

**Analyse und Optimierung der
Versatzeigenschaften im
Scheelit-Bergbau Mittersill**

Masterarbeit

am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde

vorgelegt von

Maria Walkner

eingereicht

Leoben am 1. März 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Analyse und Optimierung des pastösen Versatzes im Scheelitbergbau der Wolfram Bergbau- und Hütten AG in Mittersill (Salzburg, Österreich). Im Auftrag des Unternehmens wird geklärt, aus welchem Grund der eingebrachte Versatz trotz eines Bindemittelgehalts von 20 M% keine Festigkeit aufweist und mit welchen Maßnahmen ein Versatzprodukt mit messbarer Festigkeit erzielt werden kann. Laut Gewinnungsbetriebsplan ist eine Mindestdruckfestigkeit von 0,4 MPa für den eingebrachten Versatz erforderlich.

Das Versatzprodukt wird aus der entwässerten Bergetrube der Scheelitflotation und 20 M% eines Bindemittels in einem Durchlaufmischer hergestellt und mit einer Betonpumpe in den Abbauraum gepumpt. Das Bindemittel besteht aus 80 M% einer Gewebefilterasche der Salzburger Reststoffgesellschaft und 20 M% Zement CEM II B-S 42,5 N. Abhängig von der Frischwasserzugabe beträgt das Masseverhältnis zwischen Wasser und Bindemittel maximal 2,5, was einem Wasser/Zement-Verhältnis von 12,5 entspricht. Der hohe Wassergehalt ist erforderlich, um die Pumpbarkeit des Versatzproduktes zu gewährleisten und resultiert aus dem hohen Feinstanteil (Korngröße < 20 µm) der Berge sowie der Gewebefilterasche.

Mögliche Gründe für die geringe Festigkeit des eingebrachten Versatzes sind einerseits das hohe Wasser/Bindemittel-Verhältnis, andererseits kann es zwischen Bindemittel und den in der Flotation und Entwässerung verwendeten Reagenzien zu einer Wechselwirkung kommen, welche das Erstarrungsverhalten negativ beeinflusst.

Erstarrungsversuche nach ÖNORM EN 196-3 zeigen, dass sich die Zugabe der Flotationsreagenzien nicht negativ auf das Erstarrungsverhalten des Bindemittels auswirkt. Jedoch beinhaltet die verwendete Gewebefilterasche Anhydrit (CaSO_4), der hydratisiert und als Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) ausfällt. Die Folge ist eine kurze Verarbeitungszeit und eine geringe Festigkeit des Bindemittels. Da die Gewebefilterasche außerdem den Wasserbedarf erhöht, eignet sich die Bindemittelmischung aus Gewebefilterasche und Zement nicht für den Versatz.

Versuche mit 5 M% Zement CEM II B-S 42,5 N zeigen, dass der Wasserbedarf zum Herstellen einer pumpfähigen Versatzmischung gesenkt und somit ein Wasser/Bindemittel-Verhältnis von unter 6,0 erreicht werden kann. Derartige Versatzmischungen erreichen eine einaxiale Druckfestigkeit von über 1 MPa nach 28 Tagen. Eine weitere Verringerung des Wasser/Zement-Verhältnisses durch Zugabe von Fließmittel sowie die Verwendung von Zement CEM I 52,5 R zeigen keine weitere Steigerung der Festigkeit. Der Einsatz von Zement als alleiniges Bindemittel verbessert außerdem das Bluthverhalten des Pumpversatzes im Vergleich zur Bindemittelmischung aus Zement und Gewebefilterasche.

Versuche mit einem Bindemittelgemisch, bei dem die Gewebefilterasche durch Hüttensand ersetzt wurde, zeigen, dass die Neigung zum Bluten im Vergleich zu Versatzprodukten mit reinem Zement als Bindemittel verringert wird. Allerdings weisen solche Versatzmischungen einen erhöhten Wasserbedarf auf und erreichen eine geringere Festigkeit im Vergleich zu Versatzmischungen mit Zement als alleinigem Bindemittel.

Die durchgeführten Laborversuche zeigen, dass durch die Verwendung von 5 M% Zement als Bindemittel die geforderten Eigenschaften des Versatzproduktes im Hinblick auf Pumpbarkeit und Festigkeit erreicht werden können. Durch die Verringerung des Bindemittelgehalts im Versatzprodukt kann darüber hinaus mehr Bergematerial versetzt werden.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Inhaltsverzeichnis	1
Abkürzungsverzeichnis	3
1 Problemstellung	4
2 Stand der Technik	5
2.1 Bindemittel	5
2.1.1 Zement	5
2.1.2 Anhydrit.....	6
2.1.3 Flugasche.....	6
2.1.4 Hüttensand.....	6
2.2 Wasser/Bindemittel-Wert	7
2.3 Berge	7
2.4 Pumpfähigkeit	8
2.4.1 Fließmittel	8
3 Versuchsplanung und -durchführung	9
3.1 Erstarrung	9
3.2 Viskosität	9
3.3 Bluten	10
3.4 Festigkeit	11
4 Beschreibung der Anlagen und der Proben	12
4.1 Anlagenbeschreibung	12
4.2 Probenbeschreibung	13
4.2.1 Probenahme.....	13
4.2.2 Probencharakterisierung.....	13
5 Ergebnisse der Versuche	20
5.1 Erstarrung	20
5.1.1 Bindemittel und Bindemittelkomponenten	20
5.1.2 Auswirkung der Reagenzien auf das Erstarrungsverhalten	21
5.1.3 Mischungen mit Zement als Bindemittel	23
5.2 Viskosität	24
5.3 Bluten	26
5.3.1 Versatzmischungen mit CEM II B-S 42,5 N und Fließmittel.....	26
5.3.2 Versatzmischungen mit CEM II B-S 42,5 N und Hüttensand	28
5.4 Festigkeit	28
5.4.1 Versatzmischungen mit CEM II B-S 42,5 N und Fließmittel.....	28
5.4.2 Versatzmischungen mit CEM I 52,5 R und Fließmittel	29
5.4.3 Versatzmischungen mit CEM II B-S 42,5 N und Hüttensand	30
6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	33

7	Resümee	34
8	Literatur	I
9	Abbildungen	II
10	Tabellen	III
	Anhang.....	IV

Abkürzungsverzeichnis

A	Al ₂ O ₃ , Aluminiumoxid
C	CaO, Kalziumoxid
C ₂ S	Belit, Dicalciumsilikat
C ₃ A	Tricalciumaluminat
C ₃ S	Alit, Tricalciumsilikat
C ₄ AF	Calciumalumoferrit
CAH	Kalziumaluminathydrat
CH	Ca(OH) ₂ , Kalziumhydroxid, Portlandit
CSH	Kalziumsilikathydrat
D ₂₀	Durchgang in M% bei einer Korngröße von 20 µm
H	H ₂ O, Wasser
k ₅₀	Korngröße bei 50 M% Durchgang
k ₈₀	Korngröße bei 80 M% Durchgang
M	MgO, Magnesiumoxid, Periklas
M%	Masse-%
S	SiO ₂ , Silika
V%	Volums-%
W/B-Wert	Masseverhältnis Wasser zu Bindemittel
W/Z-Wert	Masseverhältnis Wasser zu Zement

1 Problemstellung

Diese Diplomarbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Wolfram Bergbau und Hütten AG, die am Standort Mittersill das Wolframerz Scheelit abbaut und zu einem Konzentrat weiterverarbeitet. In der Aufbereitung wird die Flotation als wichtigstes Trennverfahren eingesetzt. Dieser Prozess fordert eine Zerkleinerung auf $k_{80} < 200 \mu\text{m}$. Neben dem Scheelit-Konzentrat fallen dabei große Mengen an Berge an, welche entweder in Klärteichen entwässert und deponiert oder als Versatz in stillgelegte Abbaukammer eingebracht werden. Letztere Methode wird vom Unternehmen aufgrund der aufwändigen Genehmigungsverfahren für Deponien bevorzugt und soll weiter gefördert werden.

Laut Gewinnungsbetriebsplan wird zwischen Sturzversatz, Spülversatz und Pumpversatz (Pastöser Versatz) unterschieden. Für diese Arbeit ist jedoch nur der Pumpversatz von Belangen. Dieser soll durch Zugabe eines hydraulischen Bindemittels eine einaxiale Druckfestfestigkeit von mindestens 0,4 MPa erreichen. Das gegenwärtig verwendete Bindemittel besteht zu 80 M% aus Gewebefilterasche, die von der Salzburger Reststoffgesellschaft bezogen wird, und zu 20 M% aus Zement (CEM II B-S 42,5 N). Das Bindemittel wird diskontinuierlich geliefert und in Silos gelagert.

Im Flotationsprozess wird ein basisches Milieu erzeugt, außerdem kommen Sammler, Drücker und Schäumer zum Einsatz. Anschließend wird die bergeführende Trübe neutralisiert und zur Mischanlage gepumpt. Dort werden ca. 60 V% des Wasser-Berge-Gemischs unter Einsatz von Flockungsmittel entwässert. Die restliche Trübe wird über einen Bypass zur Mischanlage transportiert. Dort werden der Trübe 20 M% Bindemittel, bezogen auf die Trockenmasse des Bergematerials, zugegeben. Um die Pumpbarkeit bis zum Versatzort zu gewährleisten, wird bei Bedarf Frischwasser hinzugefügt.

Trotz des relativ hohen Bindemittelgehalts ist die Festigkeit des Versatzes zu gering, um diese prüftechnisch zu bestimmen. Im Zuge dieser Diplomarbeit sollen die Gründe dafür festgestellt werden. Es gilt abzuklären, ob die in Flotation bzw. Entwässerung eingesetzten Chemikalien negativen Einfluss auf Erstarrung bzw. Erhärtung des eingesetzten Bindemittels haben. Zu diesem Zweck werden Prüfverfahren laut ÖNORM EN 196 zur Ermittlung der Erstarrungszeiten und der Festigkeit angewendet.

Von größter Bedeutung ist auch die Messung der Viskosität um die Pumpbarkeit für die bestehende Anlagen zu gewährleisten. Zusätzlich soll vom Versatzprodukt kein Wasser abgegeben und der ökonomische Aspekt der Versatzproduktion beachtet werden. Das Bindemittel stellt den wichtigsten Kostenfaktor dar, weshalb dessen Anteil im besten Fall reduziert werden soll.

2 Stand der Technik

Das primäre Ziel von Versatz im Bergbau ist, Hohlräume zu stabilisieren, um Verbrüche und Setzungen an der Oberfläche zu verhindern. Werden als Versatzmaterial Aufbereitungsabgänge verwendet, können zusätzlich die Kosten für Deponien verringert werden. Ein weiterer ökonomischer Aspekt ist die Erhöhung des Ausbringens. Da durch das Einbringen von Versatz die Stabilität des Grubenbauwerks erhöht und Auflockerungen verhindert werden, kann der Erzkörper zu einem größeren Ausmaß abgebaut werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn der Versatz ein von der Gebirgsqualität abhängiges Maß an Festigkeit aufweist. Übliche Werte liegen zwischen 0,7 und 2 MPa [1]. Zu diesem Zweck wird ein hydraulisches Bindemittel verwendet. Diese Mischung wird pastöser Versatz, Pumpversatz oder Paste Fill genannt. Im Gegensatz zu Spülversatz tritt pastöser Versatz nicht aus den Hohlräumen aus, wodurch die Arbeitssicherheit gewährleistet wird. Zusätzlich kann der Wasseraustritt von nicht abdichtbaren Hohlräumen verhindert werden. [2], [3]

Da im Bergematerial oft wasserlösliche, umweltschädliche Elemente und Verbindungen enthalten sind, dient der pastöse Versatz auch dem Zweck, diese Stoffe zu binden und Umweltproblemen vorzubeugen. [4]

Die erforderliche Menge des Bindemittels stellt einen wichtigen Kostenfaktor in der Versatzherstellung dar. Neben Portlandzement werden Hochofenschlacke und Flugasche bzw. Mischungen dieser Materialien als Bindemittel verwendet. [4]

Die drei Versatzkomponenten Wasser, Berge und Bindemittel sind für die mechanischen Eigenschaften des Paste Fill verantwortlich.

2.1 Bindemittel

Bei der Auswahl des Bindemittels ist zu beachten, dass jeder Bergbaubetrieb eine individuelle Lösung finden muss, da es aufgrund der unterschiedlichen Einflussfaktoren keine universell einsetzbare Rezeptur gibt. Ausschlaggebend sind die gebirgsmechanischen Anforderungen, Umweltschutzrichtlinien und Kosten. [5]

Von Pirapakaran et al. wird gezeigt, dass sich bereits eine geringe Erhöhung des Bindemittelanteils positiv auf die Festigkeit auswirkt. Der Zusammenhang zwischen Bindemittelgehalt und Festigkeit ist linear. Üblicherweise werden im Paste Fill Bindemittelmengen zwischen 3 und 10 M% der eingesetzten Bergemasse verwendet, um die gewünschte Festigkeit zu erreichen. [5], [6]

Das Bindemittel, insbesondere Portlandzement, stellt in der Versatzproduktion den größten Kostenfaktor dar. Mit hydraulischen Zusätzen wird deshalb versucht, einen möglichst großen Anteil an Zement zu ersetzen. Dabei handelt es sich meist um Recyclingprodukte wie Hochofenschlacke oder Flugasche. [5]

2.1.1 Zement

Basis für die meisten Zementsorten bildet Portlandzementklinker mit den Hauptphasen C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF . Je nach Sorte können unterschiedliche Anteile an Hüttensand, Flugasche oder anderen Puzolanen enthalten sein. Zur Regelung der Abbindezeit wird Anhydrit oder Gips zugemahlen. Reaktionsgeschwindigkeit und Festigkeit werden von der Mahlfineinheit bzw. der spezifischen Oberfläche bestimmt. [7]

Mögliche Schäden an der Zementstruktur können durch den späteren Angriff von Sulfaten aus dem zugemahlenen Gips bzw. Anhydrit, sulfatischen Lösungen von außen oder durch Oxidation der sulfidischen Berge entstehen. Das Sulfat kann nicht vor der Erhärtung des Zementleims aufgebraucht werden und bildet auch im Zementstein mit freien Ca-Ionen Gips. Durch den resultierenden Kristallisationsdruck wird die Mikrostruktur geschädigt und die Festigkeit gesenkt. Dieser Vorgang wird Sulfatreiben

genannt und stellt besonders im Versatzbergbau ein großes Problem dar, da das Bergematerial oft sulfidische Minerale enthält. Die Beständigkeit gegen Sulfatangriff kann durch den Einsatz eines sulfatbeständigen Zements erhöht werden, jedoch entstehen dadurch höhere Kosten. [4] Die Verwendung eines Bindemittels, bestehend aus Portlandzement und Hochofenschlacke, wirkt sich bei hohen Sulfatgehalten positiv aus. Der Einsatz eines Bindemittels aus 80 M% gemahlener Hochofenschlacke und 20 M% Portlandzement erhöhte die Langzeitfestigkeit bei gleichem Bindemittelgehalt um das 5-fache gegenüber einer Bindemittelmischung, die zu je 50 M% aus Portlandzement und sulfatbeständigem Zement besteht. [5]

2.1.2 Anhydrit

Im pastösen Versatz wirkt Anhydrit aktivierend auf latent-hydraulische Zuschläge und fällt nach der Hydratation als Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) aus. So wird die Festigkeitsentwicklung beschleunigt. Langfristig wirkt sich Anhydrit jedoch negativ auf die Festigkeit aus, da die Bereitstellung von Sulfat das Sulfatreiben fördert. Durch die expansive Wirkung der sulfatischen Minerale wird die Zementmatrix nachträglich geschwächt. Das Resultat ist eine geringere Endfestigkeit. [8]

2.1.3 Flugasche

Als Flugasche wird ein feinkörniger Staub aus unterschiedlichen Industrieprozessen bezeichnet, der aufgrund seines Gehalts an hydraulischen Komponenten (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) als puzzolanischer Zuschlag verwendet wird. Die hydraulischen Eigenschaften sind stark von der chemischen Zusammensetzung, insbesondere dem Gehalt an amorphem Silika, abhängig. [9]

Peyronnard et al. untersuchen die Auswirkung unterschiedlicher Gehalte an verschiedenen puzzolanischen Zuschlägen auf die Eigenschaften von pastösem Versatz. SiO_2 - und Al_2O_3 -reiche Flugasche verringern den Wasserbedarf für eine bestimmte Konsistenz im Vergleich zu reinem Portlandzement. Die einaxialen Druckversuche zeigen, dass die Flugasche die Festigkeitsentwicklung aufgrund der späteren Hydratation verzögert. Dadurch ist eine Konsolidierung möglich, die sich positiv auf die Endfestigkeit auswirkt. Trotzdem sind die Endfestigkeiten geringer als bei reinem Portlandzement, da vom Klinker nicht genug CH eingebracht wird, um das gesamte Silika in CSH-Phasen umzusetzen. [8]

Andere Untersuchungen zeigen, dass höhere Endfestigkeiten erreicht werden können, wenn 25 M% des Portlandzements durch Flugasche ersetzt werden. [6]

2.1.4 Hüttensand

Glasig erstarrte Hochofenschlacke besitzt latent-hydraulische Eigenschaften und wird als Zumahlstoff im Zement (CEM II, CEM III und CEM V) genutzt. Der granuliert Hüttensand wird basisch durch gelöstes CH oder sulfatisch durch Gips bzw. Anhydrit angeregt. Die Reaktivität ist außerdem abhängig von der Mahlfeinheit. [5], [10]

Mit Bindemittelmischungen aus 80 M% Portlandzement und 20 M% gemahlener granulierter Hochofenschlacke kann Versatz mit Druckfestigkeiten über 2,5 MPa hergestellt werden. Im Vergleich dazu erreichten Versatzmischungen mit anderen puzzolanischen Zusätzen nur Werte zwischen 1,0 und 1,5 MPa. Den Grund dafür sehen Peyronnard et al. einerseits in der hohen Reaktivität und der damit verbundenen Bildung von CSH-Phasen, andererseits im verzögerten Erhärtungsprozess, der eine Konsolidierung ermöglicht. Aufgrund des späteren Wachstums der CSH-Phasen werden die Kapillarporen verkleinert und somit die Festigkeit gesteigert. [4]

2.2 Wasser/Bindemittel-Wert

Der übliche Feststoffgehalt im Pumpversatz beträgt je nach geforderter Konsistenz 70 bis 80 M%, daher werden meist W/B-Werte über 5 erreicht. Als Resultat unterscheidet sich der Erhärtungsvorgang von jenem in Beton oder Mörtel mit W/Z-Werten von ca. 0,4. Aufgrund des hohen W/B-Wertes ist viel überschüssiges Wasser vorhanden und der pH-Wert geringer. Nicht nur die Hydratation des Zements trägt zu Erstarrung und Erhärtung bei, sondern auch die Fällung von Hydratphasen aus der Porenlösung des Pumpversatzes.

