeug fasst rund 8 m³ Beton. Somit dauert das Entleeren und der Einbau des Transportbetons eines Fahrzeuges weniger als 30 Minuten. Im Gegensatz dazu dauert die Versuchsdurchführung ohne Einbau des Betons in die Filterpresse BPV 60 Minuten. Werden noch rund 10 Minuten für das Instandsetzen des Versuchs hinzugerechnet, ist der Beton im Bohrpfahl oder in der Schlitzwand demnach schon 40 Minuten eingebaut bevor das Ergebnis des Auspressversuchs vorliegt. In diesem Zeitraum ist auch schon der Beton des folgenden Transportfahrzeuges verarbeitet. Soll nun die Qualität des Frischbetons hinsichtlich der Wasserabgabe von mehreren Transportfahrzeugen vor dem Einbau überprüft werden, ist dies in der derzeit angewandten Form der Versuchsdurchführung unmöglich. Da die Versuchsdurchführung des Auspressversuchs an sich nicht verändert werden soll, bleibt nur die Möglichkeit, in Form eines Prognosemodells die Versuchszeit zu verkürzen und den Auspresswert von 60 Minuten hochzurechnen.

Da die Anwendung des Prognosemodells vorwiegend auf Baustellen stattfinden soll, ist auf die Benutzerfreundlichkeit ein besonderes Augenmerk zu richten. Daher sind umfangreiche Berechnungen, die vor Ort auf einem Computer durchgeführt werden müssen, zu vermeiden. Auch wenn die Modellansätze komplexer gestaltet werden, sollen als Ergebnis einfache Diagramme oder auch Tabellen auf der Baustelle zum Einsatz kommen, damit das Kriterium der Anwenderfreundlichkeit erfüllt wird.

5.3.2 Grundlagen

5.3.2.1 Einzellinearspeicher

In der Natur treten viele Bereiche auf, die in irgendeiner Form mit der Speicherung von verschiedenen Medien zu tun haben. Darunter fallen die Speicherung von Wasser in Stauseen, Böden und Schneedecken, die Speicherung von Nährstoffen in Böden und Pflanzen als auch die Speicherung von Energie in der Atmosphäre. All jene Systeme haben im Groben betrachtet Gemeinsamkeiten. Jedes dieser Systeme besitzt einen maximalen Speicherinhalt und ein Pufferungs- bzw. Retentionsvermögen. Die Kennwerte, die zur Beschreibung der Speicher herangezogen werden, können je nach System zeitlich veränderbar oder auch konstant sein.

Die Anwendung von Speichersystemen ist in der Hydrologie sehr verbreitet. Diese Systeme dienen zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken oder zur Berechnung von Grundwasserströmen und Schmelzwasserabflüssen aus Gletschern. Die in der Hydrologie verwendeten Speichermodelle sind oft sehr komplex aufgebaut. Das System der Betonfilterpresse BPV erlaubt es, das einfachste Modell, den Einzellinearspeicher, für die Modellierung heranzuziehen. Die Rahmenbedingungen, die diese Vereinfachung ermöglichen, werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. [24]

Mathematisches Modell [6],[7]

Für die Beschreibung eines Speichers als Einzellinearspeicher sind einige Rahmenbedingungen zu definieren. Alle in diesem Prozess ablaufenden Vorgänge finden in nur einem Speicher statt. Des Weiteren sind der Zufluss, der Speicherinhalt und der Abfluss aus dem Speicher als zeitvariant anzusehen. Die Speichercharakteristik hingegen wird als zeitinvariant und linear beschrieben. Somit ist der Abfluss aus dem Speicher immer proportional zum Speicherinhalt.

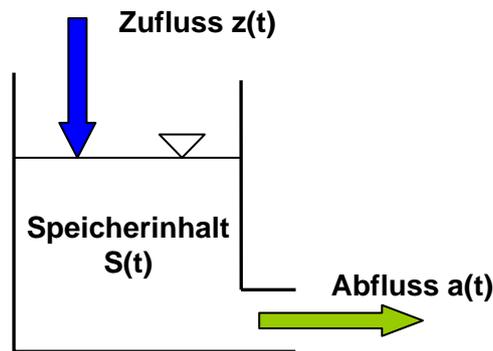


Abb. 5.11 Schematische Darstellung eines Einzellinearspeichers

Der Speicherinhalt eines Einzellinearspeichers kann nur durch die Differenz aus Zufluss und Abfluss verändert werden. Damit gilt die Kontinuitätsgleichung in der Form:

$$\frac{dS(t)}{dt} = z(t) - a(t) \quad (5.1)$$

Des Weiteren gilt, wie oben erwähnt, der lineare Zusammenhang zwischen Speicherinhalt und Abfluss sowie die Zeitinvarianz der Speicherfunktion $k(t)$:

$$k(t) = k \quad (5.2)$$

$$S(t) = k \cdot a(t) \quad (5.3)$$

Durch Differenzieren von $S(t)$ nach t und Einsetzen in die Kontinuitätsgleichung folgt eine lineare Differentialgleichung:

$$z(t) - a(t) - k \cdot \frac{da(t)}{dt} = 0 \quad (5.4)$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung 1. Ordnung mit konstantem Koeffizienten k ist eine Funktion, die aus einem unbestimmten Integral und einer e-Funktion besteht:

$$a(t) = \int_{t_0}^t \frac{z(\tau)}{k} \cdot e^{-\frac{(t-\tau)}{k}} d\tau + a(t_0) \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{k}} \quad (5.5)$$

Der Speicherabfluss des Einzellinearspeichers setzt sich somit aus zwei sich überlagernden Funktionen zusammen. Der erste Teil beschreibt die Reaktion des Speichers auf einen zeitlich veränderlichen Zufluss, der zweite Teil beschreibt das Leerlaufen des Speichers ohne Zufluss.

5.3.2.2 Regressionsanalyse [8]

Die Regressionsanalyse ist ein Verfahren aus dem Fachgebiet der Statistik. Das Ziel dieses Verfahrens besteht darin, Beziehungen zwischen einer abhängigen Variablen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu ermitteln. Im Allgemeinen wird die unabhängige Variable „x“ und die von „x“ abhängige Variable „y“ bezeichnet. Der einfachste Fall der Regressionsanalyse ist jener der *Einfachen Linearen Regression*. Dabei wird ein linearer Zusammenhang zwischen den Parametern vermutet, der folgendermaßen dargestellt werden kann.

$$Y = a + bx + Z \quad (5.6)$$

Die folgende Abb. 5.12 soll den Zusammenhang graphisch darstellen.

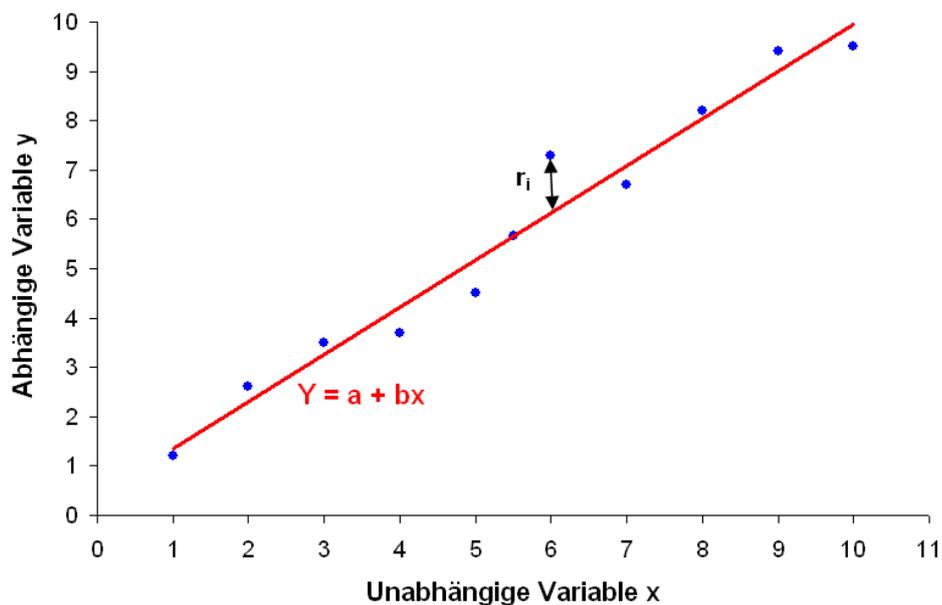


Abb. 5.12 Lineare Regression

Die Variable „Z“ stellt eine Zufallsvariable mit dem Mittelwert Null dar, die die zufälligen Schwankungen von „y“ um den Mittelwert bedingt. Des Weiteren wird die Variable „Z“ in diesem Zusammenhang auch als Fehlervariable bezeichnet. Die auftretenden Residuen „r_i“ bilden die dazugehörige Stichprobe von „Z“.

Die Koeffizienten „a“ und „b“ können durch Minimierung der Abweichungsquadrate gefunden werden. Dabei sind die Koeffizienten solange zu variieren, bis die Summe der Quadrate der Residuen „r_i“ ein Minimum erreicht. Die nun gefundene Regressionsgerade geht durch den Schwerpunkt der Punktwolke. Dieser kann durch die Mittelwertbildung der beiden Variablen „x“ und „Y“ ermittelt werden.

Um eine quantitative Aussage über die Qualität der durchgeführten Regression treffen zu können, ist es notwendig, den Korrelationskoeffizienten „r“ zu bestimmen. Dieser ist ein dimensionsloses Maß für den Grad des linearen Zusammenhanges zwischen den Variablen. Der Korrelationskoeffizient kann die reellen Werte von -1 bis 1 annehmen. Dabei bedeutet r = 1, dass ein idealer linearer Zusammenhang besteht, sodass mit steigendem „x“ auch „y“ zunimmt. Ein negatives Vorzeichen beschreibt den Fall, dass „y“ mit steigendem „x“ abnimmt. Ist der Korrelationskoeffizient gleich Null, so besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den Variablen. Es ist jedoch möglich, dass zwischen den Variablen ein nichtlinearer Zusammenhang besteht.

Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten erfolgt nach folgender Gleichung.

$$r = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{Var}(x)} \cdot \sqrt{\text{Var}(y)}} \quad (5.7)$$

Dabei sind Var(x) und Var(y) die Varianzen der Stichproben der x- bzw. y-Werte und cov(x,y) die Kovarianz der x- und y-Werte. Wird der ermittelte Korrelationskoeffizient quadriert und als Prozentwert ausgedrückt spricht man vom Bestimmtheitsmaß „B“.

$$B = r^2 \cdot 100\% \quad (5.8)$$

Das Bestimmtheitsmaß „B“ gibt an zu wie viel Prozent die Variabilität von „y“ durch „x“ erklärt wird.

Oft ist es zweckmäßig, zusätzlich zum Korrelationskoeffizienten bzw. dem Bestimmtheitsmaß die Vertrauensbereiche der Regressionsgeraden zu ermitteln. Dabei ist zwischen zwei Vertrauensbereichen zu unterscheiden:

Einerseits kann der Vertrauensbereich für den Erwartungswert der Variable „y“ an der Stelle „x“ errechnet werden. Dieser ist durch das so genannte Vertrauensband welches durch zwei Hyperbeläste begrenzt wird, charakterisiert.

Andererseits kann der Vertrauensbereich für eine zukünftige Beobachtung „y“ an der Stelle „x“ ermittelt werden. Dieser ist durch eine symmetrische Parallelverschiebung der Regressionsgerade zu beschreiben.

5.4 Modellerstellung

5.4.1 Allgemeines

Die grundsätzliche Überlegung zum Aufbau des Modells ist, ein Betonelement in der Betonfilterpresse BPV als Einzellinearspeicher anzusehen. Aus diesem Element bzw. Speicher wird Wasser ausgepresst. Die Menge des Wassers, das pro Zeiteinheit ausgepresst wird, nimmt über die Dauer des Versuchs ab. Der Grund dafür liegt in dem Umstand, dass die Menge an Wasser, die in einem Element vorhanden ist und ausgepresst werden kann, über den Versuchszeitraum immer weniger wird. Irgendwann tritt der Zeitpunkt ein, an dem der Funktionswert sich asymptotisch dem Wert Null annähert. Ab diesem Zeitpunkt ist das gesamte frei verfügbare Wasser des Betonelements ausgepresst. Folglich ist der Einzellinearspeicher leer.

Der wesentliche Bestandteil dieser Betrachtung ist somit das Leerlaufen des Speichers. Da es sich bei der Betonfilterpresse BPV um ein geschlossenes System handelt, ist die Komponente des Zulaufs nicht relevant. Die Speichergleichung ist an die gegebenen Umstände anzupassen.

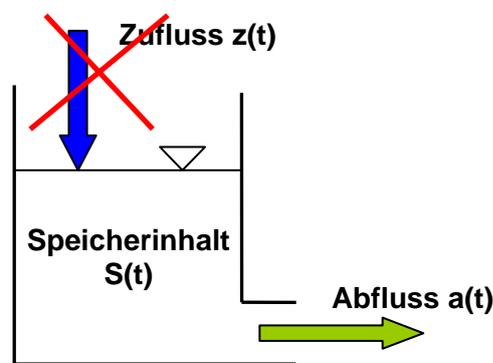


Abb. 5.13 Schematische Darstellung des modifizierten Einzellinearspeichers

Durch den Wegfall der Zuflusskomponente ergibt sich die Speichergleichung als

$$a(t) = \int_{t_0}^t \frac{z(\tau)}{k} e^{-\frac{(t-\tau)}{k}} d\tau + a(t_0) \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{k}} \quad (5.9)$$

Der Ausfluss zu einem bestimmten Zeitpunkt t ist somit von der Ausgangswassermenge im Speicher und der Speicherkonstanten dieses Speichers abhängig.

Eine weitere vereinfachende Annahme ist die Zeitinvarianz der Speicherkonstanten. Die Speicherkonstante beschreibt das Wasserrückhaltevermögen des Betons in der Filterpresse. Die Erstellung des Speichermodells erfolgt unter der Annahme, dass die Hydratation des Betons in der Filterpresse auf die ausgepresste Filtratwassermenge keinen Einfluss hat bzw. keine Hydratation auftritt. Somit ändert der Beton durch die Annahme der Zeitinvarianz seine Eigenschaften nicht. Das Wasserrückhaltevermögen bleibt über die Versuchsdauer von 60 Minuten gleich und die Speicherkonstante k muss in der Modellberechnung nur einmal bestimmt werden.

In Kapitel 5.2.4 wurden der Versuchsaufbau und die Durchführung schon eingehend erläutert. Aus diesem Ablauf heraus resultiert ein weiterer wichtiger Schritt für die Modellbildung. Die Wassermenge, die aus der Filterpresse BPV ausgepresst wird, wird in einem zylindrischen Gefäß gesammelt. Durch eine Messskala kann die bis zum Zeitpunkt t ausgepresste Wassermenge abgelesen werden. Die Ablesungen erfolgen in Intervallen von 5 Minuten.

Die Speichergleichung in der unten dargestellten Form (5.10) liefert als Ergebnis einen Ausflusswert zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Einheit Volumen pro Zeiteinheit.

$$a(t) = a(t_0) \cdot e^{\frac{-(t-t_0)}{k}} \quad (5.10)$$

Um einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aus den Auspressversuchen und der Speichergleichung herstellen zu können, muss letztere zuvor nach der Zeit t integriert werden.

$$\int_0^t a(t) dt \quad (5.11)$$

Nachdem t_0 immer den Wert Null annimmt, ergibt sich

$$Q(t) = -k \cdot a(t_0) \cdot e^{\frac{-t}{k}} \quad (5.12)$$

$Q(t)$ beschreibt die gesamte Wassermenge, die bis zum Zeitpunkt t ausgepresst wurde. $Q(t)$ ist somit die Wassermenge, die bis zu einem beliebigen Ablesezeitpunkt t im zylindrischen Messgefäß gesammelt wurde.

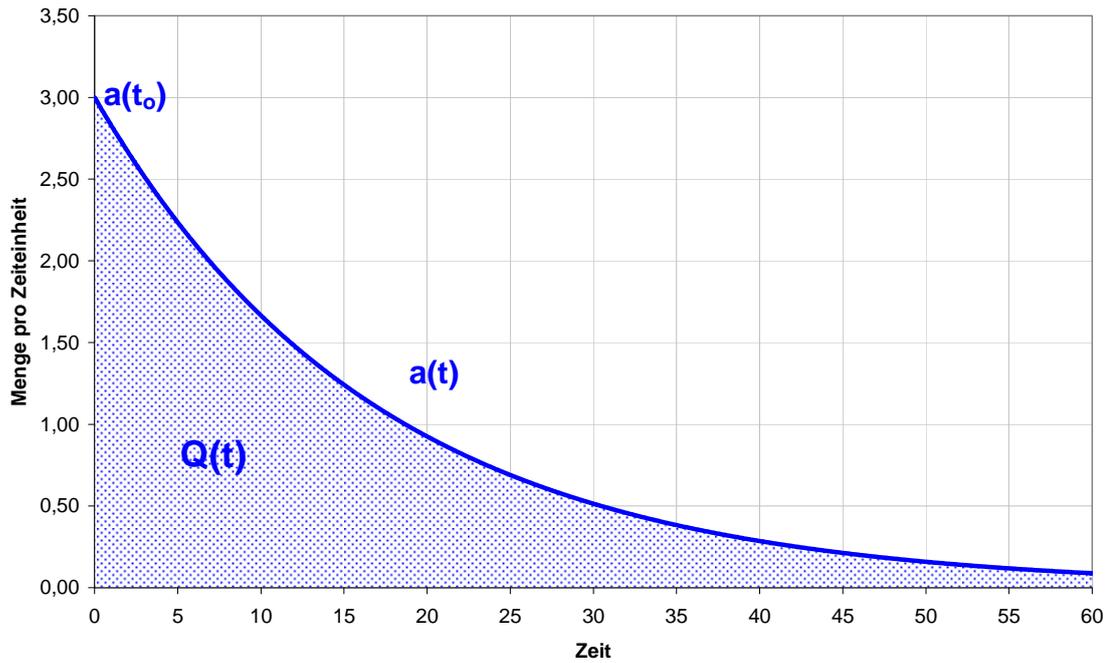


Abb. 5.14 Darstellung der Speichergleichung des modifizierten Einzellinearspeichers

In Abb. 5.14 ist die integrierte Speichergleichung (5.12) grafisch dargestellt. Die blaue Linie zeigt den Verlauf von $a(t)$, der sich asymptotisch dem Wert Null nähert. $a(t_0)$ wird als Anfangswert bezeichnet, der den Wert des Ausflusses zum Zeitpunkt t_0 Null darstellt und gleichzeitig der größte mögliche Ausflusswert ist. Die Fläche unter der Kurve der Speichergleichung beschreibt $Q(t)$. Abb. 5.15 zeigt den Verlauf von $Q(t)$ in Abhängigkeit der Zeit t .

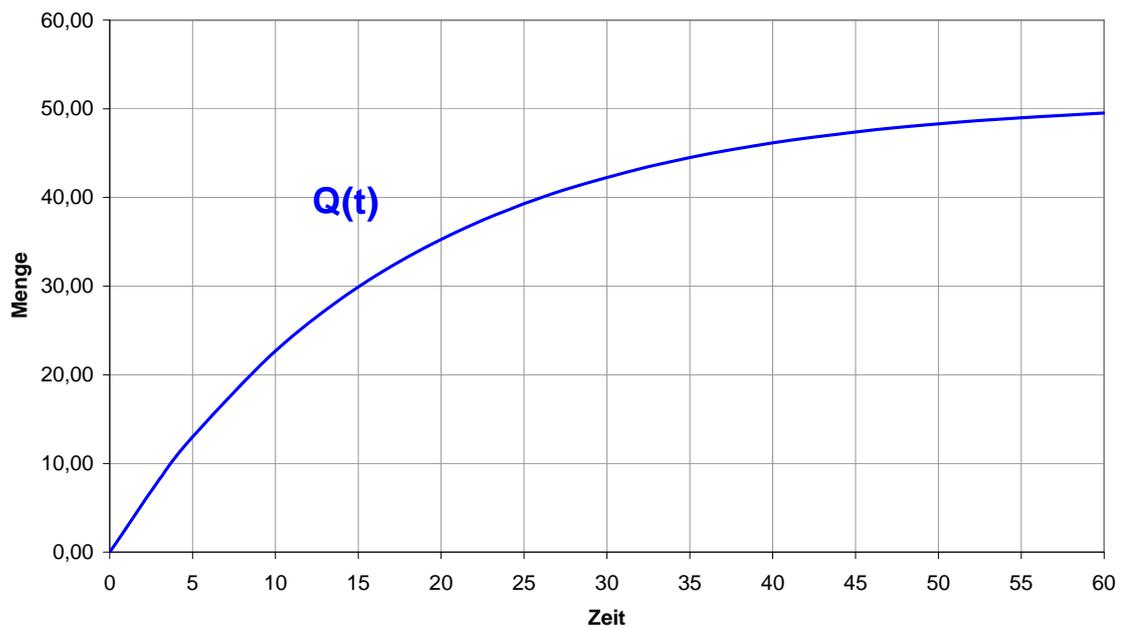


Abb. 5.15 Darstellung des zeitlichen Verlaufs von $Q(t)$

Nachfolgend ist der ermittelte Ausfluss aus der Betonfilterpresse dargestellt (Abb.5.16). Der gemessene Ausflussverlauf zeigt große Ähnlichkeiten mit dem Modellansatz.

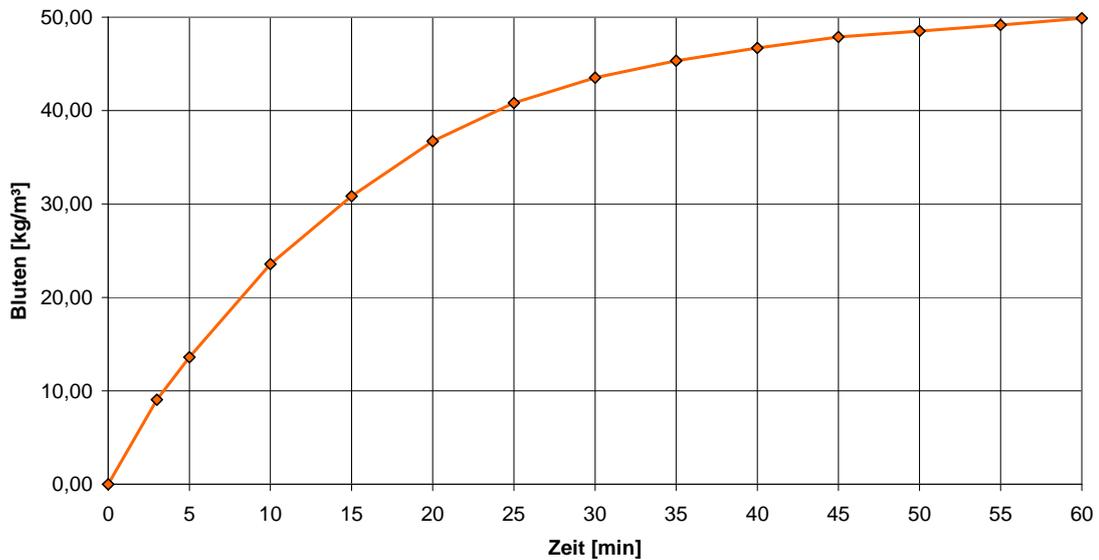


Abb. 5.16 Auswertung des Auspressversuches mit der Betonfilterpresse BPV

Die zentrale Aufgabe für die Erstellung des Prognosemodells ist es, die Parameter Anfangswert $a(t_0)$ und Speicherkonstante k des angenommenen Speichers zu ermitteln. Nachdem, diese Parameter bestimmt wurden, kann die ausgepresste Wassermenge zu jedem beliebigen Zeitpunkt approximiert werden. Die Schwierigkeit besteht darin, jene Parameter schon nach 10 oder 15 Minuten Versuchszeit zu bestimmen, um den Auspresswert von 60 Minuten hochrechnen zu können. Mit der folgenden Abb. 5.17 wird der Vorgang der Hochrechnung grafisch dargestellt. Dabei ist die orange Linie die Verbindung der bis zum Start der Hochrechnung erhaltenen Messwerte. Die blaue Linie zeigt den weiteren Verlauf der hochgerechneten Auspresskurve, der die Bestimmung der Parameter voraussetzt.

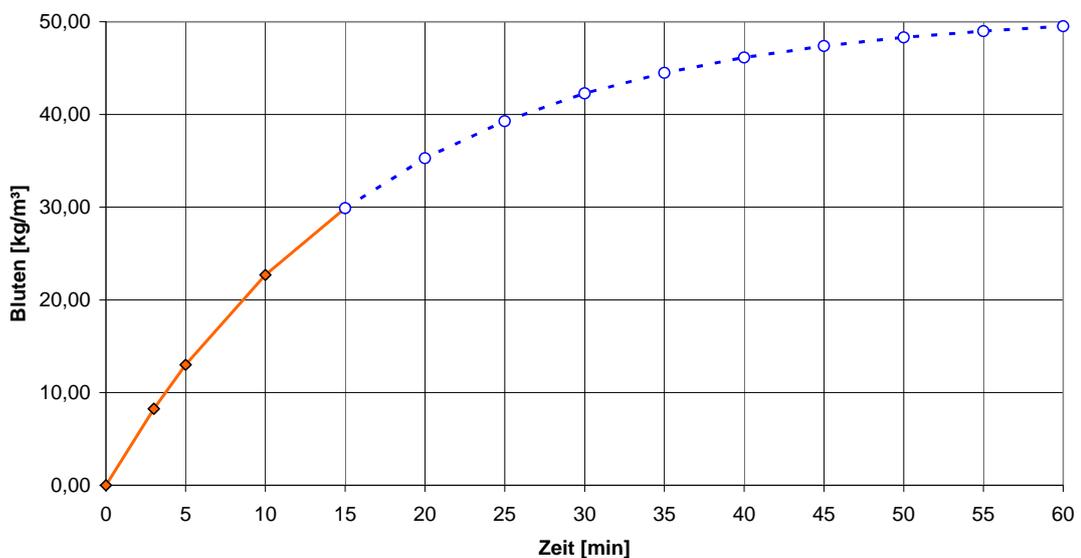


Abb. 5.17 Hochrechnung der Auspresskurve

5.4.2 Ermittlung der Parameter

Für die Erstellung des Prognosemodells wurden zunächst die beiden Parameter Anfangswert $a(t_0)$ und Speicherkonstante k von 42 ausgewerteten Baustellenversuchen ermittelt, um daraus Zusammenhänge ableiten zu können. Dazu war es notwendig, eine möglichst optimale Ausgleichskurve über die gemessene Auspresskurve des Versuchs zu legen. Umgesetzt wurde dies über die Minimierung der Abweichungsquadrate zwischen der tatsächlichen Auspresskurve und der Ausgleichskurve. Dazu wurden die beiden Parameter der Ausgleichskurve solange variiert, bis die Summe der quadrierten Abweichungen ein Minimum erreichte. Das Ergebnis der Ausgleichsrechnung ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Dabei stellt die blaue Linie die auf der Baustelle gemessene Auspresskurve dar. Die grüne Linie zeigt den Verlauf der ermittelten Ausgleichskurve. Das Ergebnis der Ausgleichsrechnung bilden die beiden gefundenen Parameter Anfangswert und Speicherkonstante.

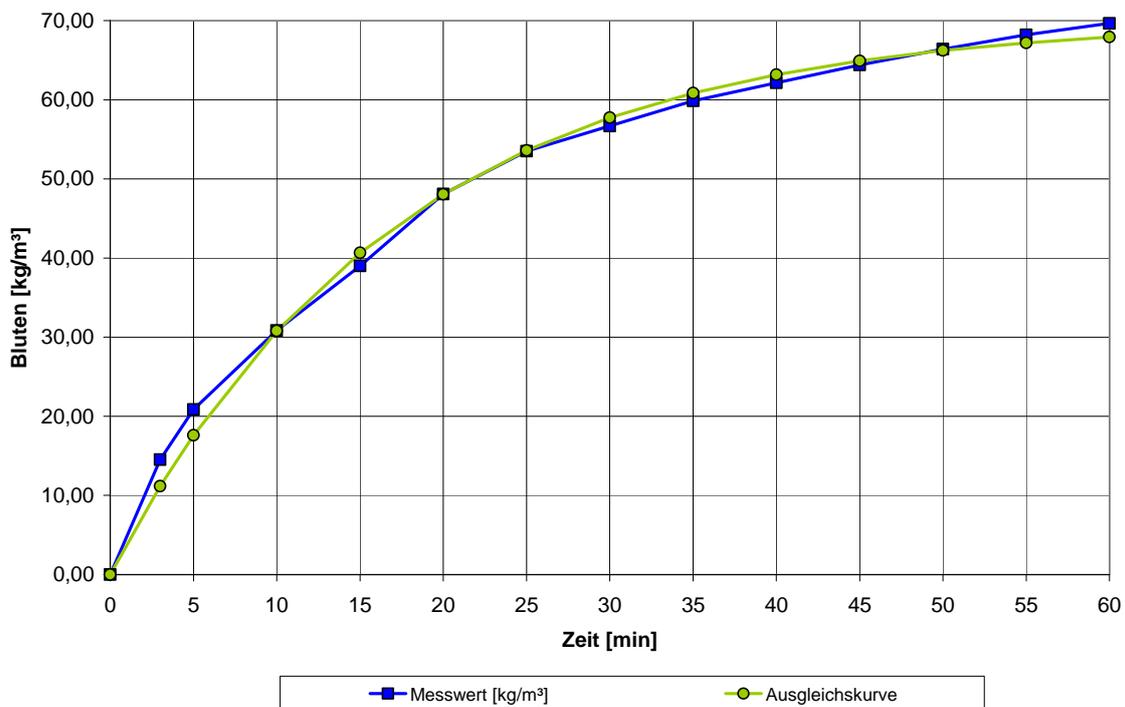


Abb. 5.18 Ausgleichsrechnung

Die gesamten Berechnungsformulare inklusive Zusammenstellung der ermittelten Parameter der 42 Baustellenversuche sind im Anhang A zu finden.

