

Anpassung der Verarbeitungseigenschaften von Frischbetonmischungen für die Entwicklung von Spritzbetonen mit reduziertem Versinterungspotential

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der

Ruhr-Universität Bochum

von

Maria Thumann

Regensburg, 2019

Dissertation eingereicht am 20.05.2019

Mündliche Prüfung am 17.07.2019

Gutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Wolfgang Kusterle

Abkürzungen, Symbole und Begriffe

Frischbetonmischung	„Grundmischung für das Nassspritzverfahren“ [1]
Frischbeton	Beton, der fertig gemischt ist und sich im verarbeitbaren Zustand befindet
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert: Verhältnis von Masse Wasser zu Masse Zement
J1, J2, J3	Frühfestigkeitsklassen nach Richtlinie Spritzbeton [2] und EN 14487-1 [1]
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid
M.-%	Masse-%
RV-Wert	Wert zur Beurteilung des Reduzierten Versinterungspotentials von Spritzbeton nach Merkblatt [3] in kg Ca/t Spritzbeton
AHWZ	Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung nach ÖNORM B 3309-1 [4] und ÖNROM B 3309-2 [5]
Eluat	nach dem Auslaugen erhaltene Lösung
EK	elektrische Leitfähigkeit
τ	Schubspannung
F	Kraft
A	Fläche
$\dot{\gamma}$	Scherrate
v	Geschwindigkeit
h_p	Plattenabstand
η	Viskosität
$\tau(r)$	Scherspannung an der Rohrwandung
r/R	Radius der Rohrleitung
Δp	Druckverlust im betrachteten Rohrabschnitt
L	Länge des betrachteten Rohrabschnitts/Förderlänge
τ_0	Fließgrenze (Kern-)Beton
p/P	Förderdruck
Q	Fördermenge
k	Füllgrad des Rohrquerschnitts mit Beton
μ	Plastische Viskosität Kernbeton
τ_{0g}	Fließgrenze der Gleitschicht

μ_g	Plastische Viskosität der Gleitschicht
e	Gleitschichtdicke
Sliper	Sliding Pipe Rheometer (Gleitrohr-Rheometer)
Beiwert a	Parameter Fließgrenze ermittelt mit dem Gleitrohr-Rheometer
Beiwert b	Parameter Viskosität ermittelt mit dem Gleitrohr-Rheometer
D/d	Durchmesser der Förderleitung
H	Förderhöhe
ρ	Rohdichte Beton
g	Erdbeschleunigung
p_F	Druckanteil Einfluss der Fließgrenze
p_v	Druckanteil Einfluss der Viskosität
p_H	Druckanteil Einfluss der Förderhöhe
W/B-Wert	Wasser/Bindemittel-Wert: Verhältnis von Masse Wasser zu Masse Bindemittel, zum Bindemittel zählen der Zement und alle Beton-zusatzstoffe unabhängig von ihrer Reaktivität
W/P-Wert	Wasser/Pulver-Wert: Verhältnis von Volumen Wasser zu Volumen Pulver, zum Pulver zählen alle Feinstoffe $\leq 0,125$ mm unabhängig von ihrer Reaktivität, z. B. Zement, Zusatzstoffe, Feinanteile der Gesteinskörnung $\leq 0,125$ mm
d_{50}	mittlere Partikelgröße
MEF	Mesofüller, Betonzusatzstoffe deren mittlere Korngröße im Bereich von $5 \mu\text{m} \leq d_{50} \leq 30 \mu\text{m}$ liegt
MIF	Mikrofüller, Betonzusatzstoffe deren mittlere Korngröße $d_{50} \leq 5 \mu\text{m}$ ist
PCE	Polycarboxylatether Fließmittel
C ₃ S	Tricalciumsilicat
C ₂ S	Dicalciumsilicat
C ₃ A	Calciumaluminat
C ₄ AF	Calciumaluminatferrit
FM	Fließmittel
Eluens/Eluent	für die Auslaugung verwendetes Lösungsmittel
n.b.	nicht bestimmt
RF	relative Luftfeuchtigkeit
FW	Filtratwasser

PP	Polypropylen
CEM	Zement
% v. BM	% von Masse Bindemittel
BE	Erstarrungsbeschleuniger für Spritzbeton
PD	Packungsdichte
L _ä	äquivalente Förderlänge
ps	Betondruck _S
Betondruck _S	berechneter Betondruck auf Grundlage der mit dem Geleitrohr-Rheometer ermittelten Kennwerte
p _H	Betondruck _H
p _{HP}	Hydraulikdruck der Doppelkolbenpumpe (Spritzbetonmaschine)
F	Oberfläche Betonkolben
K	Oberfläche Zylinderseite (Kreisoberfläche)
Betondruck _H	berechneter Betondruck auf Grundlage des Hydraulikdrucks der Doppelkolbenpumpe (Spritzbetonmaschine)
% v. Z	% von Masse Zement

Kurzfassung

In nicht druckwasserhaltenden Tunnelbauwerken wird das Bergwasser über Entwässerungssysteme gesammelt und aus dem Bauwerk geleitet. Versinterungen der Drainageleitungen des sekundären Entwässerungssystems führen zu Querschnittsverminderungen und -verschlüssen, wodurch die gezielte Ableitung des Bergwassers aus dem Bauwerk gestört wird. Zur Vermeidung von Schäden am Tunnelbauwerk oder von Wassereintritten in den Tunnel, aufgrund eines Anstiegs des Bergwasserdrucks hinter der Innenschale, sind regelmäßige Reinigungsarbeiten erforderlich. Die Reinigung der Drainageleitungen ist häufig sehr kostenintensiv und führt zu Verkehrsbehinderungen in den Tunneln.

Die Entstehung von Versinterungen wird durch die chemisch-physikalische Zusammensetzung des Bergwassers, die Umgebungsbedingungen im Bereich des Tunnels, die Ausführung des Entwässerungssystems und den Kontakt des Bergwassers mit zementgebundenen Materialien, z. B. dem Spritzbeton, beeinflusst. Ein Ansatz, um die Entstehung von Versinterungen zu reduzieren, ist die Optimierung der Spritzbetonrezeptur. Die Änderung der Rezepturzusammensetzung beeinflusst aber auch die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung, die Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons und die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons.

Die Versuchsergebnisse von Auslaugversuchen mit Mörtel-, Spritzmörtel- und Spritzbetonproben im Rahmen dieser Arbeit belegen, dass das Versinterungspotential durch eine Reduzierung des Klinkergehalts im Bindemittel, den Einsatz von puzzolanischen oder latent-hydraulischen Zusatzstoffen und eine geringe Porosität reduziert wird. Die Änderungen der Bindemittelzusammensetzung des Spritzbetons haben Auswirkungen auf den Klinkergehalt, den Wasserbedarf und den Leimgehalt und damit auch auf die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung. Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit, v. a. der Pumpbarkeit, von Frischbetonen und Frischbetonmischungen wurden Konsistenzprüfverfahren, rheologische Prüfverfahren und Prüfverfahren zur Beurteilung der Stabilität ausgewählt. Ihre Eignung und Aussagekraft wurde bei Pumpversuchen mit einer mobilen Spritzbetonmaschine verifiziert. Für die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen ist zum einen ein ausreichendes Leimvolumen zur Ausbildung einer Gleitschicht an der Rohrwandung erforderlich und zum anderen müssen die Mischungen unter Druck ausreichend stabil bleiben, damit während des Pumpens keine Blockaden in den Förderleitungen auftreten. Sofern diese Aspekte bei den entwickelten Rezepturen erfüllt sind, ist eine ausreichende Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischungen erreicht. Darüber hinaus konnten die Anforderungen an die Frühfestigkeitsentwicklung und die 28 d Druckfestigkeit der Spritzbetone mit optimierten Mischungen erfüllt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, welche Aspekte bei der Entwicklung von Spritzbetonen mit einem reduzierten Versinterungspotential berücksichtigt werden müssen, um auch die genannten baupraktischen Anforderungen zu erfüllen.

Abstract

In double-shell tunnel linings, the construction of 'umbrella' insulations helps preventing water ingress: depressurized ground water is led to drainage pipes, relieving the tunnel lining from water pressure. However, these solutions are associated in many cases with sintering (precipitation of carbonates) in the drainage system. Over time, the drainage pipes get clogged and the water cannot flow off. Subsequently, the water pressure increases and the tunnel may be damaged. The cleaning of the drainage pipes during operation of traffic tunnels is possible, but very costly and time consuming. To minimize the tunnel maintenance work, it is crucial to reduce such precipitations to a minimum.

The parameters that influence the sintering process are (i) the chemical composition of the ground water, (ii) the environmental conditions, (iii) the design of the drainage system, (iv) and the contact of the water with cementitious materials, e.g. the sprayed concrete. In fact, the mix design of the sprayed concrete can be adapted to develop mixes with low sintering potential. To achieve this purpose special care has to be taken to avoid compromising the workability of the wet mix, the early strength development of the young sprayed concrete and the strength development of the hardened sprayed concrete.

Results of leaching tests show that the calcium released from mortar, sprayed mortar and sprayed concrete samples can be reduced by lowering the clinker content of the binder, by adding supplementary cementitious materials, or by producing a dense matrix. Changes in the binder composition influence the clinker content in the binder, the water demand, the paste content, and thus the workability of the wet-mixes. The workability, and specifically the pumpability, of the wet-mixes was characterised using different test methods. The reliability of the selected test-methods was verified in pumping tests with a spraying machine. Results of lab tests and pumping tests show that the pumpability of wet-mixes requires, on the one hand, sufficient paste volume to form a lubricating layer on the pipe wall and, on the other hand, that the concrete remains stable even under pressure to avoid blockages in the conveying pipe. In addition to the requirements concerning the workability of the wet-mix, the requirements for early strength development and 28 day compressive strength of the sprayed concrete must be met.

This work describes the various aspects that have to be taken into account when designing new mixes for sprayed concrete with low sintering potential, fulfilling at the same time the corresponding requirements for workability and hardened concrete properties.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	1
2	Stand des Wissens.....	3
2.1	Spritzbeton im Tunnelbau	3
2.1.1	Allgemeines	3
2.1.2	Spritzverfahren.....	4
2.1.3	Spezielle Anforderungen	7
2.1.4	Anwendung	9
2.2	Versinterungspotential von Spritzbeton	12
2.2.1	Entstehung, Ursachen und Folgen von Versinterungen.....	12
2.2.2	Lösungsansätze	15
2.2.3	Beurteilung des Versinterungspotentials	20
2.3	Verarbeitbarkeit von Frischbetonmischungen.....	28
2.3.1	Anforderungen an die Frischbetonmischung von Spritzbeton im Tunnelbau	28
2.3.2	Modelle zur Förderung von Beton in Pumpleitungen	28
2.3.3	Verfahren zur Beurteilung der Pumpbarkeit.....	34
2.3.4	Betontechnologische Einflüsse auf die Pumpbarkeit.....	43
3	Eigene Untersuchungen	54
3.1	Versinterungspotential von Mörtel, Spritzmörtel und Spritzbeton	54
3.1.1	Methodische Vorgehensweise	54
3.1.2	Mörtel.....	54
3.1.3	Spritzmörtel	56
3.1.4	Spritzbeton	58
3.2	Verarbeitbarkeit.....	63
3.2.1	Methodische Vorgehensweise	63
3.2.2	Frischbeton.....	63
3.2.3	Frischbetonmischung	66
3.3	Festigkeit	67
3.3.1	Methodische Vorgehensweise	67
3.3.2	Junger Spritzbeton und Spritzbeton.....	67

4	Eigene Ergebnisse und Diskussion	68
4.1	Versinterungspotential von Mörtel, Spritzmörtel und Spritzbeton.....	68
4.1.1	Mörtel.....	68
4.1.2	Spritzmörtel.....	79
4.1.3	Spritzbeton	83
4.1.4	Zusammenfassung, Gegenüberstellung und Schlussfolgerung	86
4.2	Verarbeitbarkeit	89
4.2.1	Frischbeton	89
4.2.2	Frischbetonmischung	108
4.2.3	Zusammenfassung, Gegenüberstellung und Schlussfolgerung	124
4.3	Festigkeiten.....	127
4.3.1	Junger Spritzbeton.....	127
4.3.2	Spritzbeton	131
4.3.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	133
5	Zusammenfassung und Fazit	134
	Literatur.....	139
	Abbildungsverzeichnis.....	151
	Tabellenverzeichnis.....	157
	Anhang	161
A.1	Ausgangsstoffe.....	161
A.1.1	Zemente	161
A.1.2	Zusatzstoffe.....	163
A.1.3	Gesteinskörnungen.....	165
A.1.4	Zusatzmittel	167
A.2	Rezepturen.....	169
A.2.1	Rezepturen Frischbetone.....	169
A.2.2	Rezepturen Frischbetonmischungen - Versuchsserie_B.....	172
A.3	Versuchsergebnisse	173
A.3.1	Frischbetone.....	173
A.3.2	Frischbetonmischungen	175
A.4	Berechnung äquivalente Förderlänge	176
	Lebenslauf.....	179

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Entwässerungssysteme in nicht druckwasserhaltenden Tunnelbauwerken haben die Aufgabe eintretendes Bergwasser gezielt aus dem Bauwerk zu leiten. Häufig treten Versinterungen (Kalkablagerungen) in den Drainagerohren des sekundären Entwässerungssystems auf, die zu Querschnittsverminderungen oder -verschlüssen führen und deren Funktion einschränken. Zur Vermeidung von Bauwerkschäden durch einen Anstieg des Bergwasserdrucks hinter der Innenschale müssen die Drainageleitungen regelmäßig gereinigt werden. Die Reinigungsarbeiten sind jedoch sehr kostenintensiv und führen zu Verkehrsbehinderungen in hoch ausgelasteten Tunnelbauwerken. Die Gründe für die Entstehung von Versinterungen sind vielfältig. Es spielen sowohl die chemisch-physikalische Zusammensetzung des Bergwassers im Bereich des Tunnels, als auch der Kontakt des Bergwassers mit zementgebundenen Materialien, z. B. Spritzbeton, eine Rolle.

Durch eine Optimierung der Spritzbetonrezeptur kann die Entstehung von Versinterungen reduziert werden. Bei der Entwicklung von Spritzbetonrezepturen mit reduziertem Versinterungspotential kommt dem Ersatz von Klinker mit Zusatzstoffen eine wesentliche Bedeutung zu. Die Änderung der Rezepturzusammensetzung des Spritzbetons beeinflusst dessen Leimgehalt, Klinkergehalt und Wasserbedarf. Aufgrund der häufig geringeren Dichte und der unterschiedlichen Feinheit der Zusatzstoffe muss bei einer Substitution des Klinkers immer auch die Auswirkung auf die Verarbeitbarkeit (Pumpbarkeit) der Frischbetonmischung berücksichtigt werden. Eine Änderung der Bindemittelleimzusammensetzung hat ebenfalls Auswirkungen auf die Eigenschaften des jungen Frischbetons (Frühfestigkeitsentwicklung) und die Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit). Für einen erfolgreichen Einsatz der hinsichtlich einer Reduzierung des Versinterungspotentials entwickelten Spritzbetonrezepturen ist Voraussetzung, dass die Mischungen die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit (Pumpbarkeit) und die Festbetoneigenschaften (Frühfestigkeit und Festigkeit) erfüllen. Die Optimierung eines einzelnen Aspektes ist bei der Rezepturentwicklung von Spritzbeton nicht zielführend, da jede Änderung in der Mischungszusammensetzung mehrere Aspekte beeinflusst.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie Versinterungen von Tunneldrainagen durch eine Optimierung der Spritzbetonrezepturen reduziert werden können. Bei der Rezepturentwicklung sollen insbesondere die Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung und der Festbetoneigenschaften des Spritzbetons berücksichtigt werden. Die Arbeit umfasst folgende Schwerpunkte:

- Reduziertes Versinterungspotential des Spritzbetons
- Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung
- Frühfestigkeit des jungen Spritzbetons und Festigkeit des Spritzbetons

Es soll zunächst untersucht werden, welche Bestandteile der Rezepturzusammensetzung die Entstehung von Versinterungen begünstigen. Für die Beurteilung des Versinterungspotentials soll ein geeignetes, reproduzierbares Prüfverfahren ausgewählt werden und die Einflussfaktoren bei der Versuchsdurchführung sollen erkannt werden. Auf dieser Grundlage sollen Spritzbetonrezepturen mit einem reduzierten Versinterungspotential entwickelt werden.

Für den baupraktischen Einsatz der entwickelten Rezepturen ist Voraussetzung, dass die Frischbetonmischungen verarbeitbar sind. Bei Nassspritzbetonen, die im Dichtstromverfahren hergestellt werden, ist die Pumpbarkeit der Mischungen von zentraler Bedeutung. Es sollen Erkenntnisse gewonnen werden, welche Parameter die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen beeinflussen und wie sie geprüft werden können. Darauf aufbauend sollen die Zusammensetzungen und Eigenschaften der Mischungen, die hinsichtlich eines reduzierten Versinterungspotentials entwickelt werden, festgelegt werden.

Des Weiteren sollen die entwickelten Rezepturen eine ausreichende Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons und Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons gewährleisten. In Großspritzversuchen sollen diese Eigenschaften nachgewiesen werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen den Einsatz von Spritzbetonen mit einem reduzierten Versinterungspotential in der Praxis ermöglichen und somit den Aufwand für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen der Tunnelbauwerke verringern.

2 Stand des Wissens

2.1 Spritzbeton im Tunnelbau

2.1.1 Allgemeines

Bei Spritzbeton handelt es sich um einen Beton, der durch Leitungen gefördert wird und der aus einer Spritzdüse pneumatisch aufgetragen und durch seine Aufprallenergie verdichtet wird [1]. Ein wesentlicher Vorteil beim Einsatz von Spritzbeton ist, dass er aufgrund seiner hohen Frühfestigkeitsentwicklung ohne zusätzliche Schalungen direkt auf die Auftragsfläche aufgebracht werden kann. Für den Baustoff Spritzbeton und das Bauverfahren Spritzbeton werden in den nationalen Regelwerken spezielle Begriffe verwendet, eine Auswahl ist in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt. In dieser Arbeit wird das Mischgut für das Nassspritzverfahren aus Gesteinskörnungen, Bindemitteln, Wasser, evtl. Zusätzen und Fasern als „Frischbetonmischung“ bezeichnet. Der Begriff „Junger Spritzbeton“ bezieht sich auf den Baustoff bis zu 24 h nach Herstellung, der Begriff „Spritzbeton“ wird für den Baustoff, wie Anfangs in diesem Kapitel definiert, verwendet.

Tabelle 1: Definitionen bezüglich Spritzbeton, Teil 1, Auswahl in Anlehnung an [6]

Bezeichnung	Erklärung / Definition	Regelwerk
Dichtstromförderung	Bezeichnet eine Pumpförderung von Nassmischgut ohne Auflockerung in der Förderleitung.	[2]
	Pumpförderung einer nassen Mischung zur Spritzdüse, wo sie durch Zufuhr von Treibluft ausgeworfen und beim Aufprall verdichtet wird. Dichtstromförderung kann nur im Nassspritzverfahren verwendet werden.	[1]
Dünnstromförderung	Bezeichnet eine pneumatische Förderung der Ausgangsmischung zur Einbaustelle. Hier wird das aufgelockerte Trocken- oder Nassmischgut in Flugförderung von der Spritzmaschine zur Düse gefördert.	[2]
Junger Spritzbeton	Spritzbeton bis zum Alter von 24 Stunden.	[1, 2]
Mischgut/Grundmischung	Die für das jeweilige Spritzverfahren bereitgestellte Grundmischung. Die Grundmischung besteht aus Bindemittel und Gesteinskörnung und kann Wasser, Zusatzstoffe, Zusatzmittel und Fasern enthalten.	[2]
Nassmischgut = Frischbetonmischung	Mischgut (Grundmischung) für Nassspritzverfahren (meist Pumpbeton), aus Gesteinskörnungen, Bindemitteln, Wasser, eventuell Zusätze und Fasern.	[2]
	Grundmischung für das Nassspritzverfahren	[1]
Nassspritzbeton	Spritzbeton mit Nassmischgut (im Allgemeinen bei Dichtstromverfahren: Pumpbeton) als Grundmischung.	[2]
Nassspritzverfahren	Verfahren des Spritzens einer Frischbetonmischung mit einem festgesetzten Wasserzementwert.	[1]

Tabelle 2: Definitionen bezüglich Spritzbeton, Teil 2, Auswahl in Anlehnung an [6]

Bezeichnung	Erklärung / Definition	Regelwerk
Rückprall	Jener Anteil des Spritzgemisches (Mischgut und ggf. Zugabewasser), der unmittelbar beim Aufbringen von der Auftragsfläche zurückprallt. Rückprall besteht zum überwiegenden Teil aus Gesteinskörnungen, zum geringeren Teil aus Bindemittel und Anmachwasser.	[2]
Spritzbeton	Beton, der durch Spritzen von Mischgut und ggf. Wasser und/oder Erstarrungsbeschleuniger mit hoher Auftreffgeschwindigkeit aufgetragen und bei diesem Vorgang verdichtet wird.	[2] Achtung: wird auch als Begriff für das spezielle Betonierverfahren und die Bauart verwendet
Spritzdüse	Ein Rohr mit einem Mischkörper für die Zugabe von Flüssigkeit und/oder Luft, durch die das Mischgut die Förderung verlässt. Zugegeben werden beim Trockenspritzverfahren Wasser und gegebenenfalls pulverförmige oder flüssige Zusatzmittel und Zusatzstoffe, beim Nassspritzverfahren im Dichtstromverfahren Luft und eventuell Zusatzmittel.	[2]
Trockenspritzbeton	Spritzbeton mit Trockenmischgut oder Feuchtmischgut als Ausgangsmischung.	[2]
Zyklischer Vortrieb (konventioneller Vortrieb)	Vortriebsart, bei der die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und des Stützmitteleinbaus im Wesentlichen nacheinander und mithilfe von Einzelgeräten ausgeführt werden. Das Lösen erfolgt in der Regel durch Sprengen, Bagger oder Teilschnittmaschine.	[7]

In Deutschland ist das Basisregelwerk für Spritzbetonarbeiten die EN 14487-1 [1] und EN 14487-2 [8] in Verbindung mit der nationalen Ergänzungsnorm DIN 18551 [9], bei Spritzbeton im Tunnelbau sind zusätzlich die Festlegungen der ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1 [10] zu berücksichtigen [11]. In Österreich umfasst die ÖVBB Richtlinie „Spritzbeton“ [2] alle relevanten europäischen Regelwerke.

2.1.2 Spritzverfahren

2.1.2.1 Übersicht Dünn- und Dichtstromverfahren

Die Förderung von Spritzbeton erfolgt im Dünn- oder Dichtstromverfahren. Die beiden Verfahren unterscheidet im Wesentlichen der Zustand der Ausgangsmischung während der Förderung im Schlauch von der Spritzmaschine zur Spritzdüse [12]. In Abbildung 1 sind die wesentlichen Merkmale der beiden Spritzverfahren dargestellt und erläutert.

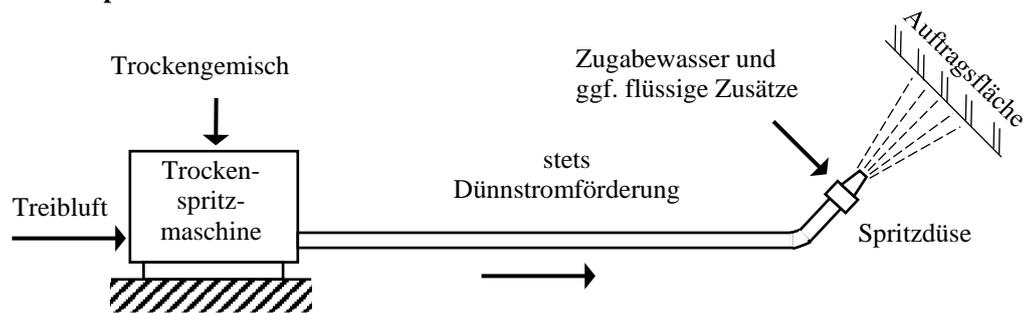
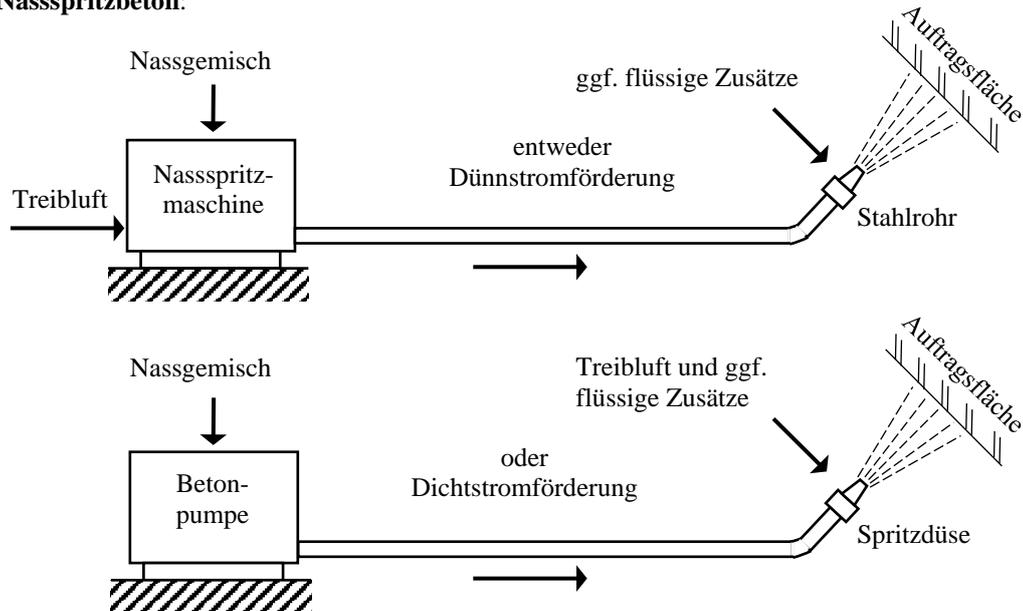
Trockenspritzbeton:**Nassspritzbeton:**

Abbildung 1: Spritzverfahren in Anlehnung an [12] (abweichend zur Originalgrafik wurde bei Nassspritzbeton mit Dünnstromförderung der Beitrag „ggf. flüssige Zusätze“ hinzugefügt)

Bei Trockenspritzbeton wird trockenes oder feuchtes Mischgut im Dünnstrom mittels Druckluft zur Spritzdüse gefördert [13]. Im Prinzip ist die Art des Mischgutes bei diesem Spritzverfahren unerheblich, d. h. es kann sowohl loses Mischgut (trocken oder feucht) oder auch Frischbeton verarbeitet werden. An der Düse werden je nach Spritzbetonart Wasser und/oder flüssige Zusatzmittel zudosiert. Der wesentliche Vorteil bei diesem Verfahren liegt in der hohen Flexibilität, da jederzeit Arbeitsunterbrechungen möglich sind und die Maschine nur einen geringen Reinigungsaufwand erfordert [6].

Bei Nassspritzbeton wird die Frischbetonmischung entweder im Dünnstrom oder im Dichtstrom, d. h. mit Pumpen, zur Düse gefördert [13]. Nassspritzbeton im Dünnstromverfahren kommt derzeit nur selten zum Einsatz. Bei Spritzbeton im Tunnelbau wird im zyklischen Vortrieb in der Regel Nassspritzbeton im Dichtstromverfahren eingesetzt. Wesentliche Gründe hierfür sind vor allem die hohen erforderlichen Spritzleistungen im Vortrieb, die, im Vergleich zum Trockenspritzen, geringere Rückprall- und Staubeentwicklung und der, im Vergleich zum Dünnstromverfahren, deutlich geringere Druckluftbedarf [6]. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit beziehen sich auf Nassspritzbetone, die im

Dichtstromverfahren hergestellt werden. Im nachfolgenden Kapitel 2.1.2.2 wird darauf detaillierter eingegangen.

2.1.2.2 Nassspritzbeton im Dichtstromverfahren für den Tunnelbau

Bei den im Tunnelbau verwendeten Nassspritzmaschinen handelt es sich meist um mobile Spritzbetonmaschinen (siehe Abbildung 2) [6]. Die Düsenführung erfolgt maschinell mit Spritzmanipulator, wodurch der Düsenführer entlastet und große Fördermengen ermöglicht werden [14]. Bei mobilen Spritzbetonmaschinen befinden sich die Betonpumpe, die Zusatzmitteldosierung (Beschleuniger) und der Spritzarm auf einem Trägerfahrzeug. Die Frischbetonmischung wird direkt aus dem Fahrmischer in eine Doppelkolbenpumpe gefüllt und über die Schlauchleitungen zur Spritzdüse gefördert.



Abbildung 2: Beispiel einer mobilen Spritzbetonmaschine für Nassspritzverfahren mit Dichtstromförderung [Florian Steindl, TU Graz]

Bei Doppelkolbenpumpen handelt es sich um eine sogenannte Rohrweichpumpe mit gegenläufig arbeitenden Kolben [15]. Das Fördermaterial wird gleichzeitig von einem Zylinder angesaugt und aus dem anderen Zylinder in die Förderleitung gepumpt. Für einen kontinuierlichen Förderstrom sorgt ein S-Rohr als Weiche, welche den jeweils pumpenden Kolben mit dem Rohrleitungssystem verbindet. Die Förderleistung der Pumpe ist nicht nur abhängig von der Geschwindigkeit der Kolben, sondern auch von deren Füllgrad. Sind die Kolben nicht ausreichend gefüllt, kommt es zu unerwünschten Pulsationen im Förderstrom.

Von der Pumpe ausgehend verjüngt sich der Leitungsquerschnitt vom Durchmesser des Zylinders auf den der Förderleitung. Durch den Pumpvorgang bildet sich in der Förderleitung eine Gleitschicht aus Leim an der Rohrwandung aus. Die Gleitschicht besteht aus Wasser, Bindemittel und Feinanteilen des Sandes [16], der Beton wird im restlichen inneren Querschnitt als Pfropfen gefördert [17]. Das System funktioniert, solange die Mischung auch unter Druck ausreichend stabil ist und eine ausreichend dicke Leimschicht gebildet werden kann.

Am Ende der Leitung, an der Düse, wird der Beschleuniger hinzu dosiert und das Mischgut mit Druckluft aufgerissen und beschleunigt, um eine ausreichende Auftragsgeschwindigkeit zu erreichen (siehe Abbildung 3). Der Spritzstrahl wird in der Düse gebündelt und der Beton, der Erstarrungsbeschleuniger und die Luft durchmischt.



Abbildung 3: Auftrag Spritzbeton in Spritzkisten [Benedikt Lindlar, Sika]

2.1.3 Spezielle Anforderungen

2.1.3.1 Frühfestigkeit junger Spritzbeton

Eine ausreichende Frühfestigkeitsentwicklung ist beim Einsatz von Spritzbeton im Tunnelbau erforderlich, um die Stabilität des Tunnelbauwerks und die Sicherheit der Vortriebsmannschaft zu gewährleisten. Die Frühfestigkeit wird durch die Ausgangsstoffe und die Rezepturzusammensetzung beeinflusst. Einen wesentlichen Einfluss haben die Art des Beschleunigers, die Beschleunigerdosierung bezogen auf den Klinkergehalt sowie der w/z-Wert und die Temperatur [6].

Die Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons kann nach der österreichischen Richtlinie „Spritzbeton“ [2], der DIN EN 14487-1 [1] bzw. der DIN EN 14488-2 [18] mit den indirekten Prüfmethoden Penetrationsnadelverfahren und Setzbolzenverfahren erfolgen (siehe Abbildung 4). Beim Penetrationsnadelverfahren wird eine Nadel mit definierten Abmessungen 15 mm tief in den Beton eingedrückt und es wird die dafür notwendige Kraft ermittelt. Das Verfahren ist für die Bestimmung der Frühfestigkeit bis zu einer Festigkeit von etwa 1,0 N/mm² geeignet. Beim Setzbolzenverfahren werden Setzbolzen mit einer definierten Energie in den Beton eingetrieben (siehe Abbildung 4 a). Es wird die Eindringtiefe der Bolzen gemessen und anschließend die Ausziehungskraft bestimmt (siehe Abbildung 4 b).

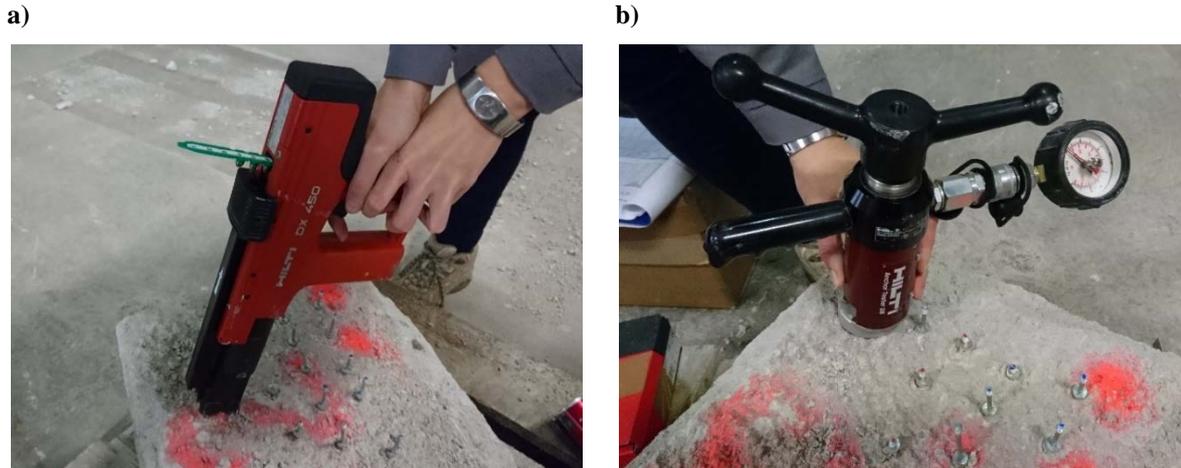


Abbildung 4: Setzbolzenverfahren zur Bestimmung der Frühfestigkeit des Jungen Spritzbetons a) Eintreiben der Bolzen b) Ermittlung der Ausziehungskraft [Florian Steindl, TU Graz]

Für die Berechnung der Festigkeit ist das Verhältnis zwischen Eindringtiefe und Ausziehungskraft zu ermitteln. Das Verfahren kann ab einer Festigkeit von ca. 2 N/mm² angewandt werden. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse ist die Einteilung des Spritzbetons in die drei Frühfestigkeitsklassen J1, J2 und J3 möglich (siehe Abbildung 5).

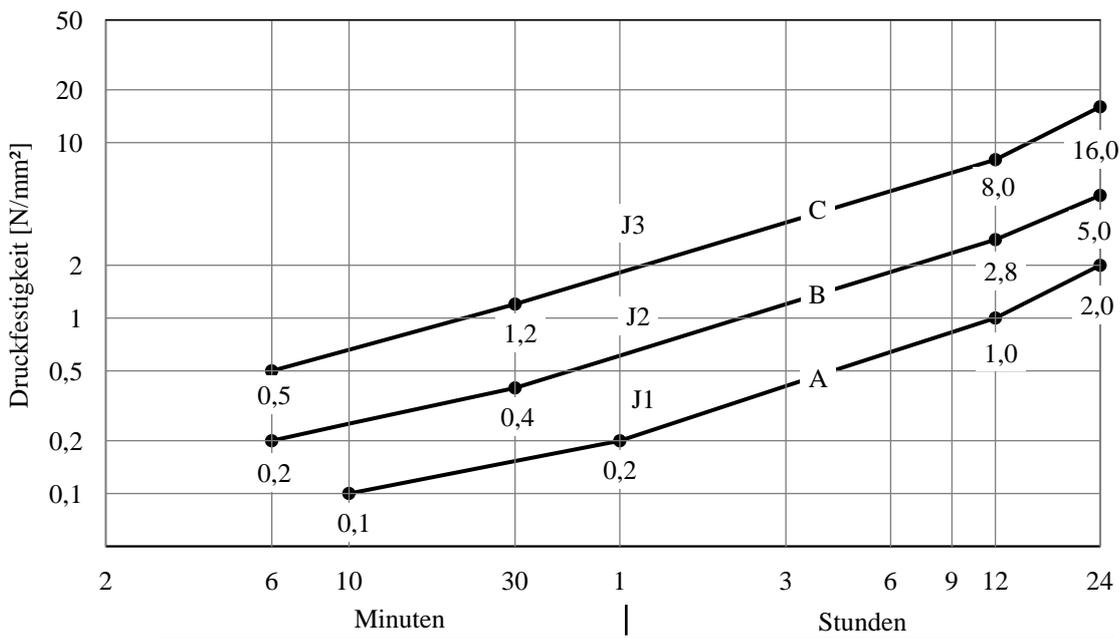


Abbildung 5: Frühfestigkeitsklassen des Jungen Spritzbetons in Anlehnung an [2]

Für einen Großteil der Bauvorhaben im Tunnelbau ist die Frühfestigkeitsklasse J2 ausreichend. Eine zu hohe Frühfestigkeit unmittelbar nach dem Auftrag hat negative Auswirkungen auf den Rückprall und die Staubentwicklung und sollte deshalb nur bei Bedarf, z. B. bei hohem Wasserandrang, ungünstigem Untergrund, statischen Anforderungen oder raschem Vortrieb, eingesetzt werden [2].

2.1.3.2 Festbetoneigenschaften Spritzbeton

Die Festbetoneigenschaften von Spritzbeton werden durch die Mischungszusammensetzung und das Spritzverfahren beeinflusst. Bei der Rezepturenentwicklung ist zu berücksichtigen, dass sich die Zusammensetzung der Frischbetonmischung von der Zusammensetzung des Spritzbetons an der Auftragsfläche unterscheidet. Die Unterschiede ergeben sich aus dem Rückprall und der Betonverdichtung während des Auftrags sowie der Zugabe von Beschleuniger an der Düse. Der Spritzbeton hat aufgrund des Rückpralls nach dem Auftrag eine zementreichere Zusammensetzung als die Grundmischung [13].

Außerdem beeinflusst die Düsenführung und die Fachkompetenz des Düsenführers die Qualität des Spritzbetons. Grundsätzlich sollte möglichst senkrecht auf die Auftragsfläche gespritzt und ein passender Abstand gewählt werden, sodass eine möglichst gute Verdichtung und somit Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit und geringe Rückprallverluste erreicht werden [6]. Folgende Faktoren sind beim Auftrag des Spritzbetons von Bedeutung:

- Spritzwinkel zur Auftragsfläche
- Düsenabstand zur Auftragsfläche
- Austrittsgeschwindigkeit

Die Beurteilung der Festbetoneigenschaften von Spritzbeton erfolgt an Probekörpern, die im Spritzverfahren hergestellt wurden, um den Einfluss des Spritzvorgangs mit zu berücksichtigen. Für die Gewinnung der Probekörper werden sogenannte Spritzkisten oder Probekisten im Spritzverfahren hergestellt. Aus den Spritzkisten werden anschließend Bohrkerne für die entsprechenden Festbetonprüfungen gewonnen [13]. Alternativ werden Platten oder Balken bereits als Probekörper gespritzt, oder Bohrkerne direkt aus dem Bauwerk gewonnen [6]. Bei der Herstellung von Probekisten ist darauf zu achten, dass der Rückprall entweichen kann und die Abmessungen der Probekisten ausreichend groß sind. Die Probenentnahme von Bohrkernen aus den Spritzkisten sollte in Spritzrichtung erfolgen. Die Anforderungen an die Festbetoneigenschaften des Spritzbetons im Tunnelbau sind von der jeweiligen Bausituation abhängig und im Einzelfall z. B. über Expositionsklassen festzulegen. Daraus ergeben sich die entsprechenden Prüfverfahren und die nachzuweisenden Eigenschaften [2], z. B.:

- Druckfestigkeit
- Wassereindringtiefe
- Dauerhaftigkeit (z. B. Sulfatbeständigkeit, Versinterungspotential, lösender Angriff)
- Frost/Frost-Taumittel-Beständigkeit

2.1.4 Anwendung

2.1.4.1 Zyklischer Tunnelvortrieb und Ausbausysteme

Im zyklischen Tunnelvortrieb ist Spritzbeton ein wesentlicher Bestandteil der Erstsicherung nach dem Ausbruch des Gebirges, um Auflockerungen und Ablösungen zu vermeiden. Weitere Begriffe für zyklischen Tunnelvortrieb sind „Spritzbetonbauweise“ oder auch „NÖT - Neue

Österreichische Tunnelbauweise“. Das Gebirge wird bei diesem Verfahren in Abschlügen z. B. im Spreng- oder Baggervortrieb ausgebrochen, deren Länge und Form sich nach der Standzeit des umgebenden Gebirges richtet. Im Anschluss erfolgen der Abtransport des Ausbruchmaterials („Schuttern“) und das Einbringen der primären Stützmaßnahmen [19]. Der Spritzbeton wird aus Gründen der Arbeitssicherheit häufig sowohl an der Ortsbrust als temporäre Maßnahme und als verbleibende Schale an der Tunnellaibung aufgebracht. Je nach Eigenschaften des Gebirges werden als Stützmittel Kombinationen aus Spritzbeton und Ankern, Stahlbögen oder Gitterbögen, Baustahlgewebe oder Stahlfaserbewehrung gewählt [6]. Ergänzend können z. B. auch Spieße, Rohrschirme oder Hochdruckinjektionen eingesetzt werden [19]. Aufgrund seiner hohen Frühfestigkeitsentwicklung trägt der Spritzbeton unmittelbar nach dem Auftrag zur Bildung eines Gebirgstragringes bei. Er dringt in kleinste Klüfte und Hohlräume ein und haftet gut auf festem Untergrund [6]. Der zyklische Tunnelvortrieb wird durch die immer wiederkehrenden Arbeitsschritte Ausbruch, Schuttern und Einbringen der primären Stützmaßnahmen charakterisiert. Für den permanenten Ausbau ist in der Regel neben dem o.g. primären Ausbau ein sekundärer Ausbau erforderlich, um alle endgültigen Lastfälle abzudecken und die Anforderungen an die Lebensdauer des Bauwerks zu erfüllen [19]. Bei der Wahl des sekundären Ausbausystems kommt insbesondere der Abdichtung des Bauwerks gegen eindringendes Bergwasser eine wesentliche Bedeutung zu (siehe Kapitel 2.1.4.2). Der sekundäre Ausbau kann entweder in Ortbeton oder mit einer zweiten Spritzbetonschale erfolgen, was im Einzelfall anhand der örtlichen Gegebenheiten festzulegen ist.

2.1.4.2 Überblick der Abdichtungs- und Entwässerungssysteme zweischaliger Tunnelbauwerke

Für die Abdichtung und Bemessung von zweischaligen Tunnelbauwerken gegen eindringendes Bergwasser gibt es im Wesentlichen drei mögliche Entwässerungs- und Abdichtungskonzepte [20–22]. Eine detailliertere Unterteilung der Systeme ist in [23] aufgeführt. Je nach Wahl des Systems wird die Ausbildung des Wasserdrucks beim Zufluss zum Tunnelhohlraum beeinflusst (siehe Abbildung 6) und die Konstruktion des Bauwerks ist entsprechend auszulegen.

Bei einer druckwasserhaltenden Abdichtung wird das Bauwerk auf den vollen Wasserdruck bemessen und rundum abgedichtet. Je höher der Wasserdruck ist, umso höher sind bei dieser Bauweise die Kosten für die Erstellung des Bauwerks. Die Dichtheit des Bauwerks darf zu keinem Zeitpunkt gefährdet sein, da ansonsten Schäden an der Konstruktion entstehen und im Extremfall die Standsicherheit gefährdet wird. Der Vorteil bei dieser Variante besteht darin, dass keine Wartungsmaßnahmen des Entwässerungssystems anfallen und nicht in den natürlichen Bergwasserstand eingegriffen wird.

Bei hohen Wasserdrücken besteht die eher selten angewandte Möglichkeit mit einer Teilentspannung den Wasserdruck auf ein bestimmtes Niveau zu begrenzen. Der auf das Bauwerk einwirkende Wasserdruck wird durch diese Maßnahme gesenkt.