Wenn Sulfate vorhanden sind, wird Gips gebildet. Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) fällt nur bei pH-Werten über 12 aus. Den größten Beitrag leisten jedoch die CSH-Phasen. Deren Fällung kann durch die Senkung des Wassergehalts gefördert werden. Um dies zu erreichen, muss es im Versatz zu Konsolidierung, Drainage und/oder Verdampfen kommen. Diese Vorgänge werden durch die Korngrößenverteilung des Bergematerials, die Dichtigkeit und Größe des zu verfüllenden Hohlraumes und die Art des Einbringens des Versatzes beeinflusst. Benzaazoua et al. stellen außerdem fest, dass sich eine Steigerung des Wassergehalts negativ auf die kurz- und langfristige Festigkeit auswirkt. [5] Durch Erhöhung des Feststoffgehalts hingegen können die mechanischen Eigenschaften verbessert werden [6].

Die Beobachtungen von Peyronnard et al. zeigen, dass der Wassergehalt von Paste Fill in den ersten 7 Tagen nach Probenherstellung stark sinkt. Zum einen setzt sich überschüssiges Wasser an der Oberfläche ab, zum anderen wird es durch die Bildung von Hydratphasen (CSH, Ettringit) verbraucht. Danach wird der Wassergehalt nur noch durch die Hydratation des Bindemittels gesenkt. Die Verringerung ist gering, da mit niedrigen Bindemittelgehalten gearbeitet wird. [8]

2.3 Berge

Ein Feinstanteil ($< 20 \mu\text{m}$) von mindestens 15 M% ist nötig, um die Abscheidung grober Bestandteile im Paste Fill zu verhindern. Das Mehlkorn fördert das Wasserrückhaltevermögen und wirkt dem Bluten entgegen. Außerdem erfüllt das Feinstkorn die Funktion eines Schmiermittels beim Pumpen von Paste Fill (siehe 2.4). [1], [11]

Die Menge an Feinstkorn im Bergematerial wirkt sich maßgeblich auf die Porosität des Paste Fill aus. Laut Fall et al. steigt mit wachsendem Feinkornanteil das Porenvolumen und die Festigkeit sinkt. Außerdem wird der Festigkeitsanstieg verlangsamt, da bei der Hydratation ein größeres Volumen zwischen den Körnern gefüllt werden muss. Gleichzeitig wird der Wasserbedarf erhöht, da bei großer Feinheit mehr Bindemittel benötigt ist um die Kornoberfläche zu benetzen. Die Folge ist ein höherer W/B-Wert bei gleicher Konsistenz. [12]

Durch Entschlammung des Bergematerials kann der Bindemittelverbrauch bei gleichbleibender Festigkeit gesenkt werden [11]. Fall et al. zeigen, dass Versatzmischungen mit einem Feinstanteil von bis zu 55 M% annähernd gleiche Festigkeiten erreichen, bei höheren Anteilen die einaxiale Druckfestigkeit jedoch deutlich sinkt [12]. Bei Verringerung des Feinstanteils wird der Feststoffgehalt erhöht und der W/B-Wert gesenkt, wodurch die Festigkeiten bei gleichbleibendem Bindemittelgehalt steigt [5].

Den negativen Effekten eines sehr feinen Bergematerials kann laut Amaratunga et al. durch die partielle Agglomeration der Fraktion $< 20 \mu\text{m}$ mit einem hydraulischen Bindemittel entgegengewirkt werden. Beim Mischen der Pellets mit unklassierten Bergen kann die einaxiale Druckfestigkeit des Paste Fill gegenüber Proben mit unbehandelten Bergen stark gesteigert werden. [12]

Auch die mineralogische Zusammensetzung der Berge beeinflusst die Festigkeit des Versatzes. Sulfidische Bestandteile (z.B. Pyrit, Magnetkies) oxidieren, die entstehenden Sulfate reagieren mit Bindemittelbestandteilen und verursachen Sulfatreiben. Die Bildung von Gips führt zwar zu einer beschleunigten Festigkeitsentwicklung, langfristig sinkt die Festigkeit jedoch wieder. [8], [10], [11]

2.4 Pumpfähigkeit

Laut Sivakugan et al. handelt es sich bei Paste Fill um Flüssigkeiten, die dem Modell nach Bingham genügen (siehe Gleichung 1).

$$\tau = \eta_p * \gamma + \tau_0 \quad (1)$$

τ_0 entspricht der „Fließgrenze“, die bei einem Schergeschwindigkeitsgefälle (γ) von Null überwunden werden muss. Die Steigung dieser Geraden wird als plastische Viskosität (η_p) bezeichnet. Für Paste fill wird die Gleichung nach Bingham bei hohen Scherraten erfüllt. Bei niedrigem Schergeschwindigkeitsgefälle steigt die Scherspannung (τ) nicht-linear mit dem Schergeschwindigkeitsgefälle und geht erst bei höheren Scherraten in einen linearen Bereich über. [13]

Die Pumpfähigkeit des Paste Fill hängt von unterschiedlichen Parametern ab. Um Stopfer zu verhindern, muss die Masse während des gesamten Pumpvorgangs gefügedicht bleiben. Dieser Zustand ist gegeben, wenn alle festen Partikel vollständig benetzt und gegeneinander beweglich sind. Damit der Förderdruck nur über die Flüssigkeit übertragen wird, ist die Sättigung mit Wasser nötig. Es muss genug Bindemittelleim vorhanden sein, um die gesamte Oberfläche der Zuschlagskörner zu bedecken. [14]

Beim Pumpen durch Rohre bildet sich aufgrund der erhöhten Scherbeanspruchung eine Randzonenleitschicht. Neben der vorhandenen Wassermenge ist der Widerstand dieses Schmierfilms für die Pumpfähigkeit ausschlaggebend. Der Wandreibungswiderstand wird durch eine Konzentration des Feinstkorns an der Wand verringert, die größeren Bestandteile sammeln sich in der Querschnittsmitte, wo die Masse eine zähere Konsistenz aufweist. Der Feinstanteil aus Zement und Bergematerial verbessert die Schmierung und ist für eine dichte Packung über den gesamten Querschnitt nötig. [1], [14]

2.4.1 Fließmittel

Als Fließmittel werden Zusatzstoffe bezeichnet, durch deren Zugabe die Verarbeitbarkeit verbessert bzw. die Menge an Anmachwasser verringert werden kann. Bei konstantem W/Z-Wert kann so die Förderung mit Pumpen erleichtert werden, bei gleicher Konsistenz wird eine Verringerung der Wassermenge und somit eine Festigkeitssteigerung ermöglicht. [10]

Die wirkungsvollsten Fließmittel sind organische Polymere mit Carboxylsäuregruppen. Ihre Wirkung beruht auf dem Aufbau aus negativ geladenen Hauptkettenmolekülen (Polyacrylsäure) und Seitenkettenmolekülen (Polyethylenoxid). Während sich die Hauptkettenmoleküle an die positiv geladenen Cationen anlagern, verursachen die Seitenmoleküle eine räumliche Abstoßung. Die Modifikation des Verhältnisses der Länge von Haupt- zu Seitenketten ermöglicht eine Veränderung der Eigenschaften. Durch die Zugabe von Fließmittel kann der nötige Förderdruck um bis zu 40 % reduziert werden. Sie dürfen jedoch nicht überdosiert werden, da es sonst zu Sedimentation und stärkerem Bluten kommt. Eine Entmischung führt außerdem zu Stopfern in der Pumpleitung. Bei zu hoher Dosierung kommt es außerdem zur Verzögerung der Hydratation. [7], [10], [15]

Die Wirkung von Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylether kann aufgrund unterschiedlicher Verarbeitungsparameter wie Temperatur, Mischzeit oder Zeitpunkt der Zugabe variieren. [15]

3 Versuchsplanung und -durchführung

Die für die Untersuchungen notwendigen Proben stammen von der Versatzanlage der Wolfram Bergbau und Hüttenanlage bzw. deren Lieferanten. Die Probencharakterisierung beinhaltet je nach Probe die chemische bzw. mineralogische Zusammensetzung, Korngrößenverteilung und Festigkeitsprüfung.

Zuerst wurden Erstarrungsversuche nach ÖNORM EN 196-3 durchgeführt. Diese sollten Aufschluss darüber geben, ob die geringe Festigkeit auf die bei der Flotation verwendeten Chemikalien zurückzuführen ist.

Die Probencharakterisierung und Erstarrungsversuche zeigten, dass sich das gegenwärtig verwendete Bindemittel aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung und feinen Korngrößenverteilung nicht für Paste Fill mit den gewünschten Eigenschaften eignet. Deshalb wurden die folgenden Versuche mit reinem Zement (Sorte CEM II B-S 42,5 N bzw. CEM I 52,5 R) als Bindemittel durchgeführt. Außerdem sollte der Einsatz eines Fließmittels geprüft werden, da so bei gleicher Viskosität eine Senkung des W/Z-Wertes und infolgedessen eine Festigkeitssteigerung erwartet werden kann. Um die optimale Fließmitteldosierung zu ermitteln, mussten das Blutverhalten und die Viskosität untersucht werden. Beide Eigenschaften sind für die Versatzproduktion im Scheelitbergwerk Mittersill von Bedeutung.

Laut Gewinnungsbetriebsplan ist eine einaxiale Mindestdruckfestigkeit des pastösen Versatzes im Scheelit-Bergbau Mittersill von 0,4 MPa vorgeschrieben [3]. Deshalb wurde geprüft, ob sich die Verwendung von Zement bzw. die Verringerung des W/Z-Wertes durch Fließmittelzugabe positiv auf die Festigkeit auswirkt und ob im Labor Versatzmischungen mit höherer Festigkeit hergestellt werden können.

Untersuchungen haben gezeigt (2.1.4), dass sich die Zugabe von Hüttensand positiv auf die Festigkeit von pastösem Versatz auswirken kann. Um festzustellen, ob das auch beim vorhandenen Versatzprodukt der Fall ist, wurden Versuche mit Mischungen von Hüttensand und Zement als Bindemittel durchgeführt.

3.1 Erstarrung

Das Verhalten des Bindemittels bzw. dessen Bestandteile (Zement und Gewebefilterasche) wurde zuerst untersucht. Anschließend folgten Versuche mit dem Bindemittel und den Reagenzien aus Flotation und Entwässerung sowie der Vergleich mit den zuvor ermittelten Erstarrungszeiten. Da sich vor allem organische Substanzen negativ auf die Erstarrung auswirken können, musste der Einfluss aller Reagenzien auf das Erstarrungsverhalten untersucht werden.

Zusätzlich wurde mit dem Vicat-Gerät das Erstarrungsverhalten von Versatzmischungen mit Bergematerial und unterschiedlichen Gehalten an Zement CEM II B-S 42,5 N untersucht und verglichen.

Da sich die Zugabe von Fließmittel negativ auf die Erstarrung auswirken kann, wurde auch geprüft, ob die zur Verfügung stehenden Fließmittel die Erstarrungszeiten beeinflussen.

3.2 Viskosität

Vor Ort wurden Messungen mit einem Rotationsviskosimeter (Modell 800 des Herstellers Ofite, siehe Abbildung 1) durchgeführt. Gemessen wurde die Viskosität des Versatzproduktes am Mischer und am Versatzort. Bei der Messung wird das Schergeschwindigkeitsgefälle stufenweise verringert, die jeweilige Scherspannung ermittelt und daraus unter Verwendung des Modells nach Bingham die Viskosität bestimmt.



Abbildung 1: Viskometer Model 800 des Herstellers Ofite

In den Laborversuchen wurde zur Probenherstellung die Mischfolge laut ÖNORM EN 196-3 eingehalten. Bei den Versatzmischungen mit Zement als Bindemittel wurde ebenfalls das oben genannte Rotationsviskosimeter verwendet. Bei Zugabe von Hüttensand war es nicht möglich, dieses Gerät zur Viskositätsmessung zu nutzen, da der Ringspalt nur 1 mm breit ist und die unterschiedlichen Hüttensande Partikel bis 4 mm enthalten. Daher wurde hier das Ausbreitmaß als Parameter für die Viskosität herangezogen.

Da die Pumpfähigkeit von großer Bedeutung ist, wurde die Viskosität aller alternativen Versatzmischungen untersucht und der W/Z-Wert variiert bis diese den Anforderungen genügen.

3.3 Bluten

Zur Bestimmung der Blutwassermenge wurde kein genormter Versuchsaufbau gewählt. Stattdessen wurde die Versatzmischung in einem dichten, abgedeckten Kunststoffgefäß (siehe Abbildung 2) gelagert. Nach 24 Stunden (± 15 Minuten) erfolgte die Wägung vor und nach dem vorsichtigen Abgießen des Blutwassers. Die Menge an Blutwasser wird in Folge auf die Bruttomenge der Mischung bezogen.



Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Feststellung der Blutwassermenge; abgedeckter Kunststoffbecher mit Versatzmischung

Bei der Verwendung von Polycarboxylat-Fließmitteln ist zu beachten, dass eine Überdosierung zu einer raschen Sedimentation und in weiterer Folge zu erhöhtem Bluten führen kann. Bei richtiger Dosierung ist jedoch eine Verringerung der Blutwassermenge möglich.

Um die Auswirkung des Fließmittels auf Basis von Polycarboxylatethers auf das Blutverhalten festzustellen, wurden zuerst Versuche mit Zement (CEM II B-S 42,5 N) und konstantem W/Z-Wert durchgeführt. Bei konstanter Viskosität wurde anschließend festgestellt, ob W/Z-Wert und Blutwassermenge durch die Zugabe größerer Fließmittelmengen verringert werden können.

Die unterschiedlichen Hüttensande weisen eine gröbere Korngrößenverteilung als Bergematerial und Zement auf. Es wurde untersucht, wie sich diese auf den Wasserbedarf und das Blutverhalten der Versatzmischungen auswirkt.

3.4 Festigkeit

Zur Bestimmung der Festigkeit wurden Prismen mit Abmessungen laut ÖNORM EN 196-1 hergestellt. Da nach 24 Stunden Lagerung im Klimaschrank bei 21 °C und ca. 85 % relative Luftfeuchte kein Ausformen ohne Beschädigung der Prüfkörper möglich gewesen wäre und die 1-Tages-Festigkeit für die Anwendung keine Rolle spielt, wurden diese erst 7 Tage im Klimaschrank gelagert und anschließend ausgeformt. Die Prüfung der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit und einaxialen Druckfestigkeit wurde nach 7 und 28 Tagen durchgeführt. Bis zur Prüfung der 28-Tages-Festigkeit wurden die ausgeformten Prismen weiter unter denselben Bedingungen gelagert.

Um einen aussagekräftigen Vergleich zwischen Hochofen- und Gießpfannenschlacke ziehen zu können, wurden Probekörper mit Normensand, 450 g Bindemittel (80 M% Schlacke, 20 M% CEM II B-S 42,5 N) und einem W/B-Wert von 0,5 nach ÖNORM EN 196-1 hergestellt. Diese wurden bereits nach 24 Stunden ausgeformt und bis zur Prüfung der 7-Tages- bzw. 28-Tages-Festigkeit unter Wasser gelagert.

Die Einzelergebnisse der Festigkeitsprüfung sind im Anhang dargestellt.

