



Investigation of sustainable cement (AAB) fresh and solid properties

Master's Thesis

Masterstudiengang für Bauingenieurwesen

Vorgelegt von:

Christian Aschauer, BSc.

Matrikelnummer:

01225318

Erstbegutachter:

Assistant Prof. Dr. Dipl.-Ing. Teresa Liberto

Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Kirnbauer

Univ. Prof. PhD Agathe Robisson

Abgabetermin:

7. Juni 2022

Erklärung:

Ich erkläre, dass die vorliegende Diplomarbeit von mir selbst verfasst wurde und ich keine anderen als die angeführten Behelfe verwendet bzw. mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Ich versichere, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Weiters versichere ich, dass die von mir eingereichten Exemplare (ausgedruckt und elektronisch) identisch sind.

Datum: 07.06.2022

Unterschrift:

Oliver Aschauer

Danksagung

Ich möchte mich hier herzlich bei meinen Eltern Sonja und Herbert Aschauer bedanken, auf die ich mich zu jeder Zeit verlassen kann.

Auch bedanken möchte ich mich beim gesamten Team der TU Wien unter der Leitung von Agathe Robisson. Ein spezielles Danke gilt meiner Betreuerin Teresa Liberto. Sie war ständig erreichbar und half mir immer sofort und gerne, wenn es zu Fragen kam. Ich weiß, dass das nicht selbstverständlich ist. Danke!

Ohne dich, lieber Benjamin Marksteiner, wäre die Durchführung der Versuchsauswertungen und Mischungen sicherlich nicht möglich gewesen. Ein großes Danke dafür!

Abstract

During my investigations, we studied the workability and strength development of mixes with slag-based, Alkali-Activated Binders (AAB) exploring the limits in term of w/b with different water to binder values. The main problems that prevent AAB to be currently used in construction field are its limited workability and the lack of durability tests

The umbrella term of alkali-activated binders is used for building products that represent an alternative to the Ordinary Portland Cement (OPC). The need in finding alternative to OPC is the high CO₂ impact of clinker which represents the 95% of cement. Reducing the proportion of clinker in cement has a decisive influence on both fresh and final properties of the hardened material as well as a direct impact on the general cost on construction sites. Therefore, to find eligible substitute to OPC, an extensive study of its fresh and set properties should be made.

The largest percentage of our AAB is composed by blast furnace slag, which is a by-product of steel production. Blast furnace slag, in combination with alkaline additives, Ca(OH)₂ and Na₂CO₃, can be seen as just one representative of the possible alkali-activated binders (i.e., clay).

In this thesis a preliminary work on AAB was extended achieving the influence of adding CaCl₂ and PCE into the solutions. This work was the basis for our work. Following the circumstances already studied, the W/B value could be further reduced with the addition of CaCl₂ and PCE. Another point that also appeared in the results was that PCE also has a decisive influence on the compactability and the associated compressive strength curve. In the end, it was also interesting to compare the compressive strengths with mortar CEM 32.5, where it was found that the values after 28 days were very similar. This fact shows that further research is definitely worthwhile.

This scientific work is divided into an introduction, in which the current problems with cement as a binder are discussed. Then the materials which we have used, and the test methods employed are presented. In the result, the discussion and the conclusion the achievements of this thesis will be described in detail. An appendix with the less relevant results is also presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Zement als globales CO ₂ -Problem	1
1.1.1	Problem der guten Einsetzbarkeit.....	1
1.1.2	CO ₂ -Emissionen bei der Herstellung.....	3
1.1.3	CO ₂ -Emissionen in Österreich.....	4
1.1.4	Alternativen für den Klinker im Zement.....	5
1.1.5	Alkalische Bindemittel als Zementersatz.....	7
1.2	Einsatz von Hochofenschlacke	11
1.3	Erster Einsatz von alkalisch aktivierten Bindemitteln	13
1.4	Aktuelle Studie über AAB	15
2	Materialien und Methoden.....	16
2.1	Grundlagen der Versuchsdurchführung.....	16
2.1.1	Verwendete Materialien	16
2.1.2	Mischvorgang	20
2.1.3	Verwendete Schalungen.....	21
2.1.4	Methoden.....	23
2.1.5	Übersicht über alle Mischungen (Destilliertes- & Leitungswasser)	26
3	Resultate.....	28
3.1	Verlauf der Druckfestigkeiten mit destilliertem Wasser nach 1, 7, 14 und 28 Tagen.....	28
3.2	Verlauf der Druckfestigkeiten mit Leitungswasser nach 1,7,14 und 28 Tagen.....	36
3.3	Verlauf der Druckfestigkeiten mit destilliertem Wasser– abhängig vom W/B-Wert (Testung nach 28 Tagen)	39
3.4	Verlauf der Druckfestigkeiten mit Leitungswasser– abhängig vom W/B-Wert (Testung nach 28 Tagen).....	40
3.5	Ergebnisse der E-Modul- Bestimmung.....	40
3.5.1	Mischungen mit destilliertem Wasser.....	40
3.5.2	Mischungen mit Leitungswasser	41
4	Diskussionen.....	42
4.1	Vergleiche von Mischungen mit Leitungs- und destilliertem Wasser.....	42
4.1.1	Zeitabhängige Druckfestigkeitsverläufe	42
4.1.2	Druckfestigkeiten abhängig vom W/B-Wert	44
4.2	Vergleich von AAB-Mischungen mit Zement-Mörtel (W/B-abhängig).....	47
4.2.1	Gegenüberstellung von destilliertem Wasser mit Mörtel CEM 32.5	47

4.2.2	Gegenüberstellung von Leitungswasser mit Zement-Mörtel CEM 32.5	48
4.3	Vergleich von kleinen und großen Probekörpern.	49
4.4	Vergleich der E-Module mit Mörtel	52
5	Conclusio	53
6	Perspektiven	54
7	Anhang.....	55
7.1	Auswertung von Biegezugversuchen mit Leitungswasser	55
7.2	Biegezugversuche mit destilliertem Wasser und der Einfluss von unterschiedlichen Lagerungen	56
7.3	Auswertungen von „SM“	57
	Quellenverzeichnis	61
	Abbildungsverzeichnis.....	63
	Tabellenverzeichnis	65
	Abkürzungsverzeichnis	66

1 Einführung

1.1 Zement als globales CO₂-Problem

1.1.1 Problem der guten Einsetzbarkeit

Im Vergleich zum Jahr 1950 hat sich die heutige Produktion von Zement verdreißigfach. Aber auch seit dem Jahr 1990 hat sich die Menge an ausgestoßenem CO₂ bei der Zementherstellung vervierfacht.¹

In der nächsten Abbildung wird gezeigt, wie sich der Materialbedarf in den nächsten Jahren und Jahrzehnten entwickeln wird. Aufgegliedert ist die Grafik in die unterschiedlichen Länder und Regionen und in die prozentuale Aufteilung. Die Einheit des Materialbedarfs ist Millionen-Tonnen (Mt) pro Jahr.

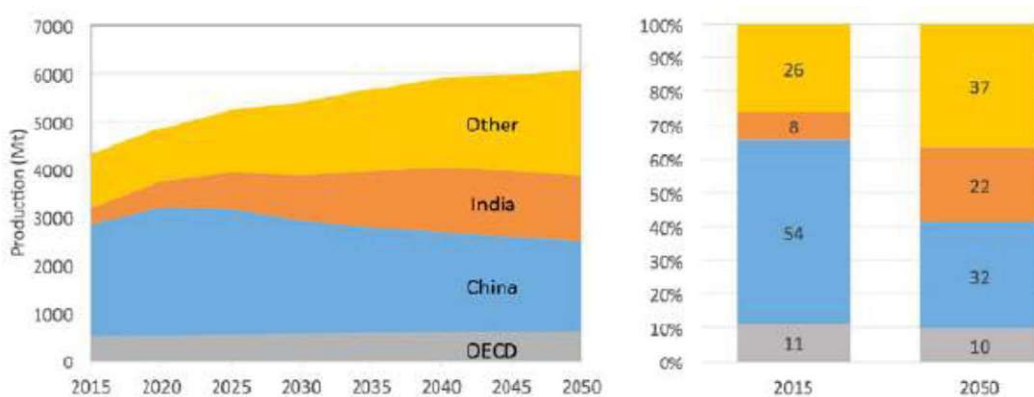


Abb. 1.1: Entwicklung der benötigten Zementmenge pro Jahr und Region²

In Abb. 1.1 ist zu sehen, dass sich der momentan enorm hohe Bedarf an Zement in China in den nächsten Jahren und Jahrzehnten laufend ein bisschen, aber konstant, reduzieren wird. Andererseits steigt der benötigte Zementbedarf in den sogenannten Schwellenländern enorm. In den OECD-Ländern allerdings bleibt der Verbrauch relativ konstant.

Moderne Städte weltweit sind von den weitreichenden Einsatzmöglichkeiten von Zement abhängig. Vergleichbar geringe Kosten erlauben es, große und flexible Bauwerke herzustellen. Grundlage dafür ist der Einsatz von Wasser (mit und ohne Additiven), Kies, Sand und dem Bindemittel, das hauptsächlich Zement ist.³

¹ Vgl.: Univ. Lektor DDipl.-Ing. Dr.techn. BSc MSc PhD Maurizio Bellotto, Werkstoffe/Kapitel 2 – Grundlagen – Binding Materials; S. 24,25

² Arab Hoballah, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, S. 3

³ Vgl.: Arab Hoballah, S. 2

Die Menschheit hat einen sehr hohen Bedarf an konstant billigen Materialien. Dieser Vorteil, aber auch die schnelle Abbinde- und Erhärtungszeit und die Flexibilität, dass man Beton in allen möglichen Volumina herstellen kann, führte und führt zu einer wahnsinnig schnellen Verbreitung weltweit.⁴

Auch durch den Städtezug, der weltweit zunehmend vor sich geht, geschieht ein enormer Anstieg an Materialbedarf. Schon seit dem Jahr 2008 ist mehr als die Hälfte der weltweiten Bevölkerung in Städten beheimatet. Im Vergleich dazu lebten im Jahr 1950 noch 70% der Menschheit in ländlichen Gebieten. Einer groben Schätzung der UNO zufolge wird es im Jahr 2050 so weit sein, dass schon 70% der Bevölkerung in Städten wohnen wird.⁵

Die Abb. 1.2 verdeutlicht den vergleichsweise hohen Einsatz von Zement im Vergleich zu anderen Materialien. Die größte Menge, die hier pro Jahr abgebildet ist, sind Kombinationen aus Stoffen mit Zement. Das Bindemittel kommt nicht nur als Bindemittel beim Beton zum Einsatz, sondern auch zum Beispiel bei Oberflächenverbesserungen im Tiefbau bei Bestands- oder Neubaustrecken von Straßen. Auch bei der Bodenverbesserung als Untergrund für Bodenplatten kommt Zement sehr häufig zum Einsatz.

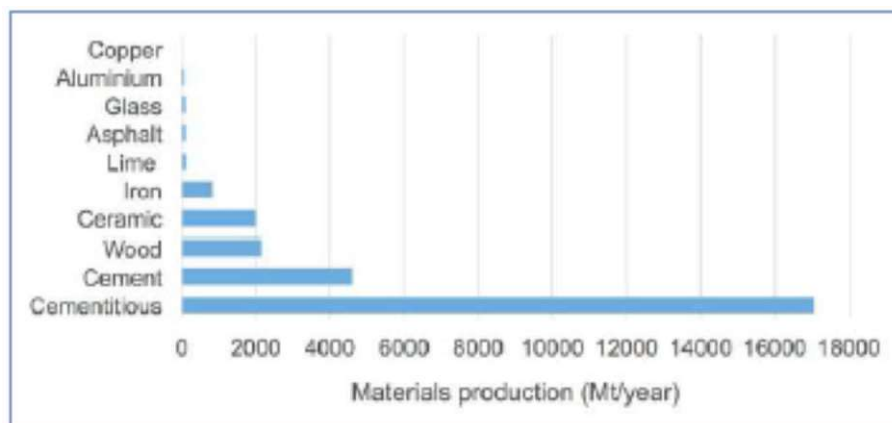


Abb. 1.2: Weltweit eingesetzte Baumaterialien zwischen 2002 und 2005⁶

In Abb. 1.3 sieht man, dass Beton sogar in einer größeren Menge produziert bzw. gefördert wird als zum Beispiel Öl.

⁴ Vgl.: Arab Hoballah S. 3

⁵ Vgl.: <https://www.wochenblick.at/politik/landflucht-sterbende-ortschaften-und-staedte-am-zusammenbruch/>, abgerufen am 05.04.2022

⁶ Arab Hoballah, S. 3

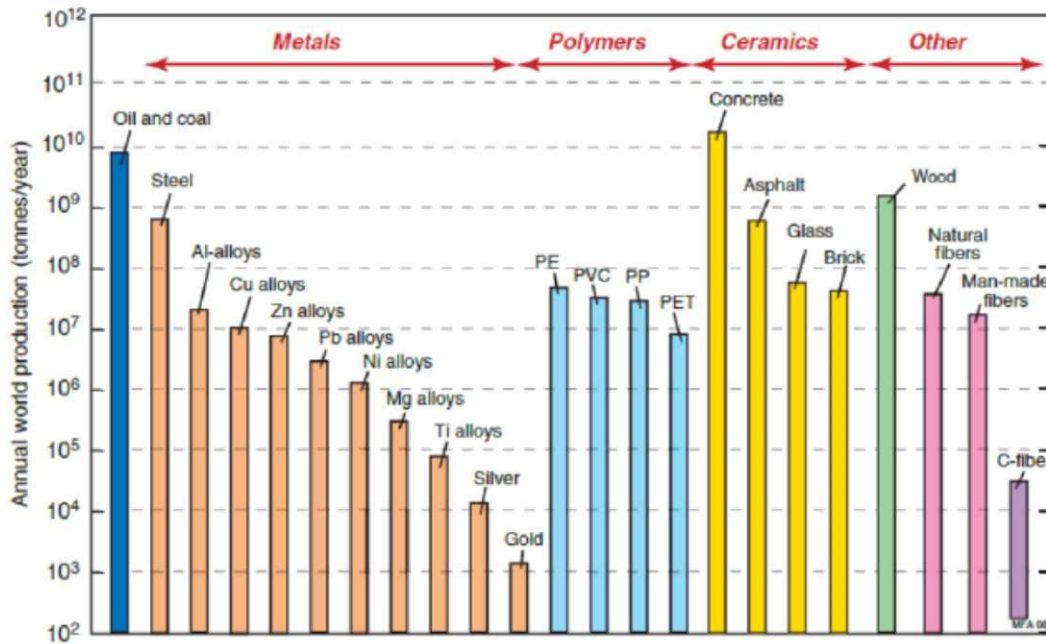


Abb. 1.3: Materialien die in industrialisierten Ländern weltweit benötigt werden⁷

1.1.2 CO₂-Emissionen bei der Herstellung

Die Produktion von Zement lässt sich in vier Abschnitte gliedern:

- 1) Gewinnen und Brechen der Rohmaterialien
- 2) Rohmehlherstellung
- 3) Brennvorgang des Gemisches
- 4) Mahlvorgang des Klinkers

Hauptbestandteil des Zements ist der Klinker. Dieser entsteht im Zuge der Erwärmung auf 1450°C im Drehrohrföfen und ist wiederum aufgeteilt in Kalkstein (CaCO₃) und Ton. Das Verhältnis dieser beiden Rohstoffe beträgt zirka 2:1, das heißt zwei Teile an Kalkstein und ein Teil an Ton. Ebenfalls dazu kommt eventuell noch Mergel.⁸

Durch die Zugabe von beispielsweise Hüttensand, Flugasche und gebranntem Ton werden die gewünschten Eigenschaften des Zementes beeinflusst.⁹

Die beiden Vorgänge, die maßgeblich für den CO₂-Ausstoß verantwortlich sind, sind zum einen der CO₂-Ausstoß, der im Zuge der chemischen Umwandlung von Kalkstein in CaO und CO₂ anfällt (für zirka

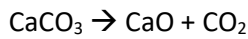
⁷ Bellotto, S. 29

⁸ Vgl.: Ao.Univ.Prof. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. DDr.h.c. Elemer Bölsckey/Ass.Prof.Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Bruckner, Baustofflehre Werkstoff-Technologie & Brandsicherheit - Bindemittel, 2012, S. 29,30,31

⁹ Vgl.: Zement + Beton Handels- und Werbges.m.b.H., Zementherstellung in Österreich – 8. Auflage – November 2021, S. 8

60% verantwortlich) und zweitens die thermische Erwärmung (für zirka 40% verantwortlich) im Drehrohrofen, wo der Zementklinker gebildet wird.¹⁰

Bei der ersten Stufe der Entsäuerung (Kalzinierung) wird das Rohmehl im Vorwärmer auf zirka 900 bis 1100°C erwärmt. Ab einer Temperatur von zirka 850°C kommt es im Kalkstein zu einer chemischen Reaktion. Dabei entsteht Kohlendioxid und Calciumoxid, oder besser beschrieben, Kalkstein spaltet sich in Calciumoxid und Kohlendioxid auf.¹¹



Zu dem klimaschädlichen Gas CO₂ ist zu sagen, dass aus einer Tonne Rohmehl zirka 340 kg Kohlendioxid anfallen.¹²

Der letzte Schritt des Brennvorganges, die Sinterung, findet im Drehrohrofen statt. Durch die Schräglage und die Drehbewegung des Ofens gelangt das nunmehr kugelförmige Material in die heißen Ofenzonen in Richtung des Brenners. Ab einer Temperatur von zirka 1450°C bilden sich die Klinkerminerale.¹³

1.1.3 CO₂-Emissionen in Österreich

Die in unserer Atmosphäre vorhandenen anthropogenen Kohlenstoffdioxidemissionen stammen vorwiegend aus drei Quellen:

- ◆ Aufspaltung von Karbonaten
- ◆ Landnutzungsumänderungen
- ◆ Oxidation von fossilen Brennstoffen

Zu der Auflösung von Karbonaten ist zu betonen, wie schon bereits zuvor erwähnt wurde, dass hier der vorwiegende Teil von der Verbrennung von Kalkstein stammt, der hauptsächlich für Baumaterialien verwendet wird. Ab dem Jahr 1945 stieg diese Emissionsquelle enorm und heute kann man sagen, dass jedes Jahr zirka eine halbe Tonne Zement pro Person und pro Jahr hergestellt wird.¹⁴

In Abb. 1.4 ist dargestellt, wie sich die CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung in Österreich aufteilen. Den weitaus größten Anteil pro Jahr hat immer der Kohlendioxid-Ausstoß aus der Rohmehlkarbonisation. Der Anteil an fossilen (konventionellen) Brennstoffen ist in Österreich viel kleiner als der Anteil der Ersatzbrennstoffe. Der grüne Anteil in den einzelnen Anteilen ist den biogenen

¹⁰ Vgl.: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/betonherstellung-und-klimaschutz-7229519>, abgerufen am 22.04.2022

¹¹ Vgl.: Zement + Beton Handels- und Werbges.m.b.H., Zementherstellung in Österreich – 8. Auflage – November 2021, S. 15,17

¹² Vgl.: Zement + Beton Handels- und Werbges.m.b.H, S. 15,17

¹³ Vgl.: Zement + Beton Handels- und Werbges.m.b.H, S. 15,17

¹⁴ Vgl.: Bellotto, S. 24,25

Brennstoffen zuzuordnen. Übergeordnet ist zu sagen, dass es in den letzten fünf Jahren zu einer leicht steigenden Tendenz gekommen ist.

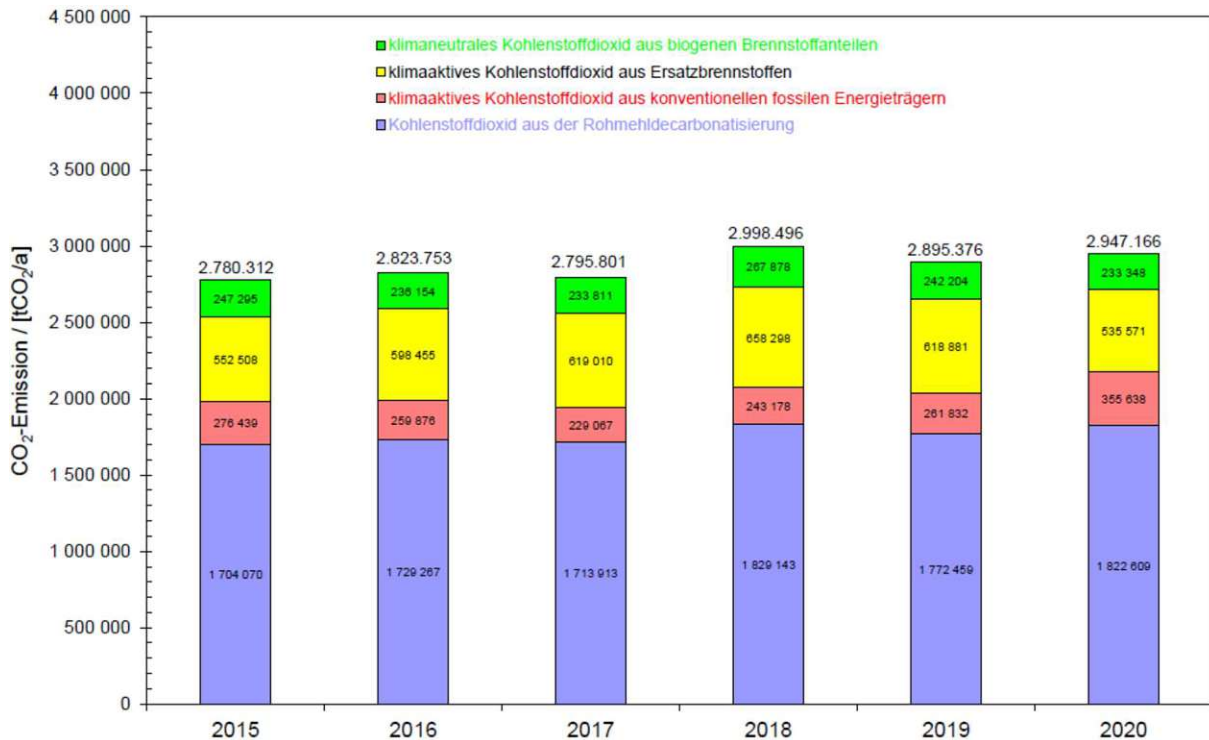


Abb. 1.4: Jährliche Entwicklung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Österreich¹⁵

1.1.4 Alternativen für den Klinker im Zement

Wie schon erwähnt wurde, ist die Reduktion vom Klinkeranteil im Zement entscheidend für die Reduktion des Kohlendioxid-Fußabdruckes. Dieser Anteil hat, wie schon zuvor erwähnt, einen Anteil von zirka 60% vom Gesamt-Kohlendioxidausstoß. Derzeit am Markt befindliche Zemente, zum Beispiel CEM I, hat folgend der EN 197-1:2011 einen Klinkeranteil von 95-100 Prozent.¹⁶

Zufolge der Norm können weitere Möglichkeiten aufgezählt werden. Als Beispiel kann hier CEM II/A-S mit einem Klinkeranteil von 80-94% und mit 6-20% an Hüttensand gesehen werden. Mit der Beimengung von noch mehr Hüttensand mit bis zu 21-35%, ändert sich die Normbezeichnung zu CEM II/B-S. Flugasche wird laut Norm in kieselsäurereich und kalkreich unterteilt. Dementsprechend variiert dort der Anteil im Zement zwischen 6-20% und 21-35%.¹⁷

¹⁵ Gerd Mausitz, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften TU Wien, Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie – Berichtsjahr 2020, – Wien April 2021, S. 21