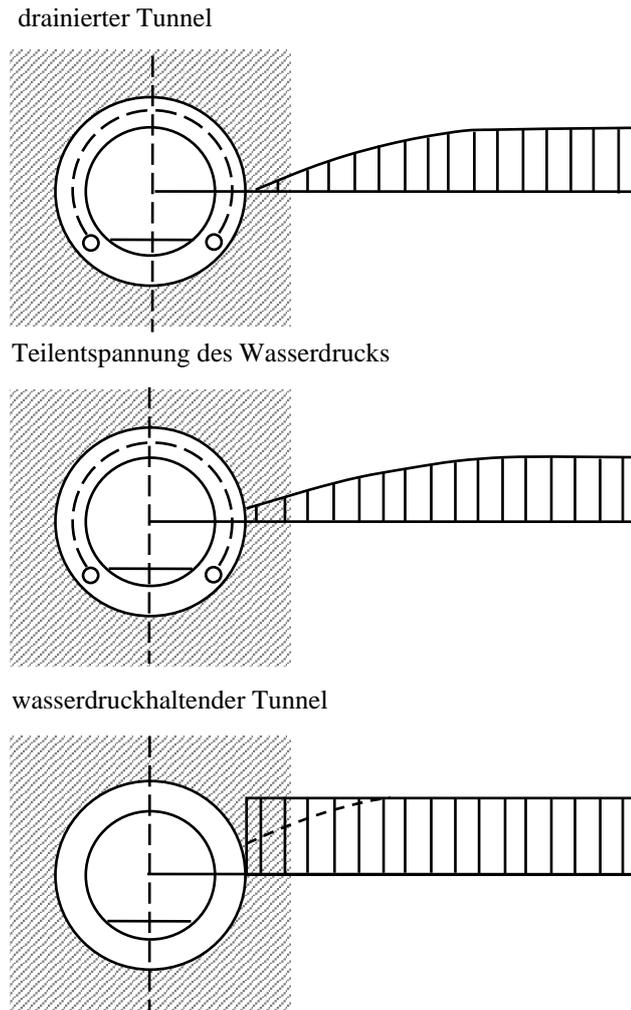


Abbildung 6: Wasserdruckaufbau beim Zufluss zum Tunnelhohlraum in Anlehnung an [20] (abweichend zur Originalgrafik fehlen die Darstellung für „Wasserverdrängung durch Injektionen“ und „zusätzliche Druckentlastung durch Entwässerungsbohrung“)

Aus wirtschaftlichen und baupraktischen Gründen wird häufig die Alternative einer nicht druckwasserhaltenden Abdichtung (drainierter Tunnel) gewählt. Dabei wird das Bergwasser gezielt über Entwässerungssysteme aus dem Bauwerk geleitet und der Wasserstand auf einem planmäßig festgelegten Niveau gehalten. Die Funktionstüchtigkeit des Entwässerungssystems muss nach Fertigstellung des Bauwerks gewährleistet werden, damit keine Schäden an der Konstruktion durch einen Anstieg des Bergwasserdrucks entstehen. Auf die in diesem Zusammenhang stehende Problematik, aufgrund von Versinterungen im Entwässerungssystem, wird im nachfolgenden Kapitel 2.2 eingegangen.

2.2 Versinterungspotential von Spritzbeton

2.2.1 Entstehung, Ursachen und Folgen von Versinterungen

Bei Versinterungen handelt es sich um Kalkablagerungen, die in den Entwässerungssystemen von nicht-druckwasserhaltenden Tunnelbauwerken (drainierter Tunnel) auftreten können (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Drainageleitung mit Versinterung [24]

Die Ablagerungen können zu einem Teil- oder Vollverschluss der Rohre führen und das Bergwasser kann nicht mehr ungehindert abfließen. Der sich aufbauende Wasserdruck hinter der Innenschale führt zu Wassereintritten in den Tunnel oder sogar zu Hebungen in der Sohle, weil das Bauwerk nicht auf diesen hohen Wasserdruck bemessen wurde. Versinterungen in den Drainageleitungen sind regelmäßig zu entfernen, damit die Funktionstüchtigkeit des Entwässerungssystems gewährleistet wird. Die Reinigung der Drainagerohre ist je nach Ausmaß und Härte der Versinterungen mit erheblichen Kosten und Verkehrsbehinderungen verbunden [23, 25]. Sie kann mit hydraulischen, hydromechanischen oder mechanischen Reinigungsgeräten, wie sie bei der Kanalreinigung eingesetzt werden, durchgeführt werden [26]. Problematisch sind dabei die sehr hohen Kräfte und Kraftstöße, die auf die Leitungen einwirken und es besteht das Risiko von Schäden am Entwässerungssystem und folglich von hohen Instandhaltungskosten.

Die Entstehung von Versinterungen wird durch die chemisch-physikalische Zusammensetzung des Bergwassers im Bereich des Tunnels und durch den Kontakt des Bergwassers mit zementgebundenen Baustoffen beeinflusst. Bei zweischaligen, nicht-druckwasserhaltenden Tunnelbauwerken wird das Bergwasser über Abschlachungen oder Risse und Fehlstellen im Spritzbeton zu einer Abdichtungsbahn geleitet (siehe Abbildung 8).

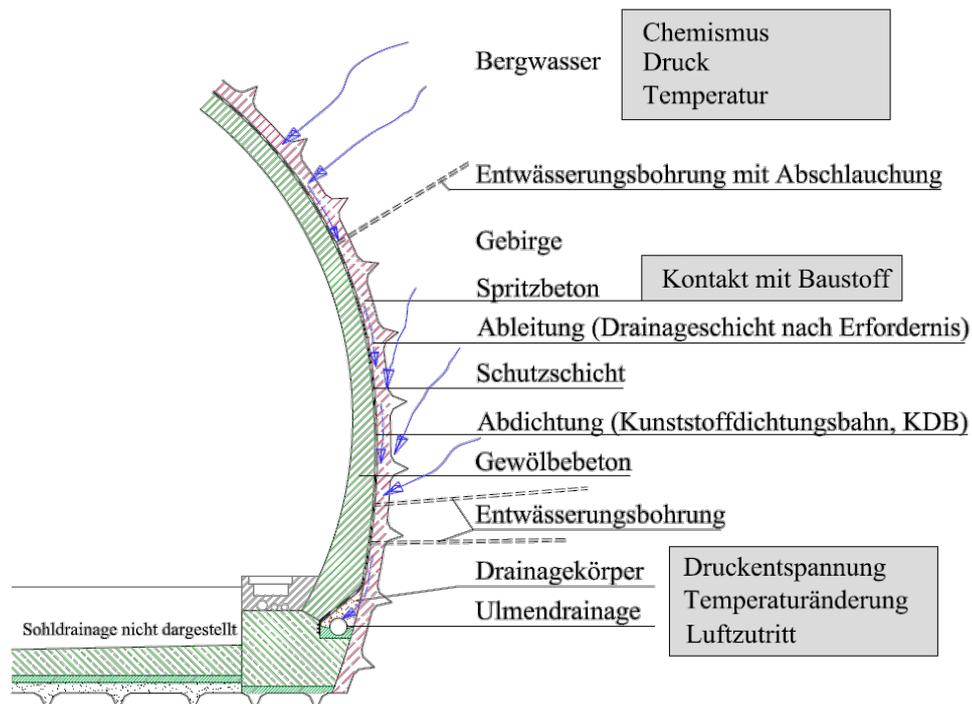


Abbildung 8: Weg des Bergwassers in die Ulmendrainage in Anlehnung an [24]

Die Abdichtung befindet sich zwischen der Außenschale, in der Regel Spritzbeton, und der Innenschale. Das Bergwasser wird entlang der Abdichtung zu Drainageleitungen an der Ulme und/oder an der Sohle geführt und aus dem Bauwerk abgeleitet. Beim Weg in die Drainageleitungen kommt das Wasser in Kontakt mit zementgebundenen Materialien und gleichzeitig ändern sich die Umgebungsbedingungen (Druck- und Temperaturverhältnisse, Luftzutritt). Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Wassers kann dadurch gestört werden. Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht beschreibt vereinfacht den Anteil an gelöstem Calciumhydrogencarbonat unter den gegebenen Umgebungsbedingungen. Wird ein Parameter des Gleichgewichtes gestört, treten Versinterungen in den Drainagerohren auf. Dabei gibt es nicht beeinflussbare Faktoren, z. B. die Zusammensetzung des Bergwassers und die Umgebungsbedingungen, sowie beeinflussbare Faktoren, z. B. der Kontakt des Bergwassers mit zementgebundenen Baustoffen. Diese Faktoren können zu einer Änderung der Temperatur, des pH-Werts oder des CO_2 -Gehalts (Partialdrucks) führen, wodurch weniger Calciumhydrogencarbonat in Lösung gehalten werden kann und Kalk in Form von Calciumcarbonat ausfällt (siehe Abbildung 9). Die Entstehung von Versinterungen wird dadurch begünstigt oder verstärkt.

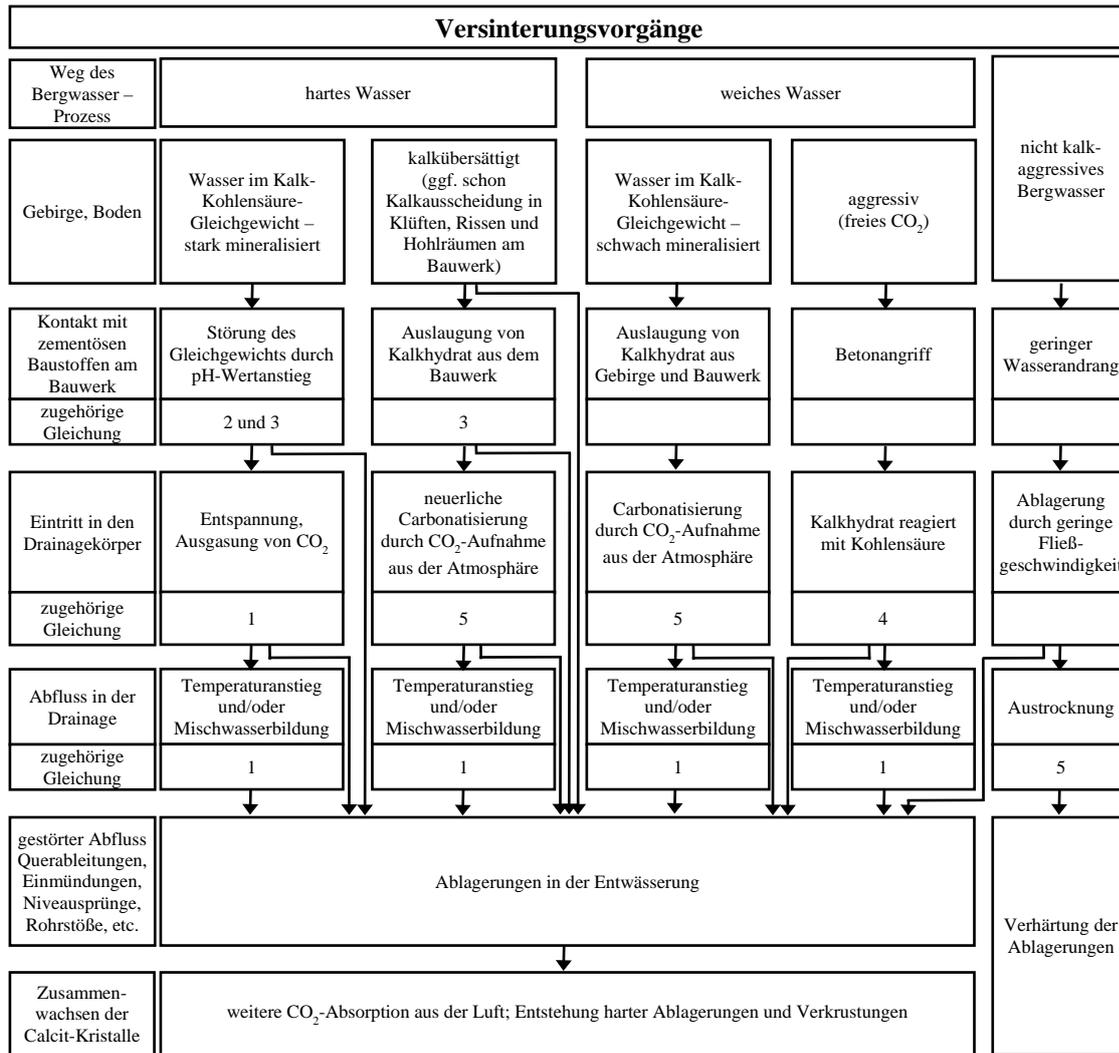
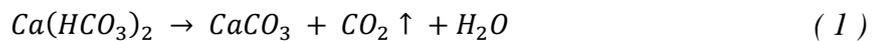


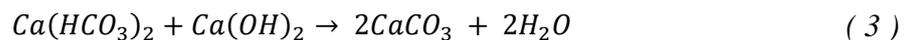
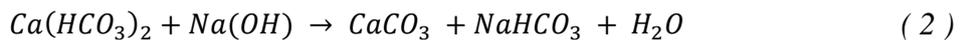
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Versinterungsvorgänge in Anlehnung an [24]

Folgende Gleichungen bilden die Grundlage für die in Abbildung 9 dargestellten Versinterungsmechanismen [24]:

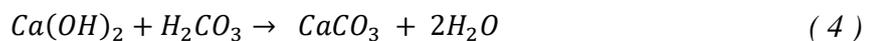
Versinterung durch kalkübersättigtes Wasser



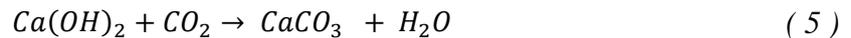
Versinterung durch eine Erhöhung des pH-Werts des Bergwassers



Versinterung durch kohlen-saures (kalkaggressives) Wasser



Versinterung durch Kalkhydrat-Lösung



Außerdem kann durch die Mischung von Wässern mit unterschiedlicher Zusammensetzung, die sog. Mischwasserbildung, die Entstehung von Versinterungen begünstigt werden. Detaillierte Beschreibungen zu den Entstehungsmechanismen und Einflussfaktoren sind u. a. enthalten in [24, 27–29].

2.2.2 Lösungsansätze

2.2.2.1 Bauliche Maßnahmen

Bei der Entwicklung eines Tunnelentwässerungskonzepts sind alle wasserfassenden und wasserableitenden Einzelkomponenten zu berücksichtigen, um ein System mit geringem versinterungsbedingtem Wartungs- und Instandhaltungsaufwand zu entwickeln (siehe Abbildung 10) [30–34]. Es müssen sowohl baupraktische als auch wirtschaftliche Überlegungen mit einbezogen werden.

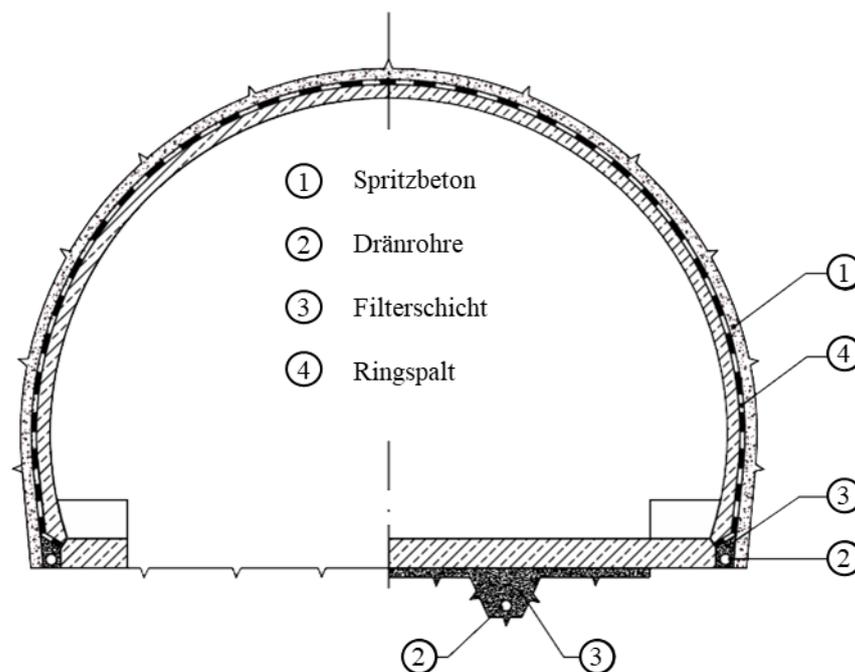


Abbildung 10: Wasserfassende und -ableitende Einzelkomponenten in Anlehnung an [30]

Die Gestaltung und Ausführung des Entwässerungssystems kann einen Beitrag dazu leisten, dass bereits die Entstehung von Versinterungen verringert wird. Es ist zwischen dem primären und dem sekundären Entwässerungssystem zu unterscheiden [24]. Die Elemente des primären Entwässerungssystems umfassen z. B. die Drainagematten und die Abschlauungen und sind nach dem Einbau nicht mehr zugänglich. Zum sekundären Entwässerungssystem gehören z. B. die Ulmendrainage, die Sohl drainage und die Kontrollschächte, die auch nach Fertigstellung des Bauwerks zugänglich sind. Bei der Ausbildung des sekundären Entwässerungssystems ist darauf zu achten, dass stets die Zugänglichkeit und Instandhaltungsfähigkeit erhalten bleibt.

Die Drainagerohre müssen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen die bei etwaigen Reinigungsarbeiten einwirkenden Kräfte aufweisen [27]. Des Weiteren müssen die Rohre ausreichend dimensioniert sein, um das anfallende Bergwasser zu fassen. Aber sie dürfen nicht überdimensioniert sein, um die Verdunstung und den Kontakt des Wassers mit der Atmosphäre möglichst gering zu halten [35]. Eine wirksame Methode um die Entstehung von Versinterungen zu reduzieren ist es, den Kontakt des Bergwasser mit zementgebunden Baustoffen zu minimieren. Starke örtliche Wasserzutritte werden durch Abschlachungen direkt abgeleitet und kommen somit nicht in Kontakt mit dem Spritzbeton (siehe auch Kapitel 2.2.2.3) [36]. Bei den genannten Maßnahmen handelt es sich um ausgewählte Beispiele, die keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit haben. Die baulichen Maßnahmen zur Reduzierung von Versinterungen sind immer im Gesamtkonzept des individuellen Bauwerks zu betrachten und zu entwickeln.

2.2.2.2 Härtestabilisierung

Eine weitere Möglichkeit, um die Entfernung von Versinterungen in den Drainageleitungen zu erleichtern, ist der Einsatz von Härtestabilisatoren [20, 25, 26, 35–42]. Dabei handelt es sich um Kristallisationsinhibitoren, welche die Bildung von Versinterungen stören. Das Wachstum der Ablagerungen wird gehemmt und die Festigkeit der entstehenden Versinterungen wird verringert. Die Drainageleitungen können somit leichter gereinigt und die Reinigungszyklen verlängert werden. Beim Einsatz und der Auswahl von Produkten zur Härtestabilisierung sind die hydrologischen und verfahrenstechnischen Randbedingungen des Tunnelbauwerks zu berücksichtigen [42]. Die Drainagen von Tunnelbauwerken sind meist direkt an Vorfluter, wie Bäche oder Flüsse angeschlossen, weshalb grundsätzlich nur ökologisch unbedenkliche Stoffe verwendet werden können. Außerdem müssen die jahreszeitlich bedingten Schwankungen der anfallenden Wassermengen und die klimatischen Randbedingungen im Tunnelbauwerk berücksichtigt werden.

Im Tunnelbau geht der erstmalige Einsatz von Härtestabilisierungsverfahren auf Patente von Wegmüller zurück [43–46]. Sie können sowohl in flüssiger Form als auch in Form von Depotsteinen gezielt dosiert werden. Als Wirkstoff für flüssige Härtestabilisatoren kommt Polyasparaginsäure zum Einsatz. In Abbildung 11 ist die Wirkungsweise schematisch dargestellt.

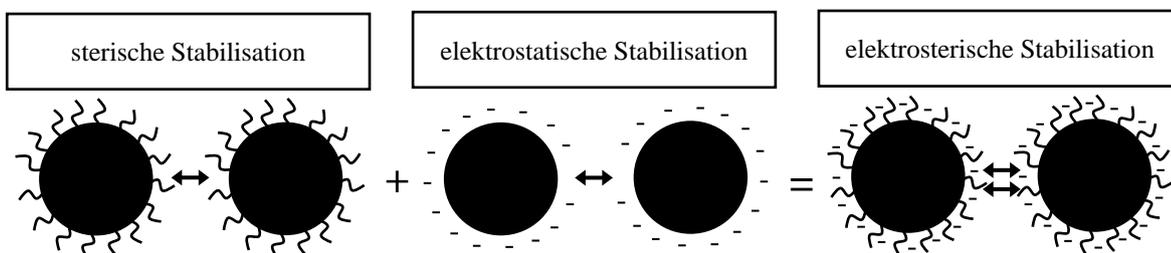


Abbildung 11: Schemaskizze der elektrosterischen Stabilisation von Härtestabilisatoren in Anlehnung an [43]

Die Wirkungsweise der Polyasparaginsäure, die sog. „elektrosterische Stabilisation“, beruht auf den Mechanismen der „sterischen Stabilisation“ und der „elektrostatischen Stabilisation“ [43].

Die „sterische Stabilisation“ beschreibt den Mechanismus, durch den das Zusammenwachsen der Kalkkristalle verhindert wird, indem sich langkettige Härtestabilisatoren an der Oberfläche der Kalkkristalle anlagern. Bei der „elektrostatischen Stabilisation“ wird die negative Oberflächenladung der Kalkkristalle und so die Abstoßung von Kristallen durch gleiche Ladung verstärkt.

Für Polyasparaginsäure ist keine Trägersubstanz bekannt, um sie in eine feste Form zu transformieren. Deshalb wird Polysuccinimid, welches im wässrigen alkalischen Milieu zu Salzen der Polyasparaginsäure hydrolysiert, als Wirkstoffbasis für Depotsteine genutzt [42]. Die Wahl einer flüssigen Härtestabilisation oder der Einsatz von Depotsteinen ist im Wesentlichen abhängig von der auftretenden Wassermenge im Entwässerungssystem. Bei teilweise trockenen Drainageleitungen ist der Einsatz von Depotsteinen günstiger, da sie erst bei Kontakt mit Wasser aufgelöst werden und somit länger wirksam bleiben. Bei einer kontinuierlichen flüssigen Härtestabilisation würde bei teilweise trockenen Drainageleitungen eine Überkonditionierung auftreten, weshalb deren Einsatz nur bei einer konstanten Wassermenge sinnvoll ist [43].

2.2.2.3 Betontechnologische Maßnahmen

Der Kontakt des Bergwassers mit zementgebundenen Materialien und die damit verbundene Auslaugung von Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Alkalien begünstigt die Bildung von Versinterungen [28, 35, 36, 47]. Bei der Wahl der Ausgangsstoffe und der Mischungszusammensetzung von Baustoffen, die in Kontakt mit dem Bergwasser treten, ist auf eine geringe Eluierbarkeit zu achten.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung von Spritzbetonrezepturen mit reduziertem Versinterungspotential, weshalb auf diesen Baustoff nachfolgend detaillierter eingegangen wird.

In den ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau [10] und in der RI-BWD-TU [33] wird gefordert auf eine geringe Auslaugbarkeit des Spritzbetons zu achten und alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger zu verwenden. Das Gesamt- Na_2O -Äquivalent, welches die in den Beton eingebrachte Alkalimenge bezogen auf die Zementmenge beschreibt, muss nach [10] unter 1,5 M.-% liegen. In den ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau [10] und in der RI-BWD-TU [33] werden jedoch keine konkreten Festlegungen und Vorgaben eines Prüfverfahrens für die Beurteilung der Betonzusammensetzungen genannt. Genauere Angaben werden in den österreichischen Richtlinien „Spritzbeton“ [2] und „Tunnelentwässerung“ [24] getroffen. Das Versinterungspotential des Spritzbetons wird durch den „RV-Wert“ (RV=Reduziertes Versinterungspotential) charakterisiert. Damit kann ein an die Spritzbetonrezeptur und das Bauwerk angepasster Grenzwert festgelegt werden, der die zulässige Auslaugung von Calcium in kg/t Spritzbeton nach dem Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials“ [3] beschränkt (siehe auch Kapitel 2.2.3.3). Im Folgenden werden die Ausgangsstoffe des Spritzbetons und ihr Einfluss auf das Versinterungspotential des Spritzbetons im Einzelnen betrachtet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zusätzlich zu den einzelnen Ausgangsstoffen auch die gesamte Mischungszusammensetzung und die Porosität des Spritzbetons einen Einfluss auf die Auslaugung versinterungsrelevanter Stoffe haben. Bei einer hohen Porosität des Spritzbetons

wird die Auslaugung versinterungsrelevanter Stoffe, unabhängig davon ob Ausgangsstoffe mit einem geringen Versinterungspotential verwendet wurden, begünstigt. Neben der Art des Klinkers und der Art der Zusatzstoffe hat auch ihr Anteil in der Mischungszusammensetzung einen Einfluss auf die Auslaugrate. Bei der Substitution des Klinkers im Bindemittel mit Zusatzstoffen ergibt sich allein aufgrund des geringeren Kalkhydratgehalts eine Reduktion der Calciumauslaugung [48].

Bindemittel und Zusatzstoffe

Die Entstehung von Versinterungen wird durch die Auswahl des Bindemittels im Spritzbeton beeinflusst, dabei dürfen jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Frühfestigkeit und die Verarbeitbarkeit auftreten. Untersuchungen von Breitenbücher et al. [28, 49, 50] zeigen, dass eine Reduzierung der Calciumauslaugung durch den Einsatz von Hochofenzementen, Flugasche, Silikastaub und Silikasuspensionen sowie Zementen mit geringem Alkaligehalt möglich ist. In Österreich wird AHWZ (Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung) als Zusatzstoff im Bindemittel eingesetzt, um Versinterungen zu verringern [51]. AHWZ ist ein Kombinationsprodukt aus Flugasche, Hüttensand und Kalksteinmehl [4]. Die Calciumauslaugung wird zum einen durch die puzzolanische und/oder latent-hydraulische Reaktion während der Hydratation als auch durch die Reduzierung des Klinkergehalts im Bindemittel verringert [48]. Ein negativer Einfluss des Anteils an Kalksteinmehl wurde bei dieser Bindemittelkombination nicht festgestellt. Ein weiterer Vorteil beim Einsatz von Zusatzstoffen ist neben der Reduzierung des Klinkergehalts im Bindemittel und den chemischen Reaktionen, die zu einer geringeren Auslaugung führen, dass die Bindemittelmatrix dichter und damit die Porosität erniedrigt werden kann.

Gesteinskörnung

Die Auswahl der Gesteinskörnung für den Spritzbeton im Tunnelbau ist aus baupraktischer und wirtschaftlicher Sicht häufig sehr eingeschränkt. Es wird angestrebt die lokal vorhandene Gesteinskörnung oder aufbereitetes Tunnelausbruchmaterial zu verwenden. Inwiefern und unter welchen Randbedingungen der Einsatz von kalkhaltigen Gesteinskörnungen die Entstehung von Versinterungen begünstigt ist derzeit nicht geklärt. Häufig wird deshalb empfohlen nur nicht-kalkhaltige Zuschläge zu verwenden [47, 50], insbesondere in Bereichen in denen Spritzbeton mit Bergwasser mit aggressiver Kohlensäure in Kontakt kommt. Untersuchungen aus den 80er Jahren von Locher et al. [52] über einen Zeitraum von 20 Jahren haben ergeben, dass Betone mit kalkhaltiger Gesteinskörnung, die mit Wasser mit kalkaggressiver Kohlensäure umströmt wurden, eine wesentliche geringere Beständigkeit aufweisen als Betone mit quarzitischer Gesteinskörnung. In kürzeren Auslaugversuchen von nur zwei Tagen konnte von Breitenbücher [50] kein Unterschied zwischen den Auslaugraten von Betonen mit Kalksplitt und mit Basaltsplitt festgestellt werden.

Die Sieblinie der Gesteinskörnung ist so zu wählen, dass ein möglichst dichtes Gefüge des Spritzbetons erreicht wird. Bei einer optimierten Sieblinie wird der Leimbedarf gesenkt und folglich auch der Anteil versinterungsrelevanter Bestandteile des Zements [53].

Beschleuniger

Als besonders negativ auf die Versinterungsneigung hat sich vor allem in den 80er Jahren der Einsatz alkalihaltiger Beschleuniger, z. B. auf Basis von Wasserglas, Natrium- oder Kaliumaluminat, herausgestellt [28, 35, 47, 50]. Die Alkalien können schnell aus dem Spritzbeton ausgelaugt werden und führen zu einer Erhöhung des pH-Werts im Eluat. Die Entstehung von Versinterungen wird indirekt gefördert, da bei hohen pH-Werten weniger Calciumhydroxid in Lösung gehalten werden kann und sehr früh und intensiv Calciumcarbonat in Form von Versinterungen ausfällt. Beim Bau der Neubaustrecke Hannover-Würzburg, Ende der 80er Jahre, wurden Beschleuniger aus Wasserglas eingesetzt und es gab erhebliche Schäden an der Spritzbetonschale. Es waren u. a. die Wasserundurchlässigkeit und chemische Beständigkeit des Spritzbetons nicht ausreichend und in den Drainageleitungen traten starke Versinterungen auf [6]. Die Verwendung alkalihaltiger Beschleuniger ist auch aus Gründen der Arbeitssicherheit für die Mannschaft, wegen der Gefahr von Haut- und Augenverletzungen, nicht zu empfehlen [2]. Ende der 90er Jahre gelang ein Durchbruch um diese Probleme zu vermeiden, indem von der Bauchemie alkaliarme bzw. alkalifreie Beschleuniger auf den Markt gebracht wurden [6]. Die Erfahrungen beim Einsatz der alkalifreien Beschleuniger haben gezeigt, dass im Vergleich zu alkalihaltigen oder alkaliarmen Beschleunigern wesentlich geringere Auswirkungen auf die Versinterungsneigung zu erwarten sind [32, 47, 54, 55].

2.2.2.4 Weitere Lösungsansätze

Für die Reduzierung von Versinterungen ist es grundsätzlich erforderlich die Entstehungsprozesse und Ursachen im Detail zu verstehen. An der TU Graz werden verstärkt chemische, mineralogische und isopenchemische Analysen sowie hydrogeochemische Modellierungen durchgeführt, um die Einflussfaktoren zu identifizieren und ggf. Gegenmaßnahmen zu entwickeln [56–59]. Die Untersuchungen werden teilweise im Rahmen von Fallstudien an ausgewählten Tunnelbauwerken in Österreich und in systematischen Laborversuchen durchgeführt. Aus den Ergebnissen können Modellierungskonzepte zur Ermittlung der Abscheidungskapazitäten und der Geschwindigkeit der Abscheidungen entwickelt werden. Dieses Wissen ermöglicht es, Prognosen über die Entstehung von Versinterungen zu entwickeln und rechtzeitig Maßnahmen zur gezielten Vermeidung und/oder Verringerung von Versinterungen zu ergreifen.

Ein numerisches Modell zur Beschreibung der Lösungs- bzw. Diffusionsvorgänge von Calcium aus zementgebundenen Stoffen wurde in einem Forschungsprojekt an der Universität Innsbruck entwickelt [60, 61]. Das Modell liefert eine mathematische Beschreibung der Lösungs- und Diffusionsvorgänge und bietet somit die Möglichkeit der rechnerischen Abschätzung der Auslaugrate von Calcium aus Beton. Grundlage für die Entwicklung des Modells waren Ergebnisse aus experimentellen Laborversuchen an Bindemittel- und Mörtelproben. Bei der Berechnung werden die Klinkermineralogie, die Bindemittel- und Betonzusammensetzung sowie die Änderung des Porenraums durch Auslaugung der calciumhaltigen Feststoffanteile berücksichtigt. Die Ergebnisse des Modells sollen Aussagen zum Versinterungspotential des Betons liefern.

Die ÖBB strebt in einem aktuellen Forschungsprojekt die Entwicklung eines Monitoring-systems an, welches die Entstehung von Versinterungen in den Drainageleitungen laufend kontrolliert [62, 63]. Die Reinigungsintervalle und -methoden können damit optimal auf den Grad der Versinterungen abgestimmt werden. Das Ziel der Maßnahme ist es, die Lebensdauer der Drainageleitungen zu erhöhen, Gleissperrungen zur Inspektion mittels Kamerabefahrung weitgehend zu vermeiden und bessere Vorhersagen über erforderliche Sperrzeiten treffen zu können.

2.2.3 Beurteilung des Versinterungspotentials

2.2.3.1 Freisetzungsmechanismen

Der Kontakt von Beton mit einem wässrigen Medium führt dazu, dass sich ein Ausgleichsprozess zwischen dem wässrigen Medium und dem Porenwasser, das sich im Gleichgewicht mit der Zementsteinmatrix befindet, einstellt. Die Auslaugung von Calcium aus der Zementsteinmatrix ist in der Regel diffusionsgesteuert. Allgemein betrachtet, werden bei der Diffusion zwei oder mehrere miteinander in Berührung stehende Stoffe (Flüssigkeiten, Gase oder lösliche Feststoffe in einer Flüssigkeit) vermischt [64]. Statistisch gesehen bewegen sich mehr gelöste Teilchen aus Bereichen, in denen sie in hoher Konzentration vorliegen, in Bereiche niedrigerer Konzentration [64]. Durch Unterschiede in der Teilchenkonzentration wird ein Mischungs- und Ausgleichsprozess angeregt, welcher dazu führt, dass sich die Konzentrationsunterschiede angleichen. Die Diffusion läuft beim Beton vorwiegend über die Kapillarporen der Zementsteinmatrix ab [65]. Eine freie Diffusion wird durch physikalische und chemische Faktoren verlangsamt [66]. Zu den physikalischen Faktoren gehören die Gesamtporosität, die Geometrie und die Gewundenheit (Tortuosität) der Poren. Außerdem treten im Porenwasser der Zementsteinmatrix chemische Reaktionen auf, wie pH-Wert abhängige Auflösung oder Ausfällung, Oxidationen und Reduktionen und Reaktionen der gelösten Ionen untereinander, welche die Auslaugung beeinflussen. Beim effektiven Diffusionskoeffizient $D_{e,i}$ werden diese chemischen und physikalischen Faktoren berücksichtigt [67]. Die Ermittlung des effektiven Diffusionskoeffizienten bzw. des maßgebenden Freisetzungsmechanismus erfolgt in Auslaugtests (siehe Kapitel 2.2.3.2) und ermöglicht so Prognosen über das Langzeitauslaugverhalten eines Stoffes unter definierten Bedingungen

Die Ergebnisse von Auslaugtests werden u. a. grafisch ausgewertet und der maßgebende Freisetzungsmechanismus bestimmt, z. B. nach [68]. Es wird die während der Auslaugung freigesetzte Stoffmenge bezogen auf die Oberfläche der Probe in einem doppeltlogarithmischen Diagramm aufgetragen (siehe Abbildung 12). Bei der Auslaugung von Calcium aus dem Spritzbeton wird der Calciumgehalt in mg/m^2 aufgetragen. Wenn die Steigung $rc=0,5$ ist, handelt es sich beim maßgebenden Freisetzungsmechanismus um „Diffusion“ [68].

Neben der Diffusion gibt es weitere Freisetzungsmechanismen: die Auflösung oder ein oberflächlicher wash-off bzw. Verarmung [68]. Eine Ursache für Auflösung kann ein lösender Angriff auf den Beton durch Säure sein. Ein wash-off Effekt kann auftreten, wenn leicht lösliche Salze an der Oberfläche des Betons beim ersten Kontakt mit dem Eluens abgelöst werden. Dieser Vorgang ist meist nach kurzer Zeit abgeschlossen.

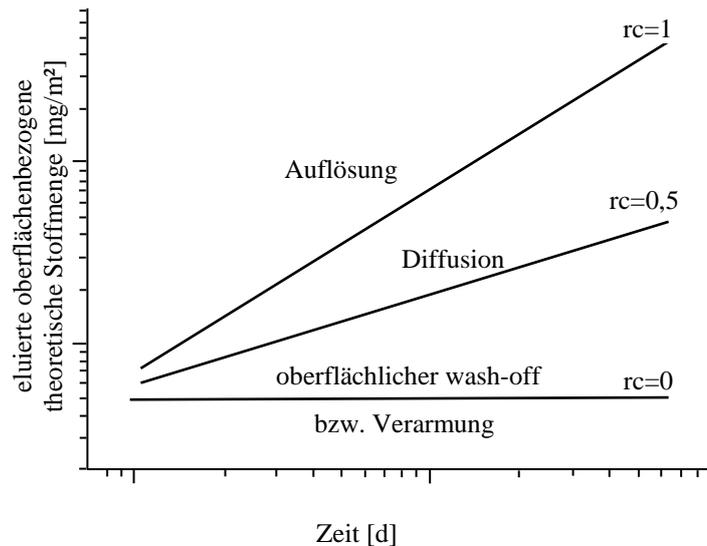


Abbildung 12: Ermittlung der Freisetzungsmechanismen (schematisch) in Anlehnung an [68]

2.2.3.2 Prüfverfahren zur Beurteilung des Auslaugverhaltens von Baustoffen

Das kurzzeitige wie auch das langzeitige Auslaugverhalten von Baustoffen kann in Auslaugtests ermittelt werden. Es gibt drei wesentliche Verfahrensarten: den Schütteltest, den Säulentest und den Standtest (siehe Abbildung 13) [53, 66]. Nachfolgend werden die charakteristischen Merkmale dieser drei Verfahrensarten beschrieben und welche Parameter dabei variiert werden können. In Kapitel 2.2.3.3 wird der Bezug zu den Prüfverfahren zur Beurteilung des Auslaugverhaltens von Spritzbeton erstellt.

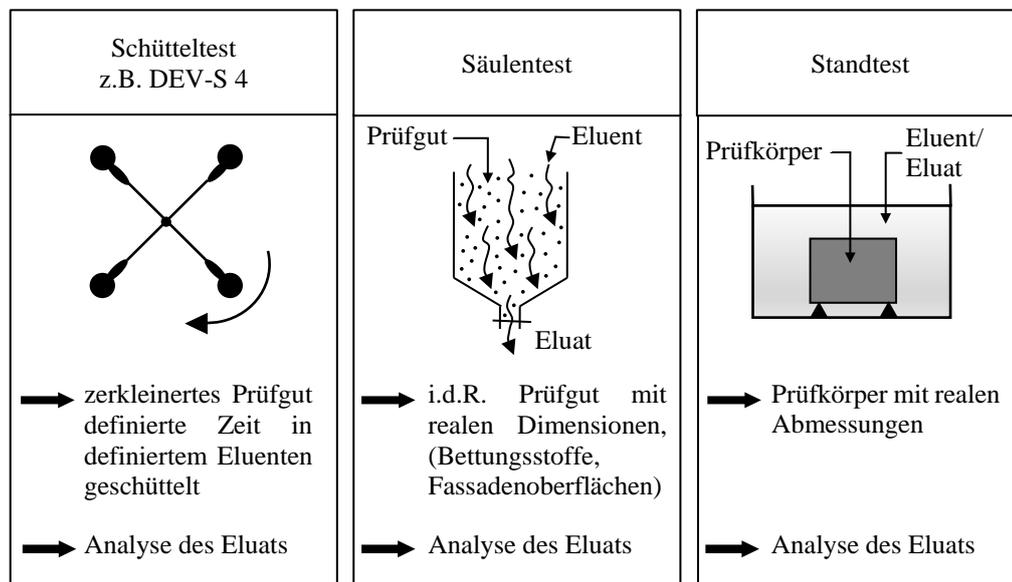


Abbildung 13: Prüfverfahren zur Untersuchung des Auslaugverhaltens in Anlehnung an [66]

Schütteltest

Beim Schütteltest wird das Auslaugverhalten an zerkleinertem Probenmaterial untersucht. Dabei können das Flüssigkeits-/Feststoff-Verhältnis, die Art des Eluens, die Korngröße des zu

eluirenden Materials, die Elutionsdauer und die Bewegungsart variiert werden [66]. Bei der Untersuchung des Auslaugverhaltens von Beton ist bei diesem Verfahren vor allem problematisch, dass durch die Zerkleinerung neue Reaktionsflächen entstehen und die Matrix des Probekörpers verändert wird. Dadurch lassen sich nur schwer Rückschlüsse auf die Auslaugraten unter realen Bedingungen ableiten. Das Eluens wird in der Regel während der Auslaugung nicht ausgetauscht. Bei einigen Verfahren wird der pH-Wert auf einem konstanten Niveau gehalten, um das Löslichkeitspotential des Eluens zu erhöhen.

Säulentest

Säulentests werden in der Praxis häufig für Baustoffe mit unterschiedlicher Korngröße eingesetzt [53]. Es eignet sich stückiges und feinkörniges Material, das in Säulen eingebracht wird und mit dem Eluens meist nur einmalig in Kontakt gebracht wird [66]. Das kann entweder durch Überregnen bzw. Perkolation, indem die Flüssigkeit von oben nach unten fließt, oder durch eine inverse Säulenelution, d. h. das Eluens wird von unten nach oben gepumpt, oder durch eine statische Elution, indem die Säule mit dem Eluens befüllt wird, erfolgen. Beim Säulentest können das Eluens, das Flüssigkeit-Feststoff-Verhältnis und die Beschickungsdauer variiert werden [53]. Säulentests sind für die Beurteilung des Auslaugverhaltens von zementgebundenen Baustoffen nur bedingt geeignet, da diese in der Säule aushärten und somit nicht mehr wie anfangs beschrieben mit dem Eluens als stückiges Material in Kontakt gebracht werden [66].

Standtest

Beim Standtest ist der Prüfkörper, z. B. der Bohrkern oder der Würfel, vom Eluens umgeben. Aufgrund der realen Abmessungen des Prüfkörpers werden beim Auslaugversuch der Einfluss der Porenstruktur der Probe und chemische Reaktionen, die im Porenwasser der Zementsteinmatrix auftreten, berücksichtigt. Während dem Auslaugverfahren wird das Eluat meist in festgelegten Zeitabständen ausgetauscht und analysiert. Somit können Rückschlüsse über den dominierenden Freisetzungsmechanismus und Prognosen zum Langzeitauslaugverhalten gezogen werden. Folgende Parameter können beim Auslaugversuch variiert werden [66]:

- Abmessungen der Probekörper
- Temperatur
- Verhältnis von Volumen Eluens zur Oberfläche des Probekörpers
- Art des Eluens
- Bewegungsart des Eluens
- Zeitspanne zwischen dem Wechsel des Eluens
- Anzahl der Wechsel des Eluens

Beim Standtest müssen die genannten Parameter so gewählt werden, dass während der Auslaugzyklen einerseits keine Sättigung im Eluat erreicht wird, aber andererseits die Konzentration des zu untersuchenden Stoffes im Eluat ausreichend groß ist, um erfasst werden zu können.

2.2.3.3 Spezielle Prüfverfahren zur Beurteilung des Versinterungspotentials von Spritzbeton

Für die Beurteilung des Auslaugverhaltens von Spritzbeton wurden bereits unterschiedlichste Prüfverfahren entwickelt, z. B.:

- Auslaugzelle der Philipp Holzmann AG [53]
- Durchströmungszelle der TU München [28]
- Modifiziertes Trogverfahren der Ruhr-Universität Bochum [53]
- öbv-Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials“ [3]
- Umströmungsanlage der Ruhr-Universität Bochum [55]
- Multireaktor der TU Graz [69]

Alle genannten Prüfverfahren haben das Ziel die Auslaugraten des Baustoffes Spritzbeton und damit den Beitrag an der Entstehung von Versinterungen zu beurteilen. Die Umsetzung und Aussagekraft der Verfahren unterscheiden sich jedoch deutlich.

Auslaugzelle

Bei der Auslaugzelle der Phillip Holzmann AG wird der Spritzbeton auf einen Prüfrahmen mit den Abmessungen 50 x 70 cm² gespritzt [53]. Zwischen dem Prüfrahmen und dem Spritzbeton befindet sich eine Teflonschicht, die nach dem Erstarren des Betons entfernt wird. In diesem ca. 3 mm dicken Spalt wird entionisiertes Wasser mit einer Geschwindigkeit von 300 ml/h von oben nach unten geleitet (siehe Abbildung 14). Das Eluat wird nach einer Stunde, nach sechs Stunden, nach einem Tag, nach sieben Tagen und nach 28 Tagen aufgefangen und analysiert.