Für den Parameter Anfangswert konnte ein Wertebereich von 0,5 bis 5,1 gefunden werden. Der Wertebereich der Speicherkonstanten liegt in den durchgeführten Auswertungen zwischen 10,9 und 62,7.

5.4.3 Zusammenhang zwischen den Parametern

Für jeden Versuchszeitpunkt (z.B. t_0+10 Minuten) steht genau eine Gleichung zur Verfügung, in der die beiden Parameter Anfangswert und Speicherkonstante die unbekannt Variablen bilden. Die bekannten Variablen sind die ausgespresste Wassermenge bis zum Zeitpunkt 10 Minuten (Q_{10}) und das Zeitintervall von Versuchsbeginn bis zu diesem Zeitpunkt (10 Minuten). Grundsätzlich ist es nicht möglich, eine eindeutige Lösung für zwei unbekannte Variablen aus nur einer Gleichung zu ermitteln.

$$Q_{10} = -k \cdot a(t_0) \cdot \left(e^{\frac{-10}{k}} - 1 \right) \quad (5.12)$$

Das Aufstellen eines Gleichungssystems mit Gleichungen zu verschiedenen Zeitpunkten ist nicht zweckmäßig, da die gemessene Auspresskurve von einer theoretisch über Parameter ermittelten Kurve abweicht und die unbekannt Variablen nicht explizit bestimmt werden können. Aus diesen Gründen ist es erforderlich, empirische Zusammenhänge zwischen den gesuchten Variablen zu finden, um die Gleichung lösen zu können.

Eine weitere Schwierigkeit resultiert daraus, dass der Anfangswert in seiner physikalischen Form den Ausfluss einer Wassermenge pro Zeiteinheit darstellt. Wie in Abb. 5.14 gezeigt, ist der Anfangswert der zum Zeitpunkt Null auftretende Ausfluss. Theoretisch gesehen ist dieser Ausfluss kurz nach Versuchsbeginn bekannt. In der derzeitigen Versuchsanordnung ist der Anfangswert als Wassermenge pro Zeiteinheit jedoch nicht messbar. Die Bestrebungen den Anfangswert direkt nach Versuchsbeginn zu bestimmen wurden bald eingestellt, da sämtliche Faktoren der Versuchsvorbereitung und Instandsetzung diesen Wert beeinflussen und in diesem widergespiegelt werden. Deshalb wurde versucht den Anfangswert nach 5, 10, 15 und 20 Minuten Versuchszeit zu ermitteln.

Zur Ermittlung des Anfangswerts wurden die ausgespressten Wassermengen zu den oben genannten Zeitpunkten der 42 Baustellenversuche mit den dazugehörigen ermittelten Anfangswerten jener Versuche in einem Diagramm (Abb. 5.19) dargestellt. Die Punktwolken, bestehend aus 42 Einzelpunkten, sind je nach Zeitpunkt farblich unterteilt. Weiters sind die durch die Punktwolken gehenden Regressionsgeraden abgebildet, welche wiederum farblich gegliedert sind. Zu den Regressionsgeraden sind die Gleichungen samt errechnetem Bestimmtheitsmaß angegeben.

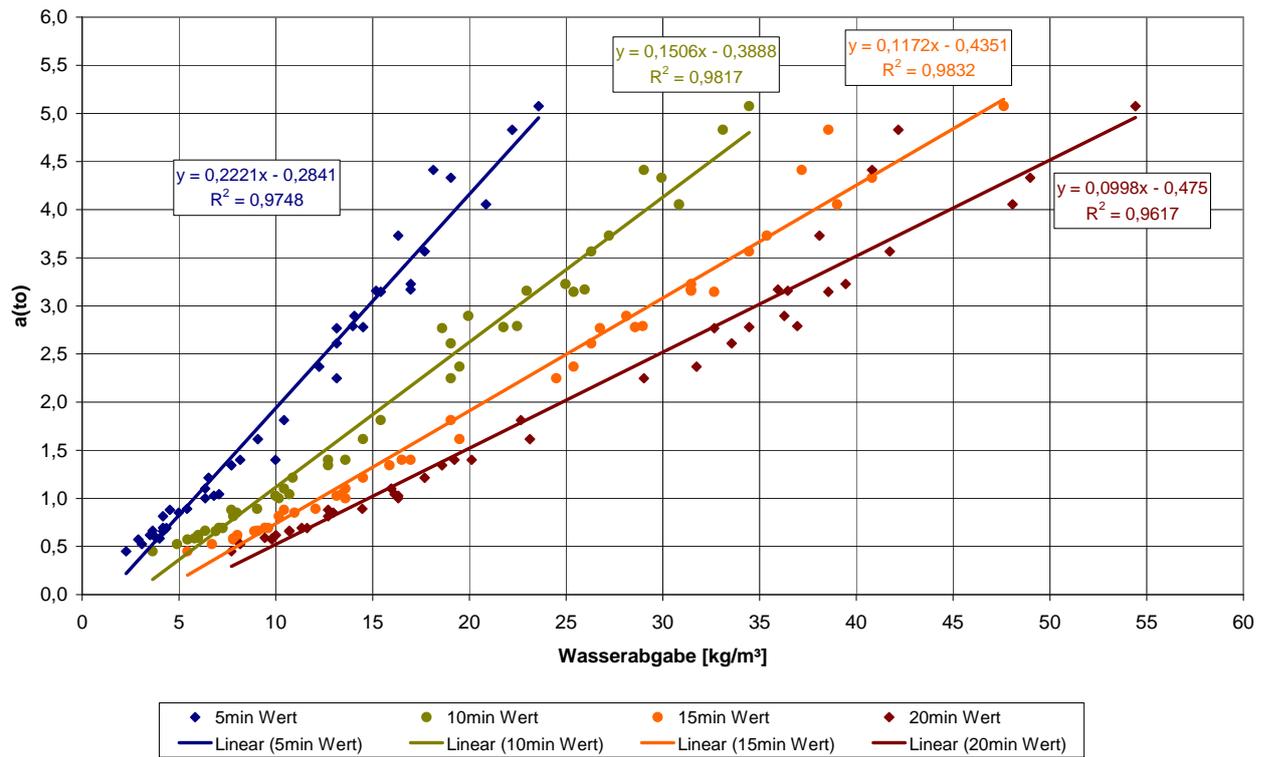


Abb. 5.19 Zusammenhang zwischen Wasserabgabe und Anfangswert $a(t_0)$

Als Ergebnis der oben angeführten Abbildung können folgende Punkte festgehalten werden: Es besteht ein approximativ linearer Zusammenhang zwischen der Wasserabgabe der jeweiligen Zeitpunkte und dem dazugehörigen Anfangswert. Die Bestimmtheitsmaße der Regressionsgeraden liegen zwischen 96,17% und 98,32%. Die besten Übereinstimmungen wurden für die Werte von 10 und 15 Minuten gefunden. Das Bestimmtheitsmaß des Zusammenhangs nach 10 Minuten beträgt 98,17%, jenes nach 15 Minuten 98,32%. Das Abnehmen des Bestimmtheitsmaßes nach 15 Minuten Versuchszeit ist dadurch zu begründen, dass der Einfluss der Speicherkonstanten auf die Auspresswassermenge zunimmt. Das etwas geringere Bestimmtheitsmaß des Zusammenhangs von 5 Minuten Versuchszeit ist dadurch zu erklären, dass der Versuchsaufbau und die Instandsetzung einen Einfluss auf die ausgepresste Wassermenge zu Versuchsbeginn haben. Aufgrund dessen werden für die weitere Erstellung des Prognosemodells nur mehr die Zeitpunkte 10 und 15 Minuten betrachtet.

Über den gefundenen Zusammenhang kann nun von jedem zukünftig durchzuführenden Versuch der Anfangswert nach 10 bzw. 15 Minuten ermittelt werden. Daraus folgt, dass die Speicherkonstante die einzige Unbekannte im weiteren Ablauf bleibt. Diese könnte aus der integrierten Speichergleichung errechnet werden. Die durchzuführende Rechenoperation ist jedoch nur iterativ lösbar, da die Speicherkonstante k nicht explizit ausgedrückt werden kann.

Durch den angestrebten einfachen, baustellennahen Einsatz eines zukünftigen Prognosemodells ist ein Schritt, in dem umfangreiche Rechenarbeit notwendig ist, zu vermeiden.

Im Zuge der Auswertung der 42 Baustellenversuche wurde ein für das zukünftige Prognosemodell elementarer Zusammenhang gefunden.

Zunächst ist es notwendig, verschiedene Kurvenformen der Auspresskurven näher zu beleuchten. In Abb. 5.20 sind Auspresskurven von drei ausgewählten Versuchen abgebildet.

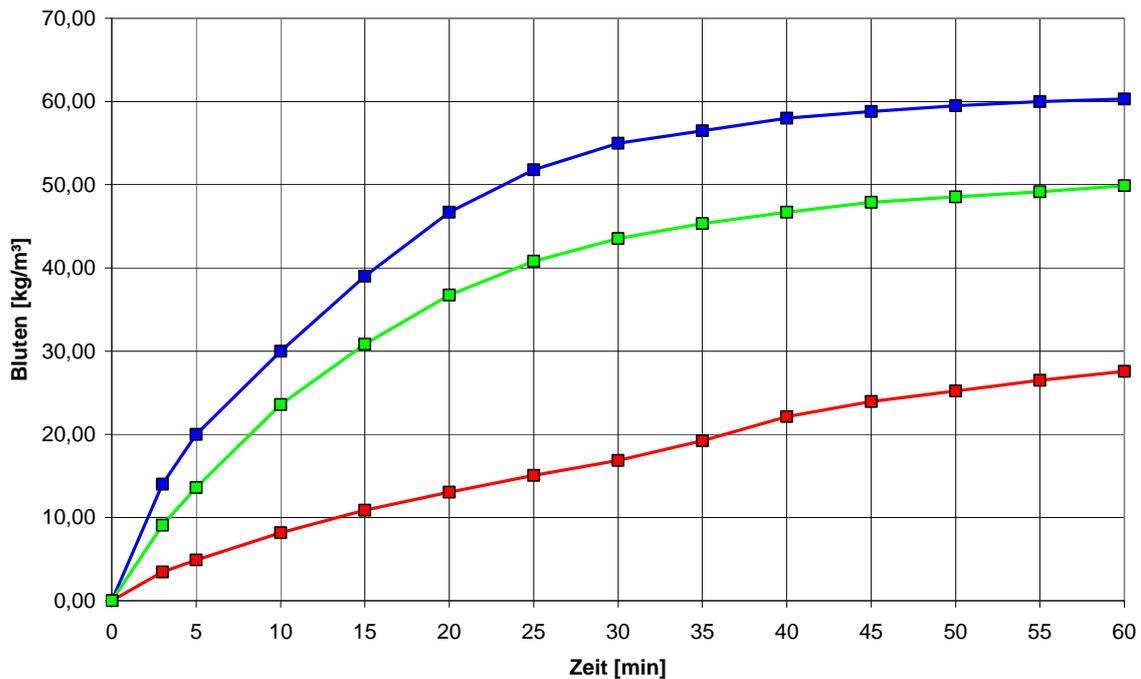


Abb. 5.20 Darstellung unterschiedlicher Auspresskurvenformen

Es zeigt sich, dass die Kurve mit kleinem Auspresswert nach 60 Minuten sich eher linear verhält, während jene Kurven mit großer ausgepresster Wassermenge eine gekrümmte Form haben. Folglich ist die Krümmung der Kurven umso ausgeprägter, je größer der 60 Minuten Auspresswert wird. Die Krümmung der Kurven wird in der Speichergleichung über die Speicherkonstante k beschrieben. Der Wert der Speicherkonstanten nimmt bei größeren Krümmungen kleinere Werte an.

Ein zweiter zutreffender Punkt ist, dass auch die Steigungen zu Versuchsbeginn in Verbindung zur ausgepressten Wassermenge nach 60 Minuten gebracht werden können. Die rote Kurve aus der obigen Abbildung zeigt die kleinste Steigung zu Versuchsbeginn und den kleinsten 60 Minuten-Auspresswert. Die Steigung zu Versuchsbeginn wird in der Speichergleichung mit dem Parameter des Anfangswertes $a(t_0)$ beschrieben. Der Anfangswert ist umso kleiner, je flacher die Kurve zu Versuchsbeginn wird. Eine flache Kurve bedeutet wie oben erwähnt eine geringere Krümmung und einen niedrigeren 60 Minuten Auspresswert.

In Summe gesehen müsste ein Zusammenhang zwischen der Steigung zum Zeitpunkt t_0 , welche in Form des Anfangswertes $a(t_0)$ dargestellt wird, und der Krümmung der Auspresskurve bestehen.

Zunächst wurde ein Diagramm erstellt, indem auf der Abszisse die Anfangswerte $a(t_0)$ der 42 Baustellenversuche und auf der Ordinate die dazugehörigen Werte der Speicherkonstanten k aufgetragen wurden. Die folgende Abb. 5.21 zeigt diesen Zusammenhang.

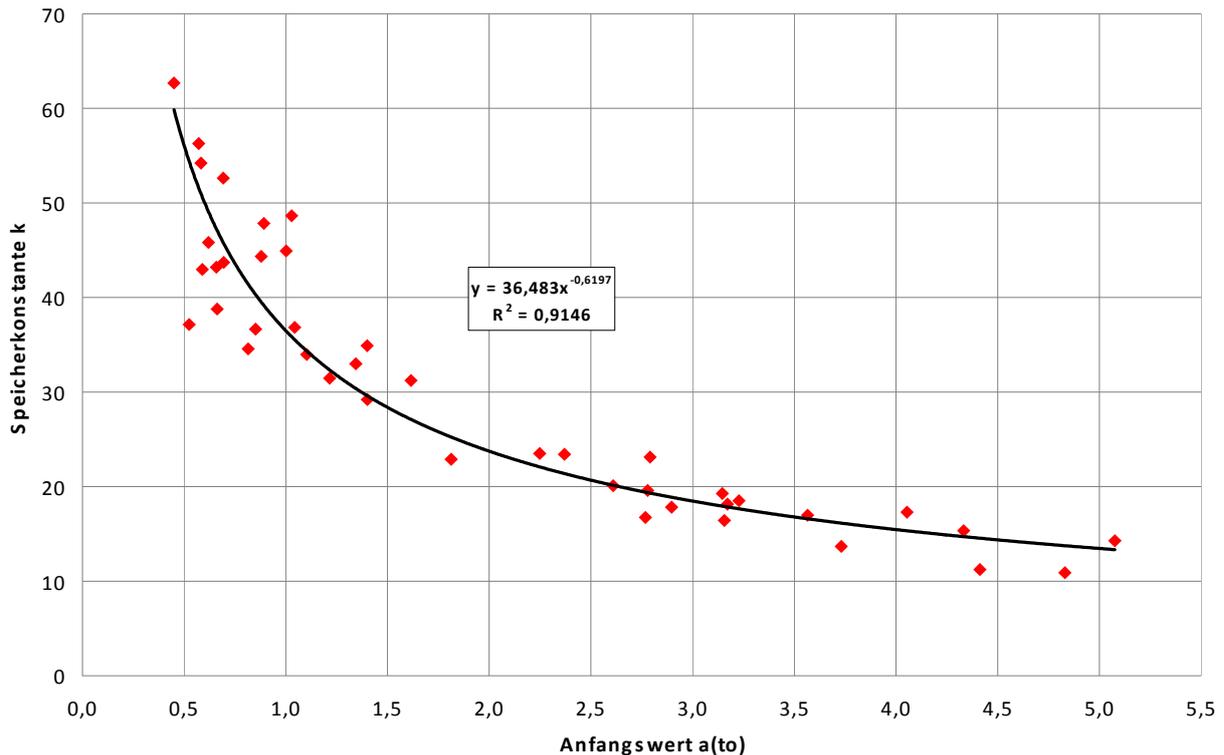


Abb. 5.21 Zusammenhang zwischen Anfangswert und Speicherkonstanten

Der Zusammenhang zwischen dem Anfangswert $a(t_0)$ und der Speicherkonstanten k kann in Form einer Potenzfunktion angegeben werden. Die Gleichung zur Beschreibung dieses Zusammenhangs ist im Diagramm dargestellt. Zur Beurteilung der Güte des Zusammenhangs wurde das Bestimmtheitsmaß errechnet. Es zeigt, dass die Abhängigkeit der Speicherkonstanten vom Anfangswert zu 91,46% gegeben ist.

Im Grunde kann mit Hilfe dieser Zusammenhänge der Auspresswert nach 60 Minuten Versuchszeit schon nach 10 oder 15 Minuten bestimmt werden. Durch die vorhandenen Abweichungen der Messpunkte von der Ausgleichskurve kommt es unweigerlich zu Abweichungen im Ergebnis der Hochrechnung, welche die Qualität der zu treffenden Aussage deutlich vermindern.

5.4.4 Verbesserung der Aussagequalität

Um die Qualität der zu treffenden Aussage nach getaner Hochrechnung zu erhöhen, soll das Ergebnis nach einer Hochrechnung nicht nur aus einem Wert bestehen. Es ist erstrebenswert, nach einer Hochrechnung einen Wertebereich angeben zu können, in dem der zukünftige Wert mit großer Wahrscheinlichkeit zu liegen kommt. Zu diesem Zweck wurde der Vertrauensbereich für eine zukünftige Beobachtung der Speicherkonstanten in Abhängigkeit des Anfangswertes ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Abweichungen der Messwerte von der Ausgleichskurve normalverteilt um die Kurve streuen. Als Konfidenzniveau wurde der 90% Zufallsstrebereich für diese Berechnung herangezogen.

Um den Rechengang praktisch durchführbar zu machen, war es notwendig die Logarithmenwerte der beiden Parameter zu bestimmen. Für die Darstellung in einem Diagramm wurden die Achsen der Abb. 5.21 mit einer logarithmischen Skalierung versehen. Durch diesen Vorgang wird die Ausgleichskurve mit der Form einer Potenzfunktion als Gerade abgebildet. In der folgenden Abb. 5.22 ist die Ausgleichsgerade samt Konfidenzintervall dargestellt.

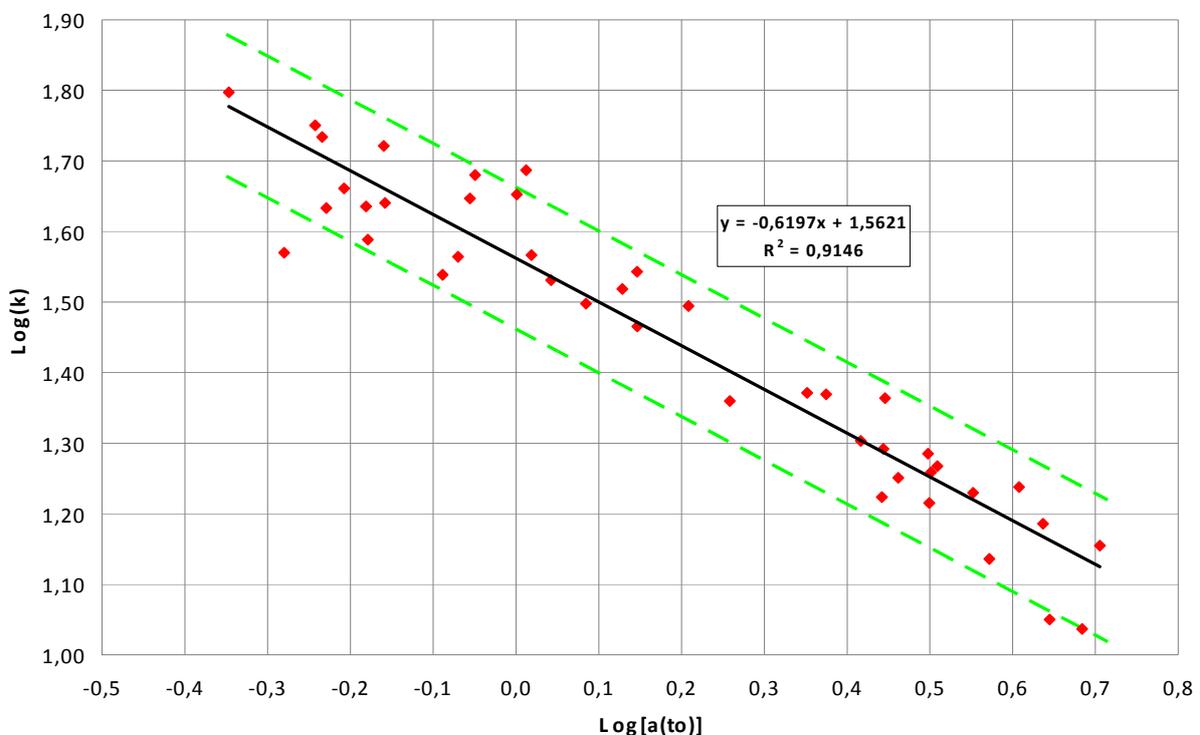


Abb. 5.22 Linearisierung des Zusammenhangs der Parameter

Die grünen Geraden im obigen Diagramm begrenzen das 90%- Konfidenzintervall für eine zukünftige Beobachtung. Die vorhandenen Messwerte sind durch die roten Punkte gekennzeichnet.

Im nächsten Schritt muss die Ausgleichskurve samt Begrenzungen, welche jetzt als Geraden abgebildet sind, wieder in die ursprüngliche Form transformiert werden. Dazu werden die drei Geradengleichungen delogarithmiert. Diese bilden sich nun wieder in Form der ursprünglichen Potenzfunktionen ab. Die gefundenen Kurven werden in der Abb. 5.23 grafisch veranschaulicht.

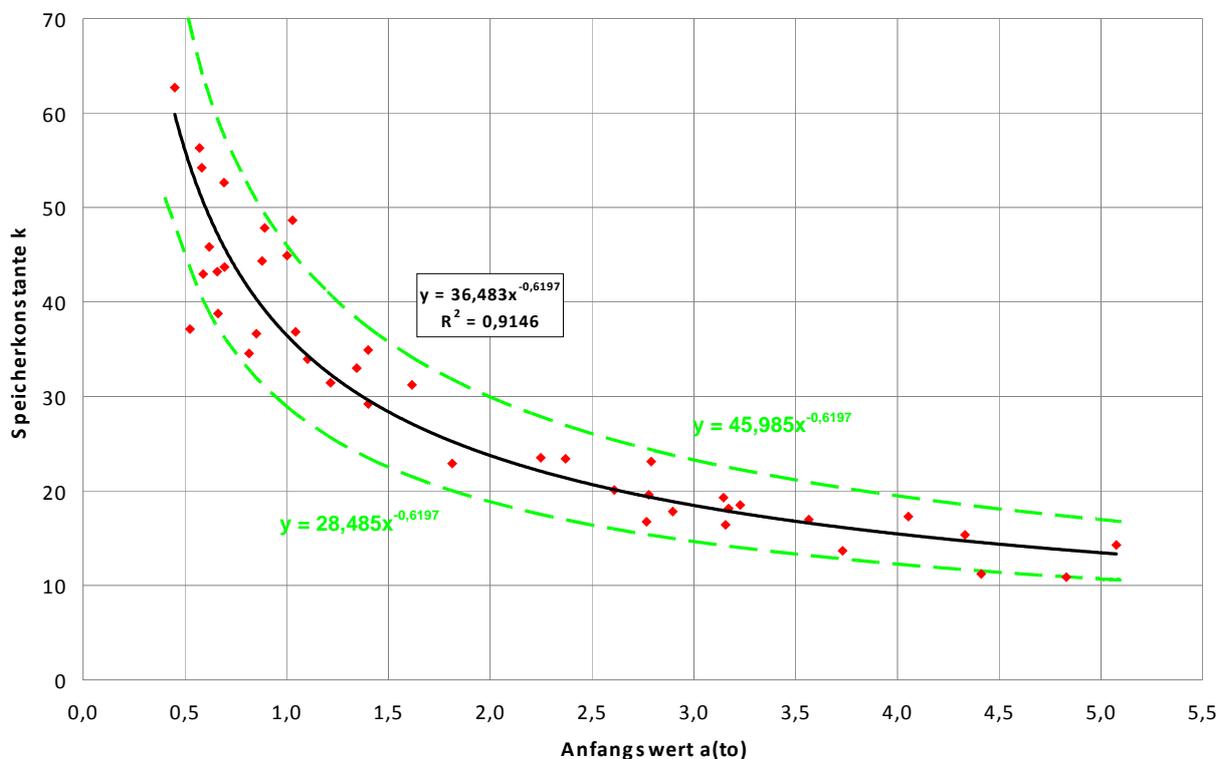


Abb. 5.23 Konfidenzintervall für zukünftige Messwerte

Die grünen Kurven bilden wie zuvor die Begrenzung des Konfidenzintervalls. Zu den beiden Grenzkurven sind die Gleichungen der Potenzfunktionen angegeben. Die roten Punkte stellen wie in Abb. 5.22 die Messwerte dar. Die Parameter einer zukünftig gemessenen Auspresskurve liegen nun mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% innerhalb des grün begrenzten Bereiches.

Durch diese Zusammenhänge kann ein Wertebereich angegeben werden, in dem der hochgerechnete Wert mit großer Wahrscheinlichkeit liegen wird.

5.4.5 Zusammenfügen des Modells

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die einzelnen Bausteine des Modells beschrieben und ihre Zusammenhänge analysiert. In diesem Kapitel sollen die einzelnen Bausteine zu einem Prognosemodell zusammengefügt werden.

Im Grunde sind nur drei Schritte notwendig um von einem Auspresswert nach 10 oder 15 Minuten auf den Wert von 60 Minuten hochrechnen zu können.

Im ersten Schritt erfolgt die Ermittlung des Anfangswertes. Dieser kann grafisch über die gefundenen Ausgleichsgeraden aus Abb. 5.19 oder explizit über die Gleichungen jener Geraden ermittelt werden.

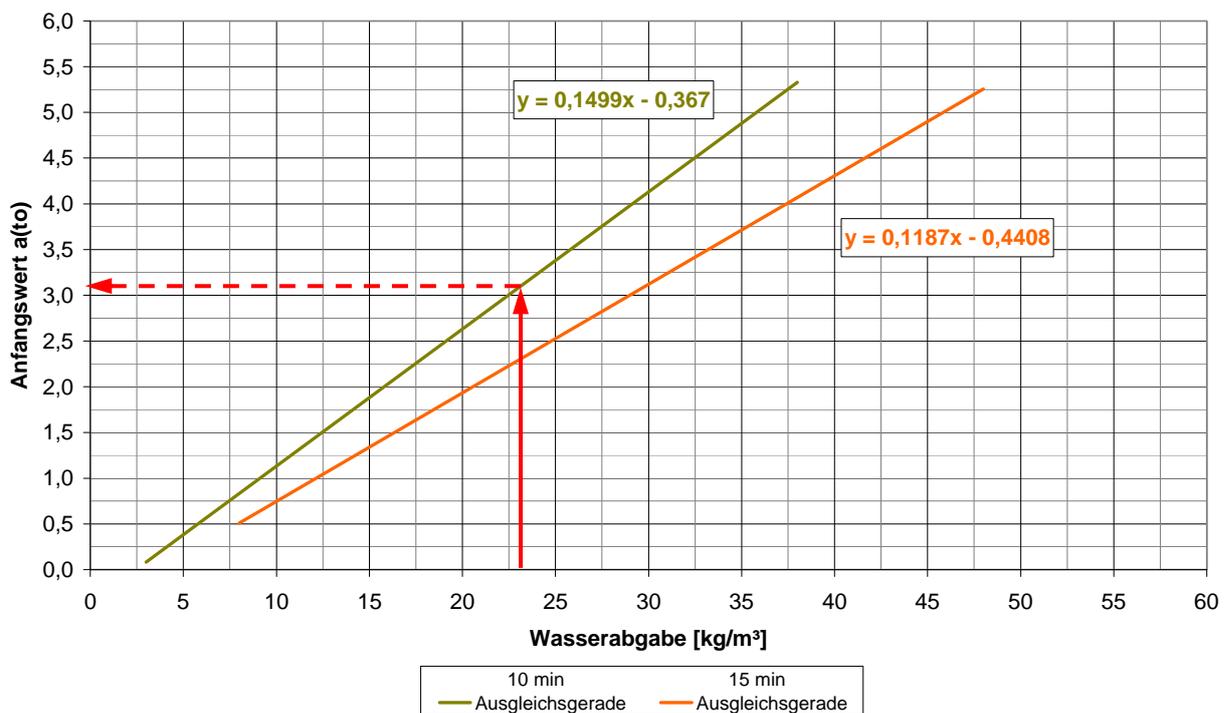


Abb. 5.24 Bestimmung des Anfangswertes

In Abb. 5.24 sind die Ausgleichsgeraden samt Gleichungen zur Bestimmung des Anfangswertes dargestellt. Die dunkelgrüne Gerade zeigt den Verlauf der Funktion des 10-Minuten- Wertes, die orange Gerade jenen des 15- Minuten- Wertes. Die roten Pfeile demonstrieren den Vorgang zur Ermittlung des Anfangswertes.

Im zweiten Schritt wird über den zuvor ermittelten Anfangswert die Speicherkonstante der Speichergleichung ermittelt. In Kapitel 5.5.4 wurden zur Bestimmung der Speicherkonstanten Konfidenzintervalle angegeben, welche auch jetzt zum Einsatz kommen. Durch sie werden über den Anfangswert zwei Speicherkonstanten (k_{\min} und k_{\max}) ermittelt. In der späteren Berechnung des 60 Minuten Auspresswerts wird dieser über die beiden Speicherkonstanten nach oben und unten begrenzt. Die Ermittlung der Speicherkonstanten kann wiederum grafisch oder über die angegebenen Gleichungen erfolgen.