4 Beschreibung der Anlagen und der Proben

4.1 Anlagenbeschreibung

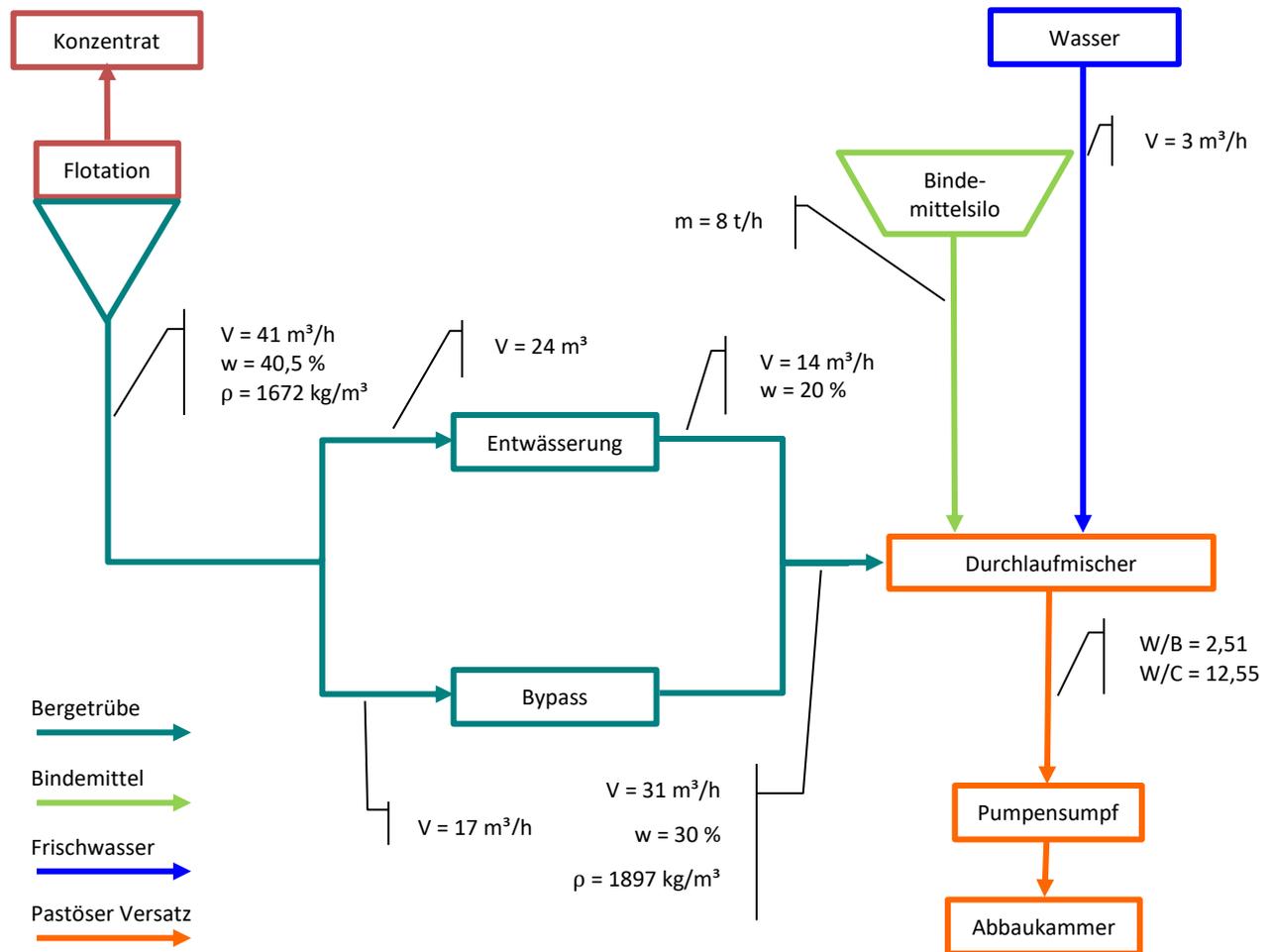


Abbildung 3: Schematischer Ablauf der Entwässerung und Versatzproduktion; den Strömen sind Volumen bzw. Masse sowie Wassergehalt zugeordnet

Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau der Versatzproduktion der Wolfram Bergbau und Hütten AG in Mittersill inklusive Volumen- bzw. Masseströmen und Trübeeigenschaften. Das Bergematerial wird als Trübe mit einem Wassergehalt von ca. 40 M% mit einer Kolbenmembranpumpe von der Aufbereitungsanlage zur Versatzanlage auf Teilsohle 1175 gepumpt. Dort werden auf drei Vakuumtrommelfiltern (siehe Abbildung 4) jeweils ca. 8 m³ Trübe pro Stunde entwässert, die restliche Trübe wird über einen Bypass geleitet. Nach Vereinigung beider Trübeströme beträgt der Wassergehalt ca. 30 M%. [3]

Die Firma Porr Bau GmbH mischt die Bindemittelkomponenten Zement und Gewebefilterasche chargenweise in einem Betonwerk und liefert das Bindemittel mit Silowägen an. Es wird in zwei Silos zu je 100 m³ gelagert und der Trübe im Durchlaufmischer zugegeben. Die Dosierung erfolgt über eine Prallplattenwaage und beträgt 20 M% der trockenen Bergemasse. [3]

Der Pumpversatz wird dann in den Pumpensumpf transportiert und mit einer Betonpumpe 500 bis 2 000 m in die zu verfüllende Abbaukammer gepumpt. Die Konsistenz des Pumpversatzes wird anhand des Stromverbrauchs der Pumpe beurteilt. Bei Bedarf wird im Durchlaufmischer Frischwasser zur Senkung der Viskosität hinzugefügt. [3]



Abbildung 4: Vakuumentrommelfilter in der Versatzanlage, Wolframbergwerk Mittersill

4.2 Probenbeschreibung

4.2.1 Probenahme

Im Rahmen einer Besichtigung der Versatzanlage des Wolframbergwerks Mittersill wurden Proben der Flotationsberge vor und nach der Entwässerung, sowie des Versatzproduktes direkt am Mischer und am Versatzort genommen. Das Unternehmen Wolfram Bergbau und Hütten AG stellte außerdem Proben der verwendeten Flotationsreagenzien bereit.

Proben des von der Firma Porr Bau GmbH hergestellten Bindemittels wurden an der Mischanlage im Betonwerk gezogen. Die Salzburger Reststoffgesellschaft lieferte dorthin eine Probe der Gewebefiltertasche.

Der im Bindemittel verwendete Zement CEM II B-S 42,5 N sowie der Zement der Sorte CEM I 52,5 R der Firma Leube Zement wurden direkt im Zementwerk abgefüllt.

Die unterschiedlichen Hüttensande stammen aus den Werken der Voestalpine AG in Linz und Donawitz.

4.2.2 Probencharakterisierung

4.2.2.1 Flotationsberge

Die mineralogische Zusammensetzung der Flotationsabgänge wurde von der Wolfram Bergbau und Hütten AG in Mittersill mittels Rietveld-Analyse bestimmt (Tabelle 1):

Tabelle 1: Phasenzusammensetzung der Flotationsberge laut Rietveld-Analyse

Mineral	Mineralgruppe	Gehalt/%
Hornblende	Inosilikat, Amphibolgruppe	33,1
Quarz	Tektosilikat, Quarzgruppe,	24,9
Albit	Tektosilikat, Feldspatgruppe	16,4
Orthoklas	Tektosilikate, Feldspatgruppe	7,3
Biotit	Phyllosilikat, Glimmergruppe	6,5
Chlorit	Phyllosilikat, Chloritgruppe	4,8
Muskovit	Phyllosilikat, Glimmergruppe	4,3
Kalzit	Karbonat	4,0

Die Messung mit dem Pyknometer ergibt eine Dichte von $3,08 \text{ g/cm}^3$.

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der lasergranulometrischen Analyse des Bergematerials und Tabelle 2 die charakteristischen Parameter der Korngrößenverteilung. Aus der Korngrößenverteilung geht hervor, dass der Feinstkornanteil ($\leq 20 \mu\text{m}$) bei 16,0 % liegt und 50 % des Bergematerials eine Korngröße $\leq 70,5 \mu\text{m}$ aufweisen.

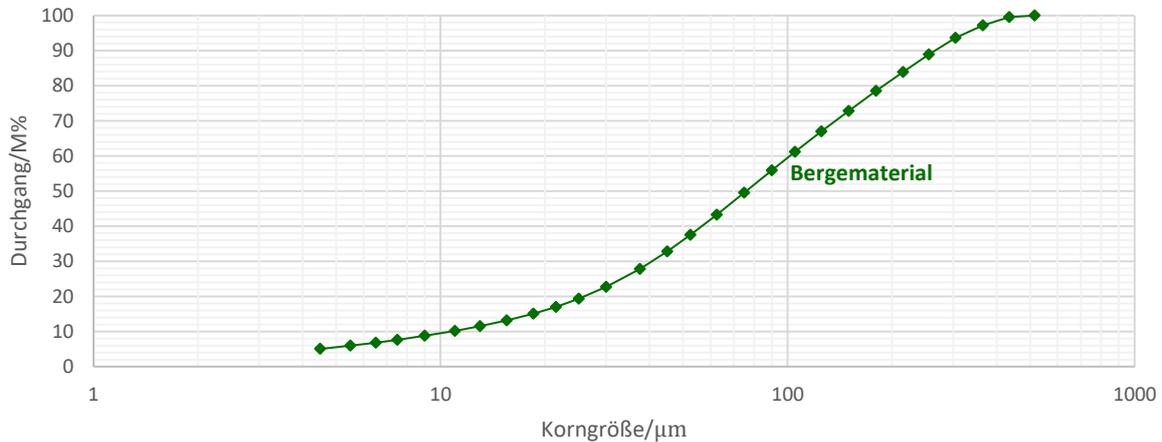


Abbildung 5: Korngrößenverteilungen des Bergematerials

Tabelle 2: Kennzahlen D_{20} , k_{50} und k_{80} der Korngrößenverteilung des Bergematerials

$D_{20}/\%$	16,0
$k_{50}/\mu\text{m}$	70,5
$k_{80}/\mu\text{m}$	189,6

4.2.2.2 Zement

Beim Zement handelt es sich um Portlandhüttenzement mit der Bezeichnung CEM II B-S 42,5 N. Dieser enthält Portlandzementklinker, 21 bis 35 % Hüttsand und einen Sulfatträger. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen beträgt 42,5 bis 62,5 MPa. Die durchgeführte Festigkeitsprüfung nach ÖNORM EN 196-1 zeigt den Verlauf der Festigkeitsentwicklung bis 28 Tage (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7). Nach 28 Tagen wurden eine Biegezugfestigkeit von 8,7 MPa und eine einaxiale Druckfestigkeit von 55,9 MPa erreicht.

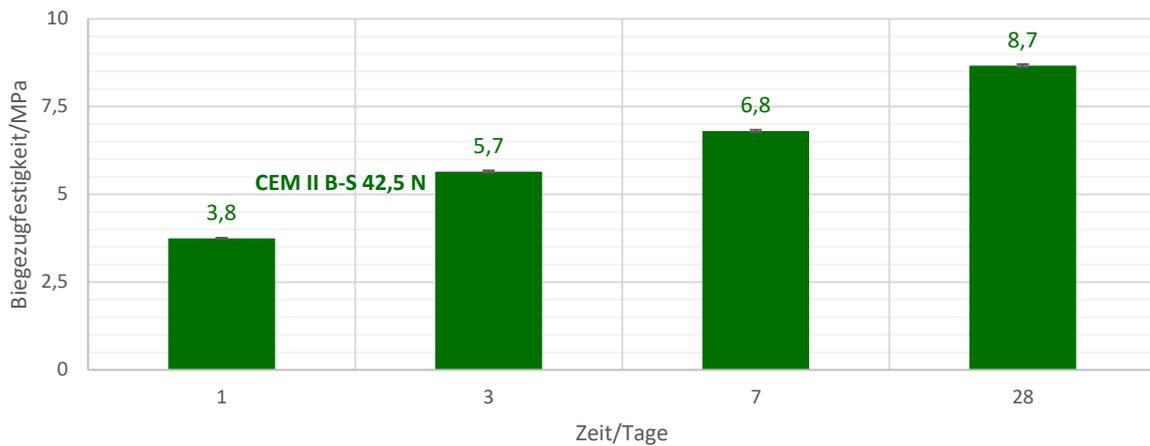


Abbildung 6: Ergebnis der 3-Punkt-Biegezugprüfung des Zements CEM II B-S 42,5 N nach ÖNORM EN 196-1

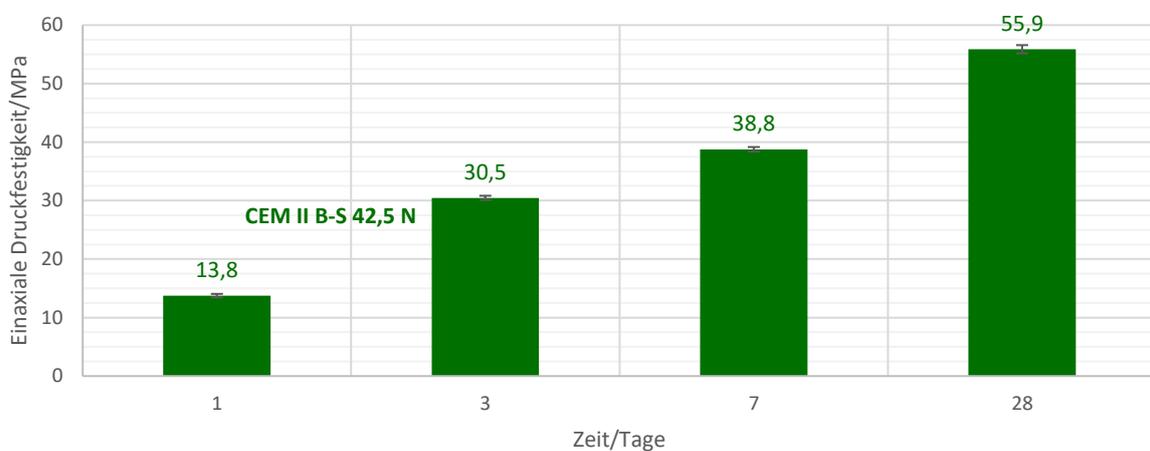


Abbildung 7: Ergebnis der einaxialen Druckfestigkeitsprüfung des Zements CEM II B-S 42,5 N nach ÖNORM EN 196-1

Die Zementsorte CEM I 52,5 R enthält mindestens 95 M% Portlandzementklinker und hat eine Mindestdruckfestigkeit von 52,5 MPa nach 28 Tagen.

4.2.2.3 Gewebefilterasche

Die Gewebefilterasche der Lenzing AG wurde von einem unabhängigen staatlich befugten und beeideten Zivilingenieur für technische Chemie charakterisiert und laut Deponieverordnung begutachtet. Da bei Gesamt- und Eluatgehalten relevanter Stoffe keine Überschreitungen festgestellt wurden, erfolgte die Einstufung als ungefährlicher und einlagerbarer Abfall. Laut Begutachtung der Gewebefilterasche enthält diese nennenswerte Gehalte an Aluminium (9,83 g/kg), Eisen (12,5 g/kg) und Zink (28,0 g/kg).[16]

Zusätzlich wurde eine röntgendiffraktometrische Analyse zur Bestimmung der Mineralphasen durchgeführt. Der kristalline Anteil der Probe besteht aus folgenden Komponenten: Anhydrit, Kalzit, Periklas und Portlandit (siehe Abbildung 8).

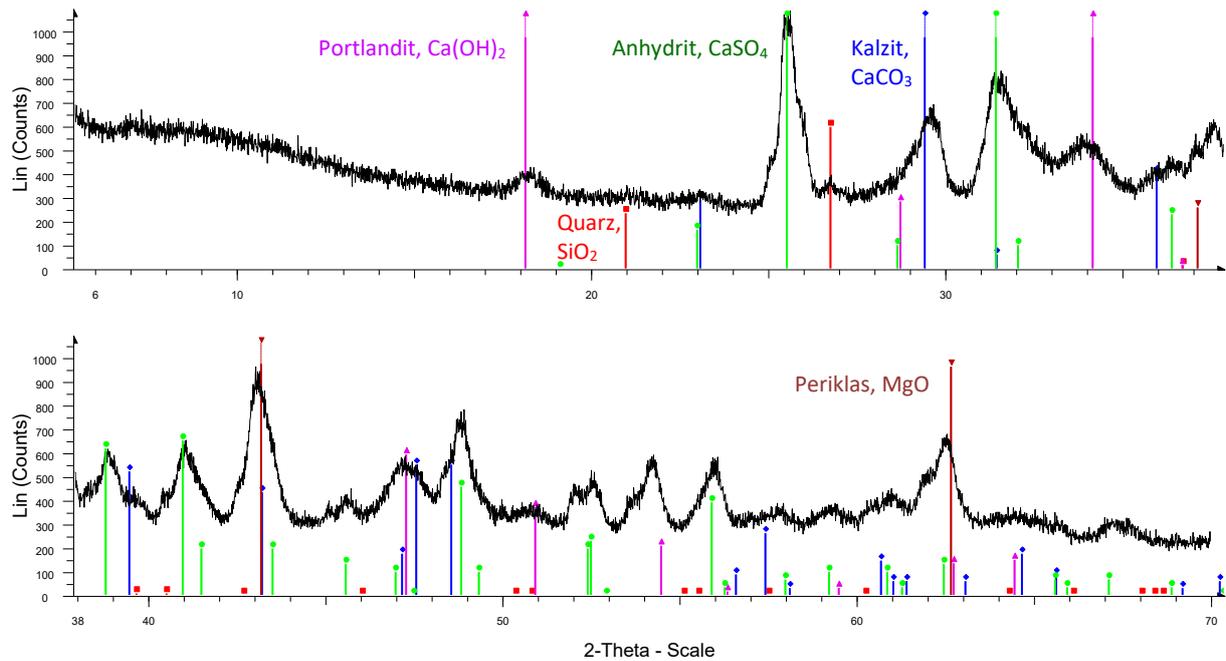


Abbildung 8: RDA der Gewebefilterasche aus Lenzing, Diffraktogramm und Peaks

Die vollständige chemische Analyse (Tabelle 3) bestätigt das Ergebnis der röntgendiffraktometrischen Analyse. Der aus dem Sulfatgehalt von 22,0 M% resultierende Anhydritgehalt beträgt ca. 46 M%

Tabelle 3: Chemische Analyse der Gewebefilterasche

	Gehalt/M%
CaO	40,9
MgO	8,71
Na ₂ O	1,06
K ₂ O	0,72
Al ₂ O ₃	4,3
Fe ₂ O ₃	2,26
Cr ₂ O ₃	< 0,01
SiO ₂	13,0
TiO ₂	0,32
MnO	0,26
P ₂ O ₅	1,34
SO ₃	22,0

Bei einer lasergranulometrischen Untersuchung (siehe Abbildung 9 und Tabelle 4) wurde festgestellt, dass 55,1 % der Gewebefilterasche ≤ 20 µm und 80 % ≤ 96,1 µm sind.

