Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

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

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT
Master's Thesis

Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von Formenwerkstoff und Verdichtung

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

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Dipl.-Päd. Sinan Korjenic

E 206
Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Farzam Movahedrad
Matr.Nr.: 0327820

Heinrich von Buolgasse 14/3/5
1210 Wien

Wien, April 2015

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinen Eltern von ganzem Herzen bedanken, dass sie mir dieses Studium überhaupt ermöglicht haben. Sie haben mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch unterstützt. Vielen Dank, dass Ihr mir den Rücken auch in dieser Lebensphase gestärkt habt.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Frau, Golsa Shahrava, bedanken. ohne ihre tatkräftige Unterstützung und ihre ermutigenden Worte wäre ich bestimmt niemals fertig geworden.

Weiteres möchte ich mich bei meiner Schwiegermutter und meinem Bruder bedanken, die mir immer zur Seite gestanden sind und für mich gebetet haben.

Alleine wenn ich an die oben genannten Personen denke bin ich beruhigt und fühle mich glücklich. Sie haben mir beigebracht, über meine Grenzen hinaus zu denken. Ich liebe Euch über Alles und danke Gott, dass es Euch gibt.

Diese Arbeit möchte ich Euch widmen.

Mein herzlicher Dank gilt ebenfalls Herr Professor Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch und Herr Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dipl.-Päd. Sinan Korjenic, die mich während dieser Arbeit begleitet und großzügig betreut haben.

Zusätzlich danke ich meinem Studienkollegen Herr Emrah Büke für die reibungslose Mitwirkung. Analog zu dieser Arbeit hat er mit der gleichen Vorgangsweise die Betonformen aus Hybrid (Marke Kombi & Esty) untersucht.

Ebenfalls möchte ich mich hier bei meinem Arbeitgeber bedanken. Herr Dipl.-Ing. Jahangir Nasserzare hat mich während der Studienzeit im Zuge meiner Werkstudententätigkeit immer motiviert.

Schließlich möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich während der Ausarbeitung dieser Diplomarbeit motiviert und beim Korrekturlesen unterstützt haben.

Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von Formenwerkstoff und Verdichtung

Kurzfassung

In der DIN EN 12390 sowie ONR 23303 finden sich bezüglich der verwendeten Werkstoffen für Betonformen, den Befestigungsmöglichkeiten am Rütteltisch und dessen Rüttelfrequenz sehr viele Unklarheiten.

Um diese Unklarheiten weitestgehend zu beseitigen, werden im Zuge dieser Diplomarbeit die Auswirkungen:

- der Materialeigenschaften von Betonformen auf die Betondruckfestigkeit
- der Verdichtungsfrequenzen auf die Betondruckfestigkeit
- der Befestigungsmöglichkeiten der Betonform am Rütteltisch auf die Betondruckfestigkeit
- des Rüttelvorgangs bei manuellem Festhalten sowie magnetischer Befestigung der Betonform auf den Laboranten

untersucht.

Für die Ermittlung der Einflüsse durch Formenwerkstoffe wurden Betonformen aus Kunststoff und Gusseisen ausgewählt worden. Mittels dieser konnten Betonprobekörper der Betongüten C16/20, C25/30 und C30/37 hergestellt werden.

Oben genannte Betonproben wurden mit Verdichtungsfrequenzen 4000 [U/min] und 9000 [U/min] verdichtet. Überdies werden die Betonformen während der Verdichtung sowohl magnetisch am Rütteltisch befestigt, als auch händisch gegen den Tisch gehalten.

Damit sichergestellt wird, dass die Ergebnisse der Arbeit sowohl für Zylinder- als auch für Würfeldruckfestigkeiten gültig sind, wurden die Betonprobekörper sowohl in Zylinder- als auch in Würfelformen aus Gusseisen und aus Kunststoff hergestellt und getestet.

Parallel zu dieser Arbeit hat mein Kollege - Emrah Büke - mit der gleichen Vorgangsweise die Betonformen aus Hybrid (Marke Kombi & Esty) untersucht.

Dependence of the concrete pressure resistance on form Materials and condense

Abstract

There is a lot of confusion in Eurocode regarding the raw material of concrete form, the different type of mounting on the vibration table and vibrating frequency of the vibration table.

In order to clarify these ambiguities, the effect of

- material properties of concrete form on pressure resistance of concrete
- vibrating frequency on pressure resistance of concrete
- mounting possibilities of concrete form to the vibration table on pressure resistance of concrete
- mounting possibilities of concrete form to the vibration table on laboratory assistant

are researched with experiments performed in this thesis.

I have chosen concrete forms of plastic and cast iron to determine the effects of moulds material.

Here concrete specimens made of plastic moulds and cast iron moulds with concrete grade C16/20, C25/30 and C30/37 were produced.

The concrete forms were compressed with compression frequencies 4000 rpm and 9000 rpm.

Moreover during compression, the concrete forms were magnetically attached on the vibrating table and were also kept manually against the table.

To ensure the validity of the results of my work for cube and cylinder compressive strength, the concrete specimens were manufactured and tested in both cylinder and cube shapes in cast iron and plastic.

At the same time my collegue, Emrah Büke, has examined with the similar procedure on combi mould (brand of Esty and Kombi).

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Grundlagen 2

2.1 Beton 2

2.2 Betoneigenschaften 2

2.3 Ausgangsstoffe 4

2.3.1 Zement 4

2.3.1.1 Zusammensetzung von Zement gemäß EN 197-1:2011 5

2.3.1.2 Festigkeitsklassen der Zemente 6

2.3.2 Gesteinskörnung (Zuschlag) 8

2.3.2.1 Festigkeit 9

2.3.2.2 Kornform 9

2.3.2.3 Schädliche Anteile 10

2.3.2.4 Chemische Verbindungen 10

2.3.2.5 Sauberkeit 11

2.3.2.6 Kornzusammensetzung 11

2.3.2.7 Eigenschaften der Gesteinskörnungen 14

2.3.3 Wasser 14

2.3.4 Betonzusatzstoffe 15

2.3.4.1 Inaktive Zusatzstoffe 16

2.3.4.2 Puzzolanische Zusatzstoffe 16

2.3.4.3 Latent hydraulische Stoffe 16

2.3.4.4 Organische Zusatzstoffe 16

2.3.5 Betonzusatzmittel 17

2.3.5.1 Betonverflüssiger 18

2.3.5.2 Fließmittel 18

2.3.5.3 Verzögerer 18

2.3.5.4 Beschleuniger 19
2.3.5.5 Luftporenbildner 19
2.3.5.6 Zusatzmittel für Einpressmörtel 19
2.3.5.7 Dichtungsmittel 20
2.3.5.8 Stabilisierer 20
2.3.5.9 Viskositätsmodifizierer 20
2.3.5.10 Chromatreduzierer 21
2.3.5.11 Recyclinghilfen für Waschwasser 21
2.3.5.12 Schaumbildner 21
2.3.5.13 Sedimentationsreduzierer 21
2.3.5.14 Schwindreduzierer 21
2.4 Klassifizierung von Beton 22
2.4.1 Einteilung nach dem Erhärtungszustand 22
2.4.2 Einteilung nach der Eigenschaften 23
2.4.3 Einteilung nach der Rohdichte 23
2.4.4 Einteilung nach dem Ort der Herstellung 24
2.4.5 Einteilung nach dem Ort der Verarbeitung 24
2.4.6 Einteilung nach den Anforderungen der Herstellung und Überwachung 24
2.4.7 Einteilung nach dem Fördern, Verarbeiten und Verdichten 25
2.4.8 Einteilung nach Anwendung und Berechnung 25
2.4.9 Einteilung nach Expositionsklasse 26
2.4.10 Einteilung nach Eurocode 2 – Nach Festigkeitsklasse 28
2.5 Betondruckfestigkeit 30
2.6 Frischbetoneigenschaften 33
2.6.1 Verarbeitbarkeit 33
2.6.2 Rohdichte des Frischbetons 34

2.6.3 Frischbetontemperaturen 34
2.6.4 Luftporengehalt 34
2.6.5 Wasserzementwert 35
2.7 Verdichten 36
2.8 Abziehen der Betonoberfläche 38
2.9 Kennzeichnung 38
2.10 Nachbehandlung 39
3 Ausführung der Versuche 41
3.1 Ziel der Versuche 41
3.2 Kooperation 43
3.3 Versuchsreihen 44
3.4 Betonsorten 45
3.5 Frischbetonprüfung 47
3.5.1 Ausbreitmaß 47
3.5.2 Rohdichte 51
3.5.3 Luftgehalt 53
3.5.4 Gesamtwassergehalt 56
3.5.5 Temperatur 59
3.6 Herstellung und Lagerung der Betonprobekörper 60
3.7 Ermittlung der Betondruckfestigkeit von Betonprobekörpern 68
3.7.1 Ergebnisse in Tabellen 71
3.7.2 Ergebnisse in Diagrammen 74
3.7.2.1 Ergebnisse von Würfel-Probekörper 76
3.7.2.2 Ergebnisse von Zylinder-Probekörper 82
3.8 Schlussfolgerung 86
3.8.1 Formenwerkstoffe 87
3.8.1.1 Anschaffungspreis 87

3.8.1.2 Gewichtsmasse der Betonformenwerkstoffe 88

3.8.1.3 Dauer für die Ausschalung und den Feinputz einer Form 90

3.8.1.4 Lebensdauer 91

3.8.2 Auswirkung von Befestigungsmöglichkeiten der Betonformen am Rütteltisch auf den Laboranten 92

3.8.3 Auswirkung der Rüttelfrequenz auf den Laborant 93

3.8.4 Persönliches Fazit 94

4 Literatur 95

5 Abbildungsverzeichnis 97

6 Tabellenverzeichnis 99

1 Einleitung

Die Arbeit ist in einen theoretischen Teil und einen praktischen Teil gegliedert. Der theoretische Teil beinhaltet das einleitende Kapitel 1, welches sich mit der Motivation und dem Ziel der Diplomarbeit beschäftigt. In Kapitel 2, werden die Grundlagen des Betons und dessen Druckfestigkeit in Abhängigkeit von Formwerkstoff und Verdichten kurz beschrieben.

Kapitel 3 erläutert die Vorgehensweise der Versuchsdurchführung. Anschließend werden die Ergebnisse in Tabellen und Diagrammen dargestellt.

2 Grundlagen

Das zweite Kapitel beinhaltet einen kurzen Überblick über den Baustoff Beton und dessen Bestandteile. Dabei werden seine Eigenschaften sowie die Anforderungen an den Beton näher betrachtet.

Dieses Kapitel soll dem besseren Verständnis der Grundlagen von Beton dienen und so eine Basis für die folgenden Teile der vorliegenden Arbeit sowie für die Ausführung der Versuche in Kapitel 3, bilden.

2.1 Beton

„Beton ist ein künstlicher Stein"[1], der nach der Erhärtung raumbeständig bleibt und eine hohe Druckfestigkeit besitzt.

Aufgrund seiner vorteilhaften Eigenschaften wird der Beton in vielen verschiedenen Bereichen eingesetzt. Er wird im Tunnel-, Damm-, und Brückenbau, dem sogenannten Tiefbau, eingesetzt. Im Hochbau wird er in erster Linie für die Herstellung von Decken, Fundamenten und Baugruben (jeder Art) sowie für die Ausführung von Hochhäuser verwendet.

2.2 Betoneigenschaften

"Beton ist der meistverwendeten Baustoff der Welt."[2] Im Vergleich zu anderen Baustoffen weist er folgende Vorteile auf: [1+20+29]

- Hohe Druckfestigkeit
- Formbarkeit
  - Beton ist gießfähig und lässt sich in jede Schalungsform einbringen
  - Freie Formgebung ist möglich
- Gute bauphysikalische Aspekte
  - Schallschutz
  - Feuchtigkeitsschutz

---

1 Kollegger; Skriptum zur Vorlesung Betonbau 1 [1]
2 Das kleine Buch vom Beton, 100 Argumente für das Bauen mit Beton [29]

- Beton ist ein sicherer Baustoff
  - Brandschutz
  - Energietransport sowie -speicher in Form von Rohrleitungen und Behältern
  - Einsatz als Überflutungsschutz, zum Schutz von Flüssen und Küstenstreifen vor Überschwemmungen
- Beton ist beständig gegen
  - Verrotten
  - Vermodern
  - Schimmelpilze
  - Witterungseinflüsse und mechanische Einwirkungen
  - Alterung: Ein Bauwerk aus Beton kann bis zu 2000 Jahre halten
  - Chemikalien (Einsatz als Betonpflastersteine in Tankstellen)
  - ungenießbar für tierische Schädlinge
- Statisch effektiv
  - Hohe Spannweiten mit geringer Konstruktionshöhen wird möglich
  - Hohe Druckfestigkeit
  - Gleichzeitige Erfüllung von mehreren Tragfunktionen ist möglich z.B. Plattenbalken
  - Dämpft Schwingungen
- Wirtschaftlichkeit
  - Preisgünstige Ausgangsstoffe
  - Niedrige Herstellungskosten
  - Recycelbar
  - Weltweit hohe Verfügbarkeit
  - Geringe Erhaltungskosten
  - Leichtigkeit und Eleganz

Damit den Anforderungen an Beton Genüge getan werden kann, müssen die Ausgangsstoffe entsprechende Vorschriften und Normen erfüllen. [1+11+20]

2.3 Ausgangsstoffe

Der Beton stellt sich als Drei-Stoff-System dar, er wird hauptsächlich durch Vermischen von Zement, Gesteinskörnung und Anmachwasser hergestellt. Je nach Anforderung bzw. zur Optimierung bestimmter Betoneigenschaften werden Zusatzmittel und Zusatzstoffe im Beton hinzugefügt. [5]

Zusätze werden entweder gemeinsam mit dem Anmachwasser oder direkt danach zugegeben. [5]

Generell dürfen die Bestandteile von Beton keine Stoffe enthalten, die die Festigkeit, die Dichtigkeit sowie das Erhärten des Betons beeinträchtigen oder zur Korrosion der Bewehrung führen. [4]

2.3.1 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel für die Beton- und Mörtelherstellung. Im Vergleich zu anderen hydraulischen Bindemitteln (Gipsmörtel und Kalkmörtel), weist der Zement eine wesentlich höhere Festigkeit auf. [11]

Durch die Mischung des Zements mit dem Anmachwasser entsteht Zementleim, welcher die Gesteinskörnungen miteinander dauerhaft und fest verkittet. [6]

Zementleim kann sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärten. Nach dem Erhärten entsteht der sogenannte Zementstein, dieser bleibt wasserfest und raumbeständig. [5]

2.3.1.1 Zusammensetzung von Zement gemäß EN 197-1:2011

Zement ist ein Gemenge aus Kalkstein, Ton und Mergel, das bei einer Temperatur von ca. 1450 °C bis zur Sinterung in einem Drehrohrofen zum Portlandzementklinker gebrannt und nach Abkühlung zum Portlandzement fein vermahlen wird. [5]

Durch die Beigabe von anderen Zumahlstoffen ergeben sich verschiedene Zementarten. „Die Zumahlstoffe sind namensgebend für die jeweilige Zementart.“[3]

Nach EN 197-1 wird in folgende fünf hauptzementarten unterschieden:

- CEM I Portlandzement
- CEM II Portlandkompositzement
- CEM III Hochofenzement
- CEM IV Puzzolanzement
- CEM V Kompositzement

Tabelle 2-1: Die 27 Produkte der Familie der Normalzemente [7]

Haupt-arten	Bezeichnung der 27 Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung (Massenanteile in Prozent[a])										
			Hauptbestandteile										Neben-bestandteile
			Klinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolan		Flugasche		Ge-brann-ter Schie-fer	Kalkstein		
						natürlich	natürlich getempert	kiesel-säurereich	kalk-reich				
			K	S	D[b]	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Portlandzement	CEM I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM II	Portlandhütten-zement	CEM II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portland-silicastaubzement	CEM II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portland-puzzolanzement	CEM II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
	Portland-flugaschezement	CEM II/A-V	80-94	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-V	65-79	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		CEM II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
	Portland-schieferzement	CEM II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	0-5
		CEM II/B-T	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	0-5
	Portland-kalksteinzement	CEM II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5
		CEM II/B-L	65-79	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	0-5
	Portlandkomposit-zement[c]	CEM II/A-M	80-88	<---------- 12-20 ---------->									0-5
		CEM II/B-M	65-79	<---------- 21-35 ---------->									
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM IV	Puzzolan-zement[c]	CEM IV/A	65-89	–	<---------- 11-35 ---------->					–	–	–	0-5
		CEM IV/B	45-64	–	<---------- 36-55 ---------->					–	–	–	0-5
CEM V	Komposit-zement[c]	CEM V/A	40-64	18-30	–	<-------- 18-30 -------->			–	–	–	–	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	–	<-------- 31-49 -------->			–	–	–	–	0-5

a Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.

b Der Anteil an Silicastaub ist auf 10 % begrenzt.

c In den Portlandkompositzementen CEM II/A-M und CEM II/B-M, in den Puzzolanzementen CEM IV/A und CEM IV/B und in den Kompositzementen CEM V/A und CEM V/B müssen die Hauptbestandteile außer Klinker durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden (Beispiele: siehe Abschnitt 8).

3 Weigler; Beton – Arten – Herstellung - Eigenschaften [6]

2.3.1.2 Festigkeitsklassen der Zemente

Indem seine Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen der Herstellung in einem Prüfkörper von 4x4x16 cm geprüft wird, kann der Zement nach Festigkeitsklassen unterteilt werden. [3]

"Es werden drei Klassen von Normfestigkeit unterschieden: Klasse 32,5, Klasse 42,5 und Klasse 52,5"[4].

Tabelle 2-2: Zementfestigkeitsklassen [7]

Festigkeit-sklasse	**Druckfestigkeit [MPa]**				**Erstarrung-sbeginn**	**Raum-beständigkeit (Dehnungsmaß)**
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit			
	2 Tage	7 Tage	28 Tage		min	Mm
32,5 L[a]	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 L[a]	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 L[a]	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-				
a Die Festigkeitsklasse gilt nur für CEM III-Zemente.						

[4] DIN EN 197-1:2011-11; Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzement [7]

"Für jede Klasse der Normfestigkeit werden drei Klassen der Anfangsfestigkeit definiert: Eine Klasse mit üblicher Anfangsfestigkeit, durch N gekennzeichnet, eine Klasse mit hoher Anfangsfestigkeit, durch R gekennzeichnet, und eine Klasse mit niedriger Anfangsfestigkeit, die durch L gekennzeichnet wird"[5].

„Die Verwendung eines Zements höherer Festigkeitsklasse beschleunigt die Erhärtung des Betons, verringert aber dessen Nacherhärtung, wie auch aus [Abbildung 2-1] hervorgeht. Eine Beschleunigung der Erhärtung kann vor allem im Zusammenhang mit dem Bauablauf notwendig werden, um Arbeitsschritte, bei denen noch nicht die volle Betonfestigkeit benötigt wird (z.B. Ausschalen, Teilvorspannungen), möglichst bald fortsetzen zu können.“[6]

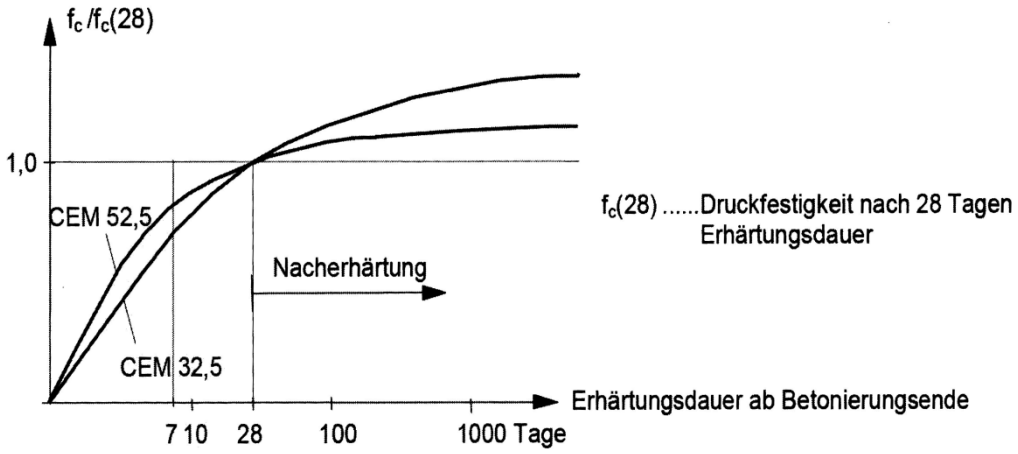


Abbildung 2-1: Einfluss der Zementfestigkeitsklasse auf die Erhärtung des Betons [3]

Die Zunahme der Zementfestigkeit nach 28 Tagen wird als Erhärtungsdauer bezeichnet. Da sie sich aber über einen sehr langen Zeitraum erstreckt, bleibt sie für die Berechnungen von Bauwerken unberücksichtigt [3]. In diesem Zusammenhang wird eine höhere Zementfestigkeit aufgrund seiner Frühfestigkeit (Festigkeit vor 28 Tagen) und weniger aufgrund seiner Erhärtungsdauer (Festigkeit nach 28 Tagen) ausgewählt. [3]

5 DIN EN 197-1:2011-11; Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien vonNormalzement [7]

6 Valentin; Stahlbetonbau, Teil 1 [3]

2.3.2 Gesteinskörnung (Zuschlag)

Der Beton kann als Zweiphasensystem (bestehend aus Zementstein und Zuschlaggemisch) betrachtet werden. [1]

Im Normalbeton hat der Betonzuschlag in der Regel im Vergleich zu Zementstein eine deutlich höhere Festigkeit, einen wesentlich größeren Elastizitätsmodul sowie eine bessere Dauerhaftigkeit und keine Volumenänderung infolge von Feuchtigkeit. In Tabelle 2-3 werden die wesentlichen Eigenschaften von Zuschlag, Zementstein und Beton miteinander verglichen. [1]

Tabelle 2-3: Vergleich der Eigenschaften von Zuschlag, Zementstein, Beton [1]

	$F_{c,cube}$ [N/mm²]	E [N/mm²]	φ_∞	ε_s [‰]
Zuschlag (Quarz)	250	60.000	0	0
Zementstein (w/b=0,50)	25	10.000	5	2
Beton C 20/25	30	35.000	2	0.2

Unter Gesteinskörnung - nach ÖNORM EN 12620 versteht man ein "körniges Material für die Verwendung im Bauwesen"[7] welches natürlich, industriell hergestellt oder rezykliert sein kann.

Jenes bildet die Grundstruktur des Betons und sollte durch Verdichtung möglichst hohlraumarm aufgebaut sein. Es umfasst etwa 70% des Betonvolumens. [2]

Anforderungen an die Gesteinskörnung sind: [2+4]

- Festigkeit
- Kornform
- Kornzusammensetzung
- Sauberkeit
- schädliche Anteile

[7] ÖNORM EN 12620:2014-02-15; Gesteinskörnungen für Beton [28]

- Frostwiderstand
- Sieblinien der Zuschläge (Verarbeitbarkeit)
- Eigenfeuchte des Zuschlages
- Dauerhaftigkeit
- chemische Verbindungen

2.3.2.1 Festigkeit

Etwa 70% des Betonvolumens beläuft sich auf die Zuschlagskörner. Jene haben ein hohes Elastizitätsvermögen, weswegen sie die Betondruckfestigkeit maßgebend beeinflussen. [1]

"Gesteinskörnungen haben in der Regel eine höhere Festigkeit als Beton"[8]. Im Normalbeton sind die üblichen Kontrollfestigkeiten, die im Rahmen der Betonherstellung ermittelt werden, für die Beurteilung der Gesteinskörnungsfestigkeit in der Regel ausreichend. Für besonders hochfesten Beton ist sie jedoch unter Umständen in Betracht zu ziehen. [28]

2.3.2.2 Kornform

"Frischbeton soll ein Maximum an Verdichtungswilligkeit bei einer möglichst geringen Zementleimzugabe besitzen. Die Verdichtungswilligkeit wird unter anderem durch die Kornform beeinflusst."[9]

Es ist sinnvoll gedrunge Kornformen zu verwenden, da sie verdichtungswillig sind. Ungünstig sind jedenfalls länglich-splittrige und plattige Körner. Diese Kornformen sind sperrig. [9]

Die Plattigkeit kann mit Hilfe der Plattigkeitskennzahl FL_{INDEX}, welche nach EN 933-3 bestimmt wird, beurteilt werden. [9]

"Diese Prüfung besteht aus zwei Siebungen. In der ersten Siebung wird durch Analysensiebe die Probe in verschiedene Kornklassen d_i/D_i aufgeteilt. Jede dieser Kornklassen d_i/D_i wird dann auf Stabsieben mit parallelen Stäben der Weite $d_i/2$

[8] ÖNORM EN 12620:2014-02-15; Gesteinskörnungen für Beton [28]
[9] Bölcskey E., Bruckner H.; Frischbeton [9]

gesiebt. Die Gesamt-Plattigkeitskennzahl wird als Gesamtmasse aller Durchgänge durch die Stabsiebe berechnet und in Prozent der Gesamt-Trockenmasse der geprüften Körner angegeben."[10]

Tabelle 2-4: Kategorien für Höchstwerte der Plattigkeitskennzahl [28]

Plattigkeitskennzahl	**Kategorie FI**
≤ 15	FI_{15}
≤ 20	FI_{20}
≤ 35	FI_{35}
≤ 50	FI_{50}
≥ 50	$FI_{agegeben}$
Keine Anforderung	FI_{NR}

2.3.2.3 Schädliche Anteile

Stoffe wie Ton, Lehm oder sehr feines Gesteinsmehl sind abschlämmbare Bestandteile, deren Korngröße kleiner als 0,063 mm ist. [3]

Ein geringer Anteil dieser Stoffe ist wünschenswert, da sie die Dichtigkeit sowie Verarbeitbarkeit des Betons und die damit zusammenhängenden Eigenschaften steigern.