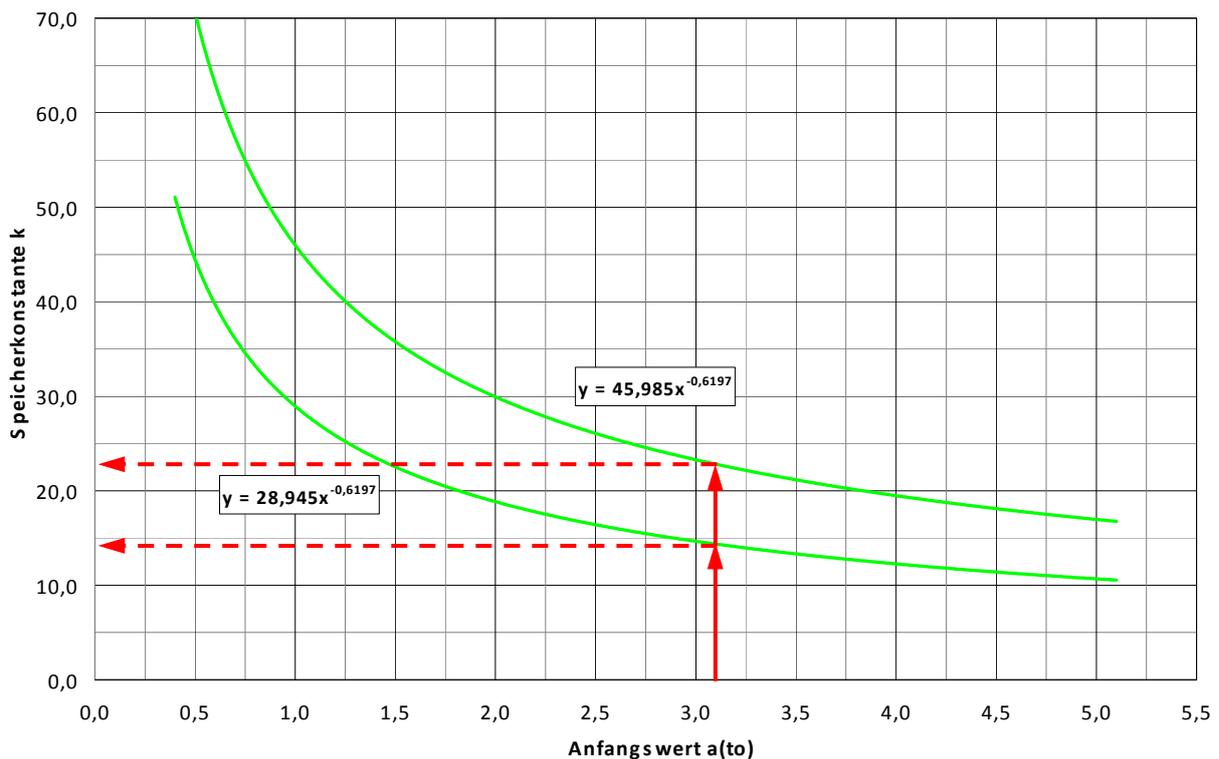


Abb. 5.25 Bestimmung der Speicherkonstanten

Die Abb. 5.25 beschreibt den Vorgang zur Bestimmung der Speicherkonstanten. Die grünen Kurven zeigen den Verlauf der ermittelten Grenzen des Konfidenzintervalls, die roten Pfeile die Ermittlung von k_{\min} und k_{\max} . Nach diesem Schritt sind alle zuvor unbekannt Variablen bekannt und es kann zum letzten Punkt übergegangen werden.

Im dritten Schritt werden die ermittelten Parameter in die Speichergleichung eingesetzt und der Wertebereich der Wassermenge nach 60 Minuten Versuchszeit $Q(60)$ berechnet.

$$Q(t) = -k \cdot a(t_0) \cdot e^{\frac{-t}{k}} \quad (5.12)$$

Das Ergebnis dieser Berechnung bildet der Bereich zwischen $Q_{\min}(60)$ und $Q_{\max}(60)$.

Um den zukünftigen Einsatz des Prognosemodells so einfach als möglich zu gestalten, werden die oben angeführten Schritte zu einem einzigen Schritt zusammengefasst. Dazu werden die zuvor gefundenen Formeln der Ausgleichskurven und Regressionsgeraden direkt in die Speichergleichung eingesetzt. Das Einsetzen in die Speichergleichung ist nachstehend für die Ermittlung des maximalen 60 Minuten-Auspresswerts nach 15 Minuten Versuchszeit dargestellt. Die Variable x stellt in diesen Zusammenhängen die ausgepresste Wassermenge nach 15 Minuten Versuchszeit dar.

$$a(t_0) = 0.1171 \cdot x - 0.4351 \quad (5.13)$$

Die oben angeführte Gleichung zur Ermittlung des Anfangswerts wird nun die folgende Gleichung für die Bestimmung der Speicherkonstanten eingesetzt.

$$k = 10^{1.663} \cdot a(t_0)^{-0.6197} \quad (5.14)$$

In der nun gefundenen Form der folgenden Gleichung ist die Speicherkonstante nur von der Variable x abhängig.

$$k = 10^{1.663} \cdot (0.1171 \cdot x - 0.4351)^{-0.6197} \quad (5.15)$$

In der unten angeführten Speichergleichung sind die Variablen k und $a(t_0)$ durch die zuvor erhaltenen Gleichungen zur Bestimmung des Anfangswerts und der Speicherkonstanten zu ersetzen. Für die Zeit t in der Speichergleichung sind 60 Minuten einzusetzen.

$$Q(t) = -k \cdot a(t_0) \cdot e^{\frac{-t}{k}} \quad (5.12)$$

Die jetzt ermittelte Gleichung stellt den Zusammenhang zwischen dem 15 Minuten-Auspresswert x und dem mit großer Wahrscheinlichkeit maximal auftretenden Auspresswert nach 60 Minuten dar.

$$Q_{\max}(60) = -10^{1.663} \cdot (0.1171 \cdot x - 0.4351)^{-0.6197} \cdot (0.1171 \cdot x - 0.4351) \cdot \left[e^{\frac{-60}{10^{1.663} \cdot (0.1171 \cdot x - 0.4351)^{-0.6197}}} - 1 \right] \quad (5.16)$$

Analog dazu sind die Gleichungen zur Ermittlung des minimalen 60- Minuten-Werts nach 15 Minuten Versuchszeit bzw. des maximalen und minimalen 60- Minuten-Werts nach 10 Minuten Versuchszeit aufzustellen.

Die ermittelten Gleichungen ermöglichen nun das Errechnen des 60 Minuten-Auspresswerts ohne zuvor den Anfangswert bzw. die Speicherkonstante zu ermitteln. Für den praktischen Baustelleneinsatz sind diese Gleichungen jedoch nicht geeignet. Daher wurden zwei Diagramme mit dem Inhalt dieser Gleichungen erstellt. Die Abb. 5.26 zeigt das Diagramm zur Bestimmung des Bereichs der 60 Minuten-Auspresswerte nach 10 Minuten Versuchszeit, die Abb. 5.27 jenes für 15 Minuten Versuchszeit.

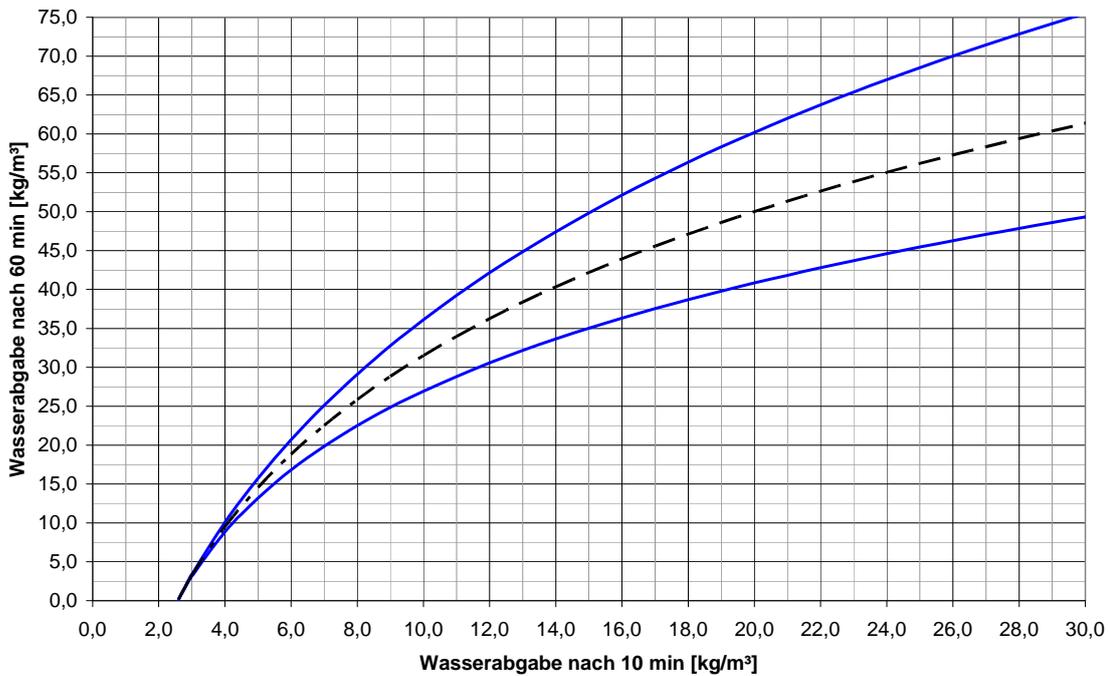


Abb. 5.26 Bestimmung der Gesamtwasserabgabe nach 10 Minuten Versuchszeit

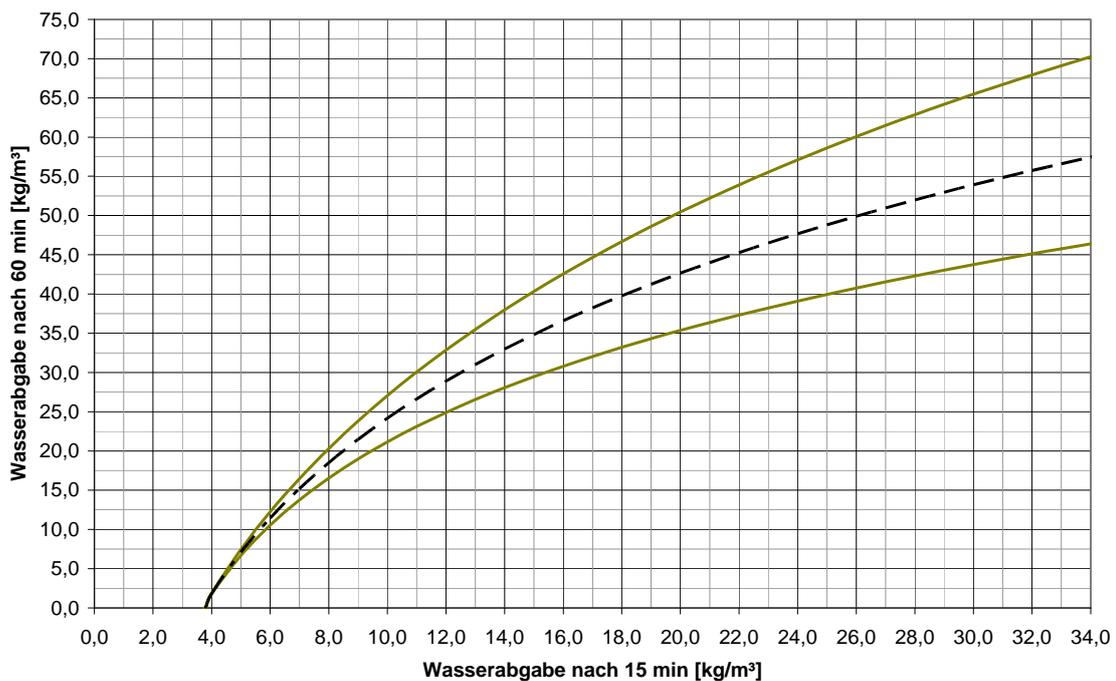


Abb. 5.27 Bestimmung der Gesamtwasserabgabe nach 15 Minuten Versuchszeit

Die oben angeführten Abb. 5.26 und 5.27 stellen das Ergebnis des Prognosemodells dar.

Die genaue Beschreibung der Diagramme und deren Anwendungsmöglichkeiten erfolgen in den nächsten Kapiteln. Weiters werden die ermittelten Diagramme auf vom Modell unabhängigen Baustelle eingesetzt und hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Benutzerfreundlichkeit beurteilt.

5.5 Modellbeschreibung

5.5.1 Allgemeines

Das Ziel des Prognosemodells war es, schon nach kurzer Versuchszeit eine möglichst qualifizierte Aussage über das Ergebnis des Auspressversuchs treffen zu können. Zusätzlich zum definierten Ziel wurden im vorigen Kapitel Rahmenbedingungen für die Erstellung des Prognosemodells beschrieben. Kurz zusammengefasst waren dies die Einfachheit der Bedienung, die Möglichkeit des Baustelleneinsatzes und die Genauigkeit der Vorhersage. Es wurde nun versucht, ein Prognosemodell zu entwickeln, welches den gegebenen Rahmenbedingungen optimal entspricht.

Dieses Prognosemodell besteht im Grunde aus einem physikalischen Ansatz und empirischen Zusammenhängen zwischen den vorkommenden Parametern, welche im vorigen Kapitel eingehend erläutert wurden. Den physikalischen Ansatz des Prognosemodells bildet das System des Linearen Speichers. Um die Hochrechnung möglichst einfach zu gestalten und damit den Rahmenbedingungen zu entsprechen, wurden die gesamten Berechnungen für das Auffinden der Parameter in einem einzigen Diagramm zusammengefasst. Dadurch sind die für die Hochrechnung notwendigen Parameter nicht explizit zu bestimmen, was die Ergebnisfindung deutlich beschleunigt. Es ist der Eingangswert aufzutragen und der dazugehörige Bereich des hochgerechneten Wertes abzulesen. In den beiden Diagrammen, welche in den Abbildungen 5.26 bzw. 5.27 dargestellt sind, sind auf der Abszisse die Auspresswerte nach 10 bzw. 15 Minuten Versuchszeit angegeben. Die hochzurechnenden 60-Minuten-Auspresswerte sind auf der Ordinate dieser Diagramme zu finden. Weiters sind in den beiden Diagrammen je drei Kurven abgebildet, die zur Hochrechnung dienen. Die strichpunktierte Linie zeigt den Verlauf des Mittelwerts des zu erwartenden Werts der Hochrechnung. Die beiden farblich dargestellten Linien begrenzen das 90%- Konfidenzintervall. Als Ergebnis der grafisch durchgeführten Hochrechnung kann ein Wertebereich angegeben werden, indem der hochgerechnete Wert mit großer Wahrscheinlichkeit zu liegen kommt.

Je nach Fragestellung ist die auf der Baustelle durchgeführte Hochrechnung zu interpretieren und die notwendigen Maßnahmen daraus abzuleiten.

5.5.2 Anwendungsmöglichkeiten

5.5.2.1 Einleitung

Durch die Art der gefundenen Diagramme zur Hochrechnung der Gesamtwasserabgabe für die Zeitpunkte t_0+10 bzw. 15 Minuten ergeben sich nun verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. In den folgenden Beschreibungen wird nur das Diagramm für die Hochrechnung nach 10 Minuten Versuchszeit verwendet. Die Anwendung des Diagramms für die Hochrechnung nach 15 Minuten funktioniert analog.

5.5.2.2 Einfache Hochrechnung

Unter der einfachen Hochrechnung versteht man den Vorgang, bei dem vom 10- Minuten- Wert direkt auf die Gesamtwasserabgabe hochgerechnet wird. Dies erfolgt grafisch mit dem Diagramm in Abb. 5.26. Als Ergebnis der Hochrechnung wird ein Wertebereich angegeben, in dem die Gesamtwasserabgabe nach 60 Minuten mit großer Wahrscheinlichkeit zu liegen kommt. Die grafische Durchführung der Hochrechnung soll anhand der folgenden Abb. 5.28 dargestellt werden.

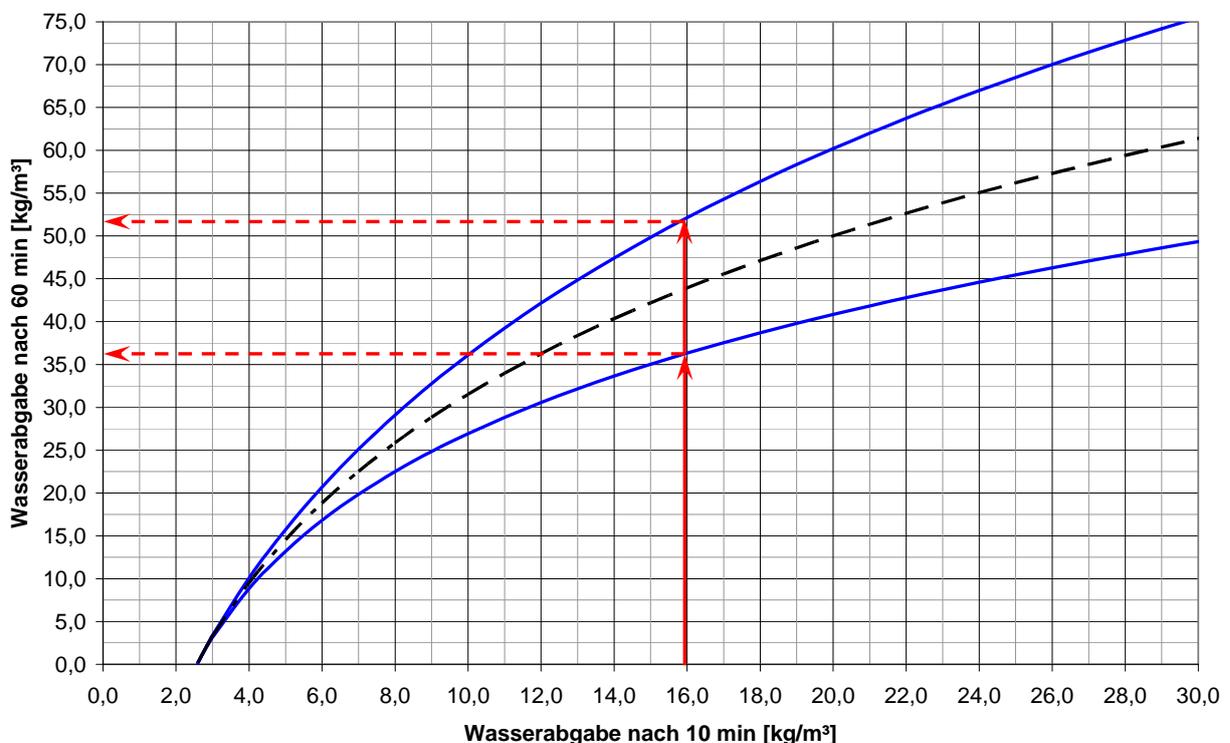


Abb. 5.28 Durchführung der Hochrechnung

Die obige Abbildung zeigt beispielhaft die Ermittlung des Wertebereichs für die Gesamtwasserabgabe. Als Ausgangswert wurde die Wasserabgabe nach 10 Minuten Versuchszeit mit dem Wert $16,0 \text{ kg/m}^3$ angenommen. Der ermittelte Bereich liegt zwischen $36,3$ und $52,1 \text{ kg/m}^3$ und stellt das Ergebnis des angewandten Beispiels der einfachen Hochrechnung dar.

5.5.2.3 Hochrechnung mit fixem Grenzwert

Für die Hochrechnung mit fixem Grenzwert muss vor Versuchsbeginn ein Grenzwert, für die maximal zulässige Gesamtwasserabgabe nach 60 Minuten Versuchszeit definiert werden. Ist der Grenzwert bekannt, so ist dieser im Diagramm als horizontale Linie einzutragen. Über die Schnittpunkte der horizontalen Linie mit den Begrenzungslinien des Konfidenzintervalls können an der Abszisse drei Wertebereiche festgelegt werden. Die folgende Abb. 5.29 soll diesen Vorgang darstellen. Für dieses Beispiel wurde ein Grenzwert von 40 kg/m^3 nach 60 Minuten Versuchszeit festgelegt.

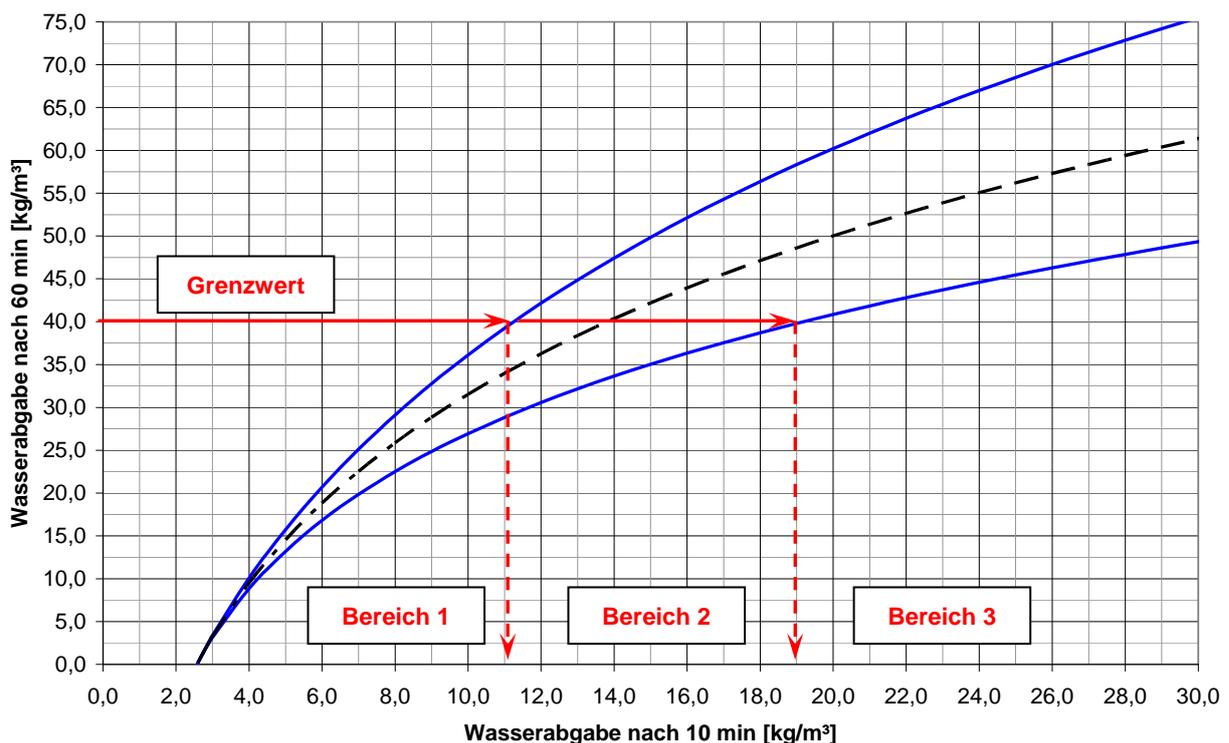


Abb. 5.29 Durchführung der Hochrechnung mit fixem Grenzwert

Das Ergebnis der Hochrechnung mit fixem Grenzwert aus Abb. 5.29 stellen die drei Bereiche auf der Abszisse des Diagramms dar. Ausgehend vom Grenzwert der Gesamtwasserabgabe von 40 kg/m^3 wurden diese drei Wertebereiche für die ausgepresste Wassermenge nach 10 Minuten Versuchszeit gefunden.

Alle 10 Minuten-Auspresswerte kleiner $11,3 \text{ kg/m}^3$ gehören dem Bereich 1 an. Jene Werte die zwischen $11,3$ und $19,2 \text{ kg/m}^3$ liegen sind dem Bereich 2 zuzuordnen und alle Werte größer $19,2 \text{ kg/m}^3$ dem Bereich 3.

In der laufenden Versuchsdurchführung können die drei ermittelten Wertebereiche folgendermaßen interpretiert werden:

- Liegt der Auspresswert nach 10 Minuten Versuchszeit im Bereich 1, so ist zu erwarten, dass der Grenzwert mit großer Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird. Daraus kann für den laufenden Versuch nachstehendes abgeleitet werden: Das Ergebnis des Versuchs ist mit großer Wahrscheinlichkeit positiv. Der Versuch kann abgebrochen werden.
- Der Wertebereich 2 erlaubt keine Aussage für das Unter- oder Überschreiten des Grenzwerts. Der laufende Versuch ist folgendermaßen zu bewerten: Es liegt ein indifferentes Ergebnis der Hochrechnung vor. Der Versuch ist über die restliche Dauer von 50min bis zum Erreichen des Gesamtwertes fortzuführen.
- Liegt der gemessene Auspresswert nach 10 Minuten im Bereich 3, so ist zu erwarten, dass der angegebene Grenzwert mit großer Wahrscheinlichkeit überschritten wird. Für den laufenden Versuch kann folgendes abgeleitet werden: Das Ergebnis des Versuchs ist mit großer Wahrscheinlichkeit negativ. Der Versuch kann abgebrochen werden.

Die oben angeführten Interpretationen der Wertebereiche stellen somit das Ergebnis der Hochrechnung mit fixem Grenzwert dar.

5.5.2.4 Hochrechnung mit gegenwärtig bestimmter Speicherkonstante

Eine dritte Möglichkeit zur Hochrechnung der Gesamtwasserabgabe stellt jene mit gegenwärtig bestimmter Speicherkonstante dar. Da diese Methode einen nicht trivialen Rechenansatz beinhaltet, ist sie nicht für den Baustelleneinsatz geeignet. Sie bietet jedoch die Möglichkeit, die Auspresskurve eines aus irgendwelchen Gründen vorzeitig abgebrochenen Versuchs im Nachhinein unter Verwendung eines Rechners zu modellieren.

Zunächst ist es erforderlich den Anfangswert $a(t_0)$ in Abhängigkeit der Auspresswerte nach 10 oder 15 Minuten Versuchszeit zu bestimmen. Dies erfolgt mit Hilfe des Diagramms der Abb. 5.24 oder der dazugehörigen Formeln. Nach der Bestimmung des Anfangswerts $a(t_0)$ ist die Speicherkonstante k die einzige verbleibende Unbekannte der Speichergleichung. Diese lässt sich nun zu jedem Zeitpunkt t und dem dazugehörigen Auspresswert $Q(t)$ errechnen.

Die Schwierigkeit besteht jetzt darin, die Speicherkonstante k , welche aus der folgenden Gleichung nicht explizit ausgedrückt werden kann, zu bestimmen.

$$Q(t) = -k \cdot a(t_0) \cdot e^{\frac{-t}{k}} \quad (5.12)$$

Die durchzuführende Rechenoperation kann nur iterativ gelöst werden und ist deshalb nicht für den Baustelleneinsatz geeignet. Die iterative Bestimmung der Speicherkonstanten k stellt jedoch beim Einsatz der richtigen Berechnungssoftware kein Hindernis dar.

Nachdem die aktuelle Speicherkonstante k für den Abbruchzeitpunkt bestimmt wurde, kann jeder folgende Auspresswert berechnet werden. Die Qualität der Hochrechnung nimmt naturgemäß mit fortschreitender Versuchsdauer zu. Hochrechnungen dieser Form nach sehr kurzer Versuchszeit bringen kann zufrieden stellendes Ergebnis, da in den meisten Fällen eine zu niedrige Speicherkonstante ermittelt wird. Für die nachträgliche Modellierung eines verbleibenden Versuchszeitraums von rund 20 Minuten ist diese Methode durchaus geeignet.

5.6 Anwendung des Prognosemodells

5.6.1 Allgemeines

Für die Erstellung des Prognosemodells wurden die Ergebnisse von 42 Baustellenversuchen herangezogen. Diese Ergebnisse wurden in Form von Regressionsanalysen in das Prognosemodell eingebaut. Soll nun das vorhandene Modell auf dessen Zuverlässigkeit überprüft werden, ist es notwendig, neue, vom Modell unabhängige Versuchsergebnisse heranzuziehen. Deshalb wurden nach Fertigstellung des Prognosemodells weitere Baustellenversuche durchgeführt. Im Zuge der Versuche sollte nicht nur die Zuverlässigkeit der Vorhersage, sondern auch die Benutzerfreundlichkeit der Diagramme unter schwierigen Baustellenbedingungen untersucht werden. Diese zu Testzwecken abgewickelten Versuche wurden mit der gesamten Versuchszeit von 60 Minuten durchgeführt.

5.6.2 Beurteilung der Zuverlässigkeit

Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit des Prognosemodells wurden 28 vom Modell unabhängige Ergebnisse von Auspressversuchen herangezogen. Diese Versuche wurden auf anderen als im Modell verwendeten Baustellen mit vom Modell unterschiedlichen Betonlieferanten durchgeführt, um das Kriterium der Unabhängigkeit zu erfüllen.

Um die Zuverlässigkeit des Prognosemodells bewerten zu können, wurden die Ergebnisse dieser Auspressversuche in die Diagramme zur Hochrechnung Abb. 5.26 und 5.27 eingetragen. Im Diagramm liegen die ermittelten Ergebnisse als Schnittpunkt des auf der Abszisse aufgetragenen 10- oder 15- Minuten- Auspresswerts mit dem auf der Ordinate aufgetragenen 60 Minuten- Auspresswert vor. Liegt der Großteil der Schnittpunkte innerhalb des Konfidenzintervalls, kann das erstellte Prognosemodell als hinreichend beurteilt werden.