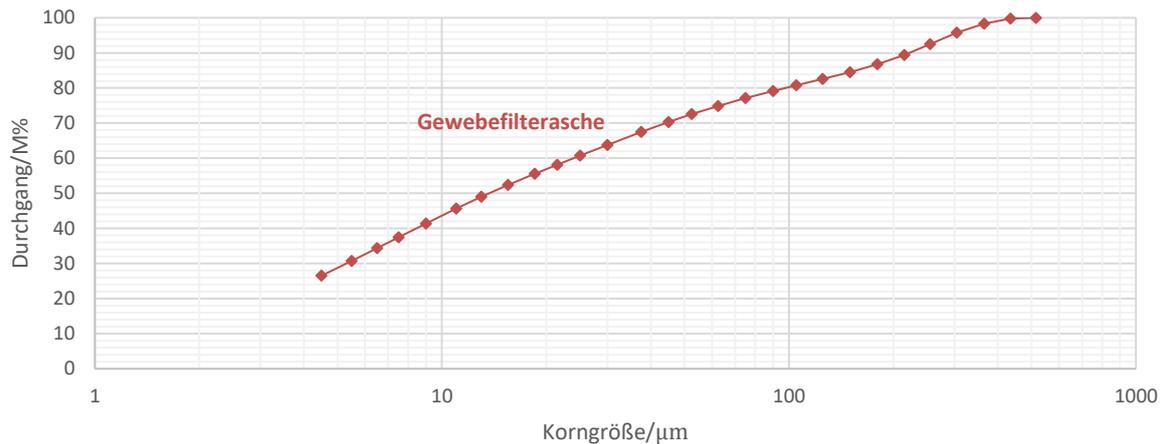


Abbildung 9: Korngrößenverteilung der Gewebefilterasche

Tabelle 4: Kennzahlen D_{20} , k_{50} und k_{80} der Korngrößenverteilung der Gewebefilterasche

$D_{20}/\%$	55,1
$k_{50}/\mu\text{m}$	19,8
$k_{80}/\mu\text{m}$	96,1

4.2.2.4 Bindemittel

Für das Verhalten im Versatz ist die Zusammenwirkung der einzelnen Bindemittelbestandteile ausschlaggebend, weshalb die Eigenschaften der Bestandteile und jene der Mischung untersucht wurden.

Um die maximal zu erwartende Festigkeit abschätzen zu können, wurde eine Festigkeitsprüfung nach ÖNORM EN 196-1 durchgeführt. Die Auswertungen in Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen, dass die Normprismen nach 28 Tagen eine Biegezugfestigkeit von 2,0 MPa und eine Druckfestigkeit von 10,2 MPa erreichen. Die geringe Festigkeit ist ein Resultat des geringen Zementgehalts und des hohen Gehalts an Anhydrit in der Gewebefilterasche. Die Entstehung von Gips aus der Hydratation des Anhydrits trägt zur Festigkeitsentwicklung bei, führt jedoch auch zu einer Volumenzunahme. Die Prismen mussten vor der Festigkeitsprüfung abgeschliffen werden.

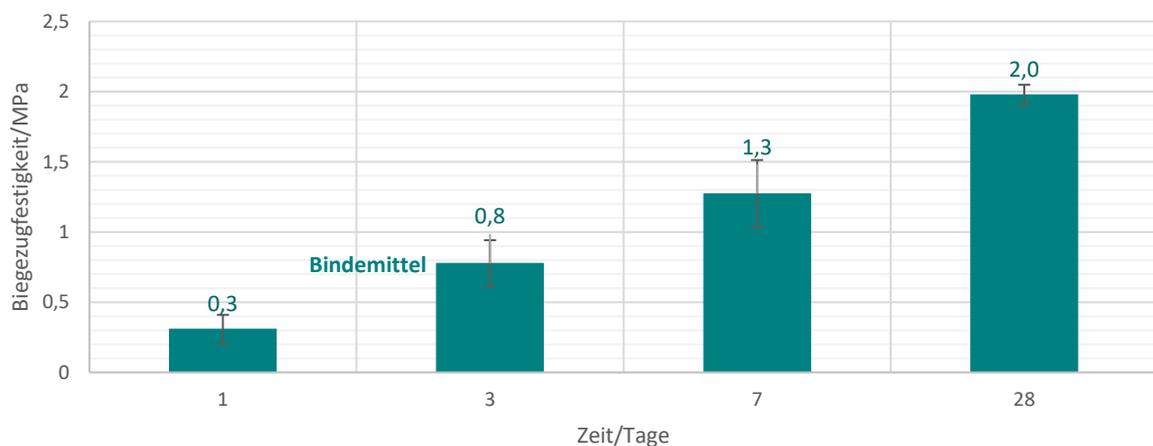


Abbildung 10: Ergebnis der 3-Punkt-Biegezugprüfung des Bindemittels nach ÖNORM EN 196-1

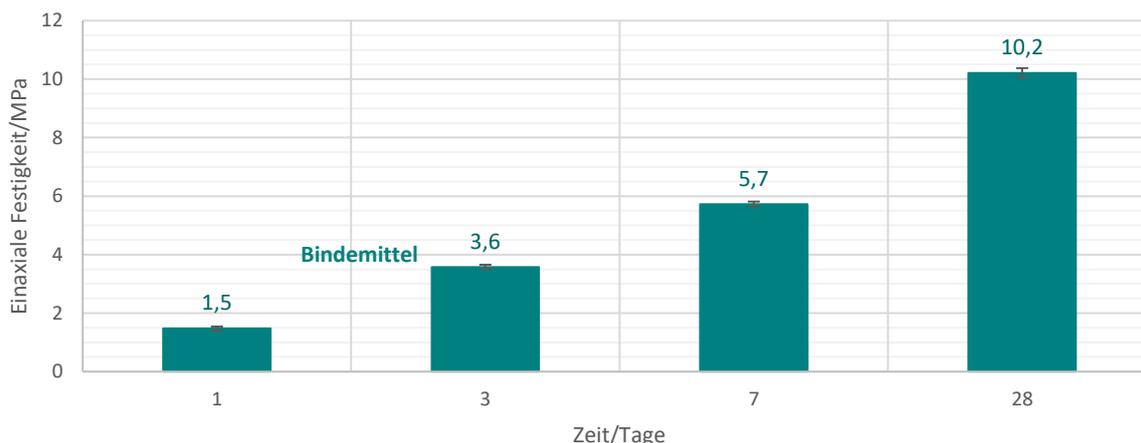


Abbildung 11: Ergebnis der einaxialen Druckfestigkeitsprüfung des Bindemittels nach ÖNORM EN 196-1

4.2.2.5 Hüttensand

Bei den drei unterschiedlichen Hüttensanden handelt es sich um Nebenprodukte der Stahlerzeugung.

- Hochofenschlacke aus Donawitz
- Hochofenschlacke aus Linz
- Gießpfannenschlacke aus Linz

Die chemische Analyse (Tabelle 5) ergibt, dass alle drei Proben hohe Gehalte an SiO_2 , CaO , Al_2O_3 und MgO aufweisen. Die Zusammensetzung der beiden Hochofenschlacken unterscheidet sich nur gering durch den CaO - und MgO -Gehalt. Die Gießpfannenschlacke hingegen enthält deutlich weniger SiO_2 , jedoch mehr CaO , Fe und doppelt so viel Al_2O_3 .

Tabelle 5: Chemische Analyse der Hüttensande

	Hochofenschlacke Donawitz	Hochofenschlacke Linz	Gießpfannenschlacke Linz
$\text{SiO}_2/\text{M}\%$	37,6	37,8	10,3
$\text{CaO}/\text{M}\%$	29,8	35,4	44,8
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{M}\%$	11,0	10,8	22,2
$\text{MgO}/\text{M}\%$	11,2	8,78	8,74
$\text{Na}_2\text{O}/\text{M}\%$	0,58	0,50	0,10
$\text{K}_2\text{O}/\text{M}\%$	2,01	1,21	0,05
$\text{Fe}/\text{M}\%$	0,35	0,49	8,24
$\text{Mn}/\text{M}\%$	2,40	1,19	2,59

Geringe Gehalte an TiO_2 , Cr_2O_3 , P_2O_5 , S und/oder V_2O_5

Die Siebung der Proben (Abbildung 12 und Tabelle 6) zeigte, dass die Gießpfannenschlacke die feinste Korngrößenverteilung aufweist. Die beiden Hochofenschlacken unterscheiden sich nur gering und haben beide nur einen geringen Anteil an Feinstkorn.

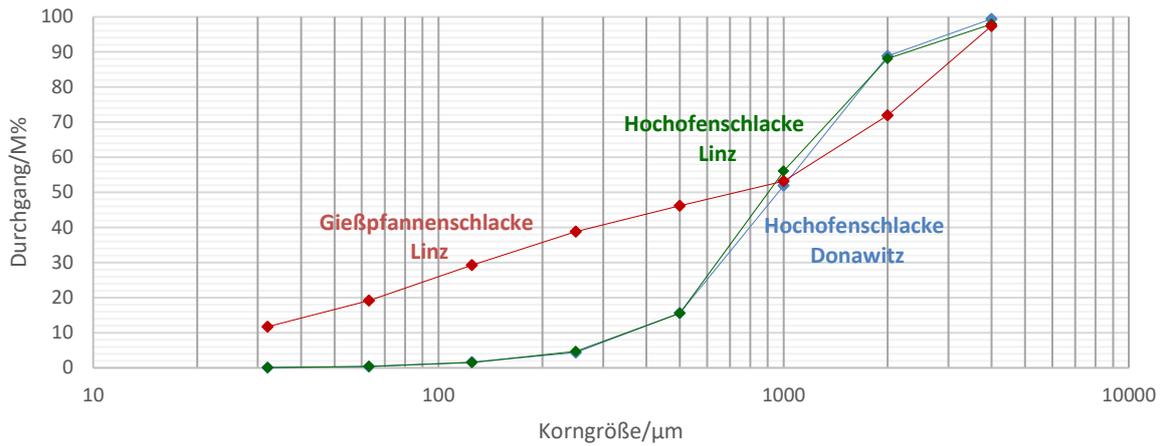


Abbildung 12: Korngrößenverteilung der Hüttensande aus Linz und Donawitz

Tabelle 6: Kennzahlen D_{20} , k_{50} und k_{80} der Korngrößenverteilung der Hüttensande aus Linz und Donawitz

	Hochofenschlacke Donawitz	Hochofenschlacke Linz	Gießpfannenschlacke Linz
$D_{50}/\%$	0,2	0,3	16,1
$k_{50}/\mu\text{m}$	973,2	925,3	771,0
$k_{80}/\mu\text{m}$	1759,9	1746,5	2632,8

5 Ergebnisse der Versuche

5.1 Erstarrung

5.1.1 Bindemittel und Bindemittelkomponenten

Abbildung 13 zeigt das Ergebnis der Erstarrungsversuche des Bindemittels und dessen Bestandteilen. In Tabelle 7 werden die Resultate zusammengefasst. Die Versuchsauswertung verdeutlicht die rasche Erstarrung des Bindemittels mit einem Erstarrungsbeginn nach 19 Minuten und einem Erstarrungsende nach 43 Minuten. Im Gegensatz dazu beginnt die Erstarrung des Zements erst bei 215 Minuten.

Eine Erklärung für die außergewöhnlich rasche Erstarrung liefert die röntgendiffraktometrische Analyse der Gewebefilterasche (siehe Abbildung 8). In Kombination mit Wasser beginnt sofort die Hydratation des Anhydrits. Dieser Vorgang führt zum schnellen Erstarrungsbeginn und einer Volumenzunahme. Der Vicat-Ring musste während des Versuchs mehrmals abgestrichen werden, um eine Beeinträchtigung der Funktionsweise des Gerätes zu verhindern.

Aus Wassergehalt und Normensteife geht hervor, dass der Wasserbedarf von Gewebefilterasche bzw. Bindemittel höher ist als jener des reinen Zements.

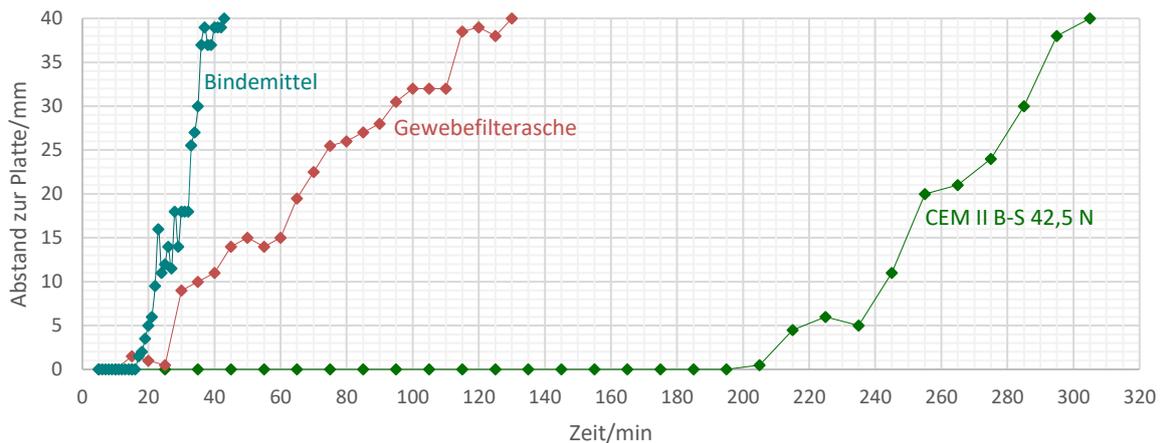


Abbildung 13: Erstarrungsverhalten von Bindemittel und Bindemittelbestandteilen; Ergebnis der Erstarrungsversuche nach ÖNORM EN 196-3

Tabelle 7: Erstarrungsverhalten von Bindemittel und Bindemittelbestandteilen; Auswertung der Erstarrungsversuches nach ÖNORM EN 196-3

	Bindemittel	Gewebefilterasche	CEM II B-S 42,5 N
Wassergehalt/M%	37	37	30
Normensteife/mm	3	5	6
Erstarrungsbeginn/min	19	30	215
Erstarrungsende/min	43	130	305

5.1.2 Auswirkung der Reagenzien auf das Erstarrungsverhalten

Bei der Flotation werden unterschiedliche Reagenzien verwendet. Die Mengenangaben beziehen sich auf eine Frischaufgabe von 73 t/h.

- a) 40 kg/h
- b) 2,2 kg/h
- c) 1 kg/h
- d) 1 kg/h
- e) 1 kg/h

Beim Flotationsprozess wird der pH-Wert stark erhöht. Dieser muss vor der Entwässerung durch Einleiten von Kohlendioxid gesenkt werden. Als Flockungsmittel wird Aluminiumsulfat eingesetzt.

Die Auswertung der Versuche ist in Abbildung 14 und Tabelle 8 dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Reagenzien a), b), c) und e) die Erstarrung zwar geringfügig beeinflussen, diese jedoch nicht verzögern bzw. behindern, sondern leicht beschleunigen. Bei Zugabe aller Reagenzien kann eine leichte Verzögerung von Erstarrungsbeginn und -ende beobachtet werden. Da diese nur 10 bzw. 5 Minuten beträgt, erfolgt die Erstarrung dennoch um ca. 2,5 Stunden früher als bei reinem Zement.