Es ist jedoch zu beachten, dass ein sehr großer Anteil an abschlämmbaren Bestandteilen die Betondruckfestigkeit herabsetzt, da die Haftung an den Kornoberflächen den Verbund zwischen Zementleim und Zuschlagskorn mindert. [3]

2.3.2.4 Chemische Verbindungen

Der Zuschlag darf unter dem Einfluss von Wasser nicht zersetzt werden. Es dürfen keine schädlichen Verbindungen, welche den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen, auftreten. [4]

[10] Bölcskey E., Bruckner H.; Frischbeton [9]

2.3.2.5 Sauberkeit

Ungewaschene Gesteinskörnungen verringern die Betonqualität in Bezug auf den Frostwiderstand. [2]

2.3.2.6 Kornzusammensetzung

Um viele Anforderungen wie die Verarbeitbarkeit, die Festigkeit des Betons und geringen Wasserbedarf zu erreichen, ist es wichtig die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung sinnvoll zu wählen, um dementsprechende Sieblinienbereiche zu erwirken. [3]

Das Zuschlagsgemisch besteht aus Körnern mit unterschiedlichen Größen.

Nach ÖNORM EN 12620 wird die Kornzusammensetzung unterschieden in:

- Grobe Gesteinskörnungen
- Feine Gesteinskörnungen
- Natürlich zusammengesetzte Gesteinskörnungen
- Korngemisch
- Füller (Gesteinsmehl)
- Gesteinskörnungen für besondere Anwendungsgebiete

Einerseits sollte das Korngemisch so aufgebaut sein, dass es möglichst große Körner beinhaltet, was zu weniger Wasserbedarf führt. [3] Anderseits ist es relevant, kleine Körner zu verwenden um ein hohlraumarmes Gemisch zu erreichen. [4]

Die kleinen Körner, die sogenannten Füller, füllen den Hohlraum zwischen den größeren Körnern und führen somit zur Erhöhung der Verarbeitbarkeit und einem besseren Verdichten sowie zur Erleichterung des Förder- und Mischaufwandes des Betons. Deshalb ist es zweckmäßig, den Beton aus Gesteinskörnungen mehrerer Korngruppen herzustellen.[3] „Das größte Korn darf 1/3 der kleinsten Bauteilabmessung (besser 1/5) nicht überschreiten. Der überwiegende Teil des

Zuschlags soll kleiner als der Abstand der Stahleinlagen untereinander und von der Schalung sein.“[11]

Korngruppe :

"Nach den Prüfkorngrößen (Nennweite einer Sieböffnung in mm, durch die ein Korn gerade noch hindurchgeht) werden die Gesteinskörnungen in verschiedene Korngruppen [d/D] eingeteilt."[12]

Dabei wird die untere Siebgröße mit d und die obere Siebgröße mit D bezeichnet. Das Verhältnis D/d darf den Wert 1,4 nicht unterschreiten. [9]

"Die Korngruppen sind unter Verwendung zweier Siebgrößen nach [Tabelle 2-5] zu bezeichnen, wobei sich die Bezeichnung aus Werten des Grundsiebsatzes, des Grundsiebsatzes plus Ergänzungssiebsatz 1 oder des Grundsiebsatzes plus Ergänzungssiebsatz 2 zusammensetzen muss. Eine Kombination der Siebgrößen von Ergänzungssiebsatz 1 und Ergänzungssiebsatz 2 ist nicht zulässig."[13]

Tabelle 2-5: Siebgrößen zur Bezeichnung von Korngrößen [28]

Grundsieb-satz mm	Grundsiebsatz plus Ergänzungs-siebsatz 1 mm	Grundsiebsatz plus Ergänzungssiebsatz 2 mm
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4 (22)	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63
ANMERKUNG: Die in Klammern gesetzten gerundeten Größen können zur vereinfachten Bezeichnung der Korngruppen verwendet werden.		

[11] Lohmeyer; Stahlbetonbau Bemessung – Konstruktion - Ausführung [4]
[12] Bölcskey E., Bruckner H.; Frischbeton [9]
[13] ÖNORM EN 12620:2014-02-15; Gesteinskörnungen für Beton [28]

Sieblinien der Zuschläge :

Eine Sieblinie erhält man, indem man die Gewichtsmenge der Siebdurchgänge abhängig von jeweiligen Lochweite grafisch darstellt. [4]

Dabei kann man zwischen stetigen und unstetigen Sieblinien unterscheiden. Bei unstetigen Sieblinien entfallen einzelne Korngruppen. Solche Korngruppen werden auch als Ausfallkörnungen bezeichnet [5].

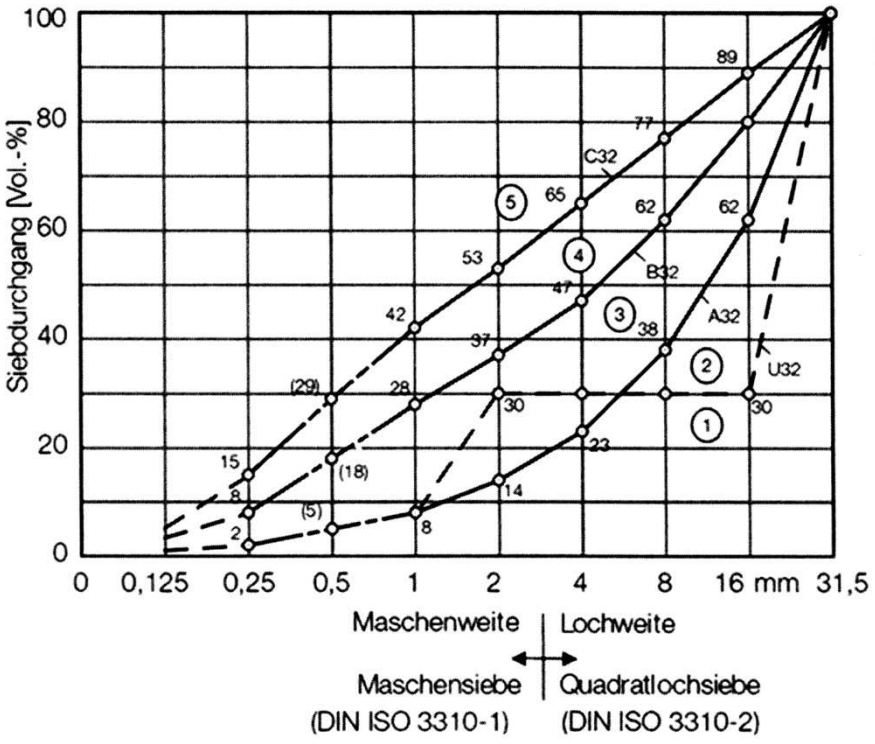


Abbildung 2-2: Grenzsieblinie für Betonzuschlag nach DIN 1045-2 / Anhang L [26]

„Aus theoretisch begründeten und experimentell nachgewiesenen idealen Zusammensetzungen der Zuschlaggemenge wurden für die praktischen Bedingungen Sieblinienbereiche festgelegt, die durch die Regelsieblinien A, B und C begrenzt werden.“[14]

Für einen hochwertigen Beton sollte die Sieblinie des Korngemischs zwischen A und B, und für einen Beton mit niedrigeren Betondruckfestigkeit zwischen B und C liegen. [5]

[14] Röhling; Betonbau [5]

2.3.2.7 Eigenschaften der Gesteinskörnungen

Die Gesteinskörnungen natürlicher Gesteinsherkunft benötigen laufende Überwachungen und Prüfungen, da sie deutlich größeren Schwankungen als die Gesteinskörnungen mit industriell hergestellten Bestandteilen unterliegen. [3]

2.3.3 Wasser

Damit der Frischbeton verarbeitbar, sowie für das Betonieren in eine gewünschte Form gießfähig wird, ist Wasser notwendig. Erst bei Zugabe von Wasser beginnt der Erhärtungsprozess des Betons durch chemische Reaktionen vom Zement. [4]

"Im Allgemeinen häng die Eignung eines Wassers für die Betonherstellung von dessen Herkunft ab."[15]

Nach DIN EN 1008 wird zwischen folgende Arten von Wasser unterschieden:

Trinkwasser, Restwasser aus Wiederaufbereitungsanlagen der Betonherstellung, Grundwasser, natürliches Oberflächenwasser und industrielles Brauchwasser, Meerwasser oder Brachwasser, Abwasser. [8]

Von oben erwähnten Wasserarten kann das Trinkwasser ohne Eignungsprüfung verwendet werden. Abwasser darf auf keinen Fall und die restlichen Wasserarten sind erst nach deren Eignungsprüfung zu verwenden. [8]

"Über den wirksamen Wassergehalt und damit den Wasserzementwert können die Verarbeitbarkeit, aber insbesondere die Festigkeit und Dichtigkeit des Zementsteins und damit die Festbetoneigenschaften maßgeblich beeinflusst werden."[16]

Der wirksame Wassergehalt setzt sich aus der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung, Wasseranteil in Zusatzmitteln und -stoffen sowie dem Zugabewasser zusammen. [30]

$$W.W. = Oberflächenfeuchte + \text{Wasseranteil in Zusatzmitteln und} - \text{stoffen} + \text{Zugabewasser}$$

(Gl. 1)

[15] DIN EN 1008:2002; Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser [8]

[16] Zement-Merkblatt Betontechnik B4; Frischbeton Eigenschaften und Prüfungen [30]

2.3.4 Betonzusatzstoffe

"Betonzusatzstoffe sind fein verteilte Stoffe, die bestimmte Eigenschaften des Betons beeinflussen."[17] Da sie dem Beton als Ergänzung in großen Mengen hinzugefügt werden, sind sie bei der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen. [31]

Die Betonzusatzstoffe haben vorrangig die Aufgabe bestimmte Frischbetoneigenschaften (z. B. Verarbeitbarkeit, Erstarrungsverhalten) und Festbetoneigenschaften (z. B. Dichtigkeit, Festigkeit) zu verändern. Um die homogene Betoneigenschaft zu erzielen, ist eine einheitliche Verteilung der Zusatzstoffe im Beton unerlässlich. [31]

Brauchbar sind dabei nur Stoffe, die den Korrosionsschutz der Bewehrung sowie die Dauerhaftigkeit und die Festigkeit des Betons nicht ungünstig beeinflussen. Daher sind nur Betonzusatzstoffe, die entweder der Norm entsprechen oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung besitzen, zulässig. [31]

Zum Einsatz kommen [31]:

- Inaktive Zusatzstoffe
- Puzzolanische Zusatzstoffe
- Latent hydraulische Stoffe
- Organische Zusatzstoffe

"Da Betonzusatzstoffe auch ungünstige Nebenwirkungen haben können, sind bei solchen Stoffen, die nicht mineralischen Ursprungs sind oder bei solchen, die in den Erhärtungsvorgang eingreifen, stets Erstprüfungen durchzuführen."[17]

[17] Zement-Merkblatt Betontechnik B3; Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe [31]

2.3.4.1 Inaktive Zusatzstoffe

Zu dieser Gruppe gehören Quarz- und Kalksteinmehl oder Pigmente. Sie heißen inaktiv weil sie mit Zement und Wasser nicht reagieren und somit in die Hydratation nicht eingreifen. Aufgrund ihre Korngröße, -zusammensetzung und -form dienen sie zur Verbesserung des Kornaufbaus im Mehrkornbereich. Durch ihren Einsatz wird die Verarbeitbarkeit des Frischbetons gesteigert. [31]

2.3.4.2 Puzzolanische Zusatzstoffe

"Puzzolanische Zusatzstoffe lassen sich in natürliche Puzzolane, wie Trass und künstliche Puzzolane, wie Flugasche oder Silikastaub einteilen. Sie reagieren mit dem bei der Hydratation des Zementsteins entstehenden Calciumhydroxid und bilden dabei zementsteinähnliche Erhärtungsprodukte. Solche Stoffe tragen zur Erhärtung bei und dienen aufgrund ihrer Korngröße, Zusammensetzung und -form der Verbesserung des Kornaufbaus im Mehlkornbereich."[18]

2.3.4.3 Latent hydraulische Stoffe

Hüttensand gehört zu dieser Gruppe. Um selbst hydraulisch zu erhärten bedürfen sie eines Anregers (Calciumhydroxid oder Calciumsulfat). [31]

2.3.4.4 Organische Zusatzstoffe

Zu dieser Gruppe gehören Polymerdispersionen, Bitumenemulsionen oder Wachsemulsionen. Durch ihren Einsatz wird die Verarbeitbarkeit, Dichtigkeit, Biegezugfestigkeit und der Wiederstand gegen chemischen Angriff verbessert. Sie werden vor allem in Instandsetzungsmörtel und -betone verwendet und benötigen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. [31]

[18] Zement-Merkblatt Betontechnik B3; Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe [31]

2.3.5 Betonzusatzmittel

Betonzusatzmittel werden in der Betonindustrie als Hilfsmittel verwendet, um die Betoneigenschaften des Frisch- oder Festbetons wie z.B. Verarbeitbarkeit, Erstarrungsverhalten, Erhärten und Frostwiderstand, durch chemische oder physikalische Wirkung oder durch beides, zu verbessern. [31]

"Dabei muss gelegentlich auch die unerwünschte Änderung einer anderen Betoneigenschaft in Kauf genommen werden. Voraussetzung für die erfolgreiche Verwendung von Betonzusatzmitteln ist die Berücksichtigung der anerkannten Grundsätze über die Mischungszusammensetzung sowie über die Verarbeitung und Nachbehandlung des Betons." [19]

Im Vergleich zu Betonzusatzstoffen ist die Zugabemenge von Betonzusatzmitteln im Beton gering (<5 M.-% des Zementanteils) und daher wird als Raumanteil des Betons nicht berücksichtigt. [31]

Zum Einsatz kommen:

- Betonverflüssiger
- Fließmittel
- Verzögerer
- Beschleuniger
- Luftporenbildner
- Zusatzmittel für Einpressmörtel
- Dichtungsmittel
- Stabilisierer
- Viskositätsmodifizierer
- Chromatreduzierer
- Recyclinghilfen für Waschwasser
- Schaumbildner
- Sedimentationsreduzierer

[19] Zement-Merkblatt Betontechnik B3; Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe [31]

- Passivatoren (Korrosionsinhibitoren)
- Schwindreduzierer

Die Betonzusatzmittel werden immer als Ergänzungsmittel dem Frischbeton (pulverförmig oder flüssig) beigemengt. "Fließmittel zur Zugabe im Fahrmischer werden nur flüssig geliefert."[20]

2.3.5.1 Betonverflüssiger

Die Betonverflüssiger haben die Aufgabe - bei gleichbleibendem Wassergehalt - die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und/oder - durch Verminderung der Wasserzugabe - die Festigkeitseigenschaften des Festbetons zu steigern, indem sie die Oberflächenspannung des Wassers herabsetzen. [31]

Durch ihren Einsatz ist eine Wassereinsparung zwischen 5 und 10 l/m³ Beton möglich.[31]

Zur möglichen Nebenwirkungen zählen: Einführung von Luftporen, Festigkeitsminderung und Erstarrungsverzögerung. [31]

2.3.5.2 Fließmittel

Sie wirken stark verflüssigend und dürfen dem Fahrmischer sowohl im Betonwerk als auch nachträglich auf der Baustelle eingemischt werden. [31]

Durch ihren Einsatz kann eine verbesserte Verarbeitbarkeit des Frischbetons und/oder eine Reduzierung des Wasseranspruchs erreicht werden. [31]

Einführung von Luftporen, Festigkeitsminderung und Erstarrungsverzögerung zählen zur ihren möglichen Nebenwirkungen. [31]

2.3.5.3 Verzögerer

Durch die Zugabe von Verzögerern wird die Verarbeitbarkeitszeit des Betons verlängert, indem das Erstarren des Zementleims verlangsamt wird. [31]

---

[20] Zement-Merkblatt Betontechnik B3; Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe [31]

Sie werden "für größere Bauteile, die ohne Arbeitsfugen betoniert werden müssen, bei heißem Wetter oder bei Transportbeton (lange Fahrzeiten)"[21] verwendet.

Neben Verlängerung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons können noch Wasserdurchlässigkeit, Nacherhärtung und Endfestigkeit des Betons verbessert werden. [31]

Zur möglichen Nebenwirkungen zählen: Stärkere Ausblühungen, Farbunterschiede bei glattem Sichtbeton, erhöhtes Schwinden. [31]

Bei hohen Temperaturen oder überhöhter Dosierung kann mit Umkehrung der Wirkung gerechnet werden.

2.3.5.4 Beschleuniger

Sie "bewirken eine Beschleunigung des Erstarrens bzw. Erhärtens und damit aber auch eine schnellere Wärmeentwicklung."[21]

2.3.5.5 Luftporenbildner

Luftporenbildner sind Zusatzmittel, die im Beton viele kleine kugelförmige Luftporen erzeugen, die auch in der Zeit des Mischens und Verdichtens stabil bleiben. [31]

Die Entstehung der Luftporen ist stark an Betonzusammensetzung, die Herstellung und an die Temperatur gebunden, dass ein erhöhter Überwachungsaufwand unabdingbar ist. [31]

Durch die Zugabe von Luftporenbildner wird der Widerstand des Festbetons gegenüber Frost- und Tauwechseln deutlich erhöht. Die Ursache dafür ist, dass der entstehende Druck zufolge Einfrieren des Zementsteingefüges durch Luftporen aufgefangen werden kann. [5]

2.3.5.6 Zusatzmittel für Einpressmörtel

Sie kommen im Spannbeton zum Einsatz und verhindern das Sedimentieren des Zementmörtels im Spannkanal. Durch Einpresshilfen wird der Wasseranspruch des

[21] Zement-Merkblatt Betontechnik B3; Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe [31]

Mörtels vermindert und das Fließvermögen des Frischbetons beim Einpressen verbessert. [31]

2.3.5.7 Dichtungsmittel

Betondichtungsmittel sind Zusatzmittel, welche die Wasseraufnahme des Betons durch kapillare Saugwirkung oder das Eindringen von Druckwasser in den Beton herabsetzen. [31]

"Die Betonzusammensetzung und -verarbeitung sowie die Nachbehandlung haben jedoch einen größeren Einfluss auf die Wasserundurchlässigkeit von Beton als ein Dichtungsmittel."[22]

Minderung der Betonfestigkeit, Einführen von Luftporen, Nachlassen der Wirkung nach längerer Zeit zählen zu möglichen Nebenwirkungen. [31]

2.3.5.8 Stabilisierer

Die Stabilisierer haben die Aufgabe das Zusammenhaltevermögen und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu verbessern sowie das Betonbluten zu vermindern. [31]

Unter Bluten wird das Absondern von Wasser eines fertig gemischten, eingebrachten und verdichteten Betons, in dem die Zuschlagkörner sich absetzen, verstanden. [10]

Durch Stabilisatoren werden die Herstellung von Spritzbeton, Pumpbeton, Unterwasserbeton und Sichtbetonoberflächen erleichtert. [31]

2.3.5.9 Viskositätsmodifizierer

"Sie verbessern die Kohäsion und begrenzen die Entmischung ungünstig zusammengesetzter Betonmischungen und schützen Betonpumpen und Förderleitungen vor übermäßigem Verschleiß."[22]

---

[22] Zement-Merkblatt Betontechnik B3; Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe [31]

2.3.5.10 Chromatreduzierer

Sie "dienen der Reduktion von aus dem Zement stammendem löslichem Chrom(VI) zu Chrom(III). Sie werden bei Betonen und Mörteln eingesetzt, die in Bereichen mit Hautkontakt verarbeitet werden und nicht mit chromatarmem Zement [...] hergestellt [worden sind], um Hautallergien usw. zu reduzieren."[23]

2.3.5.11 Recyclinghilfen für Waschwasser

Sie "sollen eine Widerverwendung von Waschwasser, das beim Reinigen von Mischfahrzeugen anfällt, ermöglichen, indem sie die Hydratation des Zements blockieren."[23]

2.3.5.12 Schaumbildner

Schaumbildner werden für die Herstellung eines Schaumbetons zw. Betons mit porosiertem Zementleim verwendet. [31]

2.3.5.13 Sedimentationsreduzierer

Durch ihren Einsatz wird das Sedimentieren von Betonbestandsteilen im Frischbeton vermindert.

2.3.5.14 Schwindreduzierer

Sie "reduzieren das Schwinden des Zementsteins und vermindern die Neigung zum Reißen und Verformen des erhärtenden Bauteils. Ihre Wirkung ist stark abhängig vom Wasserzementwert, der Zementart, der Dosierung, dem Betonalter sowie den Lagerungsbedingungen des Betons (Temperatur, Feuchte)."[23]

---

[23] Zement-Merkblatt Betontechnik B3; Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe [31]

2.4 Klassifizierung von Beton

Beton kann nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden: [1+3+5]

- nach dem Erhärtungszustand
- nach der Eigenschaften
- nach der Rohdichte
- nach dem Ort der Herstellung
- nach dem Ort der Verarbeitung
- nach den Anforderungen der Herstellung und Überwachung
- nach dem Fördern, Verarbeiten und Verdichten
- nach der Anwendung und Berechnung
- nach Expositionsklassen
- nach den Festigkeitsklassen - nach Eurocode 2

2.4.1 Einteilung nach dem Erhärtungszustand

- Frischbeton, junger Beton, Festbeton

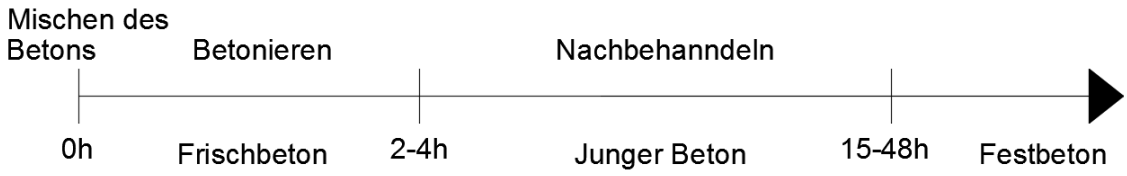


Abbildung 2-3: Einteilung nach dem Erhärtungszeit [1]

Der Beton ist sofort nach dem Mischen gießfähig und kann mit Hilfe von Schalungen in der gewünschten Form hergestellt werden. Zu diesem Zeitpunkt ist der Beton noch verarbeitbar. [1]

In den ersten 48 Stunden in denen der Hydratationsprozess abläuft, kommt der Beton zum Abbinden. Zu diesem Zeitpunkt spricht man von jungem Beton. Nach dem Abbindeprozess hat der Beton eine gewisse Festigkeit und der Abbindeprozess ist so weit entwickelt, dass man von einem Festbeton sprechen kann. [1]

2.4.2 Einteilung nach der Eigenschaften

- Druckfestigkeitsklasse (ggf. von 28 Tagen abweichender Zeitpunkt der Bestimmung der Druckfestigkeit), Feuchtigkeitsklasse, Größtkorn der Gesteinskörnung, Konsistenzklasse, unbewehrt, Stahlbeton oder Klasse des Chloridgehalts [16]

2.4.3 Einteilung nach der Rohdichte

- Leichtbeton, Normalbeton, Schwerbeton [1]

Der Beton wird auf Grund seiner Rohdichte in 3 Hauptgruppen eingeteilt.