Die folgenden Abb. 5.30 und 5.31 zeigen die in das Diagramm zur Hochrechnung eingetragenen Ergebnisse der neuen Auspressversuche. Die Ergebnisse sind als rote Punkte in den Diagrammen dargestellt.

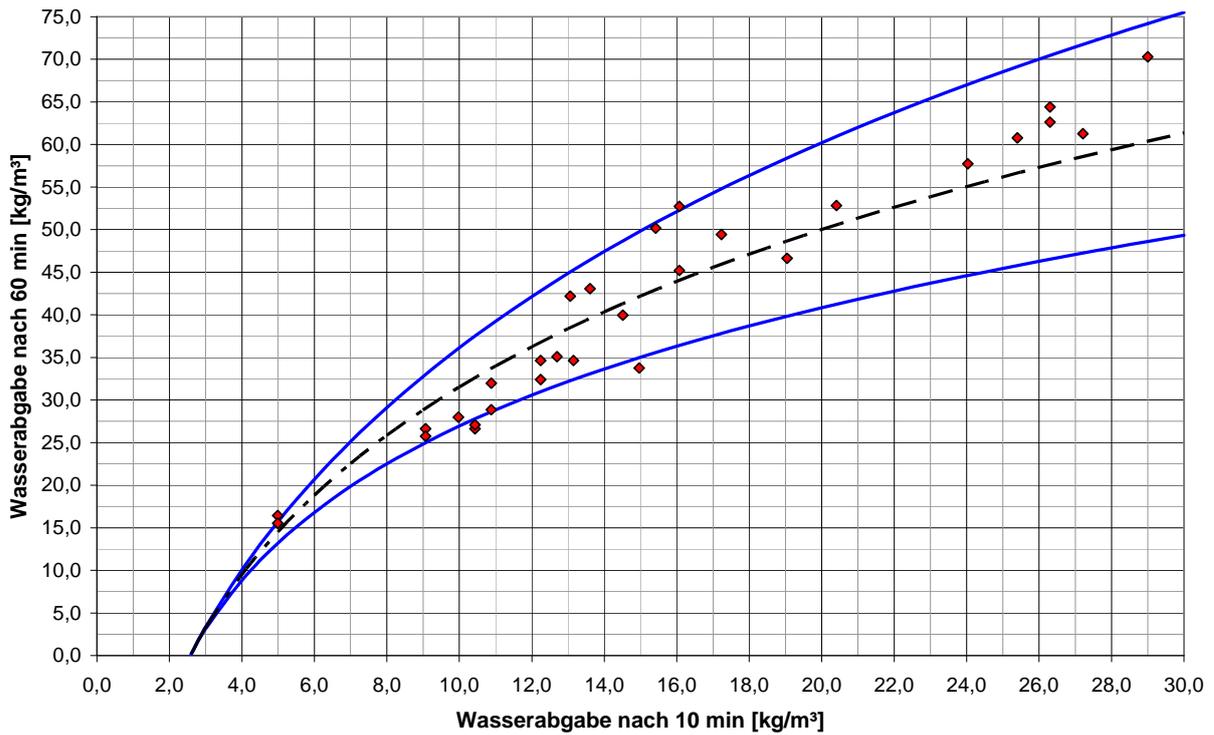


Abb. 5.30 Überprüfung der Zuverlässigkeit des 10 Minuten- Diagramms

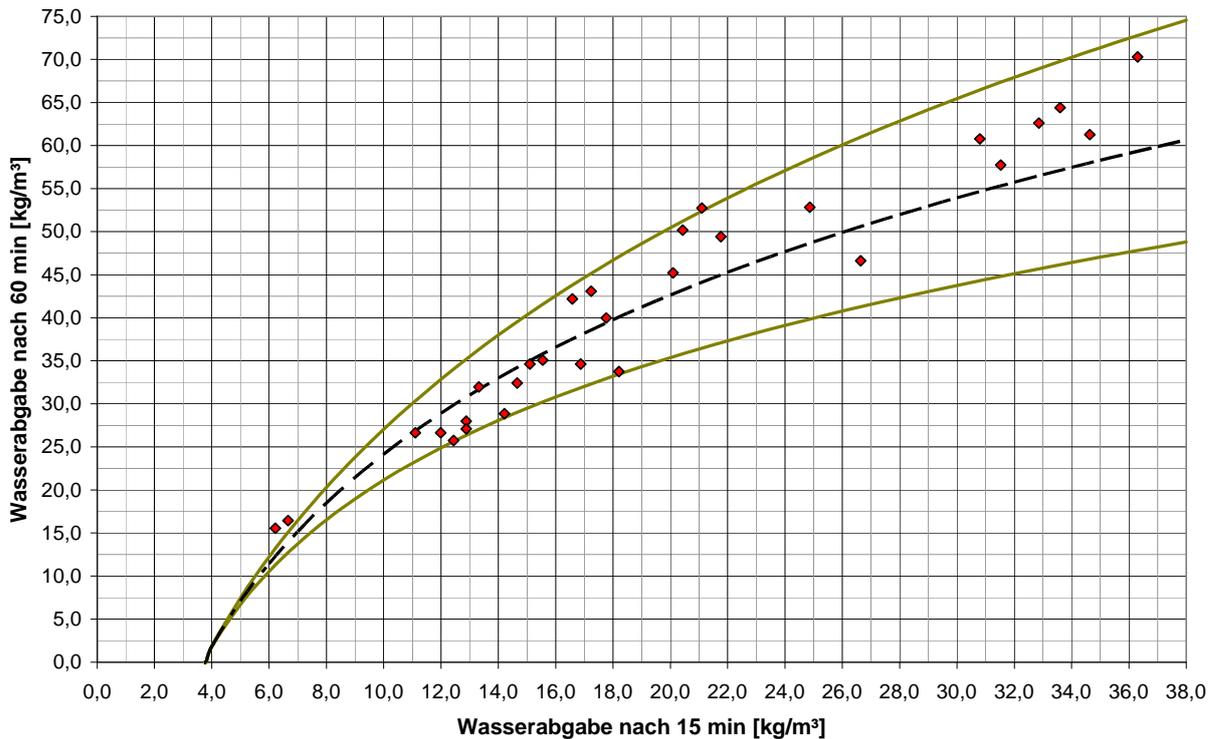


Abb. 5.31 Überprüfung der Zuverlässigkeit des 15 Minuten- Diagramms

Die in Form von roten Punkten dargestellten Ergebnisse der durchgeführten Versuche liegen zum Großteil innerhalb der angegebenen Konfidenzintervalle. Aus diesem Grund ist die Zuverlässigkeit des erstellten Prognosemodells bewiesen.

5.6.3 Beurteilung der Benutzerfreundlichkeit

Im Gegensatz zur Beurteilung der Zuverlässigkeit kann die Benutzerfreundlichkeit nicht direkt mit quantitativen Parametern beschrieben werden. Um die subjektiven Eindrücke des Benutzers ordnen zu können wurden der Zeitaufwand für die Hochrechnung, der notwendige Einsatz von Hilfsmitteln (Zeichengeräte,...) und die Komplexität der Durchführung bewertet. Für diese Bewertung wurde von zwei Laboranten, welche nicht mit dem Prognosemodell vertraut waren, das Diagramm zur Hochrechnung unter Baustellenbedingungen angewandt und anschließend nach den oben genannten Schwerpunkten beurteilt. Die Beurteilung erfolgte nach folgenden Bewertungsstufen: sehr gering, gering, mäßig, aufwendig, sehr aufwendig.

Als Ergebnis dieser Beurteilung kann folgendes festgehalten werden:

- Der Zeitaufwand für die Durchführung der Hochrechnung wurde mit „sehr gering“ bewertet.
- Der Einsatz von Hilfsmitteln (Zeichengeräte, ...) wurde ebenfalls mit „sehr gering“ bewertet. Die Hochrechnung kann Näherungsweise auch ohne Markierungen auf dem Diagrammblatt durchgeführt werden.
- Die Komplexität der Durchführung wurde mit „gering“ bewertet. Das Diagramm zur Hochrechnung war zum Teil selbsterklärend. Nach dem Erläutern der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten stellte die Durchführung der Hochrechnung kein Problem dar.

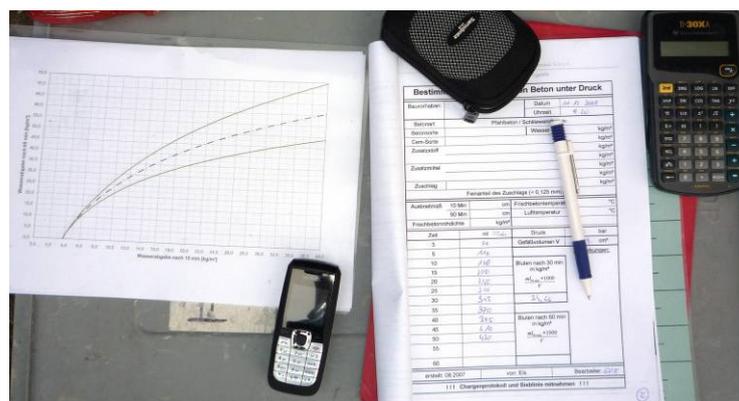


Abb. 5.32 Anwendung des Diagramms zur Hochrechnung unter Baustellebedingungen

Das eingangs erwähnte Ziel der Benutzerfreundlichkeit für die Anwendung des Prognosemodells konnte somit erreicht und bestätigt werden.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 42 Auspressversuche mit der Betonfilterpresse BPV auf Bohrpfahlbaustellen in Österreich durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde der zu prüfende Beton mit einem Druck von 3 bar beaufschlagt. Auf Basis dieser Versuchsergebnisse wurde ein Prognosemodell erstellt. Durch die Anwendung dieses Prognosemodells kann schon nach kurzer Versuchszeit eine qualifizierte Aussage über das Ergebnis des Auspressversuchs nach 60 Minuten getroffen werden. Somit ist es möglich, die Betonfilterpresse BPV auf Baustellen zur Überprüfung der Stabilität von Transportbeton vor dessen Einbau heranzuziehen.

Dieses Prognosemodell besteht aus einem physikalischen Ansatz und empirischen Zusammenhängen zwischen den vorkommenden Parametern. Die grundsätzliche Überlegung war, das Verhalten des in der Betonfilterpresse eingebauten Betons hinsichtlich der Wasserabgabe als Linearen Speicher ohne Zuflusskomponente zu beschreiben. Somit ist die Wasserabgabe eines Betonelements in der Filterpresse nur vom Wassergehalt jenes Elements abhängig. Während des Versuchs nimmt der Wassergehalt im Betonelement kontinuierlich ab, was wiederum eine Verkleinerung der Ausflusskomponente bewirkt. Am Ende des Versuchs ist das gesamte frei verfügbare Wasser ausgepresst und die Ausflusskomponente erreicht den Wert Null.

Das System des Linearen Speichers ohne Zuflusskomponente wird durch zwei Parameter beschrieben. Diese sind der Anfangswert und die Speicherkonstante. Der Anfangswert ist in seiner physikalischen Form der Ausfluss einer Wassermenge pro Zeiteinheit und ist der zum Zeitpunkt Null auftretende Wasserausfluss aus dem Betonelement. Die Speicherkonstante beschreibt das Wasserrückhaltevermögen des Betons. Im Prognosemodell steht eine große Speicherkonstante für gutes Wasserrückhaltevermögen.

Für die Erstellung des Prognosemodells wurden zunächst für jeden durchgeführten Auspressversuch die dazugehörigen Parameter *Anfangswert* und *Speicherkonstante* berechnet (s. Anhang A). Anschließend wurden durch Regressionsrechnungen Zusammenhänge zwischen den im Prognosemodell vorkommenden Parametern gesucht. Es konnte eine Abhängigkeit des Anfangswertes vom Auspresswert nach 10 bzw. 15 Minuten Versuchszeit und ein Zusammenhang zwischen der Speicherkonstanten und dem Anfangswert festgestellt werden.

Dies ermöglicht zunächst die Ermittlung des Anfangswerts auf Grundlage der ausgepressten Wassermenge nach 10 bzw. 15 Minuten Versuchszeit. Anschließend kann die Speicherkonstante über den Zusammenhang zum zuvor ermittelten Anfangswert errechnet werden. Nachdem beide Modellparameter gefunden sind, kann unter Anwendung der Speichergleichung auf den Auspresswert nach 60 Minuten Versuchszeit hochgerechnet werden.

Um die Hochrechnung möglichst einfach zu gestalten, wurden die gesamten Berechnungen für das Auffinden jener Parameter in einem einzigen Diagramm zusammengefasst. Durch die Anwendung dieses Diagramms sind die für die Hochrechnung notwendigen Parameter nicht explizit zu bestimmen, was die Ergebnisfindung deutlich beschleunigt. Es ist der Eingangswert (Auspresswert nach 10 oder 15 Minuten Versuchszeit) auf der Ordinate aufzutragen und der dazugehörige Bereich (90%- Konfidenzintervall) des hochgerechneten Werts kann auf der Abszisse abzulesen werden. Als Ergebnis der grafisch durchgeführten Hochrechnung kann ein Wertebereich angegeben werden, indem der hochgerechnete 60- Minuten- Wert mit großer Wahrscheinlichkeit zu liegen kommt.

Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit des Prognosemodells wurden 28 vom Modell unabhängige Ergebnisse von Auspressversuchen herangezogen und in das Diagramm zur Hochrechnung eingetragen. Ein Großteil der Schnittpunkte liegt innerhalb des angegebenen Konfidenzintervalls. Damit kann die Zuverlässigkeit des Prognosemodells bestätigt werden.

Ein wichtiges Kriterium für die Erstellung des Prognosemodells war, dass dieses unter Baustellenbedingungen einfach und schnell angewendet werden kann. Durch das Zusammenfügen aller Berechnungsschritte des Prognosemodells in ein Diagramm konnte eine rasche und einfache Anwendung ermöglicht werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde das Diagramm zur Hochrechnung auf Baustellen eingesetzt und die Anwendbarkeit von dessen Benutzern positiv bewertet.

Durch die Anwendung des Prognosemodells in Verbindung mit der Betonfilterpresse BPV steht ein Instrument zur Verfügung, Beton hinsichtlich seiner Stabilität unter Druck vor dem Einbau zu überprüfen, um Schadensbilder zu vermeiden.

7. Literaturverzeichnis

BÜCHER:

- [1] P. GRÜBL, H. WEIGLER, S. KARL: „Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften“ 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- [2] A. PEKAREK: „Untersuchungen zum Bluten weicher Betone im Spezialtiefbau“ Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien, 2007
- [3] G. GRUBER: „Druckverhältnisse bei Betonierarbeiten mit weichen Betonen im Spezialtiefbau“ Diplomarbeit an der Technischen Universität, Wien 2008
- [4] H.O. BUJA: „Handbuch des Spezialtiefbaus- Verfahren und Geräte“ 2. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 2001
- [5] P. PREINDL: „Spezialtiefbau“ Vorlesungsunterlagen an der Universität für Bodenkultur, Wien, 2006
- [6] U. MANAIK: „Hydrologie und Wasserwirtschaft“ 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2005
- [7] P. NACHTNEBEL: „Hydrologie“ Studienblätter an der Universität für Bodenkultur, Wien, 2004
- [8] F. KONECNY: „Statistik für die Studienrichtung Kulturtechnik und Wasserwirtschaft“ Studienblätter an der Universität für Bodenkultur, Facultas Verlag, Wien, 2003

NORMEN:

- [9] ÖNORM B4710-1: „Beton- Teil1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis“ Ausgabe 2007, ON Österreichisches Normungsinstitut, Heinestraße 38, 1020 Wien
- [10] ÖNORM B3303: „Betonprüfung“ Ausgabe 2002, ON Österreichisches Normungsinstitut, Heinestraße 38, 1020 Wien

- [11] ÖNORM EN12350-1: „Prüfung von Frischbeton – Teil 1: Probenahme“ Ausgabe 2000, ON Österreichisches Normungsinstitut, Heinestraße 38, 1020 Wien
- [12] ÖNORM EN12350-5: „Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß“ Ausgabe 2000, ON Österreichisches Normungsinstitut, Heinestraße 38, 1020 Wien
- [13] ÖNORM EN12350-6: „Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte“ Ausgabe 2000, ON Österreichisches Normungsinstitut, Heinestraße 38, 1020 Wien
- [14] ÖNORM EN12350-7: „Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalte Druckverfahren“ Ausgabe 2000, ON Österreichisches Normungsinstitut, Heinestraße 38, 1020 Wien

ZEITSCHRIFTEN:

- [15] G. STEINDL: „Bluten von Pfahl- und Schlitzwandbeton“ Förderverein der Freunde des Institutes für Geotechnik, Mitteilungsblatt Ausgabe 2, 2006
- [16] R. RAVINDRARAJAH: „Bleeding of fresh concrete containing cement supplementary Materials“, The Ninth east Asia-Pacific Conference on Structural engineering and Construction, Bali / Indonesia, 2003
- [17] R. PAVIOVICI: „Testing and modelling of fresh concrete rheology“, The annals of Dunarea de Jos University of Galati fascicle XIV mechanical engineering, 2002
- [18] F. LARRARD: „A method for concrete bleeding measurement“, Scientific report – Materials and structures, France, 2004
- [19] M. SAWAIDE: „Rheological analysis of the behavior of bleed water from freshly cast mortar and concrete“, Shimizu Tech. Res. Bull. No. 12, 1993
- [20] L. JOSSERAND: „Bleeding of concrete as an ageing consolidation process“, Cement and concrete research, France, 2004
- [21] A. LEEMANN: „Sedimentation and bleeding of concrete“, Cem Suisse, Dübendorf, 2007

INTERNET:

- [22] Homepage der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie VÖZ,
http://www.zement.at/Service/literatur/fileupl/Weiche_Betone_Macht_Nischer_1_06.pdf,
zugegriffen am 05.01.2008
- [23] Homepage der Universität Münster, Vorlesungsunterlagen
http://ifgivor.unimuenster.de/vorlesungen/Num_Modellierung/LinearSpeicher/LinearSpeicher.html,
zugegriffen am 06.08.2008
- [24] Homepage Lafarge Perlmöser GmbH, Gumpendorferstraße 19-21, 1061 Wien
<http://www.lafarge.at/problemlösungen/bluten.html>, zugegriffen am 12.01.2009
- [25] Homepage Wopfinger Baustoffindustrie GmbH, 2754 Waldegg/Wopfing
www.slagstar.com, zugegriffen am 17.07.2008
- [26] Homepage Herbert Fischer AG, Gstaldenstraße 14, 9442 Berneck
<http://www.frisch-international.com/laborgeraete/documents/frischbeton.html>,
zugegriffen am 09.01.2009
- [27] Homepage Heinze GmbH, Bremerweg 184, 29223 Celle
http://www.heinze.de/hbo/typID_528/obID_5018698/module_1000/modulePageID_3/context_1/puzzolan.html,
zugegriffen am 21.01.2009

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Grenzsieblinie gem. ÖNORM B 4710-1 [9].....	4
Abb. 3.1 Probenahme aus Fahrmischer.....	11
Abb. 3.2 Entmischung von Beton [2].....	12
Abb. 3.3 Geräte zur Bestimmung des Ausbreitmaßes	14
Abb. 3.4 Messung des Ausbreitmaßes [12]	15
Abb. 3.5 Prinzip des Druckausgleichsverfahrens [1].....	17
Abb. 3.6 Luftporentopf [26].....	18
Abb. 3.7 Erforderliche Trocknungszeit [10]	19
Abb. 4.1 Bohrwerkzeuge: Bohrschnecke, Bohreimer u. Greifer [5].....	22
Abb. 4.2 Hydraulische Verrohrungsmaschine: Ansicht / Grundriss [Leffer Produktkatalog]	23
Abb. 4.3 Bohrrohr [5].....	24
Abb. 4.4 Greiferbohrung / Drehbohrung [Grund-, Pfahl- und Sonderbau Archiv].....	25
Abb. 4.5 Schneckenortbetonpfahl SOB [Grund-, Pfahl- und Sonderbau Archiv]	27
Abb. 4.6 Schlitzwand Seilgreifer [Grund-, Pfahl- und Sonderbau Archiv]	29
Abb. 4.7 Schlitzwandherstellung [5].....	31
Abb. 5.1 Bohrpfahlkaries [BPV- Archiv].....	33
Abb. 5.2 Freilegen der Bewehrung [BPV- Archiv]	34
Abb. 5.3 Geschädigtes Schlitzwandelement [BPV- Archiv].....	34
Abb. 5.4 Vergleich der erforderlichen Kornverteilung für höchstmögliche Packungsdichte [22]	36
Abb. 5.5 Messverfahren nach Sawaide [18].....	41
Abb. 5.6 Betonfilterpresse BPV.....	42
Abb. 5.7 Betonfilterpresse BPV gefüllt – Vor Versuchsbeginn.....	43
Abb. 5.8 Betonfilterpresse BPV nach Versuchsbeginn.....	44
Abb. 5.9 Volumenreduktion infolge der Wasserabgabe	44
Abb. 5.10 Auspresskurven	45

Abb. 5.11 Schematische Darstellung eines Einzellinearspeichers.....	48
Abb. 5.12 Lineare Regression.....	49
Abb. 5.13 Schematische Darstellung des modifizierten Einzellinearspeichers	52
Abb. 5.14 Darstellung der Speichergleichung des modifizierten Einzellinearspeichers.....	54
Abb. 5.15 Darstellung des zeitlichen Verlaufs von $Q(t)$	54
Abb. 5.16 Auswertung des Auspressversuches mit der Betonfilterpresse BPV.....	55
Abb. 5.17 Hochrechnung der Auspresskurve.....	55
Abb. 5.18 Ausgleichsrechnung.....	56
Abb. 5.19 Zusammenhang zwischen Wasserabgabe und Anfangswert $a(t_0)$	58
Abb. 5.20 Darstellung unterschiedlicher Auspresskurvenformen.....	59
Abb. 5.21 Zusammenhang zwischen Anfangswert und Speicherkonstanten	60
Abb. 5.22 Linearisierung des Zusammenhangs der Parameter.....	61
Abb. 5.23 Konfidenzintervall für zukünftige Messwerte.....	62
Abb. 5.24 Bestimmung des Anfangswertes	63
Abb. 5.25 Bestimmung der Speicherkonstanten	64
Abb. 5.26 Bestimmung der Gesamtwasserabgabe nach 10 Minuten Versuchszeit.....	66
Abb. 5.27 Bestimmung der Gesamtwasserabgabe nach 15 Minuten Versuchszeit.....	66
Abb. 5.28 Durchführung der Hochrechnung.....	69
Abb. 5.29 Durchführung der Hochrechnung mit fixem Grenzwert.....	70
Abb. 5.30 Überprüfung der Zuverlässigkeit des 10 Minuten- Diagramms.....	74
Abb. 5.31 Überprüfung der Zuverlässigkeit des 15 Minuten- Diagramms.....	74
Abb. 5.32 Anwendung des Diagramms zur Hochrechnung unter Baustellebedingungen.....	75

9. Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Hauptbestandteile des Zements [1]	5
Tab. 2.2 Festigkeitsklassen und Erstarrungsbeginn von Zement [1]	7
Tab. 3.1 Einteilung der Konsistenzklassen nach ÖNORM B 4710-1	14
Tab. 5.1 Mehlkorngelhalte nach ÖNORM B 4710-1 und Bohrpfahrichtlinie.....	37

10. Anhang

Zusammenstellung der Kurvenparameter und Messwerte						
Baustellen- versuch	Kurvenparameter		Messwerte			
	k	a(to)	5 min kg/m ³	10 min kg/m ³	15min kg/m ³	20min kg/m ³
Nr.1	19,28	3,1461	15,42	25,39	32,65	38,55
Nr.2	18,14	3,1709	16,97	25,96	31,45	35,95
Nr.3	31,45	1,2151	6,53	10,88	14,51	17,69
Nr.4	38,78	0,6622	3,63	6,35	9,07	10,70
Nr.5	34,91	1,4004	8,16	12,70	16,96	20,13
Nr.6	44,92	1,0020	6,35	10,16	13,60	16,33
Nr.7	52,62	0,6920	4,35	7,26	9,61	11,61
Nr.8	43,7	0,6946	4,17	7,07	9,43	11,34
Nr.9	56,29	0,5719	2,90	5,44	7,80	9,80
Nr.10	47,84	0,8923	5,42	9,04	12,06	14,47
Nr.11	36,84	1,0439	7,07	10,70	13,42	16,14
Nr.12	62,68	0,4498	2,27	3,63	5,44	7,71
Nr.13	45,82	0,6199	3,50	6,00	8,01	10,01
Nr.14	37,14	0,5248	3,08	4,90	6,71	8,16
Nr.15	36,64	0,8514	4,99	7,98	10,97	12,97
Nr.16	54,21	0,5832	4,00	5,80	7,81	9,81
Nr.17	43,20	0,6588	4,17	6,89	8,89	10,70
Nr.18	42,96	0,5901	3,81	5,99	7,98	9,43
Nr.19	31,22	1,6155	9,07	14,51	19,50	23,13
Nr.20	16,41	3,1562	15,18	22,97	31,46	36,45
Nr.21	23,51	2,2479	13,15	19,05	24,49	29,02
Nr.22	23,11	2,7912	13,98	22,47	28,96	36,95
Nr.23	18,51	3,2279	16,98	24,97	31,46	39,45
Nr.24	17,29	4,0541	20,86	30,84	39,00	48,07
Nr.25	14,28	5,0757	23,58	34,46	47,61	54,42
Nr.26	33,96	1,1023	6,35	10,43	13,60	15,96
Nr.27	16,97	3,5649	17,69	26,30	34,46	41,72
Nr.28	17,82	2,8964	14,06	19,95	28,12	36,28
Nr.29	22,89	1,8128	10,43	15,42	19,05	22,67
Nr.30	15,34	4,3324	19,05	29,93	40,81	48,98
Nr.31	29,21	1,4012	9,98	13,60	16,51	19,23
Nr.32	20,10	2,6094	13,15	19,05	26,30	33,56
Nr.33	32,99	1,3442	7,71	12,70	15,87	18,59
Nr.34	10,88	4,8307	22,22	33,10	38,55	42,17
Nr.35	34,56	0,8153	4,17	7,80	10,16	12,70
Nr.36	19,58	2,7791	14,51	21,77	28,57	34,46
Nr.37	23,41	2,3695	12,24	19,50	25,39	31,74
Nr.38	48,64	1,0284	6,80	9,98	13,15	16,33
Nr.39	16,73	2,7675	13,15	18,59	26,75	32,65
Nr.40	13,67	3,7305	16,33	27,21	35,37	38,09
Nr.41	44,34	0,8795	4,53	7,71	10,43	12,70
Nr.42	11,22	4,4123	18,14	29,02	37,18	40,81

Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 1

Datum: 09.07.2008

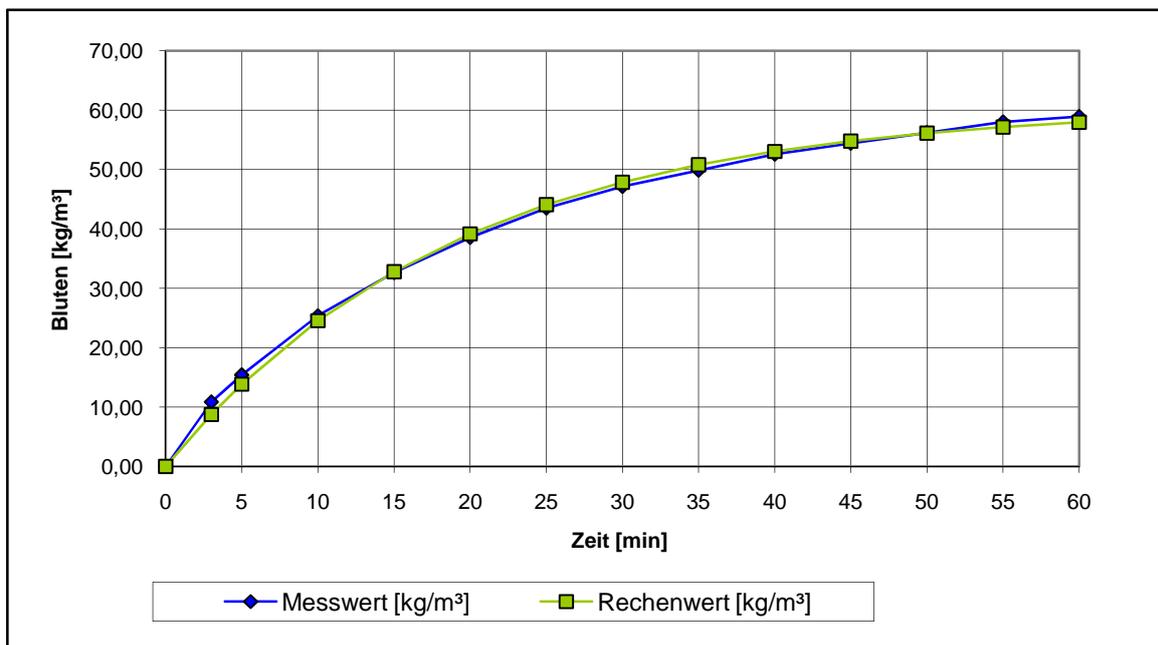
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	120	10,88	8,74	4,59
5	170	15,42	13,86	2,44
10	280	25,39	24,55	0,72
15	360	32,65	32,80	0,02
20	425	38,55	39,16	0,38
25	480	43,53	44,07	0,29
30	520	47,16	47,86	0,49
35	550	49,88	50,78	0,81
40	580	52,60	53,04	0,19
45	600	54,42	54,78	0,13
50	620	56,23	56,12	0,01
55	640	58,04	57,16	0,78
60	650	58,95	57,96	0,98
				11,85

k **19,28**

a(t₀) **3,1461**

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 2

Datum: 09.07.2008

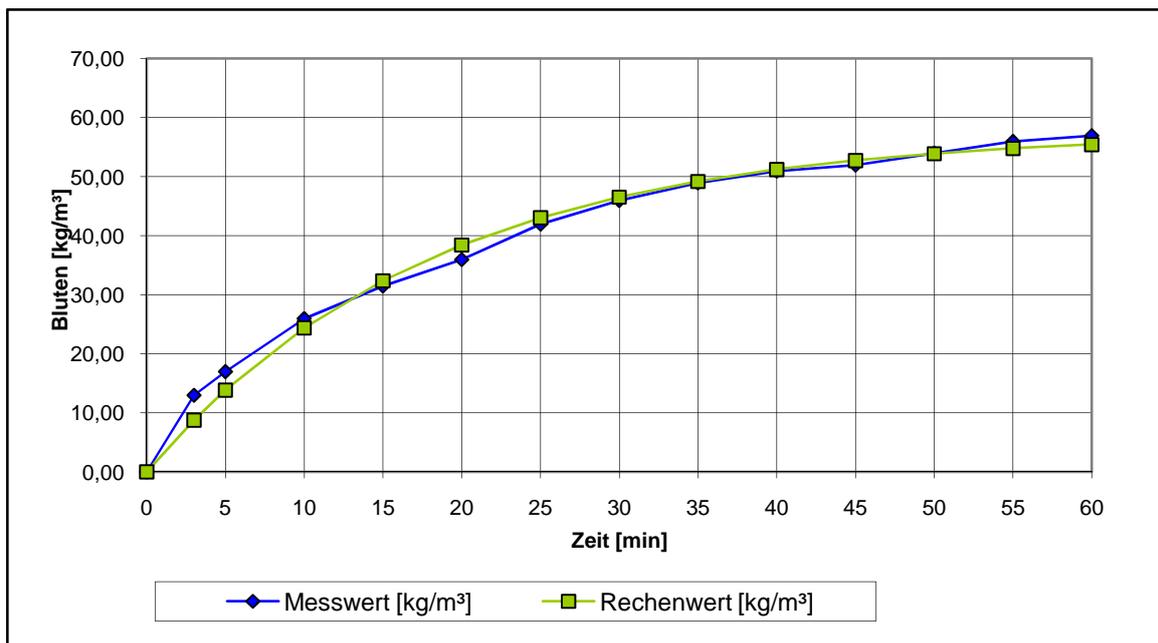
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	130	12,98	8,77	17,75
5	170	16,97	13,86	9,72
10	260	25,96	24,38	2,51
15	315	31,45	32,36	0,83
20	360	35,95	38,43	6,15
25	420	41,94	43,03	1,19
30	460	45,93	46,52	0,35
35	490	48,93	49,17	0,06
40	510	50,92	51,19	0,07
45	520	51,92	52,72	0,63
50	540	53,92	53,88	0,00
55	560	55,92	54,76	1,34
60	570	56,91	55,43	2,21
				42,81

k **18,14**

a(to) **3,1709**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 3

Datum: 22.07.2008

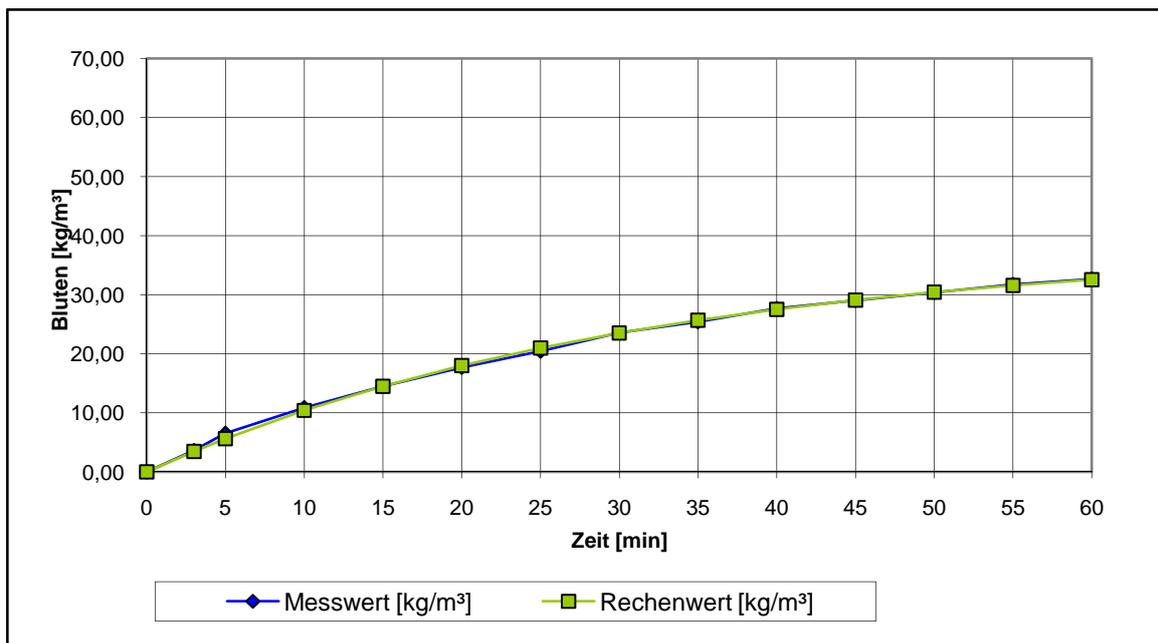
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	40	3,63	3,48	0,02
5	72	6,53	5,62	0,83
10	120	10,88	10,41	0,23
15	160	14,51	14,50	0,00
20	195	17,69	17,98	0,09
25	225	20,41	20,96	0,30
30	260	23,58	23,49	0,01
35	280	25,39	25,66	0,07
40	305	27,66	27,50	0,03
45	320	29,02	29,08	0,00
50	335	30,38	30,42	0,00
55	350	31,74	31,57	0,03
60	360	32,65	32,54	0,01
				1,62

k	31,45
----------	--------------

a(t₀)	1,2151
-------------------------	---------------

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 4

Datum: 23.07.2008

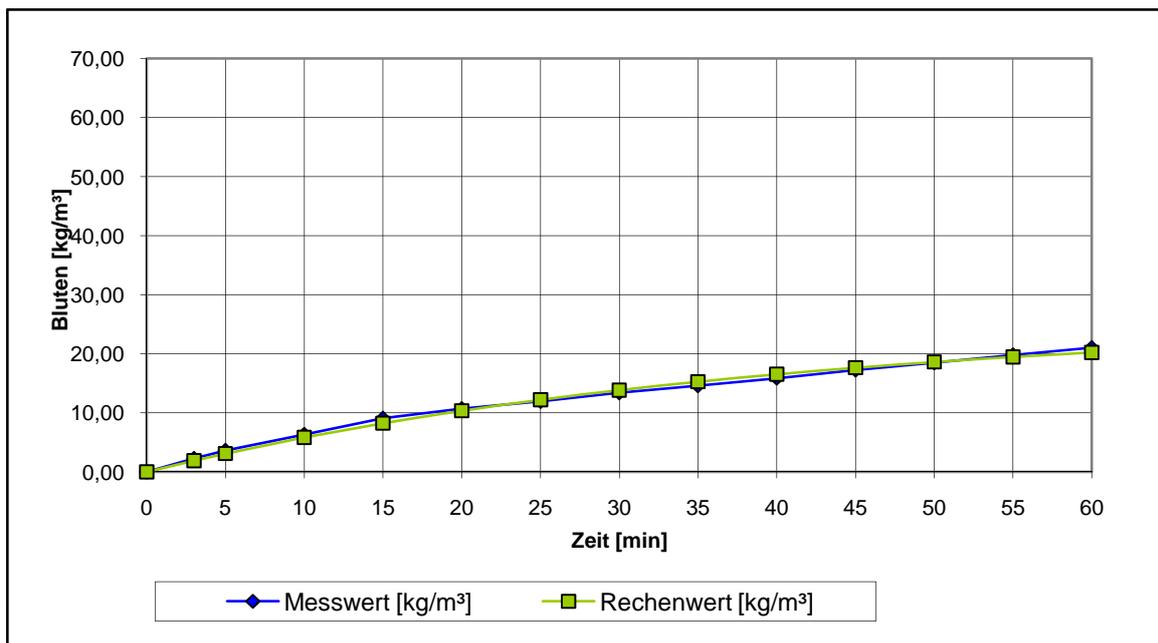
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	25	2,27	1,91	0,13
5	40	3,63	3,11	0,27
10	70	6,35	5,84	0,26
15	100	9,07	8,24	0,69
20	118	10,70	10,35	0,13
25	132	11,97	12,20	0,05
30	148	13,42	13,83	0,17
35	161	14,60	15,27	0,44
40	175	15,87	16,53	0,43
45	190	17,23	17,63	0,16
50	204	18,50	18,61	0,01
55	218	19,77	19,46	0,10
60	232	21,04	20,22	0,68
				3,52

k **38,78**

a(to) **0,6622**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 5

Datum: 29.07.2008

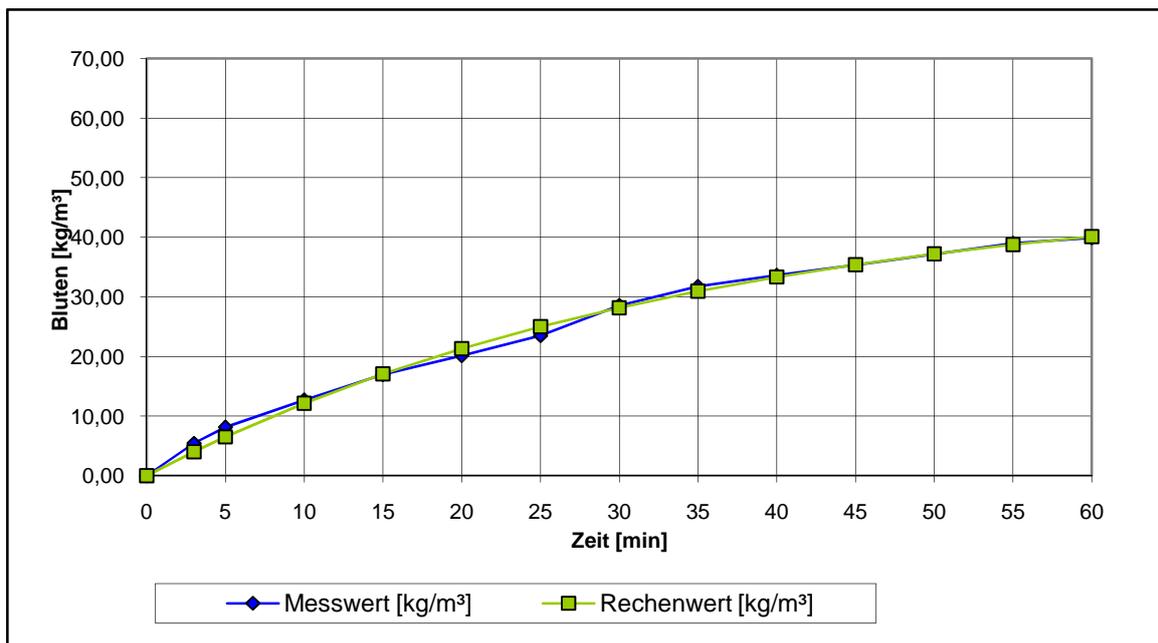
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	60	5,44	4,03	2,00
5	90	8,16	6,52	2,69
10	140	12,70	12,18	0,27
15	187	16,96	17,08	0,01
20	222	20,13	21,32	1,41
25	259	23,49	25,00	2,28
30	315	28,57	28,19	0,14
35	350	31,74	30,95	0,63
40	371	33,65	33,34	0,09
45	390	35,37	35,42	0,00
50	410	37,18	37,22	0,00
55	430	39,00	38,77	0,05
60	440	39,91	40,12	0,05
				9,63

k **34,91**

a(t₀) **1,4004**

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 6

Datum: 29.07.2008

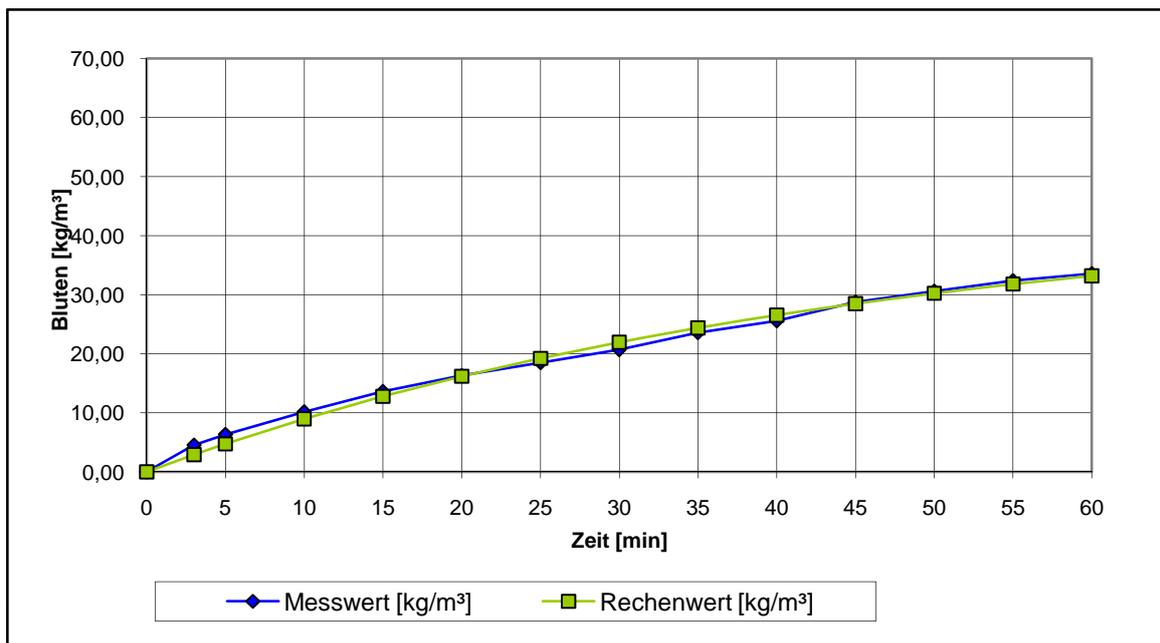
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	50	4,53	2,91	2,65
5	70	6,35	4,74	2,58
10	112	10,16	8,98	1,38
15	150	13,60	12,78	0,68
20	180	16,33	16,17	0,02
25	204	18,50	19,21	0,50
30	228	20,68	21,93	1,56
35	260	23,58	24,36	0,61
40	282	25,58	26,54	0,92
45	317	28,75	28,48	0,07
50	337	30,56	30,22	0,12
55	357	32,38	31,78	0,36
60	370	33,56	33,17	0,15
				11,60

k	44,92
----------	--------------

a(to)	1,0020
--------------	---------------

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 7

Datum: 13.08.2008

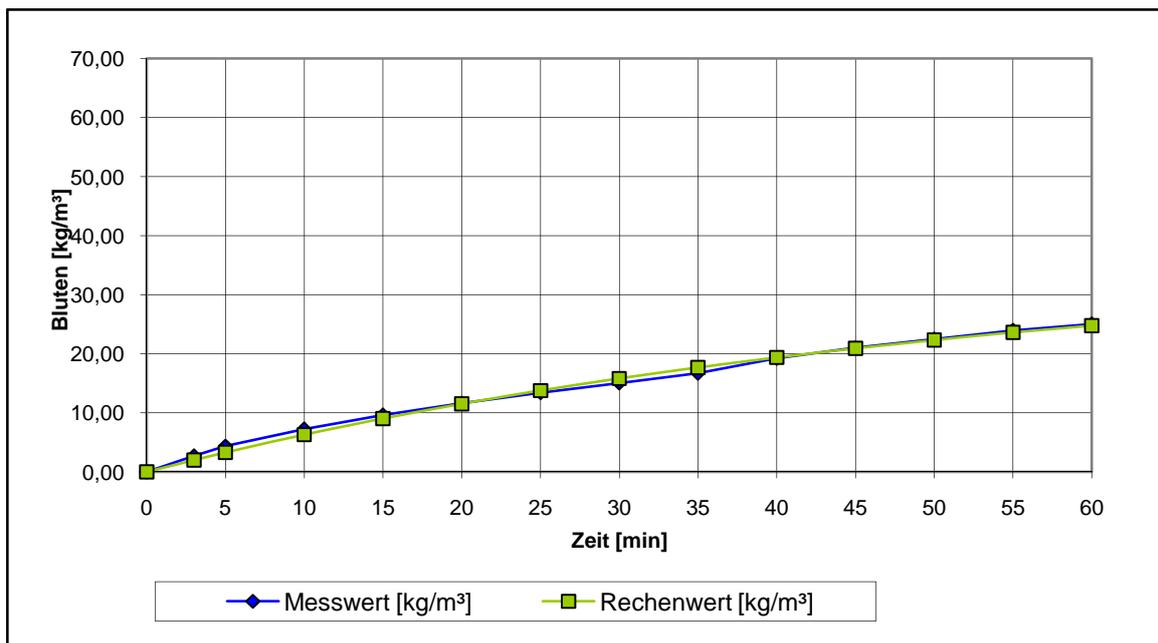
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	30	2,72	2,02	0,49
5	48	4,35	3,30	1,11
10	80	7,26	6,30	0,91
15	106	9,61	9,03	0,34
20	128	11,61	11,51	0,01
25	148	13,42	13,77	0,12
30	166	15,06	15,82	0,59
35	184	16,69	17,69	1,00
40	212	19,23	19,39	0,02
45	232	21,04	20,93	0,01
50	248	22,49	22,33	0,03
55	264	23,94	23,61	0,11
60	276	25,03	24,77	0,07
				4,82

k **52,62**

a(to) **0,6920**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **8**

Datum: **13.08.2008**

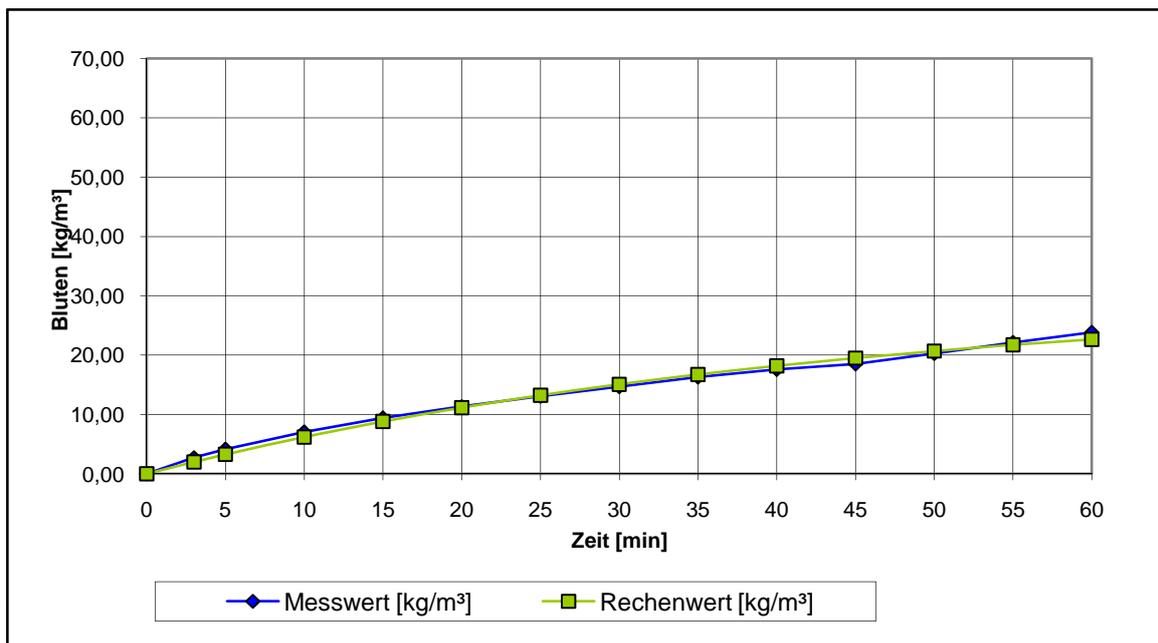
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	30	2,72	2,01	0,50
5	46	4,17	3,28	0,79
10	78	7,07	6,21	0,75
15	104	9,43	8,82	0,38
20	125	11,34	11,15	0,04
25	144	13,06	13,22	0,03
30	162	14,69	15,07	0,15
35	180	16,33	16,73	0,16
40	194	17,59	18,20	0,36
45	204	18,50	19,51	1,02
50	224	20,32	20,68	0,14
55	244	22,13	21,73	0,16
60	263	23,85	22,66	1,42
				5,89

k **43,70**

a(to) **0,6946**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 9

Datum: 21.08.2008

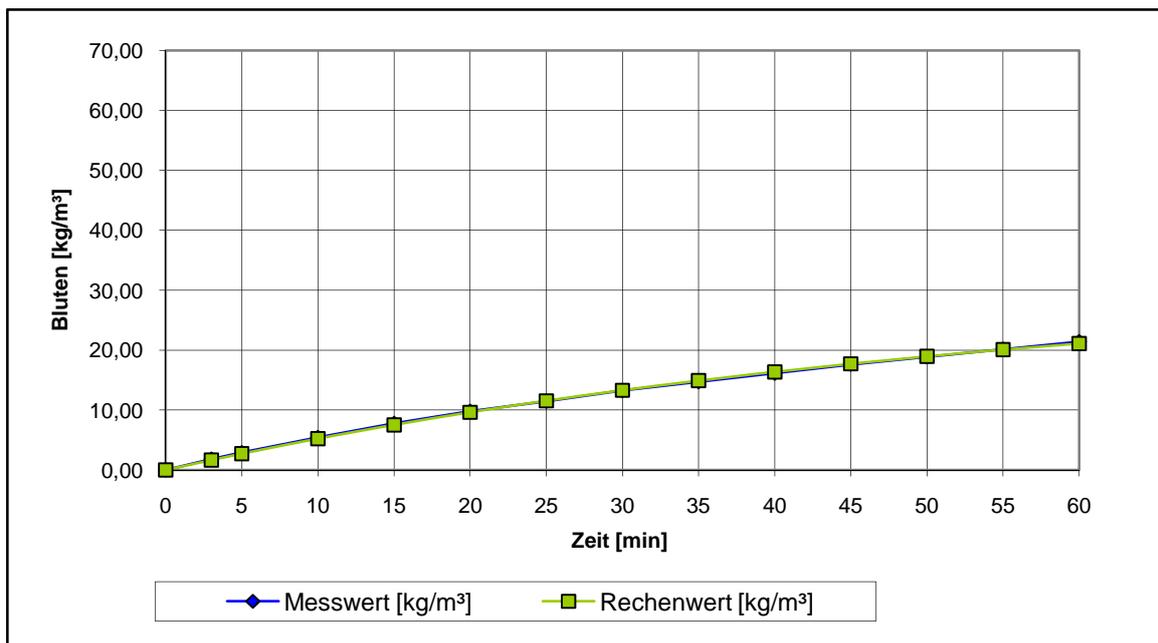
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	20	1,81	1,67	0,02
5	32	2,90	2,74	0,03
10	60	5,44	5,24	0,04
15	86	7,80	7,53	0,07
20	108	9,80	9,63	0,03
25	126	11,43	11,54	0,01
30	146	13,24	13,30	0,00
35	162	14,69	14,91	0,05
40	178	16,14	16,37	0,05
45	194	17,59	17,72	0,02
50	208	18,86	18,95	0,01
55	222	20,13	20,07	0,00
60	236	21,40	21,10	0,09
				0,42

k	56,29
----------	--------------

a(t₀)	0,5719
-------------------------	---------------

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **10**

Datum: **21.08.2008**

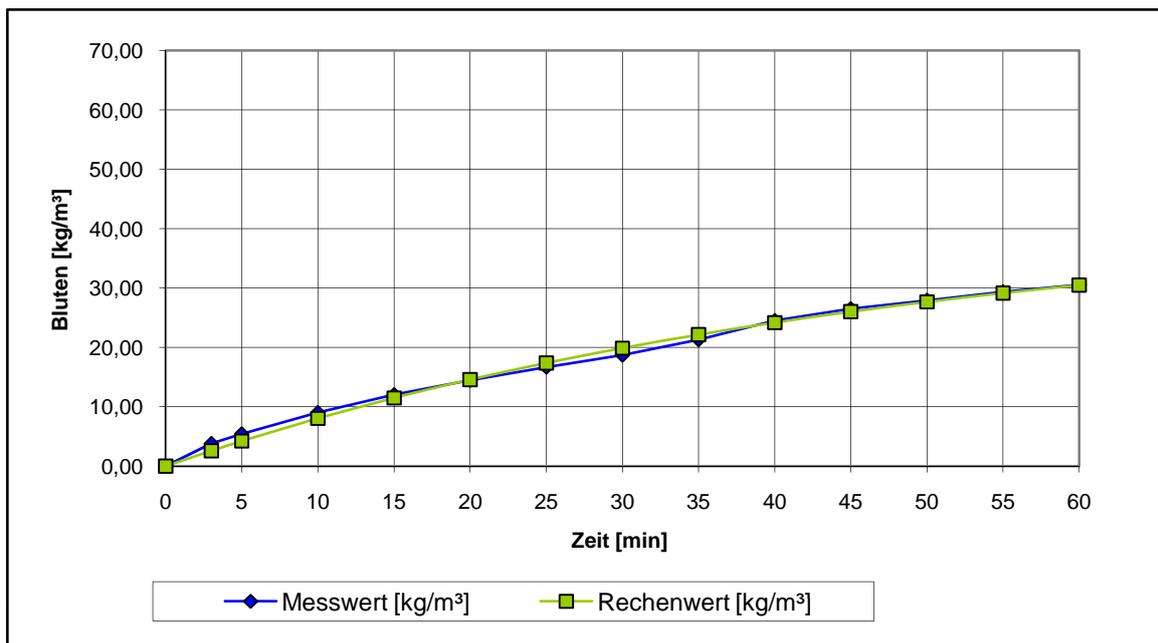
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	38	3,82	2,59	1,50
5	54	5,42	4,24	1,41
10	90	9,04	8,05	0,98
15	120	12,06	11,49	0,32
20	144	14,47	14,58	0,01
25	166	16,68	17,37	0,49
30	186	18,69	19,89	1,44
35	212	21,30	22,15	0,72
40	244	24,51	24,19	0,11
45	264	26,52	26,02	0,25
50	278	27,93	27,68	0,06
55	292	29,33	29,17	0,03
60	304	30,54	30,51	0,00
				7,32

k **47,84**

a(to) **0,8923**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 11

Datum: 21.08.2008

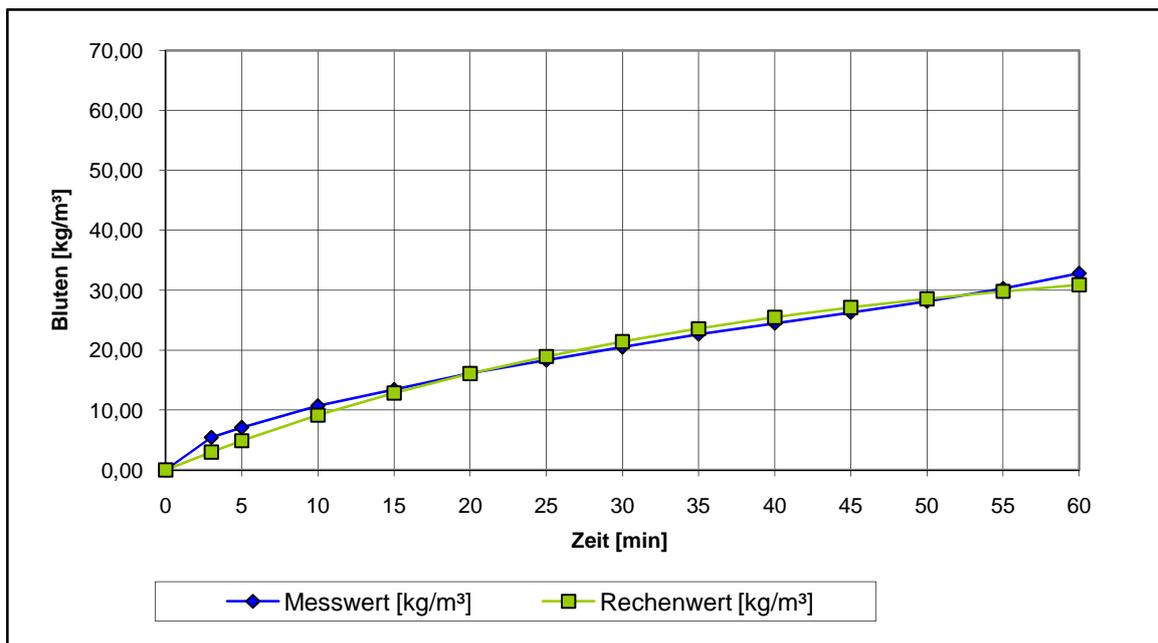
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	60	5,44	3,01	5,92
5	78	7,07	4,88	4,81
10	118	10,70	9,14	2,43
15	148	13,42	12,86	0,31
20	178	16,14	16,11	0,00
25	202	18,32	18,95	0,39
30	226	20,50	21,42	0,86
35	250	22,67	23,59	0,83
40	270	24,49	25,47	0,97
45	290	26,30	27,12	0,67
50	310	28,12	28,56	0,20
55	334	30,29	29,82	0,23
60	362	32,83	30,91	3,67
				21,31