¹⁶ Vgl.: Karen Scrivener, Fernando Martirena, Shashank Bishnoi, Soumen Maity, Calcined clay limestone cements (LC³), 2018, S. 49

¹⁷ Vgl.: Scrivener, Martirena, Bishnoi, Maity, S. 49

Als CEM III/A und CEM III/C werden Normalzemente bezeichnet, welche zwischen 36% und 95% aus Hüttensand bestehen. Der restliche Teil setzt sich aus dem Klinker und eventuell auch aus Nebenbestandteilen zusammen.¹⁸

Der Einsatz von zusätzlichen zementhaltigen Materialien, sogenannten SCMs, die den Klinkeranteil im Zement reduzieren können, ist ein sehr erfolgreicher Weg, um die Kohlendioxid-Emissionen weltweit zu reduzieren. Leider sind diese Materialien nur begrenzt verfügbar, was einen breiten Einsatz schwierig macht. Das einzige Material, welches in ausreichender Menge als Ressource vorhanden ist, ist Ton. Die reaktivere Variante basiert auf Kaolin und kann durch Kalzinierung verwendet werden.¹⁹

Mischungen mit kalziniertem Ton haben üblicherweise einen Klinkeranteil von zirka 65-70%. Kombiniert man jedoch weiters kalzinierten Ton mit Kalkstein, kann man den Klinkeranteil noch einmal reduzieren, und zwar auf zirka 50%.²⁰

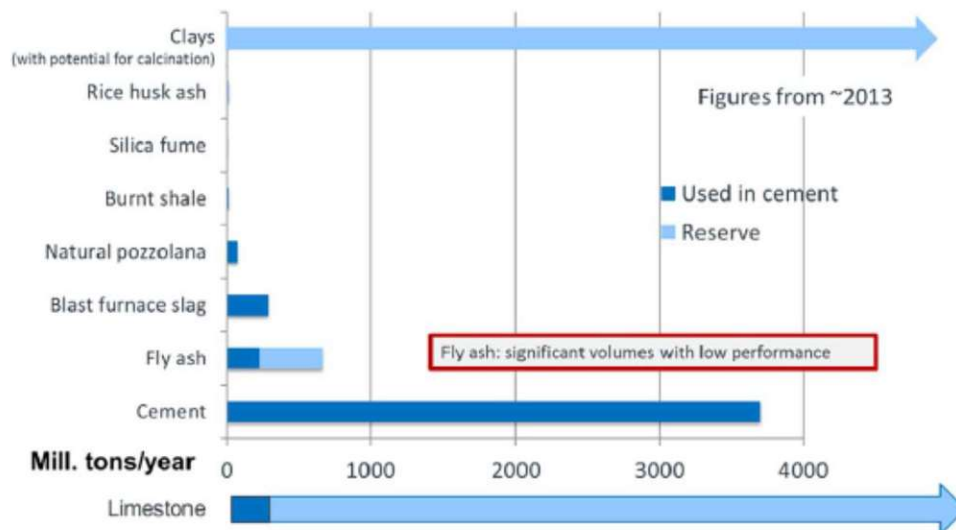


Abb. 1.5: Zusätzlich zementhaltige Materialien und deren Verfügbarkeit (SCM)²¹

Beispielsweise sieht man auch in Abb. 1.5, dass Hochofenschlacke nur zirka einen Anteil von 5-10% an dem Zementbedarf pro Jahr hat. Es ist weiters sehr unwahrscheinlich, dass der Bedarf an Stahl, aus welchem die Hochofenschlacke vorwiegend stammt, zukünftig stärker steigen wird als der Bedarf an Beton und Zement. Dazu zu sagen ist aber, dass Stahl leichter und zukünftig sicher auch häufiger und breiter rezykliert wird, wodurch auch mehr Material am Markt vorhanden sein wird.²²

¹⁸DIN EN 197-1:2011

¹⁹ Vgl.: Scrivener, Martirena, Bishnoi, Maity, S. 49

²⁰ Vgl.: Scrivener, Martirena, Bishnoi, Maity, S. 49

²¹ Scrivener, Martirena, Bishnoi, Maity, S. 50

²² Vgl. Scrivener, Martirena, Bishnoi, Maity, S. 50

Weiters werden auch laufend immer mehr Kohlekraftwerke stillgelegt, aus welchen bekanntlich ein Großteil der Flugasche stammt, wodurch es auch hier zu keinem vermehrten Angebot, sondern zu einer Angebotsverknappung kommen wird.²³

Eine weitere Möglichkeit zur Klinkerreduktion ist der Einsatz von Bauxit, der vorwiegend momentan als Grundrohstoff für die Aluminiumproduktion verwendet wurde.²⁴ In den Tropen rund um den Äquator kommt es vor, dass die Schichten über den Bauxit Vorkommen ebenfalls geeignet sind. Dieses Material nennt man Belterra-Lehm. Es wird davon ausgegangen, dass damit 50-60% des Kalkes ersetzt werden kann. Hier ist auf eine um 200°C verringerte maximal erforderliche Temperatur hinzuweisen, was ebenfalls ein Vorteil sein kann.²⁵

1.1.5 Alkalische Bindemittel als Zementersatz

Seit dem Bekanntwerden der wichtigen Hauptbestandteile von alkalischen Bindemitteln sind schon einige Versuche und Studien gemacht worden. Als Ausgangsbasis können natürliche Rohstoffe, industrielle Beiprodukte und rezyklierte Aluminiumsilikate verwendet werden. Als Beispiel kommen hier kalzinierter Ton, Hochofenschlacke, phosphorhaltige Schlacke, Flugasche, Glasabfälle und diverse Kombinationen dieser genannten Stoffe zur Anwendung.²⁶

Die unterschiedlichen chemischen Eigenschaften und der Einsatz von unterschiedlichen Aktivatoren können zum Teil zu höheren Festigkeiten führen als dies beim Einsatz von klassischem Portlandzement der Fall ist.²⁷ Alkalische Zemente sind zementhaltige Materialien, die durch die alkalische Aktivierung der Aluminiumsilikate beim Mischen mit alkalischen Aktivatoren erhärten.²⁸

Der ökologische Fußabdruck ist weiters im Vergleich zum Zement geringer, da zum Beispiel Hochofenschlacke, um nur eine Variante eines alkalischen Bindemittels zu nennen, immer als Beiprodukt bei der Herstellung von Stahl anfällt. Wie zuvor erwähnt, kann es hier zukünftig zu einer größeren Menge an rezykliertem Stahl in der Wirtschaft kommen, da Recycling immer wichtiger wird.²⁹

²³ Vgl. Scrivener, Martirena, Bishnoi, Maity, 2018, S. 50

²⁴ Vgl.: <https://www.recyclingmagazin.de/2021/08/24/klimafreundliche-alternative-zu-zement/>, abgerufen am 22.04.2022

²⁵ Vgl.: <https://www.recyclingmagazin.de/2021/08/24/klimafreundliche-alternative-zu-zement/>, abgerufen am 22.04.2022

²⁶ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, Instituto Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid, Spain; An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders.,2015, S. 19,20

²⁷ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, Torroja, 2015, S. 19,20

²⁸ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, Torroja, 2015, S. 19,20

²⁹ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, Torroja, 2015, S. 19,20

Der entscheidende Vorteil aber ist es, dass der Zement mit diesem alternativen Bindemittel zu hundert Prozent substituiert werden kann, wodurch es infolgedessen auch zu einem kompletten Ersatz des Klinkers kommt, der ja bekanntlich äußerst schlecht in Bezug auf Kohlendioxid-Emissionen ist.³⁰

1) Zement-Bestandteile und Hydratationsablauf

Die Hauptbestandteile eines klassischen Portlandzementes sind in Tab. 1.1 aufgelistet:

Bezeichnung	Chemische Formel	Abkürzung	Prozentualer Anteil
Tricalciumsilicat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	55-65 %
Dicalciumsilicat	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15-25 %
Tricalciumaluminat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8-14 %
Calciumaluminatferrat	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8-12 %

Tab. 1.1: Hauptklinkeranteile im Portlandzement³¹

C_3S und C_2S sind die Hauptbestandteile des Zementkorns und hauptverantwortlich für die Endfestigkeit des Zementes. C_2S wird oft als Alit und C_3S als Belit bezeichnet. C_3A wird oft als Aluminat bezeichnet und ist sehr oft durch verschiedene Alkalien verunreinigt.³²

Der Ablauf der C_3S -Hydratation wird in Abb. 1.6 gezeigt.³³

³⁰ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, Torroja, 2015, S. 19,20

³¹ Erik B. Nelson, Michel Michaux – Schlumberger, Chemistry and Characterization of Portland Zement

³² Vgl.: Nelson, Michaux-Schlumberger

³³ Vgl.: E.M. Gartner, J.F. Young, D.A. Damidot, I. Jawed, Hydration of Portland cement, 2001, S. 59

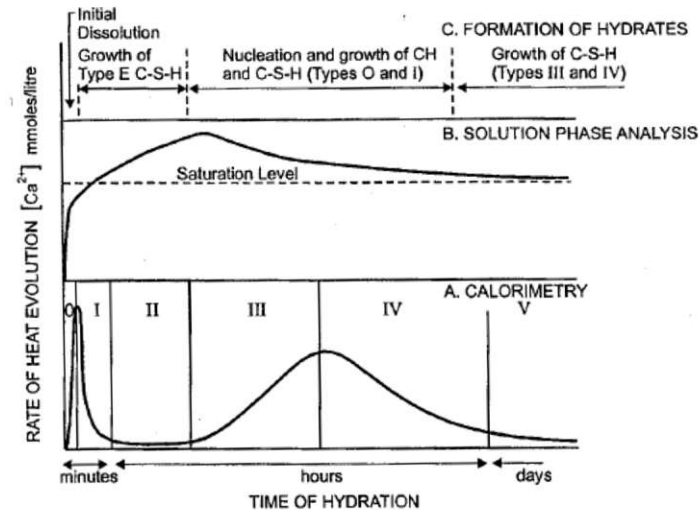


Abb. 1.6: Ablauf der Hydratation von C_3S^{34}

Auf der vertikalen Achse sieht man die Wärmeentwicklung und Kalzium-Konzentration und auf der horizontalen Achse die fortlaufende Zeit.

C_3S löst sich bei Kontakt mit Wasser auf und C-S-H fällt auf die Oberfläche des Zementkornes. Wenn man auf den Verlauf des Kalziums schaut, erreicht es danach einen Hochpunkt. Danach kommt es zur Ausfällung von C-H ($Ca(OH)_2$). Bei weiterer Hydratation werden weitere C-S-H-Phasen gebildet und sie dienen als Klebstoff zwischen den unterschiedlichen Zementkörnern bis zur vollständigen Sättigung bei zirka 28 Tagen.³⁵

In Abb. 1.7 ist ein schematischer Ablauf des chemischen Prozesses rund um ein Zementkorn nach dem ersten Kontakt mit Wasser abgebildet. Zu sehen ist der Verlauf in den ersten Minuten und Stunden sowie die theoretische Endtransformation nach mehreren Jahren.

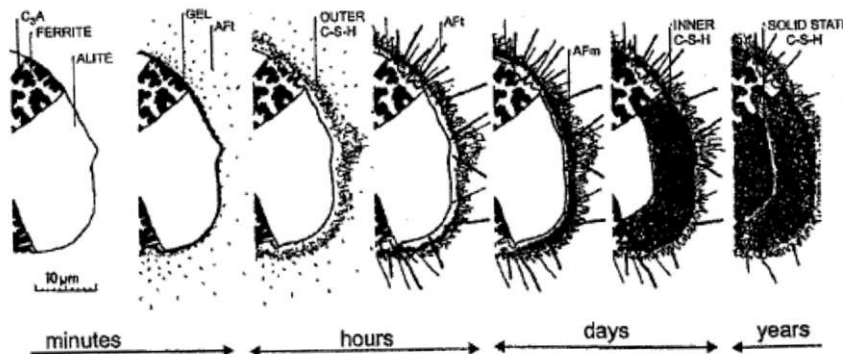


Abb. 1.7: Überblick über die fortlaufende Hydratation eines Zementkornes nach dem ersten Wasserkontakt³⁶

³⁴ Vgl.: Gartner, Young, Damidot, Jawed, S. 59

³⁵ Vgl.: Gartner, Young, Damidot, Jawed

³⁶ Gartner, Young, Damidot, Jawed, S. 101

2) AAB-Bestandteile und Hydratationsablauf:

Alkalisch aktivierte Bindemittel (AAB) sind Materialien, die mit Hilfe von alkalischen Lösungen oder Pulver „aktiviert“ werden müssen um den pH-Wert, der für den chemischen Prozess-Beginn und die Erhärtung unbedingt erforderlich ist (d.h. zirka 12,5)^{37 38}. Flüssige alkalische Lösungen sind im Vergleich zu festen Lösungen schädlicher und umweltschädlicher (z.B. NaOH).³⁹ Je nach Material gibt es die Möglichkeit der mäßig alkalischen Aktivierung und der sehr aggressiven alkalischen Bedingung, die für den Beginn der chemischen Reaktion erforderlich sind.⁴⁰

Die Vorgangsweise bei der Herstellung von alkalisch aktivierten Bindemitteln ist in der nächsten Abbildung (Abb. 1.8) dargestellt:



Abb. 1.8: Herstellung von alkalisch aktivierten Bindemitteln⁴¹

Der wichtigste Ausgangspunkt für diese Technologie ist, dass sowohl natürlich vorkommende Rohstoffe wie zum Beispiel Ton oder Feldspat möglich sind, aber gleichzeitig auch Beiprodukte wie zum Beispiel Schlacke oder Papierschlämme als Grundmaterial verwendet werden können.⁴²

Diese Art von Bindemittel hängt sehr stark von der Verfügbarkeit und der chemischen Reaktivität ab. Da die alkalischen Bindemittel vorwiegend nur als Beiprodukt anfallen, wird hierfür keine thermische Energie benötigt. Infolgedessen kommt es auch zu keinem CO₂-Ausstoß, der vorwiegend daraus stammt. Dieser Umstand macht sie so interessant, um zukünftig den CO₂-Ausstoß zu reduzieren.⁴³

³⁷ Vgl.: Teresa Liberto, Maurizio Bellotto, Agathe Robisson, Small oscillatory rheology and cementitious particle interactions, CCR 2022

³⁸ Vgl.: Nelson, Michaux-Schlumberger

³⁹ Vgl.: Nelson, Michaux-Schlumberger

⁴⁰ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, 2015, S. 19,20

⁴¹ T. Liberto

⁴² Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, 2015, S. 20

⁴³ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, 2015, S. 20

Zufolge ihrer zementartigen Bestandteile ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) kann man die alkalischen Zemente in zwei Untergruppen aufteilen:

- 1) Kalziumreiche Bindemittel (z.B. Hochofenschlacke)
- 2) Kalziumarme Bindemittel (z.B. Ton)

Wie die Abbindung und die Aktivierung funktioniert, ist bei beiden Varianten unterschiedlich.⁴⁴

Bei der ersten Gruppe kommen kalzium- und siliziumreiche Materialien zur Anwendung. Hier kann man zum Beispiel Hochofenschlacke nennen (in Punkt 1.2 wird der Einsatz von Hochofenschlacke noch genauer beschrieben). Der Anteil von SiO_2 und CaO muss größer als 70% sein. Die Aktivierung erfolgt unter vergleichbar niedrigen alkalischen Bedingungen. Das Endprodukt nach dem chemischen Prozess ist ein C-A-S-H-Gel (Kalziumsilikathydrat). Diese Form ist dem Hauptreaktionsprodukt beim klassischen Zement (OPC) sehr ähnlich.⁴⁵

In der zweiten Untergruppe sind die hauptsächlich aktivierten Materialien Aluminium und Silizium. Hier liegt aber ein deutlich niedriger Kalziumoxyd-Anteil vor. Als Beispiel kann man hier Metakaolin oder Flugasche aufzählen. Infolgedessen sind für die Aktivierung aggressivere chemische Einwirkungen erforderlich. Die Bedingungen dafür sind unter anderem der Einsatz von hochalkalischen Stoffen und eine erforderliche Abbinde­temperatur von 60-200°C. Das Hauptprodukt hier ist ein anorganisches alkalisches Polymer, das sogenannte N-A-S-H (alkalisches Aluminiumsilikathydrat). Eine andere Bezeichnung für dieses Material ist weiters auch Geo- oder anorganisches Polymer.⁴⁶

Eine weitere und damit dritte Möglichkeit ist weiters, dass man die beiden oben beschriebenen Varianten miteinander kombiniert. Die Bezeichnung dafür lautet gemischter oder hybrider alkalischer Zement. Beispiele hier sind Mischungen mit CaO -, SiO_2 - und Al_2O_3 - Gehalten größer als 20%. Weiters kann man diese dritte Untergruppe wieder in zwei Abschnitte unterteilen. Die erste Variante enthält Portlandzementklinker mit einem Anteil von größer als 70% und die zweite Gruppe enthält überhaupt keinen Portlandzementklinker. Beispiele hier sind in der ersten Gruppe Zement mit Schlacke oder Zement mit beispielsweise Flugasche oder eine Kombination von beidem.⁴⁷

1.2 Einsatz von Hochofenschlacke

Das häufigste Material, welches als alkalisches Bindemittel für AAB zum Einsatz kommt, ist, wie oben erwähnt, die Hochofenschlacke und hat typischerweise folgende Bestandteile:

- ◆ CaO (35-40%)
- ◆ SiO_2 (25-35%)

⁴⁴ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, 2015, S. 20

⁴⁵ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, 2015, S. 20

⁴⁶ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, 2015, S. 20

⁴⁷ Vgl.: Garcia-Lodeiro, Palomo, Fernandez-Jimenez, 2015, S. 20

- ◆ MgO (5-10%)
- ◆ Al₂O₃ (5-15%)⁴⁸

Schlacke ist eigentlich ein Abfallprodukt zufolge der Stahlerzeugung bei der thermischen Erhitzung in Hochöfen. Die Oxide SiO₂ und Al₂O₃ verflüchtigen sich aus der Tonerde im Eisenerz in Verbindung mit der Schwefelasche, welche im Koks vorhanden ist, gefolgt von den basischen Oxiden (CaO und MgO), welche zum Beispiel vom Kalkstein kommen. Diese Oxide kommen als Flussmittel bei zirka 1600°C zum Einsatz und werden anschließend bei einer Temperatur von zirka 800°C wieder abgekühlt.⁴⁹

Überblicksmäßig kann man sagen, dass Schlacke zu zirka aus 90-95% aus glasartigen depolymerisierten Kalziumsilikaten besteht. Der Rest sind Minderheitsphasen. Der glashaltige Anteil hat einen wesentlichen Einfluss auf die chemische Reaktion bei der Abbindung. Weiters wird hier ein Wert von größer als 90% an Glas empfohlen.⁵⁰

Weiters geht man davon aus, dass der Depolymerisationsgrad entscheidend ist. Hier wird ein Wert von 1,3 bis 1,5 empfohlen. Die Formel dazu lautet:⁵¹

$$DP = \frac{n(\text{CaO}) - 2n(\text{MgO}) - n(\text{Al}_2\text{O}_3) - n(\text{SO}_3)}{n(\text{SiO}_2) - 2n(\text{MgO}) - 0.5n(\text{Al}_2\text{O}_3)}$$

Abb. 1.9: Depolymerisationsgrad⁵²

Zu den wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften zählen:

- ◆ Wie zuvor erwähnt ist der Polymerisationsgrad entscheidend, was ein gewisses Chaos im Gefüge als Voraussetzung hat. Je niedriger der Wert ist, umso besser ist die alkalisch chemische Reaktion.
- ◆ Eine basische Konzentration muss vorhanden sein. Das Verhältnis (CaO + MgO)/SiO₂, von größer eins muss gewährleistet sein. Eine basische Schlacke kann beschrieben werden als ein Material mit einem hohen hydraulischen Potenzial.
- ◆ Die glasartigen Phasen sollten größer als 85-90% sein. Diese Eigenschaft wurde ebenfalls schon zuvor erwähnt. Das physikalische Gefüge muss granuliert sein.
- ◆ Die Materialoberfläche muss 400-600 m²/kg vorweisen. Die Oberfläche von Materialien hat immer einen entscheidenden Einfluss auf die Abbindeggeschwindigkeit und den Verlauf der chemischen Reaktion. Je feiner eine Mischung jedoch ist, umso größer sind auch die vorhergehenden Kosten zufolge des maschinellen Einsatzes.⁵³

⁴⁸ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 21

⁴⁹ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 21

⁵⁰ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 21

⁵¹ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 21

⁵² I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 21

⁵³ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 21

Die chemische Reaktion kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

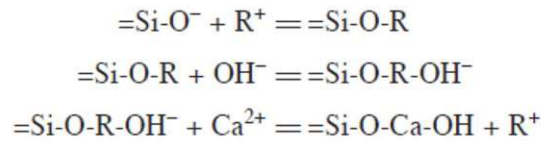


Abb. 1.10: Alkalische Reaktion von Hochofenschlacke⁵⁴

Das Kation R^+ findet hier den Einsatz als Katalysator, durch die Auswechslung mit den Ca^{2+} -Ionen. In den folgenden chemischen Schritten werden die weiteren alkalischen Kationen in die Reaktion mit aufgenommen. Die Eigenschaft des Anions hat ebenfalls eine sehr wichtige Funktion, vor allem zu Beginn der Hydratation. Zuzufolge der Schlacke-Auflösung kommt es zur sogenannten Polykondensation und damit zur Verfestigung.⁵⁵

Das wichtigste Produkt ist, wie beim klassischen Portlandzement, das C-S-H Gel mit Aluminium (das sogenannte C-A-S-H), welches schon beschrieben wurde. Die ebenfalls anfallenden Sekundärprodukte sind sehr stark vom Grundwerkstoff, dem Aktivator, dem pH-Wert, der Konzentration und den Umgebungsbedingungen abhängig.⁵⁶

Die chemische Reaktion bei der Umwandlung von Hochofenschlacke wird in Abb. 1.11 zusammengefasst:⁵⁷

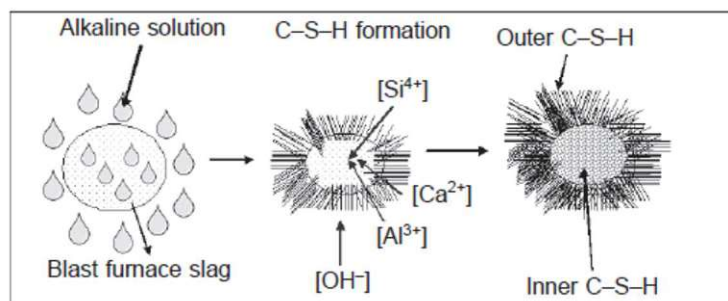


Abb. 1.11: Chemische Reaktion von Hochofenschlacke⁵⁸

1.3 Erster Einsatz von alkalisch aktivierten Bindemitteln

Wenn man glaubt, dass alkalisch aktivierte Bindemittel noch nie bautechnisch eingesetzt wurden, liegt man falsch. Schon vor zirka 70 Jahren wurde der sogenannte „Purdozement“, der von Arthur Oscar

⁵⁴ I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 21

⁵⁵ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 22

⁵⁶ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 22

⁵⁷ Vgl.: I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 22

⁵⁸ I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, S. 22

Purdon entwickelt und verbreitet wurde, als Baumaterial in ähnlicher Art und Weise wie der heutige Beton eingesetzt.⁵⁹