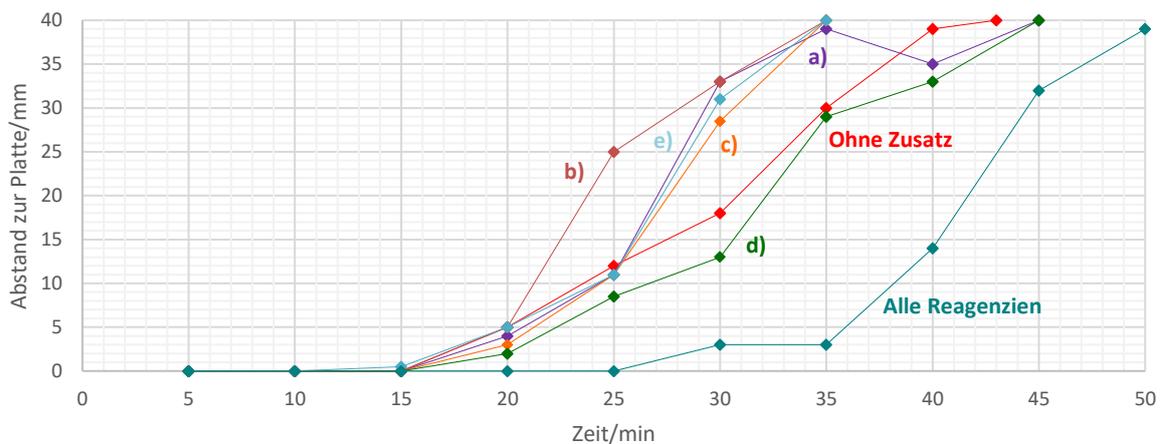


Abbildung 14: Erstarrungsverhalten des Bindemittels ohne und mit Flotationsreagenzien; Ergebnis der Erstarrungsversuche nach ÖNORM EN 196-3

Tabelle 8: Erstarrungsverhalten von Bindemittel ohne und mit Flotationsreagenzien; Auswertung des Erstarrungsversuches nach ÖNORM EN 196-3

	Ohne Zusatz	a)	b)	c)	d)	e)	Alle Reagenzien
Dosierung/g		0,26	0,04	0,01	0,02	0,04	
Wassergehalt/M%	37	36	36	36	36	36	37
Normensteife/mm	3	5	5	5	5	5	6
Erstarrungsbeginn/min	20	20	20	20	25	20	30
Erstarrungsende/min	45	45	35	35	45	35	50

Um einen möglichen negativen Einfluss des als Flockungsmittel verwendeten Aluminiumsulfats festzustellen, kamen Proben der Flotationsberge vor und nach der Entwässerung zum Einsatz. Wie beim Versatzprodukt wurden den getrockneten Flotationsabgängen 20 M% Bindemittel hinzugefügt. In Abbildung 15 und Tabelle 9 ist der Vergleich beider Versuche dargestellt. Sowohl mit als auch ohne Aluminiumsulfat tritt der Erstarrungsbeginn erst nach über 9 Stunden auf. Auch der spätere Verlauf zeigt nur geringe Unterschiede. Der Versuch mit dem Flockungsmittel überschreitet zwar die maximale Versuchsdauer des Vicat-Geräts. Eine vollständige Erstarrung konnte jedoch händisch nach etwa 14 Stunden festgestellt werden.

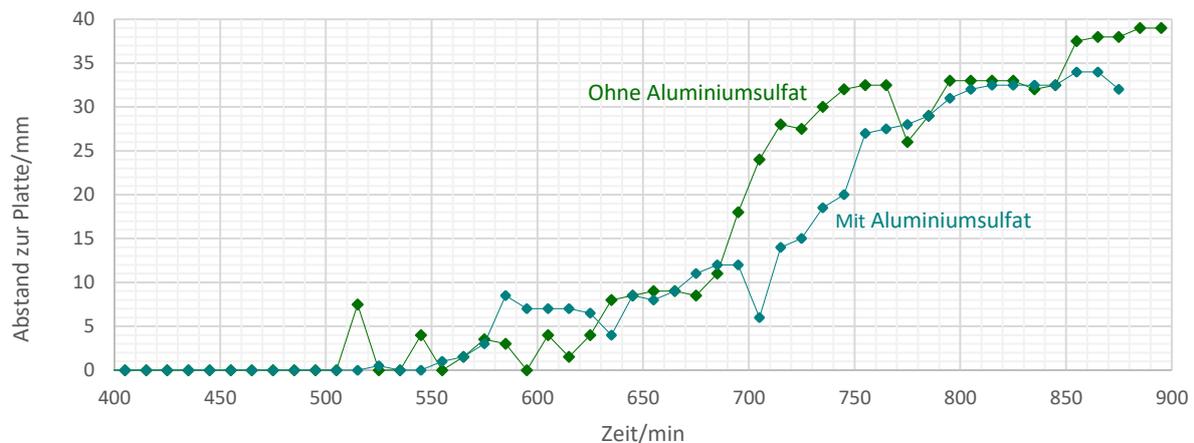


Abbildung 15: Erstarrungsverhalten des pastösen Versatzes mit und ohne Zugabe des Flockungsmittels Aluminiumsulfat; Ergebnis der Erstarrungsversuche nach ÖNORM EN 196-3

Tabelle 9: Erstarrungsverhalten des pastösen Versatzes mit und ohne Zugabe des Flockungsmittels Aluminiumsulfat; Auswertung des Erstarrungsversuches nach ÖNORM EN 196-3

	Mit Aluminiumsulfat	Ohne Aluminiumsulfat
Wassergehalt/M%	176	176
Normensteife/mm	8	6
Erstarrungsbeginn/min	575	515
Erstarrungsende/min	> 900	885

5.1.3 Mischungen mit Zement als Bindemittel

5.1.3.1 Versatzmischungen ohne Fließmittel

Der Vergleich des Erstarrungsverhaltens von Versatzmischungen mit 5 bzw. 10 M% CEM II B-S 42,5 N (bezogen auf die trockene Bergmasse) in Abbildung 16 und Tabelle 10 zeigt, dass die Erstarrung der Probe mit 10 M% Zement schneller verläuft. Im Vergleich dazu tritt der Erstarrungsbeginn des Paste Fill mit 5 M% Zement um 25 Minuten, das Erstarrungsende um 145 Minuten später ein. Die Zugabe einer größeren Zementmenge verringert außerdem den Wasserbedarf. Der W/Z-Wert sinkt von 6,06 auf 5,31.

Es konnte festgestellt werden, dass die Proben trotz des hohen W/Z-Werts innerhalb eines messbaren Zeitraums und früher als das im Bergbau verwendete Versatzprodukt vollständig erstarren.

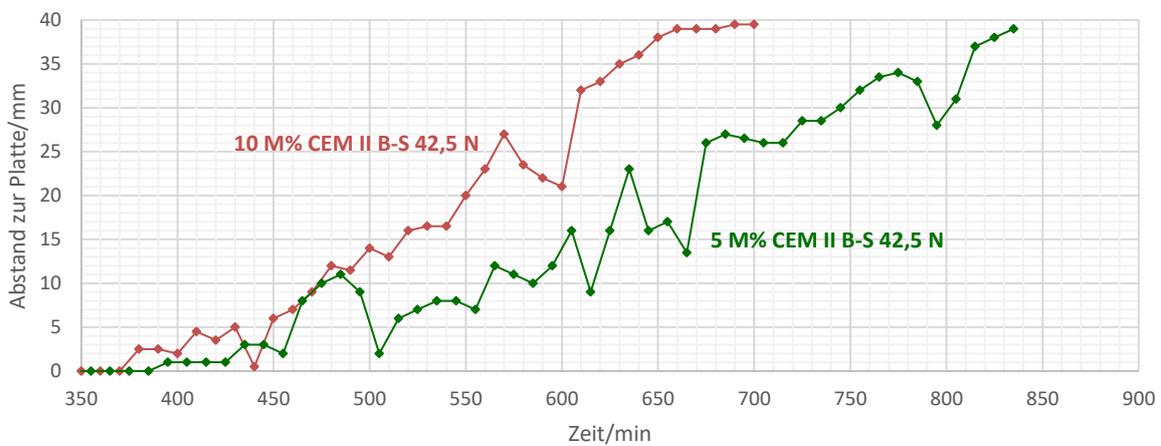


Abbildung 16: Erstarrungsverhalten von Versatzmischungen mit unterschiedlichen Zementgehalten; Ergebnis der Erstarrungsversuche nach ÖNORM EN 196-3

Tabelle 10: Erstarrungsverhalten von Versatzmischungen mit unterschiedlichen Zementgehalten; Auswertung des Erstarrungsversuches nach ÖNORM EN 196-3

	5 M% CEM II B-S 42,5 N	10 M% CEM II B-S 42,5 N
Wassergehalt/M%	606	531
Normensteife/mm	8	10
Erstarrungsbeginn/min	435	410
Erstarrungsende/min	835	690

5.1.3.2 Versatzmischungen mit Fließmittel

Abbildung 17 und Tabelle 11 zeigen das Ergebnis der Erstarrungsversuche von Versatzmischungen mit 5 M% CEM II B-S 42,5 N mit und ohne Zugabe von Fließmittel. Die Fließmittelmenge bezieht sich auf die Zementmasse. Der Wasserbedarf zum Erreichen der Normensteife unterscheidet sich bei beiden Mischungen nur gering. Auf die Erstarrungszeiten wirkt sich das Fließmittel verzögernd aus. Der Unterschied von Erstarrungsbeginn bzw. -ende der Paste-Fill-Mischung mit Fließmittel im Vergleich zu jener ohne Fließmittel beträgt 30 bzw. 50 Minuten.

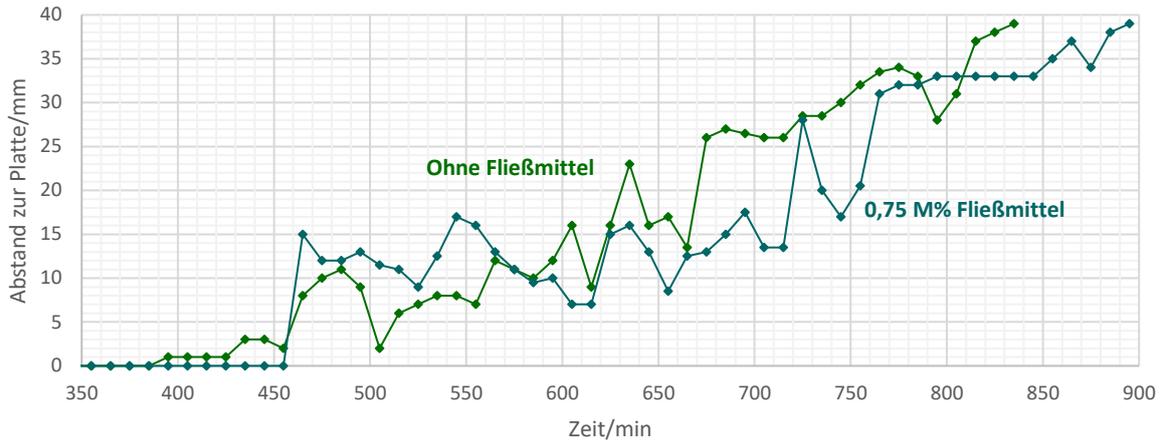


Abbildung 17: Erstarrungsverhalten von Versatzmischungen mit 5 M% CEM II B-S 42,5 N mit und ohne Fließmittel; Ergebnis der Erstarrungsversuche nach ÖNORM EN 196-3

Tabelle 11: Erstarrungsverhalten von Versatzmischungen mit 5 M% CEM II B-S 42,5 N mit und ohne Fließmittel; Auswertung des Erstarrungsversuches nach ÖNORM EN 196-3

	Ohne Fließmittel	0,75 M% Fließmittel
Wassergehalt/%	606	605
Normensteife/mm	8	8
Erstarrungsbeginn/min	435	465
Erstarrungsende/min	835	885

5.2 Viskosität

Abbildung 18 zeigt den Verlauf der Viskosität der Versatzprodukte. Als „Mischer $\eta_p <$ “ wurde die Probe mit üblicher Konsistenz bezeichnet. „Mischer $\eta_p >$ “ stellt die maximale Viskosität eines noch pumpfähigen Versatzproduktes dar. In diesem Fall wurde die zugegebene Menge an Frischwasser minimiert. Beide stammen aus dem Pumpensumpf. Die Eigenschaften der Produkte aus dem Mischer unterscheiden sich vor allem in der Fließgrenze (τ_0). Die Probe „Abbau“ wurde am Versatzort entnommen. Als problematisch stellte sich bei den Messungen die rasche Sedimentation der festen Bestandteile heraus.

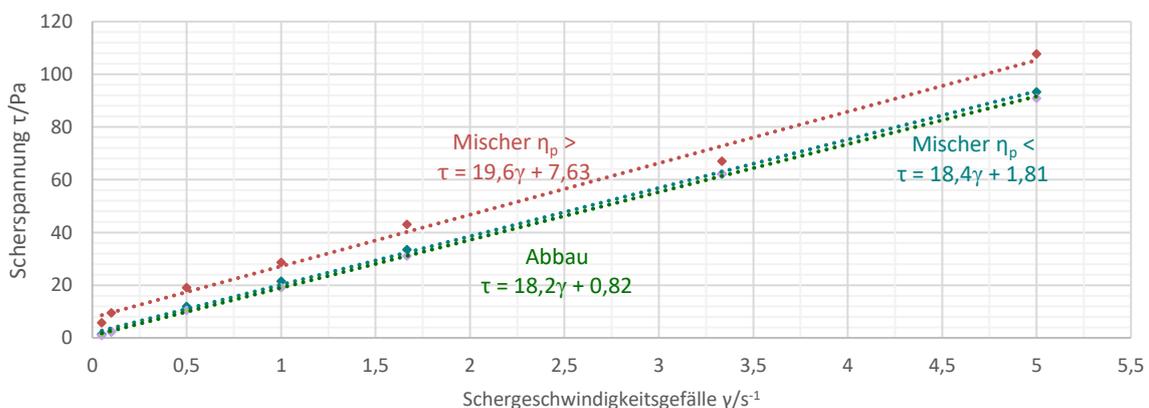


Abbildung 18: Ergebnis der Viskositätsmessung der beprobten Versatzprodukte vor Ort und Gleichung nach Bingham

Abbildung 19 zeigt, dass die Viskosität beider Mischungen mit steigendem Fließmittelgehalt und konstantem W/Z-Wert sinkt. Bei Versatzmischungen mit 10 M% Zement ist dieser Effekt geringfügig stärker ausgeprägt. Mit Ausnahme einer Mischung (10 M% Zement, ohne Fließmittel) entsprechen alle dem geforderten Wert von < 19,6 Pa·s. Es kann außerdem eine Annäherung an Newton'sche Flüssigkeiten festgestellt werden, da ab 1,0 M% Fließmittel die Fließgrenze (τ_0) aller Proben 0 Pa·s beträgt.

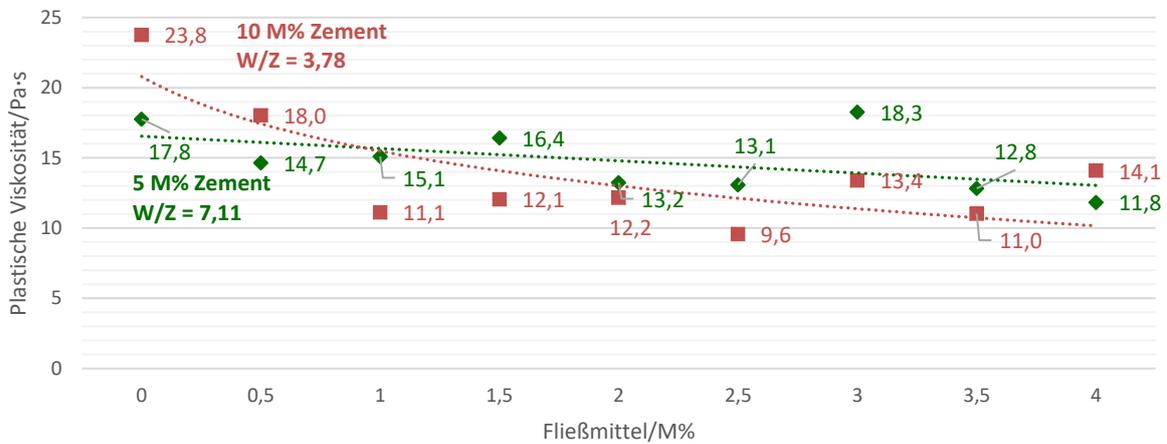


Abbildung 19: Plastische Viskosität nach Bingham in Abhängigkeit des Fließmittelgehalts für Versatzmischungen mit 5 bzw. 10 M% CEM II B-S; Fließmittel Glenium C 361

Abbildung 20 zeigt das Ergebnis der Versuche zur Ermittlung des Wasserbedarfes, der für eine bestimmte Konsistenz benötigt wird, in Abhängigkeit der Fließmittelmenge. Die durchschnittliche Viskosität beträgt 17,1 Pa·s und liegt somit unter dem geforderten Maximalwert. Aufgrund des stärkeren Blutens bei höheren Fließmittelgehalten wurden maximal 2 M% verwendet. Da aus Kostengründen eine Zementzugabe von 10 % nicht realistisch ist, wurden die Versuche nur mit 5 M% Zement durchgeführt.

Das Ergebnis zeigt, dass der W/Z-Wert für Versatzmischungen gleicher Viskosität durch die Zugabe von Fließmittel gesenkt werden kann. Die stärkste Reduktion ist zwischen Null und einem Masseprozent Fließmittel erkennbar.

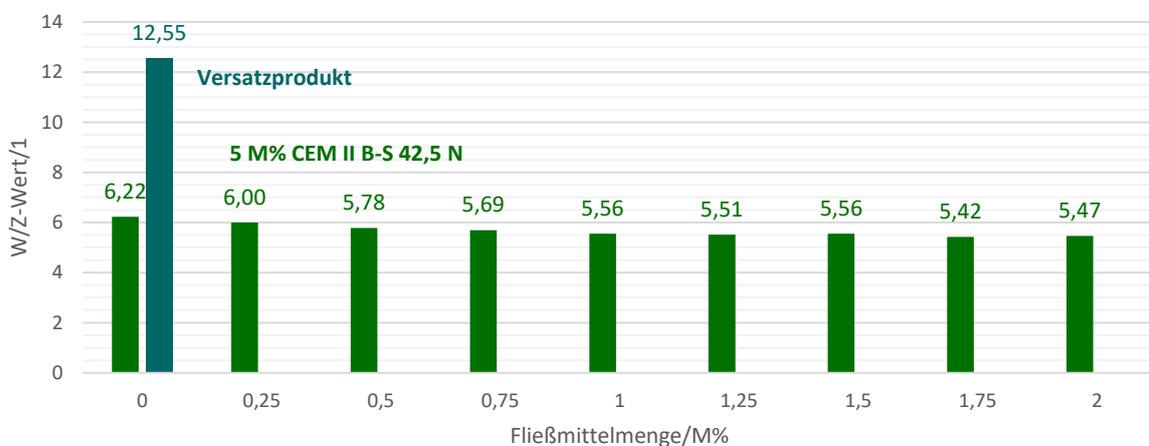


Abbildung 20: W/Z-Werte von Versatzmischungen gleicher Viskosität in Abhängigkeit des Fließmittelgehalts; Fließmittel Glenium C 361

5.3 Bluten

5.3.1 Versatzmischungen mit CEM II B-S 42,5 N und Fließmittel

Zur Ermittlung der Blutwassermenge in Abhängigkeit der Fließmittelmenge wurde der W/Z-Wert konstant gehalten und die Menge an Glenium C 361 in 0,5-M%-Schritten von 0,0 auf 2,5 M% gesteigert. Die Auswertung (Abbildung 21) zeigt für beide Zementgehalte ein Minimum der Blutwassermenge bei 1 M%. Bei höheren Gehalten stieg die Neigung zum Bluten eindeutig an. Auffällig war außerdem, dass trotz des höheren W/Z-Werts die Mischungen mit 5 M% Zement weniger zum Bluten neigten.