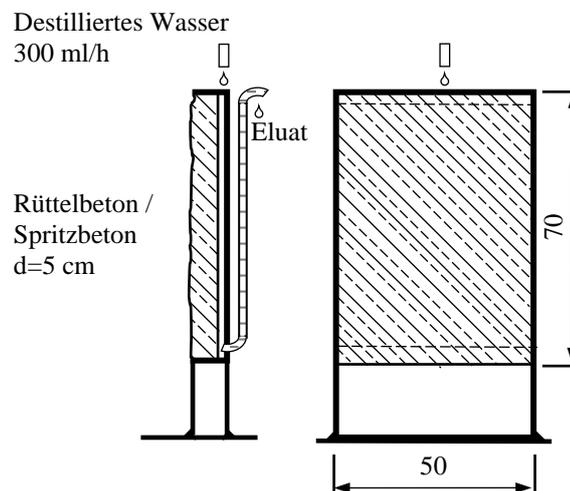


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Auslaugzelle der Philipp Holzmann AG in Anlehnung an [53] und [70]

Durchströmungszelle

Für die Durchströmungszelle wird ein Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm in ca. 10 mm dicke Scheiben geschnitten und in einem Rohr gestapelt [28]. Jede zweite Scheibe hat ein zentrales Bohrloch mit einem Durchmesser von 10 mm und wird zum Rand der Zelle

abgedichtet, sodass das Eluens mäanderförmig entlang der Oberfläche der Scheiben geleitet wird (siehe Abbildung 15). Das Eluat wird nach einem einmaligen Durchlauf aufgefangen. Das Verhältnis von Volumen Eluens zur Oberfläche der Betonscheiben beträgt 5,3 l/m².

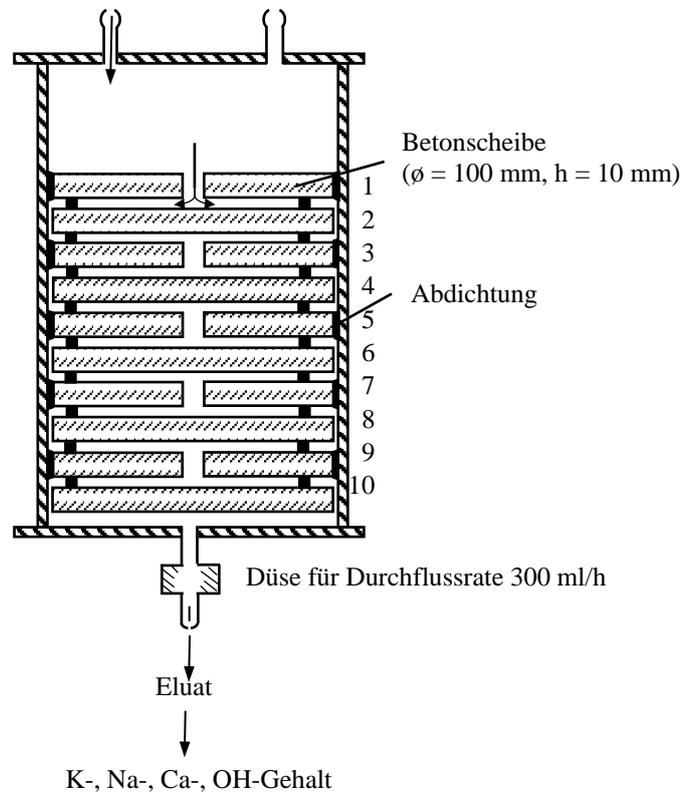


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Durchströmungszelle in Anlehnung an [28]

Modifiziertes Trogverfahren

Beim modifizierten Trogverfahren der Ruhr-Universität Bochum handelt es sich um eine Modifikation des Trogverfahrens nach ÖNORM S 2072 [71]. Die Auslaugung wird an Scheiben mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 20 mm durchgeführt, das Verhältnis von Eluens zu Feststoff beträgt 8:1. Während der Auslaugung wird die Flüssigkeit mit einem Magnetrührer kontinuierlich bewegt und das Eluens in festgelegten Zeitabständen ausgetauscht. Im Eluat werden die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert, die Calciumkonzentration sowie die Natrium-/Kaliumkonzentration bestimmt.

Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials nach öbv-Merkblatt

Mit dem Verfahren nach dem Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials von Spritzbeton“ [3] wird das Auslaugverhalten von Spritzbeton beurteilt. Für den Versuch werden zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Länge von 100 mm benötigt. Die Bohrkerne sind im Alter von 56 Tagen zu bohren und direkt im Anschluss in getrennte Behälter mit entionisiertem Wasser einzulagern (siehe Abbildung 16).

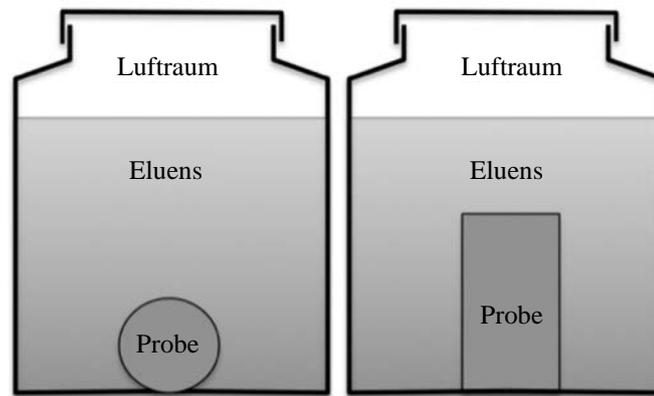


Abbildung 16: Schematische Darstellung der zulässigen Anordnung der Probekörper im Eluens in Anlehnung an [3]

Der Auslaugversuch wird in drei Zyklen durchgeführt. Nach jedem Zyklus werden die Probekörper entnommen und erneut eingelagert. Im abgegossenen Eluat werden der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Danach wird das Eluens mit Salzsäure auf einen pH-Wert von 3,0 - 4,0 angesäuert, um Karbonatisierungseffekte zu vermeiden. Im angesäuerten Eluens wird der Calciumgehalt bestimmt und in kg Ca/t Spritzbeton umgerechnet. Das Beurteilungskriterium ist der sogenannte RV-Wert. Er errechnet sich aus dem Mittelwert der Summe der Calciumfreisetzung von zwei Probekörpern aus den drei Auslaugzyklen. Mit diesem Prüfverfahren können Vergleichswerte zwischen unterschiedlichen Mischungen ermittelt [48] und Grenzwerte festgelegt werden. Der Versuch liefert jedoch keine Aussage zu tatsächlich auftretenden Versinterungen im Tunnelbauwerk, sondern beurteilt nur das Versinterungspotential unterschiedlicher Spritzbetone. Bei österreichischen Großbaustellen wird häufig ein Grenzwert von $RV=0,70$ kg/t Spritzbeton für versinterungsarme Spritzbetone festgelegt [51]. Dieser Grenzwert beruht auf Untersuchungen von Spritzbetonen einer Baustelle über einen Zeitraum von einem Jahr [48]. Es wurde ein hinsichtlich eines reduzierten Versinterungspotentials optimierter Spritzbeton mit 280 kg/m^3 CEM I 52,5 R und 140 kg/m^3 AHWZ untersucht. Der Mittelwert von 18 Prüfproben betrug $0,54 \text{ kg/t}$ und unter Berücksichtigung der 95 % Fraktile ergab sich daraus die Klasse $RV0,70$. Dabei handelt es sich jedoch um keine allgemeine Empfehlung für einen Grenzwert [3], sondern es ist für jede Baustelle in Abstimmung mit den Ausgangsstoffen und der Mischungszusammensetzung des Spritzbetons ein Grenzwert im Einzelfall festzulegen.

Umströmungsanlage

In der Umströmungsanlage werden sechs Bohrkern in einem Behälter gelagert und über eine Umwälzpumpe wird kontinuierlich Wasser am Boden des Behälters abgezogen [55]. Über ein Düsensystem, das aus perforierten Leitungen besteht, wird jeder Bohrkern von zwei gegenüberliegenden Seiten entlang der Mantelfläche umströmt (siehe Abbildung 17). Vorteil bei diesem Verfahren ist im Gegensatz zu statischen Verfahren, dass sich keine Schutzschicht aus Calciumcarbonat an der Betonoberfläche aufgrund der ständigen Umwälzung der Flüssigkeit bilden kann. Als Eluens wird Bergwasser oder dem Bergwasser nachempfundenes Wasser verwendet, das nicht ausgetauscht wird. Der Versuch wird bei einer konstanten Temperatur von $4 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt, damit keine Sättigung der Löslichkeitsprodukte eintritt. In festgelegten

Zeiträumen werden Proben des Eluats zur Analyse entnommen und die entnommene Menge wird durch Eluens ersetzt und dem System wieder zugeführt.

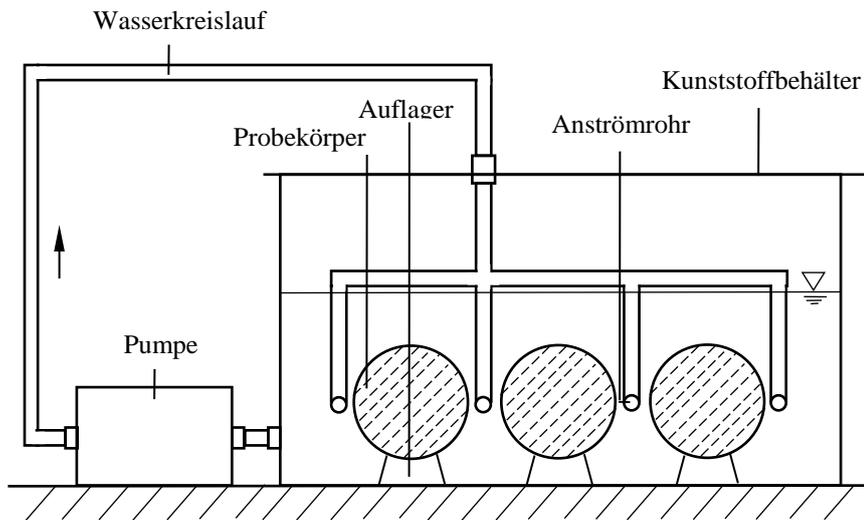


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Umströmungsanlage in Anlehnung an [55]

Multireaktor

Im Multireaktor, der aus einem Behälter aus Plexiglas besteht, wird die Auslaugung von Betonprobekörpern bei einem konstanten pH-Wert von 6 untersucht [69]. Der pH-Wert wird entweder durch die kontrollierte Zugabe von Kohlenstoffdioxid (CO_2) (siehe Abbildung 18) oder durch Salpetersäure (HNO_3) eingestellt. Die Auslaugung dauert 11 Tage und das Eluens wird in diesem Zeitraum nicht ausgetauscht. Das Verhältnis von Eluens zu Feststoff beträgt 9. Während der Versuchsdurchführung werden kontinuierlich der pH-Wert, die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit (EK) mithilfe eines „AQUA“ Computers aufgezeichnet. Die Analyse des Eluats erfolgt an manuell entnommenen Proben.

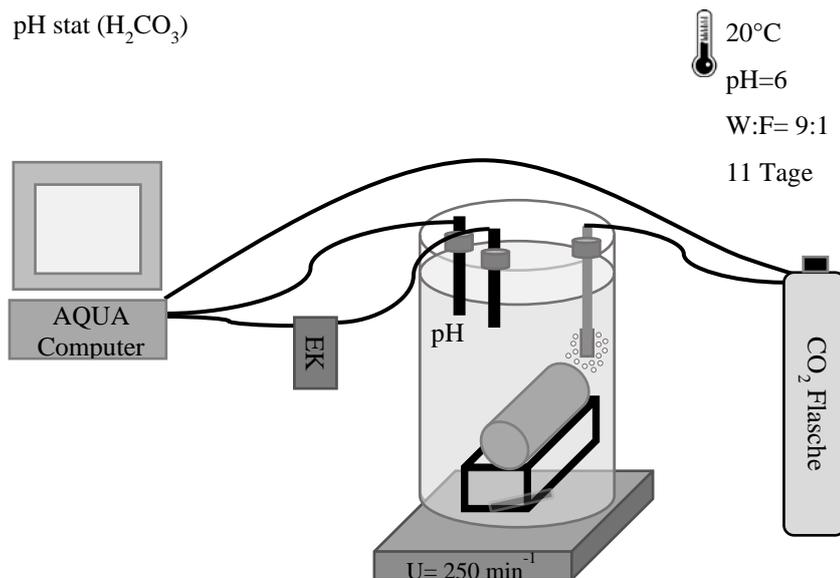


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Multireaktors in Anlehnung an [72]

Zusammenfassung

Die Übersicht der speziellen Prüfverfahren zur Beurteilung des Auslaugverhaltens von Spritzbeton veranschaulicht, dass sich die einzelnen Verfahren im Aufbau deutlich unterscheiden. Ein quantitativer Vergleich der Messergebnisse der unterschiedlichen Prüfverfahren ist nicht möglich. Die Ergebnisse werden durch die unterschiedlichen Versuchsaufbauten beeinflusst:

- das Verhältnis von Oberfläche Probekörper zu Volumen Eluens
- die Art und Aufbereitung des Probenmaterials (Größe, Alter, Vorlagerung, Form, etc.)
- die Art des Eluens (entionisiertes Wasser, Bergwasser, etc.)
- die Umgebungsbedingungen (Temperatur, pH-Wert, etc.)
- die Versuchsdauer und die Dauer der einzelnen Auslaugzyklen
- die Anzahl der Wechsel des Eluens

Bei der Wahl eines Prüfverfahrens muss vorab geklärt werden, welche Fragestellungen mithilfe der Ergebnisse beantwortet werden sollen und inwiefern es erforderlich ist die Situation in den Tunnelbauwerken nachzubilden. Bei der Beurteilung von unterschiedlichen Spritzbetonmischungen hinsichtlich ihres Beitrags zur Entstehung von Versinterungen sind einfache Vergleichsversuche häufig ausreichend. Die Auslaugung versinterungsrelevanter Stoffe aus dem Spritzbeton wird zum einen durch die Rezeptur der Spritzbetonmischungen als auch durch die Porosität und Porenstruktur der Probekörper beeinflusst. Bei zerkleinerten Probenmaterialien kann der Einfluss der Porosität beispielsweise nicht berücksichtigt werden. Ein konstanter pH-Wert während der Auslaugung ermöglicht einerseits konstante Bedingungen während der Versuchsdurchführung, andererseits ist zu hinterfragen ob dieser Fall realitätsnah ist oder ob in jedem Fall während der Auslaugung eine Änderung des pH-Werts auftritt. Diese und weitere Fragestellungen müssen bei der Beurteilung der Ergebnisse der genannten Auslaugverfahren berücksichtigt werden. Eine Bewertung der einzelnen Systeme war nicht Bestandteil dieser Arbeit.

2.3 Verarbeitbarkeit von Frischbetonmischungen

2.3.1 Anforderungen an die Frischbetonmischung von Spritzbeton im Tunnelbau

Für einen erfolgreichen Einsatz von Nassspritzbeton ist eine wesentliche Voraussetzung, dass die Frischbetonmischung pumpbar und spritzbar ist. Neben der Grundvoraussetzung eines geeigneten Equipments kommt den Ausgangsstoffen und der Mischungszusammensetzung eine wesentliche Bedeutung zu. Jedoch ist Pumpbarkeit keine messbare physikalische Größe der Frischbetonmischung, sie wird beeinflusst durch die Stabilität, die Viskosität und die Fließgrenze [73].

Im Gegensatz zu Pumpbeton für den Hochbau müssen bei der Förderung von Frischbetonmischungen im Tunnelbau keine weiten Förderstrecken oder -höhen überwunden werden, da häufig mobile Spritzmaschinen zum Einsatz kommen (siehe Kapitel 2.1.2.2). Dennoch gelten auch hier bezüglich der Pumpbarkeit ähnliche Prinzipien. Die Mischungen müssen unter Druck ausreichend stabil sein, um Blockaden in der Förderleitung zu vermeiden und es muss sich eine Gleitschicht aus Leim an der Rohrwandung bilden, um den Förderdruck gering zu halten (siehe Kapitel 2.3.2). Pulsationen während des Pumpvorgangs von Frischbetonmischungen unterbrechen einen kontinuierlichen Förderstrom und eine homogene Untermischung des Beschleunigers an der Düse ist nicht mehr gegeben. Es können sich folglich Schichtbildungen im Spritzbeton mit unterschiedlichen Beschleunigergehalten und damit negative Auswirkungen auf die Frühfestigkeits- und Festigkeitsentwicklung ergeben. Die Eindüsung des Beschleunigers an der Düse muss mit dem Förderstrom synchronisiert sein, auch um Blockaden zu vermeiden. Mithilfe von High-Speed Kameras wurden bereits Untersuchungen durchgeführt, um Pulsationen im Detail beobachten zu können [74].

Im Folgenden werden Grundlagen zu Modellvorstellungen, Einflussfaktoren und Prüfverfahren zur Beurteilung der Pumpbarkeit von Betonen erläutert.

2.3.2 Modelle zur Förderung von Beton in Pumpleitungen

2.3.2.1 Allgemeines

Bei der Förderung von Beton in Rohrleitungen bildet sich an der Rohrwandung eine sogenannte Gleitschicht aus. Sie entsteht durch den aufgebrachten Pumpendruck und der Scherung an der Rohrwandung. Wasser und Feinstoffe werden vom Frischbeton abgesondert, lagern sich an der Rohrwandung an und führen damit zu einer Verringerung des Reibungswiderstandes an der Rohrwandung. Der Gleitschichtdicke und -zusammensetzung sowie der rheologischen Eigenschaften kommt bei der Betonförderung eine wesentliche Bedeutung zu [75, 76]. Der restliche Beton wird im Inneren des Rohrs als Betonpfropfen gefördert [77–79]. Dabei müssen die groben Gesteinskörnungen mit ausreichend Leim umgeben sein, damit die Druckübertragung über den Leim und nicht nur über das Korngerüst erfolgen kann [80]. Nur so kann das Fließverhalten in der Rohrleitung mit entsprechenden Modellvorstellungen aus der Rheologie beschrieben werden [73].

2.3.2.2 Rheologie

Ein vielfach angewandtes Modell zur Beschreibung der Begriffe und Zusammenhänge der rheologischen Eigenschaften von Beton ist das sogenannte Zwei-Platten-Modell. Zwischen einer unbeweglichen Platte unten und einer beweglichen Platte oben befindet sich eine Messprobe mit einer Höhe h_p (siehe Abbildung 19). Die obere Platte mit der Fläche A wird durch eine Kraft F bewegt und die Geschwindigkeit v wird gemessen. Die Messsubstanz wird dadurch geschert. Zwei Voraussetzungen müssen für die Anwendung des Modells erfüllt sein: Zum einen muss die Messsubstanz an beiden Platten haften und zum anderen müssen laminare Fließbedingungen herrschen [81].

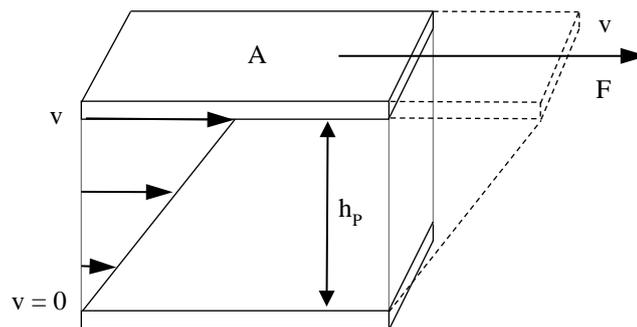


Abbildung 19: Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit im Spalt des Zwei-Platten-Modells für Scherversuche in Anlehnung an [81]

Die Schubspannung τ wird definiert über den Quotienten der Kraft F zur Fläche A .

$$\tau = F/A \quad (6)$$

τ Schubspannung [Pa] bzw. [1 N/m²]

F Kraft [N]

A Fläche [m²]

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ wird häufig auch als Schwergeschwindigkeit, Schergefälle, Geschwindigkeitsgefälle, Deformationsgeschwindigkeit oder Deformationsrate bezeichnet.

$$\dot{\gamma} = v/h_p \quad (7)$$

$\dot{\gamma}$ Scherrate [1/s] bzw. [s⁻¹]

v Geschwindigkeit [m/s]

h_p Plattenabstand [m]

Wenn Schubspannung und Schergeschwindigkeit in einem Diagramm dargestellt werden, erhält man eine sogenannte Fließkurve (siehe Abbildung 20 und Abbildung 22).

Newtonsche Modelle

Bei newtonschen Flüssigkeiten ist die Scherspannung τ proportional zum Schergefälle $\dot{\gamma}$ und geht durch den Ursprung (siehe Abbildung 20). Die Steigung der Geraden entspricht der Viskosität η .

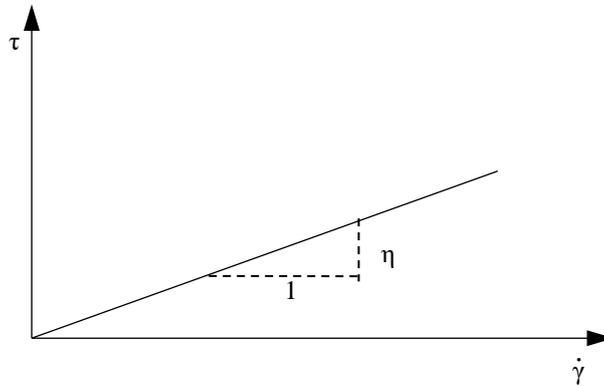


Abbildung 20: Newton Modell

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (8)$$

- η Viskosität [Pa·s] bzw. [1 Ns/m²]
- τ Schubspannung [Pa] bzw. [1 N/m²]
- $\dot{\gamma}$ Scherrate [1/s] bzw. [s⁻¹]

Für die Beurteilung der Frischbetoneigenschaften in einer Rohrleitung sind die in nachfolgender Abbildung 21 dargestellten Gleichgewichtsbetrachtungen in einem Rohrstück mit einzubeziehen [77, 82].

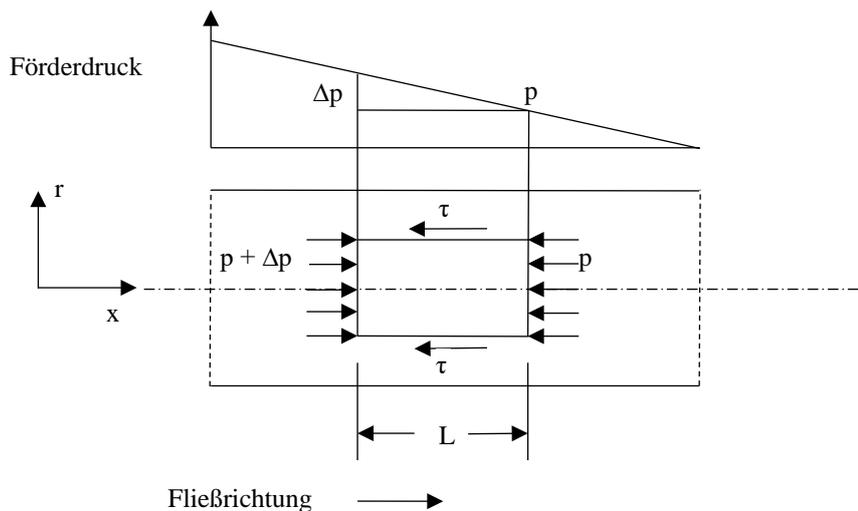


Abbildung 21: Gleichgewichtsbetrachtung am Flüssigkeitselement im Rohr in Anlehnung an [77]

Die Gleichgewichtsbedingungen im Rohr können mithilfe von Gleichung (9) beschrieben werden [77, 83].

$$2\pi r \cdot dx \cdot \tau(r) - \pi r^2 dp(x) = 0 \text{ bzw. } \tau(r) = \frac{\Delta p \cdot r}{2 \cdot L} \quad (9)$$

$\tau(r)$	Scherspannung an der Rohrwandung
r	Radius der Rohrleitung
Δp	Druckverlust im betrachteten Rohrabschnitt
L	Länge des betrachteten Rohrabschnitts

Unter der Annahme, dass in einer Leitung der Förderdruck linear in Fließrichtung abnimmt, ist der Förderdruck am Anfang des Teilabschnittes um Δp höher als am Ende des Teilabschnittes. Der Druck am Ende und am Anfang des Teilabschnittes wirkt auf die jeweilige Kreisfläche. Der Druckverlust innerhalb des Abschnittes erfolgt durch die innere Reibung. Die damit verbundene Schubspannung wirkt auf die Mantelfläche des Zylinders. Dieses Modell ist für die Beurteilung von newtonschen Flüssigkeiten geeignet.

Nicht-newtonsche Modelle

Für die Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von Frischbeton wird häufig das Bingham Modell verwendet [78, 84]. Das Modell beruht auf der Annahme, dass eine Kraft überwunden werden muss, um ein Material in Bewegung zu bringen (Fließgrenze). Sobald diese überwunden ist, ist die erforderliche Kraft um das Material zu bewegen proportional zur aufgetragenen Scherrate. Das Material verhält sich im unteren Scherspannungsbereich wie ein elastischer oder viskoelastischer Festkörper und im oberen Scherspannungsbereich, nach Überwinden der Fließgrenze, wie eine newtonsche Flüssigkeit (siehe Abbildung 22).

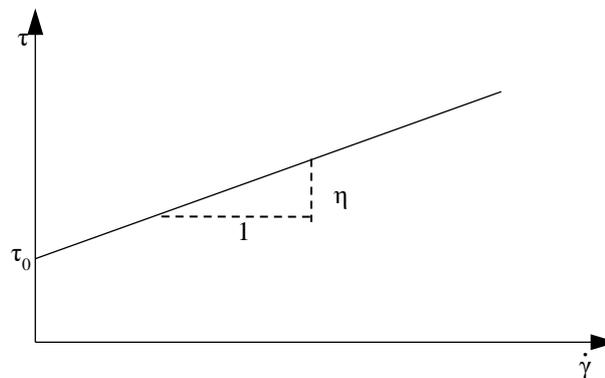


Abbildung 22: Bingham Modell

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (10)$$

τ_0	Fließgrenze [Pa] bzw. [1 N/m ²]
η	Viskosität [Pa·s] bzw. [1 Ns/m ²]
τ	Schubspannung [Pa] bzw. [1 N/m ²]
$\dot{\gamma}$	Scherrate [1/s] bzw. [s ⁻¹]

2.3.2.3 Modellvorstellungen

Bei der Förderung von Beton ist die Wechselwirkung zwischen der Gleitschicht und der Rohrwandung, d. h. die Tribologie, ein zentraler Aspekt, um Aussagen über die Pumpbarkeit treffen zu können [17]. Im Hinblick auf die Pumpbarkeit von Beton ist damit die Scherung der äußersten Betonschicht an der Oberfläche der Rohrwandung zu verstehen [76]. Die tribologischen Eigenschaften von Beton sind ein wesentlicher Bestandteil der Modellvorstellung von Kaplan zur Förderung in Rohrleitungen. Die Modellvorstellung von Kaplan [17] beinhaltet zwei unterschiedlich zu betrachtende Bereiche, um das Verhältnis von Förderdruck p zur Fördermenge Q in einer Rohrleitung zu beschreiben (siehe Abbildung 23).

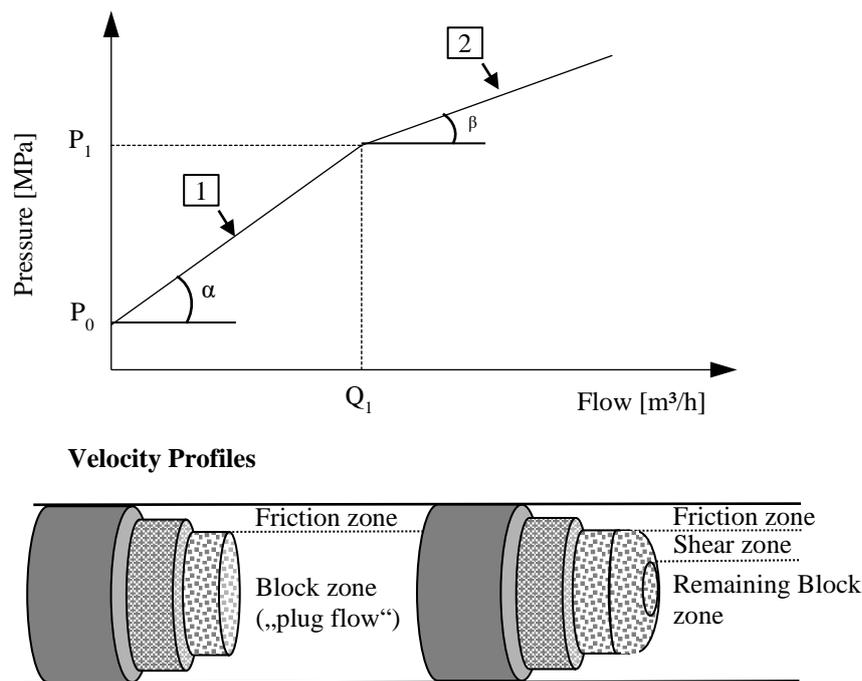


Abbildung 23: Kaplans Modell zur Darstellung des Fließvorgangs in der Pumpleitung in Anlehnung an [17] und Darstellung der Geschwindigkeitsprofile in Anlehnung an [85]

Bei niedrigen Geschwindigkeiten wird nach der Modellvorstellung von Kaplan [17] nur die Gleitschicht an der Rohrwandung und nicht die gesamte Betonmischung geschert (siehe Abbildung 23, Bereich 1 und Gleichung (11)) [73, 86].

$$P = \frac{2L}{R} \left[\tau_{0g} + \frac{Q \cdot \mu_g}{\pi \cdot R^2 \cdot k} \right] \quad (11)$$

Bei höheren Geschwindigkeiten in der Förderleitung reicht der Bereich der Scherung dann in den Betonpfropfen. In diesem Fall müssen die rheologischen Eigenschaften des Betonpfropfens in die Modellvorstellung mit eingebunden werden. Durch Kombination der beiden Bereiche kann der Fließvorgang in der Pumpleitung beschrieben werden (siehe Gleichung (12)) [86].

$$P = \frac{2L}{R} \left[\frac{\frac{Q}{\pi \cdot R^2 \cdot k} - \frac{R}{4 \cdot \mu} \cdot \tau_{0g} + \frac{R}{3 \cdot \mu} \cdot \tau_0}{1 + \frac{R}{4 \cdot \mu} \cdot \mu_g} \cdot \mu_g + \tau_{0g} \right] \quad (12)$$

P	Förderdruck [bar]
L	Länge der Förderleitung [m]
Q	Fördermenge [m ³ /h]
R	Radius der Förderleitung [m]
k	Füllgrad des Rohrquerschnitts mit Beton [-]
τ_0	Fließgrenze des Kernbetons [Pa]
μ	Plastische Viskosität des Kernbetons [Pa · s]
τ_{0g}	Fließgrenze der Gleitschicht [Pa]
μ_g	Plastische Viskosität der Gleitschicht [Pa · s/m]

Die rheologischen Eigenschaften des Kernbetons können mit Rotationsviskosimetern oder Rheometern ermittelt werden, nicht jedoch die Kennwerte der Gleitschicht (siehe Kapitel 2.3.3.3 und 2.3.3.5). Weitere Hintergründe zur Modellvorstellung sind zu finden in [17, 77].

Die Bildung der Gleitschicht wird in aktuellen Untersuchungen mit der sogenannten scherinduzierten Partikelmigration oder fließinduzierten Partikelmigration beschrieben [87–90]. Während des Pumpvorgangs bildet sich an der Rohrwandung ein Bereich mit hoher Scherung aus, während im inneren Bereich der Förderleitung der Beton kaum geschert wird. Die Partikel tendieren dazu sich von Bereichen hoher Scherung in Bereiche mit geringer Scherung zu bewegen (siehe Abbildung 24).

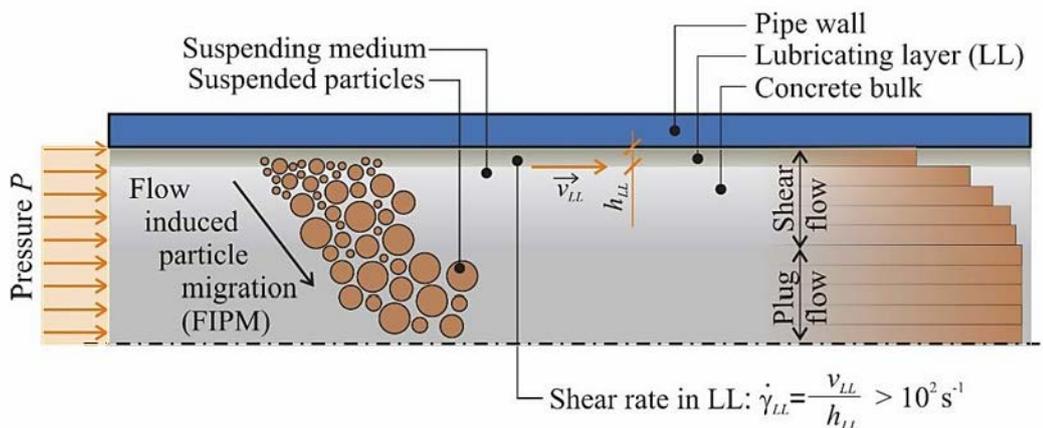


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Gleitschichtbildung in einer Förderleitung aufgrund der scherinduzierten Partikelmigration während des Pumpvorgangs [86]

2.3.3 Verfahren zur Beurteilung der Pumpbarkeit

2.3.3.1 Konsistenzprüfungen

Am häufigsten wird die Verarbeitbarkeit von Frischbetonmischungen für Spritzbeton im Tunnelbau mit dem Ausbreitmaß oder dem Setzmaß beurteilt. In Österreich gilt die Anforderung der Richtlinie Spritzbeton [2], dass die Frischbetonmischung ein Ausbreitmaß von 60 +/- 5 cm aufweisen soll. Es ist lediglich der Hinweis gegeben, dass zusätzlich zum Ausbreitmaß die Entmischungsneigung, Einhaltung des Wasserbedarfs und Fließmitteldosierung bei der Beurteilung der Frischbetonmischungen berücksichtigt werden sollen, jedoch ohne konkrete Festlegungen zu treffen. Untersuchungen von Reinhold [74], Secieru et al. [73], Kasten [77], Jacobsen et al. [79] und Ngo [16] haben ergeben, dass mit dem Ausbreitmaß oder dem Setzmaß nicht generell auf die Pumpbarkeit eines Betons geschlossen werden kann. Mithilfe der Konsistenzprüfverfahren können Vergleiche oder Kontrollen auf Baustellen durchgeführt werden, jedoch keine Prognose der Pumpbarkeit einer Betonmischung erstellt werden. In der Regel bestehen Frischbetonmischungen nicht mehr aus Dreistoffgemischen (Wasser, Zement, Gesteinskörnungen) sondern aus Fünfstoffgemischen (Wasser, Zement, Zusatzstoffe, Zusatzmittel, Gesteinskörnungen). Bei Dreistoffgemischen wird die Konsistenz über den Wassergehalt bzw. den Leimgehalt gesteuert und damit werden sowohl die Viskosität als auch die Fließgrenze beeinflusst [73]. Durch die Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln verändern sich die rheologischen Eigenschaften des Betons jedoch wesentlich und unabhängig voneinander. Es gibt grundsätzlich keinen Zusammenhang zwischen der Fließgrenze und der Viskosität, weshalb Zweipunktprüfverfahren erforderlich sind. Ähnliches gilt für den Zusammenhang zwischen Fördermenge und Förderdruck. Bei Fünfstoffgemischen kann kein allgemeiner Zusammenhang zwischen Fördermenge und Förderdruck erstellt werden [77]. Er muss im Einzelfall anhand der konkreten Mischungszusammensetzung untersucht werden.

2.3.3.2 Bestimmung des Förderdrucks

Die Beurteilung der Pumpbarkeit von Betonmischungen erfolgt(e) bisher mithilfe von Betondruck-Leistungs-Nomogrammen (Beispiel siehe Abbildung 25). Als Eingangswerte werden die Leitungslänge, der Leitungsdurchmesser, die Förderhöhe, die Fördermenge und die Konsistenz (Ausbreitmaß) benötigt [15]. Dieses Verfahren war bei Dreistoffgemischen (Wasser, Bindemittel, Gesteinskörnung) hinreichend genau und beruhte auf Erfahrungswerten. Die Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen verändert die rheologischen Eigenschaften des Betons jedoch unabhängig voneinander, sodass die Anwendung der Nomogramme nur unter Einbeziehung des Ausbreitmaßes nicht mehr zielführend ist. Für die Pumpbarkeit ist vor allem die plastische Viskosität der Betonmischung und insbesondere der Gleitschicht von Bedeutung [79, 85]. Mit dem Ausbreitmaß können darauf keine Rückschlüsse gezogen werden (siehe Kapitel 2.3.3.1). Für den speziellen Anwendungsfall Frischbetonmischungen für Nassspritzbetone sind derartige Nomogramme nicht bekannt.

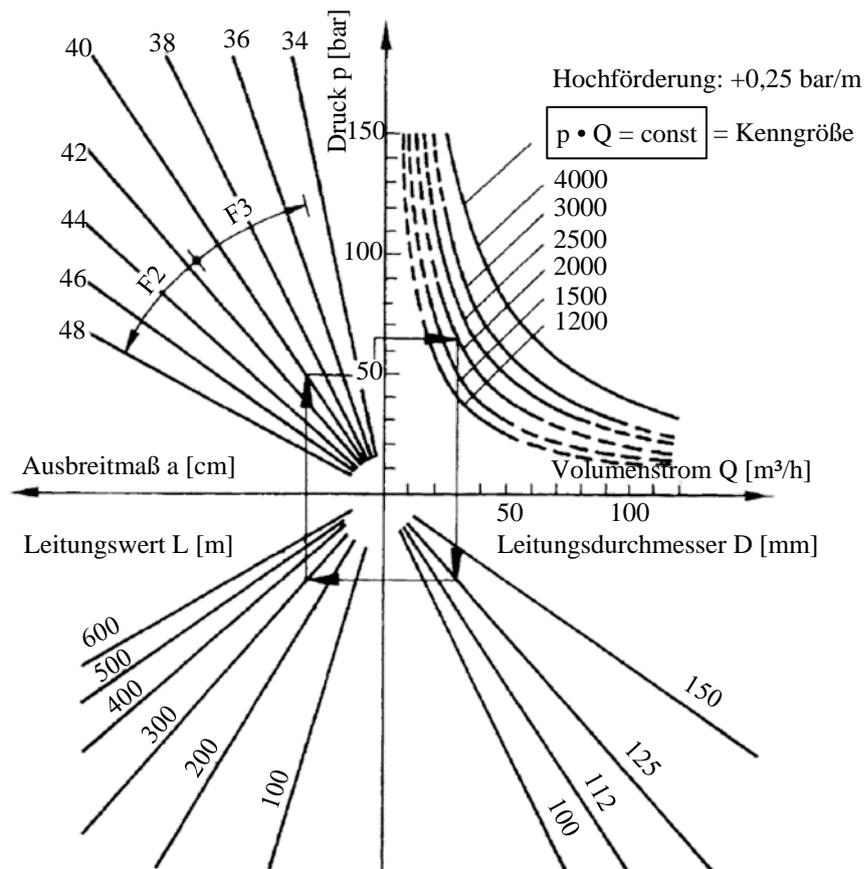


Abbildung 25: Nomogramm zur Ermittlung der Grundleistung von Betonpumpen (Schwing) in Anlehnung an [91]

2.3.3.3 Rheologische Prüfverfahren

Die rheologischen Eigenschaften von Beton werden durch die Viskosität und die Fließgrenze charakterisiert (siehe Kapitel 2.3.2.2). Die Viskosität beschreibt vereinfacht ausgedrückt die Zähigkeit eines Stoffes [81]. Die Fließgrenze ist in DIN 1342-1 [92] definiert als die „kleinste Spannung [...], oberhalb derer ein plastischer Stoff [...] sich rheologisch wie eine Flüssigkeit [...] verhält“. Vor dem Erreichen der Fließgrenze weist das Material ein elastisches Verhalten auf und geht nach der Belastung wieder in seine ursprüngliche Form zurück, nach Überschreiten der Fließgrenze beginnt das Material zu Fließen und verhält sich wie eine Flüssigkeit. Die Viskosität und die Fließgrenze von Frischbeton können mithilfe von Rheometern oder Rotationsviskosimeter bestimmt werden. Auf dem Markt ist eine große Anzahl an Herstellern und Modellen verfügbar. Eine aktuelle Übersicht ist in [77, 93] aufgeführt. Bei der Bestimmung der rheologischen Eigenschaften des Betons wird die gesamte Betonprobe geschert. Für die Beurteilung der Pumpbarkeit von Beton sind diese Verfahren nicht geeignet. Bei der Pumpbarkeit sind neben den rheologischen Eigenschaften des Betons vor allem die tribologischen Eigenschaften, also die Wechselwirkung zwischen dem Beton und der Rohrwandung (siehe Kapitel 2.3.2.3), von Bedeutung. Die tribologischen Eigenschaften der Gleitschicht können nach Kaplan [17, 84] mithilfe eines Tribometers bestimmt werden. Kaplan nutzte dafür den Aufbau eines Rheometers (BTRHEOM). Als Messinstrument wird ein rotierender Zylinder, der innerhalb eines feststehenden Zylinders angebracht ist, verwendet. Der Beton wird zwischen dem äußeren unbeweglichen Zylinder (Messbehälter) und dem

inneren rotierenden Zylinder eingefüllt. Die Bewegung des inneren Zylinders führt zur Ausbildung der Gleitschicht und damit zum Gleiten der Betonprobe. Es werden das Drehmoment und die Drehgeschwindigkeit gemessen und als Ergebnis werden die Fließgrenze und Viskosität der Gleitschicht bestimmt. Aufbauend auf den Erkenntnissen von Kaplan wurden unter anderem von Ngo [16, 94] (siehe Abbildung 26), Secieru [76], Chapdelaine [95] weitere Tribometer entwickelt oder verwendet. Die Systeme sind geeignet, um die Eigenschaften unterschiedlicher Mischungen miteinander zu vergleichen. Eine Berechnung des Betondrucks beim Pumpvorgang ist mit diesen Verfahren nur möglich, sofern durch Pumpversuche entsprechende Korrelationen erstellt wurden [77].

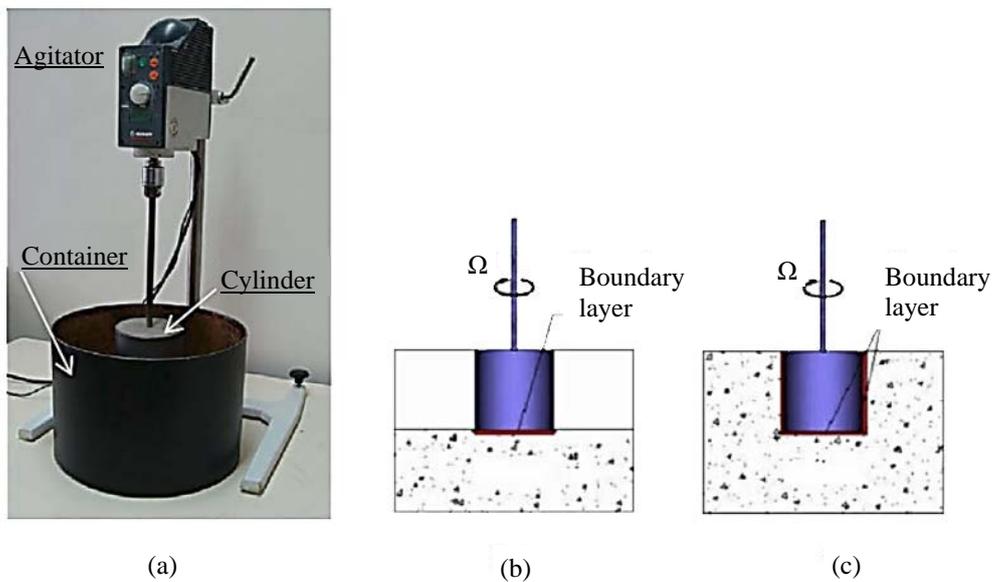


Abbildung 26: Aufbau eines Tribometers und Versuchsablauf in Anlehnung an [94]

Einen anderen Ansatz zur Beurteilung der Pumpbarkeit von Beton hat Kasten [77] mit der Entwicklung des Gleitrohr-Rheometers Slipers (**Sliding Pipe Rheometer**) gewählt. Bei der Entwicklung des Prüfverfahrens war es vor allem wichtig, dass die realen Pumpverhältnisse abgebildet werden können und das Verfahren sowohl für den Einsatz im Labor als auch auf der Baustelle geeignet ist.

Das Gleitrohr-Rheometer besteht aus einem aufgeständerten Kolben und zwei verbundenen Rohrteilen, die entlang des Kolbens geführt werden (siehe Abbildung 27). Am Kopf des Kolbens befindet sich ein Druckaufnehmer und am Fuß ein Wegaufnehmer, um die Geschwindigkeit des Rohres entlang des Kolbens aufzuzeichnen. Für den Messvorgang wird das Rohr mit Frischbeton gefüllt und durch Lösen einer Arretierung bewegt sich das Rohr aufgrund der Schwerkraft nach unten. Dabei werden sowohl der Druck als auch die Geschwindigkeit aufgezeichnet.