Ursprünglich stammte Arthur Oscar Purdon aus Großbritannien. Er lebte allerdings fast sein gesamtes Leben nach dem Studium in Leeds in Belgien. Dort entdeckte er den Einfluss von Alkalien auf Hochofenschlacke und Hüttensand. Schon im Jahr 1935 brachte er sein erstes Patent heraus, bei dem er ebenfalls den Hochofenschlackenanteil bei zirka 90% fixiert hat. Einen wesentlichen Vorteil hatte er damals schon entdeckt, nämlich war dieses neue Produkt kostengünstiger als im Vergleich zum Portlandzement, was wirtschaftlich gesehen enorm wichtig war und noch immer ist.⁶⁰

Aufgrund der Abhängigkeit von der Hochofenschlacke schaffte er es allerdings nie wirtschaftlich arbeiten zu können. Leider kam es im Jahr 1956 zu einem ersten Übernahmeangebot. Die Zementindustrie bekam vor der Konkurrenz spürbar Angst und wollte die relativ kleine Sparte übernehmen. Bereits ein Jahr danach wurde die Firma des britischen Chemikers geschlossen.⁶¹

Sehr spannend zu sehen ist hier, dass er ebenfalls Chemikalien als Beimengung zur Schlacke verwendete, um ebenfalls die Frühfestigkeit zu erhöhen. Er benutzte unter anderem Na_2CO_3 und $\text{Ca}(\text{OH})_2$.⁶²

	Slag	PC	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Na_2SO_4
Type P	91	5	–	4
Type C	91	–	5	4

Abb. 1.12: Vergleich der chemischen Bestandteile von Purdozement⁶³

Arthur Oscar Purdon stellte zwei unterschiedliche Arten her, nämlich den Typ P und den Typ C (Abb. 1.12). Dabei variierte er an Portlandzement (PC), der Schlacke und den beiden Beimengungen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und Na_2SO_4 . Die Variante des Typ C ähnelt sehr stark unserer Mischung an AAB.⁶⁴

Als Beispiel, wo diese Arten von Bindemittel eingesetzt wurden, wird hier das 22-stöckige Gebäude „Royal Building“ vorgestellt. Es wurde im Jahr 1963 eröffnet. Hier ist allerdings nicht nachweislich bekannt, wo der Purdozement eingesetzt wurde. Besonders an den Balkonen konnte Karbonatisierung

⁵⁹ Vgl.: Anja Buchwald, Maarten Vanooteghem, Elke Gruyaert, Harald Hilbig, Nele De Belie, Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s, S. 501,502

⁶⁰ Vgl.: Buchwald, Vanooteghem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 501,502

⁶¹ Vgl.: Buchwald, Vanooteghem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 501,502

⁶² Vgl.: Anja Buchwald, Maarten Vanooteghem, Elke Gruyaert, Harald Hilbig, Nele De Belie, Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s, S. 501,502

⁶³ Buchwald, Vanooteghem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 502

⁶⁴ Vgl.: Buchwald, Vanooteghem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 502,504

festgestellt werden. Hier war es allerdings leider nicht möglich, Bohrkern zu entnehmen. Leider war es auch mit Hilfe von Archiven nicht möglich, das verwendete Bindemittel zu identifizieren.⁶⁵

Diverse Studien in den letzten Jahren zeigten, dass in dieser Zeit sehr viel mit diesem Bindemittel gebaut wurde. Auch die Festigkeitsermittlung der tragenden Strukturen war heute zum Teil noch möglich. Hier zeigte sich, dass heute zum Teil Druckfestigkeiten im Bereich um 50MPa nachgewiesen werden konnten. Der eingesetzte Purdozement wies allerdings Schwächen hinsichtlich der Karbonatisierung auf.⁶⁶

Aus diversen Quellen wird weiters angenommen, dass der Einsatz von Hochofenschlacke als Bindemittel auch in der Sowjetunion schon um 1960 begonnen hat. Nicht sehr bekannt ist allerdings der Einsatz vom Purdozement, bei dem ebenfalls Schlacke zum Einsatz kommt, der schon zwischen 1952 und 1959 sehr breit eingesetzt wurde.⁶⁷



Abb. 1.13: Royal Building in Belgien⁶⁸

1.4 Aktuelle Studie über AAB

Alkalisches aktivierte Bindemittel sind mittlerweile schon seit mehreren Jahrzehnten bekannt. Vorwiegend deswegen, da die CO₂-Emissionen im Zuge der Herstellung deutlich geringer sind als beim klassischen Portlandzement. Allerdings wird AAB noch nicht genutzt, weil es noch immer zu wenige Studien über folgende Punkte gibt:

-) Festigkeitsverhalten

⁶⁵ Vgl.: Buchwald, Vanootehem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 502,504

⁶⁶ Vgl.: Buchwald, Vanootehem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 503,504,505

⁶⁷ Vgl.: Buchwald, Vanootehem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 503,504,505

⁶⁸ Buchwald, Vanootehem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 503

-) Dauerhaftigkeitsverhalten⁶⁹

AAB hat eine schlechtere Verarbeitbarkeit als OPC und Betonverflüssiger hat im Allgemeinen keinen Effekt auf AAB.⁷⁰

Der entscheidende Unterschied zwischen OPC und alkalischen Bindemitteln ist der unterschiedliche Kalziumgehalt, der für die geringere Reaktivität von AAB verantwortlich ist. Dieser Anteil liegt zum Beispiel bei Hochofenschlacke bei 35-40% und bei Zement bei zirka 60-70%. Beides wurde schon zuvor angeführt. Allgemein ist er bei allen alkalischen Bindemitteln niedriger.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Problem der geringen Verarbeitbarkeit und beschreibt die Entwicklung der mechanischen Festigkeit im Laufe der Zeit, sowie abhängig vom W/B-Wert.

Um die Verarbeitbarkeit zu erhöhen, ist es unbedingt notwendig, die Konzentration von Kalzium bei den umweltfreundlichen Bindemitteln zu erhöhen, da es für den Hydratationsprozess sehr entscheidend ist.

Dies geschieht im Zuge dieser Arbeit durch die Zugabe von Kalziumchlorid in die eingesetzte Flüssigkeit, um die Kalziumkonzentration zu erhöhen, ohne den pH-Wert zu beeinflussen. Die Konzentration wurde variiert zwischen 20 und 100 mM an CaCl_2 – jeweils in Leitungswasser und destilliertem Wasser. Die Grundlage dafür ist die Studie „Small oscillatory rheology and cementitious particle interactions, cement and concrete research 2022“.⁷¹

2 Materialien und Methoden

2.1 Grundlagen der Versuchsdurchführung

2.1.1 Verwendete Materialien

Bei den gewählten AABs wurde in zwei unterschiedliche Arten von Schlacke unterschieden, die wiederum unterschiedliche Kalziumanteile hatten. Die erste ist eine gemahlene und granuliert Hochofenschlacke (GGBS) und wird folgend der Produktbeschreibung als Ecocem (Ecocem France SAS)⁷² bezeichnet und die zweite Schlacke kommt von der Voestalpine und wurde von Smart Minerals⁷³ zur Verfügung gestellt. Zweitere wurde mit „SM“ abgekürzt.

Als erstes alkalisch aktiviertes Bindemittel wurde Hochofenschlacke (Ecocem, $D_{50}=11$ Mikrometer, Dichte= $2,9 \text{ g/cm}^3$) mit den beiden festen Aktivatoren Natrium-Karbonat (Na_2CO_3) und Kalziumhydroxyd

⁶⁹ Vgl.: Buchwald, Vanooteghem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 502

⁷⁰ Vgl.: Buchwald, Vanooteghem, Gruyaert, Hilbig, De Belie, S. 502

⁷¹ Vgl.: Liberto, Bellotto, Robisson

⁷² Ecocem France – Aix-en-provence 13100, 970 Rue Rene

⁷³ Smart Minerals GmbH, Franz-Grill-Straße 9/Objekt 214, 1030 Wien

(Ca(OH)₂) untersucht. Diese beiden Aktivatoren wurden verwendet, um die Anfangs- und Langzeitfestigkeit zu optimieren. Grundlage dafür war wiederum die durchgeführte Vorstudie.⁷⁴

Die Bestandteile der Schlacke sind in Tab. 2.1 aufgelistet:

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃
42,4%	36,5%	10,4%	8,1%	0,7%

Tab. 2.1: Chemische Bestandteile von Ecocem (verwendete Schlacke)⁷⁵

Die prozentuale Verteilung der AAB-Mischung ist in der nächsten Tabelle (Tab. 2.2) dargestellt:

Einzelement	Prozentuale Aufteilung auf die Masse
Schlacke (Ecocem)	91,5%
Sodium-Karbonat - Na ₂ CO ₃	5%
Kalzium-Hydroxyd - Ca(OH) ₂	3,5%

Tab. 2.2: Prozentuale Bestandteile unseres alkalisch aktivierten Bindemittels



Abb. 2.1: Bestandteile unseres AABs: a) Na₂CO₃ b) Slag c) Ca(OH)₂⁷⁶

⁷⁴ Vgl.: Liberto, Bellotto, Robisson, S. 3,4

⁷⁵ Ecocem France

⁷⁶ T. Liberto

In Abb. 2.1 sieht man unsere verwendeten Materialien für das AAB (durchnummeriert von a-c).

Um den AAB-Mörtel zu erhalten, wurde das Pulver mit Schlacke und den Aktivatoren mit 30% an Sand (im Verhältnis zum Volumen) vermischt. Die Korngrößenverteilung war stets zwischen 0 und 0,25mm.

In Tab. 2.3 wird die jeweilige Dichte der Komponenten aufgelistet:

Material	Dichte + Einheit
Ecocem - Hochofenschlacke	2,944 g/cm ³
AAB (ECO + Ca(OH) ₂ + Na ₂ CO ₃)	2,898 g/cm ³
Wasser	1,0 g/cm ³
Sand	2,65 g/cm ³
Betonverflüssiger (ACE 430)	1,06 g/cm ³

Tab. 2.3: Verwendete Dichten für die anteilmäßigen Bestandteile unserer Versuchsmischungen

Als Flüssigkeit bei den Mixturen kam entweder Leitungswasser oder destilliertes Wasser zum Einsatz. Der auf Polycarboxylether basierende Betonverflüssiger Master Glenium ACE, der hier immer verwendet wurde, funktioniert normalerweise nicht bei Mischungen auf Schlackenbasis. Bei klassischem Beton wird Betonverflüssiger verwendet, um die Verarbeitbarkeit zu verbessern und die erforderliche Wassermenge zu reduzieren. Folgend einer Vorstudie wurde CaCl₂ zu der Flüssigkeit hinzugegeben.⁷⁷ Es handelt sich hier um ein lösliches Salz, das die Menge an Kalzium in der Flüssigkeit erhöht, ohne den pH-Wert zu beeinflussen. Die Konzentration an Kalziumchlorid und der Betonverflüssiger (PCE) wurde laufend in den Mischungen verändert, um die Reichweite der möglichen W/B-Verhältnisse zu finden.⁷⁸

Weiters wurde eine zweite Schlacke („SM“-Schlacke) mit anderen chemischen Bestandteilen mit geringerem Kalziumanteil untersucht (Tab. 2.4). Die Inhaltsstoffe wurden vom Unternehmen Smart Minerals zur Verfügung gestellt:⁷⁹

⁷⁷ Vgl.: Liberto, Bellotto, Robisson

⁷⁸ Vgl.: Liberto, Bellotto, Robisson

⁷⁹ Smart Minerals GmbH

	CaO	SiO ₂	MgO	Restl. Bestandteile
„SM“	27%	39%	14%	20%

Tab. 2.4: Chemische Bestandteile der Schlacke „SM“

Hier wurde ebenfalls wieder der Einfluss von CaCl₂ untersucht. Die Schlacke, die im Zuge der Arbeit immer als „SM“-Schlacke (Abb. 2.2) bezeichnet wurde, hat eine braune Farbe, die infolge der chemischen Bestandteile entstanden ist. Im Zuge eines Mahlvorganges wurde ein D₅₀ von 17-19 Mikrometer erreicht. Die Dichte, die mit Hilfe des Pyknometers (Abb. 2.3) ermittelt wurde, beträgt 2,85 g/cm³.



Abb. 2.2: „SM“-Schlacke nach der Mahlung



Abb. 2.3: Verwendung des Pyknometers für die Dichtebestimmung

Wie zuvor wurde die „SM“-Schlacke wieder mit den beiden Aktivatoren Natrium-Karbonat und Kalziumhydroxyd vermischt. Auch der Sandanteil in den Probekörpern lag wieder bei 30%.

2.1.2 Mischvorgang

Vor jeder größeren Serienreihe wurden immer Voruntersuchungen mit kleineren Mischungen von 0,1 bis 0,2 Liter durchgeführt (Pilot). Die Mischreihenfolge war ebenfalls immer konstant mit 30 Sekunden an Vermischen von Sand und AAB. Danach wurde die Flüssigkeit (Wasser oder destilliertes Wasser mit und ohne Verflüssiger) hinzugegeben. Im Anschluss wurde immer bis zu einer Gesamtzeit von drei Minuten die Mischung gut verteilt, um ein möglichst homogenes Endergebnis zu erreichen. Das Ziel der kleinen Versuchsreihen war immer die Bestimmung der möglichen Verarbeitungsreichweite.



Abb. 2.4: Mischer für die Voruntersuchungen

Bei der Verarbeitung von größeren Mischungen von zirka 1,5 bis 2,5 Liter wurde weiters stets der „Hobart“-Mixer (Abb. 2.5) verwendet. Hier war die Abfolge der Misch-Schritte stets:

- ◆ Eine Minute – langsames Vermischen von Sand und AAB & anschließende Flüssigkeitszugabe
- ◆ Eine Minute – schnelleres Vermischen
- ◆ Eine Minute – Pause, um alle noch trockenen Bestandteile im Behälter nach unten in die schon feuchte Mischung zu verschieben
- ◆ Eine Minute – abschließend noch einmal mit hoher Geschwindigkeit mischen



Abb. 2.5: „Hobart“-Mixer für die größeren Versuchsreihen

2.1.3 Verwendete Schalungen

Im Zuge der Versuche wurden zu Beginn stets Mischungen, wie schon zuvor erwähnt, mit kleineren Volumina praktiziert. Hier wurden stets kleine Schalungen aus Plexiglas verwendet. Im Zuge der längeren und auch ausgedehnteren Serien wurden ebenfalls größere Behälter aus Stahl verwendet, um nach 28 Tagen den Vergleich in der Festigkeit zwischen den kleinen Formen und den größeren Stücken zu sehen.

	Abmessung [cm]	Material
Kleine Schalung	2/2/8	Plexiglas
Große Schalung	4/4/16	Stahl

Tab. 2.5: Abmessungen und Material unserer verwendeten Schalungen

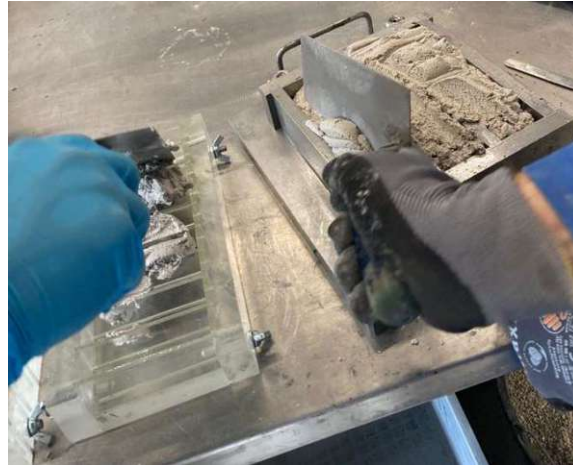


Abb. 2.6: Verfüllung der Schalungen



Abb. 2.7: Vorne: Große Schalung / Hinten: Kleine Schalungen



Abb. 2.8: Links: Kleine Körper (2/2/8cm) – Rechts: Große Stücke (4/4/16cm)

An den kleineren Probekörpern wurde im Zuge der größeren Versuchsreihen immer nach 1, 7, 14 und 28 Tagen jeweils die Zugfestigkeit und die Druckfestigkeit ermittelt. Die E-Modul-Berechnung wurde zufolge der Spannungsdehnungsverläufe rechnerisch durchgeführt. Die genaue Durchführung wird mit Abb. 2.12 noch besser erklärt.

Grundsätzlich wurden die Probekörper immer im Labor bei Raumtemperatur und in Kontakt mit Umgebungsluft gelagert. Aufgrund diverser Oberflächenveränderungen an den Bruchflächen wurde weiters eine Lagerung unter Wasser (bei zirka 15°C) und in Plastikbehältern (mit herausgesaugter Luft) untersucht. Bei der „Vakuum“-Lagerung ist es aber nicht zu einer kompletten Luftdichtheit der Behälter gekommen.

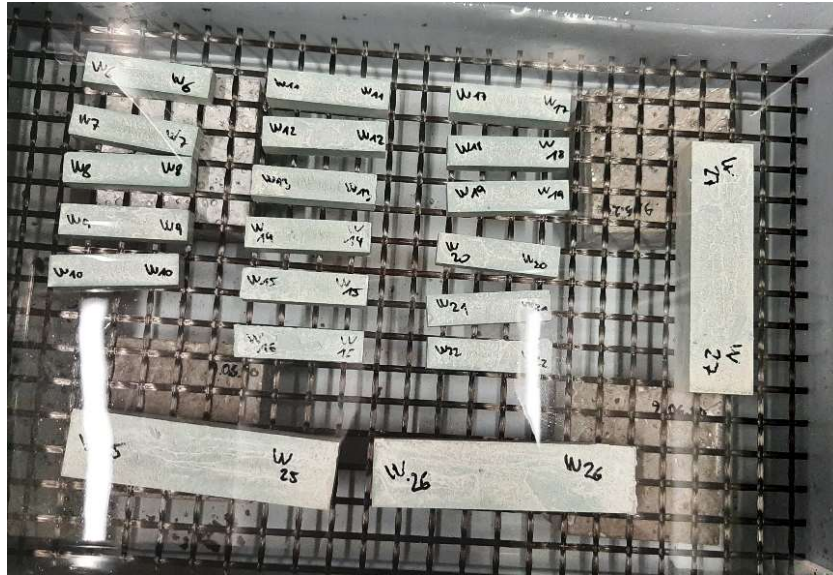


Abb. 2.9: Wasserlagerung der Probekörper bei zirka 15°C



Abb. 2.10: „Vakuum“- Lagerung mit sicherlich nicht komplett geschlossenen Behältern

2.1.4 Methoden

Für die Bestimmung der Druck- und Biegezugfestigkeiten wurde immer die „Zwick“-Maschine verwendet (Zwick Roell Z250) (Abb. 2.11).



Abb. 2.11: Aufbau der „Zwick“-Maschine im Zuge der Biegezugfestigkeitsermittlung

Auf Tabellenblättern wurden vor jedem Versuchsdurchgang die Abmessungen und die Masse notiert. Besonders wichtig war die Angabe der Tage nach der erfolgten Mischung. Begonnen wurde stets mit den Biegezugversuchen.

1) Bestimmung der Biegezugfestigkeit

Vor dem Beginn der Untersuchungen wurde, abhängig von der Größe der Proben, der Abstand zwischen Rollen manuell eingerichtet. Der Abstand, der einzustellen ist, wird von der Maschine vorgegeben.

Da im Zuge der Versuche vorwiegend keine genormten Probekörper (2/2/8cm) verwendet wurden, wurde die gesuchte Grenzspannung immer möglichst zwischen 30 und 60 Sekunden ermittelt. Grundlage dafür ist die ÖNORM EN 196-1 2016 10 15. Die Voreinstellungen hier sind die Anfangsdruckkraft und wie schnell die Kraft pro Sekunde erhöht wird. Die Grenzspannung (MPa) tritt ein, wenn die maximal mögliche Druckkraft erreicht wird und die Probe zirka in der Mitte bricht. Ein beispielsweise zu lange andauernder Zeitabschnitt zwischen dem Beginn der Durchführung und dem Erreichen des Bruches führt zu einer verfälschten Größe der Bruchfestigkeit.

Ein zu schnelles Eintreten der Grenzfestigkeit führt zu einem zu kleinen Ergebnis und damit ebenfalls zu einer verfälschten Festigkeit. Dieser Umstand machte die Durchführung des Tests sehr sensibel, was zur Folge hatte, dass zum Teil sehr hohe Standardabweichungen entstanden sind. Besonders zu Beginn, wo die Werte noch nicht abzuschätzen waren, war das der Fall.

2) Bestimmung der Druckfestigkeit

Von den zwei resultierenden Körpern, die aus den Biegezugversuchen entstanden, wurden vor dem Druckversuch wieder die Abmessungen ermittelt und in das Programm eingegeben. Vor der Durchführung musste man die Maschine umbauen. Die Rollen unten und das Druckobjekt von der Druckfestigkeitsprüfung zuvor musste entfernt werden. Unten kam eine 2/2cm große Ablagefläche. Oben wurde ein Gestänge, ebenfalls mit einer Fläche von 2/2cm montiert. Bei der Auswertung von größeren Probekörpern waren die vorhandenen Abmessungen 4/4cm.

Die einzugebenden Maschineneigenschaften waren wieder die Anfangsdruckkraft und die Geschwindigkeit, wie stark die Spannung an der Kontaktfläche erhöht wurde. Wie man in Abb. 2.12 sehen kann, ist auf der vertikalen Achse die aufgebrachte Druckkraft (N) und auf der horizontalen Achse die Verformung (%) zu sehen. Die Grenzdruckkraft ist die höchste Kraft in der Spannungs-Dehnungslinie, die den Bruch der Probekörper auslöst. Diese wiederum dividiert durch die Probekörperfläche ergibt unsere gesuchte Druckfestigkeit mit der Einheit Megapascal (N/mm²).

Die ausgewerteten Ergebnisse wurden einzeln in Excel-Tabellenblätter in Spannungs-Dehnungsverläufen dargestellt, wodurch auch die provisorische E-Modul Berechnung sehr einfach war. Zusätzlich dazu wurden noch manuell die Ergebnisse auf den Tabellenblättern schriftlich notiert.

3) Bestimmung des E-Modules

Mit der Formel für die Spannung $\sigma = E \cdot \epsilon$ wurde aus den resultierenden Druckkraft – Dehnungsverläufen der E-Modul bestimmt. Zunächst wurde augenscheinlich der lineare Bereich im Verlauf bestimmt. Anschließend wurden die vorhandene Kraft und die Verformung in den Punkten A und B ermittelt. Abhängig von den Probekörperabmessungen wurde die Spannung, resultierend aus der Kraft, ermittelt.

Abschließend wurden die Differenzen der beiden Punkte (Spannung und Verformung) bestimmt und mit der Formel für den E-Modul: σ/ϵ ergab sich das Ergebnis. Für die Ermittlung der rechnerischen Werte wurden immer sechs Verläufe ausgewertet und der Mittelwert und die Standardabweichung ermittelt. Die Einheit wurde in GPa angegeben.

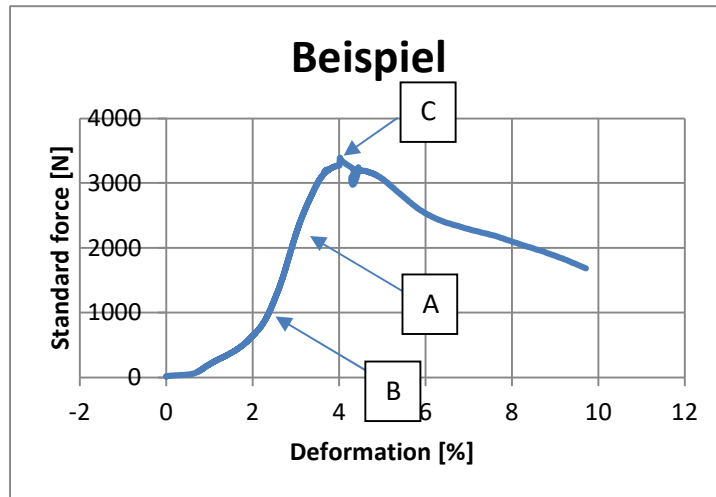


Abb. 2.12: Spannungs-Dehnungslinie eines Druckversuchs

Der Punkt A bedeutet hier der obere Bereich des linearen Bereichs in der Spannungs- und Dehnungslinie und der Punkt B der untere Bereich. Hier wurden, wie zuerst beschrieben, die Druckkraft und die Verformung gemessen. Der Punkt C stellt den Bereich der Grenzdruckkraft dar, wo es zum Bruch des Probekörpers kommt. Daraus wurde die Druckfestigkeit bestimmt. Für die Ermittlung des E-Moduls wurden sechs unterschiedliche Spannungsdehnungslinien ausgewertet.