Tabelle 2-6: Einteilung der Beton nach der Rohdichte [16]

Einteilung	**Rohdichte (Trockendichte) [Kg/m³]**	**Gesteinskörnung**
Leichtbeton	$800 \leq \rho \leq 2000$	Blähschiefer, Blähton, Hüttenbims, Naturbims
Normalbeton	$2000 \leq \rho \leq 2600$	Sand, Kies, Splitt, Hochofenschlacke
Schwerbeton	$\rho > 2600$	Eisenerz, Schwerspat Eisengranulat

Für übliche Hochbau- und Tiefbaukonstruktionen findet Normalbeton Anwendung. Schwerbeton wird in U-Bahnkonstruktionen aufgrund seiner guten Schalldämmung eingesetzt. Um das gesamte Eigengewicht einer Konstruktion zur verringern oder die Schall- und Wärmedämmung zu verbessern wird Leichtbeton verwendet. [3]

2.4.4 Einteilung nach dem Ort der Herstellung

- Baustellenbeton, Transportbeton

Bei Baustellenbeton wird der Beton direkt auf der Baustelle - vor Ort und durch die verarbeitenden Personen - durch Mischen seiner Bestandteile hergestellt. Transportbeton wird in einem Betonwerk durch Dritte hergestellt und mit einem Mischwagen auf die Baustelle transportiert. [3]

2.4.5 Einteilung nach dem Ort der Verarbeitung

- Ortbeton, Fertigteile

Beim Ortbeton handelt es sich um Baustellenbeton oder Transportbeton, der auf der Baustelle nach Einbringung in der Schalung verdichtet wird. [3]

Die Fertigteile sind Bauteile die an einem anderen Ort - nämlich im Fertigteilwerk und nicht an ihrem Bestimmungsort - hergestellt werden. Nach ihrer Lieferung mit Sondertransportwagen werden sie auf der Baustelle montiert. Die Verwendung von Fertigteilelemente verringert die Bauzeit erheblich. [3]

2.4.6 Einteilung nach den Anforderungen der Herstellung und Überwachung

- Rezeptbeton, Erstprüfungsbeton

„Als Rezeptbeton wird Beton bezeichnet, der nach den Vorschriften oder nach den Vorgaben des Abnehmers mit der erforderlichen (sic) Zementmenge gemischt wird. Dabei ist der Mindestzementgehalt so zu bemessen, dass in Abhängigkeit von der Betonkonsistenz, der Kornzusammensetzung und der Zementfestigkeitsklasse (sic) die geforderten Betonfestigkeitsklassen sowie der Rostschutz der Stahleinlagen gewährleistet sind.“[24]

Bei Erstprüfungsbeton wird vor der erstmaligen Herstellung und Verwendung mit der Eignungsprüfung festgestellt, ob die nach Normen geforderte Frisch- und Festbetoneigenschaften den zu erwartenden Umgebungsverhältnissen der Baustelle entsprechen. [3]

[24] www.baumarkt.de/lexikon/Rezeptbeton.htm [23]

2.4.7 Einteilung nach dem Fördern, Verarbeiten und Verdichten

- "Pumpbeton, Spritzbeton, Unterwasserbeton, Stampfbeton, Schleuderbeton, Vakuumbeton, selbstverdichtender Beton"[25]

2.4.8 Einteilung nach Anwendung und Berechnung

- unbewehrter oder gering bewehrter Beton, Stahlbeton, Spannbeton

Bei unbewehrten oder gering bewehrten Bauteile ist die erforderliche Bewehrungsmenge unterhalb der Mindestbewehrung.

[25] Kollegger; Skriptum zur Vorlesung Betonbau 1 [1]

2.4.9 Einteilung nach Expositionsklasse

Die Betonbauwerke müssen zusätzlich zu den lastabhängigen Einwirkungen den sogenannten lastunabhängigen Einwirkungen bzw. Umwelteinwirkungen standhalten.[27]

Unter den Expositionsklassen werden die abschätzbaren Einwirkungen aus verschiedenen Umgebungsbedingungen verstanden. Dabei werden zwischen Einwirkungen auf die metallischen Teile im Beton, auf die Bewehrung und auf den Beton selbst unterschieden. [27]

Tabelle 2-7: Expositionsklassen aufgrund Umwelteinwirkungen [12]

Klasse	**Beschreibung der Umgebung**	**W/B Wert**
X0	Beton ohne Bewehrung; Beton mit Bewehrung; sehr trocken	-
XC1	Trocken oder ständig nass	0,70
XC2	Nass, selten trocken, mäßige Feuchte, wechselnd nass und trocken	0,65
XC3	Wasserdruckhöhe bis 10 m	0,60
XC4	Wasserdruckhöhe über 10 m	0,50
XD1	Mäßige Feuchte	0,55
XD2	Nass, selten trocken	0,55
XD3	Wechselnd nass und trocken	0,45
XF1	Mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	0,55
XF2	Mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	0,50
XF3	Hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	0,55
XF4	Hohe Wassersättigung, mit Taumittel	0,45
XA1	Chemisch schwach angreifende Umgebung	0,55
XA2	Chemisch mäßig angreifende Umgebung	0,45
XA3	Chemisch stark angreifende Umgebung	HL-SW

XM1	Mäßige Verschleißbeanspruchung	0,55
XM2	Schwere Verschleißbeanspruchung	0,45
XM3	Extreme Verschleißbeanspruchung	0,45

Die Abkürzungen bedeuten

- X0 Keine Korrosion
- XC Korrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung
- XD Korrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser
- XS Korrosion, ausgelöst durch Chloride aus dem Meerwasser
- XF Frostangriff mit und ohne Taumittel
- XA Chemischer Angriff (treibend oder lösend)
- XM Verschleißbeanspruchung

Auf ein Bauwerk können mehrere Expositionsklassen gleichzeitig zutreffen, da sich diese auf die Betonoberflächen, die den Umweltbedingungen ausgesetzt sind, beziehen.

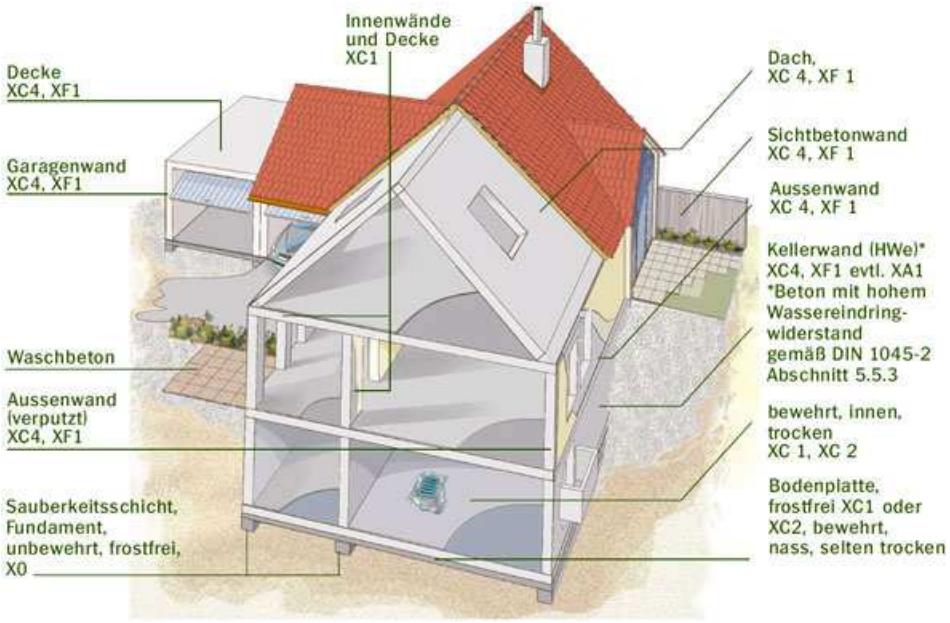


Abbildung 2-4: Beispiel für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklasse [25]

2.4.10 Einteilung nach Eurocode 2 – Nach Festigkeitsklasse

In Eurocode EN 1992-1-1 und ÖNORM wird der Beton üblicherweise nach seiner Druckfestigkeit, die nach einer Erhärtungszeit von 28 Tagen eintritt, klassifiziert. [1]

Tabelle 2-8: Einteilung der Beton nach Seine Druckfestigkeit [3]

C	12/15	16/20	20/25	25/30	30/37	35/45	40/50	45/55	50/60
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60
f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
f_{cm}	20	24	28	33	38	43	48	53	58
f_{cm}	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
$f_{ctk,0,05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9
$f_{ctk,0,95}$	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3
E_{cm}	27	29	30	31	33	34	35	36	37
ε_{c1}	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45
ε_{cu1}	3,5								
ε_{c2}	2,0								
ε_{cu2}	3,5								
n	2,0								
ε_{c3}	1,75								
ε_{cu3}	3,5								

Es bedeuten:

$f_{ck,\ cube}$	N/mm² = MPa	Charakteristische Würfeldruckfestigkeit
f_{ck}	N/mm² = MPa	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit
$f_{cm} = f_{ck} + 8$	N/mm² = MPa	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit
$f_{ctm} = 0{,}30.f_{ck}^{\ 2/3}$	N/mm² = MPa	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit
$f_{ctk,0,05} = 0{,}7.f_{ctm}$	N/mm² = MPa	Charakteristischer Wert der Betonzugfestigkeit, 5%-Quantil (5% Versagenswahrscheinlichkeit)
$f_{ctk,0,95} = 1{,}3.f_{ctm}$	N/mm² = MPa	Charakteristischer Wert der Betonzugfestigkeit, 95%-Quantil (95% Versagenswahrscheinlichkeit)
$E_{cm} = 22.\ [f_{cm}/10]^{0,3}$	GPa	Elastizitätsmodul

Aus der obigen Tabelle erkennt man, dass die Angaben der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} oder der Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ (MPa bzw. N/mm²) für die Einordnung des Betons in eine bestimmte Betonfestigkeitsklasse maßgebend sind. [1]

Grundsätzlich ist die Betondruckfestigkeit der wichtigste Parameter für die Beurteilung der mechanischen Beanspruchbarkeit des Betons. [1]

Im nächsten Abschnitt wird daher die Betondruckfestigkeit näher betrachtet.

2.5 Betondruckfestigkeit

Die Druckfestigkeit nach einer Erhärtungszeit von 28 Tagen ist das Wichtigste Merkmal des Betons und im Verhältnis zu anderen Parametern leichter zu ermitteln.[5] Eine Kenntnis über sie ermöglicht die Beurteilung der Betonqualität des Festbetons sowie die Berechnung der anderen Festigkeitsklassen wie etwa die Betonzugfestigkeit oder Elastizitätsmodul. [1]

In Österreich und anderen europäischen Ländern wird die Betondruckfestigkeit nach seiner Würfeldruckfestigkeit (Versuchskörper sind Würfelformen mit 150 mm Kantenlänge), in wiederum anderen Ländern nach seiner Zylinderdruckfestigkeit (Versuchskörper sind Zylinderformen mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe gleich dem doppelten Durchmesser) ermittelt. [5]

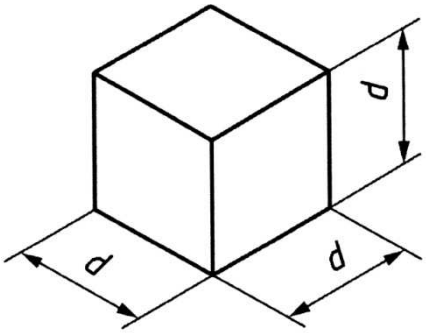


Abbildung 2-5: Würfe [14]

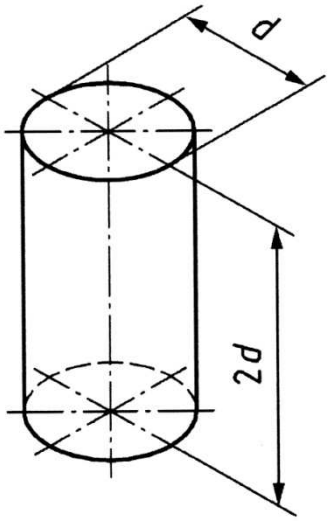


Abbildung 2-6: Zylinder [14]

In den obigen Abbildungen bezeichnet d das Nennmaß. Folgende Nennmaße sind möglich: 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm. Nach DIN EN 12390-1 darf das benannte Maß nur ± 10 % abweichen. [14]

Für die Betonprobenherstellung müssen die Formen kalibriert sein. [14]

„Sofern erforderlich, sollte vor dem Füllen die Innenfläche mit einer dünnen Schicht aus einem nicht reagierenden Entschalungsmittel bedeckt werden, um zu verhindern, dass der Beton an der Form haftet.“[26]

Zwecks der Vereinheitlichung der Betonfestigkeitsbezeichnung wird in der ÖNORM EN 1992-1-1 die Betondruckfestigkeit daher sowohl in der Zylinder- als auch in der Würfeldruckfestigkeit angegeben. [3] vgl. Tabelle 2-8 auf der Seite 28.

Die Bezeichnung C25/30 bedeutet etwa, dass der Beton eine Zylinderdruckfestigkeit von 25 N/mm² und eine Würfeldruckfestigkeit von 30 N/mm² aufweist. [3]

Grundsätzlich beträgt die Zylinderdruckfestigkeit ca. 80 bis 85 % der Würfeldruckfestigkeit. Da beim Lastversuch die Querdehnung der Würfel durch die Reibung zwischen den Lastplatten und der Würfeloberfläche verhindert wird, ist die Druckfestigkeit eines Würfels höher als die eines Zylinders. [3]

In Bruchbildern ist nachzuvollziehen, dass bei Würfeln die Brüche näherungsweise kegelförmig sind, während sie bei Zylindern parallel zur Kraftachse in Richtung der Last auftreten. [3]

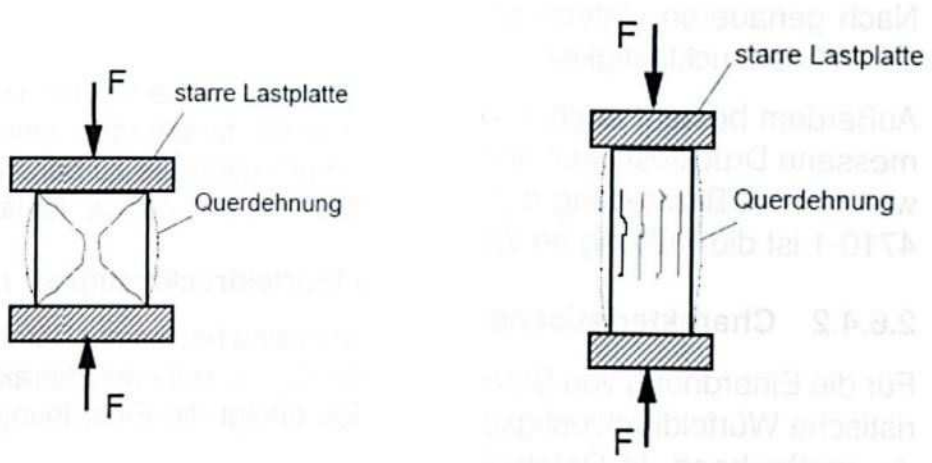


Abbildung 2-7: Unterschiedliche Behinderung der Querdehnung der Formen [3]

[26] ONR 23303:2010; Prüfverfahren Beton (PVB) [15]

Da aber die Zylinderdruckfestigkeit und die auftretenden Bruchbilder mit den tatsächlichen Beanspruchungsverhältnissen in einem Bauwerk besser übereinstimmen, wird nach ÖNORM EN 1992-1-1 die Zylinderdruckfestigkeit für die Berechnungen verwendet. [3]

Für die Ermittlung der Betondruckfestigkeit wird der Beton in Zylinderformen und Würfelformen eingebracht, verdichtet und unter genormten Bedingungen gelagert.

Nach 28 Tagen Lagerung werden die Betonformen in einer Druckprüfmaschine getestet. Die ermittelten Druckfestigkeiten gelten nur für diesen spezifischen Zeitpunkt. Ist für bestimmte Anwendungsfälle die Kenntnis der Festigkeit zu einem früheren Zeitpunkt notwendig, muss die ermittelte 28-Tage-Festigkeit unter Berücksichtigung des Betonalters und des verwendeten Zements rückgerechnet werden. [3]

Aufgrund des Zusammenhanges zwischen der Frischbetonzusammensetzung und der Betondruckfestigkeit ist eine Abschätzung der zu erwartenden 28-Tage-Betondruckfestigkeit im Voraus (durch Ermittlung von Frischbetoneigenschaften) möglich. [5]

Im nächsten Abschnitt werden die Eigenschaften von Frischbeton erläutert.

2.6 Frischbetoneigenschaften

In diesem Abschnitt werden die Grundbegriffe der Frischbetoneigenschaften und ihre wesentliche Bedeutung aufgezeigt. Die Vorgehensweise für deren Ermittlung erfolgt später in Kapitel 3 "Ausführung der Versuche".

2.6.1 Verarbeitbarkeit

Die Verarbeitbarkeit ist die wesentlichste Frischbetoneigenschaft. Der Beton muss soweit verarbeitbar sein und Zusammenhaltevermögen besitzen, dass er ohne spezielle Gerätschaften befördert, eingebaut und einwandfrei vollständig verdichtet werden kann. Beim Einbauen darf der Beton nicht zur Entmischung kommen. [1]

Für das Verarbeitbarkeitsvermögen sorgt die Betonzusammensetzung. Vor allem der Wassergehalt des Zementes, der Gehalt an Feinstoffen (Mehlkorngehalt) und Zusatzmitteln wie z. B. Verflüssigern. [3]

Tabelle 2-9: Konsistenzklassen [1]

Bezeichnung	Beschreibung	Anforderungen
C 0	Sehr steif	$\vartheta > 1{,}45$
C 1	steif	ϑ : 1,45 - 1,26
C 2	Steif plastisch	ϑ : 1,26 – 1,10
F 38	Plastisch	35 – 41 cm
F 45	Weich	42 – 48 cm
F 52	Sehr weich	49 – 55 cm
F 59	Fließfähig	56 – 62 cm
F 66	Sehr fließfähig	63 – 69 cm
F 73	Extrem fließfähig	70 -76 cm

In der Betontechnologie wird das Maß der Verarbeitbarkeit eines Betons durch das Wort Konsistenz beschrieben. Die Konsistenz wird durch die Messung des Verdichtungsmaßes (Klasse C 0 – C 2), oder des Ausbreitmaßes (Klasse F 38 - F 73) klassifiziert. [1]

2.6.2 Rohdichte des Frischbetons

Für eine rechtzeitige Sicherstellung der Betonzusammensetzung ist die Überwachung der Frischbetonrohdichte maßgebend. [22]

Die Ermittlung der Frischbetonrohdichte ermöglicht eine erste Abschätzung bezüglich der zu erwartenden Betonfestigkeit. Die Rohdichte nimmt mit steigendem Wasser- und Porengehalt ab. [3]

„Die Ermittlung der Rohdichte ist stets gemeinsam mit der Ermittlung des Ausbreitmaßes durchzuführen.“[27]

2.6.3 Frischbetontemperaturen

Im Allgemeinen darf die Frischbetontemperatur beim Einbau in die Schalung zwischen +5 °C und +27 °C liegen. Das Durchfrieren des jungen Beton kann durch Erwärmen des Zugabewassers und der Zuschläge sowie Anwendung eines Zements mit höherer Mahlfeinheit verhindert werden. Bei hohen Einbautemperaturen geschieht die Kühlung des Frischbetons durch Beigabe von Scherbeneis oder Kühlung der Betonausgangsstoffe. [3]

2.6.4 Luftporengehalt

Der Luftporengehalt darf beim gut verdichtetem Frischbeton zwischen 1 bis 4 Vol-% liegen. Die vorhandenen Luftporen sorgen für die Erhöhung des Frost- und Tausalzwiderstandes. Ein großer Luftporengehalt führt jedoch zur Abminderung der Betondruckfestigkeit. [3]

[27] ONR 23303:2010; Prüfverfahren Beton (PVB) [15]

2.6.5 Wasserzementwert

Der Wasserzementwert ist das Gewichtsverhältnis von Wasser zu Zement.

$$\frac{\text{Gewicht des Wassers}}{\text{Gewicht des Bindemittels}} = \frac{\text{W}}{\text{B}} = \text{w} = \text{Wasserbindemittelwert} \qquad \text{(Gl. 2)}$$

Der Zement benötigt maximal 40% seines Gewichtes an Wasser. Für die chemische Bindung wird 25% verwendet. Der Rest wird für die Vervollständigung des Hydratationsprozesses benötigt. [3]

Für die Sicherung der Betondruckfestigkeit sowie Anforderungen an die Betonexpositionsklassen gem. ÖNORM B 4710-1, wird der W/B-Wert wie folgt begrenzt: [3]

Tabelle 2-10: Zusammenhang zwischen W/B-Wert und Abfall der Betondruckfestigkeit [3]

W/B-Wert	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
Druckfestigkeit in %	100	83	64	48	37

Mit steigendem W/B-Wert nimmt die Betondruckfestigkeit ab. Ein höherer W/B-Wert führt darüber hinaus zu Rosten der Bewehrung, Rissbildung im Beton, Witterungsempfindlichkeit und Wasserdurchlässigkeit des Betons. [3]

2.7 Verdichten

„Unmittelbar nach dem Einbringen in die Formen ist der Beton vollständig zu verdichten, wobei weder ein übermäßiges Entmischen noch eine Schlämmschicht auftreten darf“[28] wobei jede Schicht zu verdichten ist.

Zufolge einer dichten Lagerung der einzelnen Betonbestandteile wird der Luftgehalt des Frischbetons noch bis zu zwei Volumenprozent reduziert und die besseren Festbetoneigenschaften wie Druckfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit erreicht. [5]

Bei unzureichender Verdichtung können die Poren mit Wasser gesättigt werden, was zu einer Gefährdung des Betons infolge Temperaturabsenkungen führt. [5]

Die Verdichtung darf nur mit einem der folgenden Verdichtungsgeräten erfolgen [13]:

- "Innenrüttler (Rüttelflasche) mit einer Mindestfrequenz von 120 Hz (7200 Schwingungen je Minute). Der Durchmesser des Innenrüttlers darf nicht mehr als etwa ein Viertel des kleinsten Maßes des Probekörpers betragen;
- Rütteltisch mit einer Mindestfrequenz von 40 Hz (2400 Schwingungen je Minute);
- Stampfer mit kreisförmigem Querschnitt, aus Stahl, mit einem Durchmesser von etwa 16 mm, einer Länge von ungefähr 600 mm und mit gerundeten Enden;
- Verdichtungsstab aus Stahl, gerade, mit einem quadratischen Querschnitt von etwa 25 mm x 25 mm und einer Länge von etwa 380 mm.“[28]

Verdichten mit dem Innenrüttler:

"Das Rütteln ist nur so lange durchzuführen, bis der Beton vollständig verdichtet ist. Ein übermäßiges Rütteln ist zu vermeiden, da es zu einem Freisetzen von eingeführten Luftporen führen kann."[28]

[28] DIN EN 12390-2:2012; Prüfung von Festbeton, Teil 2 [13]

Verdichten mit dem Rütteltisch:

"Das Rütteln ist nur so lange durchzuführen, bis der Beton vollständig verdichtet ist. Dabei sollte die Form vorzugsweise am Tisch befestigt oder sicher gegen den Tisch gehalten werden. Ein übermäßiges Rütteln ist zu vermeiden, da es zu einem Freisetzen von eingeführten Luftporen führen kann.“[29]

„Bei einer mechanischen Vibration ist die vollständige Verdichtung erreicht, wenn keine größeren Luftblasen mehr an der Oberfläche erscheinen und wenn die Oberfläche relativ glatt ist und ein glänzendes Erscheinungsbild ohne übermäßige Absonderungen zeigt.“[30]

Handverdichten mit dem Stampfer oder dem Verdichtungsstab:

"Die Stöße mit dem Stab oder dem Stampfer sind gleichmäßig über den Querschnitt der Form zu verteilen. Es ist sicherzustellen, dass der Stab oder der Stampfer beim Verdichten der ersten Schicht nicht auf den Boden des Behälters auftritt und des weiteren nicht wesentlich in die vorangegangenen Schichten eindringt. Je Schicht ist der Beton einer ausreichenden Anzahl von Verdichtungsstößen, bei Beton mit einer Slump-Klasse zwischen S1 und S2 üblicherweise 25 Stößen, auszusetzen. Um Lufteinschlüsse in Hohlräumen, nicht aber künstlich eingeführte Luftporen zu entfernen, ist nach dem Verdichten jeder Schicht mit dem Schlegel leicht an die Seitenwände des Behälters zu klopfen, bis der Oberfläche keine großen Luftblasen mehr erscheinen und die Eindruckstellen des Stabes oder des Stampfers ausgefüllt sind."[29]

[29] DIN EN 12390-2:2012; Prüfung von Festbeton, Teil 2 [13]
[30] ONR 23303:2010; Prüfverfahren Beton (PVB) [15]

2.8 Abziehen der Betonoberfläche

Nach Verdichten ist der überstehende Beton "zu entfernen, indem die Glättkelle aus Stahl mit einer Sägebewegung über die Oberfläche geführt und diese mit dem oberen Rand der Form sorgfältig bündig abgestrichen wird."[31]

"Wenn ein Aufsatzrahmen verwendet wird, ist dieser unmittelbar nach dem Verdichten zu entfernen."[31]

2.9 Kennzeichnung

Unmittelbar nach Abziehen der Betonoberfläche sind die Betonkörper "deutlich und dauerhaft ohne Beschädigung zu kennzeichnen."[31]

"Die Aufzeichnungen, die eine Identifizierung des Probekörpers von der Probenahme bis zur Prüfung sicherstellen, sind aufzubewahren."[31]

[31] DIN EN 12390-2:2012; Prüfung von Festbeton, Teil 2 [13]

2.10 Nachbehandlung

Um einen Dauerhaften und druckfesten Beton zu erhalten ist neben der Verdichtung die Nachbehandlung des Frischbetons wichtig. „Unter Nachbehandlung versteht man alle Maßnahmen, die dazu geeignet sind, den frisch verarbeiteten und jungen Beton bis zum Erreichen einer ausreichenden Festigkeit zu schützen.“[32]

In diesem Abschnitt wird das Ziel bzw. die Bedeutung und die Maßnahmen zur Nachbehandlung erklärt.