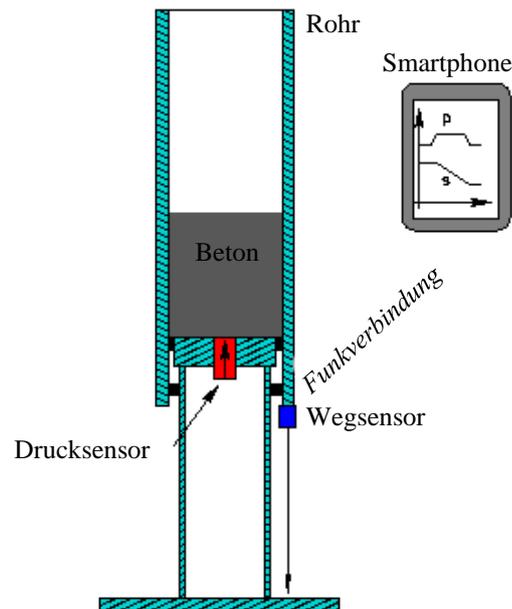


Abbildung 27: Systemskizze Gleitrohr-Rheometer in Anlehnung an [96]

Eine Messung besteht aus mehreren Hügen. Bei jedem Hub werden durch Variation mit zusätzlichen Gewichten (3 x ca. 1,6 kg und 3 x ca. 4,8 kg), die außen am Messgerät angebracht werden, unterschiedliche Geschwindigkeiten und Drücke erreicht. In Abbildung 28 sind die Ergebnisse von zwei Hügen mit dem Gleitrohr-Rheometer, bezeichnet mit „Stroke X“ und „Stroke Y“, dargestellt.

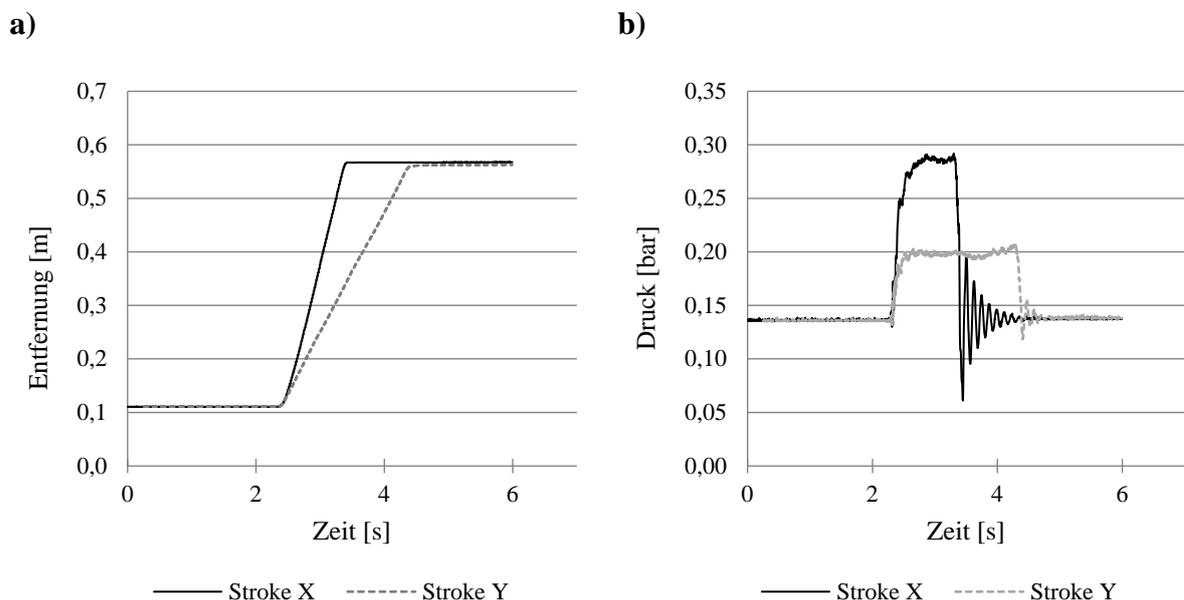


Abbildung 28: a) Aufzeichnung der Geschwindigkeit als Weg über Zeit und b) Aufzeichnung des Druckes zweier Hübe von einer Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer

Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Drücke der beiden Hübe ergeben sich durch den Einsatz der Zusatzgewichte, die am Messgerät angebracht werden können. Die Aufzeichnung des Druckes ermöglicht die Ermittlung des Maximaldrucks (siehe Abbildung 28 b) und mithilfe der Messung der Geschwindigkeit (siehe Abbildung 28 a) kann

über die Querschnittsfläche des Rohres die Fördermenge berechnet werden. Die Ergebnisse beziehen sich zunächst auf die Abmessungen des Messgerätes. In Abbildung 28 ist deutlich zu erkennen, dass bei „Stroke X“ ein höherer Druck und eine höhere Geschwindigkeit als bei „Stroke Y“ durch den Einsatz der Zusatzgewichte gemessen wurden.

Druck und Geschwindigkeit korrelieren linear und können in einem Förderdruck zu Fördermengen Diagramm (p-Q Diagramm) dargestellt werden. Das in Abbildung 29 dargestellte Beispiel bezieht sich auf die Prüfung einer Frischbetonprobe und die Messung wurde mit insgesamt 19 Hieben durchgeführt. Die Einzelergebnisse von „Stroke X“ und „Stroke Y“ aus Abbildung 28 sind im p-Q Diagramm in Abbildung 29 entsprechend gekennzeichnet.

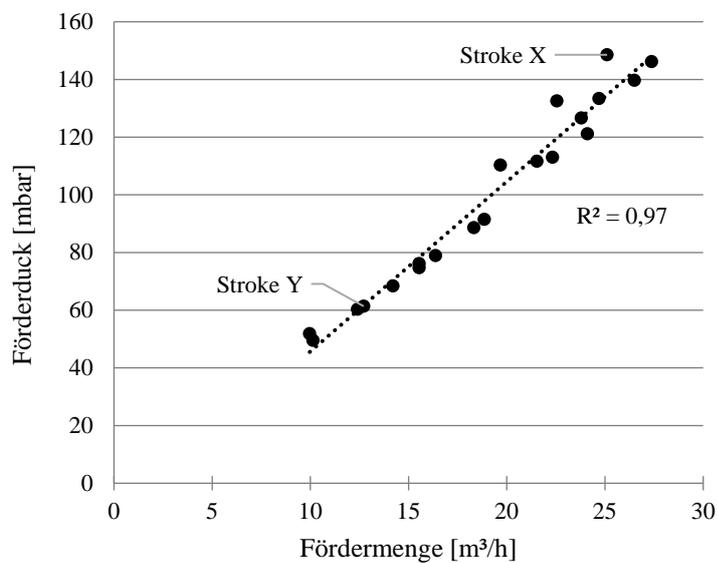


Abbildung 29: Beispiel für ein Förderdruck zu Fördermengen Diagramm (p-Q Diagramm) ermittelt mit dem Gleitrohr-Rheometer

Die Kurve wird durch den Beiwert A (y-Achsenabschnitt) und den Beiwert B (Steigung) charakterisiert. Über Umrechnungen kann der Einfluss der Geometrie vernachlässigt werden und man erhält die Beiwerte a und b. Der Beiwert a [mbar] ist der Parameter für die Fließgrenze und der Beiwert b [10^{-6} bar · h/m] der Parameter für die Viskosität. Die Beiwerte wurden gezielt gewählt, um eine Verwechslung mit den Bezeichnungen aus der Rheologie zu vermeiden [77]. Für die Berechnung des Förderdrucks muss zusätzlich zu den rheologischen Kennwerten der Anteil der Förderhöhe berücksichtigt werden. Der Druckanteil aus der Förderhöhe p_H wird mittels der Förderhöhe, der Rohdichte des Betons ρ und der Erdbeschleunigung g ermittelt. Die allgemeine Druckberechnung ergibt sich auf Grundlage der von Kaplan [17, 78] entwickelten Methodik (siehe Kapitel 2.3.2.3) nach Gleichung (13) [77].

$$p = p_F + p_v + p_H = a \cdot \frac{4 \cdot L}{D} + b \cdot \frac{16 \cdot Q \cdot L}{\pi \cdot D^3} + \rho \cdot g \cdot H \quad (13)$$

p_F	Druckanteil Einfluss der Fließgrenze [bar]
p_v	Druckanteil Einfluss der Viskosität [bar]
p_H	Druckanteil Einfluss der Förderhöhe [bar]
p	Förderdruck [bar]
L	Länge der Förderleitung [m]
Q	Fördermenge [m ³ /h]
D	Durchmesser der Förderleitung [m]
a	Parameter Fließgrenze [bar]
b	Parameter Gleitschicht [bar · h/m]
ρ	Rohdichte des Betons [kg/m ³]
H	Förderhöhe [m]
g	Erdbeschleunigung [m ² /s]

Das Gleitrohr-Rheometer ermöglicht so Pumpprognosen und Vergleiche zwischen unterschiedlichen Mischungen. Es wurde für die Beurteilung der Pumpbarkeit von Betonen, die üblicherweise mit Betonpumpen gefördert werden entwickelt [77]. Für die Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen für Spritzbetone wurde das Gleitrohr-Rheometer bisher nicht eingesetzt.

2.3.3.4 Prüfung der Stabilität

Frischbetonmischungen für Spritzbeton müssen unter Druck stabil sein, damit in den Förderleitungen keine Entmischungen und Blockaden auftreten. Blockaden treten auf, wenn sich der Leim aufgrund des hohen Drucks von den Gesteinskörnungen absondert [97]. Dieses Phänomen wird häufig mit Rezepturen mit ungeeigneter Sieblinie oder hohen W/B-Werten in Verbindung gebracht [85]. Eine Trennung der Leimschicht von den Gesteinskörnungen unter Druck führt dazu, dass die Gleitschicht nicht mehr ausgebildet werden kann. Die Reibung der Gesteinskörnung an der Rohrwandung erhöht sich und der Förderstrom wird blockiert [97]. Diese Absonderung der Leimschicht von der Gesteinskörnung oder die Wasserabsonderung ist nicht zu verwechseln mit der Anreicherung der Leimschicht an der Rohrwandung zur Ausbildung der Gleitschicht.

Bei der Beurteilung der Stabilität von Beton ist zwischen der Blutneigung, also der Wasserabsonderung, und der Sedimentation des Betons, also dem Absinken von Feststoffen, zu unterscheiden.

Für die Beurteilung der Blutneigung von Frischbetonen gibt es im Wesentlichen zwei Arten von Prüfverfahren, das Absetzverfahren und das Druckverfahren (siehe Tabelle 3) [98].

Tabelle 3: Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der abgesonderten Wassermenge nach [98]

Verfahrensart	Prüfmethode
Absetzverfahren	AS 1012.6 [99]
	ASTM Designation C232-14 [100]
	ASTM Designation C243-95 [101]
	ASTM Designation C940-10a [102]
	DBV-Merkblatt „Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton“ [103]
	DIN EN 480-4 [104]
	Verfahren nach Josserand und Larrard [105]
	Verfahren nach Lieber [106]
	Schwimmermethode nach Pauss [107]
	RILEM Draft Recommendation: „Bleeding of Concrete CPC-16“ [108]
	Verfahren nach Steinour [109]
Druckverfahren	ASTM Designation C941-10 [110]
	„Pressure-Bleed-Test“ von Browne and Bamforth [97]
	Frischbetonkompressionsgerät nach Hornung [111]
	Bauer-Betonfilterpresse [112]
	Betonfilterpresse der ÖVBB [113]

Beim Absetzverfahren wird die Menge an Blutwasser bestimmt, die von einer ruhenden Betonprobe über die Zeit abgegeben wird. Die Versuche sind abgeschlossen, wenn keine Wasserabsonderung aufgrund des Sedimentationsvorgangs mehr stattfindet. Dadurch ergibt sich häufig eine sehr lange Versuchsdauer und es werden keine äußeren Kräfte, die zu einer Wasserabsonderung führen können, berücksichtigt. Beim Druckverfahren wird die Frischbetonprobe mittels Druckluft oder Druckstempel mit einem Über- oder Unterdruck beaufschlagt und die dadurch abgegebene Blutwassermenge wird ermittelt. Je nach eingesetztem Prüfverfahren unterscheiden sich die Probenmenge, die Versuchsdauer und der Druck, mit dem die Frischbetonprobe beaufschlagt wird. Die Beurteilung der Druckverfahren und Absetzverfahren wird in der Literatur hinsichtlich Aussagekraft, Einflussparameter und Reproduzierbarkeit kontrovers diskutiert [98, 114–121].

Bei der Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen ist die Anwendung eines Druckverfahrens naheliegend. Die Frischbetonmischung ist während der Förderung in der Spritzbetonmaschine dem Förderdruck ausgesetzt. In einigen Studien [78, 84, 97, 120, 122] wurde die Blutwassermenge unter Druck bestimmt, um Rückschlüsse auf die Pumpbarkeit zu erhalten.

Browne und Bamforth [97] führten einen Test durch, bei dem ein Behälter mit einem Füllvolumen von 1,7 l mit einem Druck von 35 bar beaufschlagt wurde. Nach 10 s und 140 s wurde die Menge an Blutwasser ermittelt. Eine hohe Blutwassermenge zu Beginn zeigt, dass die Mischungen unter Druck schnell zum Absondern von Wasser neigen. In diesem Fall ist die

Differenz der Blutwassermenge nach 140 s von der Blutwassermenge nach 10 s gering (entspricht $V_{140}-V_{10}$ siehe Abbildung 30).

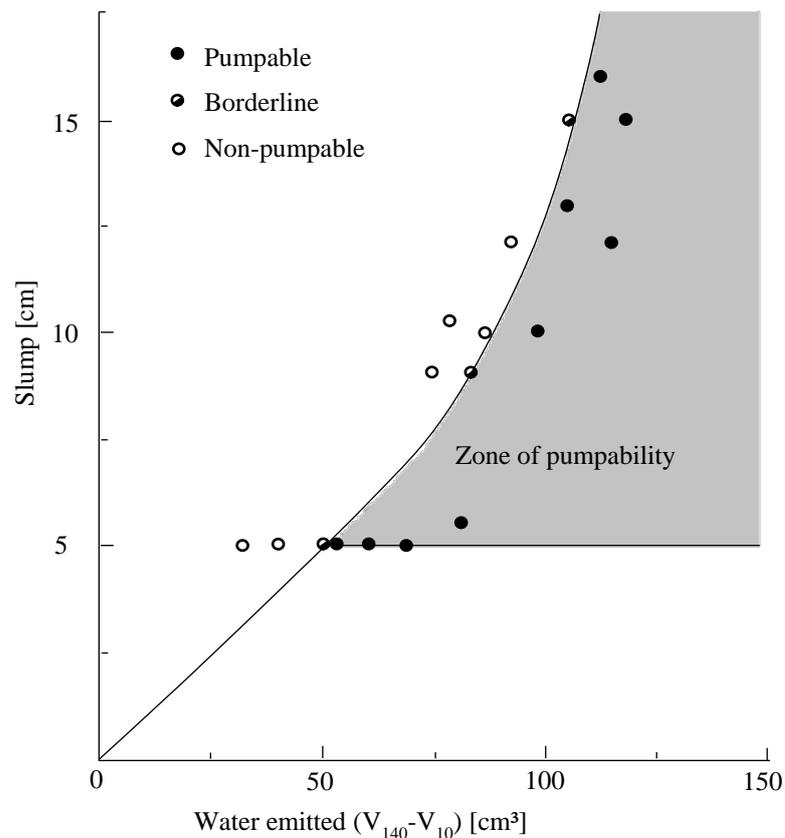


Abbildung 30: Beurteilung der Pumpbarkeit als Funktion von Setzmaß und Blutwassermenge in Anlehnung an [97]

Betone mit einer hohen Differenz zwischen V_{140} und V_{10} können das Wasser unter Druck besser in der Mischung zurückhalten. Durch Kombination der Blutwassermenge mit dem Setzmaß konnte ein Bereich für die Pumpbarkeit (bei einer bestimmten Auswahl an Rezepturen und Ausgangsstoffen) festgelegt werden. Eine generelle Aussage zur Pumpbarkeit bei anderen Ausgangsstoffen und Mischungszusammensetzungen ist anhand dieser Ergebnisse nicht möglich. Aber die Untersuchungen zeigen, dass bei der Beurteilung der Pumpbarkeit von Betonen sowohl die Stabilität der Betonmischung als auch das Fließverhalten der Mischung berücksichtigt werden sollen [97].

Die Stabilität der Betonmischung ist ein Indiz für die Pumpbarkeit, da eine zu hohe Blutwassermenge zu Entmischung und damit zu einer Erhöhung des Pumpwiderstands führen kann [123].

2.3.3.5 Prüfung der Gleitschicht

Bei der Prüfung der Gleitschicht sind die rheologischen Eigenschaften und die Dicke der Gleitschicht von Interesse. Sie beeinflussen die Pumpbarkeit von Frischbeton. Für die Untersuchung der Gleitschicht gibt es sowohl experimentelle Ansätze als auch numerische Modellierungen [86]. Die Ausbildung der Gleitschicht an der Rohrwandung und ihre Eigenschaften wurden unter anderem untersucht in [17, 73, 77, 82, 85, 94, 124–126].

Auf der Baustelle wird die Ausbildung der Gleitschicht häufig sehr einfach geprüft, indem mit einer Kelle über die Oberfläche des Betons gestrichen wird. So kann rein optisch die Leimschicht zwischen Kelle und Beton beurteilt werden. Natürlich lassen sich damit keine quantitativen Aussagen zur Gleitschicht treffen.

Die Herausforderung bei der experimentellen Prüfung der Gleitschicht besteht darin entweder die Eigenschaften der Gleitschicht während eines Pumpvorgangs zu bestimmen oder die Gleitschicht in einem Prüfgerät möglichst realistisch, d. h. so wie sie auch während des Pumpvorgangs ausgebildet wird, nachzubilden. Bei Prüfgeräten werden jedoch in der Regel keine vergleichbar hohen Pumpendrucke wie bei einem tatsächlichen Pumpvorgang aufgebracht. Wenn die Eigenschaften der Gleitschicht an einem äquivalenten Leim geprüft werden sollen, so müssen für die Größe der Feinstoffe und die Zusammensetzung der Gleitschicht Annahmen getroffen werden. Die Angaben in der Literatur variieren, meist wird ein Anteil der Feinteile $\leq 0,25$ mm für die Zusammensetzung der Gleitschicht genannt [15, 16] und für die Dicke der Gleitschicht ein Bereich zwischen 1 bis 9 mm [16]. Beim Pumpvorgang befindet sich das Material in Bewegung und die Fördermenge, die Oberfläche der Förderleitung, der Förderdruck, die Betonzusammensetzung etc. können die Dicke und/oder die Zusammensetzung der Gleitschicht beeinflussen. Bei Beton handelt es sich um ein inhomogenes Material, das heißt die Zusammensetzung der Gleitschicht kann sich je nach den von außen einwirkenden Faktoren anpassen und verändern. Diesen Prozess in einer Pumpleitung zu beobachten ist mit bloßem Auge nicht möglich.

Es gibt jedoch Ansätze und Forschungsvorhaben die Gleitschichtdicke während des Pumpens mithilfe von Ultraschallwellen [89] zu messen.

Ein anderer Ansatz ist während des Pumpvorgangs (bzw. des Einbaus) Einfluss auf die Eigenschaften des Betons durch aktivierte Zusatzmittel zu nehmen, die mit elektromagnetischen Frequenzen von außen gesteuert werden können [127]. Im Moment können die rheologischen Eigenschaften des Betons durch die Ausgangsstoffe, die Mischungszusammensetzung und den Mischprozess nur vor dem Einbau bzw. vor der Förderung zum Einbauort beeinflusst werden. Danach können die Eigenschaften der Mischung nicht mehr aktiv beeinflusst werden. Das Ziel des Forschungsvorhabens [127] ist es, während des Einbaus bzw. der Förderung des Betons die Frischbetoneigenschaften durch die Verwendung von aktivierten Zusatzmitteln zu beeinflussen. So kann z. B. die Ausbildung der Gleitschicht während des Pumpvorgangs kontrolliert werden.

Am häufigsten werden Prüfverfahren verwendet, die die Ausbildung der Gleitschicht während des Pumpens simulieren, z. B. mithilfe eines Tribometers oder eines Gleitrohr-Rheometers (siehe Kapitel 2.3.3.3). Mit diesen Verfahren können die tribologischen Eigenschaften von Mischungen untereinander verglichen werden oder der Pumpvorgang im Labormaßstab nachgebildet werden. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Erstellung von Pumpprognosen und die Berechnung eines Förderdrucks.

2.3.4 Betontechnologische Einflüsse auf die Pumpbarkeit

2.3.4.1 Leimvolumen

Der Leim im Frischbeton hat die Aufgabe die Gesteinskörnung zu umhüllen und mit dem „zusätzlichen“ Leimvolumen wird die Konsistenz des Frischbetons beeinflusst [80]. Die Verarbeitbarkeit eines Betons kann also allgemein sowohl über die Sieblinie der Gesteinskörnung als auch über das Leimvolumen gesteuert werden [128]. In Abbildung 31 ist dargestellt, wie die Konsistenz eines Betons durch eine Erhöhung des Leimvolumens bei unterschiedlichen w/z-Werten beeinflusst werden kann [129].

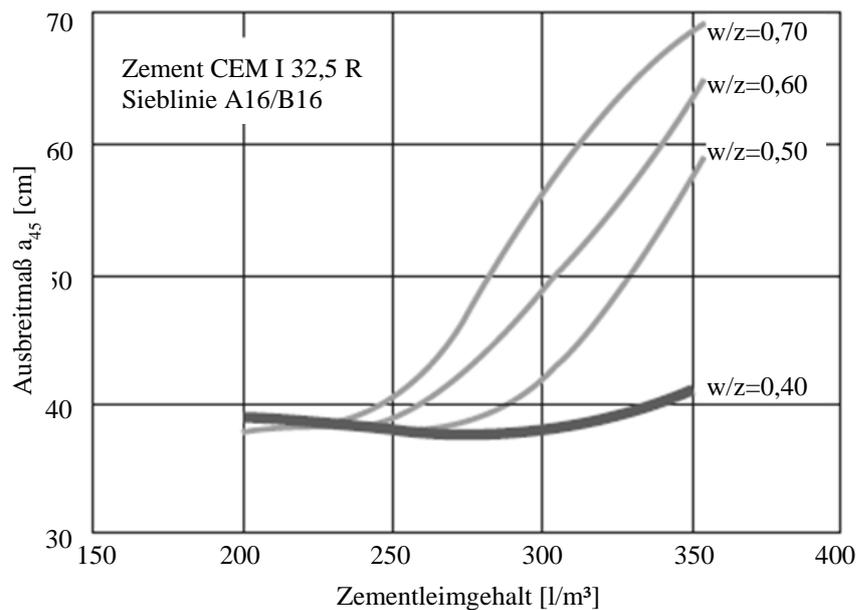


Abbildung 31: Steigerung der Konsistenz von Konstruktionsbeton durch Erhöhung des Zementleimgehalts bzw. durch Änderung der rheologischen Eigenschaften des Zementleims infolge einer Erhöhung des Wasserzementwertes in Anlehnung an [129]

Der Hohlraumgehalt der Gesteinskörnungen betrug in diesem Fall ca. 22 Vol.-%. Die Versuchsergebnisse belegen, dass die Konsistenz unterhalb eines kritischen Leimvolumens von ca. 250 l/m³ nicht mehr von diesem beeinflusst wurde. Es musste eine Mindestleimmenge vorhanden sein, um nicht nur die Hohlräume zwischen den Gesteinskörnern auszufüllen, sondern auch um eine Verschiebung der größeren Gesteinskörner zu ermöglichen. Das Leimvolumen setzte sich in diesem Fall zusammen aus Zement und Wasser. Luft und der Anteil an feinteilreicher Gesteinskörnung wurden bei den Untersuchungen von Thielen et al. [129] nicht mitberücksichtigt.

Im Folgenden werden Untersuchungsergebnisse vorgestellt, bei denen der Einfluss des Leimvolumens auf die Pumpbarkeit von Frischbetonen und Frischbetonmischungen untersucht wurde.

In einem Pumpversuch von Neumann [130] wurde der Zusammenhang zwischen einem geringen Leimvolumen (bestehend aus Zement und Wasser) und einem hohen Pumpendruck

nachgewiesen. Für die Pumpversuche wurde eine Autobetonpumpe eingesetzt, das Förderaggregat bestand aus einer Kolbenpumpe (max. Betondruck 85 bar, max. Fördermenge 160 m³/h). Während der Pumpversuche wurden der Hydraulikdruck der Pumpe und der Betondruck über einen Drucksensor am ersten Rohrbogen nach der S-Rohrweiche kontinuierlich aufgezeichnet. In Abbildung 32 ist der Einfluss des Leimvolumens auf den Betondruck bei einer Förderleistung von 60 m³/h und 125 m³/h dargestellt. Die Versuche wurden mit Frischbetonen mit unterschiedlichem Leimvolumen durchgeführt. Der w/z-Wert war bei allen Mischungen konstant. Die Konsistenz wurde über den Fließmittelgehalt gesteuert, um bei allen Mischungen die Konsistenzklasse F4 zu erreichen (mit Ausnahme der Mischung mit einem Leimvolumen von 240 l/m³, hier wurde nur die Konsistenzklasse F3 erreicht). Je geringer das Leimvolumen der Betonmischungen war, umso höher war der Betondruck (siehe Abbildung 32).

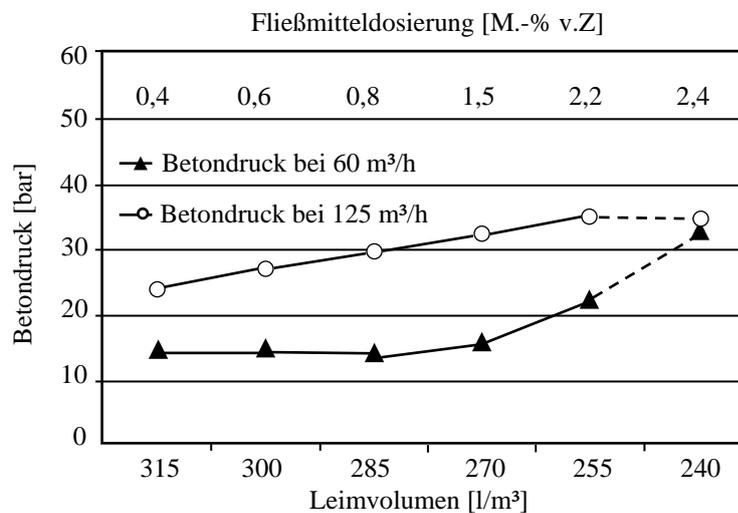


Abbildung 32: Einfluss des Leimvolumens auf den Betondruck in Anlehnung an [130]

Bei einem geringen Leimgehalt wurde die Gesteinskörnung nicht ausreichend mit Leim umhüllt, wodurch der Scherwiderstand des Betons zunahm, und die Gleitschicht nicht ausreichend ausgebildet wurde. Aus diesen Gründen führten die geringen Leimgehalte trotz gleicher Konsistenz der Mischungen zu einem erhöhten Betondruck. Bei den Untersuchungen von Neumann wurde das Leimvolumen als die Summe der Volumenanteile von Zement und Wasser des Betons definiert.

Häufig zählen zum Leimvolumen jedoch zusätzlich zum Bindemittel und Wasser auch die Feinanteile der Gesteinskörnung und der Luftgehalt. In den nachfolgend genannten Untersuchungen wird der Einfluss von unterschiedlichen Luftgehalten auf das Leimvolumen und damit die Pumpbarkeit von Beton berücksichtigt.

Untersuchungen von Jolin et al. [85] an Frischbetonmischungen für Spritzbeton ergaben, dass über das Leimvolumen zur Füllung der Zwischenräume der Gesteinskörnung noch ein zusätzliches Leimvolumen zum Auskleiden der Gleitschicht in einer Pumpleitung benötigt wird. Die Menge ist abhängig vom Schlauch- oder Rohrdurchmesser, der Dicke der Gleitschicht und der Oberflächenbeschaffenheit der Rohrleitung. In experimentellen Untersuchungen wurden diese Beobachtungen umgesetzt und die Pumpbarkeit verschiedener

Betone mit unterschiedlichen Leimgehalten geprüft [85]. Das Leimvolumen setzte sich aus Wasser, Bindemittel, Luft und Feinanteilen der Gesteinskörnung zusammen. Bei einer Erhöhung des Leimvolumens wurden entweder die Anteile an Wasser und Bindemittel erhöht oder aber der Anteil an Luft. Die Einführung künstlicher Luftporen ist grundsätzlich eine einfache und günstige Methode, um die Verarbeitungseigenschaften des Betons beim Pumpen zu verbessern. Die Ergebnisse der Pumpversuche zeigten jedoch, dass der Luftgehalt bei der Berechnung eines minimal erforderlichen Leimgehalts nicht mit berücksichtigt werden darf. Ein Teil der Luft im Leim wurde bei hohen Pumpendrücken komprimiert und beeinflusste die Ausbildung der Gleitschicht nicht. Für die Pumpbarkeit war ein Mindestanteil an Wasser, Bindemittel und Feinanteilen der Gesteinskörnungen erforderlich, andernfalls kam es zu Blockaden in den Förderleitungen. Mit Luft konnte nur die Pumpbarkeit von Mischungen verbessert werden, die bereits ohne erhöhte Luftgehalte pumpbar waren. Ein Ersatz von Feststoffen oder Wasser durch Luft war nicht möglich.

Beaupre [122] untersuchte ebenfalls den positiven Effekt eines erhöhten Luftgehalts beim Pumpen von Frischbetonmischungen. Seine Untersuchungen zeigten aber auch, welche Herausforderungen sich bei der Pumpbarkeit von Betonen mit erhöhten Luftgehalten ergeben. Bei Betonen mit zu hohen Luftgehalten führten die aufgebrauchten Pumpendrücke zu einer Verdichtung des Materials während des Pumpvorgangs, wodurch der Füllgrad der Kolben, die Steuerung der Kolbenhöhe und damit verbunden die Fördermenge beeinflusst wurden.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass das Leimvolumen die Pumpbarkeit von Beton beeinflusst, d. h. dieser Aspekt ist auch bei der Entwicklung von Frischbetonmischungen für Spritzbeton zu berücksichtigen. Beim Leimvolumen sind der Anteil an Mehlkorn, Wasser und ggf. Luft zu berücksichtigen.

2.3.4.2 Rheologische Eigenschaften des Leims

Die Pumpbarkeit der Frischbetonmischung wird neben dem Leimvolumen von den rheologischen Eigenschaften des Leims maßgeblich beeinflusst. Die rheologischen Eigenschaften des Leims wiederum werden durch den Wassergehalt, die Eigenschaften des Mehlkorns und durch die Art und Menge der Zusatzmittel, z. B. des Fließmittels, gesteuert. Für die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung für Spritzbeton sind die rheologischen Eigenschaften des Leims nicht nur für die Pumpbarkeit, sondern auch für die Untermischung des Erstarrungsbeschleunigers von Bedeutung. Die Frischbetonmischung muss an der Düse mit Druckluft beschleunigt und aufgerissen werden, um eine homogene Untermischung des Erstarrungsbeschleunigers zu gewährleisten. Die Untersuchung der Spritzbarkeit ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Mehlkorn

Zum Mehlkorn zählen nach DIN EN 206 [131] „alle festen Partikel im Frischbeton mit einer Korngröße $\leq 0,125$ mm [131]“. Die Mahlfeinheit und Kornverteilung der mehlkornhaltigen Bestandteile beeinflussen maßgeblich den Wasseranspruch und damit die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons zum Erreichen einer gewünschten Verarbeitbarkeit (siehe insbesondere nachfolgenden Abschnitt „Wassergehalt“). In Abbildung 33 ist vereinfacht

dargestellt, welchen Einfluss der Mehlkorngehalt auf die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung und den Spritzbeton hat.

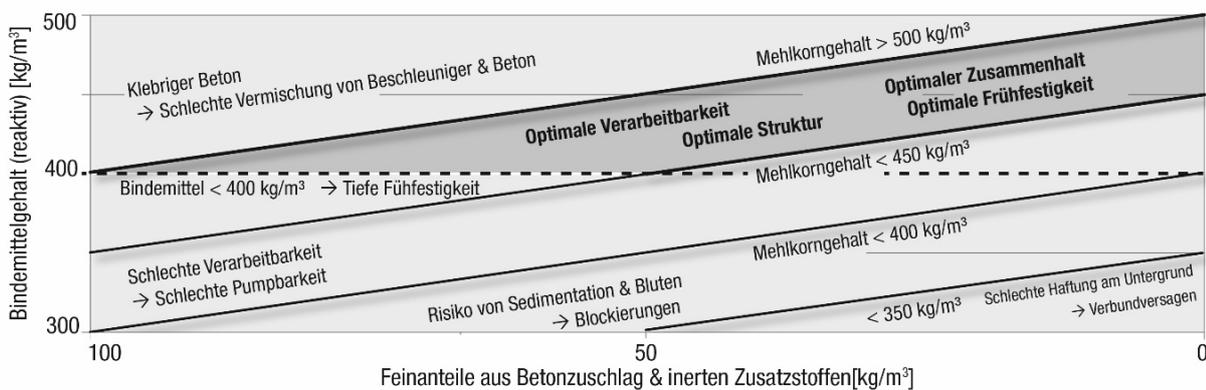


Abbildung 33: Einfluss der Feinanteile auf die Frischbetonmischung und den Spritzbeton [132]

Zu den dargestellten Zahlenwerten gibt es keine veröffentlichten Versuchsreihen als Grundlage, aber in der Abbildung wird das notwendige Ausloten des Feinteilgehalts deutlich, um z. B. eine Frischbetonmischung mit optimaler Verarbeitbarkeit und einen Spritzbeton mit optimaler Frühfestigkeitsentwicklung zu erhalten. Für die Verarbeitbarkeit von Frischbetonmischungen sind sowohl die Anteile des Mehlkorns aus dem (reaktiven) Bindemittel als auch die Feinanteile der Gesteinskörnung und der inerten Zusatzstoffe relevant. Zu hohe Feinanteile (z. B. Mehlkorngelalt > 500 kg/m³) können zu einem klebrigen Beton führen und der Beschleuniger kann infolgedessen schlecht untergemischt werden. Bei zu geringen Feinanteilen (z. B. Mehlkorngelalt < 400 kg/m³) hingegen steigt die Gefahr der Sedimentation und des Blutens und damit verbunden der Blockaden in den Förderleitungen. Innerhalb dieser Grenzen ergibt sich ein Bereich optimaler Verarbeitbarkeit, Struktur, Zusammenhalt und Frühfestigkeit.

Wassergehalt

Die Viskosität und die Fließgrenze des Frischbetons werden im Allgemeinen über den Wassergehalt gesteuert (siehe Abbildung 34 a). Die maximale Wasserzugabe wird dabei sowohl durch die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und Festbetoneigenschaften beschränkt als auch durch die Anforderung an die Stabilität der Frischbetonmischung. Beim Pumpen von Frischbetonmischungen führen zu hohe Wassergehalte dazu, dass die Mischungen unter Druck nicht ausreichend stabil sind und Blockaden in den Förderleitungen auftreten.

In Pumpversuchen von Neumann [130] wurde die Pumpbarkeit von Frischbetonen mit unterschiedlichen w/z-Werten bei gleichem Leimvolumen untersucht. Bei einer Förderleistung von 60 m³/h mit einer Autobetonpumpe (Doppelkolbenpumpe) betrug der Betondruck einer Mischung mit einem Leimvolumen = 300 l/m³ und einem w/z-Wert = 0,52 ca. 10 bar. Bei gleicher Förderleistung und gleichem Leimvolumen war der Betondruck bei einem w/z-Wert = 0,48 um ca. 5 bar höher bei ca. 15 bar. Der geringere Wassergehalt führte zu höheren Pumpendrücken trotz gleicher Konsistenzklasse F4, die mithilfe eines Fließmittels eingestellt wurde.

Der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem Pumpendruck wurde unter anderem auch mit rheologischen Prüfverfahren im Labormaßstab von Ngo et al. [16], Mechtcherine et al. [126], Secieru et al. [73] untersucht. Bei diesen Versuchen stellte sich der Wassergehalt als ein entscheidender Einflussfaktor auf die Pumpbarkeit dar.

Bei der Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichen Wassergehalten ist zu berücksichtigen, dass für die Verarbeitbarkeit nicht nur der massenbezogene w/z-Wert oder W/B-Wert von Bedeutung ist, sondern vor allem der W/P-Wert, also das volumenbezogene Verhältnis von Wasser zu Pulver. Das Pulver entspricht dem Mehlkorn (alle Feinstoffe $\leq 0,125$ mm). Für die Verarbeitbarkeit ist es zunächst nicht relevant ob es sich um reaktive oder inaktive Feinanteile handelt, sondern vielmehr wie hoch der Wasseranspruch des Mehlkorns ist.

Zusatzmittel

Für die Verarbeitbarkeit von Frischbetonmischungen für Spritzbeton sind vor allem die Zusatzmittel Fließmittel, Luftporenbildner, Stabilisierer, Verzögerer und Konsistenzregler von Bedeutung. Die Aufgabe der Zusatzmittel ist es die Eigenschaften der Frischbetonmischung, die nicht über Zement, Wasser oder Gesteinskörnung gesteuert werden können, gezielt zu beeinflussen und zu verändern. Wesentliche Ziele sind die Reduzierung des Wassergehalts, die Anpassung der Verarbeitungszeiten an die Baustellenbedingungen und die verbesserte Pumpbarkeit. Als Fließmittel kommen heute vorwiegend Hochleistungsfließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern zum Einsatz. Sie steuern die Verflüssigung und die Verarbeitungsdauer [133].

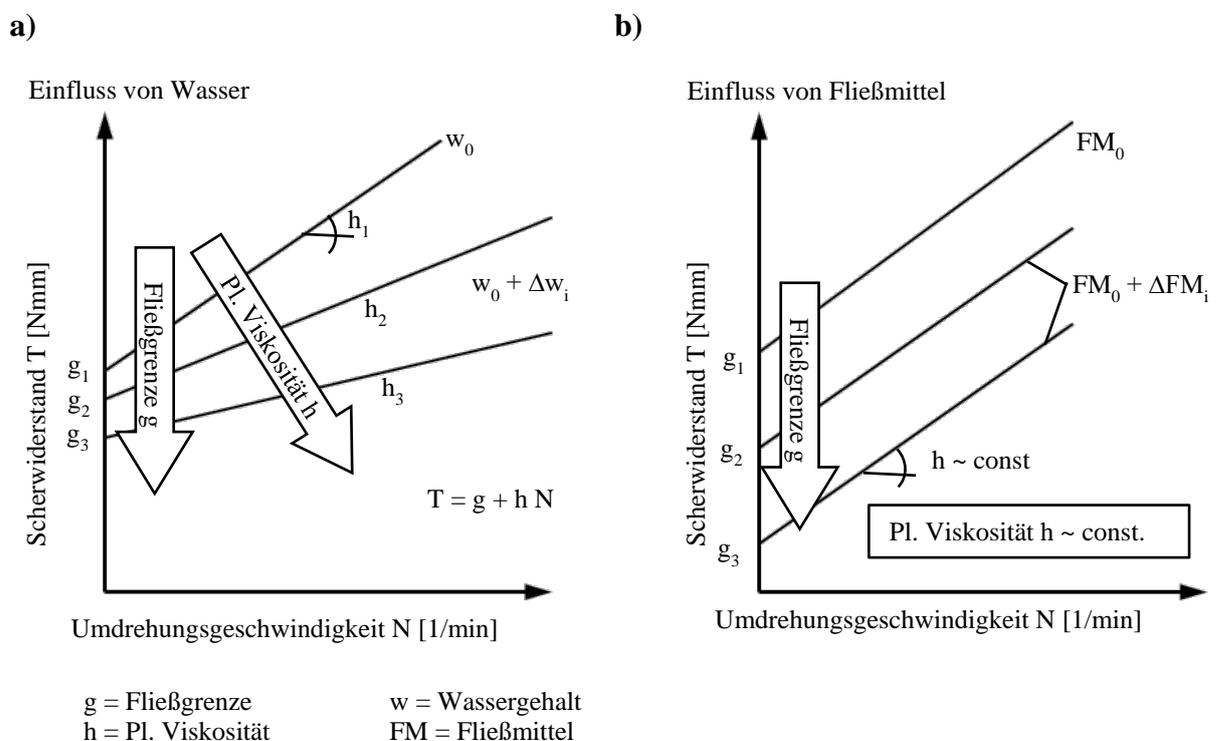


Abbildung 34: Einfluss von a) Wasser und b) Fließmittel auf die Suspensionseigenschaften eines Mehlkornleims in Anlehnung an [134]

Eine Optimierung der Verarbeitungseigenschaften der Frischbetonmischung erfolgt durch eine kombinierte Anpassung des Wassergehalts und der Art und Menge des Fließmittels. In Abbildung 34 b ist idealisiert dargestellt wie die Zugabe von Fließmitteln die Fließgrenze und in Abbildung 34 a wie der Wassergehalt die plastische Viskosität und die Fließgrenze beeinflussen können.

Die dargestellten Zusammenhänge stellen pauschale Einflüsse dar und sind im Einzelfall zu überprüfen. Die Wirkung der Zusatzmittel ist immer auf den Zement und die Zusatzstoffe abzustimmen und die gegenseitige Beeinflussung unterschiedlicher Zusatzmittel ist zu überprüfen.

Packungsdichte der Feinstoffe

Die Optimierung der Packungsdichte von Feinstoffen ist eine Möglichkeit, um die Verarbeitbarkeit von Frischbeton gezielt zu beeinflussen. Bei den Feinstoffen handelt es sich um das Mehlkorn im Beton und damit um alle Partikel $\leq 0,125$ mm. Das Ziel ist die Feinstoffe so aufeinander abzustimmen, dass der Hohlraumgehalt zwischen den Feststoffpartikeln minimiert wird. Das heißt, es müssen ausreichend feine Partikel zur Verfügung stehen, um die Hohlräume zwischen den größeren Partikelklassen zu füllen. Der Wasseranspruch sinkt bei gleichbleibender Verarbeitbarkeit und die Sedimentationsneigung wird reduziert. Ein geringer Wasseranspruch ist positiv für die Festbetoneigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Beton, da das Gefüge des erhärteten Zementsteins dichter wird. Neben der Korngrößenverteilung spielen die Kornform und die interpartikulären Wechselwirkungen zwischen den Feinstoffen bei der Optimierung der Packungsdichte eine entscheidende Rolle.

Für die Entwicklung von Rezepturen mit erhöhter Packungsdichte gibt es unterschiedliche theoretische und versuchstechnische Ansätze, z. B. [135–144]. Im Forschungsprojekt „Advanced and Sustainable Sprayed Concrete - ASSpC“ [145] wird ein Ansatz zur Optimierung der Packungsdichte erstmals auf Spritzbeton umgesetzt [146]. Ziel ist die Entwicklung einer Spritzbetonrezeptur mit einer hohen Frühfestigkeitsentwicklung und einem hohen Dauerhaftigkeitspotenzial. Die Mischungen sollen zudem gut zu verarbeiten, zu beschleunigen und spritzbar sein und die Nacherhärtung und der E-Modul sollen moderat bleiben. Für die Entwicklung der Rezepturen werden Bindemittelkombinationen aus Portlandzement, puzzolanischen und latent-hydraulischen Zusatzstoffen sowie inerten Zusatzstoffen verwendet. Bei der alleinigen Verwendung von Portlandzement im Bindemittel werden nach der Modellvorstellung die Hohlräume zwischen den Feststoffpartikeln mit Wasser gefüllt und es wird ein ausreichend dicker Wasserfilm an der Oberfläche der Partikel für die Verarbeitbarkeit benötigt (siehe Abbildung 35).