2.1.5 Übersicht über alle Mischungen (Destilliertes- & Leitungswasser)

Für eine bessere Übersicht der Versuche werden hier mit Hilfe einer Tabelle alle durchgeführten Versuche dargestellt. Die erste und zweite Tabelle zeigt alle Versuche mit destilliertem Wasser, aber Unterschieden in Luft-Lagerung und Wasser/„Vakuum“-Lagerung (Tab. 2.6 und Tab. 2.7). Die dritte Tabelle zeigt die untersuchten Mischungen mit Leitungswasser unter Luftlagerung (Tab. 2.8).

Aufgeteilt ist die Tabelle von links nach rechts mit den Wasser- und Bindemittelwerten, weiters der Konzentration an Kalziumchlorid in den Flüssigkeiten und ob Betonverflüssiger verwendet wurde.

Die Spalte **pilot** bedeutet, dass hier die Probekörper immer nach einem Tag ausgewertet wurden. Für die Herstellung ist hier immer der kleine Mixer gekommen (Abb. 2.4). **Complete** bedeutet, dass hier die Festigkeitsentwicklung nach der Zeit untersucht wurde, was wiederum bedeutet, dass hier die Biegezug- und Druckfestigkeit nach 1, 7, 14 und 28 Tagen ermittelt wurde. Hier wurde immer der große Hobart-Mixer verwendet (Abb. 2.5). **Only 28 days** bedeutet hier, dass die Festigkeiten nur nach 28 Tagen ermittelt wurden (Herstellung auch mit dem großen Mixer). Diese Werte wiederum sind die Grundlage für die W/B-Wert abhängigen Festigkeitswerte

W/B	CaCl ₂ (mM)	PCE	pilot	complete	only 28days	E-Modul
0,5					x	
0,5	50				x	
0,5	50	0,90%			x	
0,45			x			
0,45	20		x			
0,45	20	0,50%	x			
0,4					x	
0,4	50				x	
0,4	50	0,90%			x	
0,4	20		x			
0,4	20	0,30%	x			
0,38			x	x		x
0,38	50			x		x
0,36	50	0,90%	x			
0,36	100	0,50%	x			
0,356	50	0,50%	x			
0,352	20	0,50%	x	x		x
0,345	50	0,90%	x	x		x

Tab. 2.6: Übersicht über alle Mischungen mit destilliertem Wasser und Luftlagerung

W/B	CaCl ₂ (mM)	PCE	pilot	complete	only 28days
0,345	50	0,90%	x	x	water
0,345	50	0,90%	x	x	vacuum

Tab. 2.7: Übersicht über alle Mischungen mit destilliertem Wasser und Wasser/Vakuumlagerung

W/B	CaCl ₂ (mM)	PCE	pilot	complete	only 28days
0,5			x	x	
0,5	50				x
0,5	50	0,90%			x
0,45			x		
0,4			x	x	
0,4	50				x
0,4	50	0,90%			x
0,35			x	x	
0,35	50			x	
0,35	50	0,90%		x	
0,339	50	0,90%	x		
0,337	50	0,90%	x		
0,335	100	0,90%		x	

Tab. 2.8: Übersicht über alle Mischungen mit Leitungswasser und Luftlagerung

3 Resultate

In diesem Kapitel wird nur auf die resultierenden Druckfestigkeiten eingegangen, da hier der Schwerpunkt liegt. Dafür wurden im Zuge der Auswertung immer zirka zwölf bis sechzehn kleine Probekörper (Abb. 2.8) untersucht. Die ebenfalls ermittelten Biegezugfestigkeiten sind im Anhang (7.1,7.2) aufgelistet. Dafür wurden wiederum sechs bis acht kleine Körper (Abb. 2.8) verwendet. Am Schluss werden die E-Module von den Probekörpern mit Leitungs- und destilliertem Wasser vorgestellt (3.5.1,3.5.2). Unterschieden wird nach destilliertem Wasser und gewöhnlichem Leitungswasser.

3.1 Verlauf der Druckfestigkeiten mit destilliertem Wasser nach 1, 7, 14 und 28 Tagen

Zu Beginn wurden Pilotversuche durchgeführt, um die Mischbarkeit der Materialien zu überprüfen. In Tab. 2.6 und Tab. 2.7 sind alle durchgeführten Testungen aufgelistet.

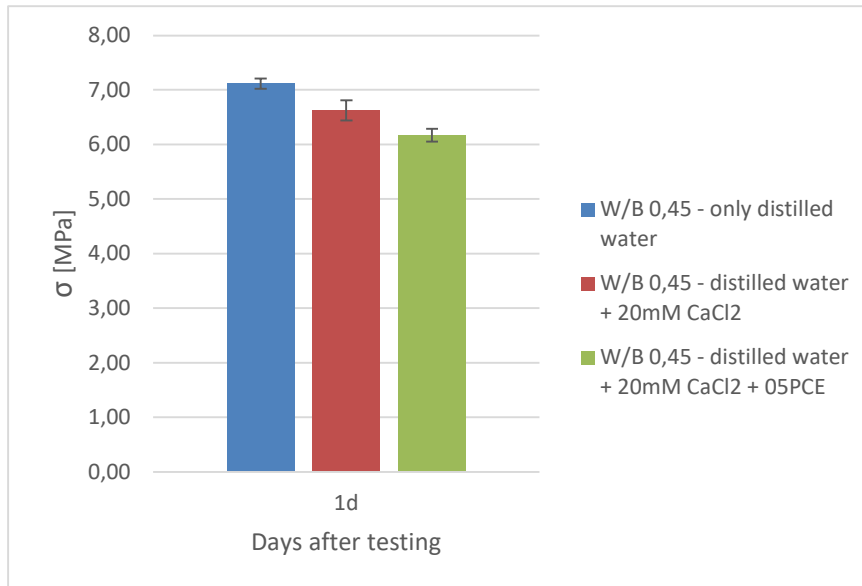


Abb. 3.1: Druckversuch nach einem Tag mit destilliertem Wasser - Pilot

In der Abb. 3.1 sind die drei unterschiedlichen Mischungen zu sehen, die einen Tag nach erfolgter Mischung getestet worden sind:

- ◆ W/B von 0,45 mit reinem destilliertem Wasser
- ◆ W/B von 0,45 mit destilliertem Wasser und 20mM an CaCl₂
- ◆ W/B von 0,45 mit destilliertem Wasser, 20mM an CaCl₂ und 0,5% an PCE (im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels)

Zur Mischung wurde hier wieder der kleinere Mischer verwendet. Pro Testdurchgang wurden hier vier Proben untersucht.

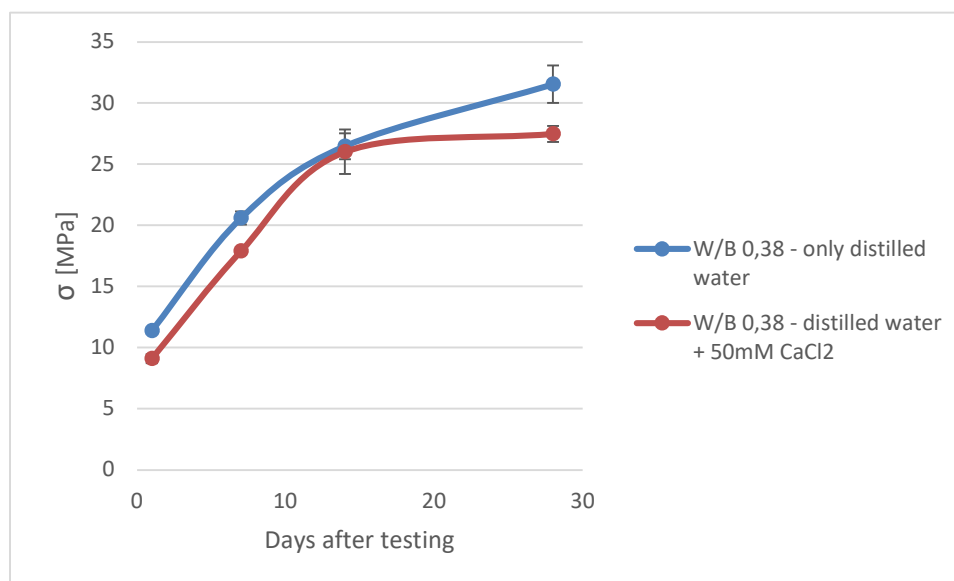


Abb. 3.2: Druckspannungsverlauf mit destilliertem Wasser (mit und ohne CaCl₂) – Complete series

In Abb. 3.2 sind auf der Abszisse die Tage nach der Mischung zu sehen und auf der Ordinate die Druckfestigkeit mit der Einheit MPa (N/mm^2). In dieser Grafik ist der Spannungsverlauf, abhängig von den Wasser- und Bindemittelwerten und abhängig von der Zugabe von Kalziumchlorid zu sehen.

In Abb. 3.3 wird der Druckfestigkeitsverlauf von den minimal erreichbaren W/B-Werten gezeigt. Der niedrigste W/B-Wert war 0,345 mit 50mM an CaCl_2 im destillierten Wasser und 0,9% an PCE (im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels).

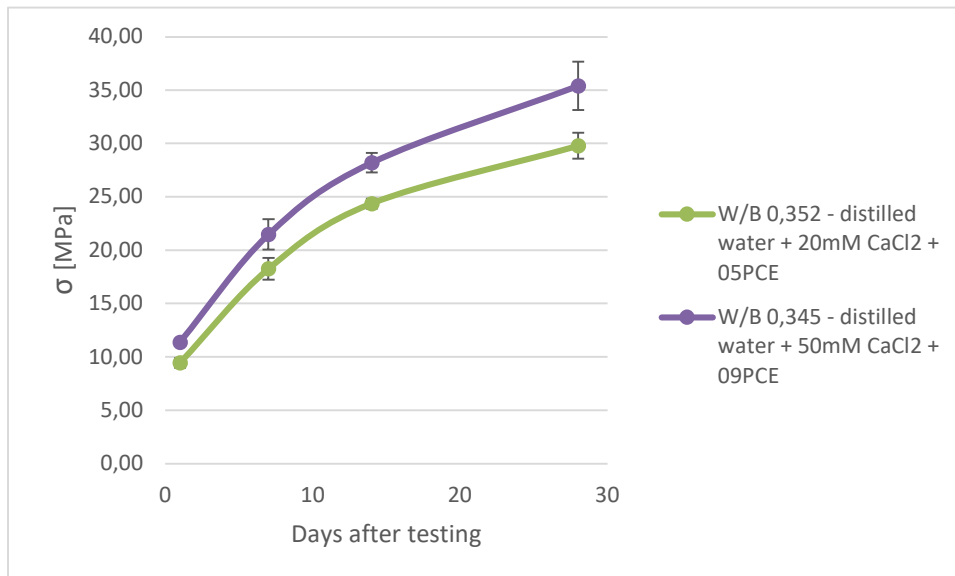


Abb. 3.3: Druckfestigkeitsverlauf mit den minimalen W/B-Werten und destilliertem Wasser – Complete series

Abschließend werden in diesem Unterkapitel noch einige Fotos von der Herstellung der Mischung mit dem niedrigsten Wasser- und Bindemittelwert anschaulich dargestellt (Abb. 3.5, Abb. 3.6, Abb. 3.7). Am Schluss wird noch der Oberflächenunterschied mit fortlaufender Dauer gezeigt (Abb. 3.8 bis Abb. 3.11).



Abb. 3.4: Mischung mit W/B von 0,345 mit 50mM CaCl_2 und 0,9% PCE

Nach der Verfüllung in die einzelnen Schalungen werden die Probekörper noch leicht mit dem Rüttler verdichtet. Dies war bei allen Versuchsdurchführungen sehr leicht möglich. Abschließend wurde jede Schalung noch mit einer Plastikfolie zugedeckt.



Abb. 3.5: Mischung mit W/B von 0,345 mit 50mM CaCl₂ und 0,9% PCE (nach einem Tag)

Dieses Foto wurde einen Tag nach der Mischung aufgenommen. Hier ist bereits die Verfärbung an der Oberfläche zu sehen. An den geschützten Seitenflächen kam es nicht dazu.



Abb. 3.6: Beschriftung der Probekörper

Wie schon zuvor erwähnt, wurde jeder einzelne Probekörper vor der Ausschalung durchnummeriert und beschriftet. Wichtig sind hier das Datum des Betonierens und die spezifischen Eigenschaften der Elemente.



Abb. 3.7: Aufteilung der Probekörper

Im letzten Schritt werden die Versuchsobjekte noch aufgeteilt auf die vier Prüfungszeitpunkte. Hier wird eine möglichst aufgeteilte Struktur vollzogen.

Als letzter Schritt wird auf die Veränderung der Oberflächeneigenschaft eingegangen. Separiert sind die Fotos (Abb. 3.8 bis Abb. 3.11) nach den vier Zeitpunkten der Festigkeitsermittlungen. Beginnend mit einem Tag bis zu 28 Tagen. Deutlich zu sehen ist die laufende Reduzierung der grünen Fläche vom Kern. Die Flächen an den Außenkanten der Probe, die direkt mit der Luft Kontakt haben, werden mit fortschreitender Zeit immer weißer. Da die Proben stets liegend gelagert wurden, ist der untere Bereich, also die Lagerfläche, nach 28 Tagen (Abb. 3.11) deutlich weniger weiß.



Abb. 3.8: Biegezugfestigkeitsversuch nach einem Tag



Abb. 3.9: Biegezugfestigkeitsversuch nach sieben Tagen



Abb. 3.10: Biegezugfestigkeitsversuch nach vierzehn Tagen

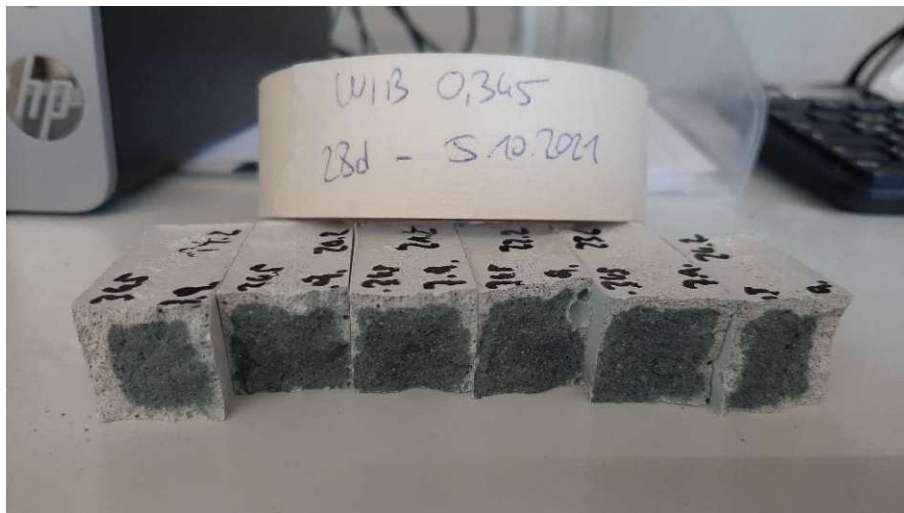


Abb. 3.11: Biegezugfestigkeitsversuch nach 28 Tagen

In den letzten beiden Schritten wird noch der Verlauf der gleichen Mischung mit einem W/B-Verhältnis von 0,345 inklusive der vorigen Additive dargestellt. Der große Unterschied zu den vorhergehenden Objekten ist hier die Lagerung, da diese einen maßgebenden Einfluss auf die oberflächliche Veränderung der Probekörper hat. Es wird unterschieden zwischen einer Wasserlagerung (bei zirka

15°C) und einer „Vakuum“-Lagerung. Letztere wurde mittels Plastikbehälter erzeugt, wobei vor dem Schluss noch die Luft herausgesaugt wurde.



Abb. 3.12: Wasser-Lagerung (nach 7 Tagen)



Abb. 3.13: „Vakuum“-Lagerung (nach 7 Tagen)



Abb. 3.14: Wasser/„Vakuum“-Lagerung (nach 14 Tagen)

Zu Abb. 3.14 ist anzumerken, dass die beiden linken Probekörper unter „Vakuum“ gelagert wurden und die restlichen zwei rechts unter Wasser verstaut waren. Augenmerklich ist oberflächlich kein Unterschied feststellbar. Der einzig feine Unterschied ist die etwas dunklere Farbe rechts, die vermutlich von der Wassersättigung stammt.



Abb. 3.15: Wasser-Lagerung (nach 28 Tagen)



Abb. 3.16: „Vakuum“-Lagerung (nach 28 Tagen)

In Abb. 3.17 ist der Druckfestigkeitsverlauf der Versuchsreihen mit unterschiedlicher Lagerung abgebildet.

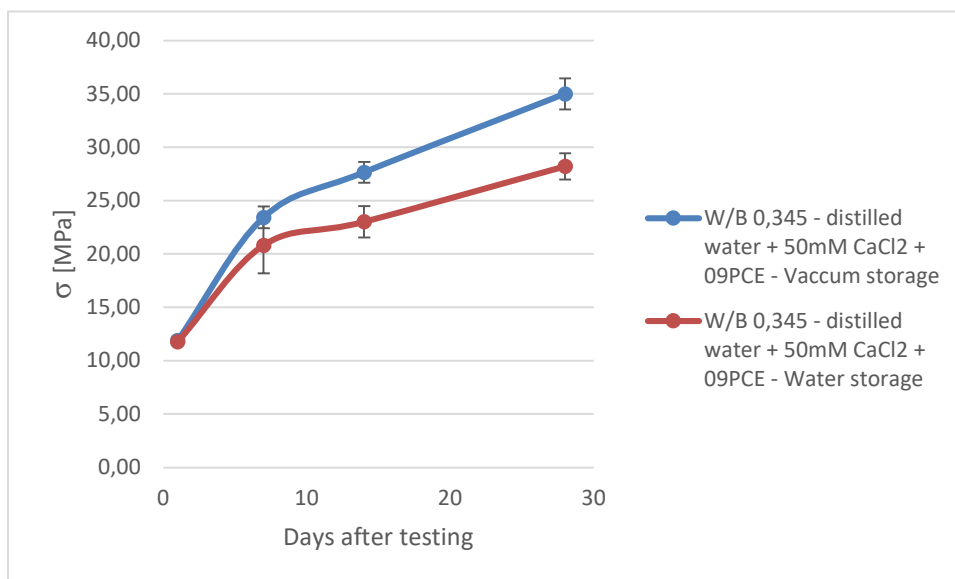


Abb. 3.17: Druckfestigkeitsverlauf mit W/B-Wert 0,345 und Wasser-/Vakuumlagerung – Complete series

Im Kapitel 7.2 wird weiters noch der sehr stark unterschiedliche Biegezugfestigkeitsverlauf dargestellt (Luft-, Vakuum- und Wasserlagerung).

Generell sind schlackenbasierte Materialien, wie zum Beispiel Mörtel, Beton oder Ca-Geopolymere, dafür bekannt, dass sie bei der Abbindung eine blaue oder grüne Farbe haben. Sehr wichtig ist diese Eigenschaft, wenn zum Beispiel bei Beton eine optische Anforderung hinzukommt. Hier kann man sich eine Sichtbetonwand vorstellen, bei der meistens keine Farbänderung gewünscht ist.⁸⁰

Wenn die Mischung direkten Umgebungsluftkontakt hat, wechselt die Farbe zu Weiß. Wenn er allerdings längere Zeit geschützt ist, zum Beispiel unter Wasser/Vakuum (Abb. 3.12 bis Abb. 3.16) oder als Fertigteil, dann kann die anfängliche blau/türkise Farbe beibehalten werden.⁸¹

Sehr oft wird das Vorkommen von Schwefel in der Schlacke als Grund für die farbliche Veränderung angesehen. Beispielsweise wurde die Entstehung von $\text{FeSo}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ und/oder $\text{FeS} \cdot \text{O}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ als Grund angeführt. Weiters ist allerdings noch nicht klar, warum die Entstehung dieser Komplexe speziell bei schlackenbasierten Bindemitteln passiert.⁸²

Bei Kontakt mit Luft können diese Komplexe oxidieren und sie verlieren ihre blaue Farbe und wechseln zu einer weißen Farbe, wie man in den Abb. 3.8 bis Abb. 3.11 sehen kann, da hier die Kontaktfläche der Umgebungsluft ausgesetzt war.⁸³

Eine Möglichkeit zur Entfernung des Farbproblems ist die Zugabe von Zinksalzen in das Bindemittel. Allerdings liegt auch hier kein exakter wissenschaftlicher Hintergrund vor, wodurch es auch hier noch weiterer Untersuchungen bedarf.⁸⁴

3.2 Verlauf der Druckfestigkeiten mit Leitungswasser nach 1,7,14 und 28 Tagen

Zu Beginn werden die Pilotversuche dargestellt, die jeweils nach einem Tag ausgewertet wurden. Alle durchgeführten Mischungen sind in Tab. 2.8 aufgezeichnet.

⁸⁰ Vgl.: Mohend Chaouche, Xiao Xiao Gao, Martin Cyr, Marine Cotte, Laurent Frouin, On the origin of the blue/green color of blast-furnace slag-based materials: Sulfur K-edge XANES investigation, 2016, S. 1,2

⁸¹ Vgl.: Chaouche, Gao, Cyr, Cotte, Frouin, S. 1,2

⁸² Vgl.: Chaouche, Gao, Cyr, Cotte, Frouin, S. 1,2

⁸³ Vgl.: Chaouche, Gao, Cyr, Cotte, Frouin, S. 1,2

⁸⁴Vgl.: Chaouche, Gao, Cyr, Cotte, Frouin, S. 1,2

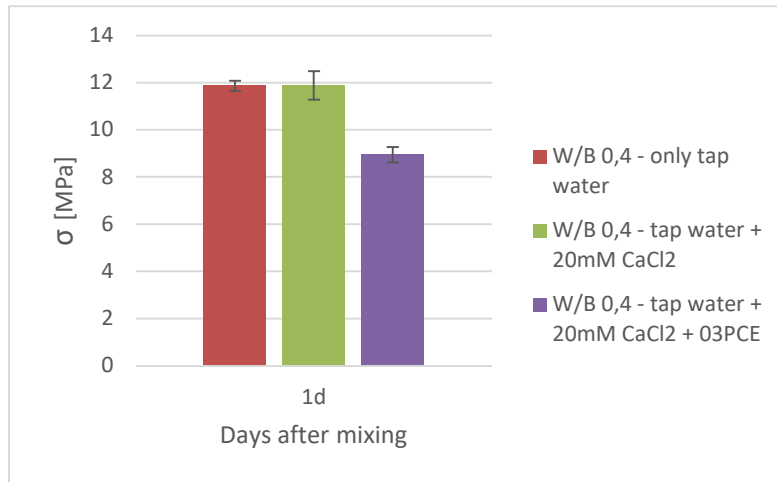


Abb. 3.18: Druckversuch nach einem Tag mit Leitungswasser - Pilot

In Abb. 3.18 ist die Druckfestigkeitsauswertung nach einem Tag zu sehen. Dabei wird unterschieden zwischen einer Mischung mit reinem Leitungswasser, dem gleichen Prinzip nur mit der Zugabe von Kalziumchlorid und im letzten Schritt kommt noch Betonverflüssiger zum Einsatz. Die eingesetzten CaCl₂ Konzentrationen sind hier bei 20mM und im lila Balken wurde weiters 0,3% an PCE (im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels) in das Wasser beigemischt.