„Die Nachbehandlung hat den Zweck, den jungen Beton vor Wasserverlust und schädlichen Einwirkungen zu schützen. Druckfestigkeit allein garantiert keine Dauerhaftigkeit, der Beton muss auch dicht sein. Gerade im oberflächennahen Bereich ist ein Zementstein mit hoher Dichtigkeit und einer möglichst geringen Porosität sehr wichtig für einen erhöhten Widerstrand gegen Karbonatisierung und das Eindringen schädlicher Stoffe.“[32]

„Die wichtigsten Ziele der Nachbehandlung sind der Schutz vor:

- vorzeitigem Austrocknen durch Wind, Sonne, trockene Kälte
- extremen Temperaturen (Kälte/Hitze) und raschen Temperaturwechseln
- Niederschlägen
- vorzeitigen Einwirkungen von Fremdstoffen (Öl usw.)“[32]

Bei den oben genannten Zielen spielt die vorzeitige Austrocknung, die gleich nach dem Einbringen des Betons in die Form und nach dem Verdichten beginnt, eine besonders wichtige Rolle. [2]

„Der verdichtete, frische Beton muss unbedingt vor raschem Austrocken geschützt werden!“[33].

---

[32] Holcim (Wien) GmbH; Betonpraxis, 4 Auflage [2]
[33] Zement und Beton – Fachtextbuch, Lafarge [20]

Ein vorzeitige Austrocknung führt zu [2]:

- Rissbildung
- geringen Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit
- vermindertem Verschleißwiderstand
- geringer Festigkeit

Schutzmaßnahmen gegen vorzeitiges Austrocknen sind unter anderem:

- in der Schalung belassen
- mit Folien abdecken
- mit Thermomatten abdecken
- Wasserhaltende Abdeckungen aufbringen
- flüssige Nachbehandlungsmittel aufbringen
- kontinuierliches Besprühen mit Wasser
- Unterwasserlagerung
- Kombination der aufgeführten Maßnahmen“[34]

Lagerung der Probekörper (nach DIN EN 12390-2)

„Die Probekörper müssen bei einer Temperatur von (20 ± 5) °C (oder (25 ± 5) °C in Ländern mit heißem Klima) mindestens 16h, jedoch nicht länger als 3 d in der Form verbleiben, wobei sie vor Stößen, Rütteln und Austrocknen zu Schützen sind.“[35]

„Nach dem Entfernen aus der Form sind die Probekörper bis zum Prüfbeginn in Wasser bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C oder in einer Feuchtekammer bei (20 ± 2) °C und einer relativen Luftfeuchte ≥ 95% zu lagern.“[35]

Die in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen des Betons werden in Kapitel 3, in welchem die Ausführung der Versuche beschrieben wird, fortgesetzt.

[34] Holcim (Wien) GmbH; Betonpraxis, 4 Auflage [2]
[35] DIN EN 12390-2:2012; Prüfung von Festbeton, Teil 2 [13]

3 Ausführung der Versuche

Das dritte Kapitel beinhaltet den praktischen Teil. In diesem Kapitel werden die im Labor durchgeführten Versuche beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse tabellarisch veranschaulicht.

Dabei wird die mögliche Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von Formenwerkstoffen und Verdichtung untersucht. Für die Durchführung dieser Untersuchungen erfolgen die Verdichtungen mit einem Rütteltisch.

3.1 Ziel der Versuche

In der DIN EN 12390-1 sowie ONR 23303 gibt es bezüglich der Werkstoffe, aus denen eine Betonform bestehen soll, der Art der Befestigung der Betonform am Rütteltisch sowie der Rüttelfrequenz mit der die Verdichtung erfolgen, keine eindeutigen Vorgaben.

Formenwerkstoff (Angaben laut DIN EN 12390-1):

„Kalibrierte Formen sind aus Stahl oder Hartguss als den Referenzwerkstoffen zu fertigen. Bestehen die Formen aus anderen Werkstoffen, so müssen Prüfdaten über die Gebrauchseigenschaften zur Verfügung stehen, welche die langfristige Vergleichbarkeit mit Stahl- oder Hartgussformen belegen.“[36]

Rüttelfrequenz (Angaben laut ONR 23303):

Die Verdichtung mit einem Rütteltisch muss "mit einer Mindestfrequenz von 40 Hz (2400 Schwingungen pro Minute) [erfolgen], wobei die Wirksamkeit des Rütteltisches für eine praktisch vollständige Verdichtung des Frischbetons ausreichend sein muss“[37].

[36] DIN EN 12390-1:2012; Prüfung von Festbeton, Teil 1 [14]
[37] ONR 23303:2010; Prüfverfahren Beton (PVB) [15]

Befestigungsart der Betonform am Rütteltisch (Angaben laut DIN EN 12390-2):

Beim Verdichten mit einem Rütteltisch ist das Rütteln "nur so lange durchzuführen, bis der Beton vollständig verdichtet ist. Dabei sollte die Form vorzugsweise am Tisch befestigt oder sicher gegen den Tisch gehalten werden.“[38]

Um diesen Unklarheiten Einhalt zu gebieten und die daraus resultierenden Fragen beantworten zu können, werden in diesem Kapitel die Auswirkungen

- der Materialeigenschaft der Betonform auf die Betondruckfestigkeit
- der Rüttelfrequenz auf die Betondruckfestigkeit
- der Art der Befestigung der Betonform am Rütteltisch auf die Betondruckfestigkeit
- der Art der Befestigung der Betonform am Rütteltisch auf den Laboranten

mittels empirischen Methoden untersucht und die Ergebnisse in den Abschnitten 3.7 und 3.8 tabellarisch dargestellt.

Für die Durchführung der Druckversuche und vor allem für die Ermittlung der Einflüsse von Formenwerkstoffen auf die Betondruckfestigkeit wurden Betonformen aus Kunststoff und Gusseisen ausgesucht, aus diesen Betonformen Betonprobekörper normgemäß hergestellt und abgedrückt. Die Gusseisenformen werden hauptsächlich als Referenz herangezogen.

Für die Ermittlung von Einfluss der Rüttelfrequenz auf die Betondruckfestigkeit werden die Betonproben mit zwei unterschiedlichen Rüttelfrequenzen 4000 [U/min] und 9000 [U/min] verdichtet.

Zur Ermittlung des Einflusses der Befestigung einer Betonform am Rütteltisch wurden hier zwei Möglichkeiten untersucht:

- Magnetische Befestigung der Betonformen am Rütteltisch sowie
- Gegenhalten der Betonformen händisch gegen den Tisch

[38] DIN EN 12390-2:2012; Prüfung von Festbeton, Teil 2 [13]

Damit sichergestellt wird, dass die Ergebnisse dieser Arbeit sowohl für die Zylinder- als auch für die Würfeldruckfestigkeiten gelten, werden die Betonformen sowohl in Zylinder als auch in Würfelformen aus Gusseisen und aus Kunststoff hergestellt und getestet.

Analog zu dieser Arbeit hat mein Kollege, Herr Emrah Büke, mit der gleichen Vorgangsweise die Betonformen aus Hybrid (Marke Kombi & Esty) untersucht.

Um sicherzustellen, dass die Untersuchung nicht nur von einer bestimmten Betongüte, z.B.: C25/30, abhängt, wurden Betongüten C16/20 und C30/37 als Vergleichsbasis herangezogen.

Diese wurden für die Versuche verwendet, da jene Betongüten in der Österreichischen Bauindustrie am häufigsten Anwendung finden.

3.2 Kooperation

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde mit den Unternehmen Testing und Cemex zusammengearbeitet.

Abbildung 3-1: Kooperationspartner

3.3 Versuchsreihen

Aus zeitlichen sowie organisatorischen Gründen, vor allem aber wegen der geringen Anzahl der Betonformen die zur Verfügung stand, sind die Versuche in mehreren Zeitfenstern durchgeführt worden.

Daher wurden drei Versuchsreihen durchgeführt, wobei jede Versuchsreihe mehrere Tage gedauert hat.

Bei jeder Versuchsreihe wurden 24 Würfelformen und 12 Zylinderformen aus einer bestimmten Betongüte hergestellt.

Die Herstellung der ersten Proben für die erste Versuchsreihe fand am 19. Mai 2014 und 20. Mai. 2014 statt.

Tabelle 3-1: Versuchsreihen je nach Anzahl der Formen

Versuchs -reihe	Datum	Ort	Anzahl der Würfelformen	Anzahl der Zylinderformen	Anzahl der Formen (Gesamt)
1	19. & 20.05.2014	Wien 1220	24	12	36
2	24. & 25.06.2014	Wien 1210	24	12	36
3	17. & 18.11.2014	Steier-mark	24	12	36

Die Proben wurden an zwei Tagen hergestellt.

Am ersten Tag wurden die Betonproben mit den Rüttelfrequenzen 4000 & 9000 [U/min], händisch gegen den Tisch haltend, verdichtet.

Am zweiten Tag wurden die Betonproben mit denselben Rüttelfrequenzen magnetisch am Rütteltisch befestigt und verdichtet.

Tabelle 3-2: Versuchsreihen je nach Art der Befestigung am Rütteltisch

Versuchs-reihe	Datum	Ort	Art der Befestigung am Rütteltisch	Verdichtungs-frequenz [U/min]
1	19.05.2014	Wien 1220	Manuell	4000 / 9000
	20.05.2014	Wien 1210	Magnetisch	4000 / 9000
2	24.06.2014	Wien 1210	Manuell	4000 / 9000
	26.06.2014	Wien 1210	Magnetisch	4000 / 9000
3	17.11.2014	Steiermark	Manuell	4000 / 9000
	18.11.2014	Steiermark	Magnetisch	4000 / 9000

3.4 Betonsorten

Um sicherzustellen, dass die Untersuchung nicht nur von einer bestimmten Betongüte, z.B.: C25/30, abhängt, wurden zwei andere Betongüten als Vergleichsbasis herangezogen. Die Betongüten C16/20, C25/30 und C30/37 haben den wertvollsten Beitrag für den Vergleich der Auswirkungen auf die Betondruckfestigkeit geleistet.

Da diese Betongüten in der Österreichischen Bauindustrie am häufigsten Anwendung finden, wurden sie für diese Arbeit ausgesucht.

Tabelle 3-3: Verwendete Betongüte

Versuchsreihe	Datum	Anforderung [%]
1	19.05.2014	C25/30 XC3 GK16 F52 42,5
	20.05.2014	C25/30 XC1 GK16 F52 42,5
2	24.06.2014	C16/20 XC1 GK16 F45 42,5
	26.06.2014	C16/20 XC1 GK16 F45 42,5
3	17.11.2014	C30/37 XC1 GK16 F52 42,5
	18.11.2014	C30/37 XC1 GK16 F52 42,5

Es bedeuten:

- C25/30: Festigkeitsklasse
  - 25 : charakteristische Zylinderdruckfestigkeit
  - 30 : charakteristische Würfeldruckfestigkeit
- C16/20: Festigkeitsklasse
  - 16 : charakteristische Zylinderdruckfestigkeit
  - 20 : charakteristische Würfeldruckfestigkeit
- C30/37: Festigkeitsklasse
  - 30 : charakteristische Zylinderdruckfestigkeit
  - 37 : charakteristische Würfeldruckfestigkeit
- XC3 : Expositionsklasse; Wasserdruckhöhe bis 10 m
- XC1 : Expositionsklasse; Trocken oder ständig nass
- GK16 = Größtkorn 16cm
- F52 = Ausbreitmaß: sehr weich: 49-55cm
- F45 = Ausbreitmaß: weich: 42-48cm
- 42,5N : Portlandhüttenzement

3.5 Frischbetonprüfung

Um sicherzustellen wird, dass der erhaltene Frischbeton von Firma Cemex den Eigenschaften des Betons laut Lieferschein entsprechen, wurden bei jedem Versuch vor Arbeitsbeginn die Frischbetoneigenschaften unter anderem bezüglich der Parameter

- Raumtemperatur
- Betontemperatur
- Verarbeitbarkeit, dem sogenannten Ausbreitmaß
- Luftporengehalt
- Gesamtwassergehalt
- Rohdichte

gemäß ONR 23303 ermittelt und mit Daten des Lieferscheins verglichen.

„Mit der Übergabe des Betons geht auch die Verantwortung für den Beton vom Produzenten an den Bestellenden über.“[39]

3.5.1 Ausbreitmaß

Diese Prüfung sollte immer zu Beginn durchgeführt werden, da sich die Konsistenz des Frischbetons aufgrund der Zementhydratation mit der Zeit verändert. [15]

Folgende Geräte, die den Abmessungen und Materialeigenschaften der ONR 23303 entsprechen, werden für die Durchführung der Prüfung verwendet:

- Form aus Metall
- Ausbreittisch
- Stössel
- Messlatte
- Mischbehälter
- Trapezkelle

[39] www.holcim-sued.de; Frisch- und Festbetonprüfungen; am 01.06.2015 [19]

- Feuchtes Tuch
- Schaufel
- Stoppuhr

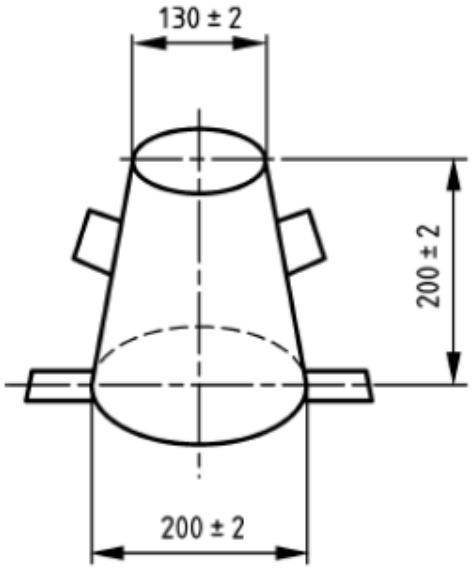


Abbildung 3-2: Form (Maße in mm) [15]

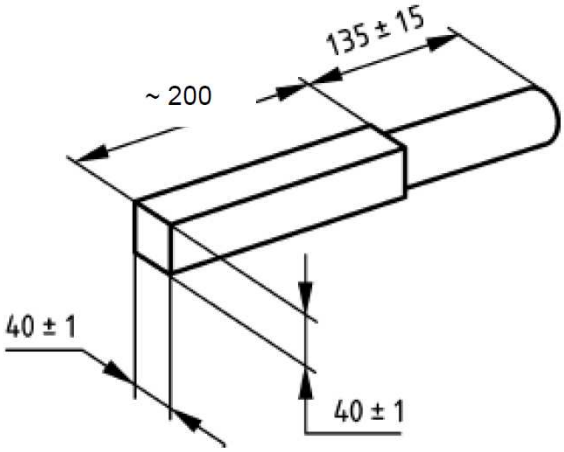
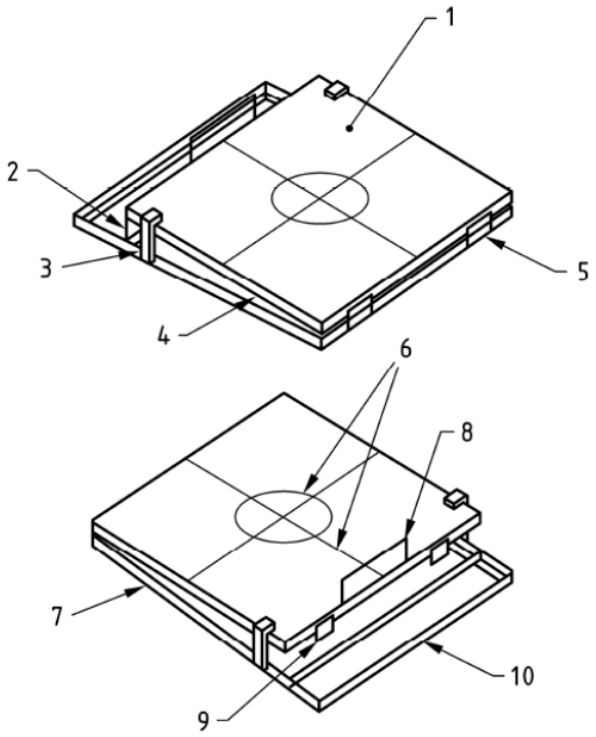


Abbildung 3-3: Stössel (Maße in mm) [15]



Es bedeutet:

1) Metallplatte

2) Hubhöhe, begrenzt auf (40 ± 1) mm

3) oberer Stopper

4) Aufschlagplatte

5) Scharniere (außen)

6) Markierung

7) Rahmen

8) Handgriff

9) unterer Stopper

10) Fußraster

Abbildung 3-4: Üblicher Ausbreittisch [15]

Zuerst wurden der Ausbreittisch und die Form mit einem feuchten Schwamm gereinigt und befeuchtet. Danach wurde die Form mittig auf den Tisch gesetzt und mit Hilfe einer Schaufel in zwei gleich starken Betonschichten gefüllt. Jede Schicht wird zehnmal gestoßen.

Damit die Betonfläche mit der Oberkante der Form bündig ist, wurde die Betonfläche mit der Trapezkelle abgezogen. Der Tisch muss von überschüssigem Beton befreit werden.

Nach 30s wird die Form binnen drei Sekunden, jedoch nicht weniger als innerhalb einer Sekunde, langsam aufrecht hochgezogen.

Abbildung 3-5: Die Form wird aufrecht hochgezogen

Anschließend wurde die Metallplatte fünfzehnmal in einem Zug, jedoch langsam, bis zum Anschlag angehoben und bis zum unteren Anschlag fallengelassen.

Durch die Ermittlung des Mittelwertes von d_1 und d_2 wurde das Ausbreitmaß f berechnet.

$$f[cm] = \frac{d1 + d2}{2} \qquad \text{(Gl. 3)}$$

Abbildung 3-6: Messung des Ausbreitmaßes f

Tabelle 3-4: Ergebnisse des Ausbreitmaßes

Versuchs reihe	Datum	Angabe im Lieferschein	Anforderung lt. NORM [cm]	Ermittelter Wert [cm]
1	19.05.2014	F 52	49 - 55	49
	20.05.2014	F 52	49 - 55	49
2	24.06.2014	F 45	42 - 48	43
	26.06.2014	F 45	42 - 48	44
3	17.11.2014	F 52	49 - 55	53
	18.11.2014	F 52	49 - 55	53,5

3.5.2 Rohdichte

Folgende Geräte, die den Abmessungen und Materialeigenschaften nach ONR 23303 entsprechen, werden für die Durchführung der Prüfung verwendet:

- Behälter
- Rütteltisch mit einer Mindestfrequenz von mindestens 24000 [U/min]
- Waage
- Stahllineal
- Probenahmeschaufel
- Glättkelle
- Trapezkelle

Für die Durchführung der Prüfung wurde zuerst der Behälter kalibriert und abgewogen. Damit erhält man jeweils das Volumen V und das Gewicht des Behälters m_1.

Nach Füllung des Behälters mit Frischbeton erfolgt die Verdichtung mittels Rütteltisch. Der Behälter wird während des Verdichtens am Tisch befestigt oder gegen den Tisch gehalten. Das Verdichten ist vollständig abgeschlossen sobald keine großen Luftblasen mehr an die Betonoberfläche treten.

Nach dem Verdichten wird die Betonfläche mit der Glättkelle abgezogen, damit die Betonfläche mit der Oberkante des Behälters bündig ist.

Durch das nochmalige Abwiegen des Behälters mit seinem Inhalt (verdichteter Beton) wurde seine Masse m_2 ermittelt.

Abbildung 3-7: Der Behälter wird mit seinem Inhalt abgewogen [19]

Mit Hilfe folgender Gleichung wird die Rohdichte des Frischbetons berechnet.

$$\rho[kg/m^3] = \frac{m2 - m1}{V} \qquad \text{(Gl. 4)}$$

Es bedeuten:

- m_1 Die Masse des Behälters, in Kg (auf g genau)
- m_2 Die Masse des Behälters mit der Masse der Betonprobe im Behälter, in Kg (auf g genau)

Tabelle 3-5: Ergebnisse von Frischbeton-Rohdichte

Versuchs-reihe	Datum	Anforderung für Normalbeton [Kg/m³]	Ermittelter Wert [Kg/m³]
1	19.05.2014	2000 ≤ ρ ≤ 2600	2336
	20.05.2014	2000 ≤ ρ ≤ 2600	2338
2	24.06.2014	2000 ≤ ρ ≤ 2600	2380
	26.06.2014	2000 ≤ ρ ≤ 2600	2399
3	17.11.2014	2000 ≤ ρ ≤ 2600	2428
	18.11.2014	2000 ≤ ρ ≤ 2600	2435

3.5.3 Luftgehalt

Für die Prüfung wird - wie in Österreich üblich - das Druckausgleichsverfahren angewendet.

Folgende Geräte, die den Abmessungen und Materialeigenschaften nach ONR 23303 entsprechen, werden für die Durchführung der Prüfung verwendet:

- Druckmessgerät; vgl. Abbildung 3-8
- Behälter
- Verschlussaggregat
- Druckmesser
- Luftpumpe
- Rütteltisch mit einer Mindestfrequenz von mindestens 24000 [U/min]
- Probenahmeschaufel
- Glättkelle
- Spritzflasche
- Schlägel
- Zeitmessgerät

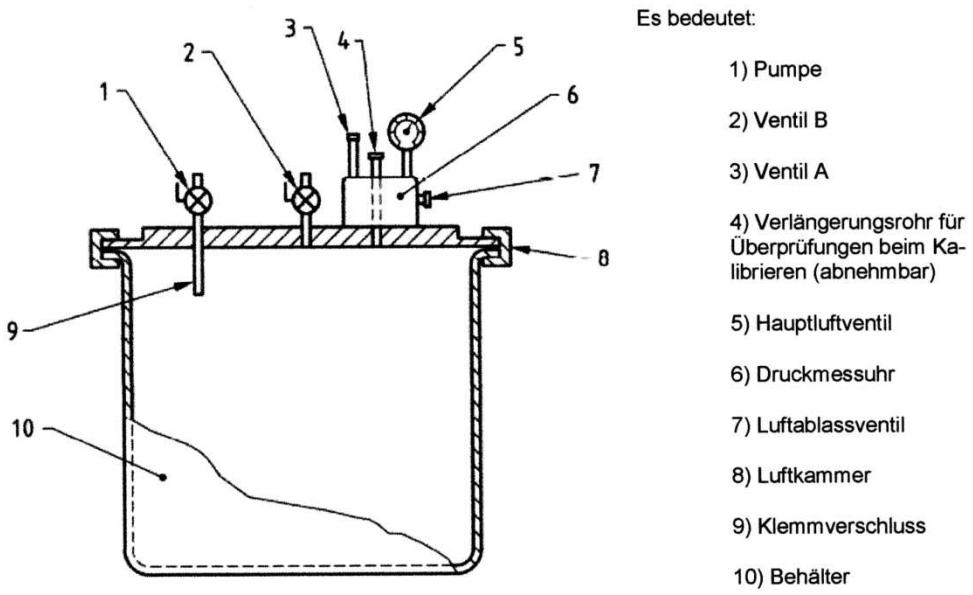


Abbildung 3-8: Druckmessgerät [15]

Der Beton wird normgerecht in den Behälter eingefüllt und danach mittels Rütteltisch verdichtet. Dabei ist darauf zu achten, dass bei der Einfüllung möglichst wenig Luft eingebracht wird.

Der Behälter wird während des Verdichtens am Tisch befestigt oder gegen den Tisch gehalten. Der Beton darf nach Verdichtung weder zur Entmischung noch zum Bluten kommen. Das Verdichten ist vollständig abgeschlossen sobald keine großen Luftblasen mehr an die Betonoberfläche kommen.

Damit die Betonfläche mit der Oberkante des Behälters bündig wird, ist die Betonfläche nach der Verdichtung mit einer Glättkelle abzuziehen.

Als Nächstes werden die Flansche von Behälter und Verschluss sorgfältig gesäubert, das Verschlussaggregat aufgesetzt und durch die Klemmvorrichtung festgeschraubt.