Bei der Optimierung der Packungsdichte wird unterschieden zwischen dem Portlandzement und den weiteren Zusatzstoffen anhand der Korngrößenverteilung:

- Portlandzement: Korngrößenbereich von ca. $5 \mu\text{m} \leq d_{50} \leq 15 \mu\text{m}$
- Zusatzstoff sog. Mesofüller „MEF“: Korngrößenbereich von ca. $5 \mu\text{m} \leq d_{50} \leq 30 \mu\text{m}$
- Zusatzstoff sog. Mikrofüller „MIF“: Korngrößenbereich $d_{50} < 5 \mu\text{m}$

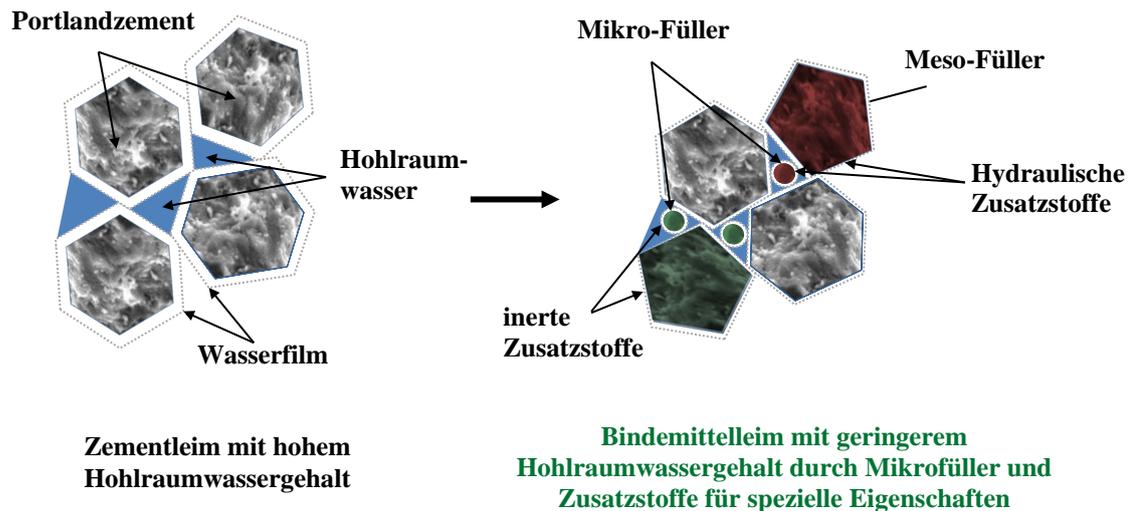


Abbildung 35: Prinzip der Packungsdichte-Optimierung eines Bindemittel-Leimes durch „Mikrofüller“ und „Mesofüller“ in Anlehnung an [146]

Die Mikrofüller können den Hohlraum zwischen dem Portlandzement und den Mesofüllern gezielt füllen. Bei den Meso- und Mikrofüllern handelt es sich um gemahlenen Hüttensand, Kalksteinmehl, AHWZ, Microsilica und Metakaolin in unterschiedlicher Feinheit. Die Verringerung des Hohlraumgehalts zwischen den Partikeln führt zu einer erhöhten Packungsdichte und damit zu einem geringeren Wasserbedarf im Vergleich zu den Mischungen mit reinem Portlandzement bei gleichbleibender oder verbesserter Verarbeitbarkeit (siehe Abbildung 35). Hilfreich ist auch der Einsatz von hochwirksamen Polycarboxylatether-Fließmitteln (PCE), um den Wasserbedarf zu senken.

Die Packungsdichte der Feinstoffe oder der Stoffgemische wird experimentell bestimmt. Mit dem Verfahren nach Marquardt [147] wird der Sättigungswasserbedarf ermittelt. Dabei wird in einem Mischer die maximale Leistungsaufnahme bestimmt, die durch die Wasserzugabe bei einem trockenen Bindemittel(gemisch) erreicht werden kann. Dieser Punkt wird als Sättigungswassergehalt angegeben und entspricht dem minimalen Hohlraumgehalt des Stoffes oder des Stoffgemisches. Die Packungsdichte kann mit diesem Verfahren sowohl von einzelnen Stoffen als auch von Stoffgemischen experimentell ermittelt werden. Das Verfahren wird kombiniert mit der Prüfung des Setzfließmaßes nach Okamura [148]. Nach Erreichen des Sättigungswassergehaltes wird schrittweise Wasser im Mischer zugegeben und anschließend das Setzfließmaß auf einer trockenen Glasplatte mit dem Haegermann Trichter nach DIN EN 1015 [149] ohne Verdichtungsstöße bestimmt. Mithilfe dieser Methode kann der Wasserbedarf der Mischung zum Erreichen einer bestimmten Fließfähigkeit ermittelt werden. Als günstig werden Mischungen mit einer hohen Packungsdichte und einem geringen Wasserbedarf zum Erreichen einer gewünschten Fließfähigkeit beurteilt.

Neben der experimentellen Bestimmung der Packungsdichte und des Wasserbedarfs wird ein theoretisches Berechnungsmodell nach Fennis [142] verwendet. Das entsprechende Berechnungsprogramm wurde an der TU Graz entwickelt [150].

Die Auswahl der Meso- und Mikrofüller und des Portlandzementgehaltes erfolgt neben den theoretischen Anforderungen an die Korngröße und die Packungsdichte insbesondere anhand

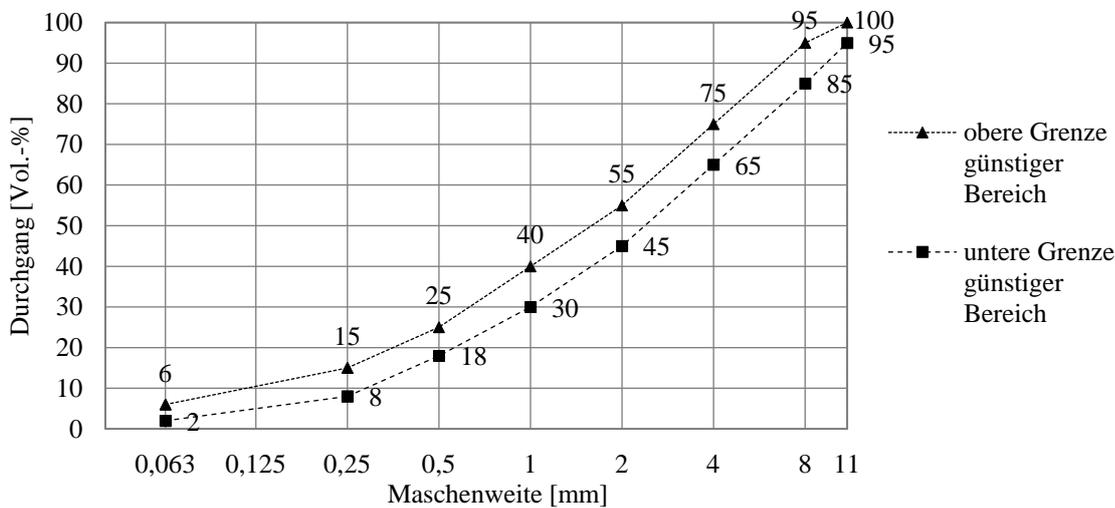
der Anforderungen an eine erhöhte Dauerhaftigkeit und Frühfestigkeit der Mischungen. Diese Aspekte sind neben der Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischungen die Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz des Spritzbetons.

2.3.4.3 Gesteinskörnungen

Die Gesteinskörnungen beeinflussen die Verarbeitbarkeit von Frischbetonmischungen für Spritzbeton durch die Kornform, die Korngrößenverteilung, die Feinanteile und den Anteil an gebrochenem Korn.

In Abbildung 36 sind als Beispiel zwei günstige Sieblinienbereiche für Frischbetonmischungen nach der österreichischen Richtlinie Spritzbeton [2] und der EFNARC Richtlinie Spritzbeton [151] dargestellt.

a)



b)

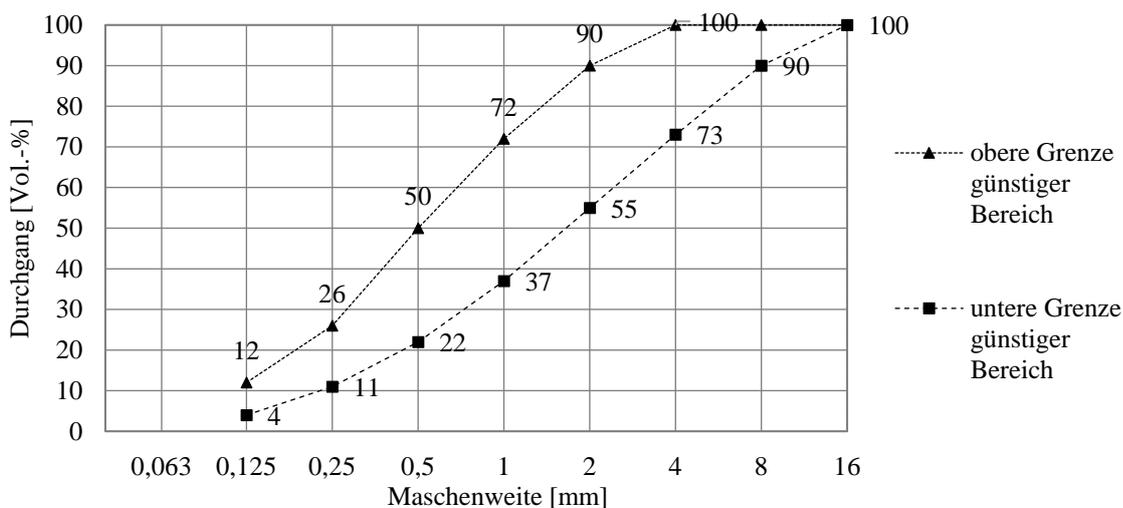


Abbildung 36: Günstige Bereiche der Sieblinie für Spritzbeton nach a) der österreichischen Richtlinie Spritzbeton [2] und b) der EFNARC Richtlinie [151]

Bei Spritzbeton wird in der Regel ein Größtkorn von 8 - 16 mm verwendet, es muss auf den Durchmesser des Förderzylinders, den Querschnitt des Ansaugkanals und die Größe der Förderleitung abgestimmt werden [15]. Außerdem führt ein hoher Grobkorngehalt zu einem verstärkten Rückprall [152]. Die Sieblinie wird meist aus 2 - 3 Korngruppen zusammengestellt [6]. Durch eine geeignete Sieblinie und Kornform kann die Gesamtoberfläche der Gesteinskörnung im Beton reduziert werden. Bei einer geringen Oberfläche wird weniger Leim benötigt, um die Gesteinskörnung zu umhüllen und die Zwischenräume zu füllen, als bei einer großen Oberfläche bei gleicher Verarbeitbarkeit [15]. Wie bereits in Kapitel 3.1.6.1 erläutert hat der Anteil an Leimvolumen einen entscheidenden Einfluss auf die Verarbeitbarkeit.

In Abbildung 37 ist der Querschnitt durch einen Förderschlauch mit einem ausreichend und einem nicht ausreichend abgestimmten Leimgehalt auf die Gesteinskörnung gegenübergestellt. Bei einem zu geringen Leimgehalt werden die groben Gesteinskörnungen nicht mit ausreichend Leim umhüllt und es kann sich keine ausreichend dicke Gleitschicht an der Rohrwandung ausbilden.

a)



b)



Abbildung 37: *Querschnitt durch einen Förderschlauch a) eines schlecht pumpbaren Betons und b) eines gut pumpbaren Betons beurteilt nach dem Leimvolumen [15]*

Der Anteil an Feinsand der Gesteinskörnung wird zu den mehlkornhaltigen Bestandteilen des Leims gezählt und beeinflusst die Pumpbarkeit, insbesondere die Ausbildung des Gleitfilms. In der Literatur finden sich unterschiedliche Hinweise bis zu welcher Korngröße der Anteil an Feinsand zu berücksichtigen ist. Häufig ist der Anteil kleiner 0,25 mm genannt [15, 16].

Ein weiterer Aspekt, der bei der Auswahl der Gesteinskörnung berücksichtigt werden muss, ist die Kornform, z. B. haben plattige oder gebrochene Körner einen höheren Wasseranspruch als runde Körner. Die Verwendung von plattigen Körnern kann beim Pumpen zu einem erhöhten Reibungswiderstand zwischen den Körnern und der Rohrwandung führen [77].

Beim Einsatz von Spritzbeton im Tunnelbau wird teilweise angestrebt aufbereitetes Tunnelausbruchmaterial als (grobe) Gesteinskörnung zu verwenden. Durch den Einsatz von Tunnelausbruchmaterial können sowohl die Kosten für die Gesteinskörnungen als auch das Deponievolumen und die Transportwege reduziert werden, sowie die Ökobilanz des Bauvorhabens verbessert werden [153]. Voraussetzung für den Einsatz ist grundsätzlich, dass die Anforderungen nach DIN EN 12620 [154] erfüllt werden:

- geometrische Anforderungen (Kornzusammensetzung, Kornform)
- physikalische Anforderungen (Festigkeiten und physikalische Eigenschaften)
- chemische Anforderungen (Chlorid- und Schwefelgehalt)

Die Verwendung von Tunnelausbruchmaterial für Spritzbeton erfordert im Einzelfall eine genaue Abstimmung und Vorversuche mit dem vorhandenen Material.

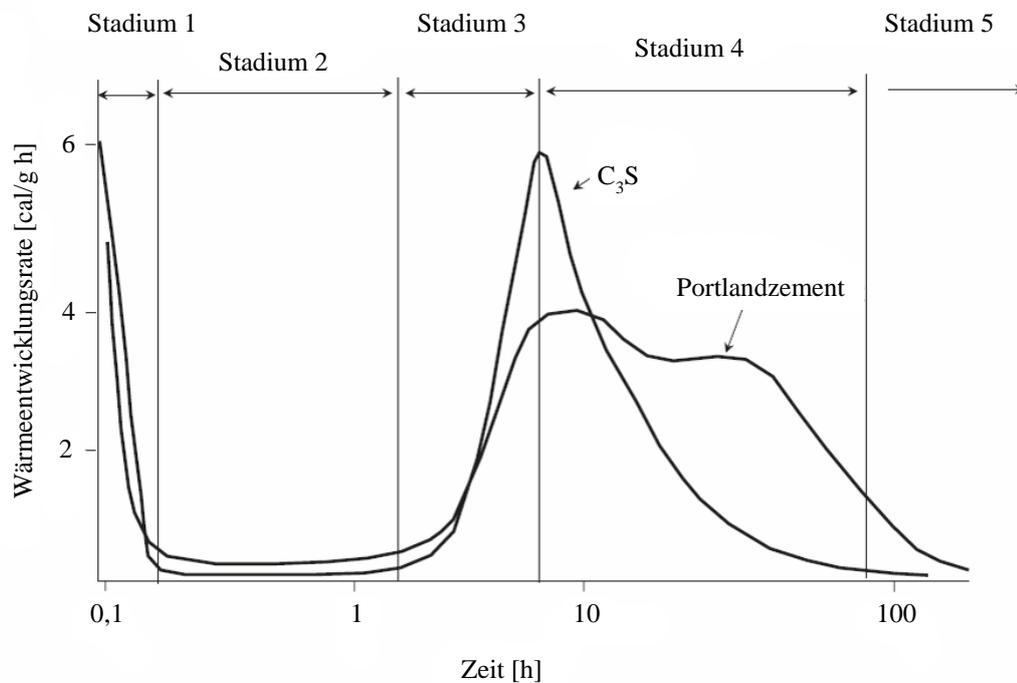
2.3.4.4 Weitere Einflussfaktoren

Die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung wird neben den oben genannten Faktoren auch von der Temperatur, dem Mischprozess und der Verarbeitungsdauer beeinflusst.

Der Rückgang der Verarbeitbarkeit mit der Zeit ist eine Folge der einsetzenden Hydratation, sie beeinflusst das Erstarren und das Erhärten des Zementleims. Portlandzement besteht im Wesentlichen aus den vier Klinkerphasen Tricalciumsilicat C_3S , Dicalciumsilicat C_2S , Calciumaluminat C_3A und Ferrit C_4AF , die einen unterschiedlichen Beitrag zur Erhärtungsgeschwindigkeit leisten. In Tabelle 4 und Abbildung 38 werden der Reaktionsablauf und die Hydratationsstadien des C_3S und des Portlandzements vereinfacht dargestellt und kurz beschrieben. Der Ablauf der Hydratation lässt sich in insgesamt fünf Stadien einteilen: Anfangshydrolyse, dormante Periode, Accelerationsperiode, Decelerationsperiode und stetige Periode [155]. Innerhalb der ersten beiden Perioden ist der Beton verarbeitbar, danach beginnen das Erstarren und das Erhärten. Für den Baustellenablauf ist die Verarbeitungsdauer ein entscheidender Faktor, im Tunnelbau sind Verarbeitungszeiten von vier Stunden oder mehr keine Seltenheit. Hier müssen im Einzelfall Maßnahmen ergriffen werden, um die Verarbeitungsdauer, z. B. durch die Zugabe von Betonzusatzmitteln, zu verlängern und an die Baustellenbedingungen anzupassen. Bei der Rezepturenentwicklung und bei der Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung sind ebenfalls die Umgebungsbedingungen, z. B. die Temperatur, zu berücksichtigen. Sie können die Verarbeitungsdauer und Erhärtungsgeschwindigkeit beeinflussen. Für vertiefende Literatur zum Thema wird auf [64, 155–157] verwiesen.

Tabelle 4: Perioden der C_3S Reaktion in Anlehnung an [155]

	Stadium	Reaktionskinetik	Chemische Prozesse	Einfluss auf die Betoneigenschaften
1	Anfangshydrolyse	chemisch kontrollierte, schnelle Reaktion	Beginn der Hydrolyse, Inlösunggehen von Ionen	Anstieg des pH-Werts der wässrigen Lösung auf $\geq 12,3$
2	dormante Periode	keimbildungskontrolliert, langsame Reaktion	kontinuierliche Lösung von Ionen	bestimmt das erste Ansteifen
3	Accelerationsperiode	chemisch kontrollierte, schnelle Reaktion	Beginn der Bildung von Hydratationsprodukten	bestimmt das späte Ansteifen und die Erstarrungsentwicklung
4	Decelerationsperiode	chemisch und diffusionskontrollierte Reaktion	kontinuierliche Bildung von Hydratationsprodukten	bestimmt die Frühfestigkeitsentwicklung
5	stetige Periode	diffusionskontrollierte Reaktion	langsame Bildung von Hydratationsprodukten	bestimmt die Endfestigkeitsentwicklung

Abbildung 38: Reaktionsablauf (anhand der Wärmeentwicklungsrate) und Hydratationsstadien des C_3S und des Portlandzementes in Anlehnung an Mindess and Young 1981 [158] bzw. [155]

3 Eigene Untersuchungen

3.1 Versinterungspotential von Mörtel, Spritzmörtel und Spritzbeton

3.1.1 Methodische Vorgehensweise

Der Einfluss von unterschiedlichen Mischungszusammensetzungen auf das Versinterungspotential wurde an Mörtel-, Spritzmörtel- und Spritzbetonproben untersucht.

3.1.2 Mörtel

3.1.2.1 Ausgangsstoffe und Mischungszusammensetzungen

Die Referenzmischung der Mörtelversuche hatte einen Zementgehalt von 450 kg/m³ und einen W/B-Wert von 0,52 (siehe Tabelle 5). Die Gesteinskörnung wurde aus 5 Kornfraktionen zusammengesetzt und das Größtkorn betrug 5 mm. Für die Mischungen dieser Versuchsreihe wird dennoch der Begriff „Mörtel“ verwendet. Die Konsistenz der Mischungen wurde mit Fließmittel (FM) angepasst, sodass mit dem Haegermann-Trichter [149] ein Ausbreitmaß von ca. 240 mm erreicht wurde. Der hohe Feinanteil der Rezeptur ergab sich aufgrund der gewünschten Vergleichbarkeit mit den Spritzmörtelversuchen (siehe Kapitel 3.1.3 und 4.1.2). Beim Spritzmörtel waren die hohen Feinanteile erforderlich, um den Mörtel durch die zur Verfügung stehende Mörtelpumpe fördern zu können.

Tabelle 5: Referenzrezeptur - Mörtel

		Dichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement	CEM I 52,5 N	3,1	450	145
Wasser		1,0	234	234
Quarzmehl		2,7	150	57
Quarzsand	Quarz 0/5	2,7	1455	549
Luftgehalt		---	---	15
Fließmittel	FM_A	1,1	2	---
Gesamt			2289	1000

In weiteren Versuchen wurden folgende Einflussfaktoren auf das Versinterungspotential der Mörtelmischungen untersucht:

- Variationen im Prüfablauf zur Beurteilung des Versinterungspotentials nach dem Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials“ [3] (siehe auch Kapitel 3.1.2.3) (Vorlagerung der Würfel, Labortemperatur, Art der Behälter für die Auslaugversuche, Bewegung des Eluens/Eluats, Leitfähigkeit des Eluens)
- Probenalter (56 d, 365 d)

- Verdünnungseffekte (Substitution des Klinkers im Bindemittel mit unterschiedlichen Anteilen an Quarzmehl)
- W/B-Werte (Wasser- und Bindemittelgehalte)
- Bindemittelkombinationen (Substitution des Klinkers durch Flugasche, Hüttensand_A, AHWZ, Metakaolin_A und Metakaolin_B)

Die entsprechenden Rezepturzusammensetzungen sind zur besseren Übersicht bei den Ergebnissen in Kapitel 4.1.1 mit angeführt, detaillierte Angaben zu den Ausgangsstoffen siehe Anhang A.1.

3.1.2.2 Herstellung

Für die Mörtelversuche wurden alle Mischungen in einem Zwangsmischer mit einem maximalen Füllvolumen von ca. 25 l gemischt, das Einwaagevolumen pro Mischung betrug 10 l. Die Mischzeiten und Reihenfolge der Zugabe der Ausgangsstoffe sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Mischregime - Mörtel

	Dauer [s]
Trockenmischen Bindemittel und Sand	60
Wasserzugabe	60
Fließmittelzugabe	30
Mischen	60

Für die Gewinnung der Probekörper zur Beurteilung des Versinterungspotentials der Mörtelmischungen wurden Würfelformen mit einer Kantenlänge von 150 mm in zwei Lagen gefüllt und mit dem Rütteltisch verdichtet. Die Würfel wurden nach einem Tag ausgeschalt und bis zum Prüfaller von 56 d vakuumverpackt in Plastiksäcken gelagert.

3.1.2.3 Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Das Auslaugverhalten der Mörtelmischungen wurde nach dem Verfahren gemäß Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials von Spritzbeton“ [3] beurteilt.

Für den Versuch wurden aus einem Würfel zwei oder drei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 50 mm unmittelbar vor Beginn des Auslaugversuchs gebohrt (Herstellung und Vorlagerung der Würfel siehe Kapitel 3.1.2.2). Innerhalb einer Stunde nach dem Bohren wurden die Kerne auf eine Länge von 100 mm geschnitten. Im Anschluss wurden sie unter fließendem Wasser von anhaftendem Bohrmehl befreit. Die Probekörper wurden mit einem weichen, saugfähigen Tuch abgewischt, um das Oberflächenwasser zu entfernen. Die Abmessungen und das Gewicht der Probekörper wurden vor dem Versuchsbeginn notiert. Im direkten Anschluss an die Probengewinnung (maximal drei Stunden nach der Bohrkernentnahme) wurde mit dem Auslaugversuch begonnen.

Die Probekörper wurden in getrennte Behälter mit entionisiertem Wasser gelegt. Das Eluens betrug die vierfache Masse der Probekörper. Bei der Einlagerung waren die Probekörper allseitig durch das Eluens bedeckt und der verbleibende Luftraum in den geschlossenen Behältern war kleiner als 1000 ml. Der Auslaugversuch wurde in drei Zyklen durchgeführt:

- 1. Zyklus: 24 h ± 1 h eingelagert
- 2. Zyklus: 48 h ± 2 h eingelagert
- 3. Zyklus: 120 h ± 4 h eingelagert

Die Probekörper wurden nach jedem Zyklus aus dem Eluens entnommen, dabei durfte ein etwaiger Bodensatz nicht aufgewirbelt werden. Das Eluens wurde abgegossen und eine Restmenge von 100 ml im Behälter wurde entsorgt. Der Behälter wurde vor jedem Auslaugzyklus gespült und mit einem Tuch ausgewischt. Anschließend wurde der Probekörper in frisches entionisiertes Wasser für den nächsten Zyklus eingelagert. Am abgegossenen Eluens wurden die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert bestimmt. Bevor mit der Bestimmung des Calciumgehaltes begonnen werden konnte, musste die Probe auf einen pH-Wert zwischen 3 - 4 angesäuert werden. Der RV-Wert ergibt sich aus der Summe der Calciumfreisetzung der drei Zyklen und wird als Mittelwert der Ergebnisse zweier oder, teilweise abweichend vom Merkblatt, dreier Probekörper gebildet. Für den RV-Wert wird der Calciumgehalt in kg Ca/t Spritzbeton umgerechnet (Ca^{2+} in mg/l x 4 Liter / 1000).

3.1.3 Spritzmörtel

3.1.3.1 Ausgangsstoffe, Zusammensetzung

Die Ausgangsstoffe der Spritzmörtelversuche waren nahezu gleich den Ausgangsstoffen der Mörtelversuche mit Ausnahme des Fließmittels und des Beschleunigers. Somit war es möglich den Einfluss des Beschleunigers und des Spritzverfahrens auf die Ergebnisse des Versinterungspotentials zu untersuchen. In Tabelle 7 ist die Referenzrezeptur des Spritzmörtels aufgelistet.

Tabelle 7: Referenzrezeptur - Spritzmörtel

		Dichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement	CEM I 52,5 N	3,1	450	145
Wasser		1,0	234	234
Quarzmehl		2,7	150	57
Quarzsand	Quarz 0/5	2,7	1363	514
Luftgehalt		---	---	50
Fließmittel	FM_B	1,1	n.b.	---
Gesamt			2197	1000

Folgende Parameter der Mischungszusammensetzung wurden bei den Spritzmörtelversuchen variiert:

- Beschleunigertyp
- Beschleunigergehalt
- Bindemittelkombinationen (Substitution des Klinkers mit Flugasche und Hüttensand_A)

Die entsprechenden Rezepturen sind bei den Ergebnissen in Kapitel 4.1.2 mit aufgeführt, detaillierte Angaben zu den Ausgangsstoffen siehe Anhang A.1.

3.1.3.2 Herstellung

Für die Spritzmörtelversuche wurde eine handelsübliche Putzmaschine umgebaut. Sie besteht aus einer Schneckenpumpe mit einer Mörtelförderleistung von 45 l/min. Die Förderung erfolgte im Dichtstrom bis zur Düse, der flüssige Beschleuniger wurde über eine weitere Schneckenpumpe zudosiert und der Förderstrom mit Druckluft aufgerissen (siehe Abbildung 39). Der Förderschlauch hatte eine Nennweite von 35 mm und eine Länge von 10 m. Der Luftdruck betrug 5 bar.

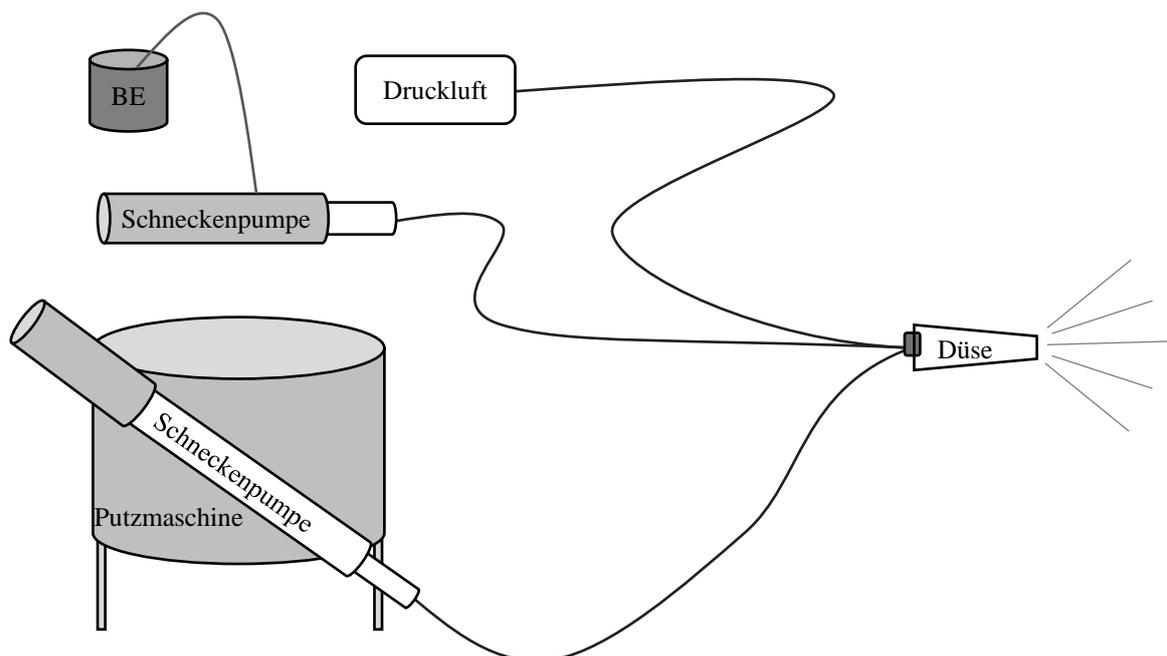


Abbildung 39: Systemskizze Spritzmörtelversuche

Für die Gewinnung von Probekörpern zur Beurteilung des Versinterungspotentials wurden Spritzkisten hergestellt. Nach 21 d wurden aus den Spritzkisten Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm gezogen und feucht gelagert (> 95 % RF und 15 °C bis 22 °C).

3.1.3.3 Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Im Alter von 56 d nach Herstellung der Spritzkisten wurden aus den Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm die Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm für den Auslaugversuch nach [3] gebohrt. Die weitere Versuchsdurchführung erfolgte analog der Beschreibung in Kapitel 3.1.2.3.

3.1.4 Spritzbeton

3.1.4.1 Ausgangsstoffe, Zusammensetzung

Allgemeines

Es wurden zwei Versuchsserien mit Spritzbeton durchgeführt. Die Mischungszusammensetzungen der Versuchsserie_A waren angelehnt an die Rezepturen der Mörtel- und Spritzmörtelversuche und es wurden weitestgehend gleiche Ausgangsstoffe verwendet. Versuchsserie_B wurde unter praxisnahen Bedingungen hergestellt. Es wurden andere Ausgangsstoffe als bei den Mörtel- und Spritzmörtelversuchen verwendet.

Versuchsserie_A

Als Referenzmischung wurde eine für Baustellen übliche Rezepturzusammensetzung ausgewählt (siehe Tabelle 8). Es wurden der gleiche Zement und die gleichen Zusatzstoffe verwendet, die bereits bei den Mörtel- und Spritzmörtelversuchen (siehe Kapitel 3.1.2 und Kapitel 3.1.3) eingesetzt wurde. Bei der Gesteinskörnung handelte es sich um den im Transportbetonwerk vorhanden Sand 0/4 und Kies 4/8.

Tabelle 8: Referenzrezeptur Versuchsserie_A - Spritzbeton

		Dichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement	CEM I 52,5 N	3,1	380	123
Zusatzstoff	AHWZ	2,7	40	15
Wasser		1,0	190	190
GK 0/4		2,7	1227	451
GK 4/8		2,7	524	193
Luftgehalt		---	---	30
Fließmittel	FM_B	1,1	3	---
Gesamt			2364	1000

In weiteren Versuchen wurde die Zusammensetzung des Bindemittels variiert, um den Einfluss auf das Versinterungspotential von Spritzbeton zu untersuchen. Anstelle eines Anteils von 10 M.-% AHWZ am Gesamtbindemittel wie bei der Referenzrezeptur (siehe Tabelle 8), enthielten diese Mischungen 33 M.-% Hüttensand_A, 33 M.-% AHWZ oder eine Kombination

aus 23 M.-% Hüttensand_A und 10 M.-% Metakaolin_A. Die entsprechenden Rezepturzusammensetzungen sind bei den Ergebnissen in Kapitel 4.1.3.1 mit aufgeführt, detaillierte Angaben zu den Ausgangsstoffen siehe Anhang A.1.

Versuchsreihe_B

Die Referenzrezeptur der Versuchsreihe_B wurde auf Grundlage von Erkenntnissen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Spritzbeton im Rahmen des Forschungsprojektes „ASSpC - Advanced and Sustainable Sprayed Concrete“ [145, 159] ausgewählt (siehe Tabelle 9). Es wurde ein neu entwickeltes Bindemittel mit folgender Zusammensetzung eingesetzt: 66 M.-% CEM I, 19 M.-% Hüttensand_B, 8 M.-% Metakaolin_C, 7 M.-% Feinstkalzit (Normbezeichnung: CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N). Die Zusammensetzung des Bindemittels wurde nach dem Prinzip der optimierten Packungsdichte (siehe Kapitel 2.3.4.2) entwickelt. Es wurde speziell für die Großspritzversuche von einem österreichischen Zementproduzenten gemahlen und gemischt. Der Portlandhüttenzement CEM II/A-S 42,5 R wurde im Zementwerk gemahlen und zwischengelagert. Im Anschluss wurden im werkseigenen Mischwerk die beiden Zusatzstoffe Metakaolin_C und Feinstkalzit mit dem Zement vermischt.

Tabelle 9: Referenzrezeptur Versuchsreihe_B - Spritzbeton

		Dichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement	CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N	3,0	398	131
Wasser		1,0	197	197
GK 0/4	dolomitisch	2,8	1370	483
GK 4/8	dolomitisch	2,8	441	155
Luftgehalt		---	---	32
Fließmittel	FM_D	1,1	2	2
Gesamt			2408	1000

Folgende Parameter der Mischungszusammensetzung wurden im Vergleich zur Referenzmischung variiert und untersucht:

- Leimvolumen (Reduzierung des Mehlkorn- und Wassergehalts, Erhöhung des Luftgehalts durch Zugabe von Luftporenmittel)
- Luftgehalt (Erhöhung des Luftgehalts durch Zugabe von Luftporenmittel)
- W/B-Wert (Erhöhung des Wasser/Bindemittel-Wertes)
- Konsistenz (verringerte Fließmittelzugabe und geringeres Ausbreitmaß)
- Gesteinskörnung 0/4 (Austausch der dolomitischen Gesteinskörnung 0/4 durch silikatische Gesteinskörnung 0/4)

Außerdem wurde zum Vergleich, der hinsichtlich Dauerhaftigkeit optimierten Rezeptur, eine bereits in Großtunnelprojekten eingesetzte Betonrezeptur (Mischung B9) mit einem CEM I 42,5 R SR0 gespritzt (Rezeptur siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Rezeptur Baustellenmischung (B9) Versuchsserie_B - Spritzbeton

		Dichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement	CEM I 42,5 R SR0	3,3	423	130
Wasser		1,0	205	205
GK 0/4	dolomitisch	2,8	1376	485
GK 4/8	dolomitisch	2,8	444	156
Luftgehalt		---	---	19
Fließmittel	FM_E	1,1	5	5
Luftporenbildner	LP_C	1,0	0,6	---
Stabilisierer	ST_A	1,1	1,7	---
Gesamt			2454	1000

Die entsprechenden Rezepturen sind bei den Ergebnissen in Kapitel 4.1.3.2 mit aufgeführt, eine ausführliche Beschreibung der Ausgangsstoffe befindet sich in Anhang A.1.

In Tabelle 11 sind die Kurzbezeichnungen der Spritzbetonrezepturen der Versuchsserie B und die charakteristischen Variationen im Vergleich zur Referenz enthalten.

Tabelle 11: Versuchsbezeichnung und charakteristische Kurzbeschreibung der Rezepturen der Versuchsserie_B - Spritzbeton

V.Nr.	Beschreibung
B2	Referenz
B3	Leimvolumen (Volumen Mehlkorn und Wasser verringert, Luft erhöht)
B4	W/B erhöht
B5	Leimvolumen (Volumen Mehlkorn und Wasser verringert, Luft erhöht) (ohne Wasser nachdosiert)
B5W	Leimvolumen (Volumen Mehlkorn und Wasser verringert, Luft erhöht) (mit Wasser nachdosiert)
B6	Referenz mit erhöhter Luft
B7	Ausbreitmaß verringert
B8	Silikatische Gesteinskörnung 0/4
B9	Baustellenmischung

3.1.4.2 Herstellung

Versuchsserie_A

Die Spritzversuche der Versuchsserie_A wurden durchgeführt, um die Erkenntnisse der Mörtel- und Spritzmörtelversuche auf Spritzbeton zu übertragen. Die Frischbetonmischungen wurden im Transportbetonwerk mit einem Ringtellermischer gemischt (1 - 2 m³ je Rezeptur). Die Dosierung der Zusatzstoffe erfolgte händisch. Die weiteren Ausgangsstoffe Zement, Gesteinskörnung und Wasser wurden über die automatische Steuerung der Transportbetonanlage in den Mischer gegeben.

Für die Spritzversuche wurde eine Doppelkolbenpumpe vom Typ Putzmeister P715 eingesetzt, die Dosierung des Beschleunigers erfolgte separat über eine Schneckenpumpe (siehe Abbildung 40). Die Düse wurde manuell geführt.

Für die Gewinnung von Probekörpern zur Beurteilung des Versinterungspotentials wurden Spritzkisten hergestellt. Nach 21 d wurden aus den Spritzkisten Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm entnommen und feucht gelagert (> 95 % RF und 15 °C bis 22 °C).

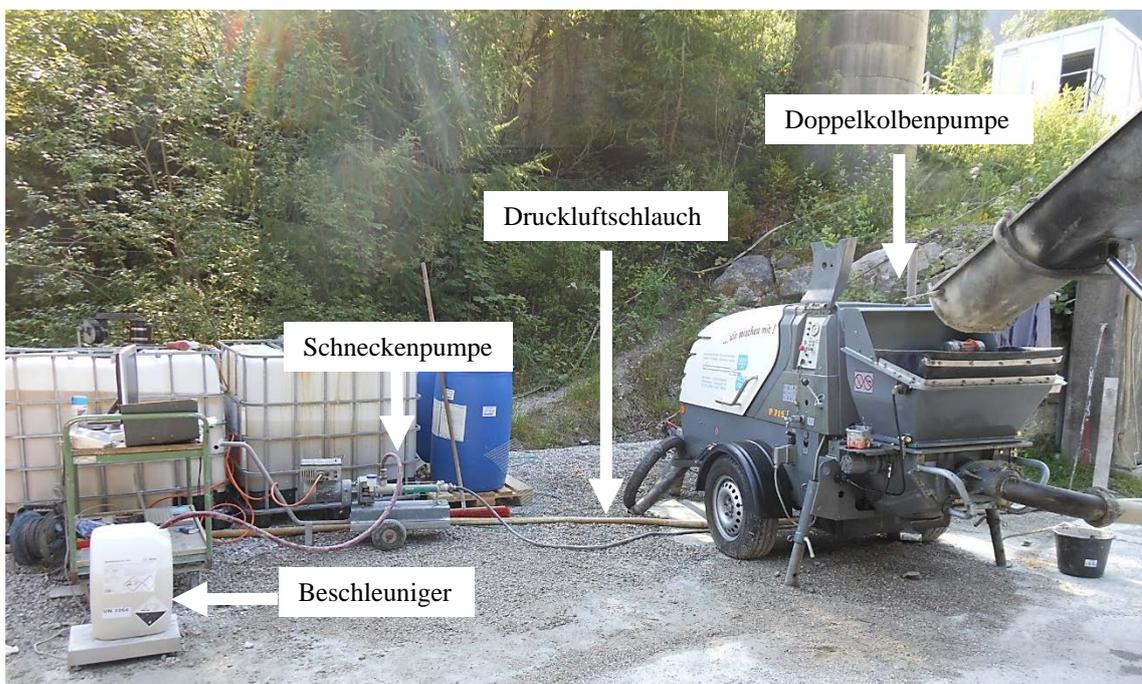


Abbildung 40: Versuchsaufbau Spritzversuche

Versuchsserie_B

Die Versuche der Versuchsserie_B fanden in einem Versuchsstollen unter möglichst praxisnahen Bedingungen statt. Alle Mischungen wurden mit dem im Transportbetonwerk vorhandenen Doppelwellenmischer gemischt (2,5 - 3 m³ je Rezeptur). Als mobile Spritzbetonmaschine wurde eine Sika - PM500 eingesetzt (siehe Abbildung 41).



Abbildung 41: Mobile Spritzbetonmaschine vor Versuchsstollen

Vor jedem Spritzvorgang wurden die Frischbetoneigenschaften der Grundmischung geprüft. Anschließend wurden Spritzkisten hergestellt. Die Spritzkisten hatten eine Grundfläche von 35 cm x 39 cm. Eine Seitenwand der Länge 35 cm war abgeschrägt und eine nach unten offen. Die Höhe der Spritzkisten betrug 15 cm. Aus den Spritzkisten wurden bereits nach 1 d bzw. nach 2 d Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm entnommen und feucht gelagert (> 95 % RF und 18 °C bis 22 °C).

3.1.4.3 Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Im Alter von 55 d bzw. 57 d nach Herstellung der Spritzkisten wurden aus den Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm die Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm für den Auslaugversuch nach [3] gebohrt. Die Probengewinnung und Versuchsdurchführung zur Beurteilung des Versinterungspotentials des Spritzbetons erfolgte analog der Beschreibung in Kapitel 3.1.2.3.

3.2 Verarbeitbarkeit

3.2.1 Methodische Vorgehensweise

Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit und die Auswahl geeigneter Versuchsparameter zur Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen wurden zwei Versuchsreihen entwickelt. Zum einen wurden systematische Versuche mit Frischbeton im Labormaßstab durchgeführt (siehe Kapitel 3.2.2, Bezeichnung für diese Mischungen ist „Frischbeton“). Zum anderen wurden, auf diesen Erkenntnissen aufbauend, Frischbetonmischungen für Pumpversuche mit einer mobilen Spritzbetonmaschine im Rahmen eines Großspritzversuches ausgewählt (siehe Kapitel 3.2.3, die Bezeichnung dieser Mischungen ist „Frischbetonmischung“). Bei den Versuchen im Labormaßstab wurden die Frischbetoneigenschaften einer großen Anzahl unterschiedlicher Mischungszusammensetzungen untersucht, um Erkenntnisse zu den Einflussfaktoren auf die Pumpbarkeit zu gewinnen. Das Ziel der Pumpversuche mit der Spritzbetonmaschine war es, die im Labor gewonnenen Erkenntnisse unter Praxisbedingungen an einer kleineren Versuchsanzahl zu bestätigen und die Eignung der Prüfmethode zur Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen zu verifizieren.

3.2.2 Frischbeton

3.2.2.1 Ausgangsstoffe und Zusammensetzung

Für die Frischbetonversuche im Labor wurde die in Tabelle 12 aufgeführte Referenzrezeptur gewählt.

Tabelle 12: Referenzrezeptur - Frischbeton

		Dichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Bindemittel	CEM I 52,5 N SR0	3,3	428	131
Wasser		1,0	214	214
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	2,7	1655	625
Luftgehalt		---	---	30
Gesamt			2297	1000

Für die Laborversuche wurde quarzitisches Gesteinskörnung verwendet (siehe Abbildung 42). Die Sieblinie entspricht den Anforderungen der Richtlinie „Spritzbeton“ [2] und wurde aus 7 Kornfraktionen mit einem Größtkorn von 8 mm zusammengestellt.

a)



b)



Abbildung 42: Quarzitischer Sand a) Kornfraktion 0,1-0,5 mm b) Kornfraktion 3-5 mm

Sofern nicht anders beschrieben wurden alle Laborversuche mit Frischbeton mit einem CEM I 52,5 N SR0 durchgeführt, weitere Angaben zu den Ausgangsstoffe siehe Anhang A.1. Die Rezepturen der Versuchsvariationen sind in den entsprechenden Abschnitten in Kapitel 4.2.1 in Volumenanteilen angegeben, weil für die Verarbeitung vor allem die volumetrische Mischungszusammensetzung von Bedeutung ist. Im Anhang A.2.1 sind die Rezepturen in Masse angegeben.

3.2.2.2 Herstellung

Die Labormischungen wurden mit einem Eimermischer mit einem Nutzvolumen von ca. 10 l gemischt. In Tabelle 13 sind die Mischreihenfolge der Ausgangsstoffe und die Mischdauer aufgeführt.

Tabelle 13: Mischregime - Frischbeton

	Dauer [s]
Trockenmischen Bindemittel und Gesteinskörnung	60
Wasserszugabe	60
Fließmittelzugabe	30
Mischen	60

3.2.2.3 Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Ausbreitmaß

Die Prüfung erfolgte nach DIN EN 12350-5 [160] ca. 10 Minuten nach der Wasserszugabe beim Mischen, sofern nicht anders beschrieben.

Luftgehalt

Die Prüfung erfolgte nach DIN EN 12350-7 [161] mit dem Druckausgleichsverfahren ca. 10 Minuten nach der Wasserzugabe beim Mischen, sofern nicht anders beschrieben.