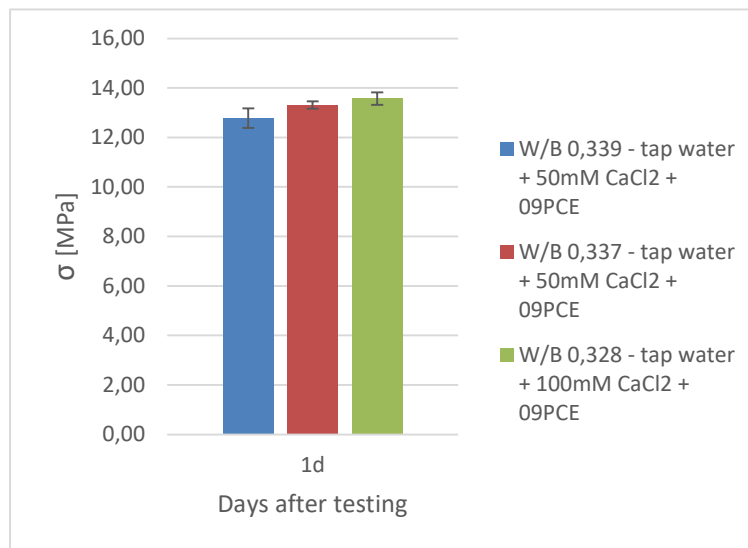


Abb. 3.19: Druckversuch nach einem Tag mit den minimalen W/B-Werten mit Leitungswasser - Pilot

Folgend dem Hauptziel der W/B-Reichweitenerkennung wurde hier in Abb. 3.19 mit unterschiedlichen Dosierungen an CaCl₂ und PCE experimentiert, um den möglichst niedrigsten W/B-Wert zu finden. Diesen niedrigsten Wert konnten wir bei 0,328 feststellen. Beigemengt wurde dabei 100mM an CaCl₂ und 0,9% (im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels) an PCE.

In Abb. 3.20 sind ebenfalls wieder die Druckfestigkeitsverläufe von unterschiedlichen Probekörpern zu sehen. Hier wurden die Festigkeit nach 1, 7, 14 und 28 Tagen gemessen. Separiert wird dabei nach unterschiedlichen W/B-Verhältnissen. Zum Einsatz kam in diesem Fall nur reines Leitungswasser.

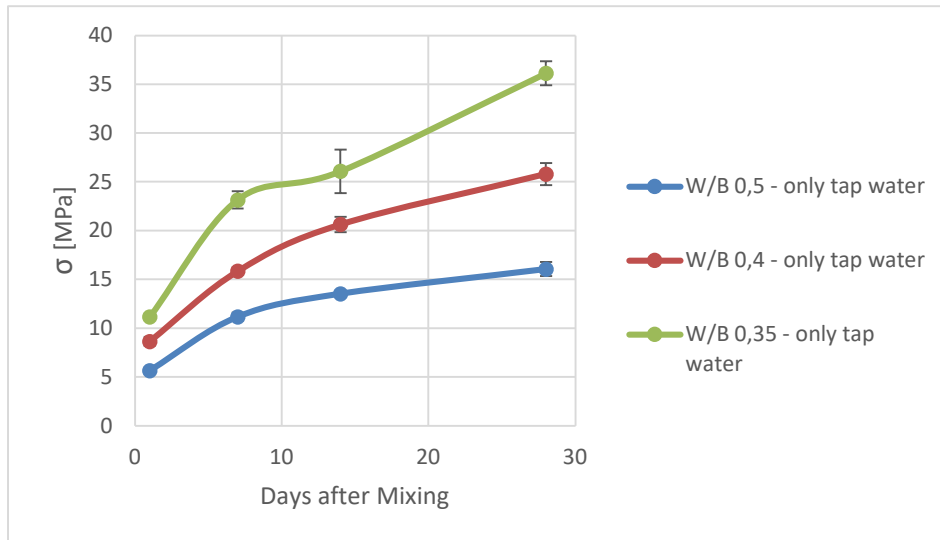


Abb. 3.20: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit unterschiedlichen W/B-Werten mit reinem Leitungswasser – Complete series

In Abb. 3.21 ist eine Mischung mit einem W/B-Verhältnis von 0,35 zu sehen. Die Mixtur besteht hier aus Leitungswasser mit 50mM an CaCl_2 . In die zweite Serie (grüne Linie) wurde weiters noch 0,9% (im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels) an PCE hinzugemischt.

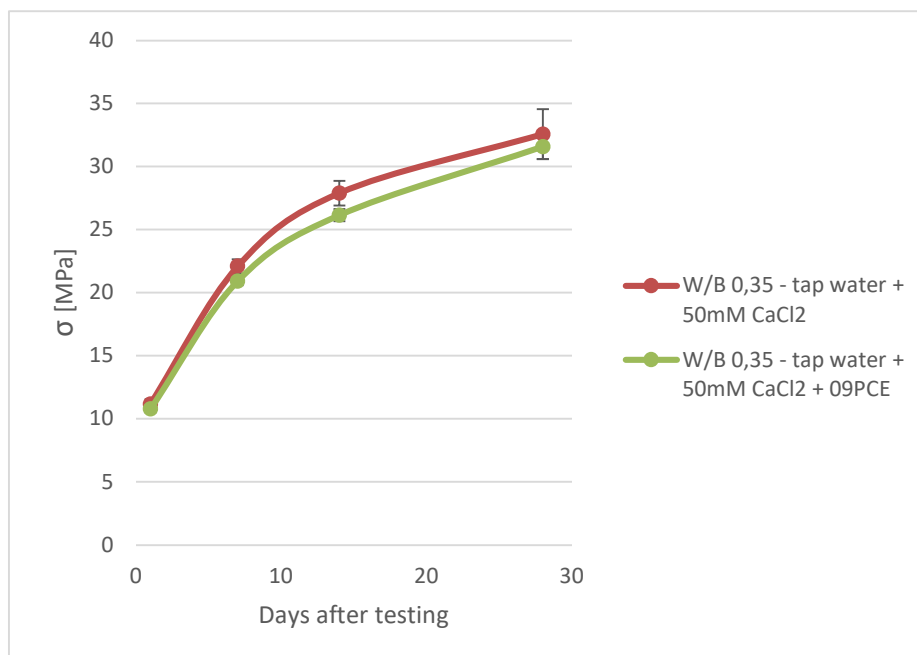


Abb. 3.21: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit W/B 0,35 und Leitungswasser (mit und ohne PCE) – Complete series

Folgend den Voruntersuchungen (Abb. 3.19) wurde noch eine Mischung mit einem W/B-Wert von 0,335 (Abb. 3.22), inklusive 100mM an CaCl_2 in der Flüssigkeit und 0,9% (im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels) an PCE produziert. Dies entspricht dem minimal erreichten W/B-Wert. Der Unterschied im minimalen W/B-Wert (0,335) hier zum vorher ermittelten minimalen W/B-Verhältnis (0,328) ergibt sich aufgrund der unterschiedlich verwendeten Mischer.

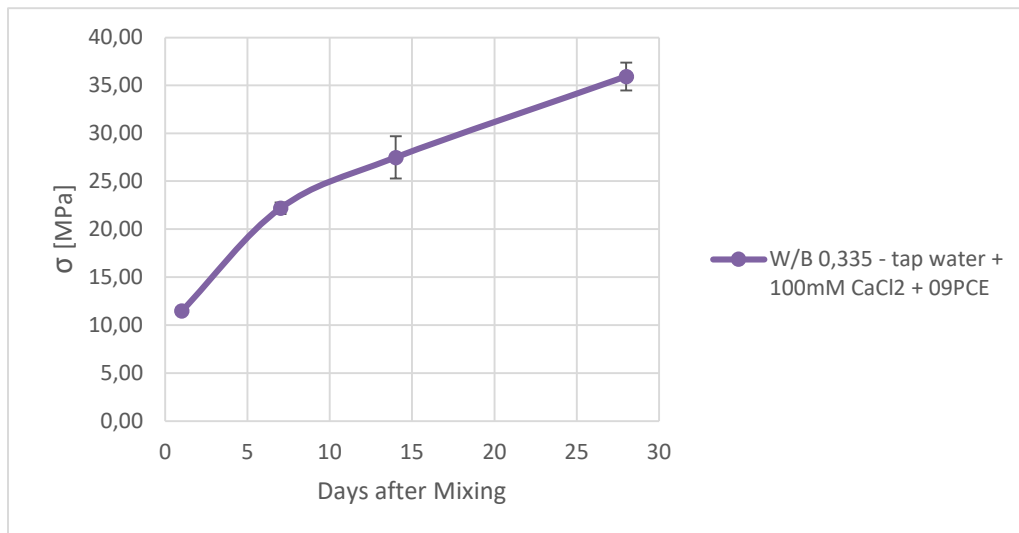


Abb. 3.22: Druckfestigkeitsverlauf des minimalen W/B-Wertes mit Leitungswasser und Additiven – Complete series

3.3 Verlauf der Druckfestigkeiten mit destilliertem Wasser– abhängig vom W/B-Wert (Testung nach 28 Tagen)

Betrachtet man die Tab. 2.6, sieht man, dass die vielversprechendste Kombination von Kalziumchlorid (50mM) und PCE (0,9% im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels) mit destilliertem Wasser ausgewählt wurde. Grundlage waren die zuvor durchgeführten Versuchsergebnisse.

In Abb. 3.23 werden die unterschiedlichen Druckspannungsverläufe nach 28 Tagen dargestellt.

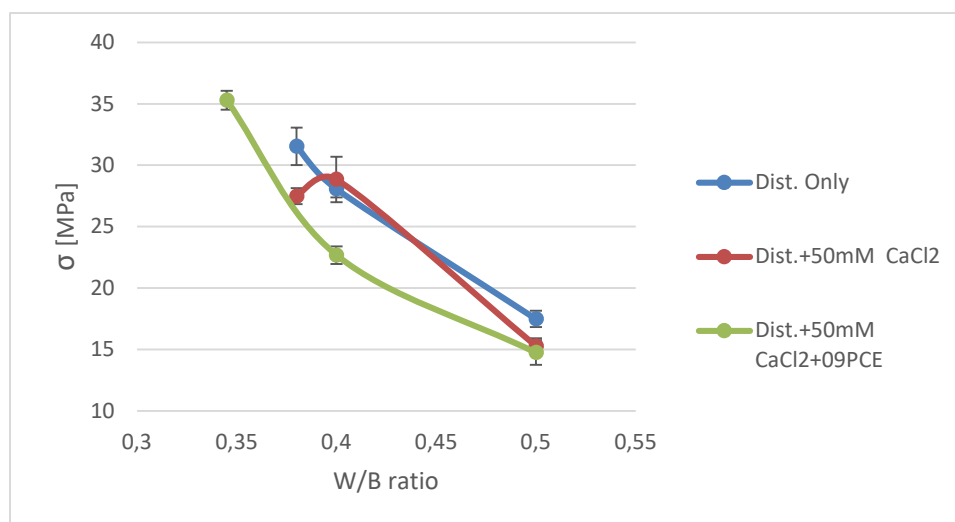


Abb. 3.23: Druckfestigkeitsverlauf abhängig vom W/B-Wert mit destilliertem Wasser – only 28 days

Es wird unterschieden in rein destilliertes Wasser, einem Gemisch mit Kalziumchlorid und einer dritten Möglichkeit mit der zusätzlichen Beimengung von Betonverflüssiger.

Die Werte wurden jeweils bei den niedrigsten W/B-Werten und bei 0,5 bestimmt. Für destilliertes Wasser und auch mit der Zugabe von CaCl_2 war das 0,38. Mit der Beimengung von PCE konnte der W/B-Wert auf 0,345 reduziert werden.

3.4 Verlauf der Druckfestigkeiten mit Leitungswasser- abhängig vom W/B-Wert (Testung nach 28 Tagen)

Betrachtet man die Tab. 2.7, sieht man, dass die vielversprechendste Kombination von Kalziumchlorid (50mM) und PCE (0,9% im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels) mit Leitungswasser ausgewählt wurde. Grundlage waren ebenfalls wieder die zuvor durchgeführten Versuchsergebnisse.

In Abb. 3.24 werden die unterschiedlichen Druckspannungsverläufe nach 28 Tagen dargestellt.

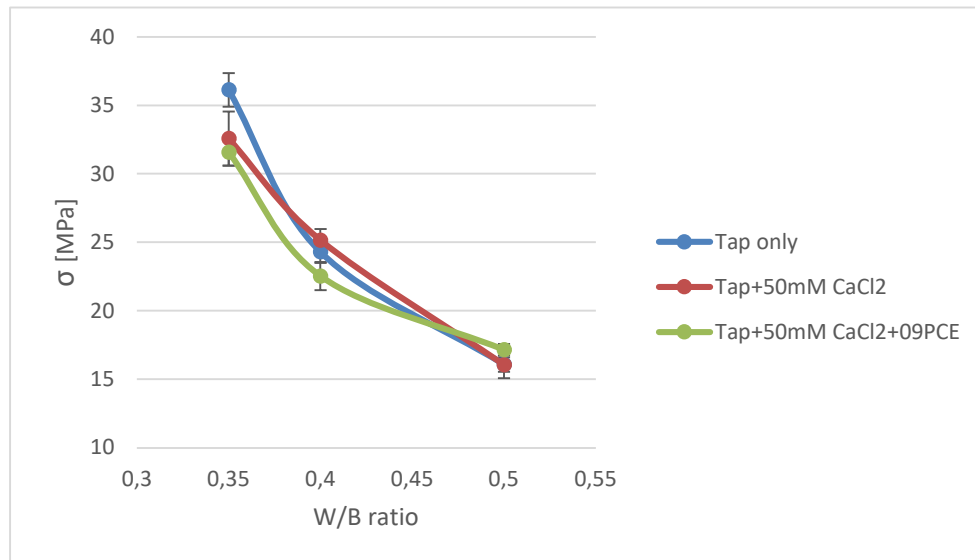


Abb. 3.24: Druckfestigkeitsverlauf abhängig vom W/B-Wert mit Leitungswasser – only 28 days

Es wird unterschieden in reines Leitungswasser, einem Gemisch mit Kalziumchlorid und einer dritten Möglichkeit mit der zusätzlichen Beimengung von Betonverflüssiger.

Die Werte wurden jeweils bei den W/B-Werten von 0,5, 0,4 und 0,35 bestimmt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

3.5 Ergebnisse der E-Modul- Bestimmung

3.5.1 Mischungen mit destilliertem Wasser

Im nächsten Punkt werden die verschiedenen E-Module mit destilliertem Wasser abgebildet. Die Werte stammen jeweils aus den Spannungsdehnungslinien und bilden die Werte nach 28 Tagen ab.

In Abb. 3.25 sind zwei Mischungen mit gleichem W/B-Verhältnis, aber unterschiedlicher Dosierung von Kalziumchlorid zu sehen. Der Einsatz von 50mM an CaCl₂ in destilliertes Wasser führte hier zu einem geringeren E-Modul.

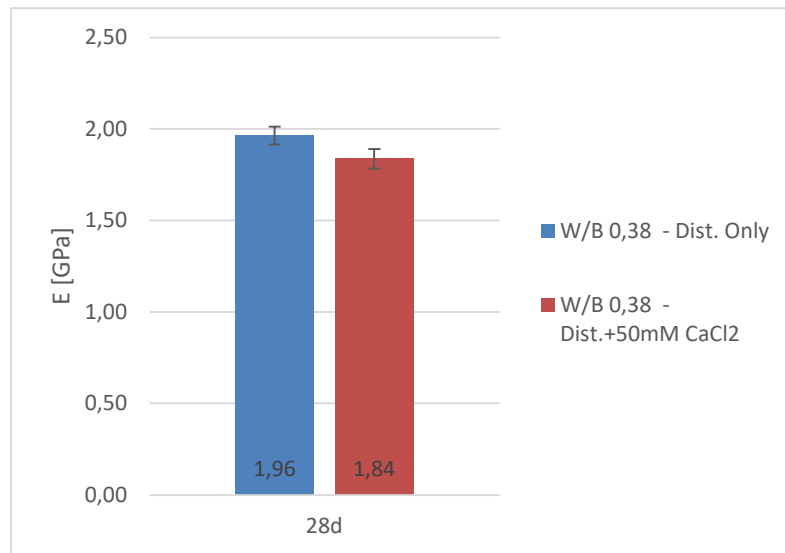


Abb. 3.25: E-Modul von destilliertem Wasser mit W/B 0,38 – mit und ohne CaCl₂ – only 28 days

In Abb. 3.26 sind die E-Module der Mischungen mit den niedrigsten W/B-Werten dargestellt. Zu sehen ist, dass sie auf ähnlichem Niveau bei zirka 2 GPa sind.

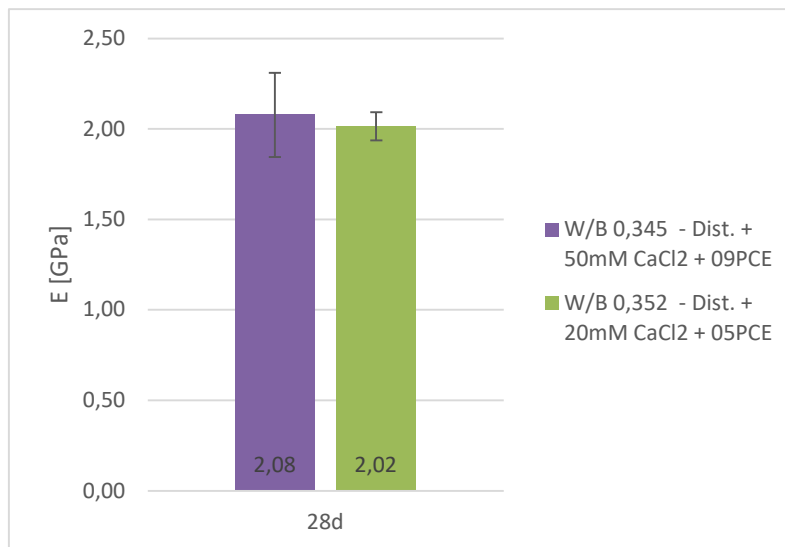


Abb. 3.26: E-Modul von destilliertem Wasser mit den niedrigsten W/B-Verhältnissen – only 28 days

3.5.2 Mischungen mit Leitungswasser

In Abb. 3.27 sieht man drei verschiedene E-Module, die hier abhängig von den W/B-Werten unterteilt sind. Die Mischungen mit den niedrigsten W/B-Werten weisen wie bei den Druckfestigkeitsverläufen auch hier die höchsten Werte auf.

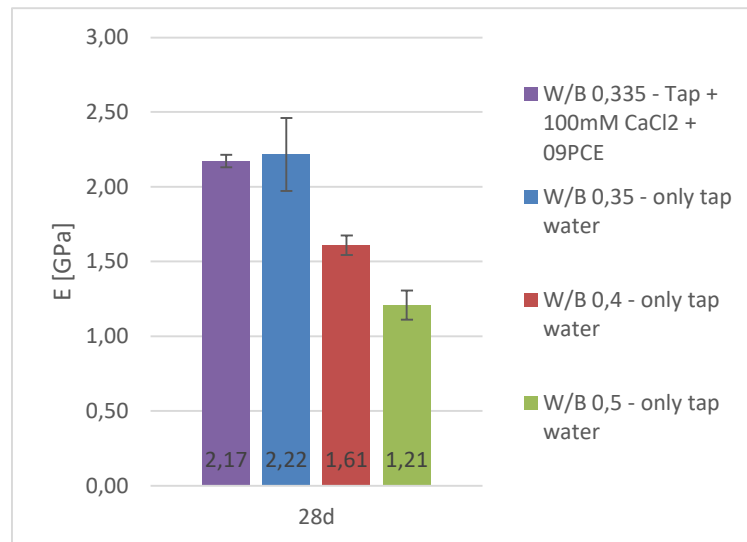


Abb. 3.27: E-Modul von Leitungswasser mit unterschiedlichen W/B-Werten und Additiven – only 28 days

4 Diskussionen

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Druckfestigkeitsverläufe, abhängig von der Zeit und vom W/B-Wert, gegenübergestellt und beschrieben und eventuelle Zusammenhänge definiert.

Es werden zunächst die eingesetzten Flüssigkeiten destilliertes Wasser und Leitungswasser verglichen. Ebenfalls verglichen wird die Einwirkung von Kalziumchlorid und Betonverflüssiger.

Abschließend wird der Vergleich zu Zement-Mörtel gezeigt und wie sich hier die Druckspannungsverläufe abhängig vom W/B-Verhältnis unterschiedlich verhalten.

4.1 Vergleiche von Mischungen mit Leitungs- und destilliertem Wasser

4.1.1 Zeitabhängige Druckfestigkeitsverläufe

Im ersten Schritt wird unterschieden in reines Leitungs- und destilliertes Wasser. Zu sehen ist der Vergleich in Abb. 4.1. Der minimal erreichte W/B-Wert bei einer Mischung von AAB, Sand und destilliertem Wasser beträgt 0,38. Wenn man Leitungswasser statt destilliertem Wasser nimmt, kommt man auf ein Verhältnis von 0,35. Verglichen werden wieder die Festigkeitswerte nach 1,7,14 und 28 Tagen.

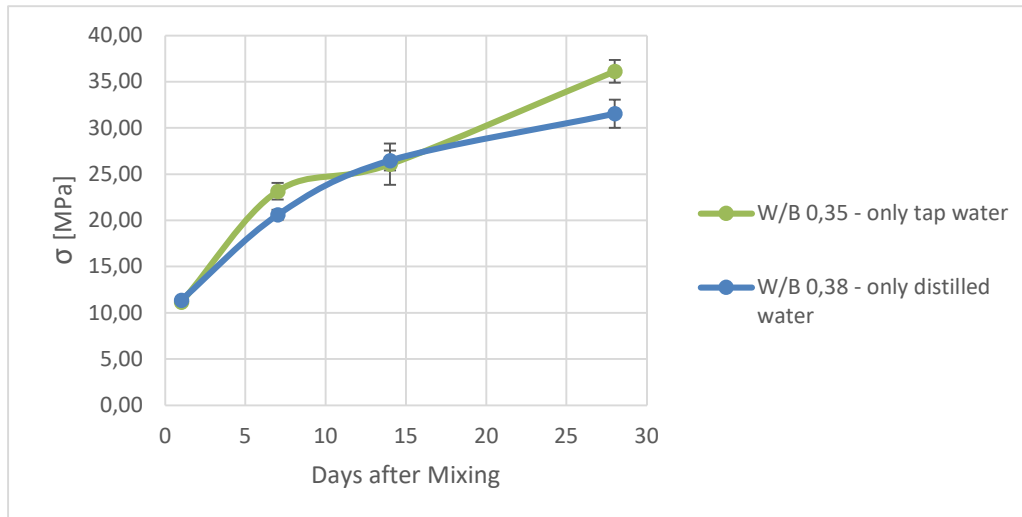


Abb. 4.1: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit reinem Leitungs- und destilliertem Wasser mit den minimalen W/B-Werten für reines destilliertes und Leitungswasser – Complete series

Von links beginnend ist in Abb. 4.1 festzustellen, dass beide Linien vom selben Startpunkt bei zirka 12 MPa beginnen. In den ersten sieben Tagen steigt die grüne Linie, also die Leitungswassermischung schneller an. Bei der Testung nach 14 Tagen ergibt sich, dass beide zirka ident hoch bei zirka 26 MPa sind. Im Anschluss kommt es zu einer höheren Steigung beim gewöhnlichen Wasser und somit auch zur höheren Druckfestigkeit nach 28 Tagen bei zirka 37 MPa.