Nach Verschließen des Hauptventils wird das Wasser aus einer Spritzflasche durch ein geöffnetes Ventil, A oder B, so lange einlaufen gelassen, bis das Wasser blasenfrei aus dem anderen Ventil ausfließt.

Die Luft wird in die Luftkammer gepumpt soweit der Druckmesser (der Zeiger) es ermöglicht.

Nachdem beide Ventile geschlossen worden sind, wird das Daumenventil einige Sekunden kräftig betätigt. Dadurch strömt Druckluft in den Behälter.

Abbildung 3-9: : Das Luftgehalt wird abgelesen

Wenn sich der Zeiger am Manometer stabilisiert hat, wird der Luftgehalt des Frischbetons A_c abgelesen.

Tabelle 3-6: Ergebnisse des Frischbeton-Luftporengehalt

Versuchs-reihe	Datum	Anforderung [%]	Ermittelter Wert [%]
1	19.05.2014	$1 < A_c < 4$	2,90
	20.05.2014	$1 < A_c < 4$	2,70
2	24.06.2014	$1 < A_c < 4$	1,70
	26.06.2014	$1 < A_c < 4$	1,50
3	17.11.2014	$1 < A_c < 4$	1,50
	18.11.2014	$1 < A_c < 4$	0,80

3.5.4 Gesamtwassergehalt

Für die Prüfung wurde das Mikrowellenverfahren angewendet.

Folgende Geräte, die den Abmessungen und die Materialeigenschaften nach ONR 23303 entsprechen, wurden für die Durchführung der Prüfung verwendet:

- Waage
- Mikrowellenherd
- Probenteller

Für die Durchführung der Prüfung wurde zuerst die Masse des Probentellers t_f gewogen. Danach werden exakt 2000g der Probe auf dem Probenteller gleichmäßig verteilt. Das nochmalige Abwiegen des Probentellers mit dessen Inhalt (auf ganze Gramm genau) ergibt die Masse m_f.

Der gewogene Probenteller wird mit seinem Inhalt in den Mikrowellenherd gegeben und für eine Zeitdauer von 20 Minuten trocknen gelassen.

Die Trocknungszeit hängt von dem zu erwartenden Wassergehalt ab, vgl. Abbildung 3-10.

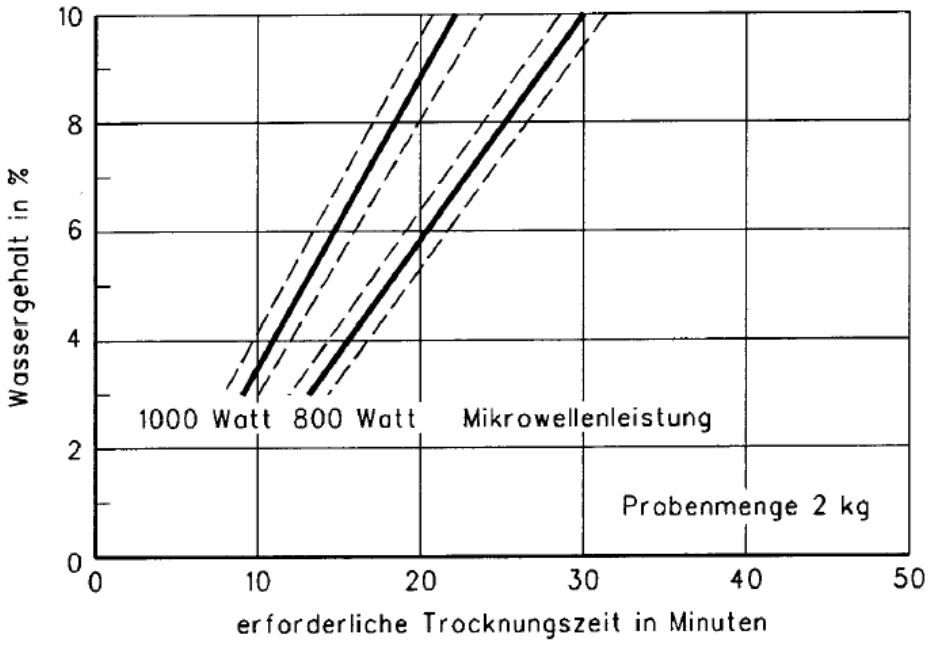


Abbildung 3-10: Abhängigkeit der Trocknungszeit vom Wassergehalt

Nach Trocknung sind zwei Massen zu ermitteln:

- m_{tr} Masse der Probe mit Teller
- t_{tr} Masse des Tellers

Abbildung 3-11: Ermittlung der Maße mf

Abbildung 3-12: Ermittlung der Maße mtr

Mit der Gleichung 5 wird der Gesamtwassergehalt des Frischbetons errechnet.

$$Wges = \frac{mf - tf - mtr + ttr}{mf - tf} * 100 \text{ in \% der Maße} \qquad \text{(Gl. 5)}$$

Es bedeuten:

w_{ges} Gesamtwassergehalt der Probe, angegeben in % […]

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“[40]

Schließlich wird der Gesamtwassergehalt in l/m³ aus dem Gesamtwassergehalt des Frischbetons in % und der Rohdichte des Frischbetons errechnet.

$$Wges\ (l/m^3) = Wges\ (proz.derMasse).\rho fb \qquad \text{(Gl. 6)}$$

Tabelle 3-7: Ergebnisse von Gesamtwassergehalt des Frischbetons

Versuchsreihe	Datum	Ermittelter Wert [%]
1	19.05.2014	7,85
	20.05.2014	8,00
2	24.06.2014	7,20
	26.06.2014	7,05
3	17.11.2014	6,15
	18.11.2014	7,70

[40] ONR 23303:2010; Prüfverfahren Beton (PVB) [15]

3.5.5 Temperatur

Bei jedem Versuch wurde vor Beginn der Arbeit die Beton- und Raumtemperatur gemessen. In der folgenden Tabelle sind die gemessenen Temperaturen eingetragen.

Tabelle 3-8: Temperaturen

Versuchs-reihe	Datum	W/B - Wert	Beton-temperatur	Raum-temperatur
1	19.05.2014	0,57	21,5 °	18,0 °
	20.05.2014	0,57	25,8 °	25,2 °
2	24.06.2014	0,70	21,5 °	26,0 °
	26.06.2014	0,70	21,0 °	24,0 °
3	17.11.2014	0,60	16,3 °	9,0 °
	18.11.2014	0,60	16,0 °	7,0 °

3.6 Herstellung und Lagerung der Betonprobekörper

Nach Überprüfung der Frischbetoneigenschaften erfolgt die Herstellung der Betonprobekörper.

Gemäß DIN EN 12390-1:2012 werden die Betonformen, vor Einbringung des Frischbetons kalibriert und deren Innenfläche eingeölt. Dies wurde bei jeder Versuchsreihe eingehalten.

Ein mangelhaftes Einölen verursacht das Haften der Betonprobekörper an der Betonform und führt zu Kantenbrüchen.

Abbildung 3-13: Kantenbruch aufgrund fehlerhaften Einölens

Nach Vorbereitung der Betonformen wird der Beton laut Norm in zwei Schichten in die Betonform eingebracht und verdichtet. Um eine übermäßige Verdichtung der ersten Hälfte der Masse zu vermeiden, wird die Form bis zur Hälfte gefüllt, der Rütteltisch eingeschaltet und erst danach die zweite Hälfte ohne Verzug eingebracht. Somit wird eine übermäßige Verdichtung der ersten Hälfte der Masse verhindert.

Für die Ermittlung der Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Verdichtung wurden die Betonformen mit zwei unterschiedlichen Rüttelfrequenzen, 4000 und 9000 Schwingungen pro Minute verdichtet.

Während der Verdichtung der Betonproben wurden die Betonformen einmal händisch gegen den Tisch gehalten bzw. magnetisch am Tisch befestigt.

Das Verdichten ist vollständig abgeschlossen sobald keine großen Luftblasen mehr an die Betonoberfläche treten. Der Beton darf nach der Verdichtung weder zur Entmischung noch zum Bluten kommen.

Bei jeder Versuchsreihe wurden die normale (händisch gehaltene) Verdichtung am ersten Tag und die magnetisch gehaltene Verdichtung am zweiten Tag durchgeführt.

Bei Kunststoffformen kann die Magnetfunktion des Rütteltisches nicht aktiviert werden.

Für die Ermittlung der Rüttelzeitdifferenz zufolge manueller und magnetischer Verdichtung ist die erforderliche Zeitdauer (Verdichtungszeit) für die jeweilige Verdichtung mit einer Stoppuhr gemessen und tabellarisch erfasst worden.

Tabelle 3-9: Ermittlung der Rüttelzeitdifferenz

Versuchs-reihe	**Beton-sorte**	**Manuell U/min**			**Magnetisch U/min**		
		Händisch gegen den Tisch gehalten			**Magnetisch am Tisch befestigt**		
		4000	**9000**	**Δt**	**4000**	**9000**	**Δt**
1	C25/30	35-45 s	20-30 s	bis 25 s	35-45 s	20-30 s	bis 25 s
2	C16/20	35-45 s	20-30 s	bis 25 s	35-45 s	20-30 s	bis 25 s
3	C30/37	35-45 s	20-30 s	bis 25 s	35-45 s	20-30 s	bis 25 s

Aus der vorigen Tabelle "Ermittlung der Rüttelzeitdifferenz" kann man folgendes ablesen:

- Die Verdichtungsart hat auf die Verdichtungszeit keinen Einfluss; ob ihre Betonformen händisch gegen den Tisch gehalten oder magnetisch am Tisch befestigt sind spielt somit keine Rolle
- Bei 9000 Schwingungen pro Minute erfolgt die Verdichtung schneller als bei 4000 Schwingungen pro Minute. Somit können bis zu 25 Sekunden pro Probe eingespart werden
- Bei Verdichtung mit 4000 Schwingungen pro Minute ist - für eine vollständige Verdichtung - eine längere Verdichtungszeit notwendig. Bei langer Verdichtung besteht die Entmischungsgefahr der Betonprobe
- Für den Laboranten wird die körperliche Arbeit deutlich reduziert, wenn der Betonform magnetisch am Tisch befestigt ist. Der Laborant erfährt keine körperlichen Erschütterungen mehr.

Unmittelbar nach der Verdichtung werden die Betonproben mit dem Datum, der Art der Verdichtung (manuell/magnetisch) sowie der eingebrachten Schwingungsfrequenz (4000/9000 U/min.) normgerecht gekennzeichnet.

Abbildung 3-14: Die Formen werden normgemäß gekennzeichnet

Zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit der Forschungsarbeit sowie für eventuelle Nachprüfungen wurden bei jeder Versuchsreihe alle Betonformen vor und nach der Einfüllung gewogen und tabellarisch erfasst.

Die Tabellen auf der nächsten Seite beinhalten zusätzlich folgende Daten:

- Beschriftungen
- Materialeigenschaft (Gusseisen bzw. Kunststoff)
- Betonform (Würfel bzw. Zylinder)
- Art der Befestigung der Proben am Tisch (manuell bzw. magnetisch)
- Drehzahl (4000 bzw. 9000 U/min.)
- Die Abmessungen der Betonformen
- Das Gewicht der Betonformen (leer)
- Das Gewicht der Betonformen (voll)
- Das Gewicht der Betonproben nach Ausschalung (Frischbetongewicht)

Tabelle 3-10: : Ergebnisse des ersten Versuches C25/30 XC3 GK16 F52 42,5

	Beschriftung	Befestigung: Händ. / Mag.	Frequenz [U/min]	Form	Material	Abmessung Form [cm]	Gewicht leer [kg] (Form)	Gewicht voll [kg] (Form)	Gewicht Frischbeton [Kg]	Betonwürfel trocken am 1.Tag [Kg]	Gewicht nach 7 Tagen unter Wasser [Kg]
1	GWMa41	Händisch	4000	Würfel	Gusseisen	15/15/15	13,08	21,04	7,96	7,91	7,96
2	GWMa42					15/15/15	12,47	20,28	7,81	7,79	7,83
3	GWMa43					15/15/15	12,49	20,47	7,98	7,93	7,98
4	GWMa41-2					15/15/15	12,64	20,85	8,21	7,90	7,94
5	GWMa42-2					15/15/15	11,67	19,63	7,96	7,92	7,97
6	GWMa43-2					15/15/15	13,30	21,22	7,92	7,87	7,92
7	GWMa91		9000			15/15/15	12,43	20,30	7,87	7,86	7,91
8	GWMa92					15/15/15	12,47	20,36	7,89	7,87	7,90
9	GWMa93					15/15/15	12,38	20,33	7,95	7,92	7,97
10	GWMa91-2					15/15/15	11,95	19,89	7,94	7,90	7,95
11	GWMa92-2					15/15/15	13,35	21,23	7,88	7,83	7,88
12	GWMa93-2					15/15/15	11,07	19,12	8,05	7,93	7,98
13	GWMg41	Magnetisch	4000	Würfel	Gusseisen	15/15/15	12,48	20,46	7,98	7,94	8,00
14	GWMg42					15/15/15	12,46	20,43	7,97	7,93	7,98
15	GWMg43					15/15/15	12,43	20,48	8,05	7,95	8,00
16	GWMg91		9000			15/15/15	12,43	20,36	7,93	7,92	7,96
17	GWMg92					15/15/15	12,47	20,44	7,97	7,94	7,99
18	GWMg93					15/15/15	12,38	20,32	7,94	7,89	7,94
19	KsWMa41	Händisch	4000	Würfel	Kunststoff	15/15/15	1,63	9,55	7,92	7,86	7,91
20	KsWMa42					15/15/15	1,60	9,48	7,88	7,86	7,91
21	KsWMa43					15/15/15	1,52	9,44	7,92	7,79	7,85
22	KsWMa91		9000			15/15/15	1,53	9,43	7,90	7,85	7,90
23	KsWMa92					15/15/15	1,62	9,41	7,79	7,84	7,90
24	KsWMa93					15/15/15	1,61	9,56	7,95	7,89	7,95
25	GZMa41	Händisch	4000	Zylinder	Gusseisen	15/30	22,64	34,94	12,30	12,26	12,32
26	GZMa42					15/30	22,77	35,08	12,31	12,27	12,33
27	GZMa43					15/30	22,82	35,16	12,34	12,28	12,33
28	GZMa91		9000			15/30	22,77	35,14	12,37	12,31	12,37
29	GZMa92					15/30	22,48	34,83	12,35	12,28	12,35
30	GZMa93					15/30	22,56	34,88	12,32	12,30	12,36
31	KsZMa41	Händisch	4000	Zylinder	Kunststoff	15/30	1,38	13,81	12,43	12,37	12,45
32	KsZMa42					15/30	1,35	13,73	12,38	12,32	12,40
33	KsZMa43					15/30	1,40	13,77	12,37	12,33	12,41
34	KsZMa91		9000			15/30	1,38	13,77	12,39	12,38	12,43
35	KsZMa92					15/30	1,36	13,81	12,45	12,39	12,46
36	KsZMa93					15/30	1,35	13,81	12,46	12,41	12,49

Tabelle 3-11: Ergebnisse des zweiten Versuches C16/20 XC1 GK16 F45 42,5

	Beschiftung	Befestigung: Händ. / Mag.	Frequenz [u/min]	Form	Material	Abmessung Form [cm]	Gewicht leer [kg] (Form)	Gewicht voll [kg] (Form)	Gewicht Frischbeton [Kg]	Betonwürfel trocken am 1.Tag [Kg]	Gewicht nach 7 Tagen unter Wasser [Kg]
1	GWMa41	Manuel	4000	Würfel	Gusseisen	15/15/15	13.08	20,48	7,40	7,94	7,99
2	GWMa42					15/15/15	12.47	20,54	8,07	7,97	8,02
3	GWMa43					15/15/15	12.49	20,50	8,01	7,95	8,01
4	GWMa41-2					15/15/15	12.64	20,70	8,06	8,02	8,07
5	GWMa42-2					15/15/15	11.67	19.79	8.12	8.06	8.12
6	GWMa43-2					15/15/15	13.30	21,50	8,20	8,07	8,13
7	GWMa91		9000			15/15/15	12.43	20,44	8,01	7,99	8,03
8	GWMa92					15/15/15	12.47	20,58	8,11	8,04	8,09
9	GWMa93					15/15/15	12.38	20,55	8,17	8,08	8,13
10	GWMa91-2					15/15/15	11,95	19,95	8,00	7,95	8,01
11	GWMa92-2					15/15/15	13.35	21,33	7,98	7,93	7,99
12	GWMa93-2					15/15/15	11.07	19,08	8,01	7,95	8,00
13	GWMg41	Magnetisch	4000	Würfel	Gusseisen	15/15/15	12.48	20,64	8,16	8,07	8,13
14	GWMg42					15/15/15	12.46	20,45	7,99	7,93	7,98
15	GWMg43					15/15/15	12.43	20,49	8,06	7,95	8,01
16	GWMg91		9000			15/15/15	12.43	20,50	8,07	8,04	8,09
17	GWMg92					15/15/15	12.47	20,50	8,03	8,00	8,05
18	GWMg93					15/15/15	12.38	20,40	8,02	8,02	8,08
19	KsWMa41	Manuel	4000	Würfel	Kunststoff	15/15/15	1,33	8,64	7,01	7,98	8,03
20	KsWMa42					15/15/15	1,30	9,20	7,60	8,06	8,11
21	KsWMa43					15/15/15	1,32	9,54	8,02	7,96	8,03
22	KsWMa91		9000			15/15/15	1,33	9,67	8,14	8,09	8,14
23	KsWMa92					15/15/15	1,32	10,00	8,38	8,19	8,23
24	KsWMa93					15/15/15	1,61	9,64	8,03	8,00	8,04
25	GZMa41	Manuel	4000	Zylinder	Guss	15/30	22,54	35,49	12,85	12,78	12,83
26	GZMa42					15/30	22,77	35,60	12,83	12,77	12,83
27	GZMa43					15/30	22,82	35,60	12,78	12,74	12,79
28	GZMa91		9000			15/30	22,77	35,59	12,82	12,77	12,83
29	GZMa92					15/30	22,59	35,56	12,87	12,76	12,80
30	GZMa93					15/30	22,76	35,55	12,79	12,78	12,82
31	KsZMa41	Manuel	4000	Zylinder	Kunststoff	15/30	1.38	14.01	12.63	12.58	12.64
32	KsZMa42					15/30	1,35	14,03	12,68	12,55	12,62
33	KsZMa43					15/30	1,40	13,99	12,59	12,55	12,61
34	KsZMa91		9000			15/30	1,38	14,09	12,71	12,57	12,73
35	KsZMa92					15/30	1,37	13,98	12,61	12,57	12,65
36	KsZMa93					15/30	1,41	14,05	12,64	12,56	12,69

Tabelle 3-12: Ergebnisse des dritten Versuches C30/37 XC1 GK16 F52 42,5

	Beschriftung	Befestigung: Händ. / Mag.	Frequenz [U/min]	Form	Material	Abmessung Form [cm]	Gewicht leer [kg] (Form)	Gewicht voll [kg] (Form)	Gewicht Frischbeton [Kg]	Betonwürfel trocken am 1.Tag [Kg]	Gewicht nach 7 Tagen unter Wasser [Kg]
1	GWMa41	Manuel	4000	Würfel	Gusseisen	15/15/15	12,97	21,04	8,07	8,03	8,08
2	GWMa42					15/15/15	12,63	20,66	8,03	7,98	8,02
3	GWMa43					15/15/15	12,61	20,84	8,23	8,16	8,21
4	GWMa41-2					15/15/15	12,40	20,58	8,18	8,12	8,17
5	GWMa42-2					15/15/15	12,44	20,53	8,09	8,01	8,09
6	GWMa43-2					15/15/15	12,60	20,70	8,10	8,05	8,11
7	GWMa91		9000			15/15/15	12,60	20,85	8,25	8,17	8,22
8	GWMa92					15/15/15	12,60	20,90	8,30	8,21	8,26
9	GWMa93					15/15/15	12,52	20,79	8,27	8,18	8,23
10	GWMa91-2					15/15/15	12,69	20,82	8,13	8,06	8,10
11	GWMa92-2					15/15/15	12,79	21,08	8,29	8,20	8,25
12	GWMa93-2					15/15/15	12,35	20,79	8,44	8,37	8,32
13	GWMg41	Magnetisch	4000	Würfel	Gusseisen	15/15/15	12,97	21,27	8,30	8,23	8,27
14	GWMg42					15/15/15	12,63	20,77	8,14	8,10	8,15
15	GWMg43					15/15/15	12,61	20,71	8,10	8,06	8,11
16	GWMg91		9000	Würfel		15/15/15	12,60	20,84	8,24	8,19	8,25
17	GWMg92					15/15/15	12,60	20,72	8,12	8,08	8,13
18	GWMg93					15/15/15	12,52	20,67	8,15	8,10	8,15
19	KsWMa41	Manuel	4000	Würfel	Kunststoff	15/15/15	1,63	9,78	8,15	8,09	8,14
20	KsWMa42					15/15/15	1,60	9,77	8,17	8,11	8,15
21	KsWMa43					15/15/15	1,52	9,65	8,13	8,02	8,07
22	KsWMa91	Manuel	9000			15/15/15	1,53	9,78	8,25	8,18	8,23
23	KsWMa92					15/15/15	1,62	9,88	8,26	8,21	8,26
24	KsWMa93					15/15/15	1,61	9,87	8,26	8,13	8,19
25	GZMa41	Manuel	4000	Zylinder	Gusseisen	15/30	22,64	35,39	12,75	12,69	12,76
26	GZMa42					15/30	22,77	35,45	12,68	12,63	12,67
27	GZMa43					15/30	22,82	35,55	12,73	12,64	12,70
28	GZMa91	Manuel	9000			15/30	22,77	35,62	12,85	12,78	12,84
29	GZMa92					15/30	22,48	35,24	12,76	12,73	12,77
30	GZMa93					15/30	22,56	35,38	12,82	12,70	12,77
31	KsZMa41	Manuel	4000	Zylinder	Kunststoff	15/30	1,38	14,12	12,74	12,67	12,73
32	KsZMa42					15/30	1,35	14,14	12,79	12,71	12,78
33	KsZMa43					15/30	1,40	14,16	12,76	12,69	12,76
34	KsZMa91	Manuel	9000			15/30	1,38	14,35	12,97	12,94	12,98
35	KsZMa92					15/30	1,36	14,32	12,96	12,92	12,97
36	KsZMa93					15/30	1,35	14,37	13,02	12,98	13,03

Um frisch hergestellte Betonprobekörper vor Stoß, Wasserverlust und schädlichen Einwirkungen zu schützen, sind sie für einen Tag in den Formen belassen worden.

Am zweiten Tag wurden die Betonformen ausgeschalt und die Betonprobekörper nach Abwiegen gegen vorzeitige Austrocknung für die nächsten sieben Tage in einem Wasserbecken - wie in Österreich üblich – gelagert.

Abbildung 3-15: Wasserlagerung der Betonprobekörper

Nach der Wasserlagerung sind die Proben für 21 Tage luftgelagert worden, bis für die Ermittlung der Betondruckfestigkeit ein Betonalter von 28 Tagen erreicht worden ist.

Abbildung 3-16: Luftlagerung der Betonprobekörpern

3.7 Ermittlung der Betondruckfestigkeit von Betonprobekörpern

Nachdem die Betonprobekörper ein Alter von 28 Tagen erreicht haben, wurden sie in einer Druckprüfmaschine abgedrückt. Um eine zweiachsige Biegung zu verhindern, wurde die Maschine vor dem Versuch kalibriert und die Betonprobekörper mittig auf die Lastplatte gestellt. Zur Kontrolle wurde ein Kalibrierstab verwendet.

Abbildung 3-17: Der Betonprobekörper wird mittig auf die Lastplatte gestellt

Beim Abdrücken wurde von jedem Betonprobekörper die aufnehmbare Druckkraft notiert.

Abbildung 3-18 Das Bruchbild eines Würfel-Probekörpers

Abbildung 3-19: Das Bruchbild eines Zylinder-Probekörpers

Wie aus den Bruchbildern auf der Seite 69 ersichtlich ist, sind die Brüche beim Würfel-Probekörper näherungsweise kegelförmig aufgetreten. Jedoch verlief die Rissbildung beim Zylinder-Probekörper parallel zur Lastachse.

Die aufnehmbare Druckkraft sowie die Druckfestigkeit jedes Betonprobekörpers sind den nächsten Seiten zu entnehmen.