Trichterauslaufzeit

Die Prüfung erfolgte nach DIN EN 12350-9 [162] ca. 10 Minuten nach der Wasserzugabe beim Mischen, sofern nicht anders beschrieben.

Filterpresse

Für die Beurteilung der Stabilität der Frischbetonmischungen wurde die Betonfilterpresse nach dem Merkblatt „Weiche Betone“ [113] verwendet. Der Prüfbeginn erfolgte ca. 15 Minuten nach der Wasserzugabe beim Mischen, sofern nicht anders beschrieben. Das Verfahren wurde entwickelt, um Betone mit einem Ausbreitmaß ≥ 560 mm in Stabilitätsklassen einteilen zu können. Die Stabilität der Mischungen wird über die Menge an Filtratwasser (FW), die unter Druck abgegeben wird, definiert. Ein Behälter mit einem Volumen von 10 l wurde in zwei Lagen mit Frischbeton gefüllt und mit einem Druck von 3 bar beaufschlagt (siehe Abbildung 43).

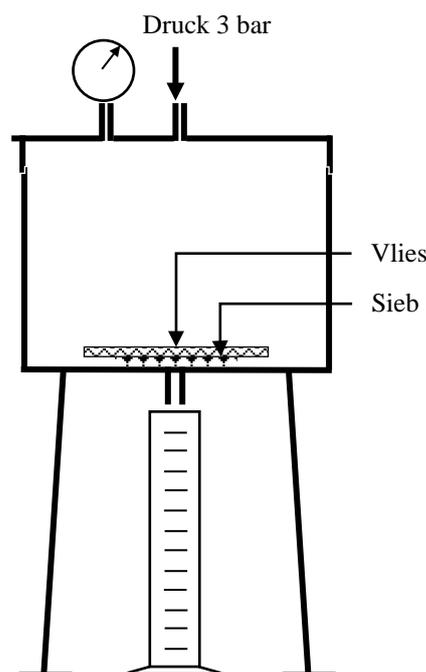


Abbildung 43: Schemaskizze Filterpresse in Anlehnung an [113]

Über eine Austrittsöffnung am Boden des Behälters wurde das Filtratwasser aufgefangen und nach 15 min und 60 min gemessen. Das Ergebnis der Blutwassermenge bzw. der Filtratwassermenge wird in kg/m^3 angegeben.

$$\text{Bluten/Filtratwasser} [\text{kg/m}^3] = \frac{\text{Wasserabgabe} [\text{ml}] \cdot 1000}{\text{Gefäßvolumen} [\text{cm}^3]} \quad (14)$$

Gleitrohr-Rheometer

Die Prüfung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons wurde mit dem Gleitrohr-Rheometer „Sliper“ ca. 15 Minuten nach der Wasserzugabe beim Mischen durchgeführt, sofern nicht anders beschrieben. Das Gleitrohr-Rheometer besteht aus einem aufgeständerten Kolben mit einem vertikal stehenden Rohr, das mit ca. 6 l Frischbeton befüllt wurde (siehe Abbildung 44). Am Kopfteil des Kolbens befindet sich ein Drucksensor. Für die Messung wurde das Rohr mithilfe von zwei Handgriffen in die obere Position gebracht und arretiert. Nach Lösen der Arretierung glitt das Rohr aufgrund der Schwerkraft nach unten und es wurden sowohl der Druck mithilfe eines Drucksensors als auch die Geschwindigkeit des Rohres mithilfe eines Wegsensors aufgezeichnet. Dieser Vorgang entspricht einem Hub. Eine Messung bestand aus mehreren Hüben (ca. 15). Die Hübe wurden bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Drücken durchgeführt, indem außen am Rohr zusätzliche Gewichte angebracht wurden. Die Messdaten wurden automatisch auf ein Smartphone übertragen und grafisch dargestellt. Über den Zusammenhang zwischen Druck und Geschwindigkeit wurde die Prognose über den Förderdruck und den Fließgrenzparameter „Beiwert a“ bzw. den Viskositätsparameter „Beiwert b“ berechnet (weitere Hintergründe und Erläuterungen zum Prüfverfahren siehe Kapitel 2.3.3.3).

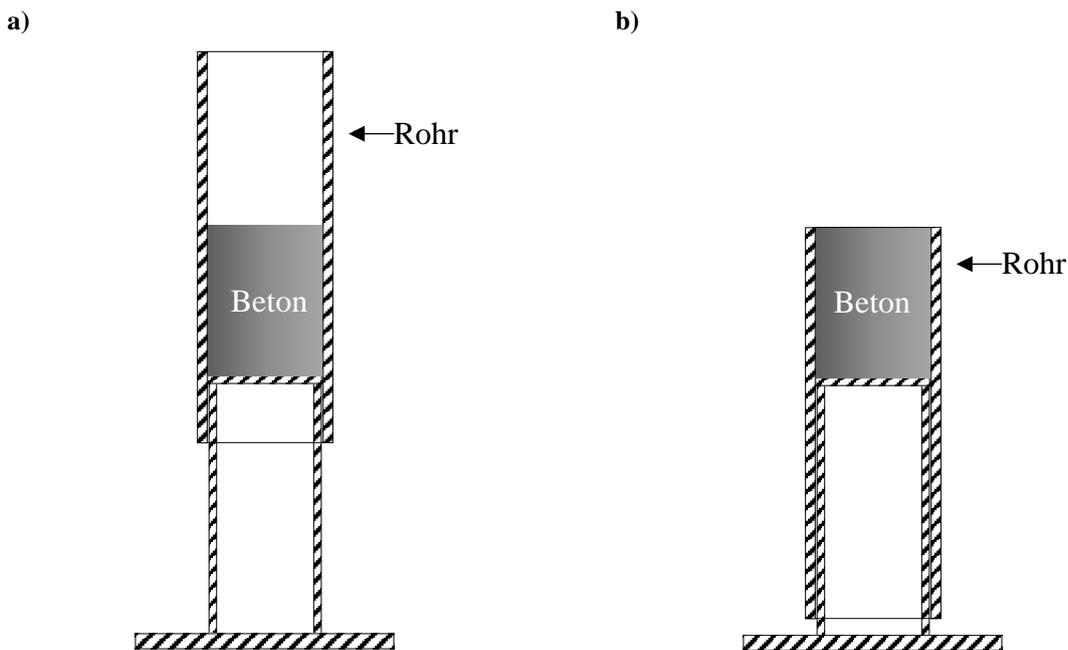


Abbildung 44: Messvorgang Gleitrohr-Rheometer a) Position des Rohres zu Beginn des Messvorgangs oben b) Position des Rohres nach Durchführung eines Hubes unten

3.2.3 Frischbetonmischung

3.2.3.1 Ausgangsstoffe und Zusammensetzung

Die Beschreibung der Ausgangsstoffe und der Mischungszusammensetzung ist in Kapitel 3.1.4.1, im Abschnitt „Versuchsserie_B“ enthalten.

3.2.3.2 Herstellung

Die Herstellung der Frischbetonmischungen wird in Kapitel 3.1.4.2, Abschnitt „Versuchsserie_B“ beschrieben.

3.2.3.3 Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung für die Prüfung des Ausbreitmaßes, des Luftgehalts und der Trichterauslaufzeit sowie die Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer und der Filterpresse erfolgten analog Kapitel 3.2.2.3. An der mobilen Spritzbetonmaschine wurde der Hydraulikdruck der Doppelkolbenpumpe während des Pump- und Spritzvorgangs manuell abgelesen, um die Pumpbarkeit der Frischbetonmischungen messtechnisch zu beurteilen. Die Prüfzeitpunkte und alle Prüfergebnisse, sofern nicht in Kapitel 4.2 aufgeführt, sind in Anhang A.3.2 enthalten.

3.3 Festigkeit

3.3.1 Methodische Vorgehensweise

Die Frühfestigkeit des Jungen Spritzbetons und die Festigkeit des Spritzbetons konnte nur an Spritzbetonprobekörpern geprüft werden, die im Rahmen von Spritzversuchen hergestellt wurden (siehe Kapitel 3.1.4.1 und 3.1.4.2).

3.3.2 Junger Spritzbeton und Spritzbeton

3.3.2.1 Ausgangsstoffe und Zusammensetzung

Die Beschreibung der Ausgangsstoffe und der Mischungszusammensetzung ist in Kapitel 3.1.4.1 enthalten.

3.3.2.2 Herstellung

Die Herstellung erfolgte analog Kapitel 3.1.4.2. Für die Prüfung der Frühfestigkeit des jungen Spritzbetons und für die Gewinnung von Probekörpern zur Prüfung der Druckfestigkeit des Spritzbetons wurden Spritzkisten hergestellt.

3.3.2.3 Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Die Prüfung der Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons erfolgte nach der Richtlinie „Spritzbeton“ [2] mit dem Penetrationsnadelverfahren und dem Setzbolzenverfahren an Spritzkisten.

Für die Prüfung der Druckfestigkeit des Spritzbetons wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm aus Spritzkisten entnommen, auf eine Länge von 100 mm geschnitten und geschliffen. Die Bohrkern wurden bis zum Prüfalter von 28 d unter Wasser gelagert und die Prüfung erfolgte nach [2].

4 Eigene Ergebnisse und Diskussion

4.1 Versinterungspotential von Mörtel, Spritzmörtel und Spritzbeton

4.1.1 Mörtel

4.1.1.1 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit der Auslaugversuche wurde anhand der Ergebnisse von Mörtelproben mit der Referenzrezeptur (siehe Kapitel 3.1.2.1, Tabelle 5) ausgewertet. Der Mittelwert von 30 Probekörpern aus 12 Mischungen lag bei einem RV-Wert von 0,97 kg/t. Die Standardabweichung betrug 0,08 kg/t und der Variationskoeffizient 8,7 %.

4.1.1.2 Einflüsse auf die Prüfergebnisse

Die Versuchsreihe „Einflüsse auf die Prüfergebnisse“ sollte Aufschluss geben, welche Änderungen im Prüfablauf die Ergebnisse der Auslaugversuche zur Beurteilung des Versinterungspotentials beeinflussen. Alle in diesem Abschnitt genannten Versuche wurden mit der Referenzrezeptur der Mörtelversuche (siehe Kapitel 3.1.2.1, Tabelle 5) durchgeführt. Es wird für den Vergleich bei jeder Versuchsserie der RV-Wert von 0,97 kg/t und die Standardabweichung von 0,08 kg/t der Referenzmischung (siehe Kapitel 4.1.1.1 Reproduzierbarkeit) mit angegeben. Diese Versuche wurden unter den in Kapitel 3.1.2.3 standardmäßig festgelegten Laborbedingungen durchgeführt. Sie werden in der Versuchsbeschreibung mit dem Hinweis „Standardverfahren“ bezeichnet.

Vorlagerung Würfel

Sofern nicht anders beschrieben wurden die Würfel, aus denen im Alter von 56 d die Bohrkerne für die Auslaugversuche gewonnen wurden, vakuumverpackt in Plastiksäcken gelagert (Standardverfahren). Es wurde untersucht, ob andere Lagerungsbedingungen der Würfel einen Einfluss auf die Ergebnisse der Auslaugversuche haben. Folgende Lagerungsbedingungen wurden für den Vergleich gewählt:

- vakuumverpackt in Plastiksäcken (Standardverfahren)
- unter Wasser
- feucht bei einer relativen Luftfeuchtigkeit > 95%
- trocken an Luft

Die Ergebnisse sind in Abbildung 45 dargestellt. Es konnte kein Einfluss auf die Ergebnisse der RV-Werte durch eine Änderung der Lagerungsbedingungen der Würfel festgestellt werden. Die RV-Werte lagen zwischen 0,96 - 1,01 kg/t und damit im Bereich der Standardabweichung.

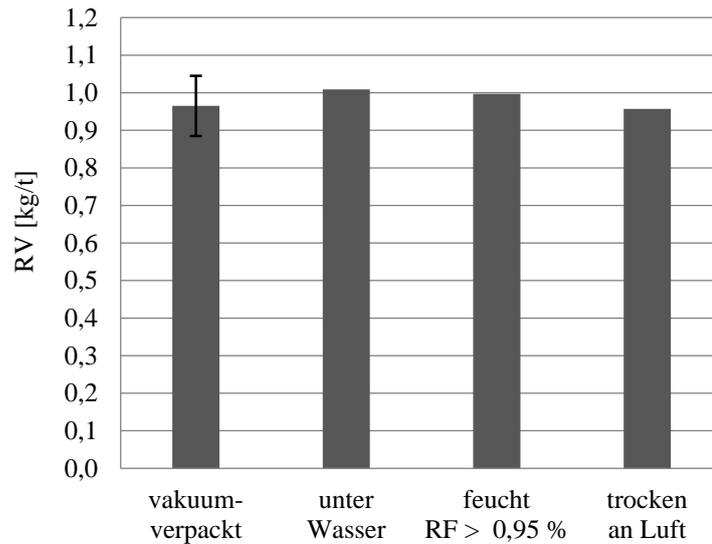


Abbildung 45: RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Lagerungsbedingungen der Würfel“ - Mörtel

Die Vorlagerung der Würfel hat somit keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Auslaugversuche. Diese Erkenntnis ist jedoch nicht auf die Lagerung der Probekörper (Bohrkerne) für die Auslaugversuche zu übertragen. Die Bohrkerne sind erst unmittelbar vor den Auslaugversuchen zu bohren und zu schneiden (siehe Kapitel 3.1.2.3).

Labortemperatur

In einer weiteren Serie wurden die Auslaugversuche bei einer Labortemperatur von 20 °C, (Standardverfahren), 17 °C und 25 °C durchgeführt. In den genannten Bereichen konnte kein eindeutiger Einfluss der Temperatur auf die Ergebnisse der Auslaugversuche festgestellt werden (siehe Abbildung 46).

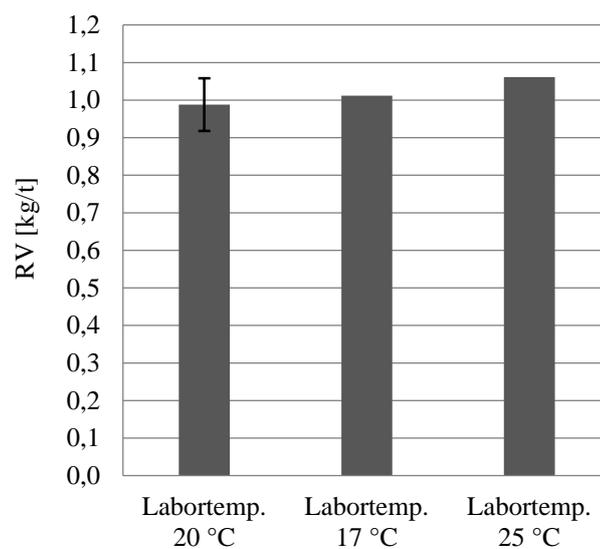


Abbildung 46: RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Labortemperatur“ - Mörtel

Die Ergebnisse von Auslaugversuchen, die bei einer Labortemperatur von 25 °C durchgeführt wurden, lagen mit einem RV-Wert von 1,06 kg/t geringfügig außerhalb der Standardabweichung der Referenzmischung, die bei einer Labortemperatur von 20°C durchgeführt wurden. Hier betrug der Mittelwert 0,97 kg/t und die Standardabweichung 0,08 kg/t.

Art der Behälter für Auslaugversuche

Als Behälter für die Einlagerung der Probekörper während der Auslaugzyklen wurden anstelle von Kunststoffbehältern aus Polypropylen (Standardverfahren) auch Glasbehälter verwendet.

Die Ergebnisse der Versuche mit Glasbehälter sind im Vergleich zum Mittelwert der Ergebnisse mit Kunststoffbehälter um 0,06 kg/t höher, jedoch liegen sie innerhalb der Standardabweichung (siehe Abbildung 47). Die Art der Behälter hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse der RV-Werte.

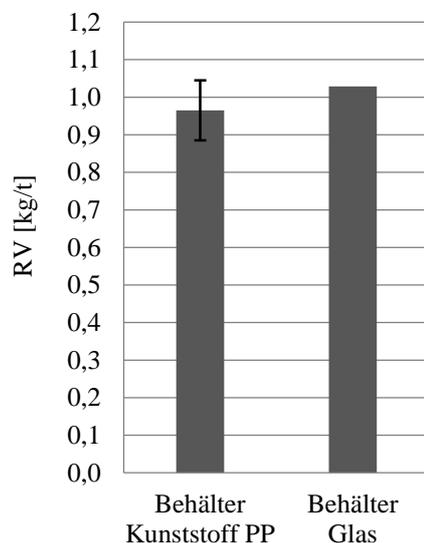


Abbildung 47: RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Art der Behälter“ - Mörtel

Bewegung des Eluens/Eluats

Es wurde untersucht, ob die Calciumauslaugung beeinflusst wird, wenn die Behälter im Labor auf kurze Distanzen vorsichtig bewegt wurden (Standardverfahren), nicht bewegt wurden oder wenn das Eluens/Eluat während der Auslaugzyklen mit einem Magnetrührer gerührt wurde („starke Bewegung“). Die Ergebnisse der RV-Werte sind in Abbildung 48 dargestellt. Bei einer starken Bewegung des Eluens/Eluats während der Auslaugung war die Calciumauslaugung um 0,15 kg/t höher als der Mittelwert beim üblichen Standardverfahren mit leichter Bewegung. Wenn keine Bewegung des Eluens/Eluats erfolgte, war der RV-Wert geringer als bei den Versuchen, die bei leichter Bewegung durchgeführt wurden. Die Bewegung des Eluens/Eluats beeinflusste die Auslaugung von Calcium und damit den RV-Wert. Insbesondere eine außergewöhnliche Bewegung des Eluens/Eluats während der Auslaugzyklen, wie im hier vorliegenden Fall mit einem Magnetrührer, ist zu vermeiden, um die Vergleichbarkeit der

Ergebnisse zu ermöglichen. Eine starke Bewegung des Eluens/Eluats während der Auslaugung führt zu höheren Auslaugraten.

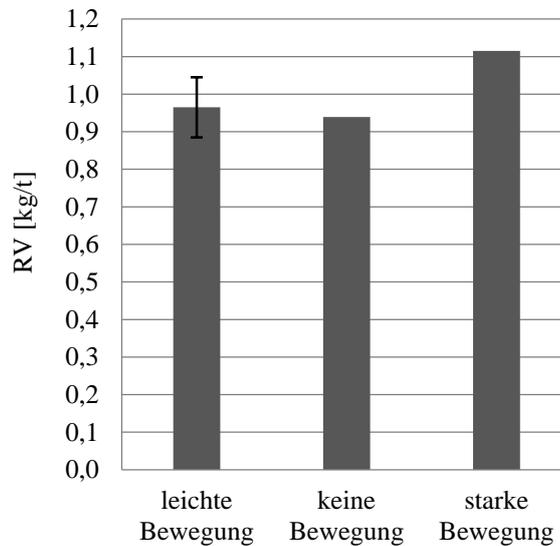


Abbildung 48: RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Bewegung des Eluens/Eluats“ - Mörtel

Leitfähigkeit des Eluens

In einer weiteren Versuchsserie wurde die Leitfähigkeit des Eluens systematisch durch die Zugabe von Leitungswasser erhöht und für die Auslaugversuche verwendet. Bei dieser Versuchsreihe konnte eine tendenzielle Zunahme der Calciumauslaugung mit steigender Leitfähigkeit des Eluens festgestellt werden (siehe Abbildung 49). Ausgehend von einem RV-Wert von 0,97 kg/t bei einer Leitfähigkeit des Eluens von 0,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Standardverfahren) stieg der RV-Wert auf 1,04 kg/t bei einer Leitfähigkeit des Eluens von 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ an.

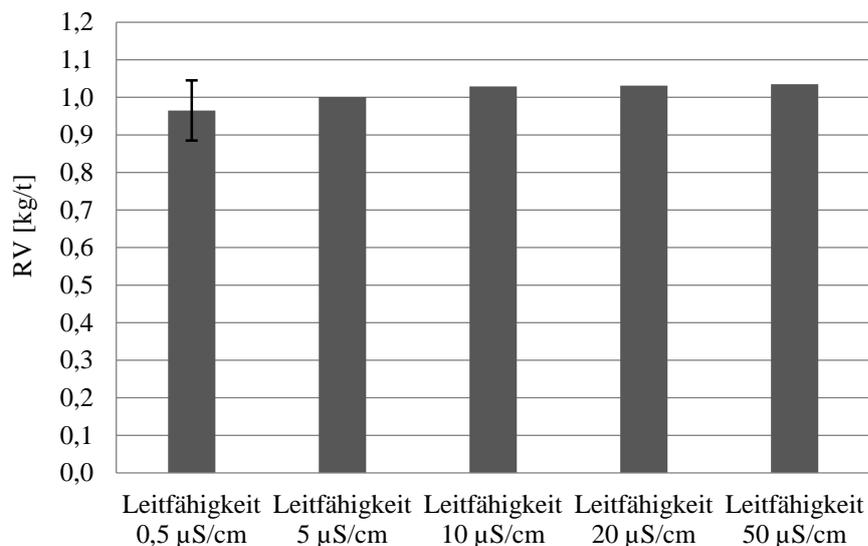


Abbildung 49: RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Leitfähigkeit des Eluens“ - Mörtel

4.1.1.3 Variation Bindemittel

Einen Großteil der Mörtelversuche umfasste die Variation mit unterschiedlichen Bindemitteln. Dazu wurde ein Teil des Zements durch puzzolanische, latent-hydraulische oder inerte Zusatzstoffe ersetzt [163–167]. In Tabelle 14 sind die Rezepturen mit einer Substitution des Klinkers von jeweils 30 M.-% Flugasche, Hüttensand_A, AHWZ oder 15 M.-% Metakaolin_A dargestellt. Bei AHWZ handelt es sich um „Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung“ nach [4].

Tabelle 14: Rezepturen der Versuchsserie „Variation Bindemittel“ - Mörtel

			CEM 450 kg/m³	30 % Flugasche	30 % Hüttensand _A	30 % AHWZ	15 % Metakaolin _A
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	450	315	315	315	383
Zusatzstoff		[kg/m ³]	---	135	135	135	68
Wasser		[kg/m ³]	234	234	234	234	234
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1455	1419	1448	1439	1444
Fließmittel	FM_A	[% v. BM]	0,5	0,5	0,4	0,4	0,9

Mischungen mit einer Substitution des Klinkers von jeweils 30 M.-% Flugasche, Hüttensand_A oder AHWZ erreichten einen RV-Wert im Bereich zwischen 0,62 - 0,65 kg/t (siehe Abbildung 50). Der RV-Wert war damit deutlich geringer als der Mittelwert der Referenzmischung (CEM 450 kg/m³) mit RV=0,97 kg/t. Mit dem verwendeten Metakaolin_A führte die Zugabe von nur 15 M.-% zu einer Reduzierung der Calciumfreisetzung um ca. 55 % im Vergleich zum Mittelwert der Referenzmischung.

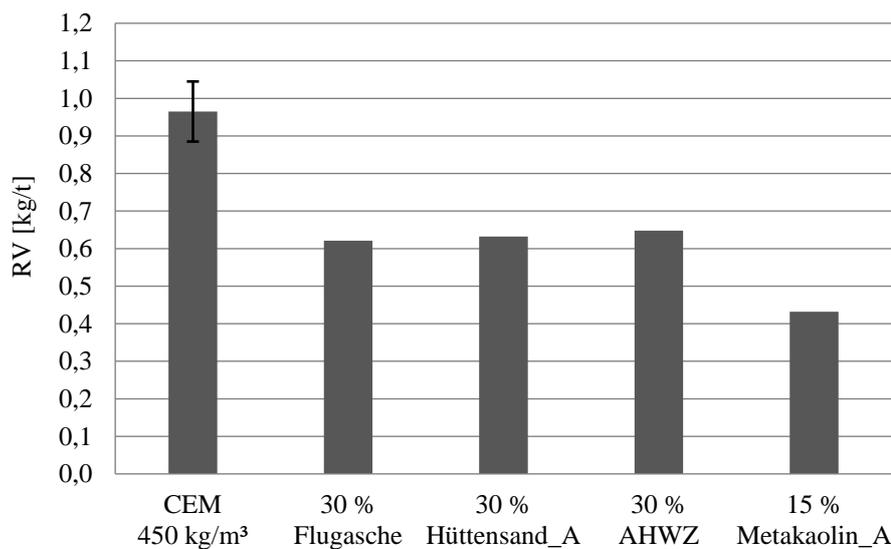


Abbildung 50: RV-Werte der Versuchsserie „Variation Bindemittel“ - Mörtel

Beim Ersatz von Klinker mit Zusatzstoffen muss berücksichtigt werden, dass aufgrund von Verdünnungseffekten der Anteil an leicht löslichem Calciumhydroxid reduziert wird und damit die Calciumauslaugung verringert wird.

Neben Verdünnungseffekten haben aber auch chemische Reaktionen einen Einfluss auf die Calciumfreisetzung. Puzzolanische Stoffe reagieren während der Hydratation mit dem Calciumhydroxid zu festigkeitsbildenden Bestandteilen. Je nach Dichtigkeit des Gefüges und Aktivität des Puzzolans können diese Effekte mehr oder weniger intensiv ausfallen. Bei dieser Versuchsreihe ist insbesondere der geringe RV-Wert der Mischung mit Metakaolin_A auffällig. Metakaolin_A hat außerdem eine im Vergleich zu den anderen Ausgangstoffen sehr hohe Feinheit. Die Blaine Werte der verwendeten Flugasche, Hüttensand_A und AHWZ lagen zwischen 2.400 - 4.300 cm²/g, Metakaolin_A hingegen hatte einen Blaine Wert von 26.000 cm²/g (siehe Anhang A.1.2, Tabelle A 5 und Tabelle A 6). Dieser hohe Wert für Metakaolin_A kann nur als Indiz für eine sehr hohe Feinheit gesehen werden, da er außerhalb der üblichen Bandbreite des Luftdurchlässigkeitsverfahrens für Zemente nach DIN EN 196-6 [168] liegt. Bei sehr feinem Material kann das Prüfverfahren ggf. keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern [168]. Die hohe Feinheit und/oder die chemische Reaktivität von Metakaolin_A führten zu einer Reduzierung der Calciumauslaugung, die über einen Verdünnungseffekt durch Substitution des Klinkers hinausging.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu beachten, dass es innerhalb der jeweiligen Produktgruppen ebenfalls Unterschiede in der Feinheit und der chemischen Reaktivität der Zusatzstoffe gibt. Am Beispiel von Mischungen mit zwei unterschiedlichen Metakaolinen (Metakaolin_A und Metakaolin_B) wird das deutlich. Bei dieser Versuchsserie wurden 5 - 15 M.-% des Klinkers im Bindemittel schrittweise durch Metakaolin substituiert. Bei den Mischungen mit Metakaolin_A oder Metakaolin_B wurden mit Ausnahme der Fließmitteldosierung die gleichen Rezepturen verwendet (siehe Tabelle 15 und Tabelle 16).

Tabelle 15: Rezepturen der Versuchsserie „Variation Bindemittel - Metakaolin_A“ - Mörtel

			CEM 450 kg/m³	5 % Metakaolin _A	7 % Metakaolin _A	10 % Metakaolin _A	15 % Metakaolin _A
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	450	428	419	405	383
Zusatzstoff		[kg/m ³]	---	23	32	45	68
Wasser		[kg/m ³]	234	234	234	234	234
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1455	1452	1450	1448	1444
Fließmittel	FM_A	[% v. BM]	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Tabelle 16: Rezepturen der Versuchsserie „Variation Bindemittel - Metakaolin_B“ - Mörtel

			CEM 450 kg/m³	5 % Metakaolin _B	7 % Metakaolin _B	10 % Metakaolin _B	15 % Metakaolin _B
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	450	428	419	405	383
Zusatzstoff		[kg/m ³]	---	23	32	45	68
Wasser		[kg/m ³]	234	234	234	234	234
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1455	1452	1450	1448	1444
Fließmittel	FM_A	[% v. BM]	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8

In Abbildung 51 sind die Ergebnisse der Auslaugversuche der Mischungen mit den zwei unterschiedlichen Metakaolinen im Vergleich zur Referenzmischung (CEM 450 kg/m³) dargestellt.

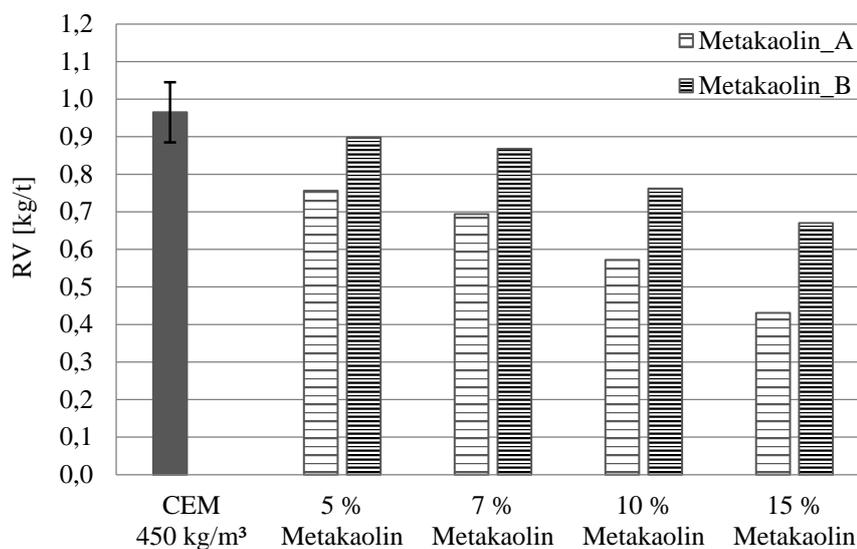


Abbildung 51: RV-Werte der Versuchsserie „Variation Bindemittel - Metakaolin“ - Mörtel

Die RV-Werte von Mischungen mit einer Substitution von 5 M.-%, 7 M.-%, 10 M.-% und 15 M.-% mit Metakaolin_A oder Metakaolin_B waren umso geringer, je geringer der Anteil an Klinker im Bindemittel war. Die RV-Werte von Mischungen mit einer Substitution des Klinkers mit Metakaolin_A sind im direkten Vergleich zu den RV-Werten der Mischungen mit Metakaolin_B bei gleicher Mischungszusammensetzung geringer. Bei einer Substitution von 15 M.-% des Klinkers mit Metakaolin beträgt der RV-Wert der Mischung mit Metakaolin_A $RV=0,43$ kg/t, der RV-Wert der Mischung mit Metakaolin_B hingegen ist um 0,24 kg/t höher. Mit Metakaolin_A konnten folglich wesentlich geringere RV-Werte erreicht werden als mit Metakaolin_B. Die RV-Werte von Mischungen mit Metakaolin_A waren um ca. 15 - 36 % geringer als mit Metakaolin_B bei gleicher Mischungszusammensetzung. Je höher der Anteil an Metakaolin im Bindemittel war, umso größer waren die Unterschiede zwischen den Mischungen. Die Feinheit von Metakaolin_A war mit einem Blaine Wert von 26.000 cm^2/g höher als von Metakaolin_B mit einem Blaine Wert von 24.000 cm^2/g (siehe Anhang A.1.2, Tabelle A 6). Jedoch sind diese hohen Werte für einen direkten Vergleich der beiden Produkte und ihre Reaktivität nur bedingt aussagekräftig (siehe Erklärung oben für Versuchsserie „Variation Bindemittel“). Inwiefern die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Metakaolinen und anderen Zusatzstoffen auf chemische Reaktionen und/oder die Feinheit zurückzuführen sind, ist Gegenstand laufender Untersuchungen im Forschungsprojekt „ASSpC - Advanced and Sustainable Sprayed Concrete“ [145, 159]. Anhand der Ergebnisse kann hier nur gezeigt werden, dass es nicht möglich ist pauschale Aussagen zur Reaktivität einzelner Produktgruppen der Zusatzstoffe und ihres Einflusses auf eine Reduzierung der Calciumauslaugung zu treffen.

4.1.1.4 Probenalter - Zeitpunkt Prüfbeginn

Der Zeitpunkt des Prüfbeginns der Auslaugversuche, und somit das Probenalter der Mischungen, beeinflusst aufgrund der fortschreitenden Hydratation die Calciumauslaugung, insbesondere bei Mischungen mit Bindemittelkombinationen aus puzzolanischen oder latent-hydraulischen Stoffen. Nach Merkblatt [3] ist der Prüfbeginn auf ein Probenalter von 56 d festgelegt. Es wurde untersucht inwiefern ein Probenalter von einem Jahr Auswirkungen auf die Ergebnisse der RV-Werte hat [164]. Die Versuche wurden mit der Referenzmischung (CEM 450 kg/m^3 , Rezeptur siehe Kapitel 3.1.2.1, Tabelle 5), Mischungen mit einer Substitution von 30 M.-% Flugasche, Hüttensand_A oder AHWZ und einer Substitution von 15 M.-% Metakaolin_A durchgeführt (Rezeptur siehe Kapitel 4.1.1.3, Tabelle 14). Mit Ausnahme der Mischung mit Flugasche sind die Werte von Mischungen mit Zusatzstoffen ähnlich den Ergebnissen von Mischungen, die 56 d nach Herstellung geprüft wurden (siehe Abbildung 52). Bei Flugasche wurde nach einem Jahr ein um 25 % geringerer RV-Wert bestimmt. Die puzzolanische Reaktion der Flugasche führte im Vergleich zu den anderen Mischungen zu einem langsameren Fortschritt der Hydratation und einer Gefügeverdichtung.

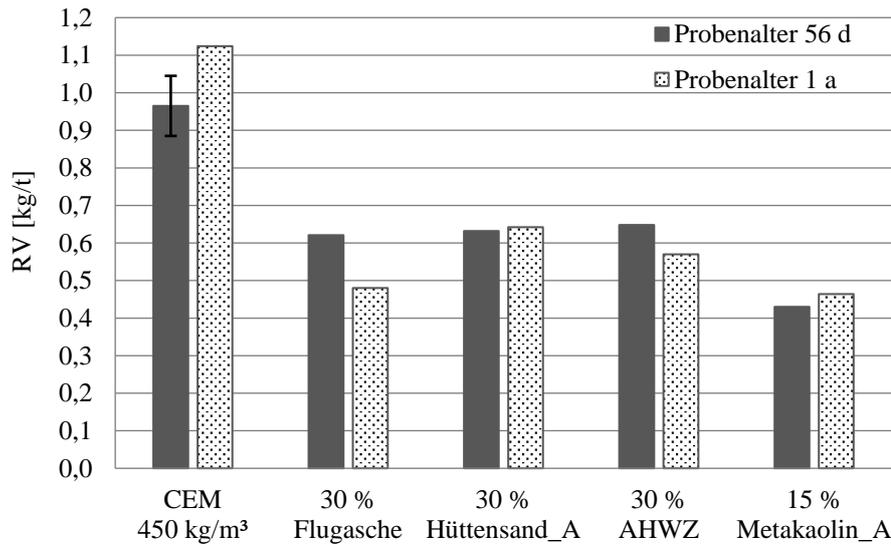


Abbildung 52: RV-Werte der Versuchsserie „Variation Bindemittel - Probenalter 56 d und 1 a“ - Mörtel

Es wird anhand der Ergebnisse deutlich, dass bei der Rezepturentwicklung und Beurteilung der Mischungen das Probenalter berücksichtigt werden muss. Der RV-Wert der Referenzmischung (CEM 450 kg/m³) ist nach einem Jahr um 16 % höher als der Mittelwert der Referenzmischung zu einem Prüfzeitpunkt von 56 d. Ein höherer RV-Wert ist im Allgemeinen auf eine höhere Menge an leicht löslichem Calciumhydroxid oder eine geringere Dichte des Gefüges zurückzuführen. Dieser Zusammenhang ist nicht eindeutig auf die Referenzmischung zu übertragen und muss nochmals untersucht werden.

4.1.1.5 Verdünnungseffekt - W/B-Wert konstant

In weiteren Versuchsserien wurde der Einfluss eines „Verdünnungseffektes“ durch Reduzierung des Klinkergehalts im Bindemittel genauer untersucht [164–167]. In der ersten Versuchsserie wurde der Klinkergehalt schrittweise von 450 kg/m³ auf 350 kg/m³ reduziert und durch ein inertes Quarzmehl ersetzt. Der W/B-Wert blieb bei allen Rezepturen konstant und der Wassergehalt wurde folglich an die verringerten Zementgehalte angepasst (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Rezepturen der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - W/B-Wert konstant“ - Mörtel

			CEM 450 kg/m ³	CEM 400 kg/m ³	CEM 350 kg/m ³
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	450	400	350
Zusatzstoff	Quarzmehl	[kg/m ³]	---	50	100
Wasser		[kg/m ³]	234	208	182
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1455	1517	1579
Fließmittel	FM_A	[% v. BM]	0,5	0,9	2,5

Die Ergebnisse belegen, dass je geringer der Klinkeranteil war, umso geringer waren die RV-Werte (siehe Abbildung 53). Eine Reduzierung des Klinkergehalts um 22 % von 450 kg/m³ auf 350 kg/m³ führte zu einer Reduzierung des RV-Wertes um ca. 45 %.

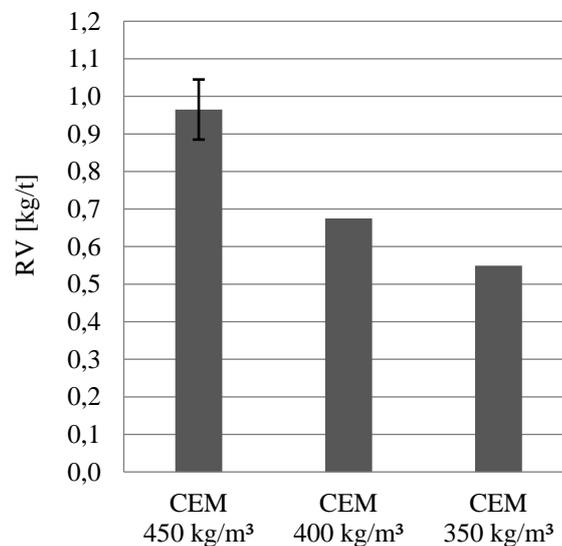


Abbildung 53: RV-Werte der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - W/B-Wert konstant“ - Mörtel

Der Anteil des Klinkers im Bindemittel beeinflusst die Bildung und den Anteil an leicht löslichem Calciumhydroxid. Je geringer der Klinkergehalt war, umso geringer war folglich die Auslaugung von Calciumhydroxid. Die Reduzierung des Versinterungspotentials ist hier auf „Verdünnungseffekte“ zurückzuführen.

4.1.1.6 Verdünnungseffekt - Wassergehalt konstant

In einer weiteren Versuchsserie wurde der Klinkergehalt von 450 kg/m³ auf 270 kg/m³ reduziert und ebenfalls durch ein inertes Quarzmehl ersetzt [165–167]. Der Wassergehalt blieb bei dieser Versuchsserie bei allen Rezepturen konstant bei 234 kg/m³ (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Rezepturen der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - Wassergehalt konstant“ - Laborversuch

			CEM 450 kg/m ³	CEM 400 kg/m ³	CEM 350 kg/m ³	CEM 270 kg/m ³
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	450	400	350	270
Zusatzstoff	Quarzmehl	[kg/m ³]	---	50	100	180
Wasser		[kg/m ³]	234	234	234	234
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1455	1448	1441	1429
Fließmittel	FM_A	[% v. BM]	0,5	0,6	0,5	0,3

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - Wassergehalt konstant“ dargestellt. Der RV-Wert der Mischung mit 400 kg/m³ war um ca. 15 % geringer als der Mittelwert der Standardmischung mit 450 kg/m³. Obwohl der Zementgehalt bei den Mischungen mit 350 kg/m³ und 270 kg/m³ Zement weiter reduziert wurde, stiegen die RV-Werte wieder an und waren nur noch um ca. 10 % und ca. 5 % geringer als der Mittelwert der Standardmischung.

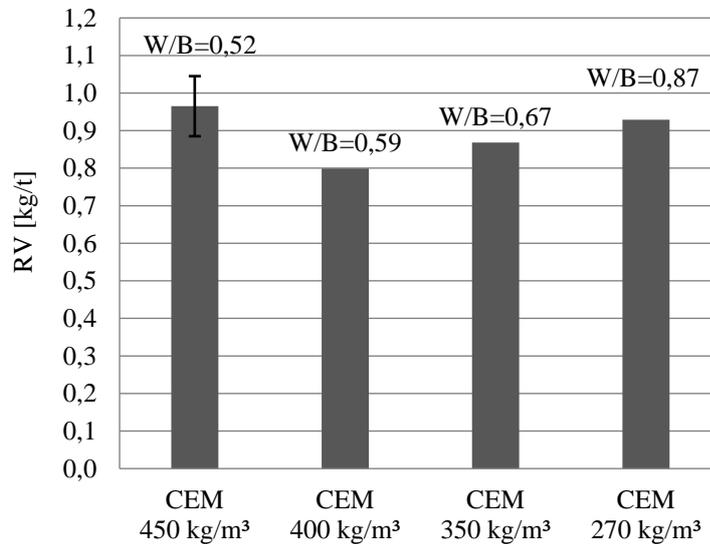


Abbildung 54: RV-Werte der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - Wassergehalt konstant“ - Mörtel

Der geringere Anteil an Klinker und damit der geringere Anteil an leicht löslichem Calciumhydroxid hatten zunächst bei der Mischung mit einem Klinkergehalt von 400 kg/m³ zu einer Reduzierung des RV-Wertes geführt. Die RV-Werte stiegen jedoch trotz einer weiteren Reduzierung des Klinkergehalts im Bindemittel wieder kontinuierlich an. Der Wassergehalt war bei allen Mischungen konstant und wurde nicht an die verringerten Klinkergehalte angepasst. Das heißt, die Mischungen mit einem verringerten Zementgehalt hatten einen höheren W/B-Wert. Bei einem Zementgehalt von 270 kg/m³ war der W/B-Wert=0,87, bei der Referenzmischung mit 450 kg/m³ war der W/B-Wert deutlich geringer mit W/B-Wert=0,52. Mit einem hohen W/B-Wert wird eine erhöhte Porosität verbunden. In dieser Versuchsserie kam es zur Überlagerung von zwei Effekten. Zum einen wurde die Calciumauslaugung durch eine Verringerung des Klinkergehalts im Bindemittel reduziert, zum anderen wurde dieser Effekt durch eine Erhöhung des W/B-Werts und damit einer geringeren Dichtigkeit des Gefüges überlagert. Eine geringe Dichtigkeit des Gefüges begünstigte die Auslaugung von leicht löslichem Calciumhydroxid und führte zu einer Erhöhung des RV-Wertes. Der Einfluss des W/B-Wertes wird im nachfolgenden Kapitel 4.1.1.7 untersucht.

4.1.1.7 W/B-Wert

In dieser Versuchsserie wurde der Einfluss des W/B-Wertes gezielt untersucht. Der W/B-Wert wurde im Bereich zwischen 0,55 und 0,40 variiert (siehe Tabelle 19) und im Gegensatz zu den

in Kapitel 4.1.1.5 und 4.1.1.6 beschriebenen Versuchen war in dieser Versuchsreihe der Zementgehalt bei allen Mischungen konstant.

Tabelle 19: Rezepturen der Versuchsserie „Variation W/B-Wert“ - Mörtel

			W/B=0,55	W/B=0,50	W/B=0,45	W/B=0,40
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	450	450	450	450
Wasser		[kg/m ³]	248	225	203	180
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1420	1479	1539	1599
Fließmittel	FM_A	[% v. BM]	0,3	0,6	1,0	2,5

Je geringer der W/B-Wert war, umso geringer war der RV-Wert und damit die Calciumfreisetzung (siehe Abbildung 55). Eine Erklärung für die niedrigeren RV-Werte ist in diesem Fall, dass die Calciumauslaugung vorwiegend über die Kapillarporen in der Zementsteinmatrix stattfindet. Wird die Porosität durch einen geringeren W/B-Wert reduziert, wird auch die Calciumfreisetzung verringert.