Zum Verlauf der Mischung mit destilliertem Wasser ist zu sagen, dass er sehr konstant ist, ohne größere Richtungswechsel. Infolge des niedrigeren W/B-Wertes mit Leitungswasser wurde dementsprechend auch mehr Bindemittel hinzugefügt, was hier auch zu einem höheren Druckfestigkeitswert führt. Der Umstand, dass niedrigere W/B-Verhältnisse mit Leitungswasser erreicht werden konnten, liegt vermutlich an der höheren Kalzium-Konzentration in der Flüssigkeit.

Die durchschnittliche Wasserhärte in Wien beträgt zirka 13,03 °dH. Dieser Wert beschreibt das Vorhandensein von gelösten Magnesium- und Kalziumverbindungen. 1° dH bedeutet hier eine Konzentration von 0,178 mM/l Kalzium. Dementsprechend liegt der Wert in Wien bei zirka 2,33 mM/l Kalzium.⁸⁵

Fügt man zu den Mischungen Kalziumchlorid und PCE hinzu, können niedrigere W/B-Werte erreicht werden (siehe Abb. 3.23). Für destilliertes Wasser konnten wir das Verhältnis von 0,38 auf 0,345 reduzieren. In Kombination mit Leitungswasser von 0,35 auf 0,335.

In Abb. 4.2 zeigt sich, dass alle drei Mischungen in den ersten sieben Tagen relativ ähnliche Druckfestigkeitswerte aufweisen. Danach kommt es zu einer Differenz der minimalen W/B-Werte (Leitungs- und destilliertes Wasser) im Vergleich zur Mischung mit Leitungswasser und dem W/B-Wert

⁸⁵ Vgl.: <https://vitalhelden.de/wasser/wasserqualitaet/wien/>, abgerufen am 06.05.2022

von 0,35. Die lila Linie mit dem Kalziumchloridanteil von 100mM stammt aus einer Voruntersuchung (siehe Abb. 3.19).

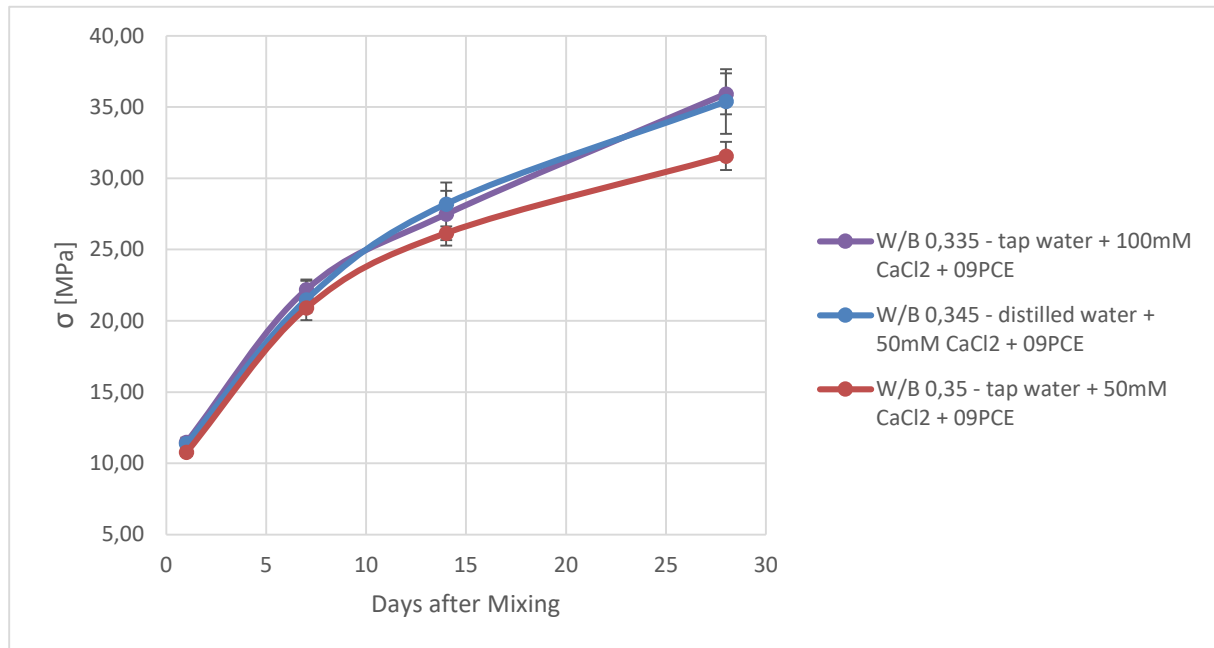


Abb. 4.2: Druckfestigkeitsverlauf der minimalen W/B-Werten mit Leitungs- und destilliertem Wasser – Complete series

Zusammenfassend in diesem Unterkapitel ist zu sagen, dass, wie zuvor beschrieben, der Unterschied zwischen Mischungen mit Leitungs- und destilliertem Wasser auf der einen Seite der minimal erreichbare W/B-Wert ist. Folglich ist auch der Druckfestigkeitsverlauf der Mischung mit reinem Leitungswasser nach 28 Tagen höher. Mit der Beimengung von Kalziumchlorid und PCE ist eine Reduzierung des W/B-Wertes sowohl bei Leitungs- als auch bei destilliertem Wasser feststellbar. Diese zeigen sehr ähnliche Druckfestigkeitsverläufe. Dadurch kommt es vor allem bei der Mischung mit destilliertem Wasser zu einer deutlichen Druckfestigkeitserhöhung nach 28 Tagen.

4.1.2 Druckfestigkeiten abhängig vom W/B-Wert

Im nächsten Schritt wird der Unterschied im Festigkeitsverlauf von Mischungen mit Leitungswasser und destilliertem Wasser beschrieben. Die Druckfestigkeitsauswertungen erfolgten hier jeweils nach 28 Tagen (Abb. 4.3).

Von rechts beginnend beim höchsten W/B-Wert sieht man in Abb. 4.3, dass hier das destillierte Wasser mit Sand und AAB voran bei etwa 18 MPa liegt. Danach steigen beide Linien zirka gleich stark an, wobei die rote Linie leicht schneller ansteigt. Bei einem Wert von 0,4 sieht man eine Festigkeitsdifferenz von zirka 5 MPa. Die rote Linie endet hier wieder bei einem W/B-Verhältnis von 0,38. Den niedrigeren W/B-Wert und die damit höhere Druckfestigkeit erreicht die Mischung mit Leitungswasser, mit einem Wert von zirka 37 MPa. Für alle W/B-Verhältnisse zeigten die Mischungen mit destilliertem Wasser höhere

Druckfestigkeitswerte als jene mit Leitungswasser. Allerdings erreichten wir mit reinem Leitungswasser niedrigere W/B-Werte. In Abb. 4.3 wurde weder Kalziumchlorid noch PCE hinzugefügt.

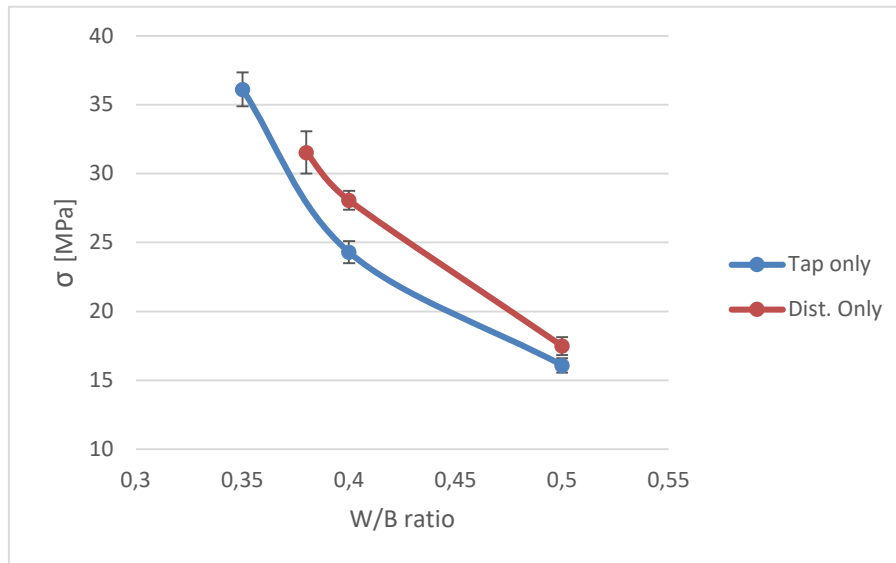


Abb. 4.3: Druckfestigkeitsverlauf nach 28 Tagen abhängig vom W/B-Wert mit Leitungs- und destilliertem Wasser – only 28 days

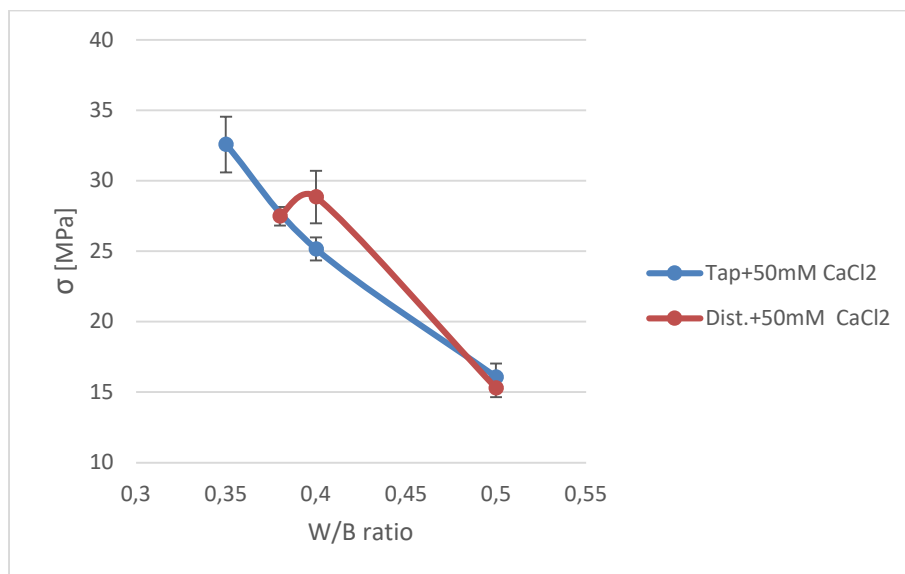


Abb. 4.4: W/B-Wert abhängige Druckfestigkeitsverläufe nach 28 Tagen mit Leitungs- und destilliertem Wasser (mit CaCl₂) – only 28 days

Wenn man in die beiden unterschiedlichen Flüssigkeiten Kalziumchlorid mit einer Konzentration von 50mM beigibt, entstehen oben abgebildete Druckfestigkeitsverläufe (Abb. 4.4). Zu sehen ist, von rechts beginnend, der unterschiedlich starke Anstieg beider Linien (unterschiedlich zu Abb. 4.3). Dementsprechend gibt es auch bei 0,4 eine Differenz von zirka vier MPa. Danach kommt es bei der Mischung mit destilliertem Wasser zu einer abrupten Reduzierung der Festigkeit. Die rote Linie wächst mit leicht erhöhter Steigerung weiter bis zum W/B-Wert von 0,35.

Wie man in Abb. 4.4 bei der roten Linie sehen kann, ist die Grenze der möglichen Mischbarkeit und Einbringbarkeit in die Schalung davon abhängig, ob mit einem Rüttler oder händisch verdichtet wurde. Abb. 4.5 zeigt die möglichen Auswirkungen der unterschiedlichen Arten der Verdichtung. Im Zuge der Probekörperherstellung wurde immer eine Rüttelplatte für die Verdichtung verwendet.

Folglich sieht man, dass die maximalen Druckfestigkeiten begrenzt sind. Niedrige W/B-Werte können auch zu einer Reduktion der Druckfestigkeit führen. Die betontechnologischen Eigenschaften Schwinden und Kriechen führen hier zu Zugspannungen. Folgen dieser Reaktionen sind Risse beziehungsweise der Verlust der Kontaktspannung. Aufgrund des niedrigen Wassergehaltes steht nicht genügend Volumen für die Abbindung zur Verfügung und dies sorgt für ein inhomogen abgebundenes Gefüge. Einige weitere Eigenschaften, die hier ebenfalls entscheidend sind, sind die Größe der Gesteinskörnung und deren physikalische Eigenschaften.⁸⁶

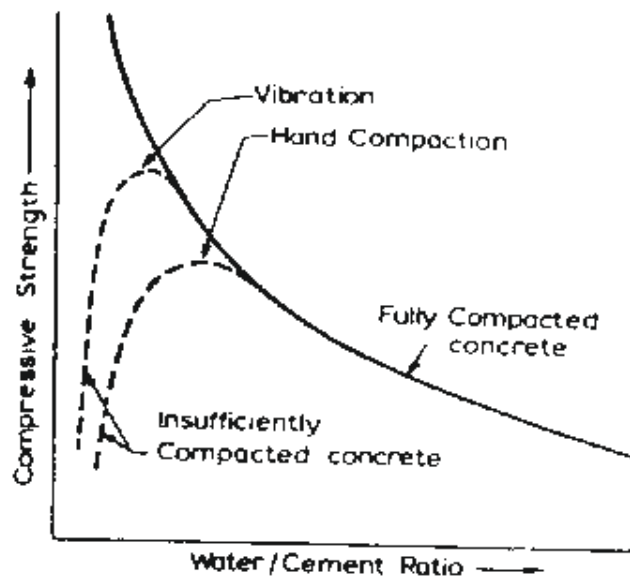


Abb. 4.5: Einfluss des W/B-Wertes und der Verdichtungsmethoden auf die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton⁸⁷

Dieser Umstand wird als möglicher Grund für den vorzeitigen Verlust der Druckfestigkeit der roten Linie (destilliertes Wasser und 50mM an CaCl_2) ab einem gewissen W/B-Wert in Abb. 4.4 gesehen. Zusammenfassend sieht man in den letzten drei Abbildungen, dass die Beimengung von 50mM an Kalziumchlorid sowohl einen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung als auch auf die maximal erreichbare Druckfestigkeit hat.

⁸⁶ Vgl.: <https://www.engineeringintro.com/concrete/concrete-strength/water-to-cement-ratio/>, abgerufen am 20.04.2022

⁸⁷ <https://www.engineeringintro.com/concrete/concrete-strength/water-to-cement-ratio/>, abgerufen am 20.04.2022

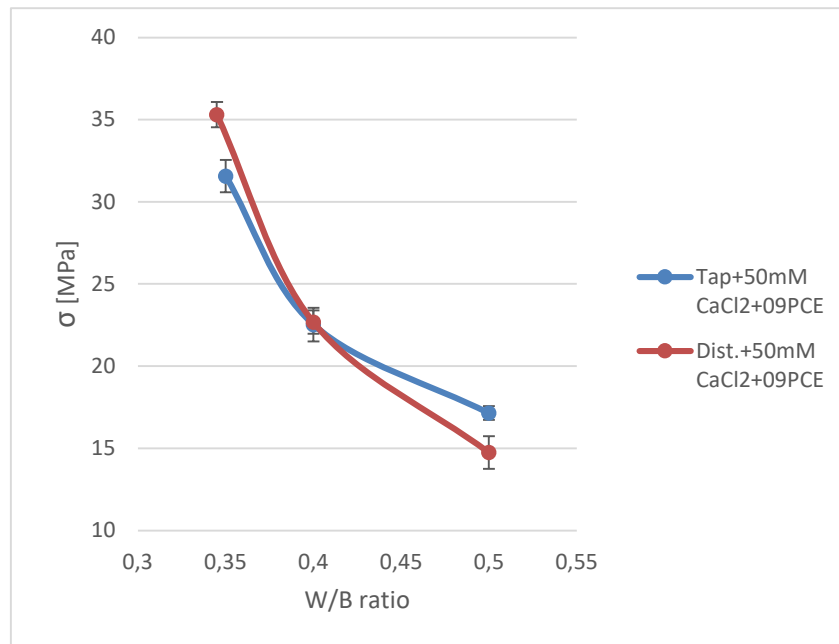


Abb. 4.6: W/B-Wert abhängige Druckfestigkeitsverläufe nach 28 Tagen mit Leitungs- und destilliertem Wasser (mit CaCl₂ und PCE) – only 28 days

In Abb. 4.6 sieht man die Einwirkung von Betonverflüssiger auf die beiden Mischungen. Hier sieht man, dass die Festigkeitswerte, beginnend vom höchsten W/B-Wert, von einem unterschiedlichen Niveau beginnen. Danach kommt es zu einer sehr unterschiedlich starken Steigung. Wobei die Festigkeitsbeiwerte bei einem W/B-Wert von 0,4 zirka ident sind. Danach kommt es zu einem Steigungsanstieg, wobei hier die Mischung mit destilliertem Wasser bei einem W/B-Wert von 0,345 (minimales W/B-Verhältnis) die höchste Druckfestigkeit aufweist.

Weiters ist hier deutlich zu sehen, dass kein abrupter Druckfestigkeitsabfall mehr zu sehen ist bei der Mischung mit destilliertem Wasser, CaCl₂ und PCE. Ebenfalls bemerkbar ist, im Vergleich zu Abb. 4.4, dass die Mischung mit zusätzlich PCE im destillierten Wasser bei niedrigen W/B-Werten einen sehr steilen Anstieg der Druckfestigkeit zeigt. Folglich scheint es so, dass der Verflüssiger die Mixtur besser verarbeitbar und leichter in die Schalung einfüllbar macht. Weiters verhindert er das Auftreten von Fehlern im Probekörper.

4.2 Vergleich von AAB-Mischungen mit Zement-Mörtel (W/B-abhängig)

Im nächsten Kapitel wird ein gewöhnlicher Zement-Mörtel (CEM 32.5) mit AAB verglichen.

4.2.1 Gegenüberstellung von destilliertem Wasser mit Mörtel CEM 32.5

Mit Hilfe der Abb. 3.23 als Grundlage wurde ein Druckfestigkeitsverlauf eines Zement-Mörtels der Kategorie CEM 32.5 ebenfalls in die Grafik hinzugefügt und es wurden Vergleiche gezogen.

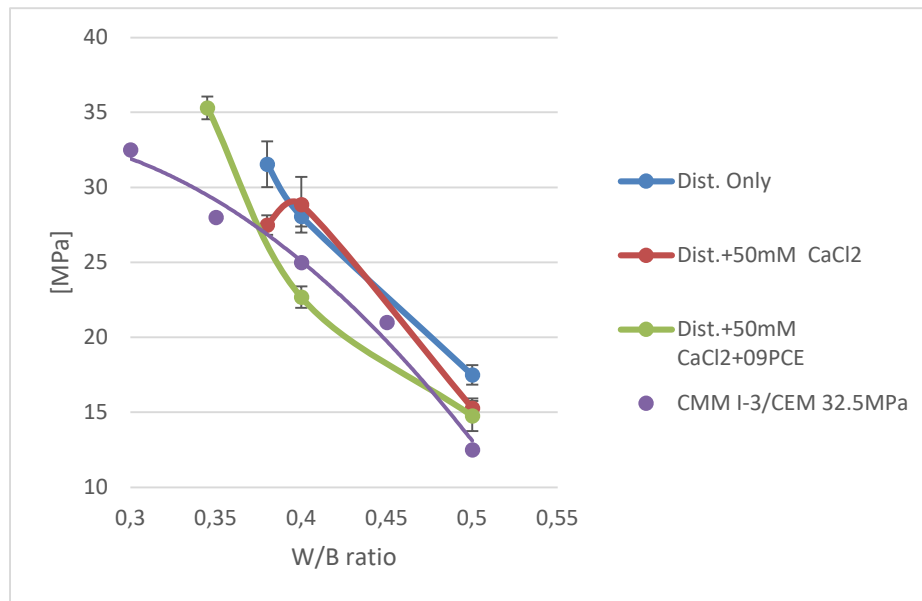


Abb. 4.7: W/B-Wert abhängige Druckfestigkeitsentwicklungen nach 28 Tagen (Destilliertem Wasser und Zement-Mörtel⁸⁸) – only 28 days

In Abb. 4.7 sieht man den Vergleich der Druckfestigkeitsverläufe von Mischungen mit AAB und destilliertem Wasser. Weiters sieht man den Spannungsverlauf von Mörtel mit der Bezeichnung CMM I-3/CEM 32.5 MPa mit einem Sand/Zement (bezogen auf die Masse)-Verhältnis von 3. Bei diesen AAB-Mischungen wurde die Menge an Sand stets konstant bei 30% (am Volumen) gehalten. Das Verhältnis zwischen Sand und Zement war in dieser Arbeit immer bei zirka 1,0. Die Druckfestigkeitswerte sind nach 28 Tagen ermittelt worden.⁸⁹

Deutlich zu sehen ist der unterschiedlich starke Druckfestigkeitsanstieg der AAB-Mischungen im Vergleich zur lila Linie (Mörtel). Die Verarbeitbarkeit von AAB ist geringer als die von OPC. Das liegt hauptsächlich an der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der beiden, vor allem aber an der unterschiedlichen Kalzium-Konzentration. **Bei niedrigem W/B-Wert sieht man in Abb. 4.7, dass hier die AAB-Mischungen sogar höhere Druckfestigkeitswerte aufweisen als der Zement-Mörtel.** Dieser Umstand ist wirklich bemerkenswert.

4.2.2 Gegenüberstellung von Leitungswasser mit Zement-Mörtel CEM 32.5

Mit Hilfe der Abb. 3.24 als Grundlage wurde ein Druckfestigkeitsverlauf eines Zement-Mörtels der Kategorie CEM 32.5 ebenfalls in die Grafik hinzugefügt und es wurden Vergleiche gezogen.