3.7.1 Ergebnisse in Tabellen

Tabelle 3-13: Ergebnisse des ersten Versuches C25/30 XC3 GK16 F52 42,5

	Beschriftung	Befestigung: Händ. / Mag.	Frequenz [U/min]	Form	Material	Gewicht Probe am 28. Tag [Kg]	aufnehmbarer Druckkraft [kN]	Druckfestigkeit N/mm²	Mittelwert Druckfestigkeit N/mm²		Mind. erforderliche Druckfestigkeit N/mm²
1	BWMa41	Händisch	4000	Würfel	Gusseisen	7,85	695,00	30,48	31,18	>	30,00
2	BWMa42					7,71	705,00	31,13			
3	BWMa43					7,85	715,00	31,46			
4	BWMa41-2					7,82	710,00	31,35			
5	BWMa42-2					7,86	700,00	30,91			
6	BWMa43-2					7,82	715,00	31,78			
7	BWMa91		9000			7,82	715,00	31,78	31,71	>	30,00
8	BWMa92					7,80	725,00	32,22			
9	BWMa93					7,86	730,00	32,02			
10	BWMa91-2					7,83	715,00	31,57			
11	BWMa92-2					7,77	710,00	31,56			
12	BWMa93-2					7,85	710,00	31,14			
13	BWMg41	Magnetisch	4000	Würfel	Gusseisen	7,87	805,00	35,54	33,48	>	30,00
14	BWMg42					7,82	750,00	33,33			
15	BWMg43					7,88	710,00	31,56			
16	BWMg91		9000			7,83	805,00	35,78	33,86	>	30,00
17	BWMg92					7,87	755,00	33,56			
18	BWMg93					7,83	735,00	32,24			
19	KswMa41	Händisch	4000	Würfel	Kunststoff	7,80	725,00	31,80	32,34	>	30,00
20	KswMa42					7,75	745,00	33,00			
21	KswMa43					7,72	725,00	32,22			
22	KswMa91		9000			7,79	770,00	34,22	34,29	>	30,00
23	KswMa92					7,78	780,00	34,67			
24	KswMa93					7,85	770,00	34,00			
25	BZMa41	Händisch	4000	Zylinder	Gusseisen	12,14	485,00	27,46	26,14	>	25,00
26	BZMa42					12,13	465,00	26,33			
27	BZMa43					12,15	435,00	24,63			
28	BZMa91		9000			12,19	495,00	28,03	27,34	>	25,00
29	BZMa92					12,15	475,00	26,54			
30	BZMa93					12,16	485,00	27,46			
31	KszMa41	Händisch	4000	Zylinder	Kunststoff	12,23	450,00	25,48	25,01	>	25,00
32	KszMa42					12,23	470,00	26,61			
33	KszMa43					12,22	405,00	22,93			
34	KszMa91		9000			12,23	450,00	25,48	26,89	>	25,00
35	KszMa92					12,23	500,00	28,31			
36	KszMa93					12,30	475,00	26,89			

Tabelle 3-14: Ergebnisse des zweiten Versuches C16/20 XC1 GK16 F45 42,5

	Beschiftung	Befestigung: Händ. / Mag.	Frequenz [u/min]	Form	Material	Gewicht Probe am 28. Tag [Kg]	aufnehmbare Druckkraft [kN]	Druckfestigkeit N/mm²	Mittelwert Druckfestigkeit N/mm²		Mind. erforderliche Druckfestigkeit N/mm²
1	GWMa41	Manuel	4000	Würfel	Gusseisen	7,88	680,00	30,02	33,09	>	20,00
2	GWMa42					7,89	680,00	29,92			
3	GWMa43					7,88	710,00	31,35			
4	GWMa41-2					7,99	802,00	35,41			
5	GWMa42-2					8,04	775,00	34,10			
6	GWMa43-2					8,03	860,00	37,72			
7	GWMa91		9000			7,90	695,00	30,68	30,30	>	20,00
8	GWMa92					7,97	670,00	29,68			
9	GWMa93					8,02	690,00	30,46			
10	GWMa91-2					7,91	825,00	36,42			
11	GWMa92-2					7,95	840,00	37,70			
12	GWMa93-2					790,00	805,00	35,31			
13	GWMg41	Magnetsch	4000	Würfel	Gusseisen	8,03	810,00	35,76	35,17	>	20,00
14	GWMg42					7,88	830,00	36,64			
15	GWMg43					7,91	750,00	33,11			
16	GWMg91		9000			8,00	850,00	37,53	38,00	>	20,00
17	GWMg92					7,98	880,00	38,85			
18	GWMg93					7,99	852,00	37,62			
19	KsWMa41	Manuel	4000	Würfel	Kunststoff	7,90	690,00	30,67	30,30	>	20,00
20	KsWMa42					8,00	680,00	30,02			
21	KsWMa43					7,89	680,00	30,22			
22	KsWMa91		9000			8,01	660,00	29,33	30,08	>	20,00
23	KsWMa92					8,11	700,00	30,90			
24	KsWMa93					7,92	675,00	30,00			
25	GZMa41	Manuel	4000	Zylinder	Guss	12,63	320,00	18,12	17,65	>	16,00
26	GZMa42					12,62	325,00	18,40			
27	GZMa43					12,59	290,00	16,42			
28	GZMa91		9000			12,63	330,00	18,56	18,04	>	16,00
29	GZMa92					12,60	320,00	18,00			
30	GZMa93					12,62	310,00	17,55			
31	KsZMa41	Manuel	4000	Zylinder	Kunststoff	12,43	315,00	17,72	17,47	>	16,00
32	KsZMa42					12,42	325,00	18,28			
33	KsZMa43					12,39	290,00	16,42			
34	KsZMa91		9000			12,52	300,00	16,87	16,38	>	16,00
35	KsZMa92					12,50	280,00	15,85			
36	KsZMa93					12,40	290,00	16,42			

Tabelle 3-15: Ergebnisse des dritten Versuches C30/37 XC1 GK16 F52 42,5

	Beschriftung	Befestigung: Händ. / Mag.	Frequenz [U/min]	Form	Material	Gewicht Probe am 28. Tag [Kg]	aufnehmbarer Druckkraft [kN]	Druckfestigkeit N/mm²	Mittelwert Druckfestigkeit N/mm²		Mind. erforderliche Druckfestigkeit N/mm²
1	GWMa41	Manuel	4000	Würfel	Gusseisen	7,95	1064,00	47,29	47,27	>	37,00
2	GWMa42					7,89	1045,00	46,44			
3	GWMa43					8,11	1038,00	46,13			
4	GWMa41-2					8,06	1077,00	47,87		>	
5	GWMa42-2					7,98	1076,00	47,82			
6	GWMa43-2					7,99	1081,00	48,04			
7	GWMa91		9000			8,12	1098,00	48,80	47,58	>	37,00
8	GWMa92					8,13	1125,00	50,00			
9	GWMa93					8,14	1064,00	47,29			
10	GWMa91-2					7,99	847,00	45,20		>	
11	GWMa92-2					8,14	1036,00	46,04			
12	GWMa93-2					8,07	1083,00	48,13			
13	GWMg41	Magnetisch	4000	Würfel	Gusseisen	7,91	1095,00	48,67	47,82	>	37,00
14	GWMg42					8,03	1058,00	47,02			
15	GWMg43					7,96	1075,00	47,78			
16	GWMg91		9000	Würfel		8,10	1095,00	48,67	46,34	>	37,00
17	GWMg92					8,03	828,00	45,69			
18	GWMg93					8,01	1005,00	44,67			
19	KsWMa41	Manuel	4000	Würfel	Kunststoff	8,03	1089,00	48,40	46,31	>	37,00
20	KsWMa42					8,03	971,00	43,16			
21	KsWMa43					7,99	1066,00	47,38			
22	KsWMa91	Manuel	9000			8,10	1131,00	50,27	50,18	>	37,00
23	KsWMa92					8,12	1124,00	49,96			
24	KsWMa93					8,12	1132,00	50,31			
25	GZMa41	Manuel	4000	Zylinder	Gusseisen	12,55	520,00	29,44	31,14	>	30,00
26	GZMa42					12,51	560,00	31,71			
27	GZMa43					12,51	570,00	32,27			
28	GZMa91	Manuel	9000			12,65	550,00	31,14	32,08	>	30,00
29	GZMa92					12,56	570,00	32,27			
30	GZMa93					12,62	580,00	32,84			
31	KsZMa41	Manuel	4000	Zylinder	Kunststoff	12,53	550,00	31,14	30,20	>	30,00
32	KsZMa42					12,58	510,00	28,87			
33	KsZMa43					12,54	540,00	30,57			
34	KsZMa91	Manuel	9000			12,79	605,00	34,25	31,52	>	30,00
35	KsZMa92					12,78	510,00	28,87			
36	KsZMa93					12,84	555,00	31,42			

3.7.2 Ergebnisse in Diagrammen

Für die Durchführung der Forschungsarbeit wurden die Betonprobekörper aus Gusseisenformen und Kunststoffformen hergestellt und mit zwei verschiedenen Rüttelfrequenzen, nämlich 4000 und 9000 [Schwingung/min.], sowie mittels zwei unterschiedlichen Arten der Befestigung - einmal händisch gegen den Tisch gehalten und einmal magnetisch am Rütteltisch befestigt - verdichtet. Aus oben genanntem Verfahren wurden jeweils mindestens 3 Proben je Versuchsreihe hergestellt und abgedrückt.

Bei Kunststoffformen kann die Magnetfunktion des Rütteltisches nicht aktiviert werden.

Bei Zylinderformen aus Gusseisen wurden die Formen während der Verdichtung der Betonproben nur händisch gegen den Tisch gehalten. Das heißt bei diesen Zylinderformen wurde der Einfluss der magnetischen Befestigung am Rütteltisch nicht untersucht.

Der einfache Grund dafür ist das Gewicht einer Zylinderform aus Gusseisen nach der Füllung mit Frischbeton. Eine gefüllte Zylinderform aus diesem Material wiegt etwa 35 kg (siehe Abbildung 3-34: Massenunterschied von Betonformen). Dies ist für einen Rütteltisch ein zu großes Gewicht um aussagekräftige Ergebnisse erhalten zu können.

Jede Versuchsreihe wurde mit einer Bestimmten Betonsorte durchgeführt um die Abhängigkeit der Ergebnisse (aus dieser Forschungsarbeit) von einer bestimmten Betonsorte auszuschließen.

Folgende Betonsorten wurden angewendet:

1. Versuchsreihe: C25/30 XC3 GK16 F52 42,5
2. Versuchsreihe: C16/20 XC1 GK16 F45 42,5
3. Versuchsreihe: C30/37 XC1 GK16 F52 42,5

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Betondruckfestigkeiten in Diagrammen dargestellt und je nach

- Art der Befestigung (händisch haltend und magnetisch befestigt)
- Materialeigenschaft der Betonform, dem sogenannten Formenwerkstoff (Kunststoff und Gusseisen)
- Rüttelfrequenz (4000 und 9000 [U/min.])

miteinander verglichen.

Die Darstellung der Ergebnisse für die Versuche aus Zylinder- und Würfelformen erfolgt in separaten Diagrammen. Im Allgemeinen weisen die Würfel-Probekörper - aufgrund der verhinderten Querdehnung - eine bessere Druckfestigkeit auf als die Zylinder-Probekörper.

3.7.2.1 Ergebnisse von Würfel-Probekörper

- **Vergleich der mittleren Würfeldruckfestigkeiten je nach Befestigungsart**

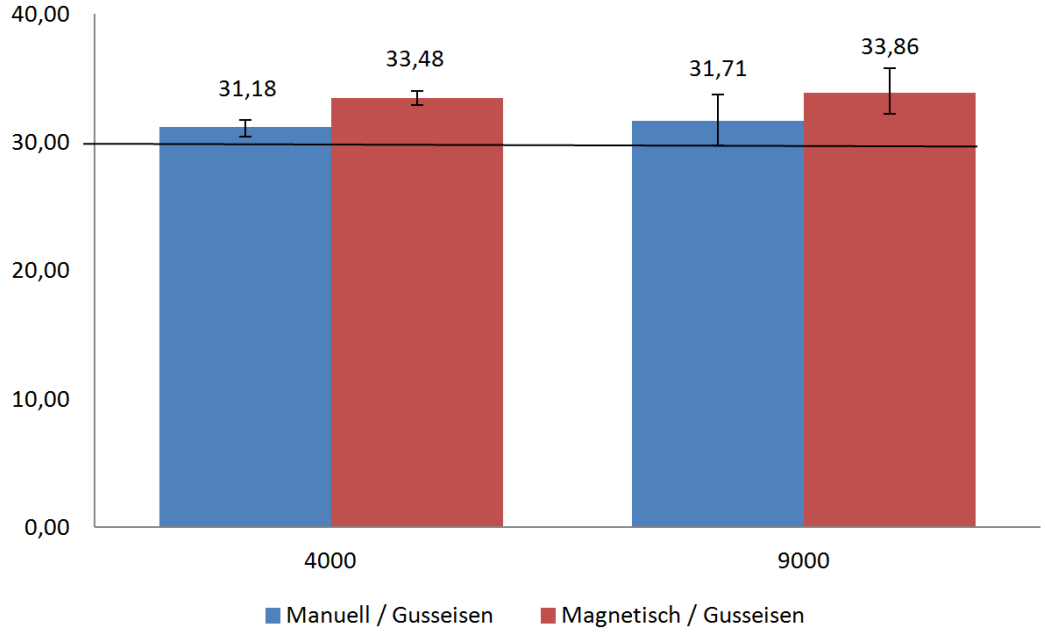


Abbildung 3-20: Erste Versuchsreihe C25/30 XC3 GK16 F52 42,5

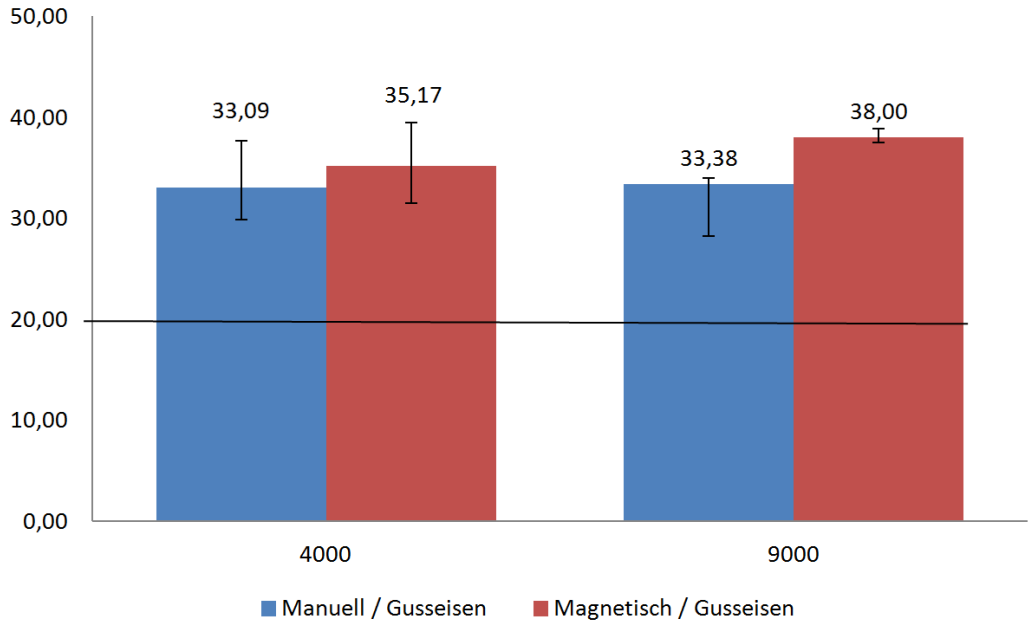


Abbildung 3-21: Zweite Versuchsreihe C16/20 XC1 GK16 F45 42,5

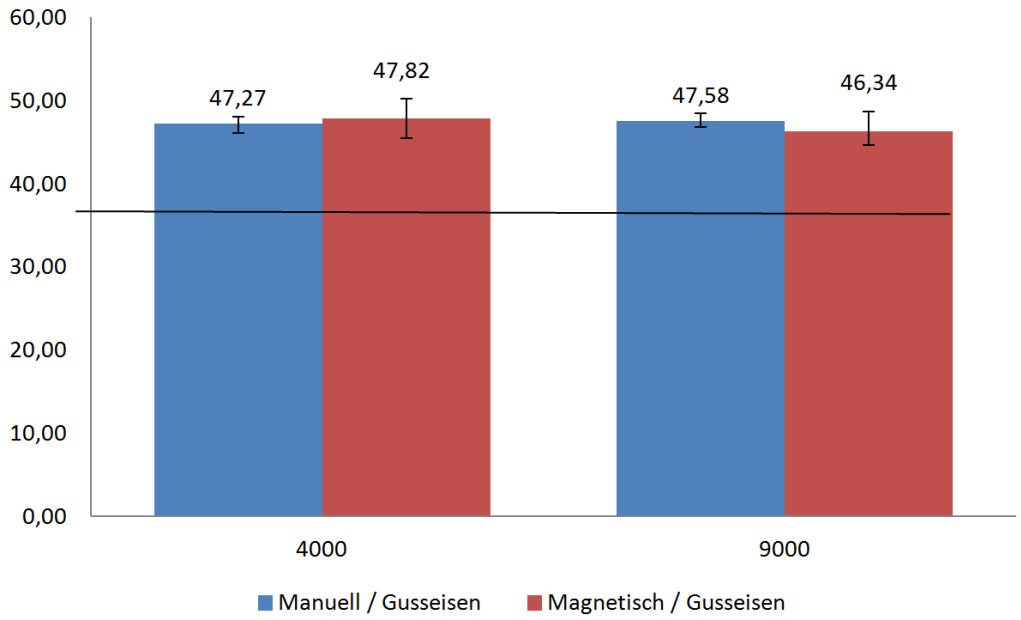


Abbildung 3-22: Dritte Versuchsreihe C30/37 XC1 GK16 F52 42,5

In den obigen Diagrammen werden die Ergebnisse der Würfeldruckfestigkeiten in Abhängigkeit der Befestigungsart der Würfelformen am Rütteltisch miteinander verglichen.

Aus den Diagrammen kann interpretiert werden, dass die magnetische Verdichtung der Betonprobekörper, bei denen die Betonformen während der Verdichtung am Rütteltisch magnetisch befestigt sind, bessere Werte erzielen als die manuell verdichteten Betonprobekörper, bei denen die Betonformen während der Verdichtung gegen den Tisch gehalten sind.

Mit einer Rüttelfrequenz von 9000 (u/min.) erhält man generell einen höheren Druckwiderstand.

Anmerkung: in beiden Fällen wird die Mindestbetondruckfestigkeit erreicht. Die erforderliche Mindestbetondruckfestigkeit ist durch eine schwarze Linie in den Diagrammen gekennzeichnet.

- **Vergleich der mittleren Würfeldruckfestigkeiten je nach Formenwerkstoff**

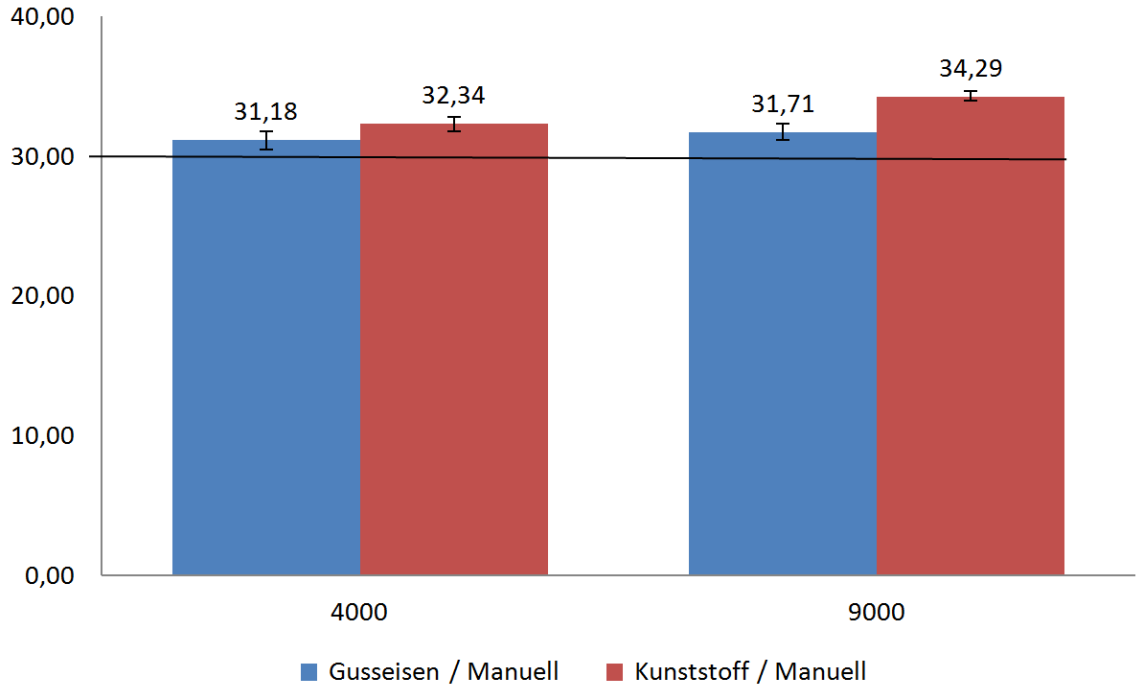


Abbildung 3-23: Erste Versuchsreihe C25/30 XC3 GK16 F52 42,5

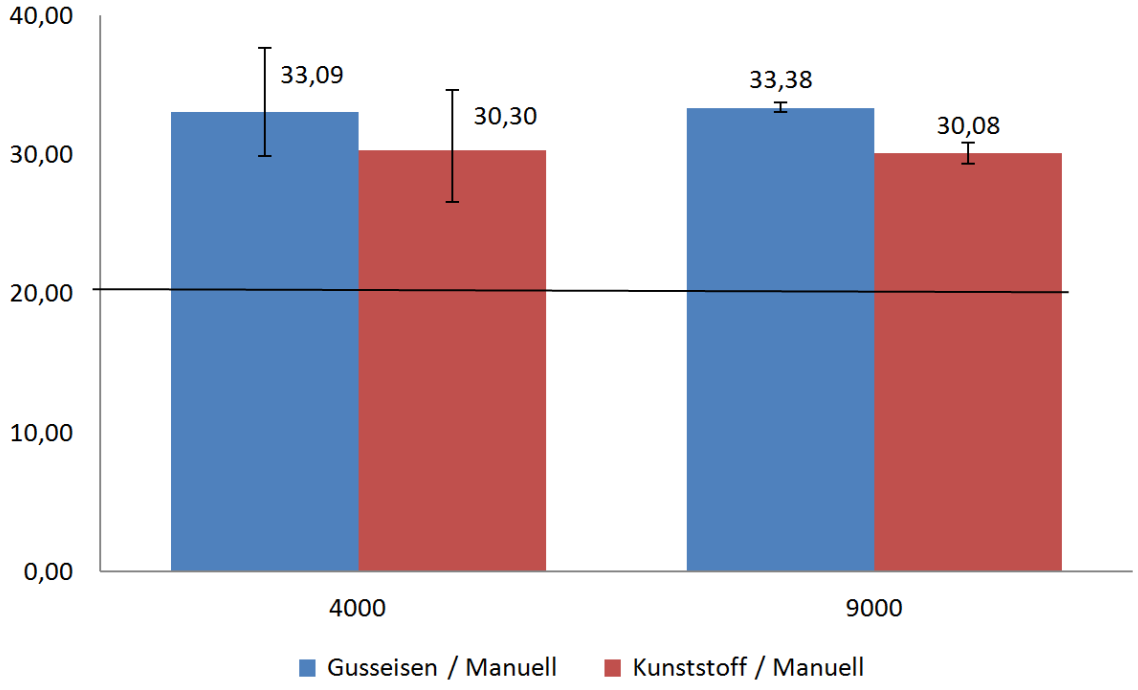


Abbildung 3-24: Zweite Versuchsreihe C16/20 XC1 GK16 F45 42,5

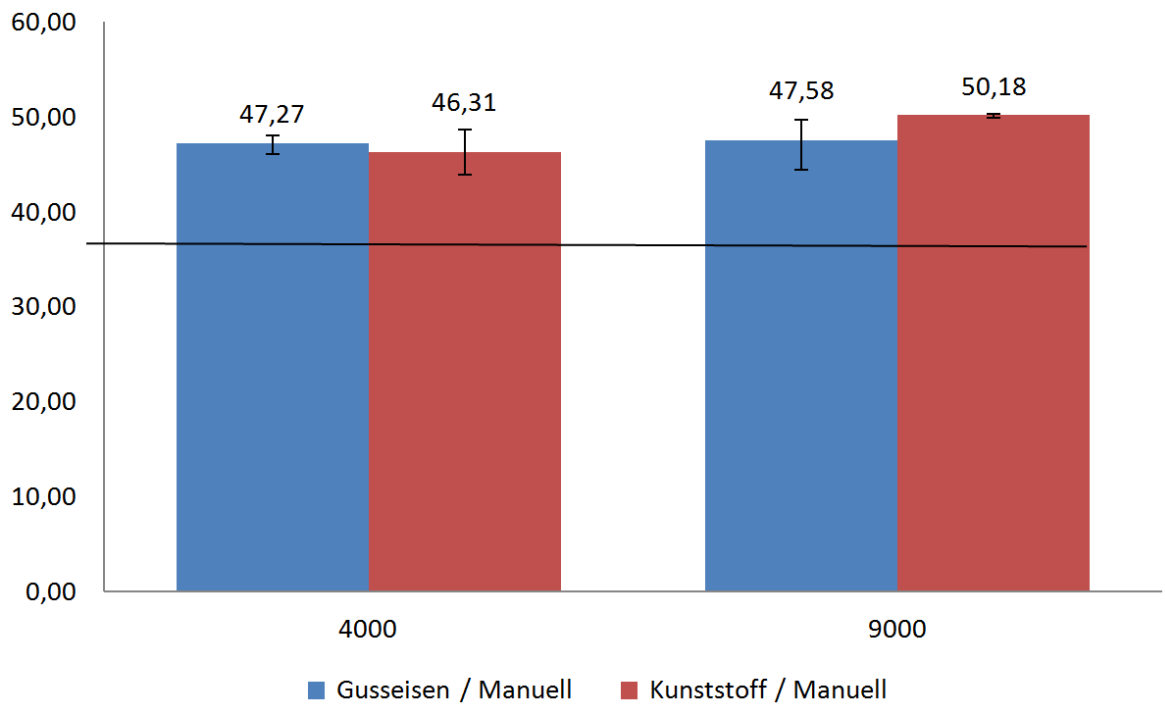


Abbildung 3-25: Abbildung 3 31: Dritte Versuchsreihe C30/37 XC1 GK16 F52 42,5

In den obigen Diagrammen werden die Ergebnisse der Würfeldruckfestigkeiten in Abhängigkeit von Formenwerkstoffen miteinander verglichen.