k **36,84**

a(to) **1,0439**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 12

Datum: 24.09.2008

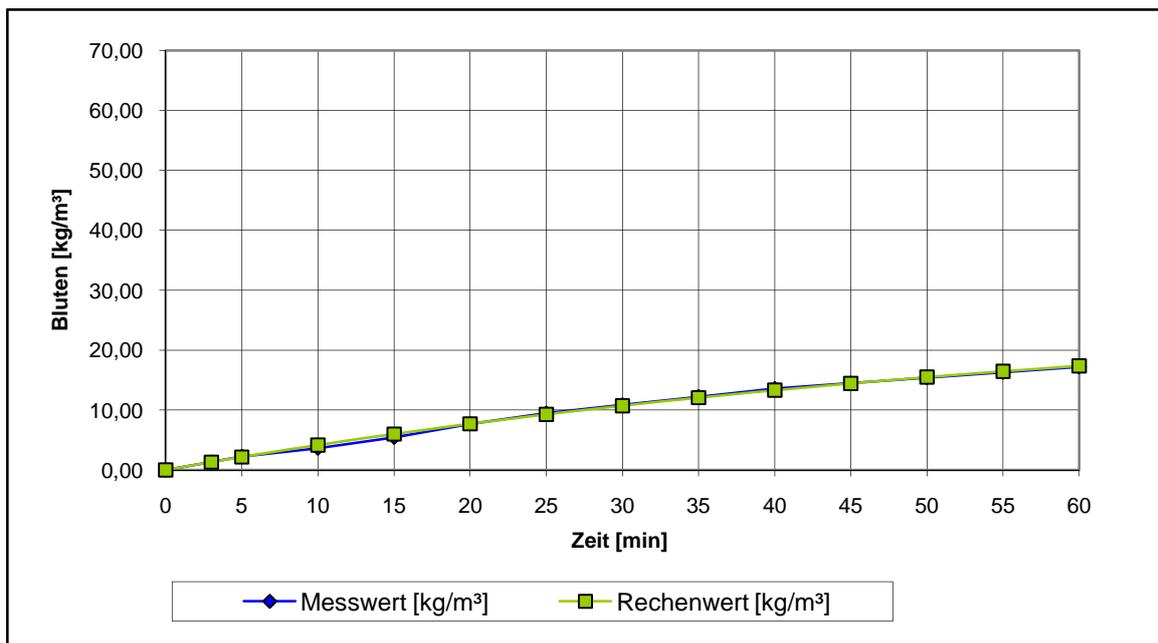
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	15	1,36	1,32	0,00
5	25	2,27	2,16	0,01
10	40	3,63	4,16	0,28
15	60	5,44	6,00	0,31
20	85	7,71	7,70	0,00
25	105	9,52	9,27	0,06
30	120	10,88	10,72	0,03
35	135	12,24	12,06	0,03
40	150	13,60	13,30	0,09
45	160	14,51	14,44	0,00
50	170	15,42	15,50	0,01
55	180	16,33	16,47	0,02
60	190	17,23	17,37	0,02
				0,87

k **62,68**

a(to) **0,4498**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **13**

Datum: **24.09.2008**

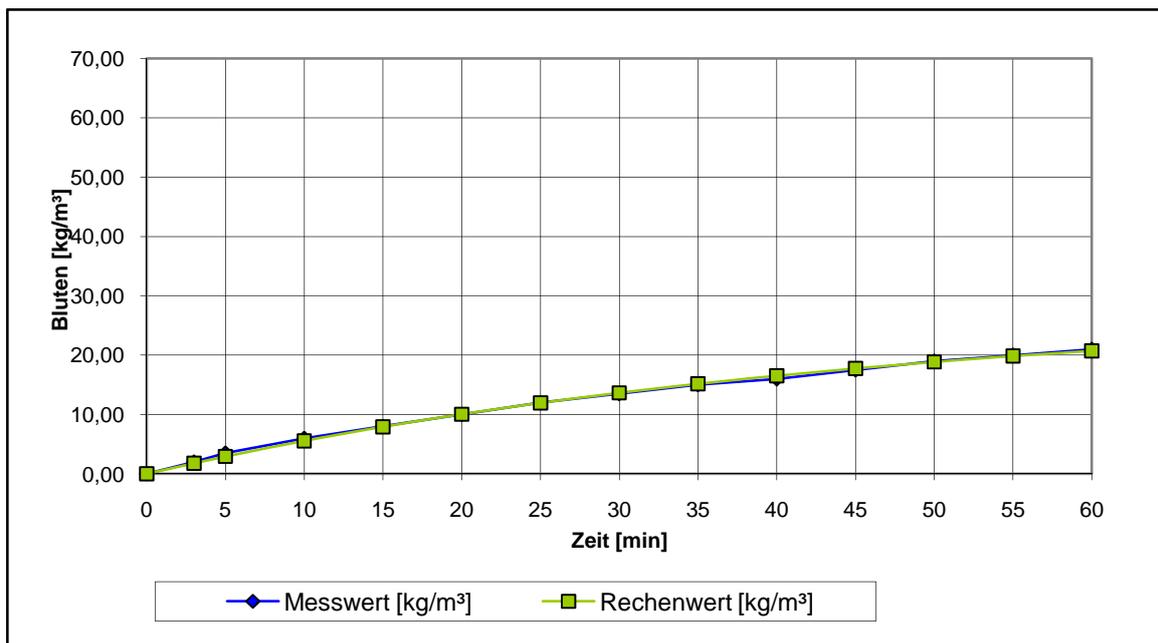
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	20	2,00	1,80	0,04
5	35	3,50	2,94	0,32
10	60	6,00	5,57	0,19
15	80	8,01	7,93	0,01
20	100	10,01	10,05	0,00
25	120	12,01	11,94	0,00
30	135	13,51	13,65	0,02
35	150	15,01	15,17	0,03
40	160	16,01	16,54	0,28
45	175	17,51	17,77	0,06
50	190	19,02	18,87	0,02
55	200	20,02	19,85	0,03
60	210	21,02	20,74	0,08
				1,08

k **45,82**

a(to) **0,6199**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 14

Datum: 24.09.2008

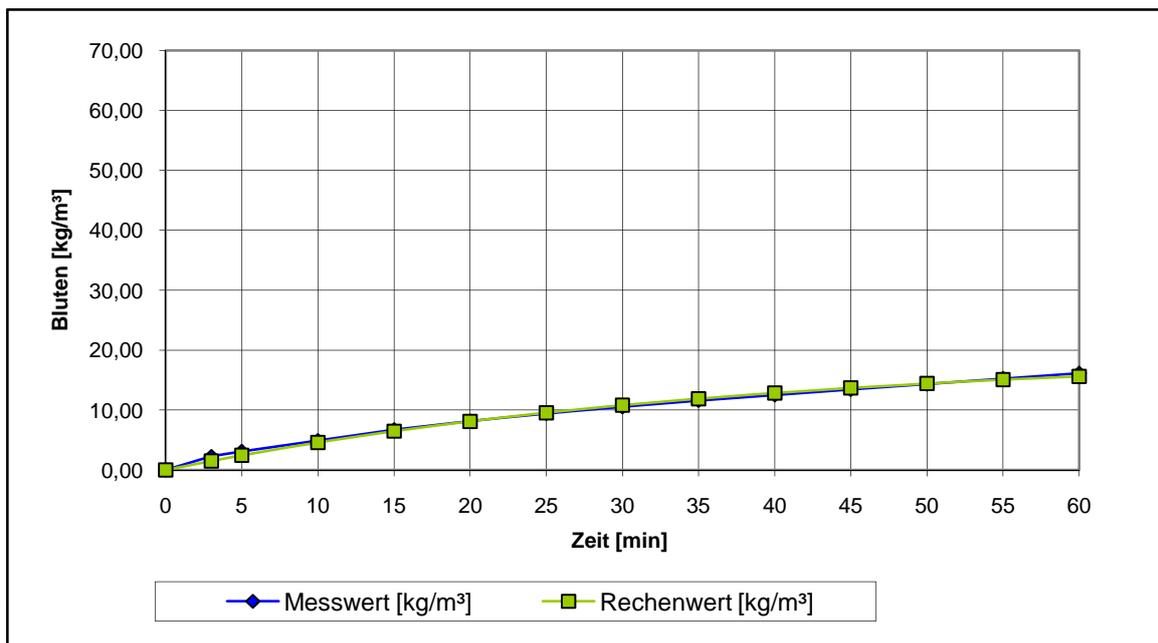
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	25	2,27	1,51	0,57
5	34	3,08	2,46	0,39
10	54	4,90	4,60	0,09
15	74	6,71	6,48	0,06
20	90	8,16	8,12	0,00
25	104	9,43	9,55	0,01
30	116	10,52	10,80	0,08
35	128	11,61	11,90	0,08
40	138	12,52	12,85	0,11
45	148	13,42	13,69	0,07
50	158	14,33	14,42	0,01
55	168	15,24	15,06	0,03
60	178	16,14	15,62	0,28
				1,79

k **37,14**

a(to) **0,5248**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **15**

Datum: **24.09.2008**

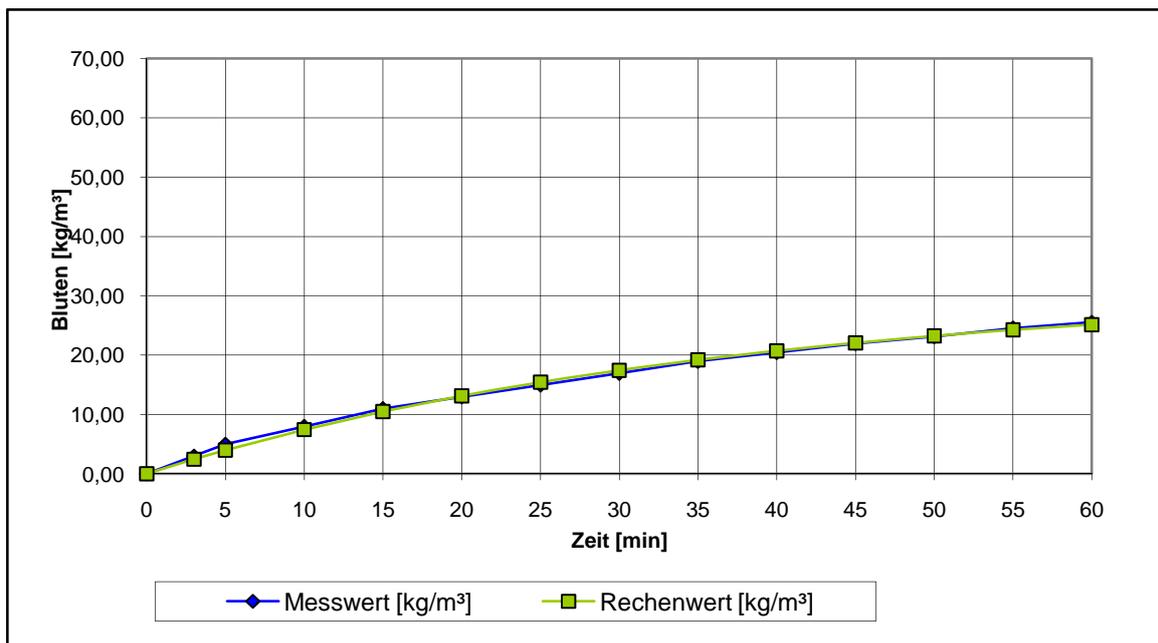
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	30	2,99	2,45	0,29
5	50	4,99	3,98	1,02
10	80	7,98	7,45	0,28
15	110	10,97	10,48	0,24
20	130	12,97	13,12	0,02
25	150	14,97	15,43	0,21
30	170	16,96	17,44	0,23
35	190	18,96	19,19	0,06
40	205	20,45	20,73	0,07
45	220	21,95	22,06	0,01
50	232	23,15	23,23	0,01
55	246	24,54	24,24	0,09
60	256	25,54	25,13	0,17
				2,71

k **36,64**

a(to) **0,8514**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **16**

Datum: **24.09.2008**

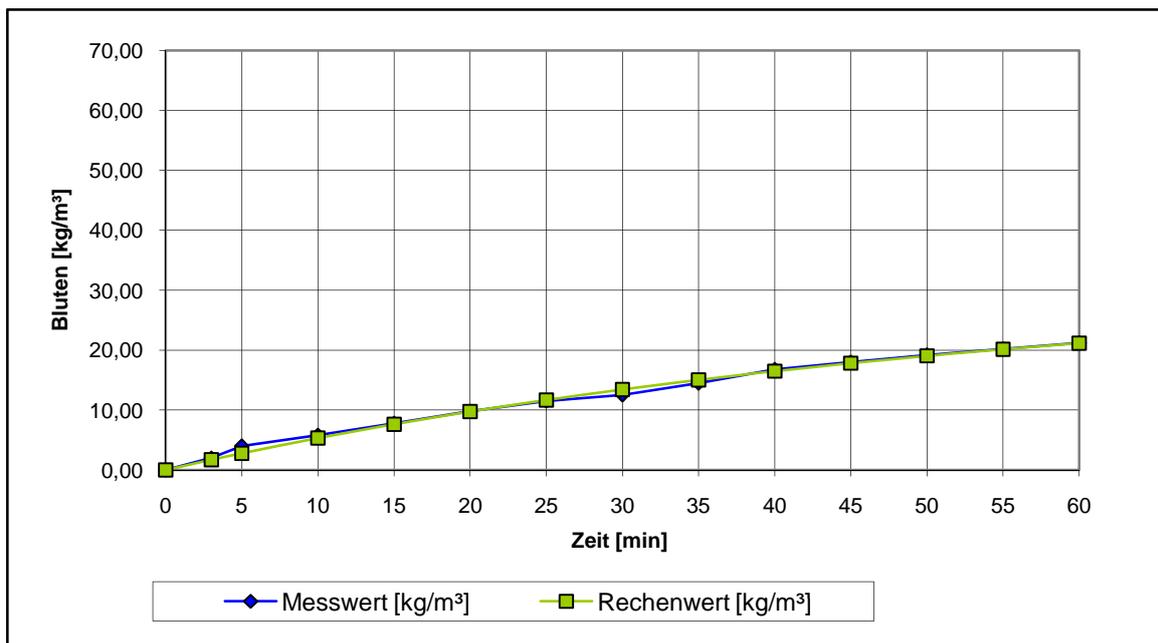
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	20	2,00	1,70	0,09
5	40	4,00	2,79	1,48
10	58	5,80	5,33	0,23
15	78	7,81	7,64	0,03
20	98	9,81	9,75	0,00
25	115	11,51	11,68	0,03
30	125	12,51	13,44	0,86
35	145	14,51	15,04	0,28
40	168	16,81	16,50	0,10
45	180	18,01	17,83	0,03
50	192	19,22	19,05	0,03
55	202	20,22	20,15	0,00
60	212	21,22	21,16	0,00
				3,17

k **54,21**

a(to) **0,5832**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 17

Datum: 24.09.2008

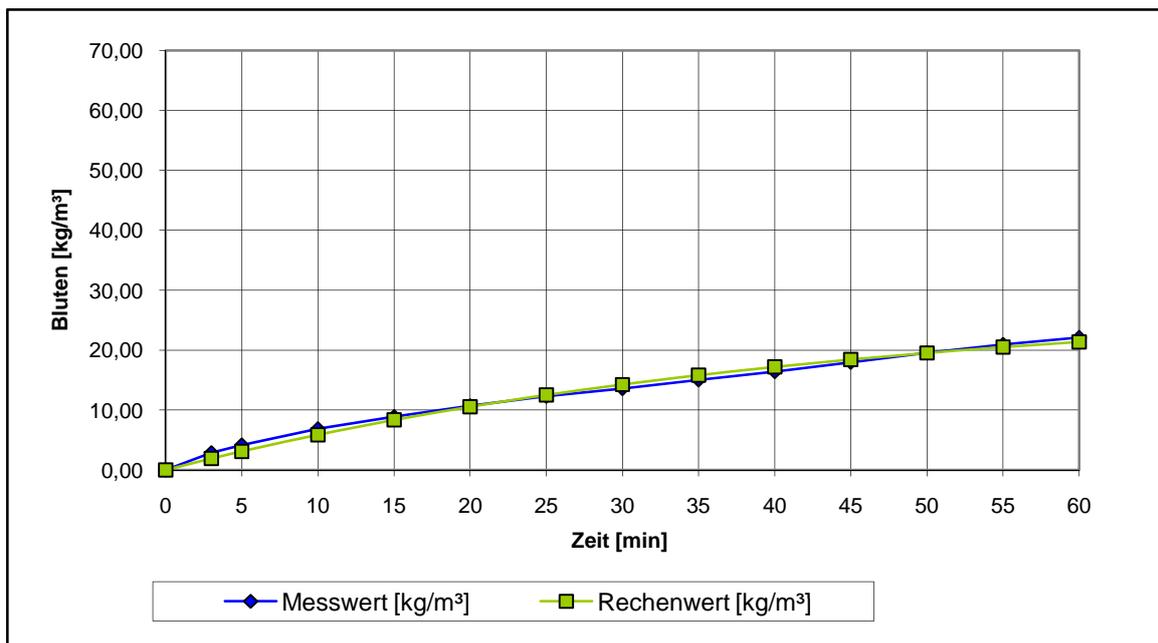
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	32	2,90	1,91	0,99
5	46	4,17	3,11	1,13
10	76	6,89	5,88	1,02
15	98	8,89	8,35	0,29
20	118	10,70	10,55	0,02
25	136	12,33	12,50	0,03
30	150	13,60	14,25	0,41
35	166	15,06	15,80	0,55
40	181	16,42	17,18	0,59
45	198	17,96	18,42	0,21
50	216	19,59	19,51	0,01
55	231	20,95	20,49	0,21
60	244	22,13	21,36	0,59
				6,06

k **43,20**

a(to) **0,6588**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **18**

Datum: **24.09.2008**

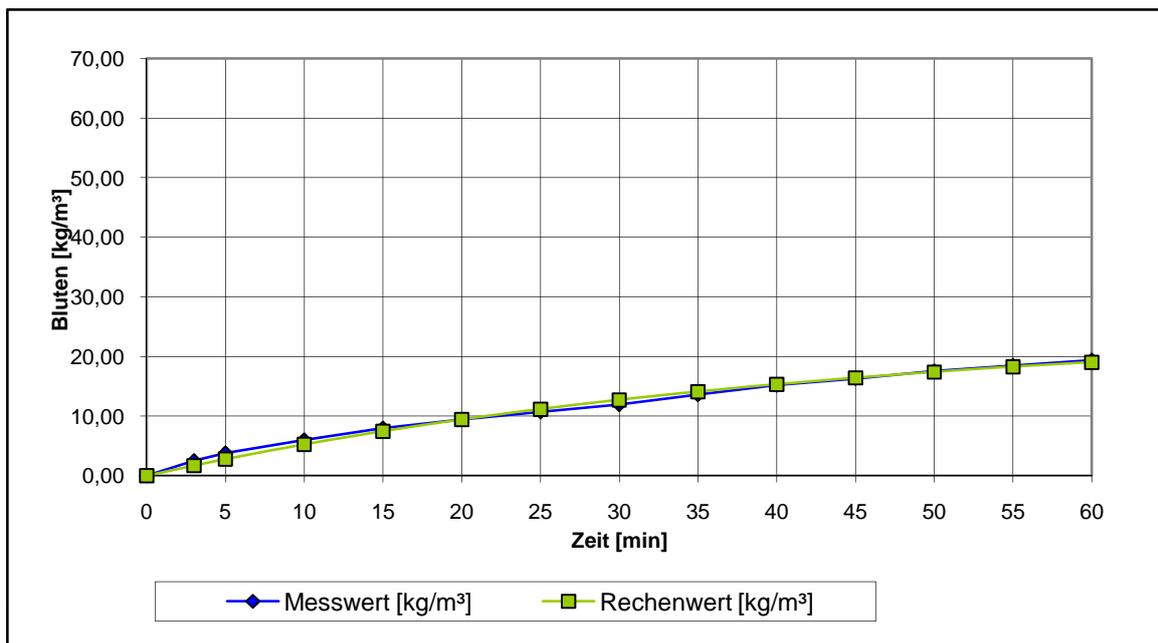
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	28	2,54	1,71	0,69
5	42	3,81	2,78	1,05
10	66	5,99	5,26	0,52
15	88	7,98	7,47	0,26
20	104	9,43	9,43	0,00
25	118	10,70	11,18	0,23
30	132	11,97	12,73	0,58
35	150	13,60	14,11	0,26
40	168	15,24	15,35	0,01
45	180	16,33	16,44	0,01
50	194	17,59	17,42	0,03
55	204	18,50	18,28	0,05
60	214	19,41	19,05	0,13
				3,82

k **42,86**

a(to) **0,5901**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **19**

Datum: **23.06.2008**

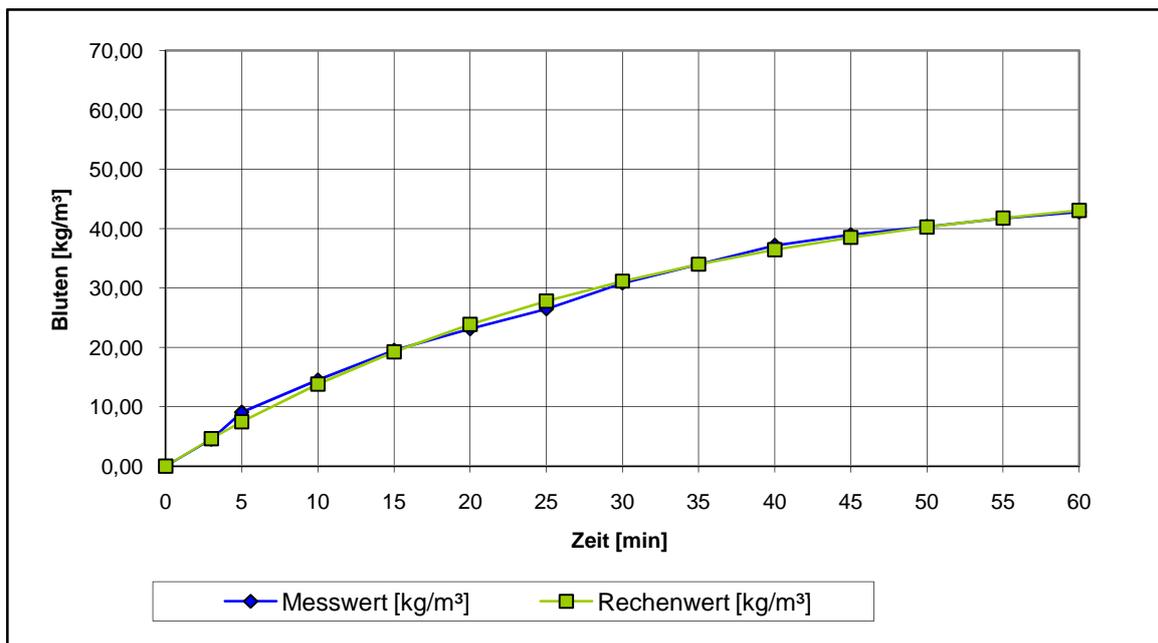
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	50	4,53	4,62	0,01
5	100	9,07	7,46	2,58
10	160	14,51	13,82	0,47
15	215	19,50	19,24	0,07
20	255	23,13	23,86	0,53
25	292	26,48	27,79	1,71
30	340	30,84	31,14	0,09
35	375	34,01	34,00	0,00
40	410	37,18	36,43	0,57
45	430	39,00	38,50	0,24
50	445	40,36	40,27	0,01
55	460	41,72	41,78	0,00
60	472	42,81	43,06	0,06
				6,35

k **31,22**

a(t₀) **1,6155**

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **20**

Datum: **23.06.2008**

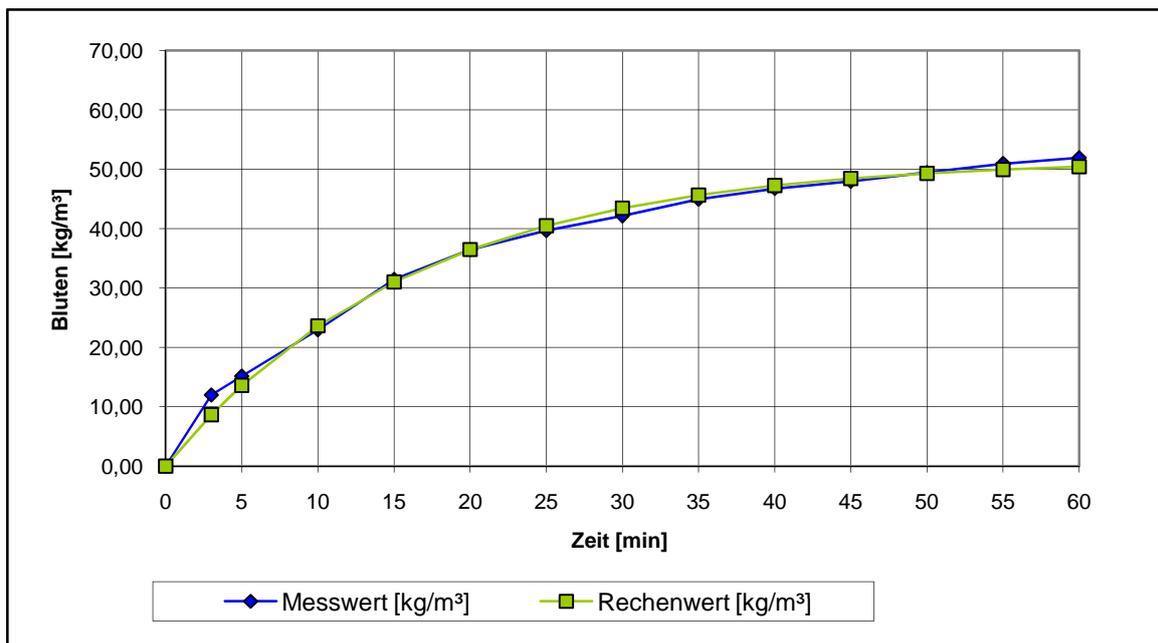
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	120	11,98	8,65	11,10
5	152	15,18	13,60	2,49
10	230	22,97	23,63	0,44
15	315	31,46	31,03	0,18
20	365	36,45	36,48	0,00
25	397	39,65	40,50	0,73
30	422	42,15	43,47	1,75
35	450	44,94	45,65	0,51
40	468	46,74	47,27	0,28
45	480	47,94	48,45	0,27
50	495	49,44	49,33	0,01
55	510	50,93	49,98	0,92
60	520	51,93	50,45	2,19
				20,86

k **16,41**

a(t₀) **3,1562**

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **21**

Datum: **23.06.2008**

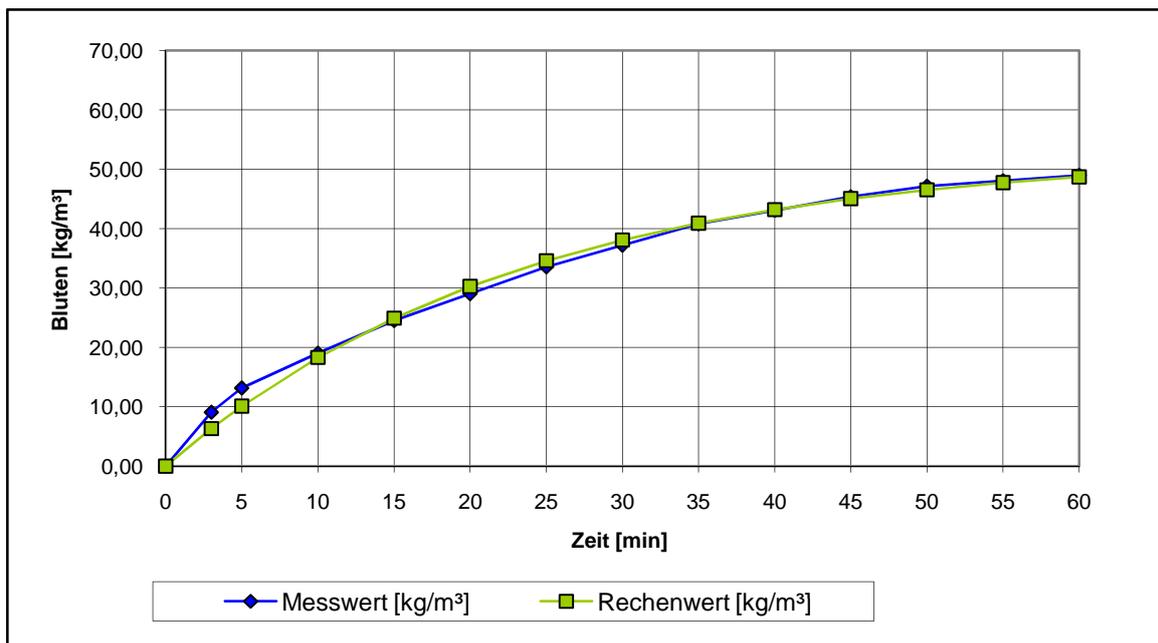
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	100	9,07	6,33	7,50
5	145	13,15	10,12	9,16
10	210	19,05	18,31	0,54
15	270	24,49	24,93	0,19
20	320	29,02	30,28	1,57
25	370	33,56	34,60	1,09
30	410	37,18	38,10	0,83
35	450	40,81	40,92	0,01
40	475	43,08	43,21	0,02
45	500	45,35	45,06	0,09
50	520	47,16	46,55	0,37
55	530	48,07	47,76	0,10
60	540	48,98	48,73	0,06
				21,53