⁸⁸ Vgl.: Amirhossein Kargari, Hamid Eskandari-Naddaf, Ramin Kazemi, Effect of cement strength class on the generalization of Abrams' law, 2018, S. 496

⁸⁹ Vgl.: Kargari, Eskandari-Naddaf, Kazemi, S. 496

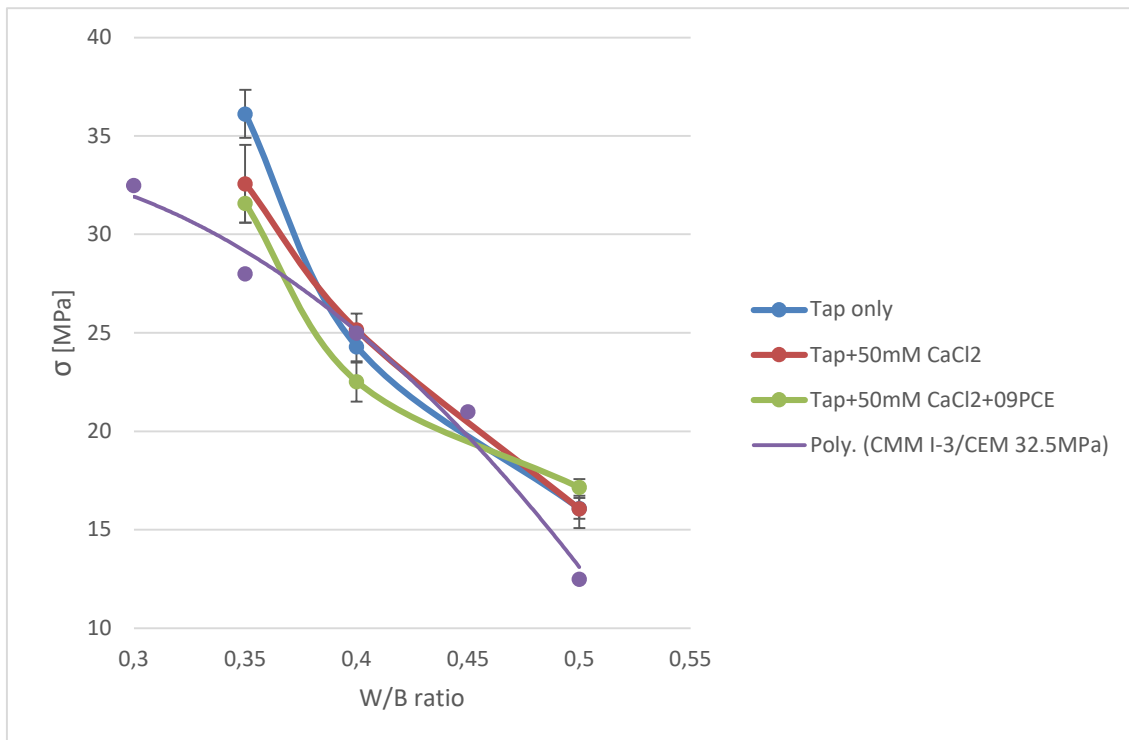


Abb. 4.8: W/B-Wert abhängige Druckfestigkeitsentwicklungen (Leitungswasser und Zement-Mörtel⁹⁰) – only 28 days

In Abb. 4.7 sieht man den Vergleich der Druckfestigkeitsverläufe von Mischungen mit AAB und Leitungswasser. Die vorhandene Mörtel-Druckfestigkeits-Linie ist ident mit der in Abb. 4.7. Auch die Eigenschaften und Sandanteile sind ident.

Deutlich ist wiederum der unterschiedlich starke Anstieg der Druckfestigkeitsverläufe zu sehen. Bei Mischungen mit AAB ist er mit Verringerung des W/B-Wertes sehr viel stärker im Vergleich zum Mörtel.

Sowohl mit destilliertem Wasser als auch mit Leitungswasser wurden Werte erhalten, die mit einem Zement CEM 32.5 vergleichbar sind. Beispielsweise wird diese Art von Zement für Putz, Mörtel oder auch als klassischer Beton in unterschiedlichsten Bereichen verwendet. Dementsprechend spannend ist es hier zu sehen, dass AAB durchaus idente Druckfestigkeitswerte aufweist.

4.3 Vergleich von kleinen und großen Probekörpern.

Im nächsten Schritt wird der Unterschied der Druckfestigkeiten abhängig vom W/B-Verlauf wieder dargestellt. Der W/B-Wert und die Inhaltsstoffe sind ident. Die Festigkeitswerte wurden hier immer nach 28 Tagen ermittelt. Unterschieden wird jedoch zwischen den kleinen (2/2/8cm) und großen Probekörpern (4/4/16cm).

⁹⁰ Vgl.: Kargari, Eskandari-Naddaf, Kazemi, S. 496

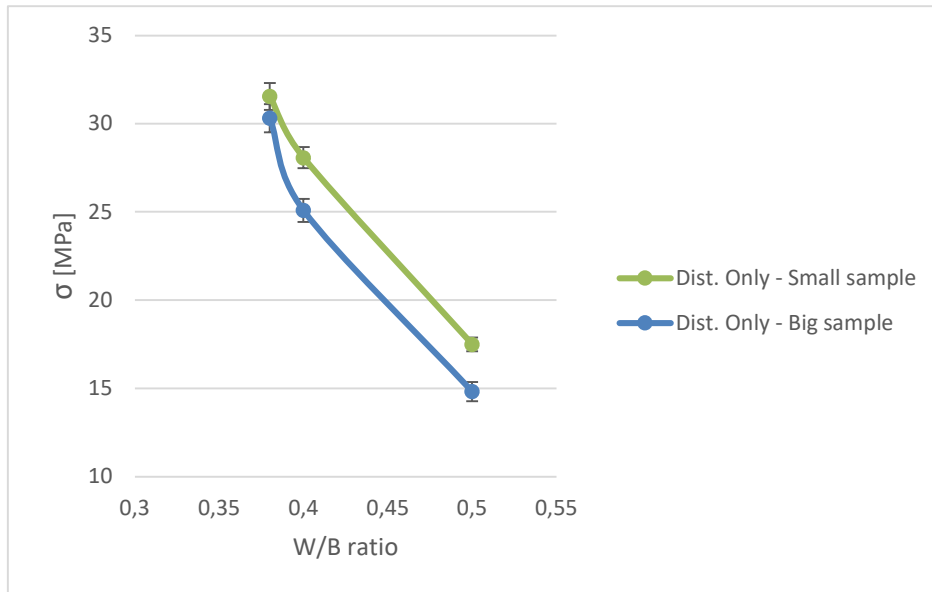


Abb. 4.9: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit destilliertem Wasser, abhängig von den W/B-Werten und den Probekörperabmessungen – only 28 days

In Abb. 4.9 sind Mischungen mit rein destilliertem Wasser zu sehen. Zu sehen ist, dass sowohl bei einem Wert von 0,5 als auch bei 0,4 zu einer Druckfestigkeitsdifferenz von zirka 5 MPa kommt. Je niedriger das Verhältnis wird, umso mehr nähern sich die beiden Kurven an.

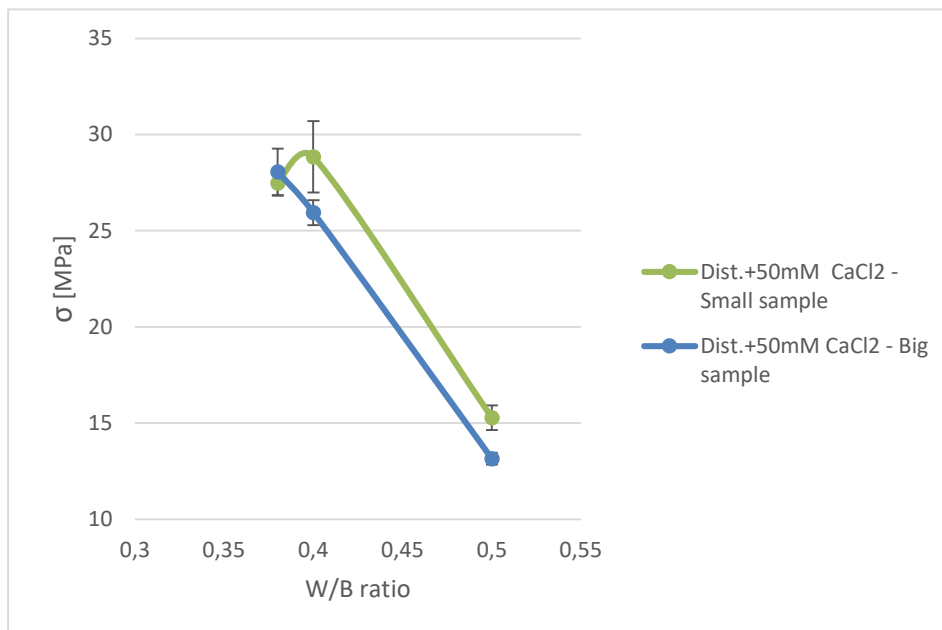


Abb. 4.10: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit destilliertem Wasser, abhängig von den W/B-Werten und den Probekörperabmessungen (mit CaCl₂) – only 28 days

Auch hier (Abb. 4.10) ist wieder zu sehen, dass beide Linien mit zirka fünf MPa Differenz wieder rechts beginnen bei einem W/B-Wert von 0,5. Diese Differenz bleibt bis zu 0,4 wieder zirka gleich. Beim niedrigsten Verhältnis kommt es zu einem gleich hohen Wert. Dieser Umstand wurde schon zuvor beschrieben (Abb. 4.5) und es wurden die möglichen Gründe dafür aufgezählt. Im Vergleich der

unterschiedlich großen Probekörper kann man aber davon ausgehen, dass die Vibration nur auf die kleinen Objekte einen maßgebenden Einfluss hat, was in Abb. 4.10 gut zu sehen ist.

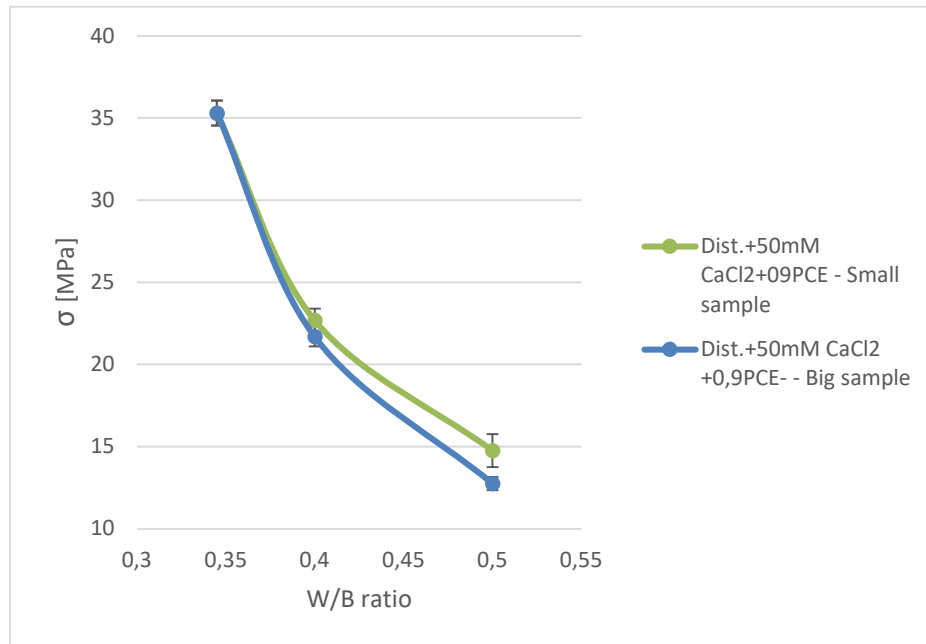


Abb. 4.11: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit destilliertem Wasser, abhängig von den W/B-Werten und den Probekörperabmessungen (mit CaCl₂ und PCE) – only 28 days

In Abb. 4.11 sind zwei Mischungen zu sehen, die hier noch zusätzlich mit Betonverflüssiger versehen sind. Hier ist einerseits die stetig kleiner werdende Differenz der Festigkeit zu sehen und andererseits die nahezu idente Festigkeit bei einem W/B-Wert von 0,345. Ebenfalls zu sehen ist die sprunghafte Steigungsänderung ab einem Wert von 0,4. Hier wurden wieder die minimalen W/B-Werte mit Hilfe der Beimengungen erzielt.

Folglich sieht man, dass der Verflüssiger auch hier einen maßgebenden Einfluss hat. Dieser sorgt nämlich im Vergleich zu Abb. 4.10 für keinen abrupten Druckfestigkeitsabfall bei niedrigem W/B-Wert. PCE führt bei gleichzeitiger Zugabe von CaCl₂ zu einer Veränderung. Dadurch wird die Verarbeitbarkeit erhöht und die Platzierung der Paste verbessert, was zu weniger Fehlern im resultierenden Probekörper führt.

4.4 Vergleich der E-Module mit Mörtel

In Abb. 4.12 wird ein Vergleich zwischen dem E-Modul der AAB-Mischung mit destilliertem Wasser mit Mörtel (M3) gezeigt:

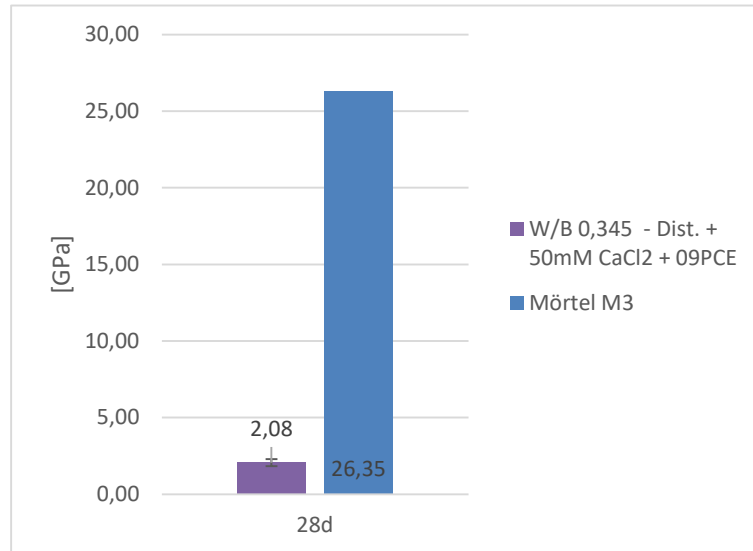


Abb. 4.12: Vergleich der E-Module von unserem minimalen W/B-Wert mit destilliertem Wasser und Mörtel (M3) mit einem Volumen-Sandanteil von 30%⁹¹

Der Unterschied zwischen den beiden E-Modulen ist sehr groß. Der E-Modul von der AAB-Mischung könnte theoretisch mit der Zugabe von Stahlfasern oder Ähnlichem verbessert werden. Der Mörtel mit der Bezeichnung M3⁹² hat hier einen Anteil von Sand im Mörtel von 30% (am Volumen). Die Einheit der gezeigten Werte ist Gigapascal.

⁹¹ C.C. Yang, Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan, Republic of China, 1998, S. 729,732

⁹² C.C. Yang, Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan, Republic of China, 1998, S. 729,732

5 Conclusio

Das Hauptthema dieser Arbeit war es, das mögliche Potential von AAB, einer Bindemittelvariante, als kompletten Ersatz für den umweltschädlichen Zement zu erforschen. Ein Ziel war es, die Reichweite der möglichen Wasser/Bindemittel-Werte zu bestimmen und infolgedessen auch die Druckfestigkeiten zu ermitteln. Der minimale W/B-Wert mit reinem destilliertem Wasser liegt bei 0,38. Durch die Zugabe von Kalziumchlorid und PCE konnte dieser Wert auf 0,345 reduziert werden. In Kombination mit Leitungswasser wurde das minimale W/B-Verhältnis auf 0,35 bestimmt. Erneut konnte dieser Wert durch die Zugabe von Kalziumchlorid und PCE auf 0,335 verkleinert werden.

Zufolge dem Paper: „Small oscillatory rheology and cementitious particle interactions“ von T. Liberto, M. Bellotto und A. Robisson CCR 2022 konnte gezeigt werden, dass PCE auf AAB unter dem Einfluss von CaCl_2 einen Einfluss hat. Dieser Umstand ermöglicht eine möglicherweise praktische Anwendung in der Bauwirtschaft. Auch im Zuge dieser Arbeit, beziehungsweise bei der Bestimmung von Festigkeitswerten von festen Probekörpern, konnte ebenfalls der eindeutige Einfluss von PCE bewiesen werden. Dies wiederum setzte jedoch immer den zusätzlichen Einsatz von CaCl_2 voraus, der zufolge des niedrigeren Kalziumgehalts von AAB erforderlich ist.

Weiters im Zusammenhang von PCE mit CaCl_2 ist zu sehen, dass diese Kombination nicht nur den W/B-Wert reduziert, sondern auch einen maßgeblichen Einfluss auf die Verdichtbarkeit hat. Die Verwendung von PCE verbessert die Verdichtbarkeit von AAB und reduziert die möglichen Probleme (Risse, Luftblasen), die infolge der Verdichtung auftreten können, wie zuvor gezeigt wurde.

Über alle Mischungen hinweg war weiters klar zu sehen, dass ein kleiner werdender W/B-Wert auch höhere Druck- und Biegezugfestigkeiten (Kapitel 7.1 und 7.2) bedeutet.

Ebenfalls interessant war der Einfluss der Oberflächenveränderung mit der Zeit. Hier wurde erläutert, wie sich die unterschiedliche Lagerung, die Luft, das Wasser und der Schutz in Plastikbehältern, auf die Festigkeitsverläufe auswirkt. Hier konnten vor allem in der Biegezugfestigkeit sehr große Unterschiede festgestellt werden. Dieser Punkt wurde im Anhang 7.2 näher beschrieben.

Die absolut höchste Druckfestigkeit wurde bei einer Mischung mit Leitungswasser und einem W/B-Wert von 0,35 erreicht mit zirka 36 MPa. Bei der Verwendung von destilliertem Wasser, dem resultierenden W/B-Wert von 0,345, 50mM an CaCl_2 und 0,9% an PCE (im Verhältnis zum Gewicht des Bindemittels) wurde ein Druckfestigkeitswert von zirka 35 MPa erreicht. Auch der Unterschied zwischen Zement-Mörtel mit CEM 32.5 und unseren AAB-Mischungen ist nur sehr gering. Hier wurden sehr ähnliche Druckfestigkeitswerte erreicht. Wenn man die unterschiedlichen Einsatzgebiete von Mörtel bedenkt, wie zum Beispiel als Putz oder als Unterlagsmaterial für zum Beispiel Schalsteine oder Waschbetonplatten, liegt hier auf der Hand, dass AAB eine sehr gute Alternative darstellen würde.

6 Perspektiven

Wie in dieser Arbeit gezeigt, ist der Einsatz von Hochofenschlacke eine vielversprechende Möglichkeit. Hierbei muss man jedoch auf die geringeren Anfangs- und Endfestigkeiten achten. Jedoch kann man diese Variante dennoch sehr breit einsetzen. Hierbei braucht man nur an zum Beispiel Unterlagsbeton denken, der beispielsweise als Untergrund für Waschbetonplatten oder keramische Steine dient. Ebenfalls einsetzbar sind solche Produkte als Sauberkeitsschicht unter Fundamenten, egal welcher Abmessung.

Selbst wenn die Stahlindustrie in den nächsten Jahrzehnten immer geringer wird, ist der verbaute Stahlanteil im Bauwesen enorm. Hier kommt die Anwendung vom geschlossenen Stoffkreislauf und damit die Rezyklierung zum Einsatz.

Sehr interessant ist, dass es diese Technologie „Alkalisch aktivierte Bindemittel“ schon über 70 Jahre lang gibt. Hier hoffe ich sehr stark, dass sie womöglich aufgrund der Weltklimakrise nun endlich zum verbreiteten Einsatz kommt. Vor allem dort, wo sie aufgrund ihrer Eigenschaften und Festigkeitswerte sofort einsetzbar wäre.

Die möglichen Aussichten in Bezug auf alkalisch aktivierte Bindemittel sind, dass sich die Bauindustrie vom klassischen Portlandzement, dort wo es sinnvoll möglich ist, abwendet und Alternativen nutzt und sucht. Weiters wäre es sehr interessant, die chemische Widerstandsfähigkeit dieser Mischungen mit alternativem Binder zu untersuchen, was zum Beispiel bei Bauwerken neben Straßen sehr wichtig ist. Ein weiterer wichtiger Punkt ist meiner Meinung nach, wie sich die Bewehrung auf kurze und lange Sicht im alkalischen Beton verhält. Die Grundvoraussetzung, der ähnliche pH-Wert ist gegeben.

Zusätzlich wäre es sehr wichtig zu sehen, wie sich das untersuchte Bindemittel in Kombination mit klassischem Schotter (z.B. mit GK 16/32) verhält. Infolgedessen kann man weiters Langzeitstudien mit den erstellten Probekörper machen, was wiederum für die Weiterentwicklung dieses Systems sehr wichtig wäre.

7 Anhang

7.1 Auswertung von Biegezugversuchen mit Leitungswasser

Im nächsten Punkt werden noch die resultierenden Biegezugfestigkeiten dargestellt. Die Tendenz, dass sich die Festigkeit mit kleiner werdendem W/B-Wert erhöht, kann man auch hier sehen. Die Farbe an der Querschnittsfläche hat einen enormen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit. Die Bereiche, die eine grüne Färbung haben, weisen eine bessere Widerstandskraft auf. Je größer die Randbereiche weiß geworden sind, desto geringer war die resultierende Biegezugfestigkeit. Die möglichen Gründe für die Farbänderung wurden bereits in Kapitel 3.1 erklärt.

In Abb. 7.1 sieht man den Biegezugfestigkeitsverlauf von verschiedenen Mischungen mit Leitungswasser unter Umgebungsluftlagerung:

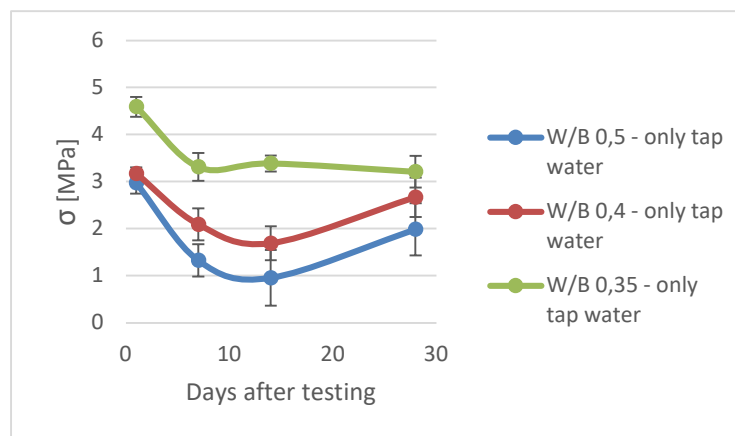


Abb. 7.1: Biegezugfestigkeitsverlauf von Mischungen mit Leitungswasser und abhängig vom W/B-Wert – Complete series

Es lässt sich hier kein wirklicher Einfluss von der Beimengung von PCE oder CaCl_2 feststellen. Nach 28 Tagen und damit nach Ende der letzten Testung sind alle auf ähnlichem Niveau bei zirka 3,5 MPa. Die oberflächliche Veränderung ist bei allen Probekörpern ident. Wie schon zuvor erwähnt, hat die Lagerung einen Einfluss. Vor allem, wie viel Fläche der Körper mit der Umgebungsluft hat, ist entscheidend. Siehe dazu: Abb. 3.8 bis Abb. 3.16.

In Abb. 7.2 sieht man den Verlauf von drei Mischungen unter Umgebungsluftlagerung mit einem konstanten W/B-Wert. Unterschieden werden sie abhängig von den Kalziumchlorid- und PCE-Konzentrationen.



Abb. 7.2: Biegezugfestigkeitsverlauf mit Einfluss von CaCl₂ und PCE – Complete series

7.2 Biegezugversuche mit destilliertem Wasser und der Einfluss von unterschiedlichen Lagerungen

Im nächsten Unterpunkt wird nun auf die unterschiedliche Lagerung eingegangen, die vor allem auf die Biegezugfestigkeit enormen Einfluss hat. Bemerkenswert ist hier der bedeutend hohe Unterschied in den resultierenden Werten im Vergleich zur „normalen“ Lagerung an der Luft in der Werkstatt.

Unterschieden wird die Lagerung in reine Wasserlagerung, wobei hier die Probekörper mit ganzer Oberfläche mit Wasser bei einer Temperatur von zirka 15°C umschlossen sind und einer Lagerung, wobei die Probekörper hier direkt nach dem Ausschalen in Plastikbehälter verstaut und die Luft möglichst exakt rausgesaugt wurde. Beide Varianten wurden wieder nach 1,7,14 und 28 Tagen untersucht und Biegezug- und Druckfestigkeiten ermittelt.

Zur Anwendung gekommen ist die bekannte Mischung mit einem W/B-Wert von 0,345 mit 50mM an CaCl₂ und 0,9% Verflüssiger im destillierten Wasser. Der Hauptgrund hierfür war der Abschluss einer kompletten Serie mit vier Testungen.

Der Verlauf der unterschiedlichen Oberflächenveränderung ist in den Abb. 3.8 bis Abb. 3.16 zu sehen.