Aus den obigen Diagrammen kann interpretiert werden, dass die Betonprobekörper in Abhängigkeit vom Formmaterial unterschiedliche Höchstwerte erzielen. Man kann erkennen, dass der Formenwerkstoff keinen wesentlichen Einfluss auf die Betondruckfestigkeit hat.

Anmerkung: in beiden Fällen wird die Mindestbetondruckfestigkeit erreicht. Die erforderliche Mindestbetondruckfestigkeit ist durch eine schwarze Linie in den Diagrammen gekennzeichnet.

- **Vergleich der mittleren Würfeldruckfestigkeiten je nach Rüttelfrequenz**

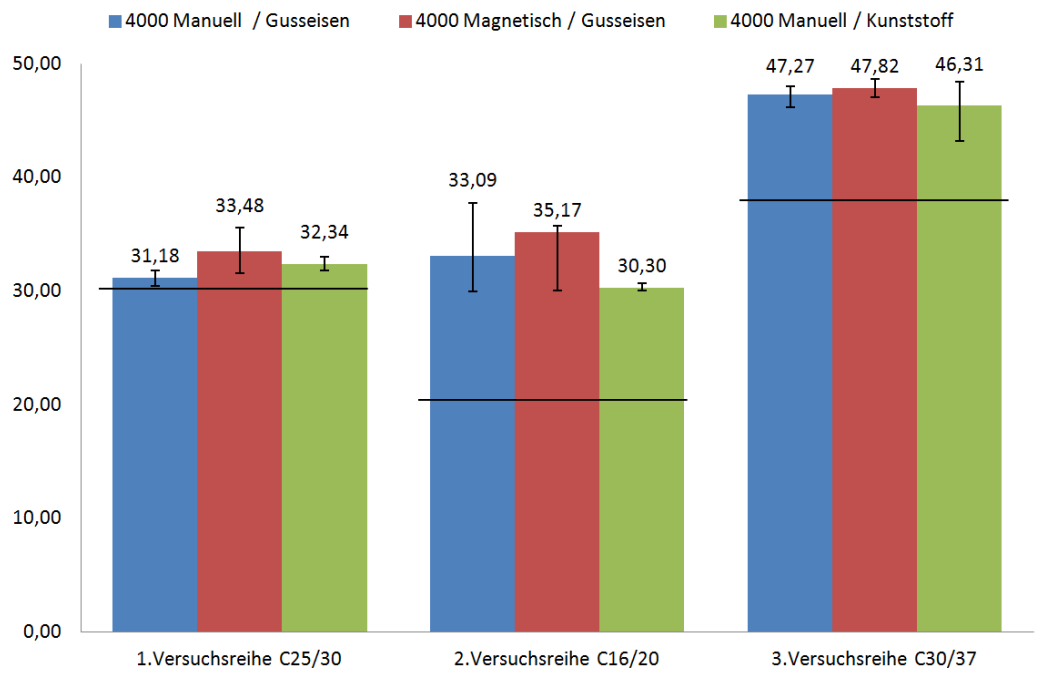


Abbildung 3-26: Rüttelfrequenz von 4000 (U/min.)

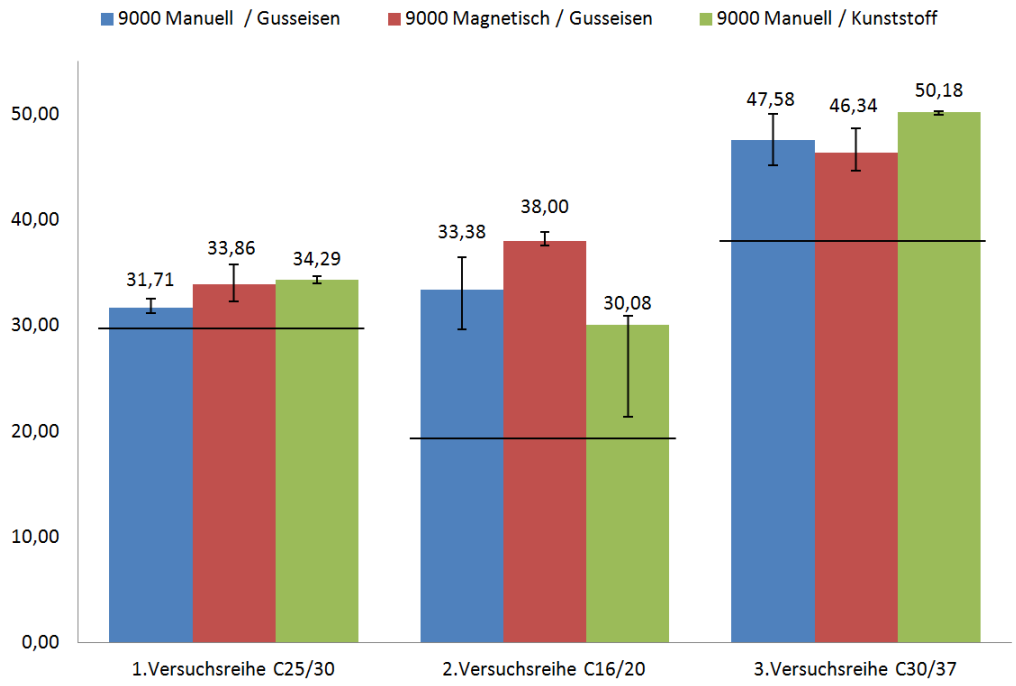


Abbildung 3-27: Rüttelfrequenz von 9000 (U/min.)

In den obigen Diagrammen werden die Ergebnisse der Würfeldruckfestigkeiten in Abhängigkeit der Rüttelfrequenz miteinander verglichen.

Aus den Diagrammen kann interpretiert werden, dass die Würfelprobekörper, die mit einer Rüttelfrequenz von 4000 Schwingungen pro Minute verdichtet und ihre Gusseisenformen magnetisch am Rütteltisch befestigt sind, die besseren Werte erzielen.

Die höchsten Werte der Würfeldruckfestigkeit werden jedoch bei Betonprobekörper aus Kunststoffformen, die manuell gegen den Tisch gehalten und mit 9000 Schwingungen pro Minute verdichtet wurden, erreicht.

Anmerkung: in beiden Fällen wird die Mindestbetondruckfestigkeit erreicht. Die erforderliche Mindestbetondruckfestigkeit ist durch eine schwarze Linie in den Diagrammen gekennzeichnet.

3.7.2.2 Ergebnisse von Zylinder-Probekörper

- **Vergleich der mittleren Zylinderdruckfestigkeiten je nach Formenwerkstoff**

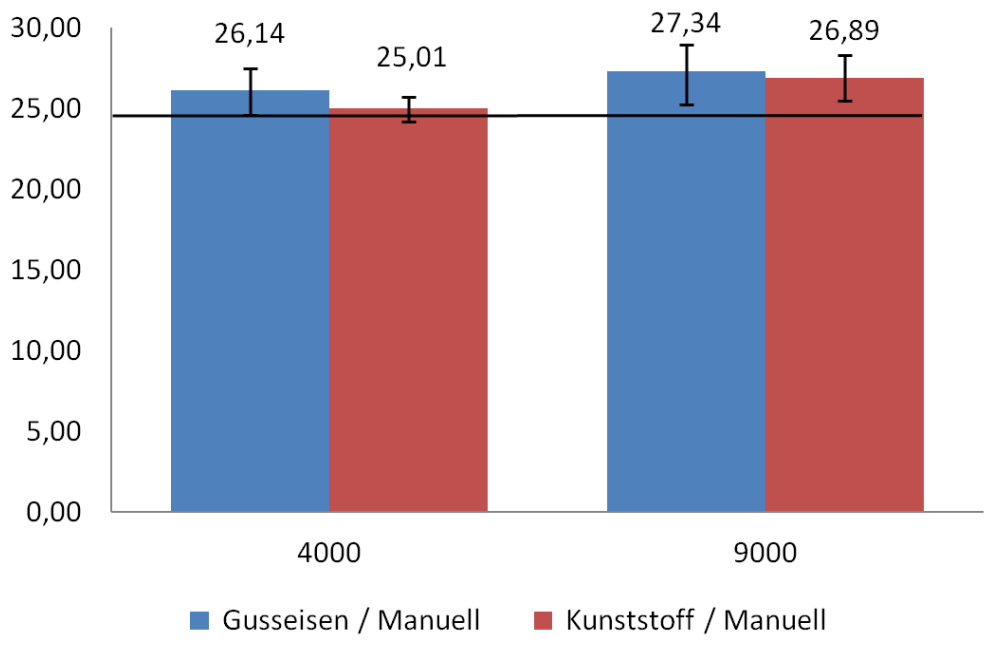


Abbildung 3-28: Erste Versuchsreihe C25/30 XC3 GK16 F52 42,5

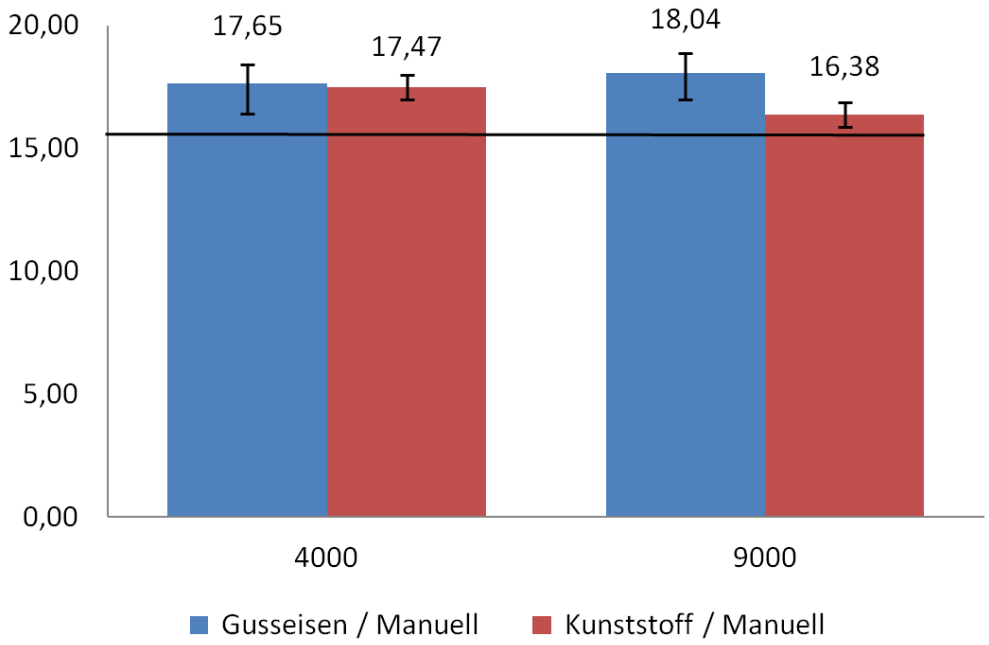


Abbildung 3-29: Zweite Versuchsreihe C16/20 XC1 GK16 F45 42,5

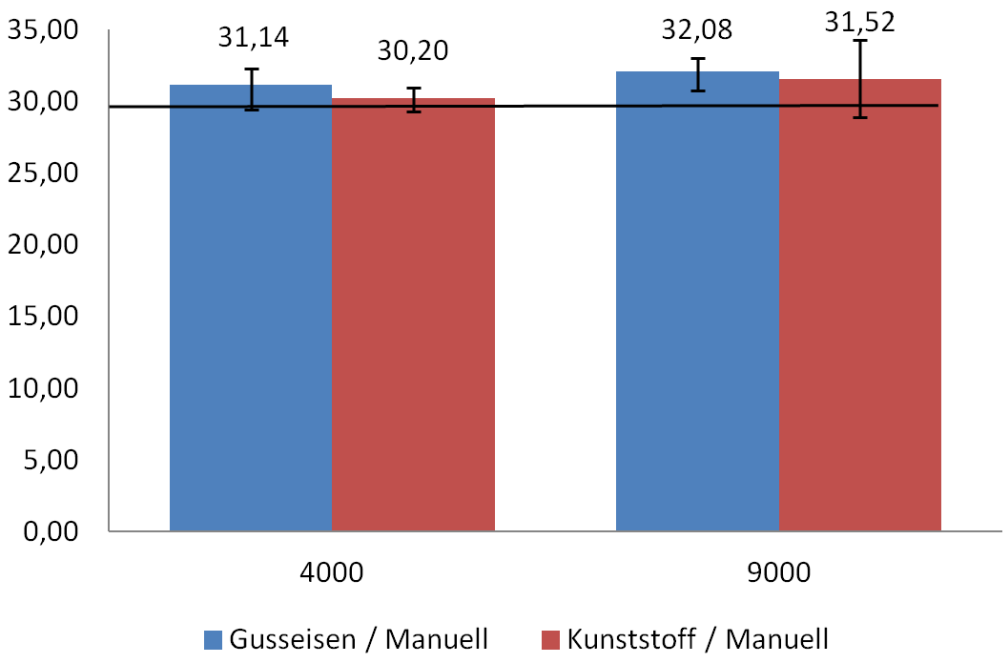


Abbildung 3-30: Dritte Versuchsreihe C30/37 XC1 GK16 F52 42,5

In den obigen Diagrammen werden die Ergebnisse der Zylinderdruckfestigkeiten in Abhängigkeit von Formenwerkstoffen miteinander verglichen.

Aus den Diagrammen kann festgestellt werden, dass die Zylinderprobekörper, die aus Gusseisenformen hergestellt sind, einen besseren Wert erzielen als die Zylinderprobekörper die aus Kunststoffformen hergestellt wurden.

Anmerkung: in beiden Fällen wird die Mindestbetondruckfestigkeit erreicht. Die erforderliche Mindestbetondruckfestigkeit ist durch eine schwarze Linie in den Diagrammen gekennzeichnet.

- **Vergleich der mittleren Zylinderdruckfestigkeiten je nach Rüttelfrequenz**

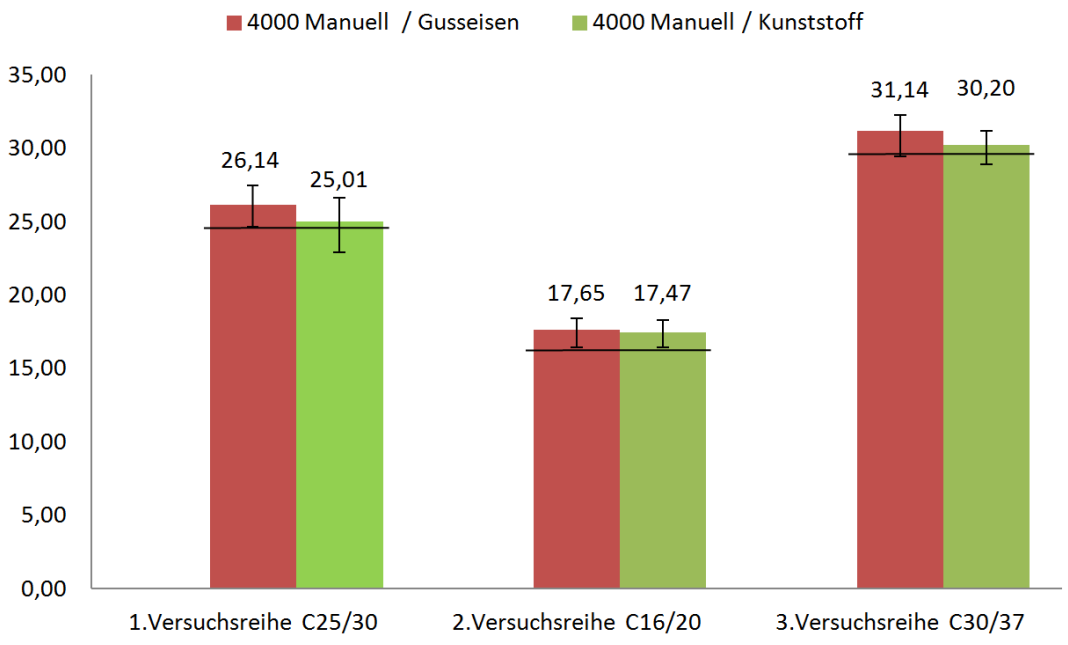


Abbildung 3-31: Rüttelfrequenz von 4000 (U/min.)

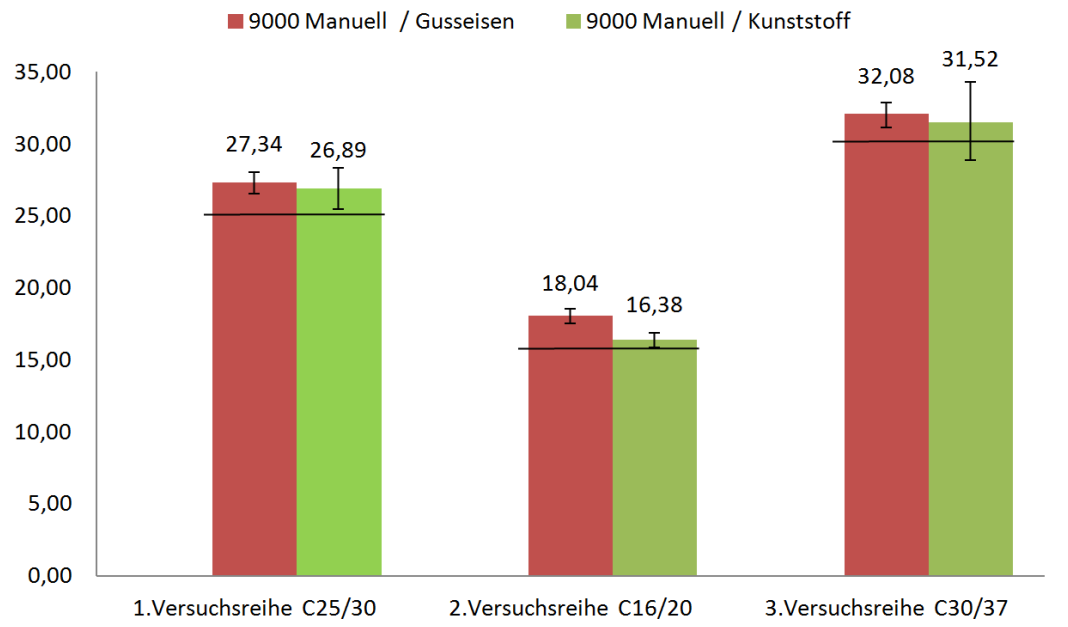


Abbildung 3-32: Rüttelfrequenz von 9000 (U/min.)

In den obigen Diagrammen werden die Ergebnisse der Zylinderdruckfestigkeiten in Abhängigkeit von Rüttelfrequenz miteinander verglichen.

Aus den Diagrammen kann abgelesen werden, dass die aus Gusseisenformen hergestellten Zylinderprobekörper - unabhängig von der Rüttelfrequenz - die besseren Werte erzielen.

Weiters kann noch erkannt werden, dass mit einer Rüttelfrequenz von 9000 Schwingungen pro Minute eine bessere Druckfestigkeit erreicht wird.

Anmerkung: in beiden Fällen wird die Mindestbetondruckfestigkeit erreicht. Die erforderliche Mindestbetondruckfestigkeit ist durch eine schwarze Linie in den Diagrammen gekennzeichnet.

Bei Zylinderformen aus Gusseisen sind die Formen während der Verdichtung der Betonproben, nur händisch gegen den Tisch gehalten worden. Das heißt bei diesen Zylinderformen wurde der Einfluss der magnetischen Befestigung am Rütteltisch nicht untersucht.

Der einfache Grund dafür ist das Gewicht einer Zylinderform aus Gusseisen nach der Füllung mit Frischbeton. Eine gefüllte Zylinderform aus diesem Material wiegt etwa 35 kg (siehe Abbildung 3-34: Massenunterschied von Betonformen). Dies ist für einen Rütteltisch ein zu großes Gewicht um aussagekräftige Ergebnisse erhalten zu können.

3.8 Schlussfolgerung

In vorigen Abschnitt ist der Einfluss von

- Formenwerkstoffen,
- Befestigungsmöglichkeiten der Betonformen am Rütteltisch
- Rüttelfrequenzen

auf die Betondruckfestigkeit beschrieben und grafisch dargestellt worden.

In diesen Abschnitt werden die

- Formenwerkstoffen auf ihre Vor- und Nachteile während der Laborarbeit sowie ihre Wirtschaftlichkeit für ein Betonwerk
- Auswirkung der Rüttelfrequenz auf den Laborant
- Auswirkung der unterschiedlichen Befestigungsmöglichkeiten der Betonformen am Rütteltisch auf den Laboranten

untersucht und grafisch dargestellt.

3.8.1 Formenwerkstoffe

In diesem Abschnitt werden die Vor- und Nachteile für jedes Formmaterial erwähnt. Dabei werden sie nach Kriterien ihrer Masse vor dem Füllen (leer) und nach dem Füllen (voll), ihrer Dauer der Ausschalung und dem Feinputz, ihrem Ankaufspreis und ihres Lebenszyklus untersucht.

3.8.1.1 Anschaffungspreis

Die Anschaffungskosten von Formen ist immer ein entscheidender Punkt für den Betonhersteller für deren Verwendung.

Aus dem folgenden Diagramm wird ersichtlich, dass die Kunststoffformen im Vergleich zur Gusseisenformen um etwa 65% billiger sind.

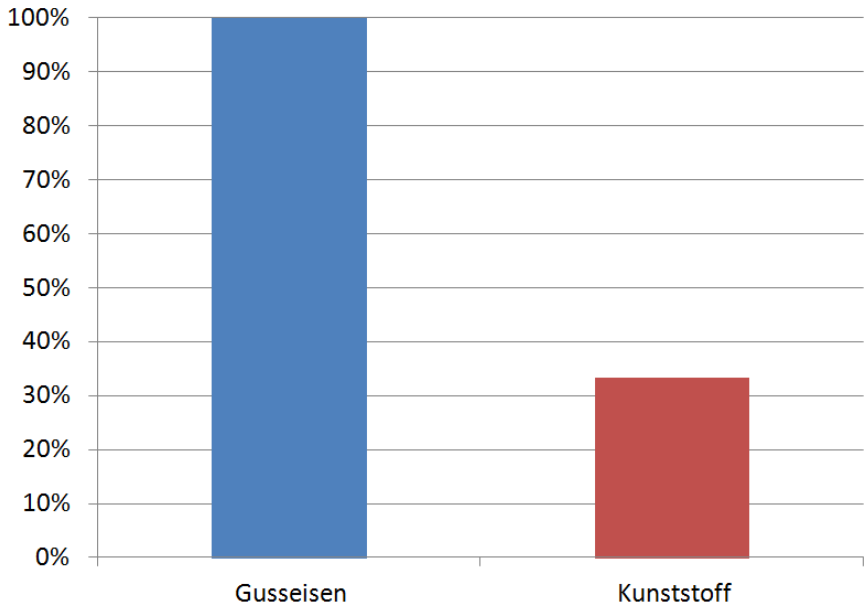


Abbildung 3-33: Preisunterschied zwischen Formenwerkstoff

Die Informationen über die Ankaufspreise der jeweiligen Formen beziehen sich auf die Firma Testing [17] und THB [24].