k **23,51**

a(to) **2,2479**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **22**

Datum: **23.06.2008**

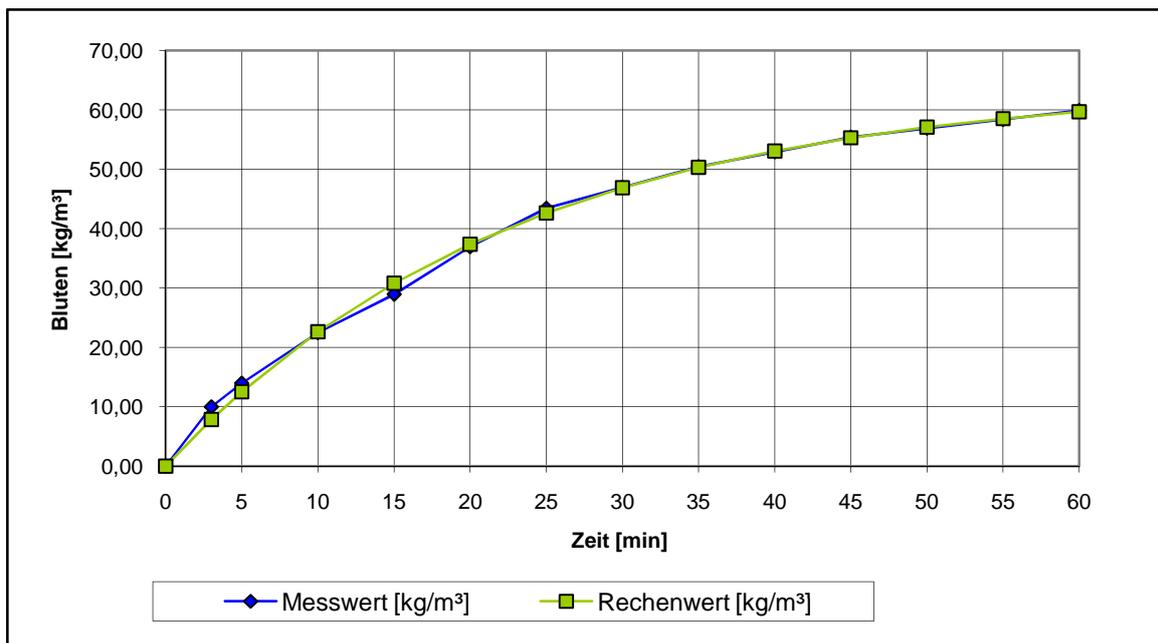
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	100	9,99	7,85	4,56
5	140	13,98	12,55	2,05
10	225	22,47	22,66	0,03
15	290	28,96	30,80	3,37
20	370	36,95	37,35	0,16
25	435	43,44	42,64	0,65
30	470	46,94	46,89	0,00
35	505	50,43	50,32	0,01
40	530	52,93	53,07	0,02
45	555	55,43	55,30	0,02
50	570	56,93	57,09	0,03
55	585	58,42	58,53	0,01
60	600	59,92	59,69	0,05
				10,97

k **23,11**

a(to) **2,7912**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **23**

Datum: **23.06.2008**

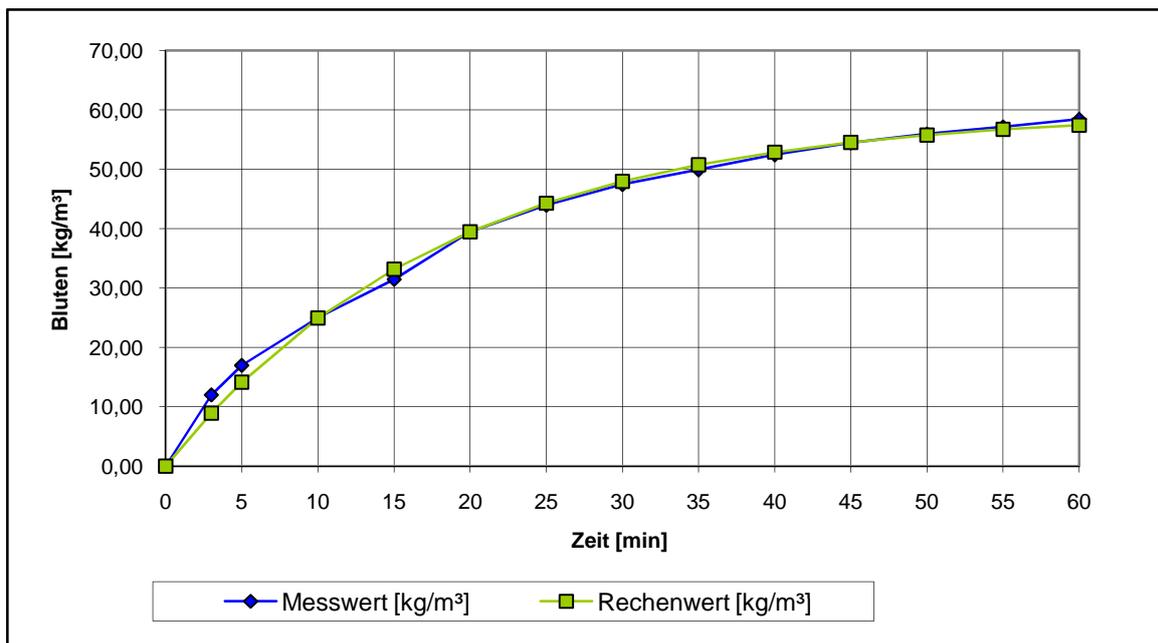
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	120	11,98	8,94	9,27
5	170	16,98	14,14	8,04
10	250	24,97	24,94	0,00
15	315	31,46	33,18	2,95
20	395	39,45	39,47	0,00
25	440	43,94	44,27	0,11
30	475	47,44	47,93	0,24
35	500	49,94	50,73	0,63
40	525	52,43	52,86	0,19
45	545	54,43	54,49	0,00
50	560	55,93	55,74	0,04
55	572	57,13	56,68	0,19
60	585	58,42	57,41	1,03
				22,69

k **18,51**

a(to) **3,2279**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **24**

Datum: **17.06.2008**

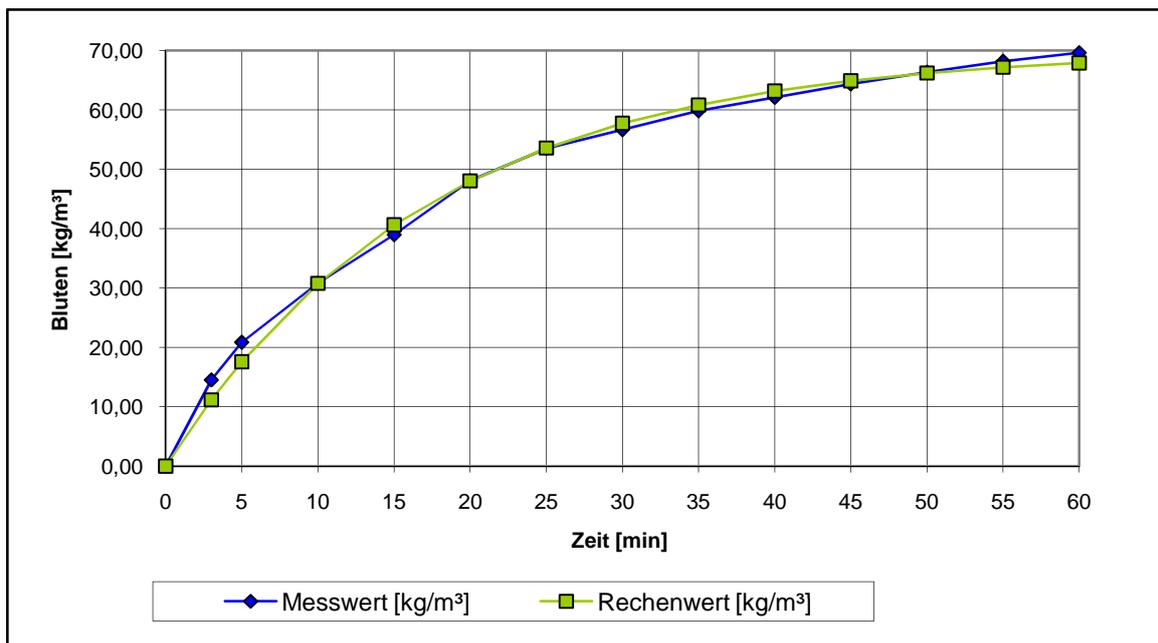
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	160	14,51	11,17	11,19
5	230	20,86	17,60	10,60
10	340	30,84	30,79	0,00
15	430	39,00	40,66	2,76
20	530	48,07	48,05	0,00
25	590	53,51	53,59	0,01
30	625	56,68	57,74	1,11
35	660	59,86	60,85	0,97
40	685	62,13	63,17	1,09
45	710	64,39	64,91	0,27
50	732	66,39	66,22	0,03
55	752	68,20	67,20	1,01
60	768	69,65	67,93	2,98
				32,04

k **17,29**

a(to) **4,0541**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **25**

Datum: **18.06.2008**

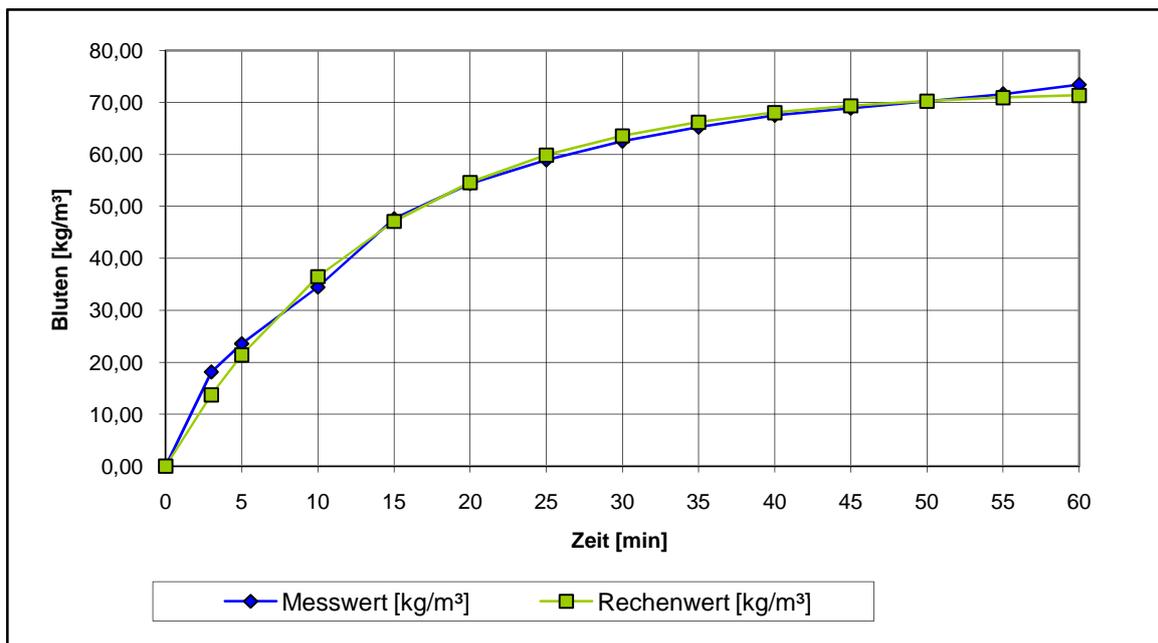
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	200	18,14	13,73	19,41
5	260	23,58	21,41	4,71
10	380	34,46	36,50	4,13
15	525	47,61	47,12	0,24
20	600	54,42	54,61	0,04
25	650	58,95	59,89	0,87
30	690	62,58	63,60	1,05
35	720	65,30	66,22	0,85
40	745	67,57	68,06	0,25
45	760	68,93	69,36	0,19
50	775	70,29	70,28	0,00
55	790	71,65	70,93	0,52
60	810	73,46	71,38	4,34
				36,58

k **14,28**

a(to) **5,0757**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **26**

Datum: **17.06.2008**

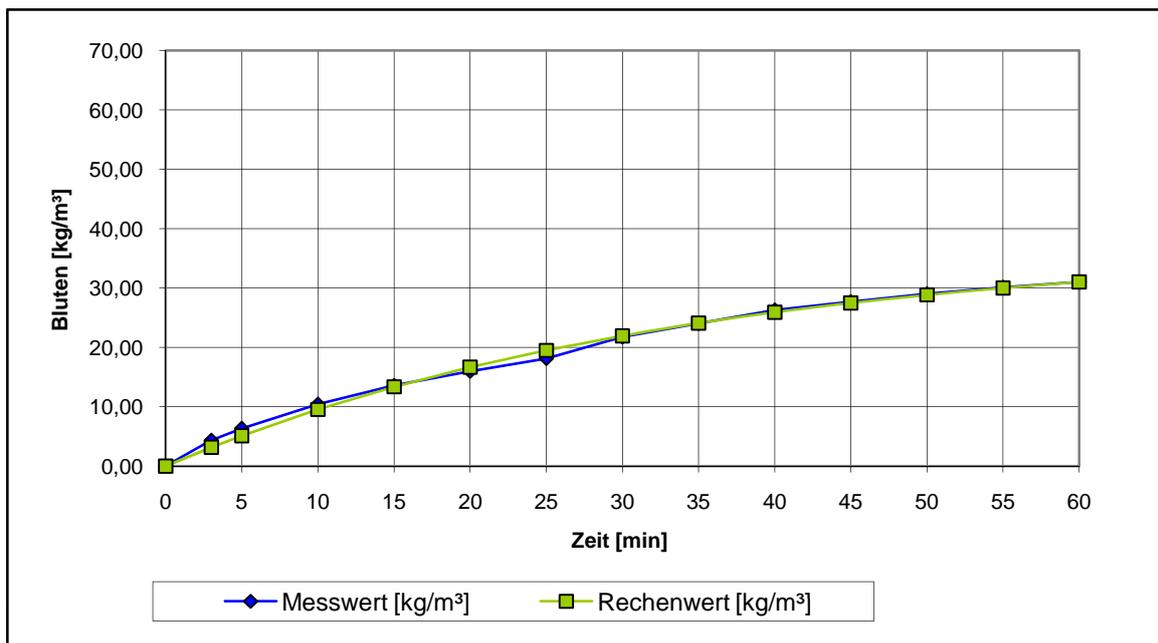
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	48	4,35	3,17	1,41
5	70	6,35	5,12	1,50
10	115	10,43	9,55	0,78
15	150	13,60	13,37	0,06
20	176	15,96	16,66	0,49
25	200	18,14	19,51	1,87
30	240	21,77	21,96	0,04
35	265	24,03	24,08	0,00
40	290	26,30	25,91	0,16
45	305	27,66	27,49	0,03
50	320	29,02	28,85	0,03
55	332	30,11	30,02	0,01
60	342	31,02	31,04	0,00
				6,36

k **33,96**

a(to) **1,1023**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **27**

Datum: **14.06.2007**

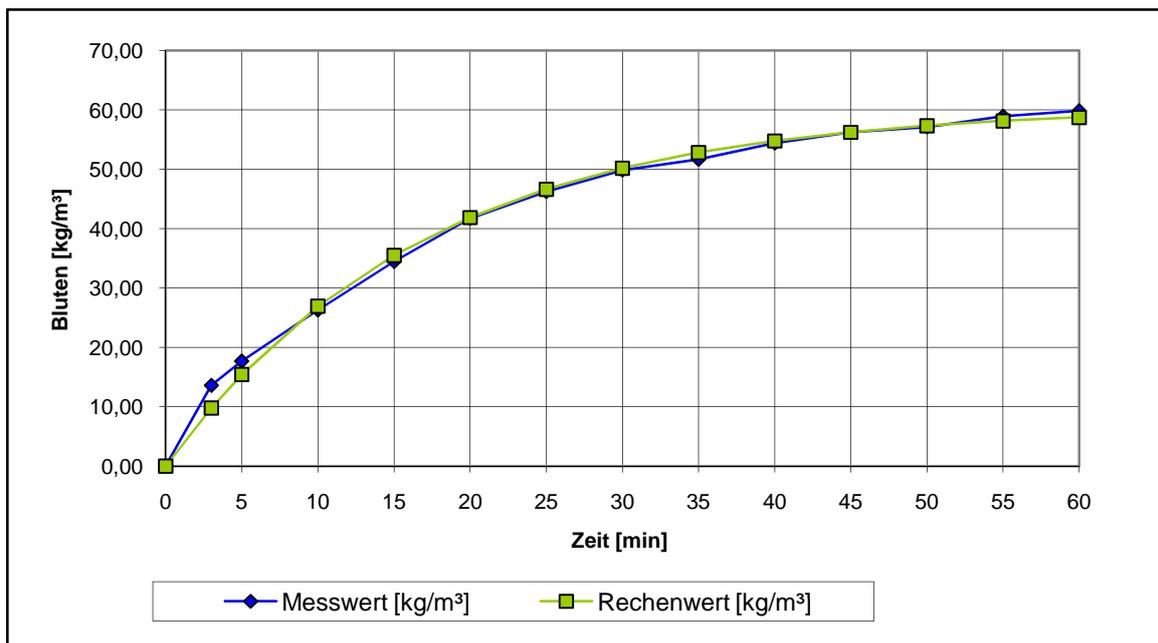
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	150	13,60	9,80	14,45
5	195	17,69	15,44	5,05
10	290	26,30	26,94	0,41
15	380	34,46	35,50	1,08
20	460	41,72	41,89	0,03
25	510	46,25	46,64	0,15
30	550	49,88	50,18	0,09
35	570	51,70	52,81	1,25
40	600	54,42	54,78	0,13
45	620	56,23	56,24	0,00
50	630	57,14	57,33	0,04
55	650	58,95	58,14	0,65
60	660	59,86	58,75	1,24
				24,56

k **16,97**

a(to) **3,5649**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **28**

Datum: **28.11.2007**

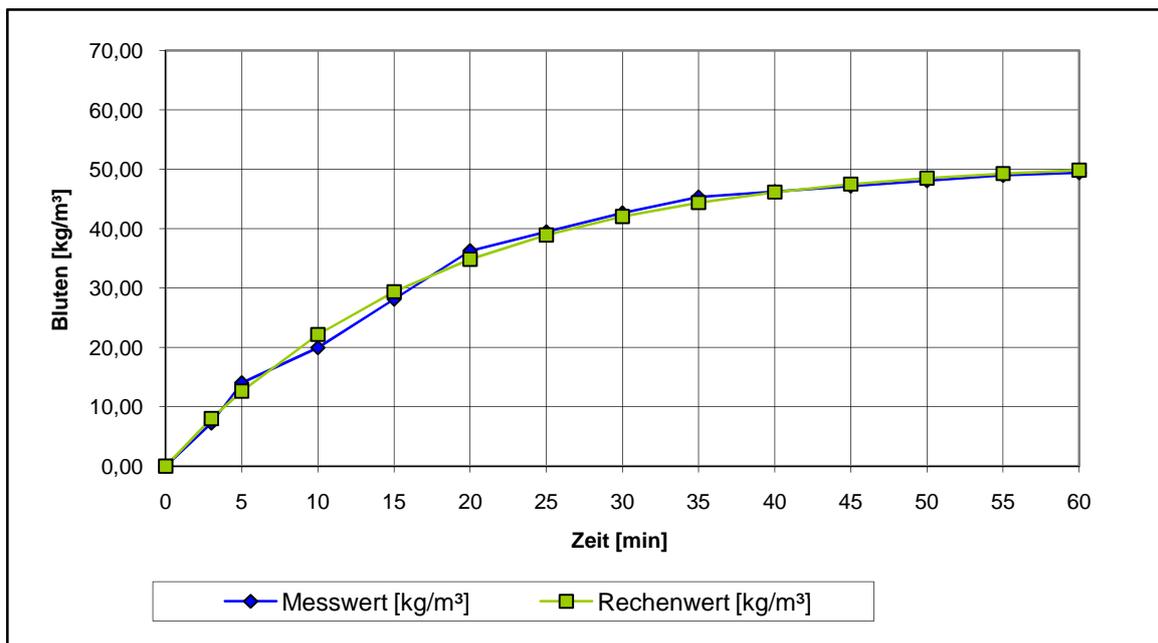
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	80	7,26	8,00	0,55
5	155	14,06	12,63	2,04
10	220	19,95	22,17	4,91
15	310	28,12	29,37	1,58
20	400	36,28	34,82	2,14
25	435	39,45	38,93	0,28
30	470	42,63	42,03	0,35
35	500	45,35	44,38	0,94
40	510	46,25	46,15	0,01
45	520	47,16	47,49	0,11
50	530	48,07	48,50	0,18
55	540	48,98	49,26	0,08
60	545	49,43	49,84	0,17
				13,34

k **17,82**

a(t₀) **2,8969**

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **29**

Datum: **09.07.2007**

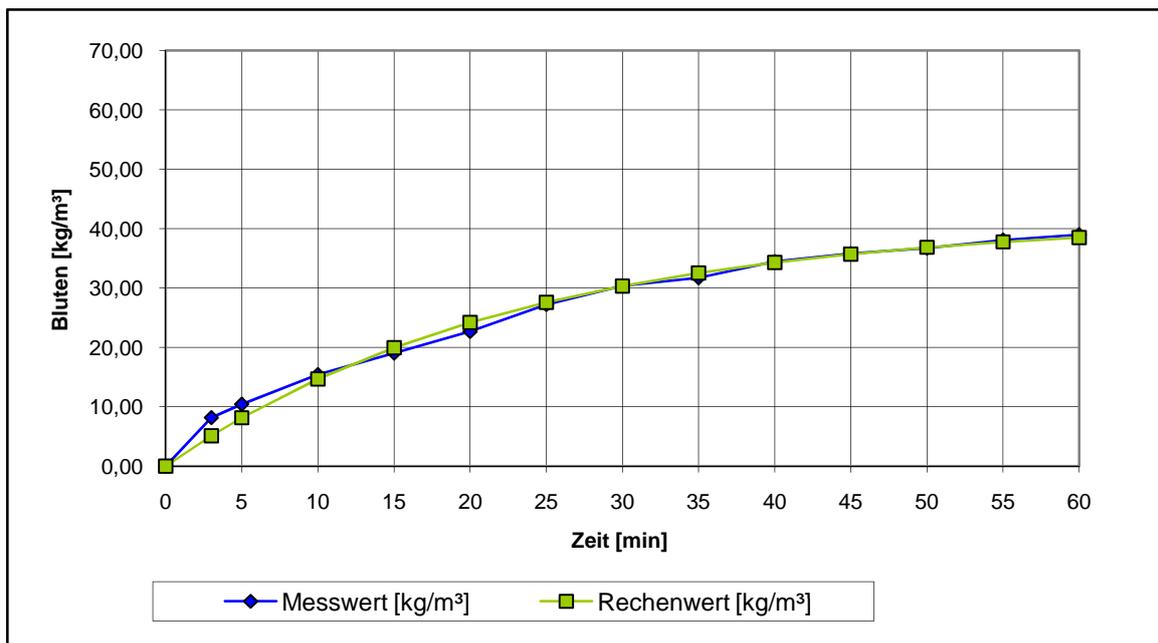
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	90	8,16	5,10	9,40
5	115	10,43	8,14	5,23
10	170	15,42	14,69	0,53
15	210	19,05	19,95	0,81
20	250	22,67	24,18	2,25
25	300	27,21	27,57	0,13
30	335	30,38	30,31	0,01
35	350	31,74	32,50	0,57
40	380	34,46	34,27	0,04
45	395	35,82	35,68	0,02
50	405	36,73	36,82	0,01
55	420	38,09	37,74	0,12
60	430	39,00	38,48	0,27
				19,41

k **22,89**

a(to) **1,8128**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **30**

Datum: **09.03.2006**

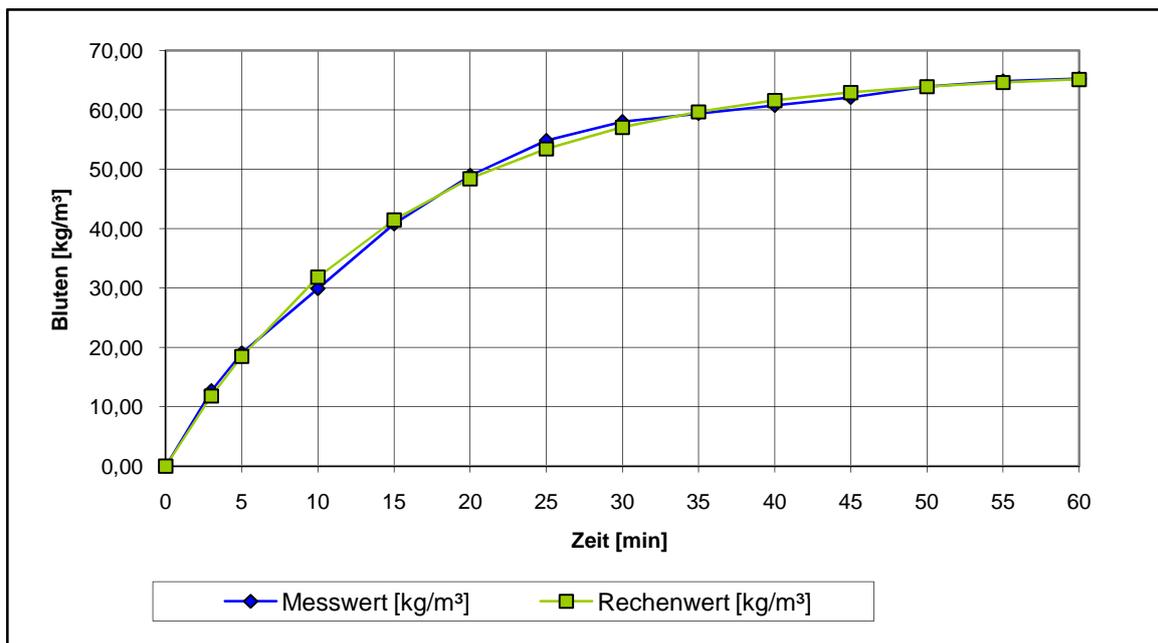
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	140	12,70	11,81	0,80
5	210	19,05	18,49	0,31
10	330	29,93	31,83	3,62
15	450	40,81	41,47	0,43
20	540	48,98	48,42	0,31
25	605	54,87	53,44	2,04
30	640	58,04	57,07	0,96
35	655	59,41	59,68	0,08
40	670	60,77	61,57	0,65
45	685	62,13	62,94	0,66
50	705	63,94	63,92	0,00
55	715	64,85	64,63	0,05
60	720	65,30	65,14	0,02
				9,91

k **15,34**

a(to) **4,3324**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: 31

Datum: 16.09.2008

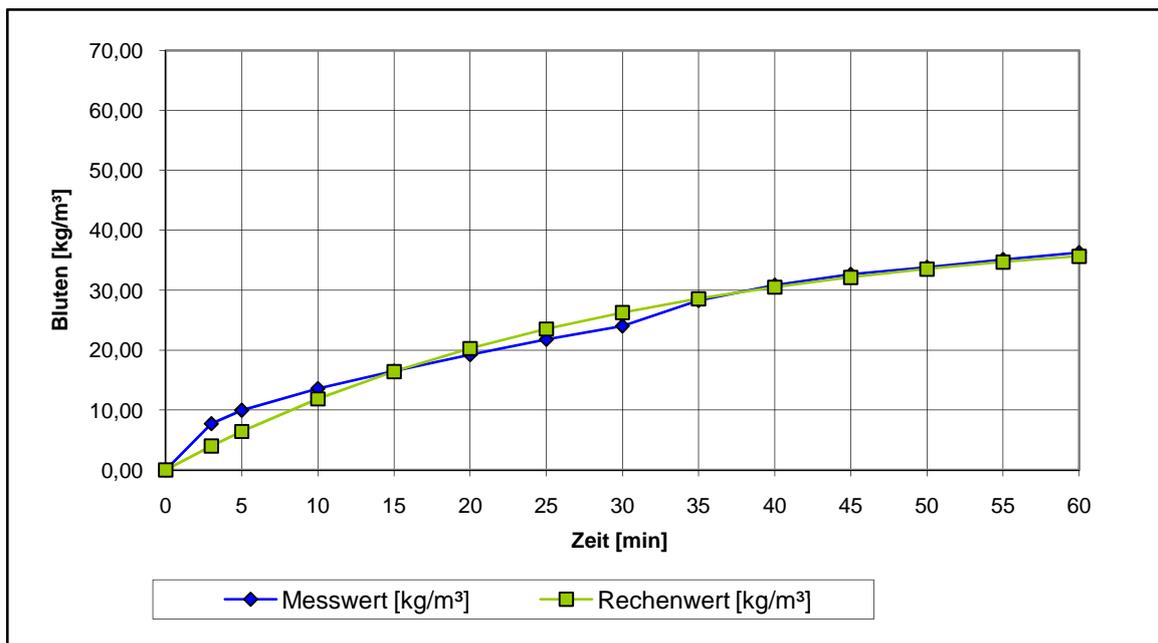
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	85	7,71	3,99	13,80
5	110	9,98	6,44	12,51
10	150	13,60	11,86	3,03
15	182	16,51	16,44	0,00
20	212	19,23	20,29	1,13
25	240	21,77	23,54	3,13
30	265	24,03	26,27	5,01
35	312	28,30	28,58	0,08
40	340	30,84	30,52	0,10
45	360	32,65	32,16	0,24
50	373	33,83	33,54	0,09
55	387	35,10	34,70	0,16
60	400	36,28	35,68	0,36
				39,64