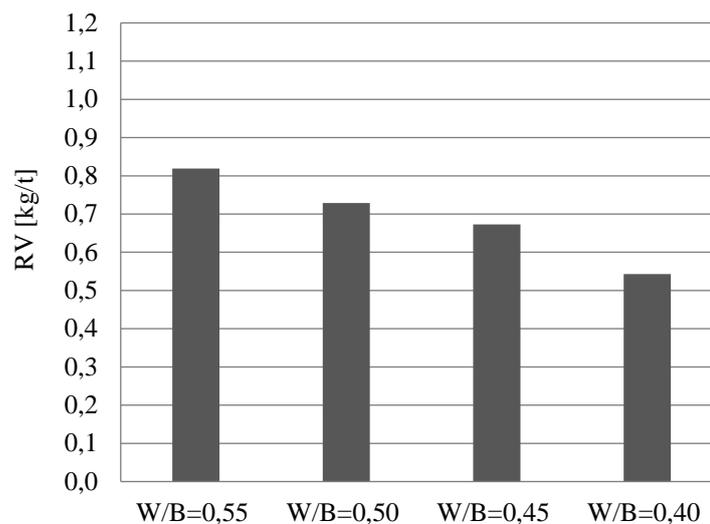


Abbildung 55: RV-Werte der Versuchsserie „Variation W/B-Wert“ - Mörtel

4.1.2 Spritzmörtel

4.1.2.1 Beschleuniger

Die Referenzrezeptur der Spritzmörtelversuche entsprach annähernd der Referenzrezeptur der Mörtelversuche mit Ausnahme des Fließmittels und des Beschleunigers (BE) (siehe Kapitel 3.1.2.1 und 3.1.3.1). Damit ist ein Vergleich der Ergebnisse der Auslaugversuche der gespritzten und der nicht gespritzten Proben möglich und es kann die Auswirkung des Beschleunigers und des Spritzverfahrens auf den RV-Wert beurteilt werden. Die Spritzmörtelversuche wurden mit unterschiedlichen alkalifreien Beschleunigerdosierungen und -typen verschiedener Hersteller mit der Referenzrezeptur durchgeführt. In Tabelle 20 sind die

entsprechenden Rezepturen von drei Mischungen mit den Beschleunigern BE_A, BE_B und BE_C aufgeführt.

Tabelle 20: Rezepturen der Versuchsserie „Beschleunigertyp“ - Spritzmörtel

			BE_A	BE_B	BE_C
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	450	450	450
Wasser		[kg/m ³]	234	234	234
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1363	1363	1363
Fließmittel	FM_B	[% v. BM]	n.b.	n.b.	n.b.
Beschleuniger		[% v. BM]	7,5 %	8,0 %	7,5 %

In Abbildung 56 sind die RV-Werte der Mörtelversuche (CEM 450 kg/m³, Rezeptur siehe Kapitel 3.1.2.1, Tabelle 5) im Vergleich zu den RV-Werten der Spritzmörtelversuche (BE_A, BE_B und BE_C, Rezeptur siehe Tabelle 20) dargestellt. Sowohl bei den Mörtel- als auch bei den Spritzmörtelmischungen wurde die jeweilige Referenzrezeptur verwendet.

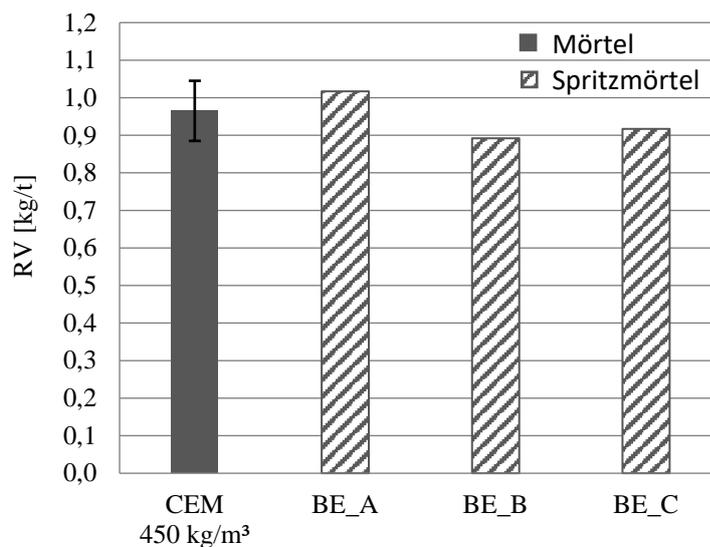


Abbildung 56: RV-Werte von Mörtelversuchen im Vergleich zu RV-Werten von Spritzmörtelversuchen der Versuchsserie „Beschleunigertyp“

Die Unterschiede der RV-Werte zwischen den Mörtel- und den Spritzmörtelversuchen sind gering, die RV-Werte liegen im Bereich zwischen 0,89 -1,02 kg/t. Die RV-Werte der drei Spritzmörtelmischungen liegen damit innerhalb der Standardabweichung der Mörtelversuche. Der Beschleuniger oder das Spritzverfahren haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Auslaugversuche.

4.1.2.2 Beschleunigergehalte

Der Einfluss des Beschleunigergehaltes auf die Ergebnisse der Auslaugversuche wurde mit drei Mischungen und drei unterschiedlichen Dosierungen eines alkalifreien Beschleunigers (BE_A) untersucht (siehe Tabelle 21) [165].

Tabelle 21: Rezepturen der Versuchsserie „Beschleunigergehalt“ - Spritzmörtel

			4,7 % BE	7,0 % BE	9,5 % BE
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	450	450	450
Wasser		[kg/m ³]	234	234	234
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1363	1363	1363
Fließmittel	FM_B	[% v. BM]	n.b.	n.b.	n.b.
Beschleuniger	BE_A	[% v. BM]	4,7 %	7,0 %	9,5 %

Die Ergebnisse der RV-Werte sind in Abbildung 57 dargestellt. Es zeigte sich keine Tendenz bei zunehmender oder abnehmender Dosierung des Beschleunigers auf die Ergebnisse der Auslaugversuche. Die Differenz der RV-Werte der drei Spritzbetone ist sehr gering, sie beträgt maximal 0,03 kg/t. Die Dosierung des Beschleunigers hat keinen Einfluss auf den RV-Wert der Spritzmörtelmischungen.

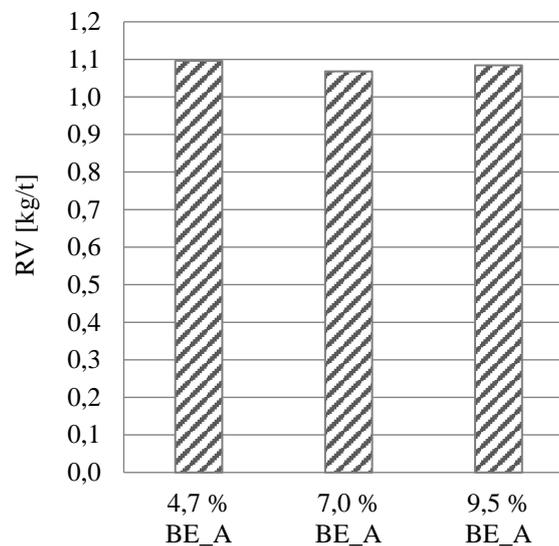


Abbildung 57: RV-Werte von Mörtelversuchen im Vergleich zu RV-Werten von Spritzmörtelversuchen der Versuchsserie „Beschleunigergehalt“

4.1.2.3 Variation Bindemittel

Des Weiteren wurde untersucht, inwiefern die Ergebnisse von Mörtelmischungen und Spritzmörtelmischungen mit unterschiedlichen Bindemittelkombinationen korrelieren [164–167]. In Tabelle 22 sind die Rezepturen der Mörtel- und Spritzmörtelmischungen mit einer Substitution von 30 M.-% Hüttensand_A und Flugasche aufgeführt.

Tabelle 22: Rezepturen der Versuchsserie „Variation Bindemittel“ - Spritzmörtel und Mörtel

			Spritzmörtel 30 % Hüttensand _A	Mörtel 30 % Hüttensand _A	Spritzmörtel 30 % Flugasche	Mörtel 30 % Flugasche
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	315	315	315	315
Zusatzstoff		[kg/m ³]	135	135	135	135
Wasser		[kg/m ³]	234	234	234	234
Quarzmehl		[kg/m ³]	150	150	150	150
Quarzsand	Quarz 0/5	[kg/m ³]	1355	1448	1327	1419
Fließmittel	FM_B	[% v. BM]	n.b.	0,4	n.b.	0,5
Beschleuniger	BE_C	[% v. BM]	7,3 %	---	7,2 %	---

Die Ergebnisse der Spritzmörtelversuche bestätigen die Erkenntnisse aus den Laborversuchen. Es konnten keine Unterschiede zwischen den Ergebnissen der RV-Werte der gespritzten Proben mit Beschleuniger (Spritzmörtel) und den unbeschleunigten Mörtelmischungen festgestellt werden (siehe Abbildung 58). Die Ergebnisse sind nahezu identisch.

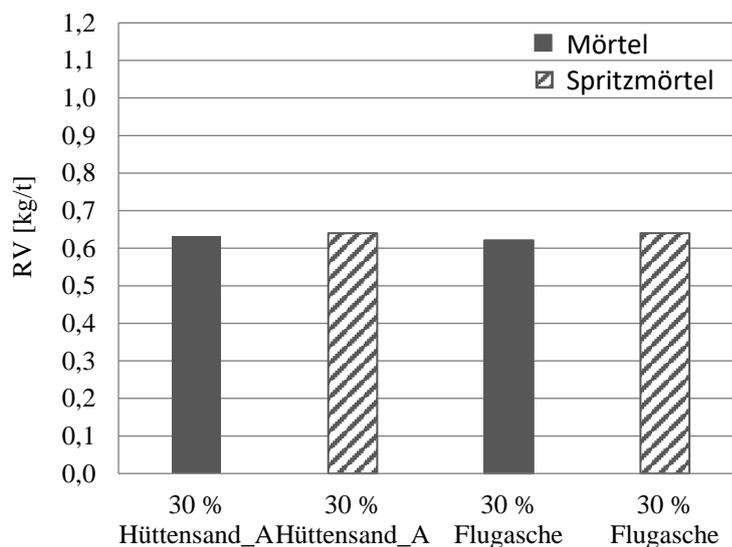


Abbildung 58: RV-Werte von Mörtelversuchen im Vergleich zu RV-Werten von Spritzmörtelversuchen der Versuchsserie „Variation Bindemittel“

4.1.3 Spritzbeton

4.1.3.1 Versuchsserie_A

Im Rahmen der Versuchsserie_A wurden Spritzbetonprobekörper für die Beurteilung des Versinterungspotentials von Mischungen mit unterschiedlichen Bindemittelkombinationen hergestellt [166, 167]. Das Bindemittel setzte sich aus dem Klinker und verschiedenen Anteilen an AHWZ, Hüttensand_A oder einer Kombination mit Hüttensand_A und Metakaolin_A zusammen (siehe Tabelle 23). Alle Versuche wurden mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen und einer Beschleunigerdosierung im Bereich zwischen 7 - 8 % v. BM durchgeführt (detaillierte Angaben zu den Ausgangsstoffen siehe Anhang A.1).

Tabelle 23: Rezepturen der Versuchsserie_A - Spritzbeton

			10 % AHWZ	33 % Hüttensand _A	33 % AHWZ	23 % Hüttensand_A ¹ 10 % Metakaolin_A ²
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	380	280	280	280
Zusatzstoff	Zusatzstoff 1	[kg/m ³]	40	140	140	98
	Zusatzstoff 2	[kg/m ³]	---	---	---	42
Wasser		[kg/m ³]	190	190	190	190
GK0/4		[kg/m ³]	1227	1224	1217	1217
GK4/8		[kg/m ³]	524	523	520	520
Fließmittel	FM_B	[% v. BM]	0,6	0,6	0,6	0,6
Beschleuniger	BE_A/BE_D/BE_F	[% v. BM]	7,7	7,0	7,0	7,0

In Abbildung 59 sind die Ergebnisse der RV-Versuche mit unterschiedlichen Bindemittelkombinationen dargestellt. Die Standardabweichung ergibt sich aus je drei Spritzversuchen mit den drei unterschiedlichen Beschleunigern BE_A, BE_D und BE_F (detaillierte Angaben zu den Beschleunigern siehe Anhang A.1.4).

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit geringerem Anteil des Klinkers im Bindemittel ein geringerer RV-Wert korreliert. Bei einer Bindemittelkombination mit 33 M.-% Hüttensand_A oder AHWZ wurde der RV-Wert um ca. 30 % im Vergleich zur Mischung mit 10 M.-% AHWZ reduziert. Der niedrigste RV-Wert von 0,33 kg/t konnte bei einer Bindemittelkombination aus Zement, Hüttensand_A und Metakaolin_A erreicht werden. Der RV-Wert war um ca. 55 % geringer als der Mittelwert der Spritzbetonmischung mit einem Anteil von 10 M.-% AHWZ im Bindemittel. Der niedrige RV-Wert ist zum einen auf den geringen Anteil an Klinker im Bindemittel zurückzuführen, wodurch der Anteil an leicht löslichem Calciumhydroxid reduziert wird. Zum anderen wird bei der puzzolanische Reaktion des Metakaolins Calciumhydroxid verbraucht und somit die Auslaugung verringert. Metakaolin_A hatte eine im

¹ Zusatzstoff 1

² Zusatzstoff 2

Vergleich zu Hüttensand_A oder AHWZ sehr hohe Feinheit, die zu einer hohen Reaktivität führte (siehe Anhang A.1.2, Tabelle A 5 und Tabelle A 6).

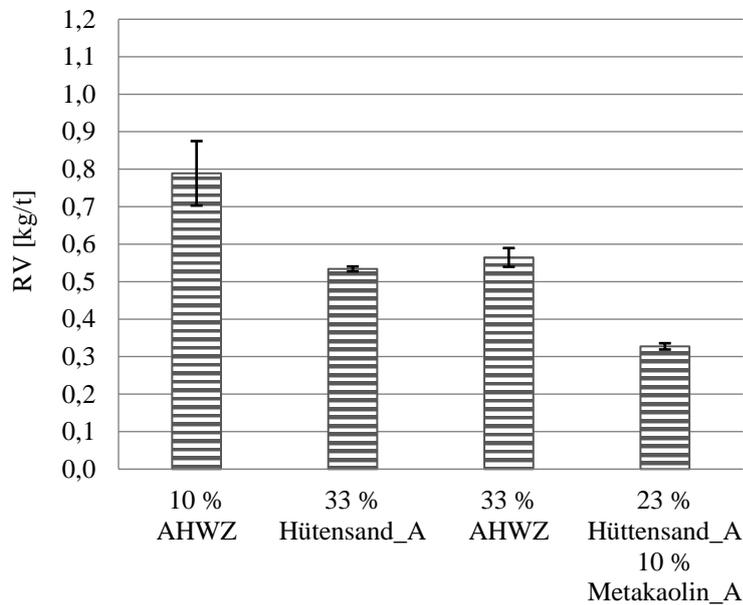


Abbildung 59: RV-Werte der Versuchsserie_A - Spritzbeton

4.1.3.2 Versuchsserie_B

Bei der Versuchsserie_B wurde ein speziell für die Großspritzversuche hergestelltes Bindemittel CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N verwendet. Es wurde mit Ausnahme der Mischung B9 kein anderes Bindemittel eingesetzt (Rezeptur siehe Kapitel 3.1.4.1, Tabelle 10). Bei den Mischungen B2 bis B8 wurden das Leimvolumen, der Luftgehalt, der W/B-Wert, die Konsistenz und die Gesteinskörnung 0/4 der Spritzbetonrezepturen variiert.

Die Rezepturen der Mischungen sind in Tabelle 24 und Tabelle 25 aufgelistet.

Tabelle 24: Rezepturen B2, B4 und B5W der Versuchsserie_B - Spritzbeton

			B2	B4	B5W
Zement	CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N	[kg/m³]	398	400	375
Wasser		[kg/m³]	197	208	192
GK0/4		[kg/m³]	1370	1372	1339
GK4/8		[kg/m³]	441	452	455
Fließmittel	FM_D	[% v. BM]	0,6	0,6	0,7
Luftporenbildner	LP_B	[% v. BM]	---	---	0,3
Stabilisierer	ST_A	[% v. BM]	---	---	---
Beschleuniger	BE_E	[% v. BM]	7,0	7,0	7,0

Tabelle 25: Rezepturen B6, B7 und B8 der Versuchsserie_B - Spritzbeton

			B6	B7	B8
Zement	CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N	[kg/m ³]	403	410	415
Wasser		[kg/m ³]	196	197	200
GK0/4		[kg/m ³]	1243	1335	1274
GK4/8		[kg/m ³]	400	443	455
Fließmittel	FM_D	[% v. BM]	0,6	0,4	0,7
Luftporenbildner	LP_B	[% v. BM]	0,4	---	---
Stabilisierer		[% v. BM]	---	---	---
Beschleuniger	BE_E	[% v. BM]	7,0	7,0	7,0

In Abbildung 60 sind die Ergebnisse der Auslaugversuche der Versuchsserie_B dargestellt. Es fällt besonders auf, dass der RV-Wert der Mischung B9 (Rezeptur siehe Kapitel 3.1.4.1, Tabelle 10) im Vergleich zu den anderen Mischungen deutlich höher ist.

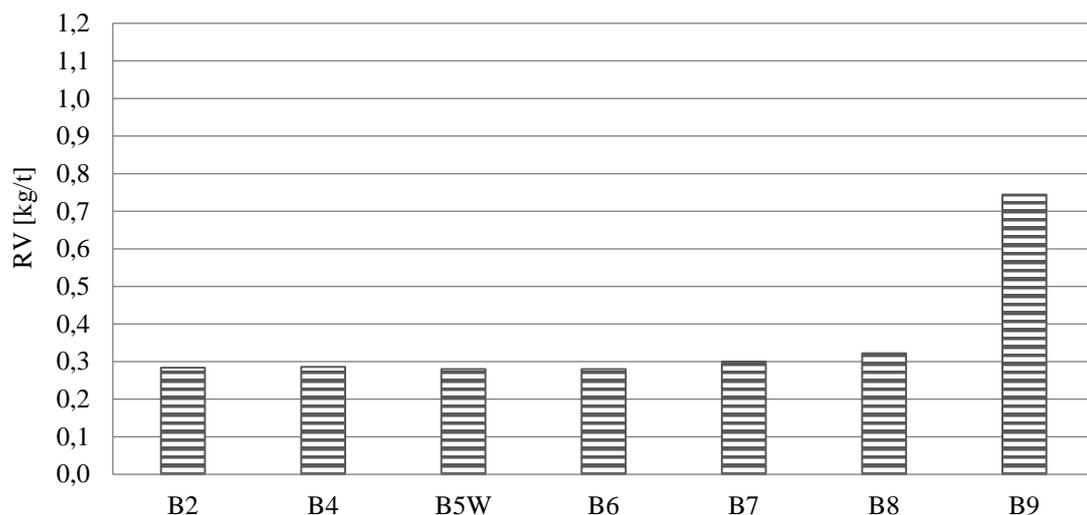


Abbildung 60: RV-Werte der Versuchsserie_B - Spritzbeton

Im Bindemittel der Mischungen B2 bis B8 war der Anteil an Klinker geringer als bei Mischung B9. Der speziell hergestellte Zement CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N bestand aus 66 M.-% CEM I, 19 M.-% Hüttensand_B, 8 M.-% Metakaolin_C und 7 M.-% Feinstkalzit. Bei Mischung B9 wurde ein CEM I 42,5 R SR0 und keine Zusatzstoffe verwendet. Die Calciumauslaugung wurde bei den Mischungen B2 bis B8 sowohl durch einen geringen Klinkergehalt als auch durch die chemischen Reaktionen der Zusatzstoffe, die zu einer Reduktion des freien Calciumhydroxids und zu einer Gefügeverdichtung führten, reduziert. Die RV-Werte der Mischungen B2 bis B8 liegen in einem Bereich zwischen 0,28 kg/t und 0,32 kg/t. Sie sind damit um bis zu 60 % geringer als bei Mischung B9.

Die Zugabe von Luftporenbildner hatte bei den Mischungen B3, B5W und B6 keine negativen Auswirkungen auf das Versinterungspotential. Beim Spritzvorgang wird ein Großteil der eingeführten Luftporen wieder ausgetrieben, weshalb mit keiner erhöhten Porosität zu rechnen

war. Untersuchungen an der Universität Innsbruck ergaben, dass es zwischen der Mischung B5W und der Mischung B8 kaum Unterschiede des Abstandsfaktors L nach DIN EN 480-11 [169] gibt (siehe Tabelle 26).

Tabelle 26: RV-Werte und Abstandsfaktor L der Versuchsserie *B* - Spritzbeton

	RV [kg/t]	L^3 [mm]
B2	0,28	---
B4	0,29	---
B5W	0,28	0,221
B6	0,28	---
B7	0,30	---
B8	0,32	0,222
B9	0,74	---

4.1.4 Zusammenfassung, Gegenüberstellung und Schlussfolgerung

Das Versinterungspotential von Mörtel-, Spritzmörtel und Spritzbetonproben mit unterschiedlicher Mischungszusammensetzung wurde in Auslaugtests untersucht.

Mörtel

Die Auslaugversuche von Mörtelproben haben ergeben, dass mit dem Prüfverfahren nach Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials“ [3] reproduzierbare Werte erzielt werden können (Versuchsbeschreibung siehe Kapitel 3.1.2.3). Der Mittelwert von 30 Probekörpern aus 12 Mischungen betrug $RV=0,97$ kg/t, der Variationskoeffizient lag bei 8,7 %. Im Rahmen der Versuchsreihe „Einflüsse auf die Prüfergebnisse“ wurden keine kritischen Einflussfaktoren bei der Versuchsdurchführung auf die Ergebnisse der Auslaugversuche, mit Ausnahme der Leitfähigkeit des Eluens und der Bewegung des Eluats während der Auslaugversuche, ermittelt.

Es wurden Mörtelmischungen mit unterschiedlichen Bindemittelkombinationen und Klinkergehalten untersucht. Die Ergebnisse belegen, dass eine Verringerung des Klinkergehaltes in der Mischung und im Bindemittel geringere RV-Werte bedingt. Ein geringer Klinkergehalt führt zu einem geringen Anteil an leicht löslichem Calciumhydroxid und somit zu einer verringerten Auslaugung („Verdünnungseffekte“). Bei einer Reduzierung des Zementgehalts von 450 kg/m³ auf 350 kg/m³ wurde der RV-Wert um ca. 45 % von $0,97$ kg/t auf $0,55$ kg/t reduziert (bei gleichem W/B-Wert). Ein weiterer Einflussfaktor auf die Auslaugung von Calciumhydroxid ist die Dichtigkeit der Porenstruktur. Ergebnisse mit W/B-Werten im Bereich zwischen $0,40$ und $0,55$ ergaben eine deutliche Tendenz. Je geringer der W/B-Wert war, umso geringer waren die RV-Werte. Ein niedriger W/B-Wert reduziert die Porosität und es kann weniger Calciumhydroxid ausgelaugt werden. Neben Verdünnungseffekten und der Porosität wird die

³ Prüfung durchgeführt von Universität Innsbruck

Auslaugung von Calciumhydroxid durch die Art und den Anteil an Zusatzstoffen im Bindemittel beeinflusst. Chemisch-reaktive Zusatzstoffe können zu einer Reduzierung des freien Calciumhydroxids bzw. im Laufe der Hydratation zu einer Gefügeverdichtung führen. Es wurden Untersuchungen mit Hüttensand_A, AHWZ, Flugasche, Metakaolin_A und Metakaolin_B durchgeführt. Der niedrigste RV-Wert wurde bei einer Substitution des Klinkers mit 15 M.-% Metakaolin_A erreicht (RV=0,43 kg/t). Die Ergebnisse mit einer Substitution des Klinkers von jeweils 30 M.-% Flugasche, Hüttensand_A oder AHWZ erreichten einen RV-Wert im Bereich zwischen 0,62 - 0,65 kg/t.

Mörtel - Spritzmörtel

Mittels Spritzmörtelversuche wurden, bei gleichen Ausgangsstoffen und ähnlicher Rezepturzusammensetzung wie bei den Mörtelversuchen, der Einfluss des Spritzverfahrens und des Beschleunigers auf die Ergebnisse der RV-Werte untersucht. Die Ergebnisse der Mörtelversuche entsprachen denen der Spritzmörtelversuche. Die RV-Werte der Spritzmörtelproben mit unterschiedlichen Beschleunigern oder Beschleunigergehalten lagen im Bereich von 0,89 - 1,10 kg/t. Die Differenz im Vergleich zum Mittelwert der Referenzmischung von Mörtelproben RV=0,97 kg/t war damit sehr gering. Der Beschleuniger, die Beschleunigerdosierung und das Spritzverfahren haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Auslaugversuche. Diese Aussage ist nur für die hier unter definierten Bedingungen, mit gleichen Ausgangsstoffen und gleicher Mischungszusammensetzung durchgeführten Mörtel- und Spritzmörtelversuche gültig.

Mörtel - Spritzmörtel - Spritzbeton

Das Versinterungspotential von Spritzbeton wurde an Spritzbetonproben untersucht, die mit gleichen Ausgangsstoffen hergestellt wurden wie die Mörtel- und Spritzmörtelproben (Versuchsserie_A). Die Erkenntnisse der Mörtel- und Spritzmörtelversuche entsprachen denen der Spritzbetonversuche. Die Substitution von Klinker durch Zusatzstoffe im Bindemittel des Spritzbetons führte ebenfalls zu einer Reduzierung der Calciumauslaugung. Je nach Art der Zusatzstoffe und Anteil der Substitution wurde die Reduzierung der Calciumauslaugung beeinflusst. Der geringste RV-Wert von 0,33 kg/t konnte bei einer Bindemittelkombination mit 23 M.-% Hüttensand_A und 10 M.-% Metakaolin_A erreicht werden. Der RV-Wert war um ca. 60 % geringer als der Mittelwert von Spritzbetonen mit 10 M.-% AHWZ und einem RV=0,79 kg/t. Bei einer weiteren Versuchsserie mit Spritzbeton (Versuchsserie_B) wurden andere Ausgangsstoffe eingesetzt. Auch in diesem Fall wurden mit einer gezielten Auswahl des Bindemittels sehr geringe RV-Werte im Bereich von 0,28 - 0,32 kg/t erreicht. Beim Bindemittel handelte es sich um einen CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N, zusammengesetzt aus 66 M.-% CEM I, 19 M.-% Hüttensand_B, 8 M.-% Metakaolin_C und 7 M.-% Feinstkalzit. Inwiefern die Reduzierung der Calciumauslaugung neben Verdünnungseffekten auf die chemische Reaktivität und/oder die Feinheit der jeweiligen Zusatzstoffe zurückzuführen ist, ist Gegenstand laufender Untersuchungen im Forschungsprojekt „ASSpC - Advanced and Sustainable Sprayed Concrete“ [145, 159].

Schlussfolgerung

Zusammengefasst kann man festhalten, dass das Versinterungspotential von Spritzbeton durch eine optimierte Mischungszusammensetzung reduziert werden kann. Dabei spielen sowohl Verdünnungseffekte durch eine Reduzierung des Klinkergehalts im Bindemittel als auch chemische Reaktionen der eingesetzten Zusatzstoffe eine Rolle, die zu einer Reduzierung des freien Calciumhydroxids und zu einer Gefügeverdichtung führen. Eine geringe Porosität der Proben reduziert ebenfalls die Calciumauslaugung. Diese Erkenntnisse wurden sowohl in Mörtel-, Spritzmörtel- und Spritzbetonversuchen bestätigt.

4.2 Verarbeitbarkeit

4.2.1 Frischbeton

4.2.1.1 Reproduzierbarkeit

Zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse wurde die Frischbeton Referenzmischung (Rezeptur siehe Kapitel 3.2.2.1, Tabelle 12) mit dem Gleitrohr-Rheometer wiederholt geprüft. In Abbildung 61 sind die Ergebnisse von zwei Mischungen mit der Referenzrezeptur (Rezepturbezeichnung Referenz_M1 und Referenz_M2) zu einem Prüfzeitpunkt ca. 15 min und ca. 90 min nach Wasserzugabe dargestellt.

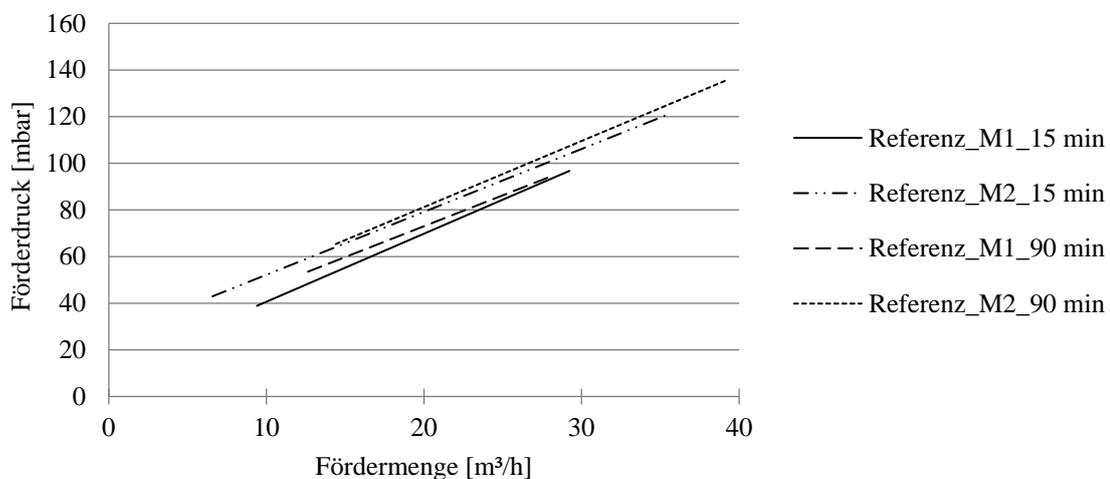


Abbildung 61: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse - Frischbeton

Die Ergebnisse der Rheometermessung sind zu den Prüfzeitpunkten 15 min und 90 min bei beiden Mischungen nahezu identisch, ebenso die Ergebnisse der beiden Mischungen M1 und M2. Die Mischungen mit dem CEM I 52,5 N - SR0 weisen über die Zeit von 90 min gleichbleibende Verarbeitungseigenschaften auf. Das zeigt sich auch in dem nahezu unveränderten Ausbreitmaß zwischen 40 - 43 cm über den Versuchszeitraum von 90 min bei beiden Mischungen (Ergebnisse der Frischbetonprüfungen siehe Anhang A.3.1).

4.2.1.2 Rheologische Eigenschaften des Leims

Die Zusammensetzung des Bindemittelleims, insbesondere die Rheologie der Gleitschicht, beeinflusst die Pumpbarkeit der Frischbetonmischung. Das theoretische Leimvolumen, der in diesem Kapitel genannten Mischungen, war bei allen Rezepturen konstant. Das Leimvolumen besteht aus den Volumenanteilen des Bindemittels, des Wassers, der Feinanteile der Gesteinskörnung $\leq 0,125$ mm sowie des Luftgehalts.

W/B-Wert

In Versuchen mit unterschiedlichen W/B-Werten wurde der Einfluss der Rheologie des Bindemittelleims auf die Pumpbarkeit systematisch untersucht [170, 171]. Die Versuche

wurden in zwei Serien durchgeführt. In der ersten Serie wurde kein Fließmittel zugegeben (Rezeptur siehe Tabelle 27, ausführliche Rezeptur siehe Anhang A.2.1). In der zweiten Serie wurde die Fließmittelmenge angepasst, um jeweils ein Ausbreitmaß von ca. 60 cm zu erreichen (Rezeptur siehe Tabelle 28, ausführliche Rezeptur siehe Anhang A.2.1).

Tabelle 27: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten - Frischbeton

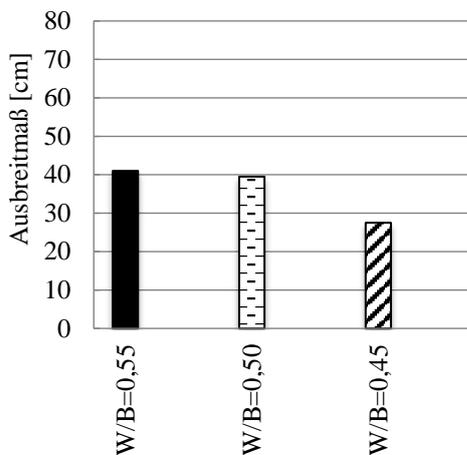
		W/B=0,55	W/B=0,50	W/B=0,45
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	124	131	140
Wasser	[dm ³ /m ³]	222	214	205
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	38	38	38
Luftgehalt	[dm ³ /m ³]	33	36	34
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	416	419	417

Tabelle 28: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten mit Fließmittel - Frischbeton

		W/B=0,55_FM	W/B=0,50_FM	W/B=0,45_FM
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	124	131	140
Wasser	[dm ³ /m ³]	222	214	205
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	38	38	38
Luftgehalt	[dm ³ /m ³]	31	36	35
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	414	419	418

Das Ausbreitmaß von Mischungen ohne Fließmittelzugabe war im Vergleich zu den Mischungen mit Fließmittelzugabe deutlich geringer (siehe Abbildung 62).

a)



b)

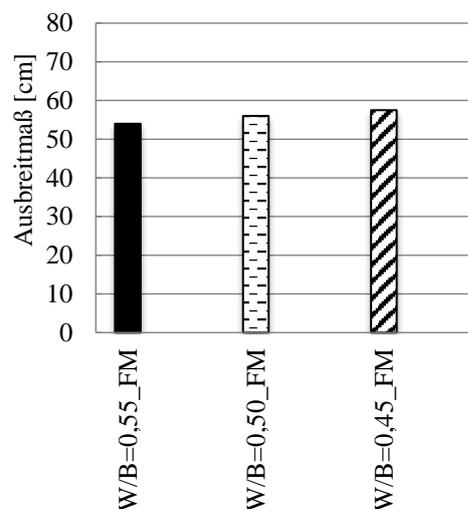
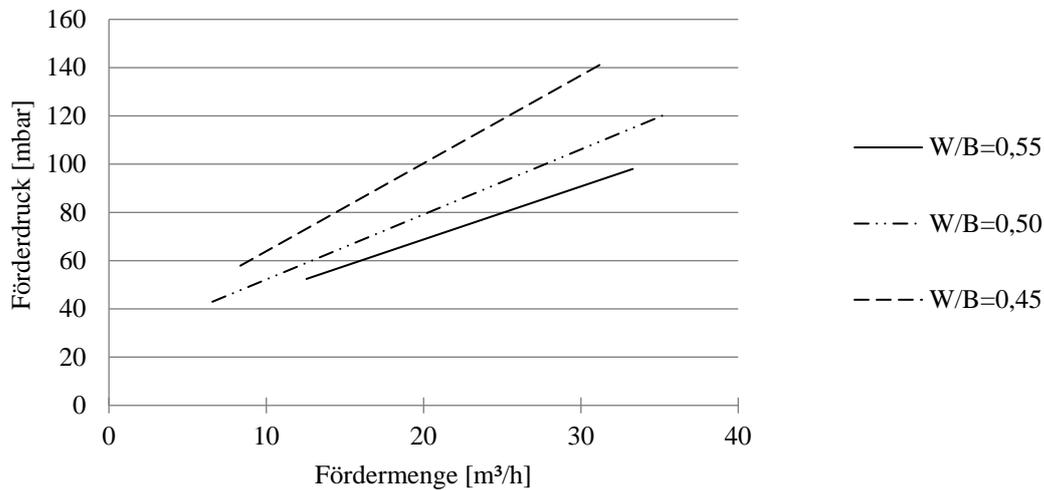


Abbildung 62: Ausbreitmaß von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton

Bei den mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Pumpprognosen ist klar zu erkennen, dass der Förderdruck mit geringer werdendem W/B-Wert ansteigt (siehe Abbildung 63). Diese Aussage gilt sowohl für die Ergebnisse der Mischungen ohne Fließmittelzugabe als auch für die Mischungen mit Fließmittelzugabe.

a)



b)

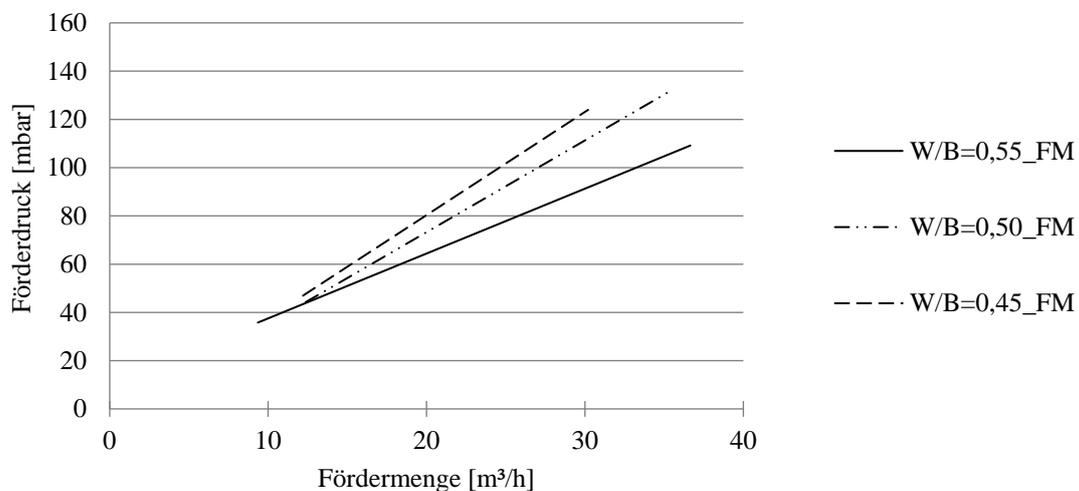


Abbildung 63: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton

Der Beiwert b , der mit dem Gleitrohr-Rheometer als Viskositätsparameter ermittelt wird, war bei Mischungen mit Fließmittel höher als bei Mischungen ohne (siehe Abbildung 64). Bei der Mischung mit W/B=0,45 und Fließmittelzugabe lag der Beiwert b bei $3,28 \cdot 10^{-6} \text{ bar} \cdot \text{m/h}$, bei der Mischung W/B=0,45 ohne Fließmittelzugabe nur bei einem Wert von $2,79 \cdot 10^{-6} \text{ bar} \cdot \text{m/h}$.

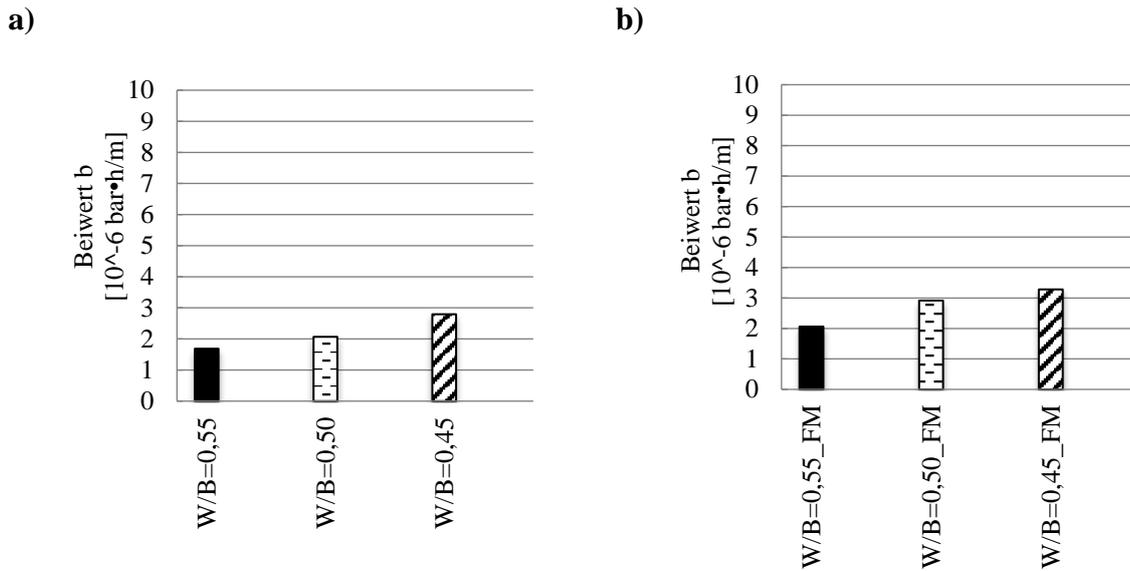


Abbildung 64: Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton

Der Vergleich der Ergebnisse von Mischungen mit und ohne Fließmittelzugabe zeigt, dass der Beiwert b , und damit der Viskositätsparameter, durch die Fließmittelzugabe beeinflusst wird. Eine Aussage über die Fließgrenze kann nicht eindeutig getroffen werden, da bei Versuchen mit Fließmittelzugabe für den Beiwert a teilweise negative Werte erreicht wurden (siehe Anhang A.3.1).

Ein ganz anderes Bild ergaben die Versuchsergebnisse von Ausbreitmaß und Trichterauslaufzeit. So war eine Bestimmung der Trichterauslaufzeit bei Versuchen ohne Fließmittelzugabe nicht möglich, da der Beton im Trichter blockierte (siehe Abbildung 65) und das Ausbreitmaß erreichte nur Werte bis maximal 41 cm bei einem W/B-Wert von 0,55 (siehe Abbildung 62).

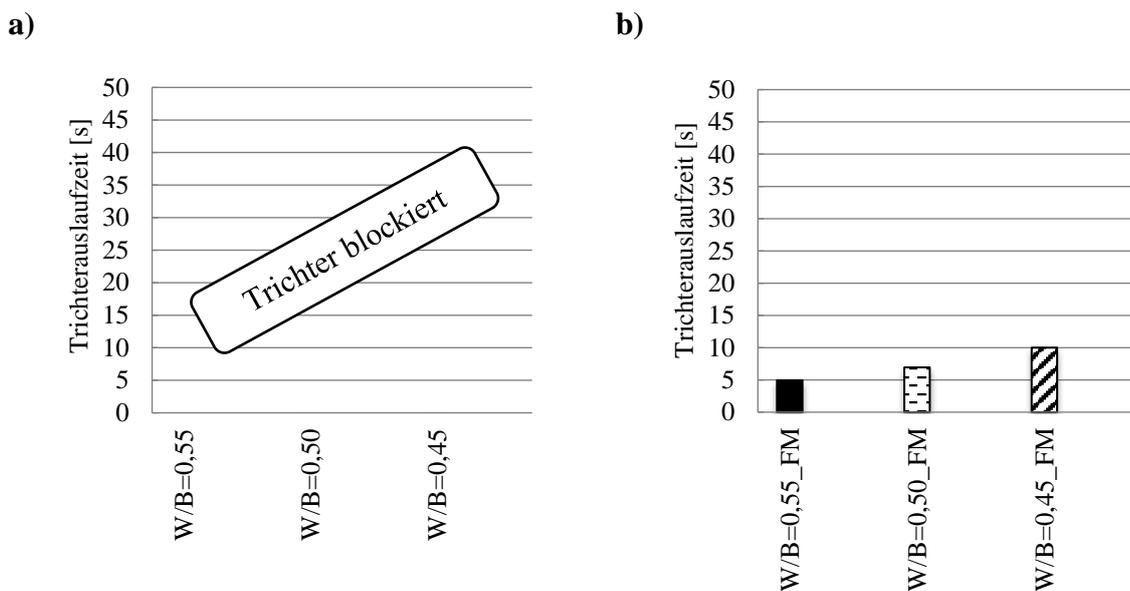


Abbildung 65: Trichterauslaufzeit von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton

Die Ergebnisse der Trichterauslaufzeit würden den Schluss zulassen, dass die Viskosität der Betonmischung mit Fließmittel geringer ist als ohne die Zugabe von Fließmittel. Die Ergebnisse der Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer zeigen für die rheologischen Eigenschaften der Gleitschicht ein anderes Bild. In diesem Fall war der Beiwert b bei Rezepturen mit Fließmittel sogar geringfügig höher. Es ist deutlich zu unterscheiden zwischen der Rheologie der gesamten Betonmischung und der Rheologie der Gleitschicht, um Aussagen über die Pumpbarkeit treffen zu können. Aus diesem Grund wird der Beiwert b nur als Viskositätsparameter bezeichnet und ist nicht zu verwechseln mit den Ergebnissen der Rheometer, welche die rheologischen Eigenschaften der gesamten Betonmischung beurteilen (Hintergründe zur Prüfung mit dem Gleitrohr-Rheometer siehe Kapitel 2.3.3.3 und Kapitel 3.2.2.3).

Ein weiterer Aspekt, der bei der Beurteilung der Pumpbarkeit der Frischbetonmischungen mit berücksichtigt werden muss, ist die Stabilität der Mischungen. Eine zu hohe Wasserabgabe unter Druck kann beim Pumpvorgang zu Entmischungen und damit zu Blockaden in den Förderleitungen führen. Bei der Versuchsreihe mit unterschiedlichen W/B-Werten war deutlich zu erkennen, dass mit ansteigendem W/B-Wert entsprechend höhere Filtratwassermengen mit der Filterpresse bestimmt wurden (siehe Abbildung 66).