Im Vergleich dazu kommt es bei einer Versatzmischung, die der Zusammensetzung des in Mittersill verwendeten Paste Fill entspricht, zur Absonderung von Blutwasser im Ausmaß von 2,7 M% der Gesamtmasse.

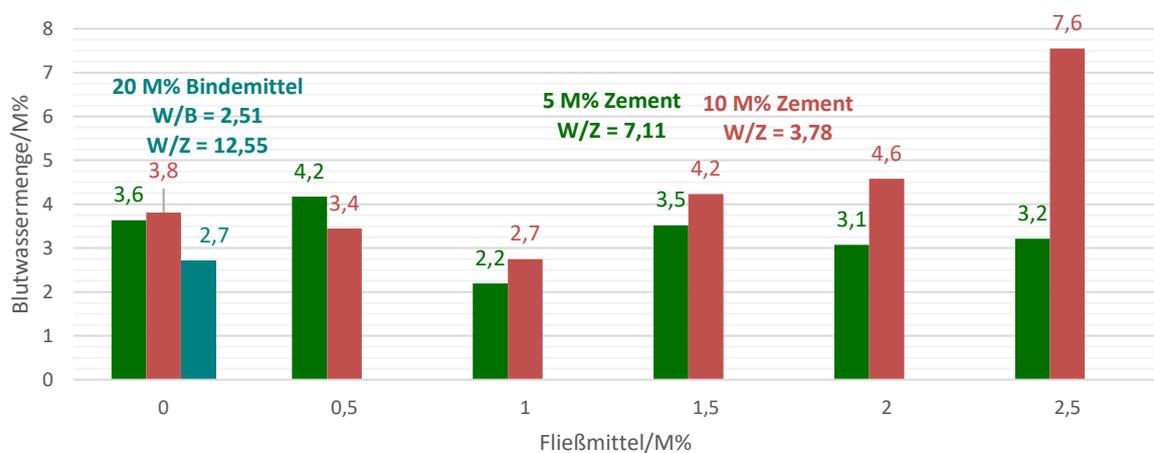


Abbildung 21: Blutwassermenge in Prozent der Gesamtmasse in Abhängigkeit des Fließmittelgehalts für Versatzmischungen mit CEM II B-S und der eingesetzten Bindemittelmischung; Fließmittel Glenium C 361

Abbildung 22 zeigt die Reduktion des W/Z-Wertes und der Blutwassermenge in Abhängigkeit der Fließmittelmenge bei konstanter Viskosität. Die Versatzmischungen enthalten 5 M% Zement. Durch Zugabe von 2 % Fließmittel und der resultierenden Senkung der Wassermenge konnte das Bluten komplett verhindert werden. Am stärksten war der Effekt jedoch zwischen null und einem Masseprozent Fließmittel.

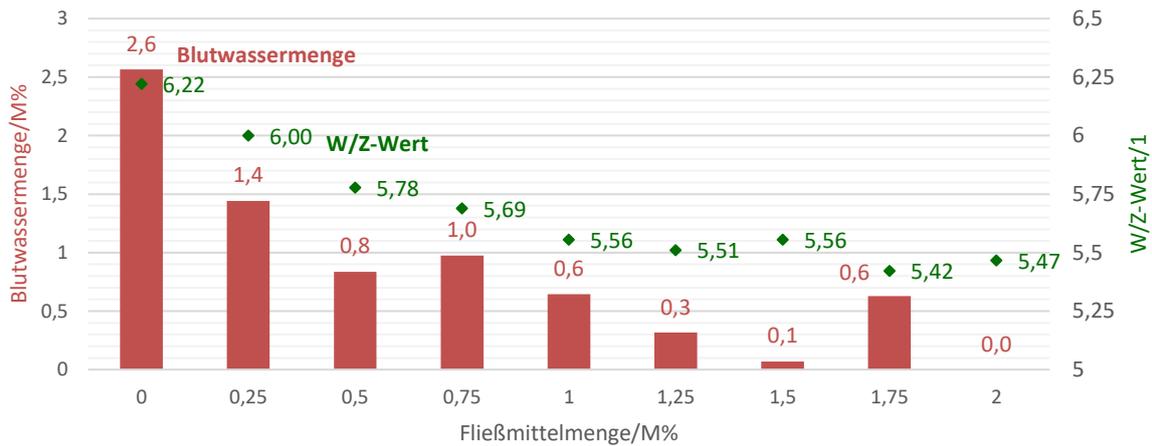


Abbildung 22: Blutwassermenge und W/Z-Werte von Versatzmischungen gleicher Viskosität in Abhängigkeit des Fließmittelgehalts; 5 % Zement; Fließmittel Glenium C 361

Im Folgenden wurden die Versuche mit dem gleichartigen Fließmittel Glenium C 330 durchgeführt. Basierend auf Bluten, Viskosität und Wasserreduktion beträgt für Versatzmischungen mit 5 M% Zement der optimale Fließmittelgehalt 0,75 M% der Zementmasse. Der Vergleich von Versatzmischungen mit und ohne Fließmittel und dem Versatzprodukt in Tabelle 12 zeigt, dass die Zugabe von Fließmittel das Bluten verringert und in Bezug auf die Viskosität die Eigenschaften des vorhandenen Paste Fill erreicht werden können. Die Versatzmischung mit 0,75 M% Fließmittel weist allerdings eine höhere Fließgrenze auf.

Tabelle 12: Vergleich der Eigenschaften verschiedener Versatzmischungen; Fließmittel Glenium C 330

	5 M% CEM II B-S 42,5 N	5 M% CEM II B-S 42,5 N 0,75 M% Fließmittel	20 M% Bindemittel
W/Z-Wert/1	6,22	5,67	12,55
W/B-Wert/1			2,51
Blutwassermenge/M%	2,6	0,4	2,7
Plastische Viskosität/Pa·s	16,2	17,2	18,4
Fließgrenze/Pa	0,0	7,2	1,81

Die Untersuchung des Blutverhaltens von Versatzmischungen mit der Zementsorte CEM I 52,5 R (siehe Tabelle 13) zeigt, dass bei Verwendung von 0,75 M% Fließmittel der W/Z-Wert zwar gesenkt werden kann, die Blutwassermenge jedoch von 0,8 auf 3,0 % steigt.

Tabelle 13: W/Z-Wert und Blutwassermenge in Prozent der Gesamtmasse von Versatzmischungen mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten; Fließmittel Glenium C330

	5 M% CEM I 52,5 R 0,00 M% Fließmittel	5 M% CEM I 52,5 R 0,75 M% Fließmittel
W/Z-Wert/1	6,12	5,92
Blutwassermenge/M%	0,8	3,0

5.3.2 Versatzmischungen mit CEM II B-S 42,5 N und Hüttensand

Für die Versatzmischungen wurden in Bezug auf die trockene Bergmasse 5 M% Zement CEM II B-S 42,5 N und 15 M% Hüttensand verwendet. Außerdem wurde eine Fließmittelmenge von 0,75 M%, bezogen auf Zementmasse, hinzugefügt. Die mittels Ausbreitmaß ermittelte Viskosität aller Versatzmischungen entspricht jener des in Mittersill verwendeten Versatzproduktes.

Die W/Z-Werte in Tabelle 14 zeigen, dass der Wasserbedarf im Vergleich zu Mischungen ohne Hüttensand (W/Z-Wert = 5,67) steigt. Die Blutwassermenge der Hochofenschlackemischungen unterscheidet sich jedoch nur gering von jener ohne Hüttensand. Bei der Versatzmischung mit Gießpfannenschlacke tritt kein Bluten auf, obwohl zum Erreichen der geforderten Viskosität ein deutlich höherer W/Z-Wert nötig ist.

Tabelle 14: W/Z-Wert, W/B-Wert und Blutwassermenge in Prozent der Gesamtmasse von Versatzmischungen mit unterschiedlichen Hüttensanden; Fließmittel Glenium C 330

	Hochofenschlacke Donawitz	Hochofenschlacke Linz	Gießpfannenschlacke Linz
W/Z-Wert/1	6,28	6,28	6,80
W/B-Wert/1	1,57	1,57	1,70
Blutwassermenge/M%	0,5	0,4	0,0

5.4 Festigkeit

5.4.1 Versatzmischungen mit CEM II B-S 42,5 N und Fließmittel

Die Auswertung der Festigkeitsprüfung von Prüfkörpern mit 5 M% Zement CEM II B-S 42,5 N ohne bzw. mit 0,75 M% Fließmittel in Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigt, dass die einaxiale Druckfestigkeit beider Proben bereits nach 7 Tagen ca. 1 MPa beträgt. Nach 28 Tagen zeigt sich trotz unterschiedlicher W/Z-Werte weder bei Biegezug- noch bei Druckfestigkeit ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Mischungen. Der Festigkeitsanstieg von 7 auf 28 Tage beträgt nur ca. 0,1 MPa.

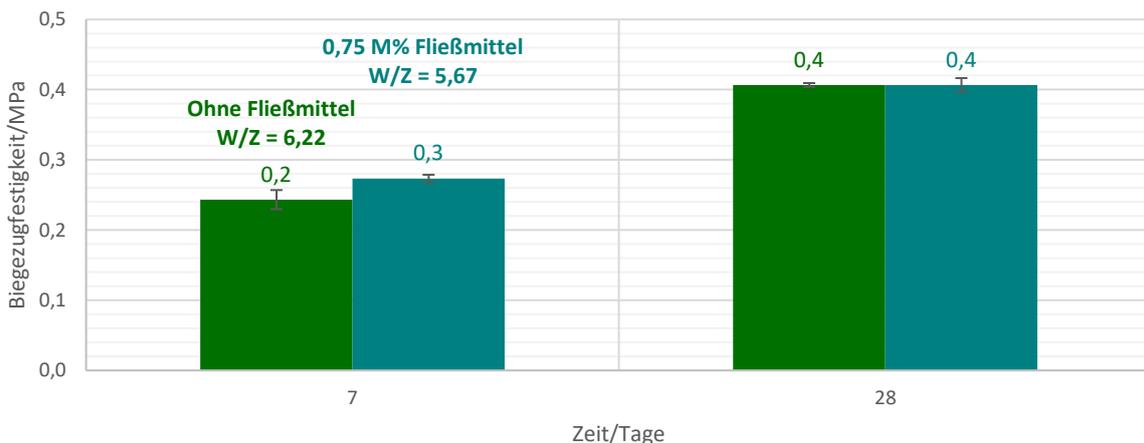


Abbildung 23: Vergleich der Biegezugfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen; 5 M% Zement CEM II B-S 42,5 N; Fließmittel Glenium C330

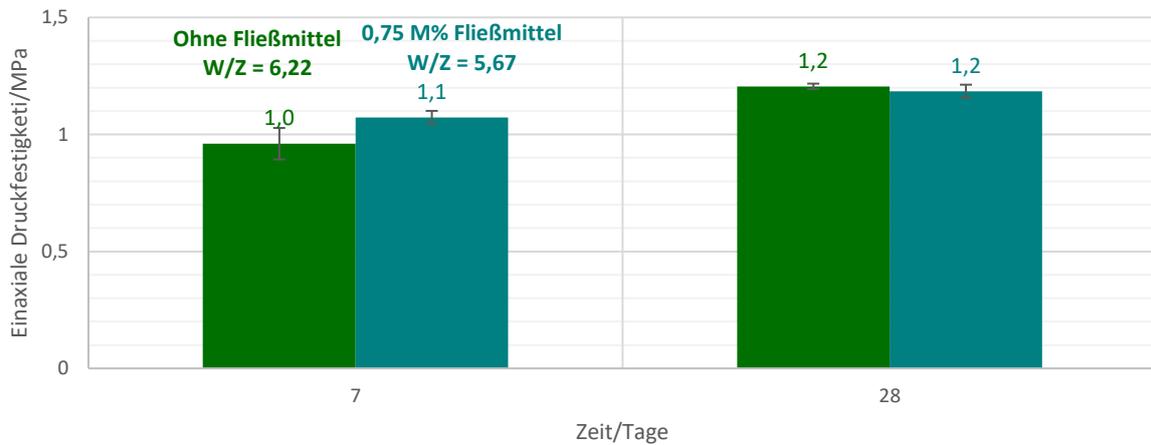


Abbildung 24: Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen; 5 M% Zement CEM II B-S 42,5 N; Fließmittel Glenium C 330

5.4.2 Versatzmischungen mit CEM I 52,5 R und Fließmittel

Beide Versatzmischungen enthalten 0,75 M% Fließmittel. Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen, dass mit 5 M% der Zementsorte CEM I 52,5 R keine höheren Festigkeiten erreicht werden wie mit derselben Menge CEM II B-S 42,5 N. Hervorzuheben ist, dass die Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen nur geringfügig höher ist als nach 7 Tagen und die einaxiale Druckfestigkeit in diesem Zeitraum sogar sinkt. Dennoch kann eine Festigkeit erreicht werden, die über den vorgeschriebenen 0,4 MPa liegt.

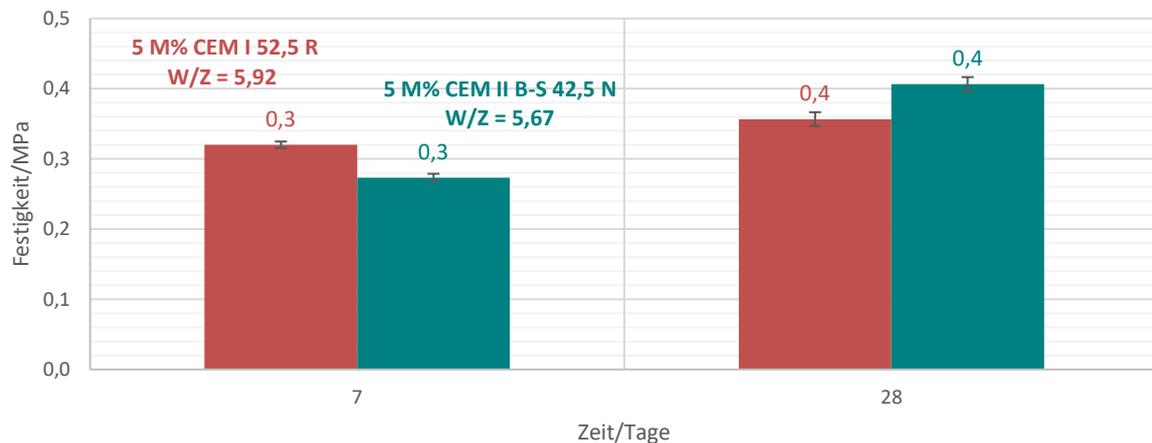


Abbildung 25: Vergleich der Biegezugfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen; 0,75 M% Fließmittel Glenium C330

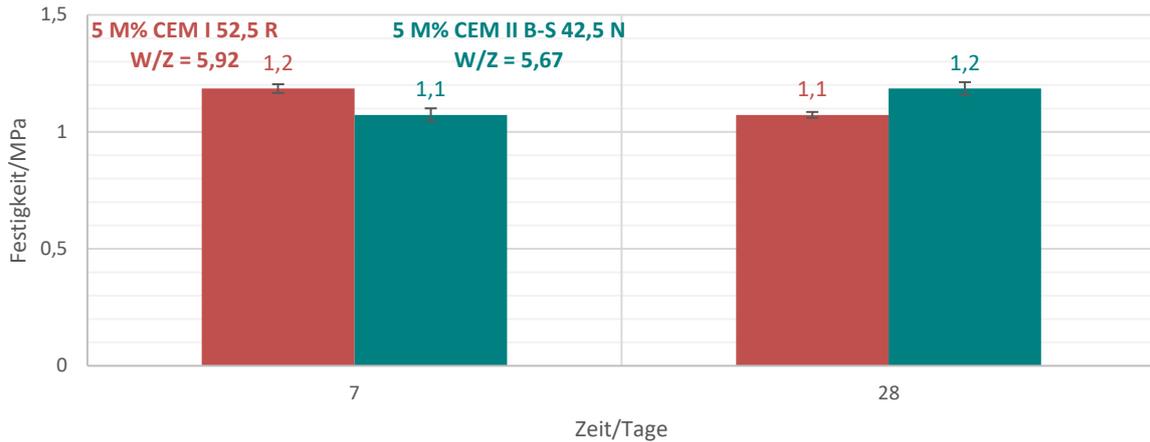


Abbildung 26: Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen; 0,75 M% Fließmittel Glenium C330

5.4.3 Versatzmischungen mit CEM II B-S 42,5 N und Hüttensand

Die erprobten Versatzmischungen enthielten jeweils 5 M% CEM II B-S 42,5 N und 15 M% der jeweiligen Schlackeproben, sowie 0,75 M% Fließmittel. Der W/Z-Wert, um die geforderte Viskosität zu erreichen, wurde nach 5.3.2 ermittelt.