k	29,21
----------	--------------

a(t₀)	1,4012
-------------------------	---------------

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **32**

Datum: **27.04.2006**

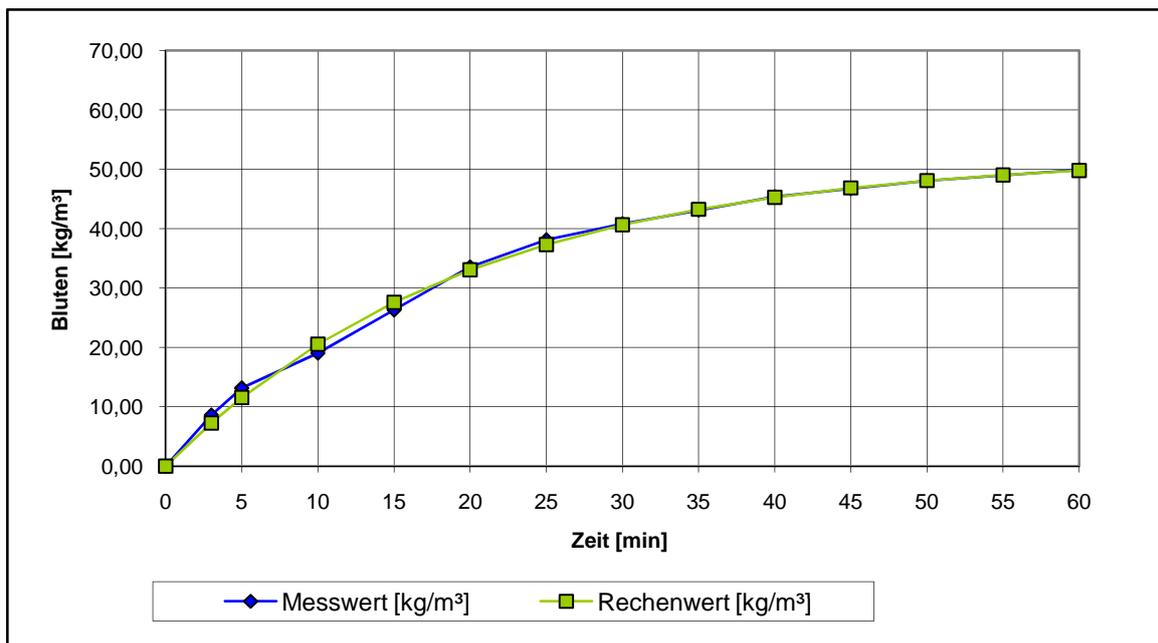
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	95	8,62	7,27	1,81
5	145	13,15	11,55	2,56
10	210	19,05	20,56	2,29
15	290	26,30	27,58	1,64
20	370	33,56	33,06	0,25
25	420	38,09	37,33	0,58
30	450	40,81	40,66	0,02
35	475	43,08	43,26	0,03
40	500	45,35	45,28	0,00
45	515	46,71	46,86	0,02
50	530	48,07	48,09	0,00
55	540	48,98	49,05	0,01
60	550	49,88	49,80	0,01
				9,22

k **20,10**

a(to) **2,6094**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **33**

Datum: **27.04.2006**

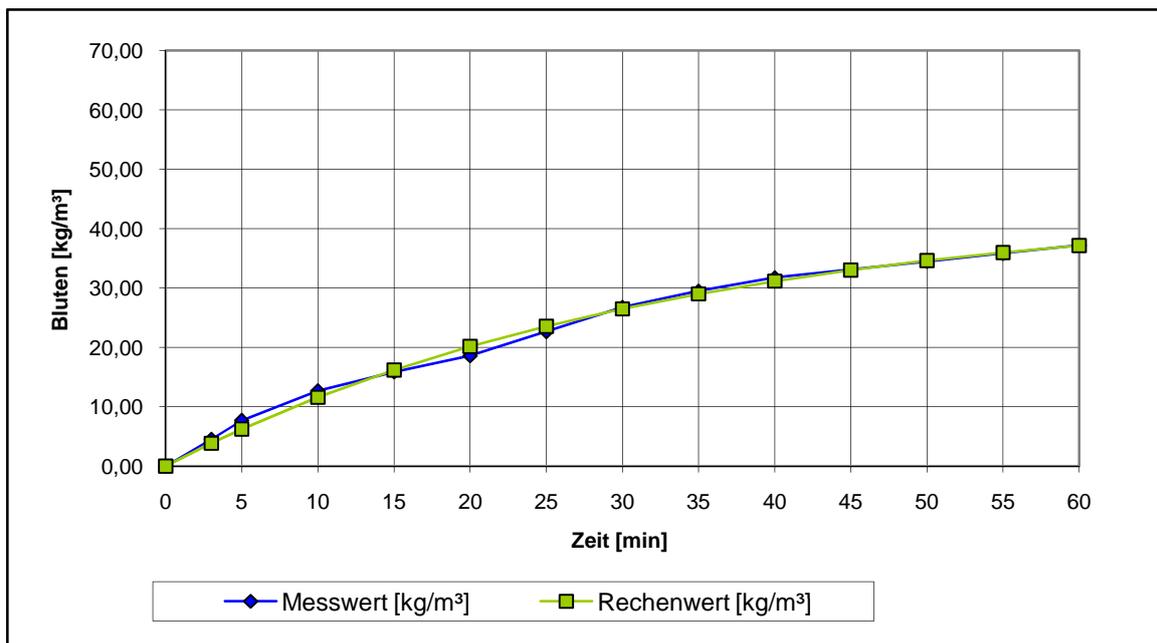
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	50	4,53	3,85	0,46
5	85	7,71	6,24	2,17
10	140	12,70	11,60	1,21
15	175	15,87	16,20	0,11
20	205	18,59	20,16	2,46
25	250	22,67	23,56	0,79
30	295	26,75	26,48	0,07
35	325	29,48	29,00	0,23
40	350	31,74	31,16	0,35
45	365	33,10	33,01	0,01
50	380	34,46	34,61	0,02
55	395	35,82	35,98	0,02
60	410	37,18	37,15	0,00
				7,90

k **32,99**

a(to) **1,3442**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **34**

Datum: **06.10.2005**

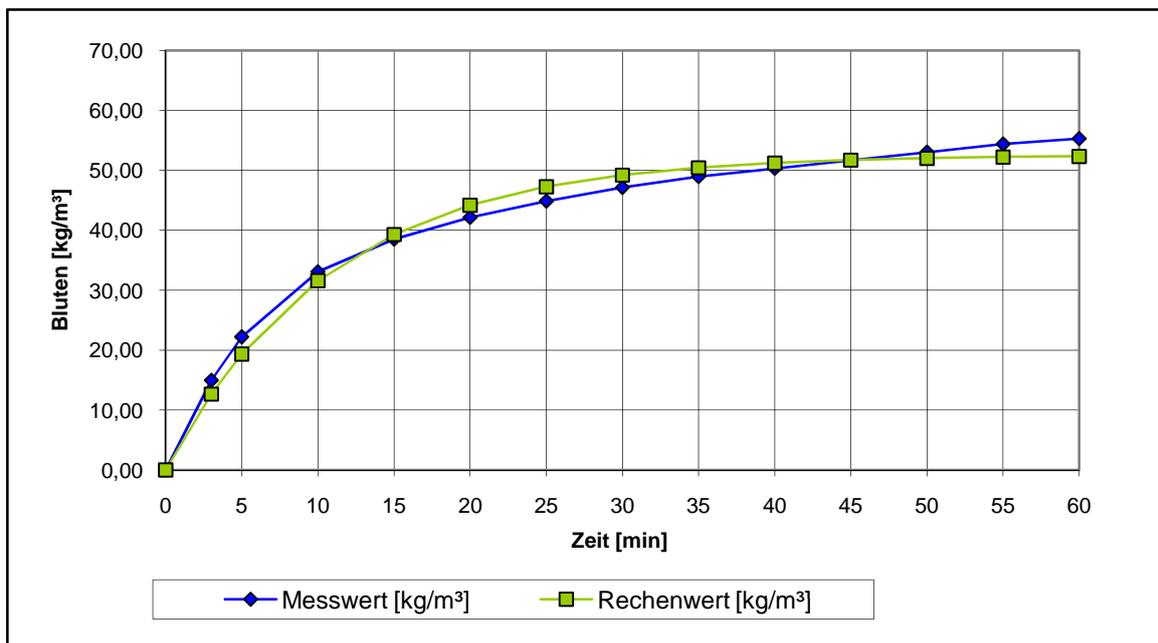
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	165	14,96	12,67	5,28
5	245	22,22	19,36	8,16
10	365	33,10	31,59	2,28
15	425	38,55	39,32	0,60
20	465	42,17	44,20	4,10
25	495	44,89	47,28	5,69
30	520	47,16	49,22	4,26
35	540	48,98	50,45	2,18
40	555	50,34	51,23	0,80
45	570	51,70	51,72	0,00
50	585	53,06	52,03	1,05
55	600	54,42	52,22	4,80
60	610	55,32	52,35	8,85
				48,05

k **10,88**

a(to) **4,8307**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **35**

Datum: **18.10.2005**

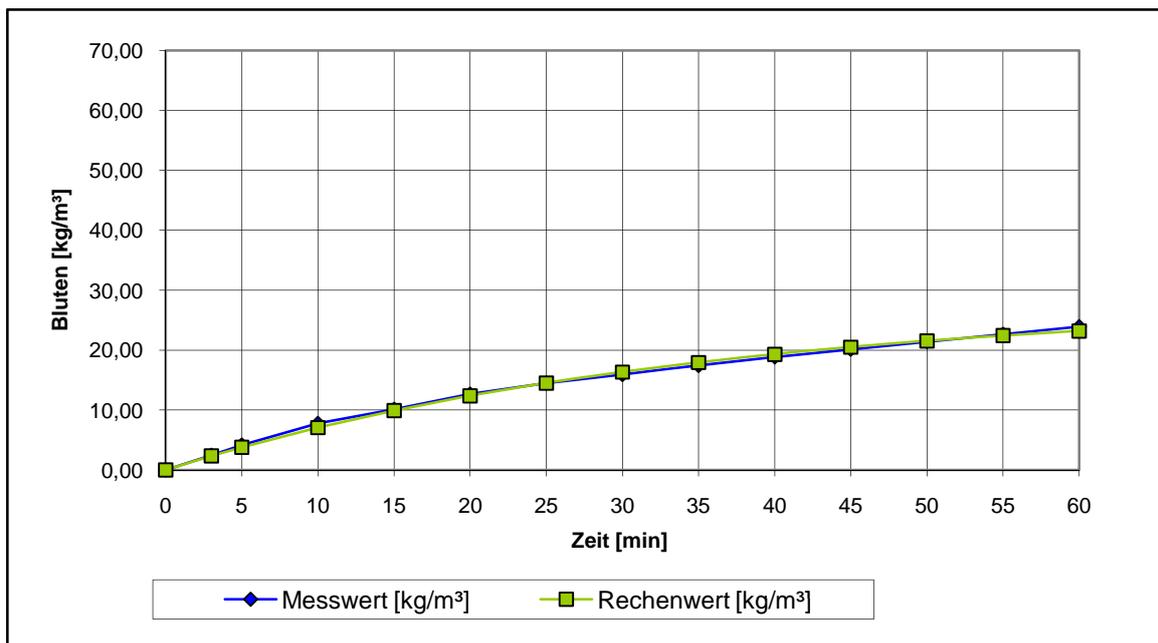
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	27	2,45	2,34	0,01
5	46	4,17	3,80	0,14
10	86	7,80	7,08	0,52
15	112	10,16	9,92	0,06
20	140	12,70	12,38	0,10
25	160	14,51	14,51	0,00
30	176	15,96	16,35	0,15
35	192	17,41	17,94	0,28
40	208	18,86	19,32	0,21
45	222	20,13	20,51	0,14
50	236	21,40	21,54	0,02
55	250	22,67	22,44	0,06
60	264	23,94	23,21	0,54
				2,22

k **34,56**

a(to) **0,8153**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **36**

Datum: **28.02.2006**

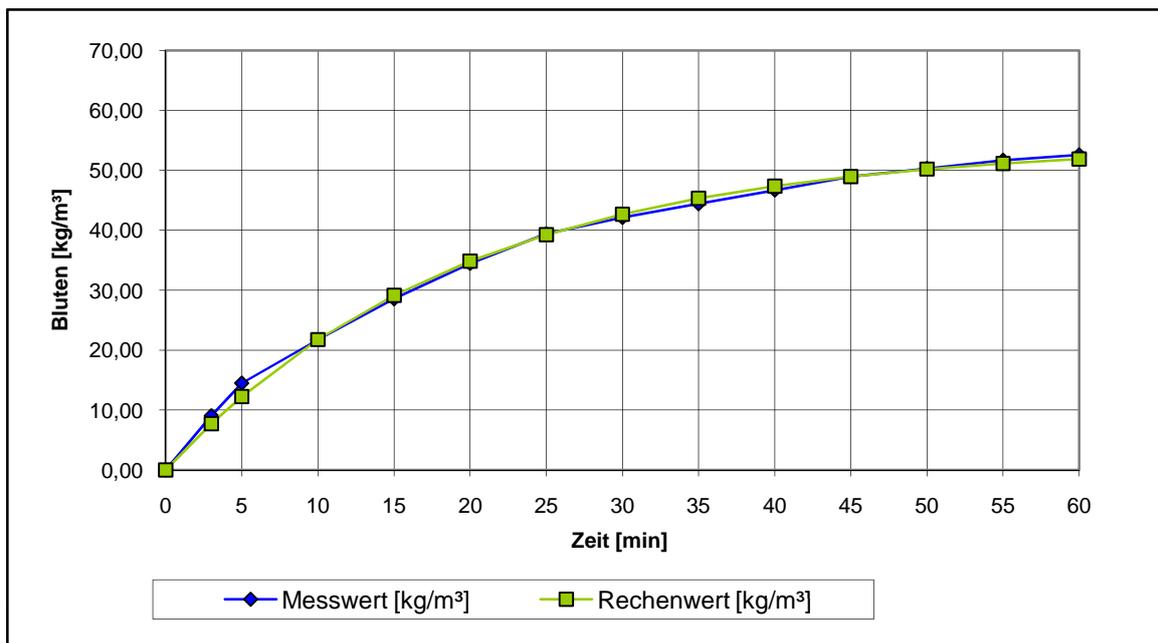
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	100	9,07	7,73	1,79
5	160	14,51	12,26	5,05
10	240	21,77	21,76	0,00
15	315	28,57	29,12	0,31
20	380	34,46	34,82	0,13
25	435	39,45	39,24	0,04
30	465	42,17	42,66	0,24
35	490	44,44	45,31	0,76
40	515	46,71	47,37	0,43
45	540	48,98	48,96	0,00
50	555	50,34	50,19	0,02
55	570	51,70	51,14	0,31
60	580	52,60	51,88	0,52
				9,61

k **19,58**

a(to) **2,7791**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **37**

Datum: **28.02.2006**

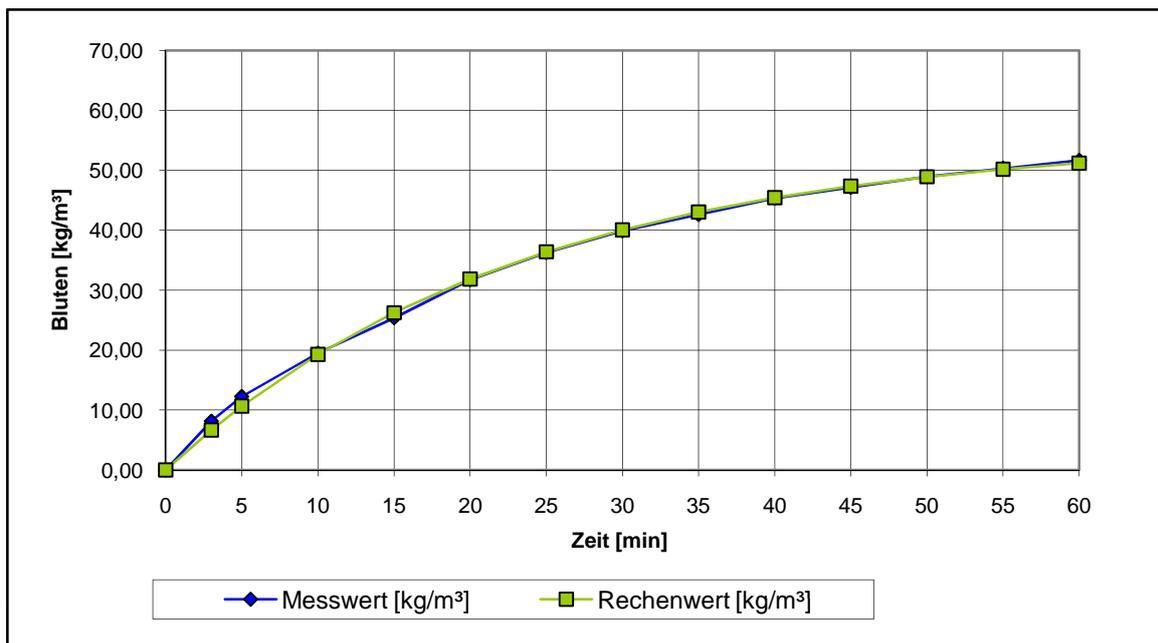
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	90	8,16	6,67	2,22
5	135	12,24	10,67	2,48
10	215	19,50	19,28	0,05
15	280	25,39	26,24	0,72
20	350	31,74	31,86	0,01
25	400	36,28	36,40	0,02
30	440	39,91	40,07	0,03
35	470	42,63	43,03	0,16
40	500	45,35	45,42	0,01
45	520	47,16	47,36	0,04
50	540	48,98	48,92	0,00
55	555	50,34	50,18	0,03
60	570	51,70	51,19	0,25
				6,02

k **23,41**

a(to) **2,3695**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **38**

Datum: **17.11.2005**

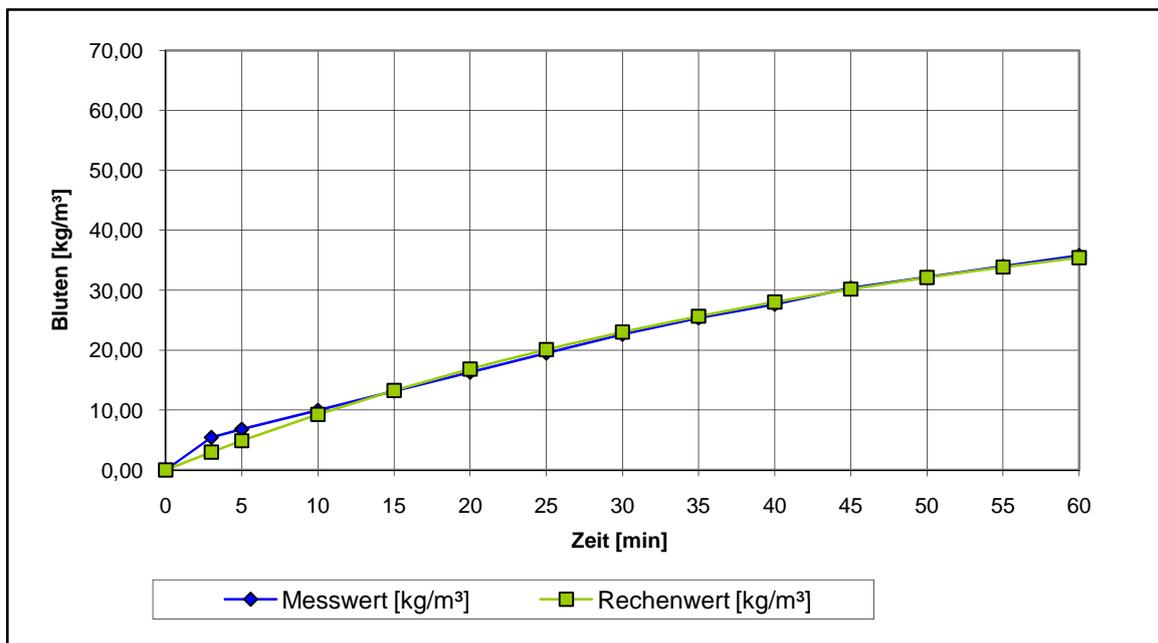
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	60	5,44	2,99	6,00
5	75	6,80	4,89	3,67
10	110	9,98	9,30	0,46
15	145	13,15	13,27	0,02
20	180	16,33	16,86	0,29
25	215	19,50	20,10	0,37
30	250	22,67	23,03	0,12
35	280	25,39	25,66	0,07
40	305	27,66	28,04	0,15
45	335	30,38	30,19	0,04
50	355	32,20	32,13	0,00
55	375	34,01	33,88	0,02
60	395	35,82	35,45	0,14
				11,34

k **48,64**

a(to) **1,0284**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **39**

Datum: **22.11.2005**

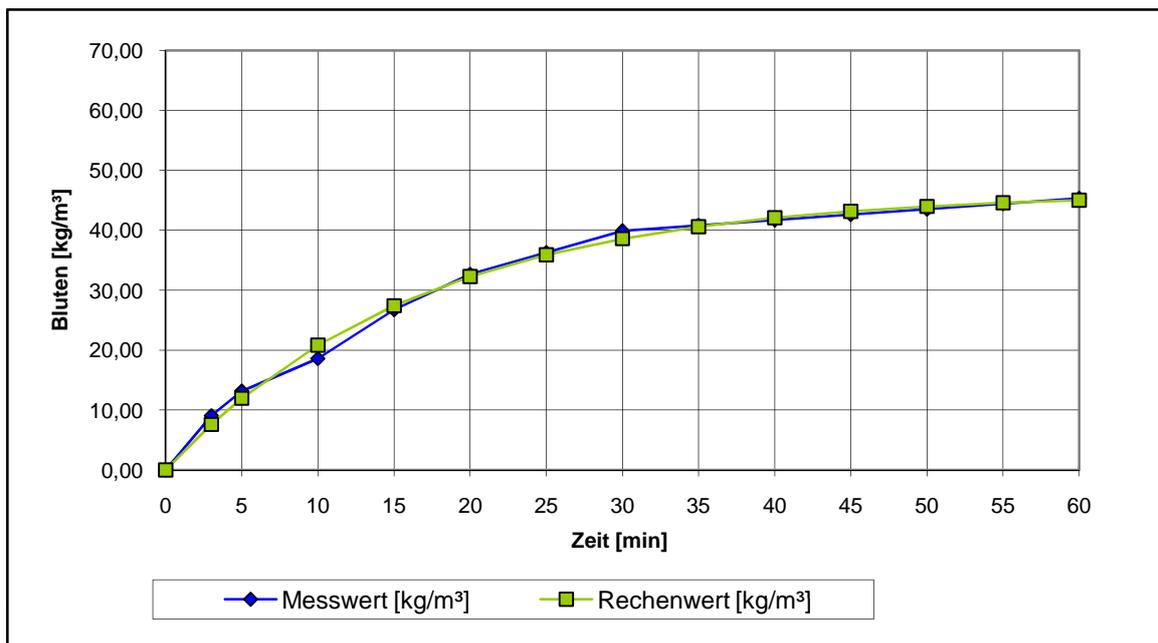
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	100	9,07	7,60	2,16
5	145	13,15	11,96	1,42
10	205	18,59	20,83	5,01
15	295	26,75	27,41	0,43
20	360	32,65	32,29	0,13
25	400	36,28	35,91	0,14
30	440	39,91	38,59	1,73
35	450	40,81	40,58	0,05
40	460	41,72	42,06	0,11
45	470	42,63	43,15	0,27
50	480	43,53	43,96	0,18
55	490	44,44	44,56	0,02
60	500	45,35	45,01	0,11
				11,77

k **16,73**

a(to) **2,7675**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **40**

Datum: **01.03.2006**

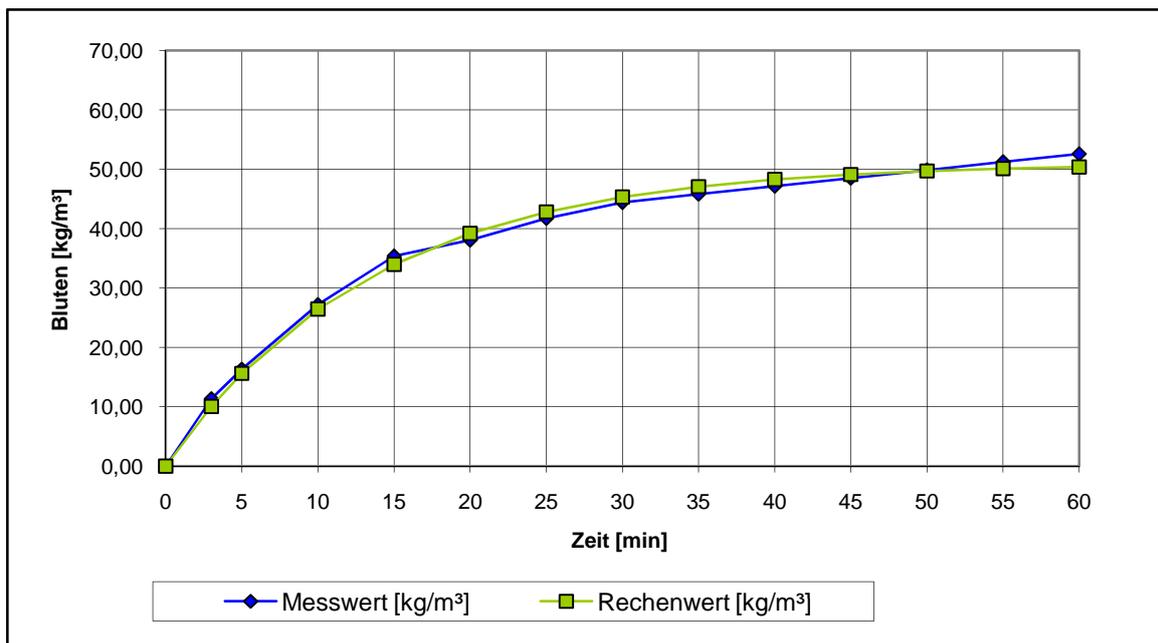
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	125	11,34	10,05	1,66
5	180	16,33	15,62	0,49
10	300	27,21	26,46	0,56
15	390	35,37	33,98	1,94
20	420	38,09	39,19	1,21
25	460	41,72	42,81	1,19
30	490	44,44	45,32	0,77
35	505	45,80	47,06	1,59
40	520	47,16	48,27	1,22
45	535	48,52	49,11	0,34
50	550	49,88	49,69	0,04
55	565	51,24	50,09	1,33
60	580	52,60	50,37	4,99
				17,34

k **13,67**

a(to) **3,7305**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **41**

Datum: **16.02.2006**

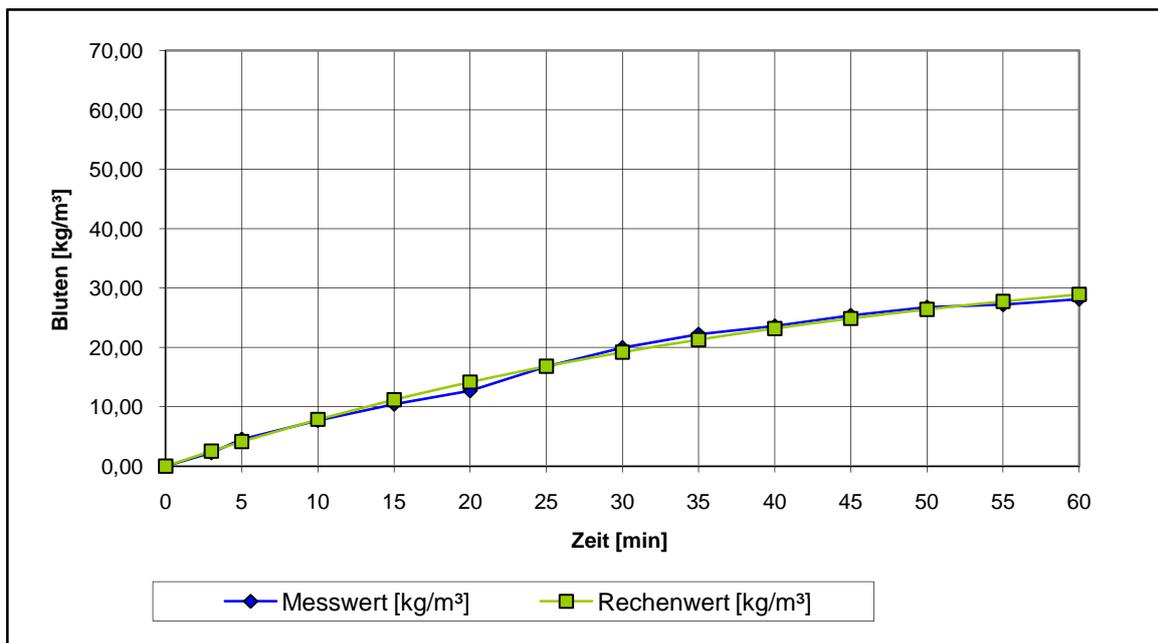
Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	25	2,27	2,55	0,08
5	50	4,53	4,16	0,14
10	85	7,71	7,87	0,03
15	115	10,43	11,19	0,58
20	140	12,70	14,16	2,13
25	185	16,78	16,81	0,00
30	220	19,95	19,17	0,61
35	245	22,22	21,29	0,87
40	260	23,58	23,18	0,16
45	280	25,39	24,86	0,28
50	295	26,75	26,37	0,15
55	300	27,21	27,72	0,26
60	310	28,12	28,92	0,65
				5,94

k **44,34**

a(to) **0,8795**

k... Speicherkonstante

a(to)... Anfangswert



Datenblatt zur Ermittlung der Kurvenparameter

Baustelle: **42**

Datum: **20.08.2007**

Zeit [min]	Messwert [ml]	Messwert (y) [kg/m ³]	Rechenwert (Y) [kg/m ³]	(Y-y) ²
0	0	0,00	0,00	0,00
3	140	12,70	11,61	1,17
5	200	18,14	17,80	0,11
10	320	29,02	29,20	0,03
15	410	37,18	36,50	0,47
20	450	40,81	41,17	0,13
25	480	43,53	44,16	0,40
30	500	45,35	46,08	0,54
35	515	46,71	47,31	0,36
40	525	47,61	48,09	0,23
45	530	48,07	48,60	0,28
50	540	48,98	48,92	0,00
55	550	49,88	49,13	0,57
60	560	50,79	49,26	2,34
				6,64

k **11,22**

a(t₀) **4,4123**

k... Speicherkonstante

a(t₀)... Anfangswert