In Abb. 7.3 sind die drei unterschiedlichen Biegezugfestigkeitsverläufe abhängig von den drei unterschiedlichen Lagerungen (Umgebungsluft, Vakuum, Wasser) abgebildet:

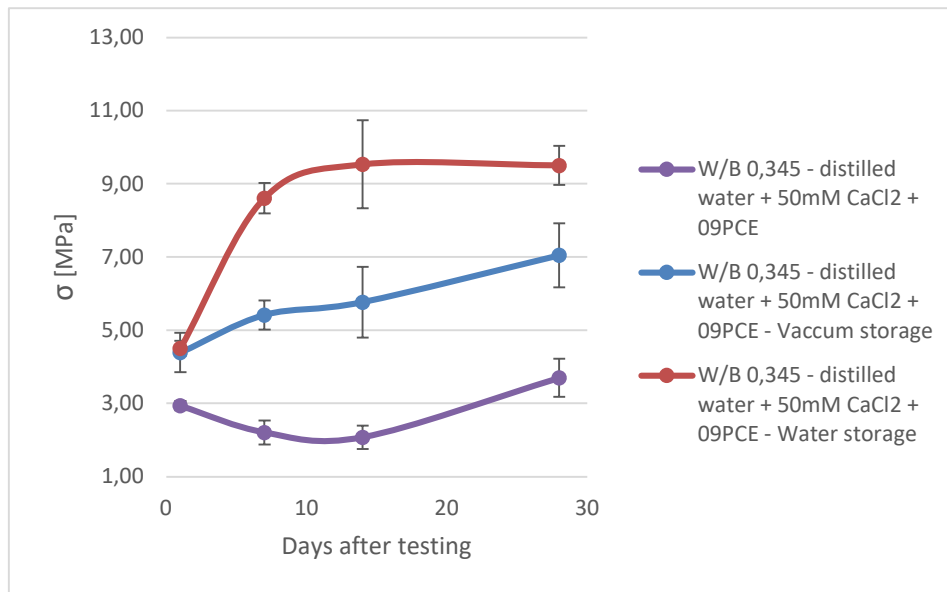


Abb. 7.3: Biegezugfestigkeitsverlauf - abhängig von der Lagerung: Umgebungsluft, Vakuum, Wasser – Complete series

Die lila Linie und damit die gewöhnliche Luftlagerung hat hier, wie schon bereits bekannt, sehr niedrige Werte, die sich auch kaum verändern. Allerdings hat schon die Lagerung unter „Vakuum“ enormen Einfluss auf die Festigkeiten, die durchaus doppelt so hoch sind wie die unteren. Um nochmals den Faktor zwei größer sind die Festigkeiten der Probekörper, die unter Wasser gelagert wurden. Bereits nach 7 Tagen kommt es hier zu einem enormen Festigkeitsanstieg, der anschließend aber konstant bleibt. Diese Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Oberflächenfarben zurückzuführen.

Die baupraktische Wichtigkeit ist hier natürlich nicht gegeben. Eine weitere genauere Untersuchung hier wäre aber dennoch sinnvoll und sicher auch interessant. Generell wurde auch in den anderen Proben, die mit der Zeit die Farbe veränderten, festgestellt, dass Oberflächen mit größerem Anteil an grüner Fläche größere Biegezugfestigkeiten hatten.

Anzumerken ist hier, dass, wenn im Bereich der Zugzone im Probekörper, also unten, vermehrt die Fläche weiß war, es hier zu geringeren Biegezugfestigkeiten gekommen ist.

Die möglichen Gründe hierfür wurden in Kapitel 3.1 schon näher beschrieben.

7.3 Auswertungen von „SM“

Im Zuge der Untersuchungen wurde weiters mit der braunen „SM“-Schlacke experimentiert. Hier sind zu Beginn die Unterschiede der chemischen Bestandteile aufgezählt. Sehr deutlich zu sehen ist der Unterschied von zirka 15% des Kalziumanteiles. Diese Differenz zeigt einen enormen Unterschied später in den Festigkeitsverläufen. In Tab. 7.1 ist der Vergleich der chemischen Bestandteile der zwei unterschiedlichen Schlacken (Ecocem & „SM“) aufgezeigt:

	CaO	SiO ₂	MgO
Ecocem	42,4%	36,5%	8,1%
„SM“	27%	39%	14%

Tab. 7.1: Chemische Bestandteile der beiden Schlacken

Wie man in Abb. 7.4 sehen kann, wurden hier wieder die kleineren Schalungen mit den Abmessungen 2/2/8cm verwendet. Am Foto (Abb. 7.4) sind im Vergleich zur Ecocem-Schlacke schon sehr niedrige W/B-Werte zu sehen. Ebenfalls zu sehen ist hier aber sofort, dass sie äußerlich sehr feucht wirken und auch sehr leicht einzubauen waren.

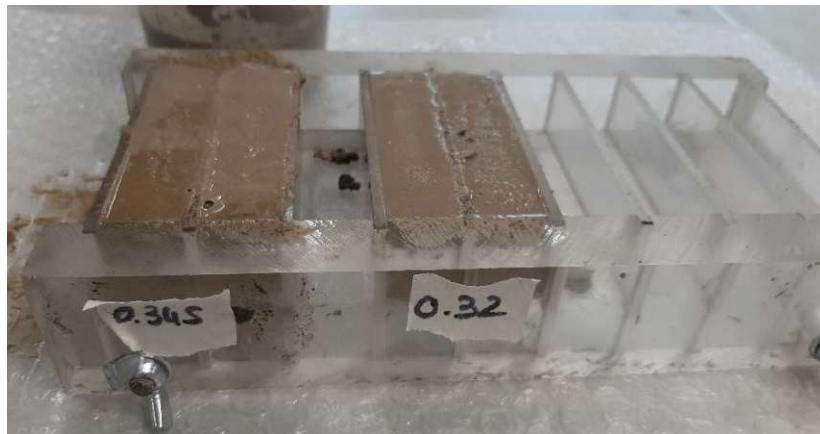


Abb. 7.4: Mischungen mit „SM“-Schlacke

Sehr spannend ist auch der Vergleich mit der grauen Schlacke, was man auf der nächsten Abbildung (Abb. 7.5) sehen kann:



Abb. 7.5: Vergleich der beiden Schlacken

Dieses Foto wurde direkt nach der Verfüllung der Schalungen gemacht. Hier ist schon deutlich der Unterschied in der Konsistenz zu sehen, der eigentlich folgend den W/B-Werten genau umgekehrt sein sollte. Die Folie um die Objekte wurde jedes Mal verwendet, um ein zu schnelles Austrocknen zu verhindern.

Am ersten Tag nach der Mischung wurde aber sowohl an Ecocem-Mischungen, als auch bei „SM“-Gemischen die oberflächliche Veränderung festgestellt (Abb. 7.6). Der Unterschied zum grauen Probekörper ist hier allerdings nur schwer zu beurteilen, da er sowieso eine gräuliche Farbe hat.



Abb. 7.6: Vergleich der beiden Schlacken – einen Tag nach der Mischung

Das nächste Foto (Abb. 7.7) wurde gewählt, da man hier den riesigen Unterschied an Kalziumoxyd in den Proben feststellen konnte. Schon nach der Ausschalung brachen einige Objekte. Dieser Umstand war bei allen Probekörpern zuvor mit der Eco-Schlacke nie passiert.



Abb. 7.7: Ausschalen mit anschließendem Bruch des Probekörpers

In der damit letzten Abbildung (Abb. 7.8) wird die Druckfestigkeit nach 28 Tagen dargestellt. Deutlich zu sehen ist der enorme Unterschied durch die vorhandene Kalziumgehalt-Konzentration. Anzumerken

ist hier allerdings noch, dass das Phänomen der hohen Festigkeiten bei sinkendem W/B-Werte auch hier wieder der Fall war.

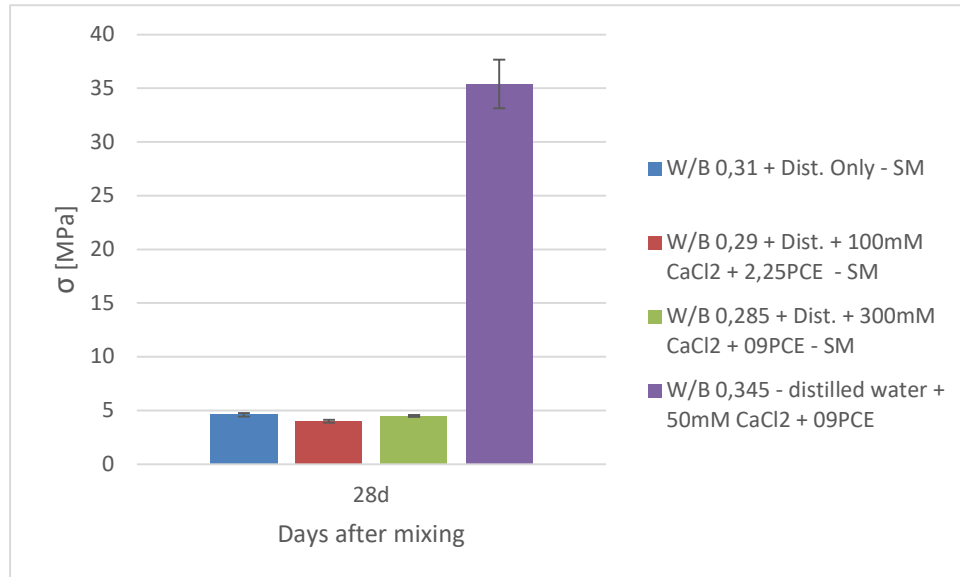


Abb. 7.8: Vergleich der Druckfestigkeiten zwischen Ecocem (lila) & „SM“-Schlacke – only 28 days

Bei den unteren drei Proben wurde wieder versucht den möglichst minimalen W/B-Wert zu erreichen. Dazu wurde wieder die Zugabe von Kalziumchlorid und Verflüssiger angewendet. Der Faktor, der die beiden Schlacken unterscheidet, liegt bei sechs bis sieben.

Die erreichten Biegezugfestigkeiten sind ebenfalls weitaus geringer. Die Ermittlung davon war jedoch kein Schwerpunkt dieser Arbeit und wird deswegen auch nicht weiter erläutert.

Hier ist der Unterschied von 15% an CaO in den Schlacken sehr deutlich zu sehen. Trotz Zugabe von CaCl₂ für die Abbindung war es hier nicht möglich, geeignete Festigkeiten zu erreichen.

Dieser Umstand zeigt, dass auf jeden Fall nicht jede Hochofenschlacke als alkalisches Bindemittel geeignet ist, zumindest wenn man hohe Druckfestigkeiten erreichen möchte.

Quellenverzeichnis

Studienunterlagen

- ◆ Univ. Lektor DDipl.-Ing. Dr.techn. BSc MSc PhD Maurizio Bellotto, Werkstoffe/Kapitel 2 – Grundlagen – Binding Materials, 2020
- ◆ Ao.Univ.Prof. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. DDr.h.c. Elemer Bölcskey; Ass.Prof.Dipl.-Ing. Dr. Heinrich Bruckner, Baustofflehre Werkstoff-Technologie & Brandsicherheit – Bindemittel, 2012

Skripten

- ◆ Anja Buchwald, Maarten Vanooteghem, Elke Gruyaert, Harald Hilbig, Nele De Belie, Purdoement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s
- ◆ Mohend Chaouche, Xiao Xiao Gao, Martin Cyr, Marine Cotte, Laurent Frouin, On the origin of the blue/green color of blast-furnace slag-based materials: Sulfur K-edge XANES investigation, 2016
- ◆ I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, Instituto Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid, Spain; An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. 2015
- ◆ E.M. Gartner, J.F. Young, D.A. Damidot, I. Jawed, Hydration of Portland cement, 2001
- ◆ Arab Hoballah, Economy Division, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, UN Environment, 2017
- ◆ Amirhossein Kargari, Hamid Eskandari-Naddaf, Ramin Kazemi, Effect of cement strength class on the generalization of Abrams' law, 2018
- ◆ Teresa Liberto, Maurizio Bellotto, Agathe Robisson, Small oscillatory rheology and cementitious particle interactions, Cement and Concrete Research 157 (2022): 106790
- ◆ Gerd Mauschitz, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften TU Wien, Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie – Berichtsjahr 2020, Wien April 2021
- ◆ Erik B. Nelson, Michel Michaux – Schlumberger, Chemistry and Characterization of Portland Zement
- ◆ Karen Scrivener, Fernando Martirena, Shashank Bishnoi, Soumen Maity, Calcined clay limestone cements (LC³), 2018
- ◆ C.C. Yang, Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan, Republic of China, 1998
- ◆ Zement + Beton Handels- und Werbges.m.b.H., Zementherstellung in Österreich – 8. Auflage, 2021

Texte aus dem Internet

- ◆ <https://www.wochenblick.at/politik/landflucht-sterbende-ortschaften-und-staedte-am-zusammenbruch/> , abgerufen am 5.4.2022
- ◆ <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/betonherstellung-und-klimaschutz-7229519> , abgerufen am 22.4.2022

- ◆ <https://www.recyclingmagazin.de/2021/08/24/klimafreundliche-alternative-zu-zement/> , abgerufen am 22.4.2022
- ◆ <https://www.engineeringintro.com/concrete/concrete-strength/water-to-cement-ratio/> , abgerufen am 29.04.2022
- ◆ <https://vitalhelden.de/wasser/wasserqualitaet/wien/> , abgerufen am 06.05.2022

Firmen

- ◆ Eocem France – Aix-en-provence 13100, 970 Rue Rene
- ◆ Smart Minerals GmbH, Franz-Grill-Straße 9/Objekt 214, 1030 Wien

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Entwicklung der benötigten Zementmenge pro Jahr und Region	1
Abb. 1.2: Weltweit eingesetzte Baumaterialien zwischen 2002 und 2005.....	2
Abb. 1.3: Materialien die in industrialisierten Ländern weltweit benötigt werden	3
Abb. 1.4: Jährliche Entwicklung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Österreich.....	5
Abb. 1.5: Zusätzlich zementhaltige Materialien und deren Verfügbarkeit (SCM)	6
Abb. 1.6: Ablauf der Hydratation von C_3S	9
Abb. 1.7: Überblick über die fortlaufende Hydratation eines Zementkornes nach dem ersten Wasserkontakt.....	9
Abb. 1.8: Herstellung von alkalisch aktivierten Bindemitteln	10
Abb. 1.9: Depolymerisationsgrad.....	12
Abb. 1.10: Alkalische Reaktion von Hochofenschlacke	13
Abb. 1.11: Chemische Reaktion von Hochofenschlacke	13
Abb. 1.12: Vergleich der chemischen Bestandteile von Purdozement.....	14
Abb. 1.13: Royal Building in Belgien.....	15
Abb. 2.1: Bestandteile unseres AABs: a) Na_2CO_3 b) Slag c) $Ca(OH)_2$	17
Abb. 2.2: „SM“-Schlacke nach der Mahlung	19
Abb. 2.3: Verwendung des Pyknometers für die Dichtebestimmung.....	19
Abb. 2.4: Mischer für die Voruntersuchungen.....	20
Abb. 2.5: „Hobart“-Mixer für die größeren Versuchsreihen.....	21
Abb. 2.6: Verfüllung der Schalungen.....	22
Abb. 2.7: Vorne: Große Schalung / Hinten: Kleine Schalungen.....	22
Abb. 2.8: Links: Kleine Körper (2/2/8cm) – Rechts: Große Stücke (4/4/16cm).....	22
Abb. 2.9: Wasserlagerung der Probekörper bei zirka 15°C.....	23
Abb. 2.10: „Vakuum“- Lagerung mit sicherlich nicht komplett geschlossenen Behältern	23
Abb. 2.11: Aufbau der „Zwick“-Maschine im Zuge der Biegezugfestigkeitsermittlung.....	24
Abb. 2.12: Spannungs-Dehnungslinie eines Druckversuchs.....	26
Abb. 3.1: Druckversuch nach einem Tag mit destilliertem Wasser - Pilot	29
Abb. 3.2: Druckspannungsverlauf mit destilliertem Wasser (mit und ohne $CaCl_2$) – Complete series. 29	
Abb. 3.3: Druckfestigkeitsverlauf mit den minimalen W/B-Werten und destilliertem Wasser – Complete series.....	30
Abb. 3.4: Mischung mit W/B von 0,345 mit 50mM $CaCl_2$ und 0,9% PCE	30
Abb. 3.5: Mischung mit W/B von 0,345 mit 50mM $CaCl_2$ und 0,9% PCE (nach einem Tag)	31
Abb. 3.6: Beschriftung der Probekörper	31
Abb. 3.7: Aufteilung der Probekörper	32
Abb. 3.8: Biegezugfestigkeitsversuch nach einem Tag.....	32
Abb. 3.9: Biegezugfestigkeitsversuch nach sieben Tagen	33
Abb. 3.10: Biegezugfestigkeitsversuch nach vierzehn Tagen.....	33
Abb. 3.11: Biegezugfestigkeitsversuch nach 28 Tagen.....	33
Abb. 3.12: Wasser-Lagerung (nach 7 Tagen).....	34
Abb. 3.13: „Vakuum“-Lagerung (nach 7 Tagen).....	34
Abb. 3.14: Wasser/„Vakuum“-Lagerung (nach 14 Tagen)	34
Abb. 3.15: Wasser-Lagerung (nach 28 Tagen).....	35
Abb. 3.16: „Vakuum“-Lagerung (nach 28 Tagen).....	35

Abb. 3.17: Druckfestigkeitsverlauf mit W/B-Wert 0,345 und Wasser-/Vakuumlagerung – Complete series	35
Abb. 3.18: Druckversuch nach einem Tag mit Leitungswasser - Pilot.....	37
Abb. 3.19: Druckversuch nach einem Tag mit den minimalen W/B-Werten mit Leitungswasser - Pilot	37
Abb. 3.20: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit unterschiedlichen W/B-Werten mit reinem Leitungswasser – Complete series	38
Abb. 3.21: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit W/B 0,35 und Leitungswasser (mit und ohne PCE) – Complete series.....	38
Abb. 3.22: Druckfestigkeitsverlauf des minimalen W/B-Wertes mit Leitungswasser und Additiven – Complete series.....	39
Abb. 3.23: Druckfestigkeitsverlauf abhängig vom W/B-Wert mit destilliertem Wasser – only 28 days	39
Abb. 3.24: Druckfestigkeitsverlauf abhängig vom W/B-Wert mit Leitungswasser – only 28 days	40
Abb. 3.25: E-Modul von destilliertem Wasser mit W/B 0,38 – mit und ohne CaCl ₂ – only 28 days.....	41
Abb. 3.26: E-Modul von destilliertem Wasser mit den niedrigsten W/B-Verhältnissen – only 28 days.....	41
Abb. 3.27: E-Modul von Leitungswasser mit unterschiedlichen W/B-Werten und Additiven – only 28 days.....	42
Abb. 4.1: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit reinem Leitungs- und destilliertem Wasser mit den minimalen W/B-Werten für reines destilliertes und Leitungswasser – Complete series	43
Abb. 4.2: Druckfestigkeitsverlauf der minimalen W/B-Werten mit Leitungs- und destilliertem Wasser – Complete series.....	44
Abb. 4.3: Druckfestigkeitsverlauf nach 28 Tagen abhängig vom W/B-Wert mit Leitungs- und destilliertem Wasser – only 28 days.....	45
Abb. 4.4: W/B-Wert abhängige Druckfestigkeitsverläufe nach 28 Tagen mit Leitungs- und destilliertem Wasser (mit CaCl ₂) – only 28 days.....	45
Abb. 4.5: Einfluss des W/B-Wertes und der Verdichtungsmethoden auf die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton	46
Abb. 4.6: W/B-Wert abhängige Druckfestigkeitsverläufe nach 28 Tagen mit Leitungs- und destilliertem Wasser (mit CaCl ₂ und PCE) – only 28 days.....	47
Abb. 4.7: W/B-Wert abhängige Druckfestigkeitsentwicklungen nach 28 Tagen (Destilliertem Wasser und Zement-Mörtel) – only 28 days.....	48
Abb. 4.8: W/B-Wert abhängige Druckfestigkeitsentwicklungen (Leitungswasser und Zement-Mörtel) – only 28 days.....	49
Abb. 4.9: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit destilliertem Wasser, abhängig von den W/B-Werten und den Probekörperabmessungen – only 28 days.....	50
Abb. 4.10: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit destilliertem Wasser, abhängig von den W/B-Werten und den Probekörperabmessungen (mit CaCl ₂) – only 28 days.....	50
Abb. 4.11: Druckfestigkeitsverlauf von Mischungen mit destilliertem Wasser, abhängig von den W/B-Werten und den Probekörperabmessungen (mit CaCl ₂ und PCE) – only 28 days.....	51
Abb. 4.12: Vergleich der E-Module von unserem minimalen W/B-Wert mit destilliertem Wasser und Mörtel (M3) mit einem Volumen-Sandanteil von 30%	52
Abb. 7.1: Biegezugfestigkeitsverlauf von Mischungen mit Leitungswasser und abhängig vom W/B-Wert – Complete series.....	55
Abb. 7.2: Biegezugfestigkeitsverlauf mit Einfluss von CaCl ₂ und PCE – Complete series.....	56

Abb. 7.3: Biegezugfestigkeitsverlauf - abhängig von der Lagerung: Umgebungsluft, Vakuum, Wasser – Complete series.....	57
Abb. 7.4: Mischungen mit „SM“-Schlacke	58
Abb. 7.5: Vergleich der beiden Schlacken	58
Abb. 7.6: Vergleich der beiden Schlacken – einen Tag nach der Mischung.....	59
Abb. 7.7: Ausschalen mit anschließendem Bruch des Probekörpers.....	59
Abb. 7.8: Vergleich der Druckfestigkeiten zwischen Ecocem (lila) & „SM“-Schlacke – only 28 days ...	60

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Hauptklinkeranteile im Portlandzement	8
Tab. 2.1: Chemische Bestandteile von Ecocem (verwendete Schlacke)	17
Tab. 2.2: Prozentuale Bestandteile unseres alkalisch aktivierten Bindemittels	17
Tab. 2.3: Verwendete Dichten für die anteilmäßigen Bestandteile unserer Versuchsmischungen....	18
Tab. 2.4: Chemische Bestandteile der Schlacke „SM“	19
Tab. 2.5: Abmessungen und Material unserer verwendeten Schalungen	21
Tab. 2.6: Übersicht über alle Mischungen mit destilliertem Wasser und Luftlagerung.....	27
Tab. 2.7: Übersicht über alle Mischungen mit destilliertem Wasser und Wasser/Vakuumlagerung...	27
Tab. 2.8: Übersicht über alle Mischungen mit Leitungswasser und Luftlagerung	28
Tab. 7.1: Chemische Bestandteile der beiden Schlacken	58

Abkürzungsverzeichnis

Ca.	Zirka
Bzw.	Beziehungsweise
z.B.	Zum Beispiel
AAB/AAS	Alkalisch aktiviertes Bindemittel/alkali activated slag
Mio.	Millionen
To.	Tonnen
Abh.	Abhängig
MPa	Megapascal (N/mm ²)
GPa	Gigapascal
W/B	Wasser/Bindemittelwert, oft aber auch Destilliertes Wasser/Bindemittel-Verhältnis
C	CaO
S	SiO ₂
H	H ₂ O
A	Al ₂ O ₃
F	Fe ₂ O ₃
CH	Ca(OH) ₂
M	MgO
°dH	Grad deutscher Härte
σ	Druckfestigkeit/Biegezugfestigkeit
ε	Verformung [%]
E	E-Modul
mM	Milli Mol
l	Liter
%	Prozent