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen, dass die Festigkeit im Vergleich zu Mischungen ohne Hüttensand weder nach 7, noch nach 28 Tagen gesteigert werden kann. Biegezug- und Druckfestigkeit sind geringfügig niedriger als jene der Versatzmischungen mit ausschließlich 5 M% Zement, jedoch höher als durch den Gewinnungsbetriebsplan vorgeschrieben.

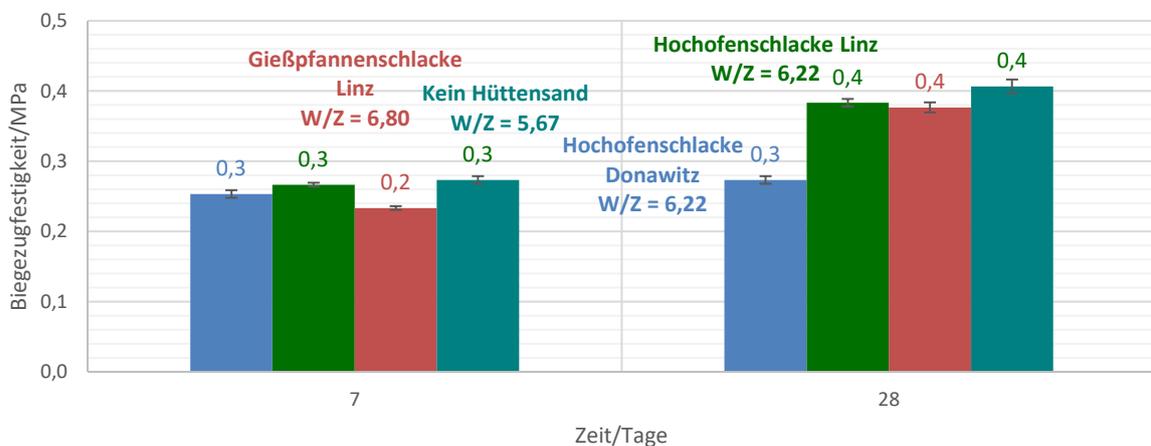


Abbildung 27: Vergleich der Biegezugfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen von Versatzmischungen mit und ohne Hüttensand; 5 M% CEM II B-S 42,5 N; Fließmittel Glenium C 330

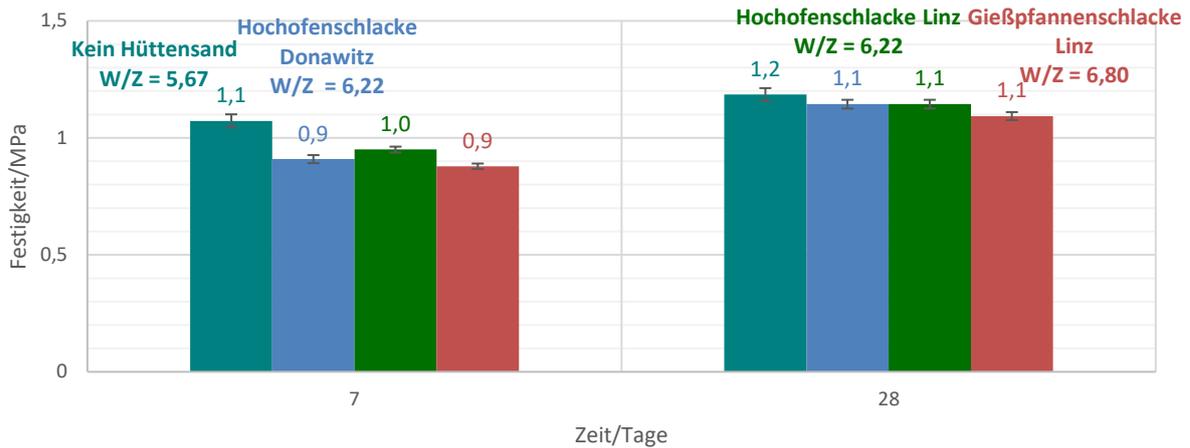


Abbildung 28: Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen von Versatzmischungen mit und ohne Hüttensand; 5 M% CEM II B-S 42,5 N; Fließmittel Glenium C 330

Bei der Normprüfung mit Normensand, einer Bindemittelmischung von 20 M% CEM II B-S 42,5 N und 80 M% Hüttensand sowie einem W/B-Wert von 0,5 können Unterschiede festgestellt werden. Wie Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen, sind die Festigkeiten der Prüfkörper mit Gießpfannenschlacke höher als jene der Prismen mit Hochofenschlacke. Besonders deutlich unterscheidet sich die 28-Tage-Druckfestigkeit. Die Differenz beträgt beinahe 25 %.

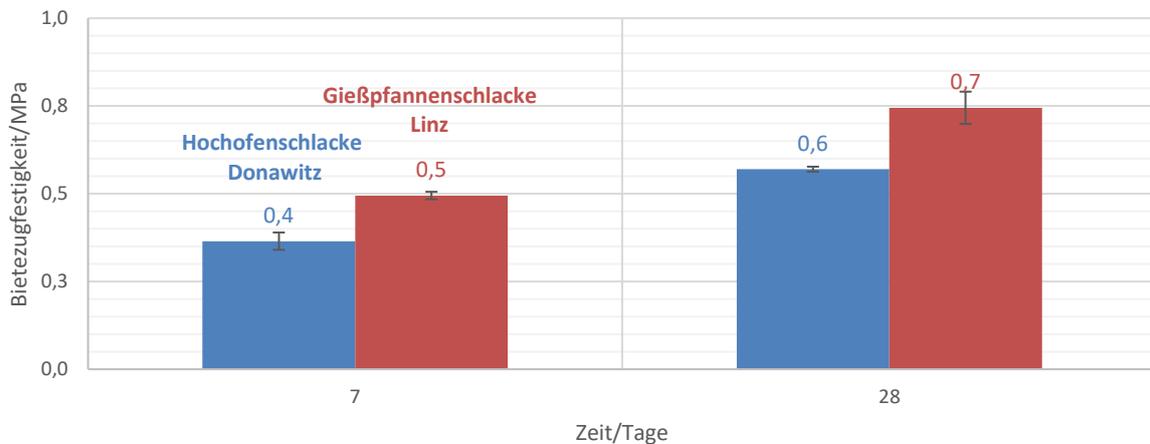


Abbildung 29: Vergleich der Biegezugfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen; Bindemittel aus 20 M% CEM II B-S 42,5 N und 80 M% Hüttensand; W/B = 0,5

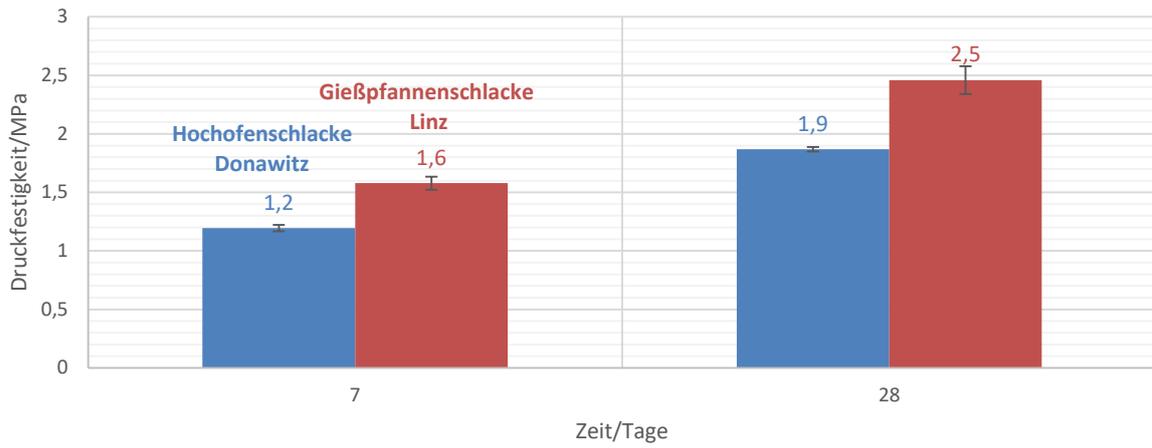


Abbildung 30: Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit nach 7 bzw. 28 Tagen; Bindemittel aus 20 M% CEM II B-S 42,5 N und 80 M% Hüttensand; W/B = 0,5

6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Eine Erklärung für die geringe Festigkeit des Pumpversatzes liefert die Korngrößenverteilungen von Gewebefilterasche und Bergematerial, welche beide einen hohen Masseanteil $\leq 20 \mu\text{m}$ aufweisen. Dieser Feinstanteil erhöht den Wasserbedarf, der für eine bestimmte Viskosität nötig ist. Der daraus resultierende hohe W/B-Wert von 2,5 wirkt sich negativ auf die Festigkeit aus. Die Normprismen der Bindemittelmischung weisen aufgrund des niedrigen W/B-Wertes (0,5) eine ausreichende Druckfestigkeit auf. Aufgrund Gehaltes an Anhydrit in der Gewebefilterasche beträgt die Normdruckfestigkeit der Bindemittelmischung nach 28 Tagen jedoch nur ungefähr ein Fünftel jener des reinen Zements.

Die frühe Erstarrung des reinen Bindemittels ist ebenfalls auf den Anhydritanteil der Gewebefilterasche zurückzuführen. Dieser hydratisiert und fällt rasch als Gips aus. Die Folge ist eine kurze Verarbeitungszeit. Wird der Paste Fill nach Beginn der Erstarrung gepumpt, entsteht Schaden an der bereits entstandenen Struktur, was sich ebenfalls negativ auf die Festigkeit des eingebrachten Versatzes auswirkt. Die Bildung von Gips führt auch nach Ende der Erstarrung zur Schädigung des Gefüges durch Volumenzunahme und daraus resultierender Rissbildung. Dies konnte mit freiem Auge beobachtet werden.

Die Erstarrungsversuche mit den in Flotation und Entwässerung verwendeten Reagenzien widerlegen, dass diese die Erstarrung stark behindern. Während sich die einzelnen Reagenzien gar nicht oder beschleunigend auswirken, konnte bei Zugabe aller Chemikalien eine geringe Verzögerung im Bereich einiger Minuten bei Erstarrungsbeginn und -ende beobachtet werden. Auch das Flockungsmittel zeigt kaum verzögernde Wirkung. Versatzmischungen mit den Flotationsbergen weisen lange Erstarrungszeiten auf. Grund dafür ist der hohe W/B-Wert.

Eine weitere negative Auswirkung der Gewebefilterasche zeigte sich beim Blutverhalten der Pumpversatzmischungen. Der in Mittersill verwendete Paste Fill mit einem Bindemittelgehalt von 20 M% weist eine höhere Blutneigung (2,7 M%) auf als Mischungen, bei denen ein geringerer Masseanteil Zement verwendet wurde.

Die Versuche mit CEM II B-S 42,5 N zeigten, dass mit Zement als alleinigem Bindemittel der W/Z-Wert und die Blutneigung reduziert, aber trotzdem die geforderte Viskosität erreicht werden kann. Die Zugabe von 0,75 M% Fließmittel verbessert das Blutverhalten zusätzlich. Auf die Erstarrungszeiten des Paste Fill wirkt sich das Fließmittel leicht verzögernd aus. Einen deutlich negativen Effekt auf die Blutneigung hatte das Fließmittel nur bei größeren Mengen, höheren Zementgehalten (CEM II B-S 42,5 N) und der Verwendung von CEM I 52,5 R. Höhere Blutwassermengen waren die Folge. Die Zugabe von 15 M% Hüttensand hingegen verringerte trotz eines höheren W/Z-Wertes die Blutwassermenge. Der Wasserbedarf stieg besonders bei der Versatzmischung mit Gießpfannenschlacke, da diese eine feinere Korngrößenverteilung aufweist. Die Reduktion der Blutwassermenge ist auf die gröbere Korngrößenverteilung zurückzuführen.

Alle Versatzmischungen, die mit 5 M% Zement hergestellt wurden, erreichen 28-Tages-Druckfestigkeiten von etwa 1 MPa oder knapp darüber. Die zusätzliche Verringerung des W/Z-Wertes durch Zugabe eines Fließmittels erzielte keine Verbesserung. Auch durch Verwendung von CEM I 52,5 R konnte keine höhere Druckfestigkeit erreicht werden. Die Zugabe von 15 M% Hüttensand reduzierte die Festigkeit nach 28 Tagen leicht, unabhängig von der Schlackenzusammensetzung. Ein möglicher Grund dafür ist der höhere W/Z-Wert und die Tatsache, dass der Festigkeitsbeitrag von Hüttensand erst zu einem späteren Zeitpunkt zum Tragen kommt.

7 Resümee

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass durch den hohen Anteil an Gewebefilterasche in der verwendeten Bindemittelmischung keine Festigkeit erreicht werden kann. Grund dafür ist in erster Linie der hohe W/B-Wert aufgrund der feinen Korngrößenverteilung. Aber auch der hohe Masseanteil an Anhydrit wirkt sich negativ aus. Ein Bindemittel auf Basis dieser Gewebefilterasche eignet sich deshalb nicht zur Herstellung von Versatz mit höheren Festigkeiten.

Im Gegensatz dazu ist es bei der Verwendung eines geringen Masseanteils an reinem Zement als Bindemittel möglich eine Festigkeit zu erzielen, welche die vorgeschriebene einaxiale Druckfestigkeit von 0,4 MPa deutlich übersteigt. Da für gleiche Konsistenz eine geringere Wassermenge nötig ist, wird der W/Z-Wert verringert. Im Vergleich zur Bindemittelmischung mit Gewebefilterasche wird durch Verwendung von Zement auch die Blutneigung reduziert. Der geringe Bindemittelanteil bietet außerdem den Vorteil, dass mehr Bergematerial versetzt werden kann.

Durch Zugabe von Hüttensand kann lediglich die Blutwassermenge verringert, nicht aber die Festigkeit nach 28 Tagen verbessert werden.

Da alle Untersuchungen unter Laborbedingungen durchgeführt wurden, sind Versuche in der Versatzanlage nötig, um die Ergebnisse zu verifizieren. Es gilt außerdem festzustellen, ob der Wassergehalt der Trübe mit den vorhandenen Entwässerungsaggregaten ausreichend gesenkt werden kann, um einen W/Z-Wert unter 6 zu erreichen.

8 Literatur

- [1] L. M. Amaratunga and D. N. Yaschyshyn, Development of a high modulus paste fill using fine gold mill tailings, *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 1997, no. 15, (1997), 205–219
- [2] A. Moser, State of the art of backfill technology in underground mining excavations, Masterarbeit, Montanuniversität, Leoben, (2014)
- [3] Wolfram Bergbau und Hütten AG, Gewinnungsbetriebsplan, Mittersill, (2015)
- [4] A. Tariq and E. K. Yanful, A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices (eng), *Journal of environmental management*, vol. 131, (2013), 138–149
- [5] M. Benzaazoua, M. Fall, and T. Belem, A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill, *Minerals Engineering*, vol. 17, no. 2, (2004), 141–152
- [6] K. Pirapakaran, S. Nagaratnam, and R. Rankine, Investigations into strength of Cannington paste fill mixed with blended cements, James Cook University, Townsville, (2007)
- [7] S. Röhling, *Betonbau*, Fraunhofer IRB-Verl, Stuttgart, (2012)
- [8] O. Peyronnard and M. Benzaazoua, Alternative by-product based binders for cemented mine backfill Recipes optimisation using Taguchi method, *Minerals Engineering*, vol. 29, (2012), 28–38
- [9] D. Lutze, W. Vom Berg, and N. Benschmidt, Eds, *Handbuch Flugasche im Beton, Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, 2, Düsseldorf, Verl. Bau und Technik, (2008)
- [10] S. Röhling, H. Eifert, and M. Jablinski, *Betonbau*, Fraunhofer IRB Verl, Stuttgart, (2013)
- [11] A. Kesimal, E. Yilmaz, B. Ercikdi, I. Alp, and H. Deveci, Effect of properties of tailings and binder on the short-and long-term strength and stability of cemented paste backfill, *Materials Letters*, vol. 59, no. 28, (2005), 3703–3709
- [12] M. Fall, M. Benzaazoua, and S. Ouellet, Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill, *Minerals Engineering*, vol. 18, no. 1, (2005), 41–44
- [13] N. Sivakugan, R. Veenstra, and N. Naguleswaran, Underground Mine Backfilling in Australia Using Paste Fills and Hydraulic Fills, *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng*, vol. 1, no. 2, (2015)
- [14] Putzmeister Engineering GmbH, *Betontechnologie für Betonpumpen*, Aichtal, (2011)
- [15] Verband Deutscher Zementwerke, *Tätigkeitsbericht 2009 - 2012*, VDZ GmbH, Düsseldorf, (2012)
- [16] Kurt Scheidl, *Begutachtung der Gewebefilterasche aus dem Wirbelschichtkessel 1K7 der Lenzing AG Bestätigung der gleichbleibenden Qualität des Prozesses 2006*, Lenzing, (2007)%