Für die Ausschalung der hergestellten Probekörper mit Gusseisenformen ist kein zusätzliches Werkzeug nötig. Bei Kunststoffformen wird jedoch ein Luftdruckgerät für die Ausschalung der Probekörper benötigt, wobei bei jedem Betonhersteller mindestens ein Luftdruckgerät vorhanden ist.

Ein Luftdruckgerät kostet je nach Leistung und Marke zwischen 4000 € und 20.000 €.

3.8.1.2 Gewichtsmasse der Betonformenwerkstoffe

Für die körperliche Beanspruchung des Laboranten ist die Masse der Betonformen ein entscheidender Faktor. Nachfolgendes Diagramm zeigt den Massenunterschied der Formmaterialien.

Für die Ermittlung des Massenunterschiedes zwischen voller und leerer Gewichtsmasse wurden aus den gesamte Zylinder- und Würfelformen, die in Tabelle 3-10 bis Tabelle 3-12 dargestellt sind, jeweils die Mittelwerte berechnet.

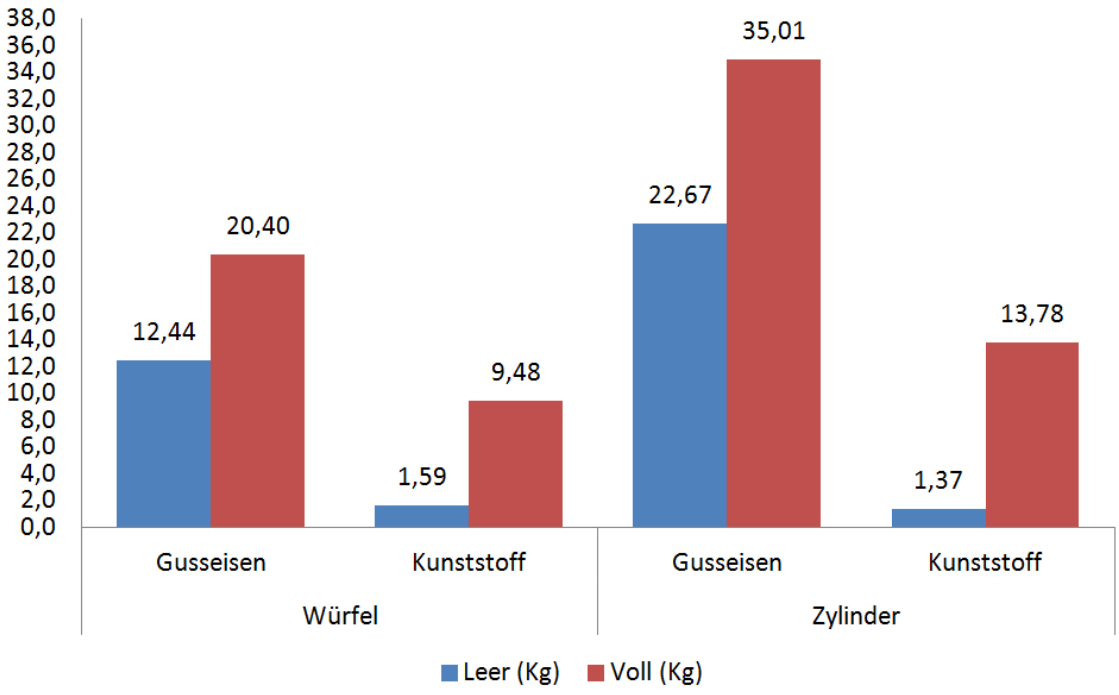


Abbildung 3-34: Massenunterschied von Betonformen

Würfel:

Aus den obigen Diagrammen erkennt man, dass eine Gusseisenform im leeren Zustand 13 kg und im vollen Zustand über 20 kg wiegt während eine Kunststoffform jeweils 1,60 kg leer und 10 kg voll wiegt. Daraus folgt, dass eine leere Gusseisenform ca. 1.5 mal schwerer ist als eine volle Kunststoffform.

Zylinder:

Das Leergewicht einer Gusseisenform beträgt 23 kg und ist 16 mal schwerer als eine Kunststoffform im gleichen Zustand.

Im vollgefüllten Zustand wiegt eine Gusseisenform 35 kg, was zu großer körperlicher Belastung des Laboranten führen kann, wenn mehrere Versuche je Tag durchgeführt werden müssen.

Bei Zylinderformen aus Gusseisen wurden die Formen während der Verdichtung der Betonproben nur händisch gegen den Tisch gehalten. Das heißt, bei diesen Zylinderformen wurde den Einfluss der magnetischen Befestigung am Rütteltisch nicht untersucht.

Der einfache Grund dafür ist das Gewicht einer Zylinderform aus Gusseisen nach der Füllung mit Frischbeton. Eine gefüllte Zylinderform aus diesem Material wiegt etwa 35 kg (siehe Abbildung 3-34: Massenunterschied von Betonformen). Dies ist für einen Rütteltisch ein zu großes Gewicht um aussagekräftige Ergebnisse erhalten zu können.

3.8.1.3 Dauer für die Ausschalung und den Feinputz einer Form

Ein wichtiger Punkt für die Manipulationszeit ist die Dauer der Ausschalung, Reinigung und Einölen einer Betonform.

Während die Ausschalung eines hergestellten Probekörpers mit Kunststoffform mit Hilfe eines Luftdruckgeräts nur wenige Sekunden dauert, muss eine Gusseisenform händisch aufgeschraubt und für einen neuen Versuch wieder zusammengeschraubt und neu kalibriert werden.

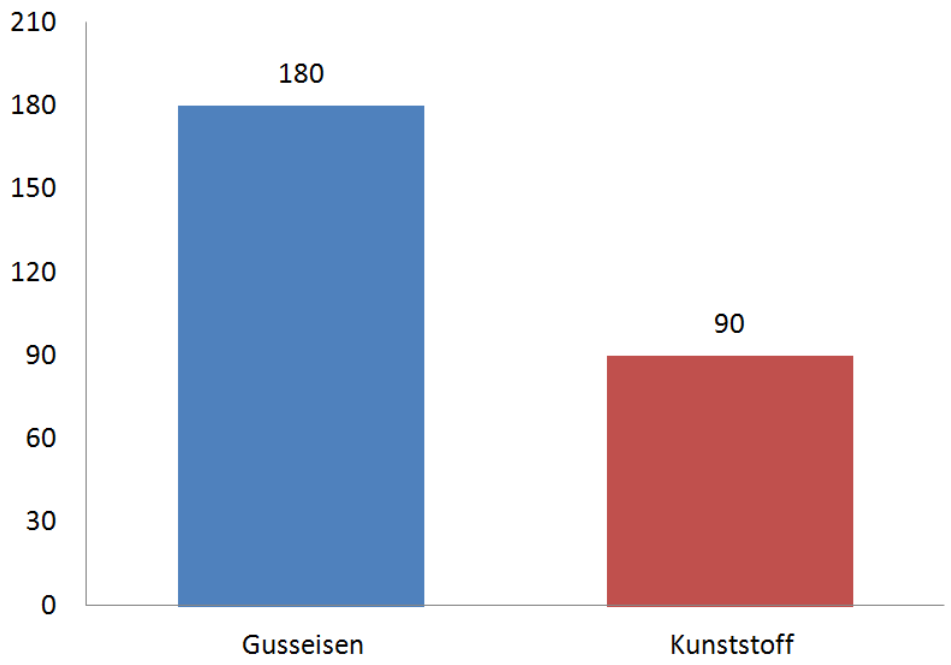


Abbildung 3-35: Zeitverbrauch für Ausschalung und Feinputz einer Form (Sek.)

Erfahrungsgemäß werden für die Ausschalung und den Feinputz einer Gusseisenform 180 Sekunden benötigt.

Bei einer Kunststoffform werden dazu lediglich 90 Sekunden gebraucht, was der halben Zeit entspricht.

Für die Ausschalung des hergestellten Probekörpers aus Gusseisenformen ist kein zusätzliches Werkzeug nötig. Bei Kunststoffformen wird jedoch ein Luftdruckgerät für die Ausschalung der Probekörper benötigt, wobei bei jedem Betonhersteller mindestens ein Luftdruckgerät vorhanden ist.

Ein Luftdruckgerät kostet je nach Leistung und Marke zwischen 4000 € und 20.000 €.

3.8.1.4 Lebensdauer

Die Lebensdauer der jeweiligen Werkstoffformen ist unten dargestellt. (Abbildung 3-36 zu entnehmen)

Die Lebensdauer einer Gusseisenform beträgt ca. 80 Jahre, diese These stützt sich auf Erfahrungswerte meines Kooperationspartners, der Firma Testing, sowie meiner Internet Recherche.

Bei Kunststoffformen kann durch guten Umgang mit der Form, eine Lebensdauer von bis zu 10 Jahren erreicht werden.

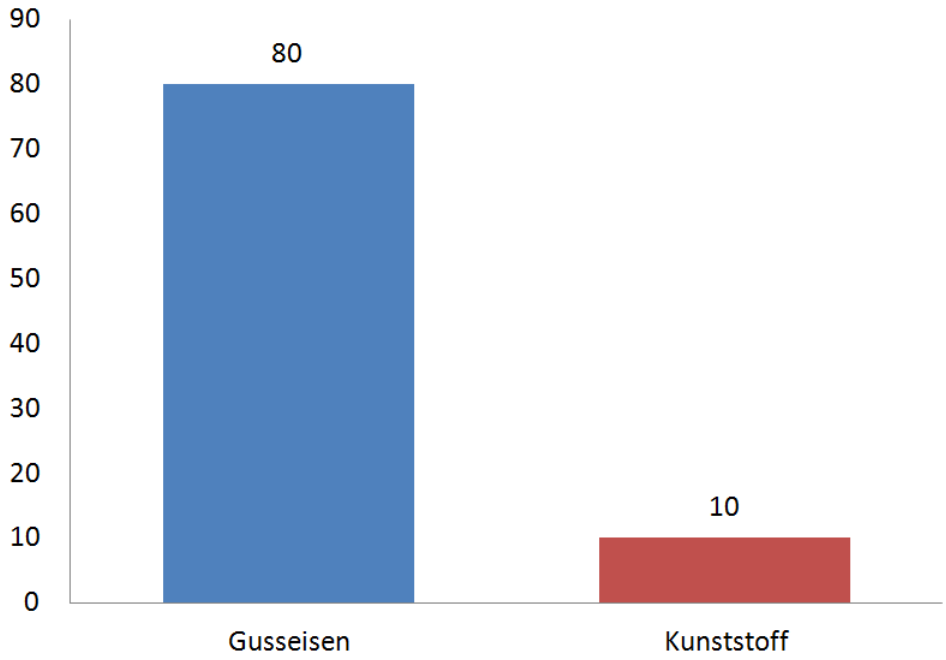


Abbildung 3-36: Lebensdauer eines Formenwerkstoffes

3.8.2 Auswirkung von Befestigungsmöglichkeiten der Betonformen am Rütteltisch auf den Laboranten

Die Art der Befestigung von Betonformen auf dem Rütteltisch ist in den Normen nicht näher definiert.

Bei Verwendung eines Rütteltisches "sollte die Form vorzugsweise am Tisch befestigt oder sicher gegen den Tisch gehalten werden.“[41]

Die Gusseisenformen haben den Vorteil, dass die Magnetfunktion von einem Rütteltisch aktiviert werden kann.

Die Betonformen können am Tisch magnetisch befestigt werden. Dadurch ist ein manuelles Halten während der Verdichtung nicht mehr nötig.

Unabhängig von der Rüttelfrequenz ist aus den Diagrammen auf den Seiten 76 und 77 leicht zu erkennen, dass mittels magnetischer Befestigung der Betonformen am Rütteltisch eine deutlich bessere Druckfestigkeit der Probekörper erreicht werden kann.

Bei manueller Verdichtung werden die Betonformen händisch gegen den Rütteltisch gehalten, während bei magnetischer Verdichtung die Betonformen am Rütteltisch magnetisch befestigt werden.

Die Art der Befestigung der Betonformen hat laut der Tabelle 3-9 "Ermittlung der Rüttelzeitdifferenz" gar keinen Einfluss auf die Verdichtungsdauer.

Es ist zu erwähnen, dass durch die magnetische Befestigung der Betonform aus Gusseisen der Laborant überhaupt keinen körperlichen Erschütterungen mehr ausgesetzt ist, eine Betonform aus Gusseisen ist allerdings sehr viel schwerer als eine solche aus Kunststoff was wiederum den Rücken belastet und vorige Aussage relativiert.

[41] DIN EN 12390-2:2012; Prüfung von Festbeton, Teil 2 [13]

3.8.3 Auswirkung der Rüttelfrequenz auf den Laborant

Laut DIN EN12390-2 und ONR 23303 darf die Verdichtung mit einem Rütteltisch erfolgen.

In der Norm ist jedoch die optimale Rüttelfrequenz für eine Verdichtung mit einem Rütteltisch nicht näher definiert.

"Rütteltisch mit einer Mindestfrequenz von 40 Hz (2400 Schwingungen pro Minute), wobei die Wirksamkeit des Rütteltisches für eine praktisch vollständige Verdichtung des Frischbetons ausreichend sein muss"[42].

„Bei mechanischer Rüttelwirkung ist die vollständige Verdichtung erreicht, wenn keine größeren Luftblasen mehr an der Oberfläche erscheinen und wenn die Oberfläche relativ glatt ist und ein glänzendes Erscheinungsbild ohne übermäßiges Entmischen aufweist.“[43]

Aus den Diagrammen der Seiten 80 und 84 ist leicht zu erkennen, dass mit einer Rüttelfrequenz von 9000 (Schwingungen/Min.) eine bessere Druckfestigkeit für Betonprobekörper - abgesehen vom Formenwerkstoff - erzielt wird.

Eine Rüttelfrequenz von 9000 (Schwingungen/Min.) bedeutet für den Laboranten gleichzeitig – rückblickend auf die Tabelle 3-9 "Ermittlung der Rüttelzeitdifferenz" - eine kürzere Rüttelzeit. Pro Probe können bis zu 25 Sekunden Zeit eingespart werden.

Eine lange Verdichtungszeit kann den Beton durch Entmischung gefährden.

Bei einer kürzeren Rüttelzeit wird der Beton nicht mehr durch Entmischung gefährdet und der Laborant arbeitet durch die Zeitersparnis effektiver.

Aus den obigen Argumenten wird das Verdichten mit 9000 Schwingungen pro Minute empfohlen.

---

[42] ONR 23303:2010; Prüfverfahren Beton (PVB) [15]
[43] DIN EN 12390-2:2012; Prüfung von Festbeton, Teil 2 [13]

3.8.4 Persönliches Fazit

Das Interesse an dieser Diplomarbeit ist nach einem Treffen im Februar 2014 mit meinem Studienkollegen, Herr Emrah Büke, entstanden.

Nach einem Zusammentreffen mit Herr Dipl.-Ing. Dr.techn. Dipl.-Päd. Korjenic aus dem Hochbau Institut der TU-Wien wurde mir die Aufgabenstellung näher beschrieben so sind zwei Diplomarbeiten entstanden.

Mein Studienkollege und ich haben alle Versuche aus unseren zwei Diplomarbeiten gemeinsam durchgeführt, untersucht und nach den Auswertungen die Ergebnisse aufgeteilt. Für eine reibungslose Zusammenarbeit sowie zahlreiche Unterstützungen möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Dipl.-Päd. Korjenic und meinem Studienkollegen Herr Büke bedanken.

Ich möchte erwähnen, dass mir die Durchführung dieser Diplomarbeit sehr viel Spaß und Freude bereitet hat.

Mit dieser Diplomarbeit habe ich die Möglichkeit bekommen, mein technisches Wissen zu verbessern.

4 Literatur

[1] Kollegger J.; Skriptum zur Vorlesung Betonbau 1, 3 Auflage (2009); Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau Technische Uni Wien

[2] Holcim (Wien) GmbH., Holcim (Vorarlberg) GmbH. (2004) Betonpraxis, 4. Auflage

[3] Valentin G., Poutucek W., Kidery G. F., Fritze R.; Stahlbetonbau, Teil 1, 12 Auflage (2009); Wissen ist Manz

[4] Lohmeyer G.; Stahlbetonbau Bemessung – Konstruktion - Ausführung, 5. Auflage (1994); B. G. Teubner Stuttgart

[5] Röhling / Eifert / Kaden; Betonbau, 1 Auflage; Verlag Bauwesen (2000)

[6] Weigler H., Karl S.; Beton – Arten – Herstellung - Eigenschaften; Ernst & Sohn (1989)

[7] DIN EN 197-1:2011-11; Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzement

[8] DIN EB 1008:2002-10; Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton

[9] Bölcskey E., Bruckner H. (2014); Frischbeton, 23 Auflage; TU Wien, Institut 206-1

[10] www.baunetzwissen.de

[11] www.betonshop.de/files/296/bs_2_1754_kleine_buch_vom_beton.pdf

[12] Krispel S. (2011) Skriptum zur Vorlesung Betonbau 3,

Betontechnologie; Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau Technische Uni Wien

[13] DIN EN 12390-2:2010 Prüfung von Festbeton, Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probenkörpern für Festigkeitsprüfungen

[14] DIN EN 12390-1:2012-12 Prüfung von Festbeton, Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen

[15] ONR 23303:2010 Prüfverfahren Beton (PVB), Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe

[16] www.verlagbt.de/verlag/shop/res/.../978-3-7640-0504-7.pdf

[17] www.testing.de/de/philosophie

[18] www.cemex.at/814_DE-Unternehmen-Geschichte.htm

[19] www.holcimsued.de/fileadmin/templates/DEUB/doc/Produkte/fachvereroeffe-ntlichungen/Frisch-und_Festbetonpruefungen.pdf

[20] Zement und Beton – Fachtextbuch, Lafarge; Auflage 2013 - 2015

[21] www.richtig-betonieren.de/nachbehandlung.html

[22] Betonhandbuch (1995), Deutscher Beton-Verein E.V., 3 Auflage

[23] www.baumarkt.de/lexikon/Rezeptbeton.htm

[24] www.baustoffprueftechnik.de

[25] www.moerteltransportbeton.de/Produkte/Transportbeton/Hoch-bau/Ill-ustration.aspx

[26] DIN 1045-2:2014-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206

[27] Zement-Merkblatt Betontechnik B9, 9.2014; Expositionsklassen für Betonbauteile im Geltungsbereich des EC2

[28] ÖNORM EN 12620:2014-02-15; Gesteinskörnungen für Beton

[29] Das kleine Buch vom Beton, 100 Argumente für das Bauen mit Beton; BetonMarketing Deutschland GmbH

[30] Zement-Merkblatt Betontechnik B4, 3.2013; Frischbeton Eigenschaften und Prüfungen

[31] Zement-Merkblatt Betontechnik B3, 2.2014; Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Einfluss der Zementfestigkeitsklasse auf die Erhärtung des Betons [3] 7

Abbildung 2-2: Grenzsieblinie für Betonzuschlag nach DIN 1045-2 / Anhang L [26] ..13

Abbildung 2-3: Einteilung nach dem Erhärtungszeit [1] 22

Abbildung 2-4: Beispiel für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositionsklasse [25] .27

Abbildung 2-5: Würfe [14] 30

Abbildung 2-6: Zylinder [14] 30

Abbildung 2-7: Unterschiedliche Behinderung der Querdehnung der Formen [3].....31

Abbildung 3-1: Kooperationspartner 43

Abbildung 3-2: Form (Maße in mm) [15] 48

Abbildung 3-3: Stössel (Maße in mm) [15].....48

Abbildung 3-4: Üblicher Ausbreittisch [15] 49

Abbildung 3-5: Die Form wird aufrecht hochgezogen 50

Abbildung 3-6: Messung des Ausbreitmaßes f.....50

Abbildung 3-7: Der Behälter wird mit seinem Inhalt abgewogen [19].....52

Abbildung 3-8: Druckmessgerät [15].....54

Abbildung 3-9: : Das Luftgehalt wird abgelesen.....55

Abbildung 3-10: Abhängigkeit der Trocknungszeit vom Wassergehalt 56

Abbildung 3-11: Ermittlung der Maße mf.....57

Abbildung 3-12: Ermittlung der Maße mtr 57

Abbildung 3-13: Kantenbruch aufgrund fehlerhaften Einölens.....60

Abbildung 3-14: Die Formen werden normgemäß gekennzeichnet 62

Abbildung 3-15: Wasserlagerung der Betonprobekörper 67

Abbildung 3-16: Luftlagerung der Betonprobekörpern 67

Abbildung 3-17: Der Betonprobekörper wird mittig auf die Lastplatte gestellt.....68

Abbildung 3-18 Das Bruchbild eines Würfel-Probekörpers 69

Abbildung 3-19: Das Bruchbild eines Zylinder-Probekörpers.....69

Abbildung 3-20: Erste Versuchsreihe C25/30 XC3 GK16 F52 42,5 76

Abbildung 3-21: Zweite Versuchsreihe C16/20 XC1 GK16 F45 42,5.....76

Abbildung 3-22: Dritte Versuchsreihe C30/37 XC1 GK16 F52 42,5.....77

Abbildung 3-23: Erste Versuchsreihe C25/30 XC3 GK16 F52 42,5 78

Abbildung 3-24: Zweite Versuchsreihe C16/20 XC1 GK16 F45 42,5.....78

Abbildung 3-25: Abbildung 3 31: Dritte Versuchsreihe C30/37 XC1 GK16 F52 42,5 ..79

Abbildung 3-26: Rüttelfrequenz von 4000 (U/min.) 80

Abbildung 3-27: Rüttelfrequenz von 9000 (U/min.) 80

Abbildung 3-28: Erste Versuchsreihe C25/30 XC3 GK16 F52 42,5 82

Abbildung 3-29: Zweite Versuchsreihe C16/20 XC1 GK16 F45 42,5.....82

Abbildung 3-30: Dritte Versuchsreihe C30/37 XC1 GK16 F52 42,5.....83

Abbildung 3-31: Rüttelfrequenz von 4000 (U/min.) 84

Abbildung 3-32: Rüttelfrequenz von 9000 (U/min.) 84

Abbildung 3-33: Preisunterschied zwischen Formenwerkstoff 87

Abbildung 3-34: Massenunterschied von Betonformen.....88

Abbildung 3-35: Zeitverbrauch für Ausschalung und Feinputz einer Form (Sek.) 90

Abbildung 3-36: Lebensdauer eines Formenwerkstoffes 91

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Die 27 Produkte der Familie der Normalzemente [7] 5

Tabelle 2-2: Zementfestigkeitsklassen [7].....6

Tabelle 2-3: Vergleich der Eigenschaften von Zuschlag, Zementstein, Beton [1].....8

Tabelle 2-4: Kategorien für Höchstwerte der Plattigkeitskennzahl [28].....10

Tabelle 2-5: Siebgrößen zur Bezeichnung von Korngrößen [28] 12

Tabelle 2-6: Einteilung der Beton nach der Rohdichte [16].....23

Tabelle 2-7: Expositionsklassen aufgrund Umwelteinwirkungen [12].....26

Tabelle 2-8: Einteilung der Beton nach Seine Druckfestigkeit [3].....28

Tabelle 2-9: Konsistenzklassen [1] 33

Tabelle 2-10: Zusammenhang zwischen W/B-Wert und Abfall der Betondruckfestigkeit [3].....35

Tabelle 3-1: Versuchsreihen je nach Anzahl der Formen 44

Tabelle 3-2: Versuchsreihen je nach Art der Befestigung am Rütteltisch.....45

Tabelle 3-3: Verwendete Betongüte.....45

Tabelle 3-4: Ergebnisse des Ausbreitmaßes 51

Tabelle 3-5: Ergebnisse von Frischbeton-Rohdichte 53

Tabelle 3-6: Ergebnisse des Frischbeton-Luftporengehalt.....55

Tabelle 3-7: Ergebnisse von Gesamtwassergehalt des Frischbetons.....58

Tabelle 3-8: Temperaturen.....59

Tabelle 3-9: Ermittlung der Rüttelzeitdifferenz 61

Tabelle 3-10: **:** Ergebnisse des ersten Versuches C25/30 XC3 GK16 F52 42,5.....64

Tabelle 3-11: Ergebnisse des zweiten Versuches C16/20 XC1 GK16 F45 42,5.....65

Tabelle 3-12: Ergebnisse des dritten Versuches C30/37 XC1 GK16 F52 42,5.....66

Tabelle 3-13: Ergebnisse des ersten Versuches C25/30 XC3 GK16 F52 42,5.....71

Tabelle 3-14: Ergebnisse des zweiten Versuches C16/20 XC1 GK16 F45 42,5.....72

Tabelle 3-15: Ergebnisse des dritten Versuches C30/37 XC1 GK16 F52 42,5.....73