9 Abbildungen

ABBILDUNG 1: VISKOMETER MODEL 800 DES HERSTELLERS OFITE	10
ABBILDUNG 2: VERSUCHSAUFBAU ZUR FESTSTELLUNG DER BLUTWASSERMENGE; ABGEDECKTER KUNSTSTOFFBECHER MIT VERSATZMISCHUNG	10
ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHER ABLAUF DER ENTWÄSSERUNG UND VERSATZPRODUKTION; DEN STRÖMEN SIND VOLUMEN BZW. MASSE SOWIE WASSERGEHALT ZUGEORDNET	12
ABBILDUNG 4: VAKUUMTROMMELFILTER IN DER VERSATZANLAGE, WOLFRAMBERGWERK MITTERSILL	13
ABBILDUNG 5: KORNGRÖßENVERTEILUNGEN DES BERGEMATERIALS	14
ABBILDUNG 6: ERGEBNIS DER 3-PUNKT-BIEGEZUGPRÜFUNG DES ZEMENTS CEM II B-S 42,5 N NACH ÖNORM EN 196-1	15
ABBILDUNG 7: ERGEBNIS DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEITSPRÜFUNG DES ZEMENTS CEM II B-S 42,5 N NACH ÖNORM EN 196-1	15
ABBILDUNG 8: RDA DER GEWEBEFILTERASCHE AUS LENZING, DIFFRAKTOGRAMM UND PEAKS.....	16
ABBILDUNG 9: KORNGRÖßENVERTEILUNG DER GEWEBEFILTERASCHE	17
ABBILDUNG 10: ERGEBNIS DER 3-PUNKT-BIEGEZUGPRÜFUNG DES BINDEMITTELS NACH ÖNORM EN 196-1	17
ABBILDUNG 11: ERGEBNIS DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEITSPRÜFUNG DES BINDEMITTELS NACH ÖNORM EN 196-1	18
ABBILDUNG 12: KORNGRÖßENVERTEILUNG DER HÜTTENSANDE AUS LINZ UND DONAWITZ	19
ABBILDUNG 13: ERSTARRUNGSVERHALTEN VON BINDEMittel UND BINDEMittelBESTANDTEILEN; ERGEBNIS DER ERSTARRUNGSVERSUCHE NACH ÖNORM EN 196-3	20
ABBILDUNG 14: ERSTARRUNGSVERHALTEN DES BINDEMITTELS OHNE UND MIT FLOTATIONSREAGENZIE; ERGEBNIS DER ERSTARRUNGSVERSUCHE NACH ÖNORM EN 196-3	21
ABBILDUNG 15: ERSTARRUNGSVERHALTEN DES PASTÖSEN VERSATZES MIT UND OHNE ZUGABE DES FLOCKUNGSMITTELS ALUMINIUMSULFAT; ERGEBNIS DER ERSTARRUNGSVERSUCHE NACH ÖNORM EN 196-3	22
ABBILDUNG 16: ERSTARRUNGSVERHALTEN VON VERSATZMISCHUNGEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN ZEMENTGEHALTEN; ERGEBNIS DER ERSTARRUNGSVERSUCHE NACH ÖNORM EN 196-3	23
ABBILDUNG 17: ERSTARRUNGSVERHALTEN VON VERSATZMISCHUNGEN MIT 5 M% CEM II B-S 42,5 N MIT UND OHNE FLIEßMITTEL; ERGEBNIS DER ERSTARRUNGSVERSUCHE NACH ÖNORM EN 196-3	24
ABBILDUNG 18: ERGEBNIS DER VISKOSITÄTSMESSUNG DER BEPROBTEEN VERSATZPRODUKTE VOR ORT UND GLEICHUNG NACH BINGHAM	24
ABBILDUNG 19: PLASTISCHE VISKOSITÄT NACH BINGHAM IN ABHÄNGIGKEIT DES FLIEßMITTELGEHALTS FÜR VERSATZMISCHUNGEN MIT 5 BZW. 10 M% CEM II B-S; FLIEßMITTEL GLENIUM C 361.....	25
ABBILDUNG 20: W/Z-WERTE VON VERSATZMISCHUNGEN GLEICHER VISKOSITÄT IN ABHÄNGIGKEIT DES FLIEßMITTELGEHALTS; FLIEßMITTEL GLENIUM C 361	25
ABBILDUNG 21: BLUTWASSERMENGE IN PROZENT DER GESAMTMASSE IN ABHÄNGIGKEIT DES FLIEßMITTELGEHALTS FÜR VERSATZMISCHUNGEN MIT CEM II B-S UND DER EINGESETZTEN BINDEMittelMISCHUNG; FLIEßMITTEL GLENIUM C 361	26
ABBILDUNG 22: BLUTWASSERMENGE UND W/Z-WERTE VON VERSATZMISCHUNGEN GLEICHER VISKOSITÄT IN ABHÄNGIGKEIT DES FLIEßMITTELGEHALTS; 5 % ZEMENT; FLIEßMITTEL GLENIUM C 361	27
ABBILDUNG 23: VERGLEICH DER BIEGEZUGFESTIGKEIT NACH 7 BZW. 28 TAGEN; 5 M% ZEMENT CEM II B-S 42,5 N; FLIEßMITTEL GLENIUM C330	28
ABBILDUNG 24: VERGLEICH DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT NACH 7 BZW. 28 TAGEN; 5 M% ZEMENT CEM II B-S 42,5 N; FLIEßMITTEL GLENIUM C 330.....	29
ABBILDUNG 25: VERGLEICH DER BIEGEZUGFESTIGKEIT NACH 7 BZW. 28 TAGEN; 0,75 M% FLIEßMITTEL GLENIUM C330	29
ABBILDUNG 26: VERGLEICH DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT NACH 7 BZW. 28 TAGEN; 0,75 M% FLIEßMITTEL GLENIUM C330 .	30
ABBILDUNG 27: VERGLEICH DER BIEGEZUGFESTIGKEIT NACH 7 BZW. 28 TAGEN VON VERSATZMISCHUNGEN MIT UND OHNE HÜTTENSAND; 5 M% CEM II B-S 42,5 N; FLIEßMITTEL GLENIUM C 330.....	30
ABBILDUNG 28: VERGLEICH DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT NACH 7 BZW. 28 TAGEN VON VERSATZMISCHUNGEN MIT UND OHNE HÜTTENSAND; 5 M% CEM II B-S 42,5 N; FLIEßMITTEL GLENIUM C 330.....	31
ABBILDUNG 29: VERGLEICH DER BIEGEZUGFESTIGKEIT NACH 7 BZW. 28 TAGEN; BINDEMittel AUS 20 M% CEM II B-S 42,5 N UND 80 M% HÜTTENSAND; W/B = 0,5.....	31
ABBILDUNG 30: VERGLEICH DER EINAXIALEN DRUCKFESTIGKEIT NACH 7 BZW. 28 TAGEN; BINDEMittel AUS 20 M% CEM II B-S 42,5 N UND 80 M% HÜTTENSAND; W/B = 0,5.....	32

10 Tabellen

TABELLE 1: PHASENZUSAMMENSETZUNG DER FLOTATIONSBERGE LAUT RIETVELD-ANALYSE.....	13
TABELLE 2: KENNZAHLEN D_{20} , K_{50} UND K_{80} DER KORNGRÖßENVERTEILUNG DES BERGEMATERIALS.....	14
TABELLE 3: CHEMISCHE ANALYSE DER GEWEBEFILTERASCHE.....	16
TABELLE 4: KENNZAHLEN D_{20} , K_{50} UND K_{80} DER KORNGRÖßENVERTEILUNG DER GEWEBEFILTERASCHE.....	17
TABELLE 5: CHEMISCHE ANALYSE DER HÜTTENSANDE	18
TABELLE 6: KENNZAHLEN D_{20} , K_{50} UND K_{80} DER KORNGRÖßENVERTEILUNG DER HÜTTENSANDE AUS LINZ UND DONAWITZ.....	19
TABELLE 7: ERSTARRUNGSVERHALTEN VON BINDEMittel UND BINDEMittelBESTANDTEILEN; AUSWERTUNG DER ERSTARRUNGSVERSUCHES NACH ÖNORM EN 196-3	20
TABELLE 8: ERSTARRUNGSVERHALTEN VON BINDEMittel OHNE UND MIT FLOTATIONSREAGENZIEN; AUSWERTUNG DES ERSTARRUNGSVERSUCHES NACH ÖNORM EN 196-3	22
TABELLE 9: ERSTARRUNGSVERHALTEN DES PASTÖSEN VERSATZES MIT UND OHNE ZUGABE DES FLOCKUNGSMITTELS ALUMINIUMSULFAT; AUSWERTUNG DES ERSTARRUNGSVERSUCHES NACH ÖNORM EN 196-3	22
TABELLE 10: ERSTARRUNGSVERHALTEN VON VERSATZMISCHUNGEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN ZEMENTGEHALTEN; AUSWERTUNG DES ERSTARRUNGSVERSUCHES NACH ÖNORM EN 196-3	23
TABELLE 11: ERSTARRUNGSVERHALTEN VON VERSATZMISCHUNGEN MIT 5 M% CEM II B-S 42,5 N MIT UND OHNE FLIEßMITTEL; AUSWERTUNG DES ERSTARRUNGSVERSUCHES NACH ÖNORM EN 196-3	24
TABELLE 12: VERGLEICH DER EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER VERSATZMISCHUNGEN; FLIEßMITTEL GLENIUM C 330	27
TABELLE 13: W/Z-WERT UND BLUTWASSERMENGE IN PROZENT DER GESAMTMASSE VON VERSATZMISCHUNGEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN FLIEßMITTELGEHALTEN; FLIEßMITTEL GLENIUM C330.....	27
TABELLE 14: W/Z-WERT, W/B-WERT UND BLUTWASSERMENGE IN PROZENT DER GESAMTMASSE VON VERSATZMISCHUNGEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN HÜTTENSANDEN; FLIEßMITTEL GLENIUM C 330	28
TABELLE 15: ERGEBNIS DER FESTIGKEITSPRÜFUNG DES ZEMENTS CEM II B-S 42,5 N NACH ÖNORM EN 196-1	IV
TABELLE 16: ERGEBNIS DER FESTIGKEITSPRÜFUNG DES BINDEMittELS (80 M% GEWEBEFILTERASCHE, 20 M% CEM II B-S 42,5 N) NACH ÖNORM EN 196-1	IV
TABELLE 17: ERGEBNIS DER FESTIGKEITSPRÜFUNG EINER VERSATZMISCHUNG MIT 5 M% CEM II B-S 42,5 N, OHNE FLIEßMITTEL UND EINEM W/Z-WERT VON 6,22	IV
TABELLE 18: ERGEBNIS DER FESTIGKEITSPRÜFUNG EINER VERSATZMISCHUNG MIT 5 M% CEM II B-S 42,5 N, 0,75 M% FLIEßMITTEL UND EINEM W/Z-WERT VON 5,67.....	V
TABELLE 19: ERGEBNIS DER FESTIGKEITSPRÜFUNG EINER VERSATZMISCHUNG MIT 5 M% CEM II B-S 42,5 N, 15 M% HOCHOFENSCHLACKE DONAWITZ, 0,75 M% FLIEßMITTEL UND EINEM W/Z-WERT VON 6,28	V
TABELLE 20: ERGEBNIS DER FESTIGKEITSPRÜFUNG EINER VERSATZMISCHUNG MIT 5 M% CEM II B-S 42,5 N, 15 M% HOCHOFENSCHLACKE LINZ, 0,75 M% FLIEßMITTEL UND EINEM W/Z-WERT VON 6,28	V
TABELLE 21: ERGEBNIS DER FESTIGKEITSPRÜFUNG EINER VERSATZMISCHUNG MIT 5 M% CEM II B-S 42,5 N, 15 M% GIEßPFANNENSCHLACKE LINZ, 0,75 M% FLIEßMITTEL UND EINEM W/Z-WERT VON 6,80.....	V
TABELLE 22: ERGEBNIS DER FESTIGKEITSPRÜFUNG EINER VERSATZMISCHUNG MIT 5 M% CEM I 52,5 R, 0,75 M % FLIEßMITTEL UND EINEM W/Z-WERT VON 5,97	VI

Anhang

Tabelle 15: Ergebnis der Festigkeitsprüfung des Zements CEM II B-S 42,5 N nach ÖNORM EN 196-1

	Biegezugfestigkeit/MPa		Druckfestigkeit/MPa		
1 Tag	3,90		12,26	13,91	
	3,85	3,75 ± 0,10	14,65	13,85	13,75 ± 0,30
	3,50		13,61	14,22	
3 Tage	5,30		30,65	30,95	
	5,65	5,65 ± 0,16	30,34	28,96	30,47 ± 0,36
	6,00		30,03	31,87	
7 Tage	7,37		40,15	39,69	
	6,65	6,80 ± 0,24	38,92	37,70	38,77 ± 0,39
	6,39		37,54	38,62	
28 Tage	8,80		58,84	54,70	
	8,50	8,67 ± 0,07	57,62	54,24	55,88 ± 0,70
	8,70		54,86	55,01	

Tabelle 16: Ergebnis der Festigkeitsprüfung des Bindemittels (80 M% Gewebefilterasche, 20 M% CEM II B-S 42,5 N) nach ÖNORM EN 196-1

	Biegezugfestigkeit/MPa		Druckfestigkeit/MPa		
1 Tag	0,32		1,78	1,53	
	0,30	0,31 ± 0,01	1,47	1,47	1,48 ± 0,07
			1,32	1,29	
3 Tage	0,71		3,56	3,31	
	0,84	0,78 ± 0,03	3,74	3,86	3,58 ± 0,08
	0,78		3,62	3,37	
7 Tage	1,24		5,88	5,88	
	1,36	1,27 ± 0,04	5,64	5,33	5,72 ± 0,09
	1,22		6,01	5,58	
28 Tage	1,92		10,79	10,30	
	2,08	1,98 ± 0,04	10,36	9,81	10,21 ± 0,17
	1,93		9,81		

Tabelle 17: Ergebnis der Festigkeitsprüfung einer Versatzmischung mit 5 M% CEM II B-S 42,5 N, ohne Fließmittel und einem W/Z-Wert von 6,22

	Biegezugfestigkeit/MPa		Druckfestigkeit/MPa		
7 Tage	0,26		1,23	1,10	
	0,21	0,24 ± 0,01	0,98	0,74	0,96 ± 0,07
	0,26		0,86	0,86	
28 Tage	0,41		1,23	1,16	
	0,40	0,41 ± 0,00	1,23	1,23	1,21 ± 0,01
	0,41		1,16	1,23	

Tabelle 18: Ergebnis der Festigkeitsprüfung einer Versatzmischung mit 5 M% CEM II B-S 42,5 N, 0,75 M% Fließmittel und einem W/Z-Wert von 5,67

	Biegezugfestigkeit/MPa		Druckfestigkeit/MPa		
7 Tage	0,28		1,10	1,16	
	0,26	0,27 ± 0,01	1,10	0,98	1,07 ± 0,03
	0,28		1,10	0,98	
28 Tage	0,43		1,23	1,29	
	0,39	0,41 ± 0,01	1,10	1,10	1,19 ± 0,03
	0,40		1,16	1,23	

Tabelle 19: Ergebnis der Festigkeitsprüfung einer Versatzmischung mit 5 M% CEM II B-S 42,5 N, 15 M% Hochofenschlacke Donawitz, 0,75 M% Fließmittel und einem W/Z-Wert von 6,28

	Biegezugfestigkeit/MPa		Druckfestigkeit/MPa		
7 Tage	0,24		0,98	0,86	
	0,26	0,25 ± 0,01	0,92	0,92	0,91 ± 0,02
	0,26		0,92	0,86	
28 Tage	0,39		1,10	1,23	
	0,39	0,38 ± 0,01	1,16	1,16	1,14 ± 0,02
	0,37		1,10	1,10	

Tabelle 20: Ergebnis der Festigkeitsprüfung einer Versatzmischung mit 5 M% CEM II B-S 42,5 N, 15 M% Hochofenschlacke Linz, 0,75 M% Fließmittel und einem W/Z-Wert von 6,28

	Biegezugfestigkeit/MPa		Druckfestigkeit/MPa		
7 Tage	0,26		0,98	0,98	
	0,27	0,27 ± 0,00	0,92	0,92	0,95 ± 0,01
	0,27		0,92	0,98	
28 Tage	0,36		1,16	1,23	
	0,39	0,38 ± 0,01	1,16	1,10	1,14 ± 0,05
	0,38		1,10	1,10	

Tabelle 21: Ergebnis der Festigkeitsprüfung einer Versatzmischung mit 5 M% CEM II B-S 42,5 N, 15 M% Gießpfannenschlacke Linz, 0,75 M% Fließmittel und einem W/Z-Wert von 6,80

	Biegezugfestigkeit/MPa		Druckfestigkeit/MPa		
7 Tage	0,24		0,86	0,86	
	0,23	0,23 ± 0,00	0,86	0,92	0,88 ± 0,01
	0,23		0,86	0,92	
28 Tage	0,42		1,04	1,10	
	0,36	0,39 ± 0,01	1,10	1,04	1,09 ± 0,02
	0,40		1,10	1,16	

Tabelle 22: Ergebnis der Festigkeitsprüfung einer Versatzmischung mit 5 M% CEM I 52,5 R, 0,75 M % Fließmittel und einem W/Z-Wert von 5,97

	Biegezugfestigkeit/MPa		Druckfestigkeit/MPa		
7 Tage	0,33		1,23	1,10	
	0,31	0,32 ± 0,00	1,16	1,23	1,19 ± 0,02
	0,32		1,23	1,16	
28 Tage	0,38		1,04	1,10	
	0,35	0,36 ± 0,01	1,04	1,10	1,07 ± 0,01
	0,34		1,04	1,10	