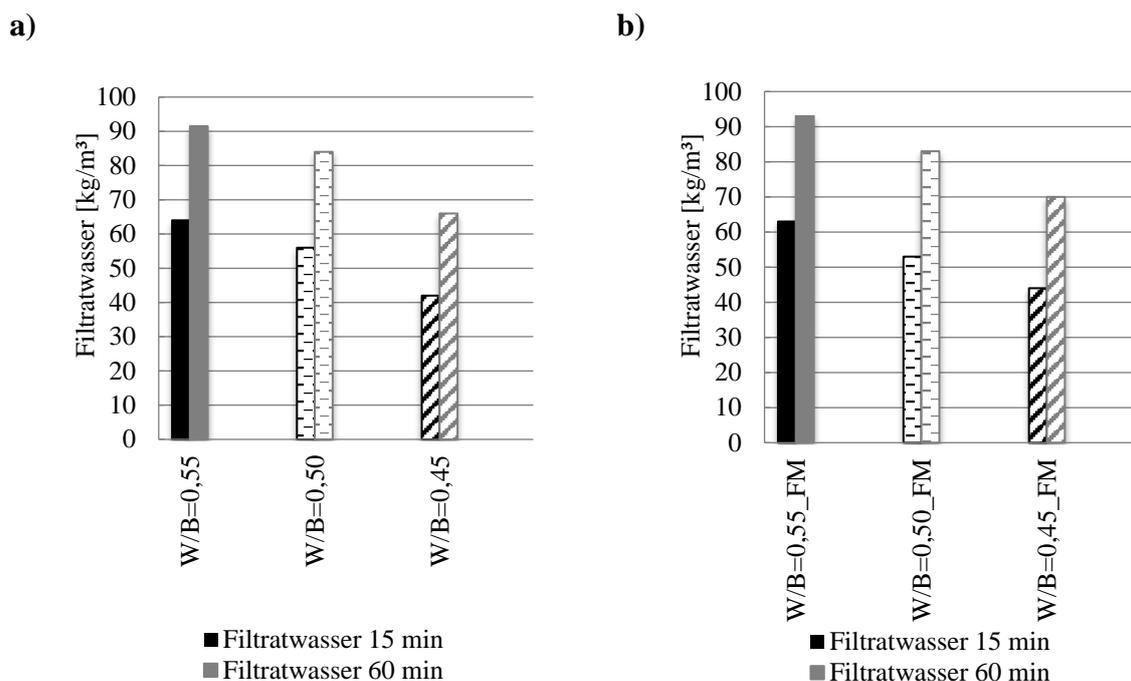


Abbildung 66: Filtratwasser nach 15 min und 60 min von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton

Eine hohe Filtratwassermenge deutet darauf hin, dass die Mischungen unter Druck zum Sedimentieren neigen und instabil sind. Bei den hier dargestellten Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten ergab sich eine Korrelation zwischen der Filtratwassermenge und dem Beiwert b , der mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelt wurde (siehe Abbildung 67). Die Korrelation wurde getrennt nach den Ergebnissen der Filtratwasserbestimmung nach 15 min und nach 60 min durchgeführt. Je höher der W/B-Wert war, umso geringer war der Beiwert b und umso höher war die Filtratwassermenge.

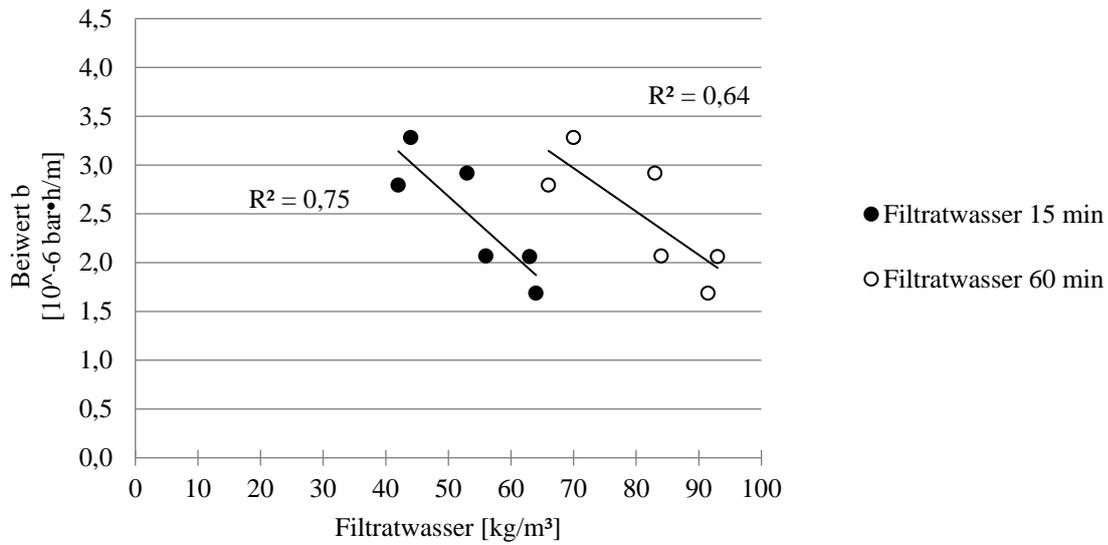


Abbildung 67: Korrelation Filtratwasser und Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten - Frischbeton

Bei einer getrennten Beurteilung der Rezepturen mit oder ohne Fließmittel wurde dieser Zusammenhang noch deutlicher (siehe Abbildung 68).

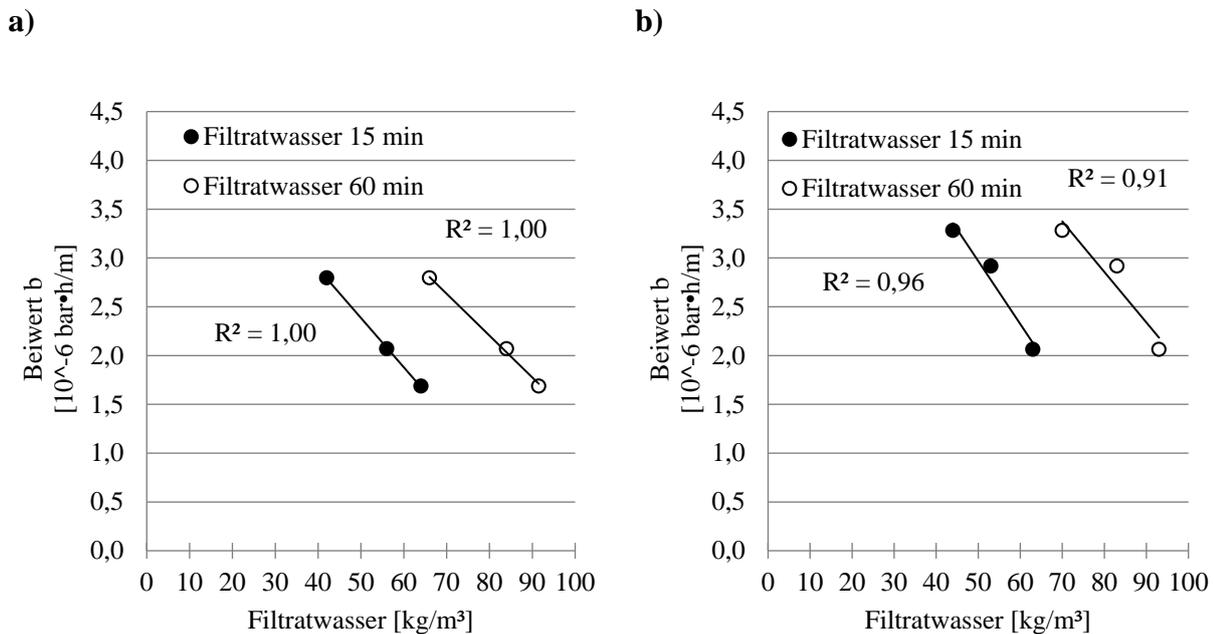


Abbildung 68: Korrelation Filtratwasser und Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton

Aus den Ergebnissen kann nicht geschlossen werden, dass es einen Zusammenhang zwischen der Filtratwassermenge und dem Beiwert b unabhängig von der Rezeptur und den Ausgangsstoffen gibt. Dieser Zusammenhang gilt nur für die hier dargestellten Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten. Es wird deutlich, dass bei der Beurteilung der Pumpbarkeit nicht nur die rheologischen Kennwerte, sondern auch die Stabilität der Mischungen mit

einbezogen werden müssen. Ein geringer Viskositätsparameter ist günstig für geringe Pumpendrucke, aber wenn die Mischung zu einer hohen Wasserabgabe unter Druck neigt, besteht die Gefahr von Blockaden in den Leitungen.

Im Gleitrohr-Rheometer kann die Stabilität der Mischung messtechnisch nicht erfasst werden. Nur bei starker Entmischung zeigt sich an der Oberfläche und an der Rohrwandung ein deutlich sichtbarer Wasserfilm. Die Filterpresse ist ein geeignetes Verfahren, um die Stabilität der Mischungen differenzierter zu beurteilen. Eine parallele Anwendung beider Prüfverfahren ist sinnvoll.

Zusammensetzung Bindemittel

Der Einfluss der Zusammensetzung des Bindemittelleims wurde an Rezepturen mit unterschiedlichen Arten und Gehalten von Zusatzstoffen untersucht [171]. Im nachfolgenden Beispiel sind die Ergebnisse von Rezepturen mit 10 M.-% Metakaolin_C sowie mit 30 M.-% und 50 M.-% Hüttensand_B, jeweils bezogen auf das Bindemittel, dargestellt (siehe Tabelle 29, ausführliche Rezeptur siehe Anhang A.2.1).

Tabelle 29: Volumenanteile von Rezepturen mit Zusatzstoffen - Frischbeton

		Referenz	10 % Metakaolin _C	30 % Hüttensand _B	50 % Hüttensand _B
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	131	117	91	64
Zusatzstoff	[dm ³ /m ³]	---	17	44	72
Wasser	[dm ³ /m ³]	214	212	211	209
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	38	38	38	38
Luftgehalt	[dm ³ /m ³]	36	36	30	32
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	419	419	413	415

Der Ersatz von 30 M.-% oder 50 M.-% Klinker durch Hüttensand_B hatte im Vergleich zur Referenzmischung kaum Auswirkungen auf den Förderdruck, ein deutlicher höherer Förderdruck wurde bei einer Substitution durch 10 M.-% Metakaolin_C gemessen (siehe Abbildung 69). Alle Versuche wurden ohne Fließmittel durchgeführt, um möglichst keine Überlagerung von Einflüssen zu erhalten.

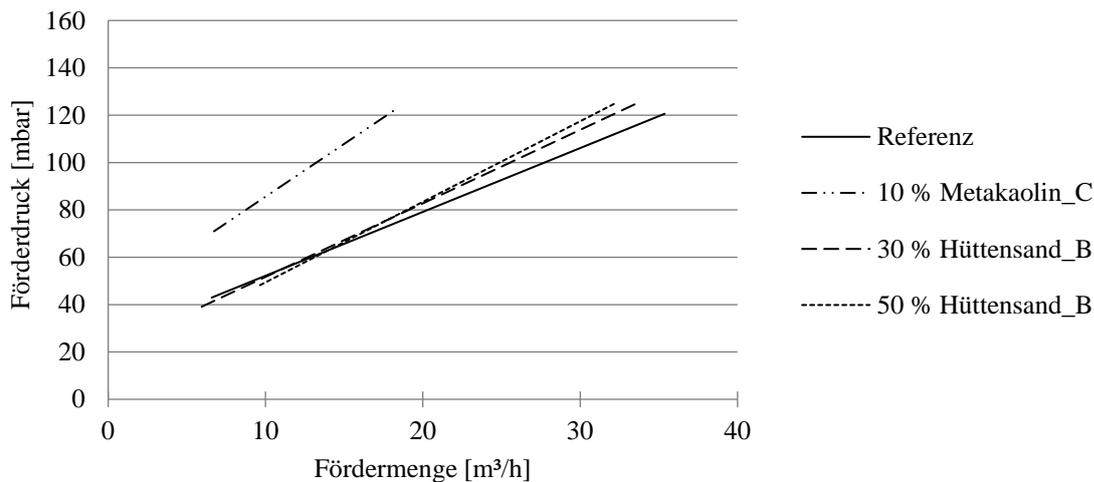


Abbildung 69: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit Zusatzstoffen - Frischbeton

Die Korngrößenverteilung in Abbildung 70 verdeutlicht, dass Metakaolin_C im Vergleich zu Hüttensand_B und CEM I 52,5 N SR0 eine deutlich höhere Feinheit hatte.

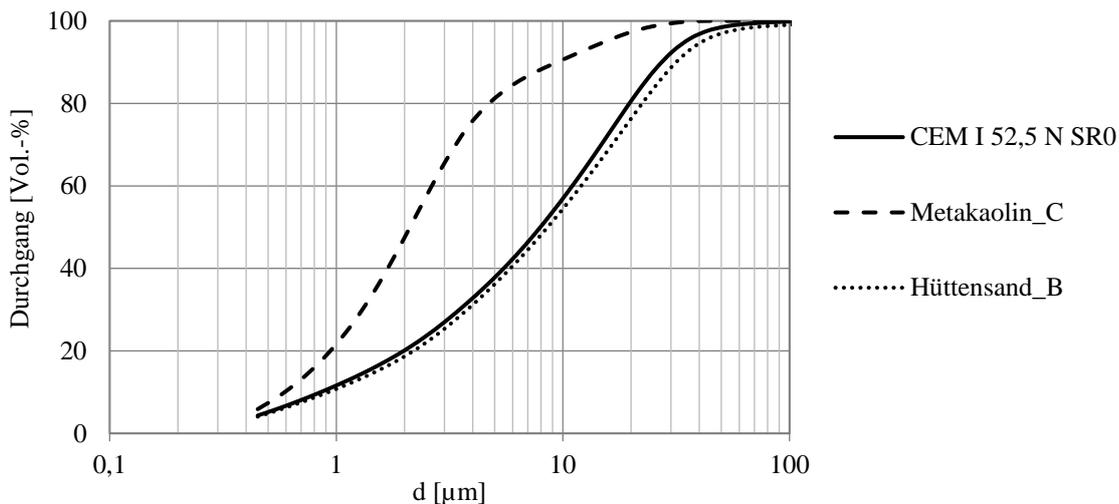


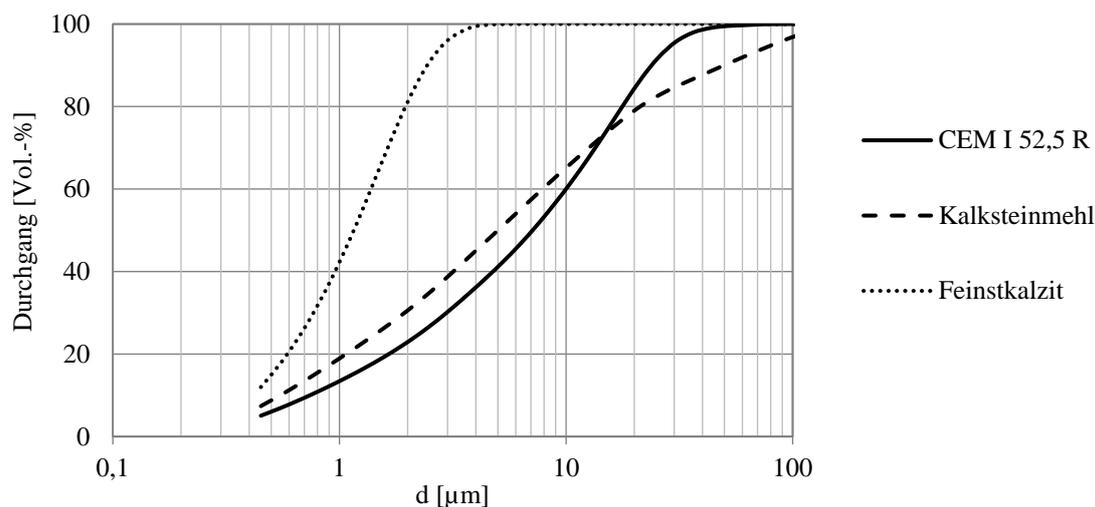
Abbildung 70: Korngrößenverteilung von Metakaolin_C, Hüttensand_B und CEM I 52,5 N SR0 (Messung durchgeführt an der TU Graz)

Eine höhere Feinheit von Materialien erfordert meist einen höheren Wasseranspruch, um eine im Vergleich zu größeren Zusatzstoffen vergleichbare Verarbeitung des Frischbetons zu erzielen. Eine pauschale Beurteilung der Pumpbarkeit auf Grund und Art des Zusatzstoffes, Metakaolin oder Hüttensand, ist nicht möglich. Innerhalb der jeweiligen Produktgruppen gibt es deutliche Unterschiede in der Feinheit der Stoffe, die sich auf den Wasseranspruch der Mischungen auswirken. Unabhängig davon ist es möglich die (rheologischen) Eigenschaften des Frischbetons mit Zusatzmitteln, z. B. Fließmittel, zu steuern und Einfluss auf die Verarbeitbarkeit zu nehmen.

Weitere Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind Anhang A.3.1 zu entnehmen.

Packungsdichte Feinstoffe

Die Rheologie des Bindemittelleims wird durch die Zusammensetzung des Bindemittels, des Wassergehalts und der Zusatzmittel beeinflusst (bei gleicher Temperatur und Verarbeitungszeit). Eine gezielte Möglichkeit um die Verarbeitungseigenschaften zu beeinflussen, ist die Optimierung der Packungsdichte. Im Rahmen des Forschungsprojektes „ASSpC - Advanced and Sustainable Sprayed Concrete“ wurden Spritzbetonrezepturen mit einer optimierten Packungsdichte an der TU Graz entwickelt (siehe Kapitel 2.3.4.2). Für die Optimierung der Packungsdichte wurden Zusatzstoffe unterschiedlicher Feinheit und der Portlandzement so aufeinander abgestimmt, dass sich der geringste Wasseranspruch für eine gewünschte Verarbeitbarkeit beim Bindemittelleim ergab. Es wurden ein CEM I 52,5 R, CEM I 52,5 N SR0, Kalksteinmehl, Microsilica, Metakaolin_C, Hüttensand_B und Feinstkalzit verwendet. Die Korngrößenverteilung der Zemente und Zusatzstoffe ist in Abbildung 70 und Abbildung 71 dargestellt. (Für Microsilica konnte mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten keine repräsentative Korngrößenverteilung ermittelt werden).



*Abbildung 71: Korngrößenverteilung CEM I 52,5 R, Kalksteinmehl und Feinstkalzit
(Messung durchgeführt an der TU Graz)*

Die Bindemittelleimzusammensetzung mit optimierter Packungsdichte wurde auf Frischbetonrezepturen übertragen. Dabei wurden gewisse „Rahmenbedingungen“ wie ein Mindestzementgehalt vorgegeben. Die Verarbeitungseigenschaften der entwickelten Rezepturen wurden im Labor der OTH Regensburg untersucht. In Tabelle 30 sind die Rezepturen mit optimierter Packungsdichte (PD) mit CEM I 52,5 N SR0 und in Tabelle 31 mit CEM I 52,5 R im Vergleich zu den jeweiligen Referenzmischungen, bei denen keine Zusatzstoffe eingesetzt wurden, aufgeführt (ausführliche Rezepturen siehe Anhang A.2.1).

Tabelle 30: Volumenanteile von Rezepturen mit optimierter Packungsdichte mit CEM I 52,5 N SR0 - Frischbeton

		CEM I 52,5 N SR0	PD 1	PD 2	PD 3
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	131	117	76	90
Hüttensand_B	[dm ³ /m ³]	---	---	26	29
Kalksteinmehl	[dm ³ /m ³]	---	---	---	---
Feinstkalzit	[dm ³ /m ³]	---	16	23	15
Metakaolin_C	[dm ³ /m ³]	---	---	---	---
Microsilica	[dm ³ /m ³]	---	---	13	---
Wasser	[dm ³ /m ³]	214	213	207	211
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	38	38	38	38
Luftgehalt (theoretisch)	[dm ³ /m ³]	30	30	30	30
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	413	413	413	413

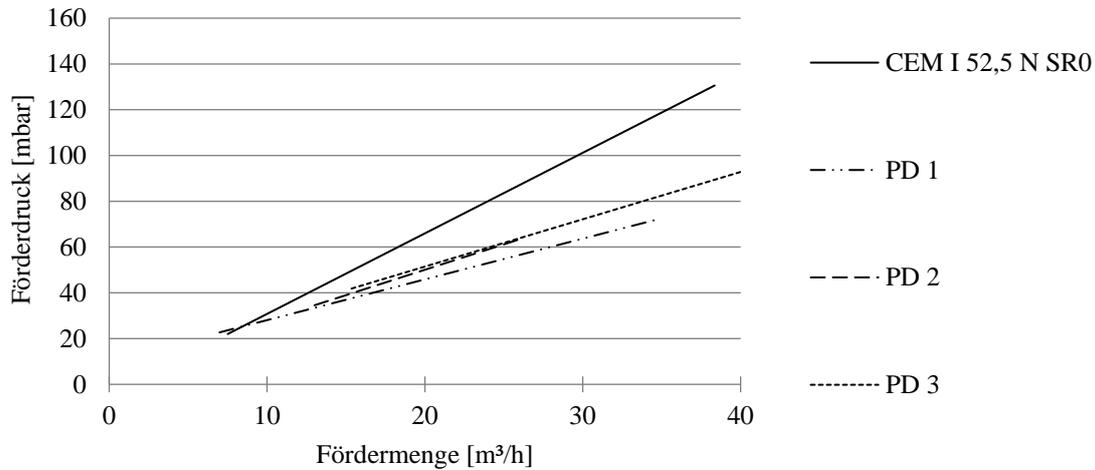
Tabelle 31: Volumenanteile von Rezepturen mit optimierter Packungsdichte mit CEM I 52,5 R - Frischbeton

		CEM I 52,5 R	PD 4	PD 5	PD 6
Zement CEM I 52,5 R	[dm ³ /m ³]	134	127	70	70
Hüttensand_B	[dm ³ /m ³]	---	---	23	23
Kalksteinmehl	[dm ³ /m ³]	---	---	15	15
Feinstkalzit	[dm ³ /m ³]	---	8	20	20
Metakaolin_C	[dm ³ /m ³]	---	---	---	12
Microsilica	[dm ³ /m ³]	---	---	13	---
Wasser	[dm ³ /m ³]	212	211	205	206
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	38	38	38	38
Luftgehalt (theoretisch)	[dm ³ /m ³]	30	30	30	30
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	413	413	413	413

Der W/B-Wert und das Bindemittelleimvolumen wurden für die Laborversuche bei allen Mischungen konstant gehalten. Der Fließmittelgehalt wurde angepasst, so dass sich ein Ausbreitmaß von ca. 60 cm ergab (ausführlich Rezeptur siehe Anhang A.2.1).

Die Ergebnisse, der mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Pumpprognosen deuten darauf hin, dass alle Mischungen mit einer optimierten Packungsdichte der Feinstoffe zu einem geringeren Förderdruck führen (siehe Abbildung 72).

a)



b)

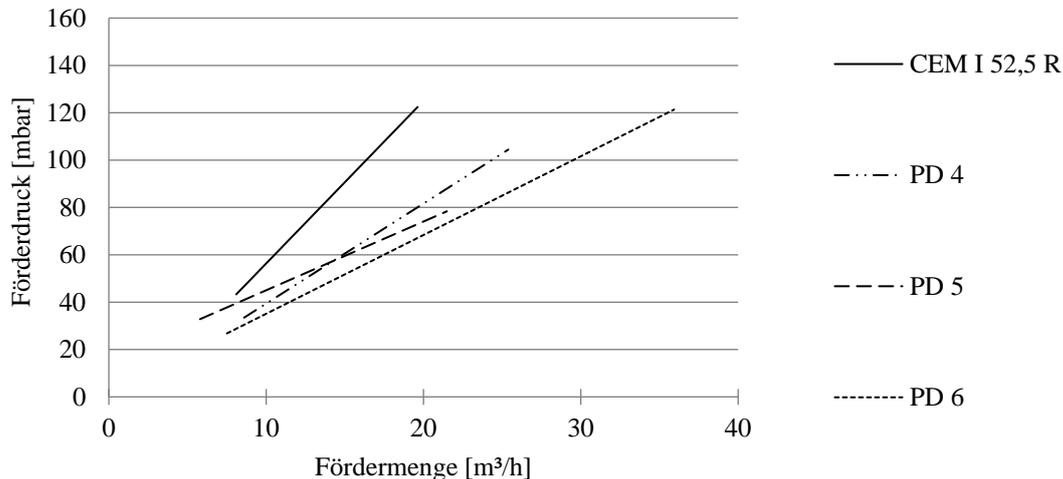


Abbildung 72: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit optimierter Packungsdichte a) Rezepturen mit CEM I 52,5 N SR0 b) Rezepturen mit CEM I 52,5 R - Frischbeton

Die Versuche wurden alle mit einem W/B-Wert von 0,50 durchgeführt. Der W/B-Wert beschreibt das Verhältnis von Masse Wasser zu Masse Bindemittel, zum Bindemittel zählen der Zement und alle Betonzusatzstoffe unabhängig von ihrer Reaktivität. Trotz der Zugabe von „Fein(st)stoffen“, die in der Regel den Wasseranspruch erhöhen, war der Beiwert b der Packungsdichte optimierten Mischungen im Vergleich zu den Ergebnissen von Frischbetonmischungen ohne Zusatzstoffe geringer (siehe Abbildung 73). Beim Beiwert b handelt es sich um den Viskositätsparameter, der mit dem Gleitrohr-Rheometer bestimmt wird.

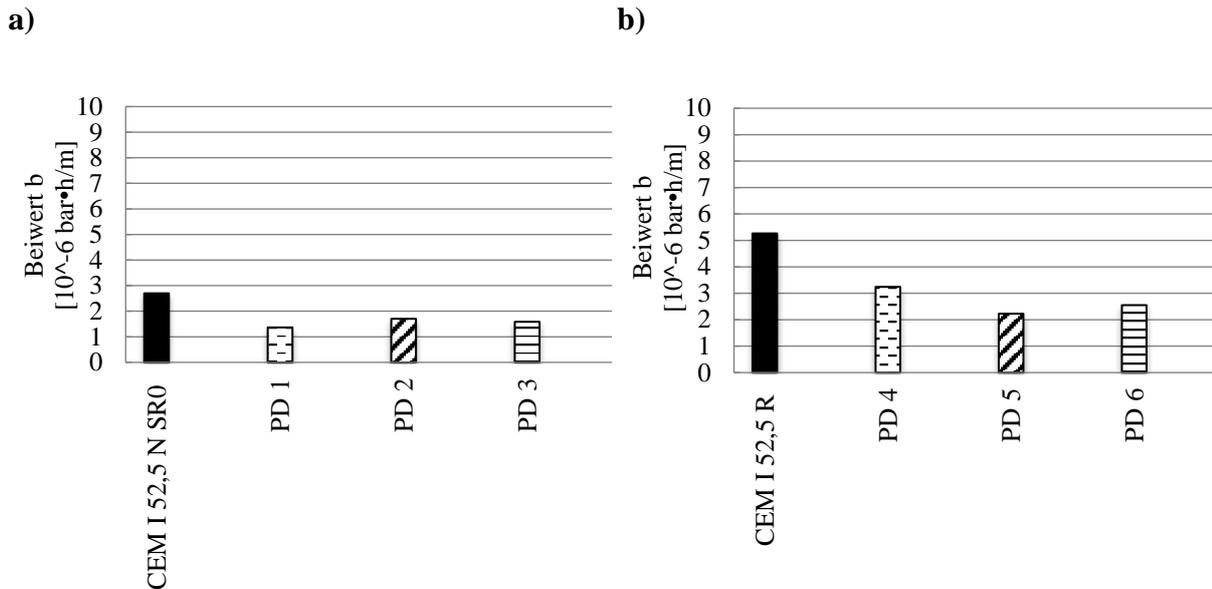


Abbildung 73: Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit optimierter Packungsdichte a) Rezepturen mit CEM I 52,5 N SR0 b) Rezepturen mit CEM I 52,5 R - Frischbeton

Bei den Rezepturen „PD 1“ und „PD 4“ wurde als Zusatzstoff nur Feinstkalzit hinzugegeben. Die Menge wurde optimal auf die jeweiligen Zemente angepasst, um eine verbesserte Verarbeitbarkeit durch Füllung der Hohlräume zu erreichen. Der Wasseranspruch wurde somit trotz der Zugabe von Feinstoffen reduziert und der Beiwert b wurde verringert (siehe Abbildung 73). Die Mischung mit Metakaolin_C führte bei den Laborversuchen bei alleiniger Verwendung (siehe Abbildung 69) zu einem höheren Förderdruck. Durch die gezielte Abstimmung mit weiteren Zusatzstoffen bei der Rezeptur „PD 6“ war die Pumpprognose im Vergleich zur Mischung ohne Zusatzstoffe „CEM I 52,5 R“ in dieser Versuchsserie geringer (siehe Abbildung 73). Aus den Ergebnissen kann man folgern, dass bei Mischungen mit optimierter Packungsdichte der Beiwert b im Vergleich zur Referenzmischung durch einen verminderten Wasseranspruch bzw. Leimanspruch geringer wurde. Weitere Ergebnisse der Versuchsserie sind im Anhang A.3.1 enthalten.

4.2.1.3 Leimvolumen

Das Leimvolumen beeinflusst die Pumpbarkeit. Bei der Entwicklung von Spritzbetonrezepturen mit reduziertem Versinterungspotential kommt dem Ersatz von Klinker mit puzzolanischen oder latent-hydraulischen Zusatzstoffen eine wesentliche Bedeutung zu. Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei einem massebezogenen Ersatz des Klinkers das Leimvolumen verändert wird. Es ist also zunächst grundsätzlich zu untersuchen, inwiefern das Leimvolumen die Verarbeitbarkeit insbesondere die Pumpbarkeit von Frischbeton beeinflusst.

In zwei Versuchsreihen wurde der W/B-Wert systematisch zwischen 0,55 und 0,45 variiert. Bei der ersten Versuchsreihe wurde das Leimvolumen bestehend aus Zement, Wasser, Gesteinskörnung $\leq 0,125$ mm und einem (theoretischem) Luftgehalt von 3 % konstant gehalten (siehe Tabelle 32, ausführliche Rezeptur siehe Anhang A.2.1) und bei der zweiten Versuchsreihe die Masse des Bindemittels (siehe Tabelle 33, ausführliche Rezeptur siehe Anhang A.2.1).

Tabelle 32: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B Werten - Leimvolumen konstant - Frischbeton

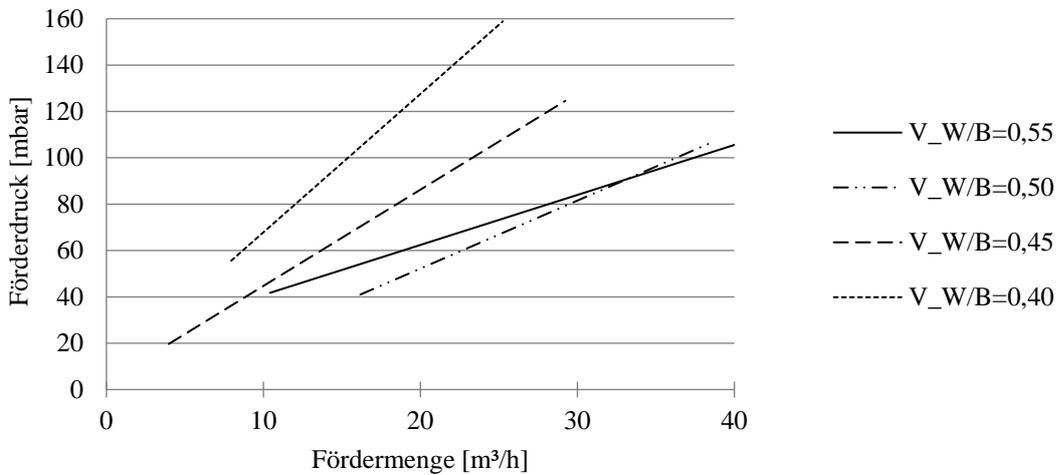
		V_W/B=0,55	V_W/B=0,50	V_W/B=0,45	V_W/B=0,40
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	124	131	140	150
Wasser	[dm ³ /m ³]	222	214	205	196
Gesteinskörnung $\leq 0,125$ mm	[dm ³ /m ³]	38	38	38	38
Luftgehalt (theoretisch)	[dm ³ /m ³]	30	30	30	30
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	413	413	413	413

Tabelle 33: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B Werten - Masse Bindemittel konstant - Frischbeton

		M_W/B=0,55	M_W/B=0,50	M_W/B=0,45	M_W/B=0,40
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	129	129	129	129
Wasser	[dm ³ /m ³]	231	210	189	168
Gesteinskörnung $\leq 0,125$ mm	[dm ³ /m ³]	37	38	39	40
Luftgehalt (theoretisch)	[dm ³ /m ³]	30	30	30	30
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	426	407	387	367

Alle Mischungen wurden mit dem Fließmittel auf ein Ausbreitmaß von ca. 60 cm eingestellt. Die Ergebnisse der Gleitrohr-Rheometermessungen zeigen, dass der Förderdruck ebenso wie der Beiwert b mit geringer werdendem W/B-Wert steigen (siehe Abbildung 74 und Abbildung 75) unabhängig davon, ob die Masse des Bindemittels oder das Leimvolumen konstant gehalten wurde.

a)



b)

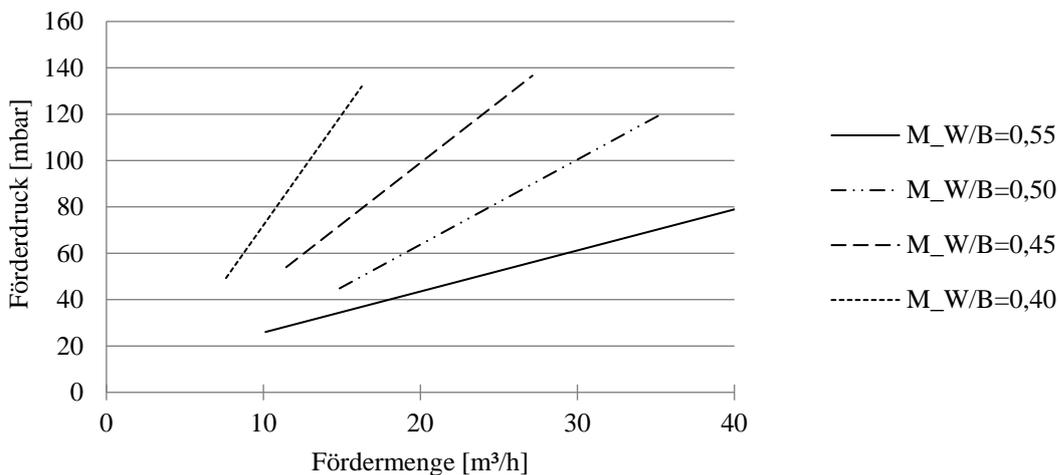


Abbildung 74: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) Volumen Leim konstant b) Masse Bindemittel konstant - Frischbeton

Der Beiwert b war bei Mischungen der Versuchsserie „Masse Bindemittel konstant“, trotz geringerem Leimvolumen, im Vergleich zu Mischungen mit gleichem W/B-Wert der Versuchsserie „Leimvolumen konstant“ höher (siehe Abbildung 75). Eine Ausnahme stellt die Mischung mit einem W/B-Wert von 0,55 dar. Hier war der Beiwert b bei der Versuchsserie „Masse Bindemittel konstant“ geringer, aber das Leimvolumen höher als bei der Versuchsserie „Leimvolumen konstant“.

Aus diesen Messungen lässt sich schließen, dass der Beiwert b nicht nur von der Rheologie des Bindemittelleims beeinflusst wird, sondern bei der Versuchsserie „Masse Bindemittel konstant“ auch durch das unterschiedliche Leimvolumen. Je geringer der W/B-Wert war, umso größer war die Differenz zwischen den Beiwerten b und dem Leimvolumen der beiden Versuchsserien.

Die Pumpbarkeit kann trotz eines geringen W/B-Wertes über das Leimvolumen verbessert werden (weitere Ergebnisse der Versuchsserie siehe Anhang A.3.1).

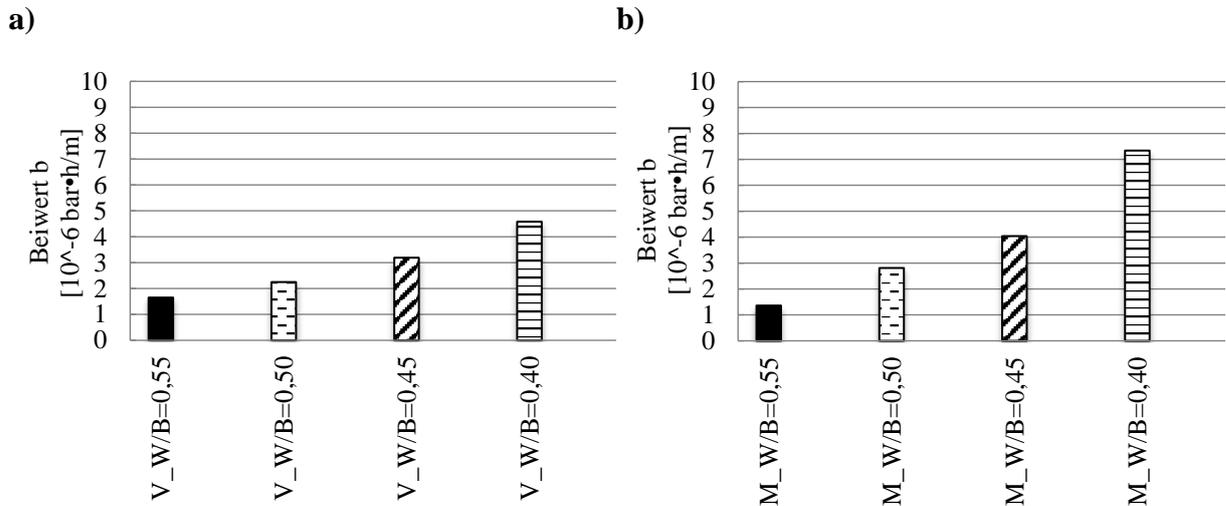


Abbildung 75: Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) Volumen Leim konstant b) Masse Bindemittel konstant - Frischbeton

Der Einfluss des Leimvolumens wurde in einer weiteren Versuchsserie untersucht [170, 171].

Ausgehend von der Referenzmischung wurde das Leimvolumen bei der Mischung „LV_n“ um ca. 30 l verringert (siehe Tabelle 34, ausführliche Rezeptur siehe A.2.1).

Tabelle 34: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Frischbeton

		Referenz	LV_n	LV_n_LP
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	131	118	118
Wasser	[dm ³ /m ³]	214	192	192
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	37	40	40
Luftgehalt	[dm ³ /m ³]	36	38	76
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	419	388	426

Die Versuchsergebnisse der Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer zeigen, dass eine Verringerung des Leimvolumens zu einer Erhöhung des Förderdrucks führt (siehe Abbildung 76). Das Leimvolumen wurde bei einer weiteren Mischung „LV_n_LP“ durch die Einführung künstlicher Luftporen erhöht. Mit der Einführung künstlicher Luftporen konnte der Leimgehalt der Mischung „LV_n_LP“ im Vergleich zur Rezeptur „LV_n“ um 38 l erhöht werden. Die Erhöhung des Leimvolumens führte zu einer Reduzierung des Förderdrucks (siehe Abbildung 76) ähnlich der Referenzmischung. Der Unterschied des Leimvolumens der Referenzmischung zur Rezeptur „LV_n_LP“ betrug lediglich 7 l/m³.

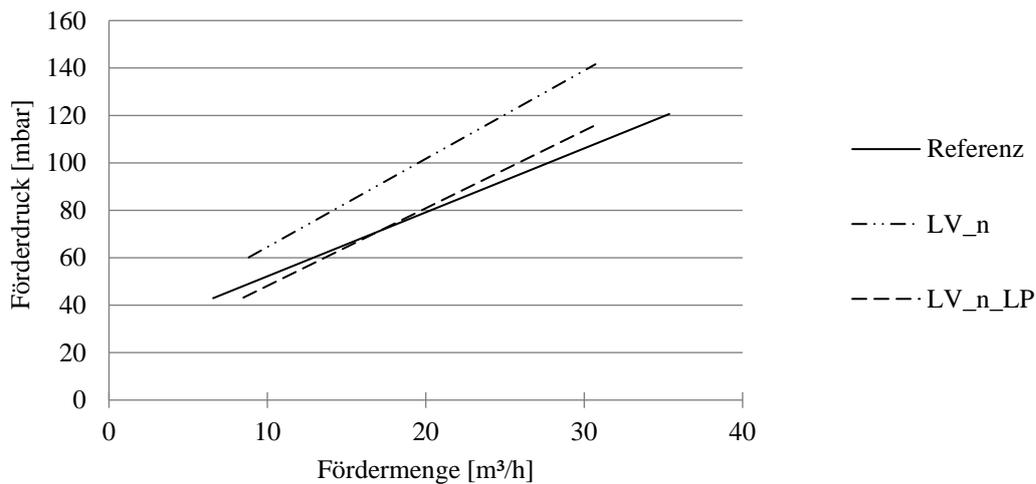


Abbildung 76: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Frischbeton

Jedoch muss berücksichtigt werden, dass beim Einsatz einer Betonpumpe wesentlich andere Pumpendrucke auf die Mischung einwirken als beim Versuch mit dem Gleitrohr-Rheometer. Bei hohen Pumpendrucke in Betonpumpen wird die Luft komprimiert und steht somit nicht zur Ausbildung der Gleitschicht zur Verfügung [85].

Im Labor wurde mit einer weiteren Reduzierung des Leimgehalts auf 359 l/m³ (Rezeptur „LV_nn“, siehe Tabelle 35) eine Mischung an der Grenze der Verarbeitbarkeit hergestellt.

Tabelle 35: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Frischbeton

		Referenz	LV_nn	LV_nn_LP
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	131	106	106
Wasser	[dm ³ /m ³]	214	173	173
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	37	41	41
Luftgehalt	[dm ³ /m ³]	36	38	56
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	419	359	377

Mit dieser Rezeptur war es weder möglich ein Ausbreitmaß zu bestimmen noch die Versuche mit dem Gleitrohr-Rheometer oder der Filterpresse aufgrund der steifen Konsistenz durchzuführen. Nur durch die Zugabe von Luftporenmittel und der damit verbundenen Erhöhung des Luftgehalts auf 5,6 % war die Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer möglich. Im Vergleich zur Rezeptur „LV_n“ führte die weitere Reduzierung des Leimvolumens zu einem deutlich höheren Förderdruck (siehe Abbildung 77).

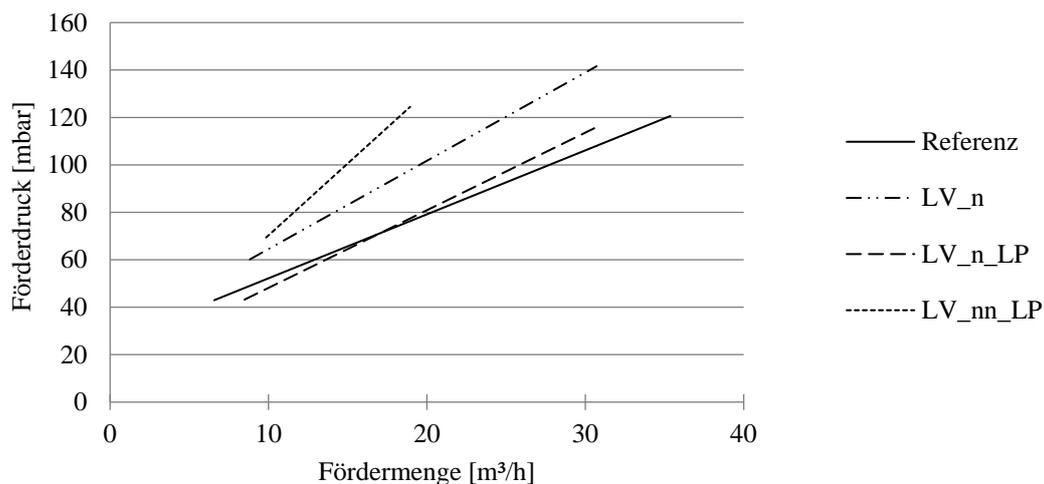


Abbildung 77: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Frischbeton

Bei diesen geringen Volumenanteilen an Bindemittel und Wasser ist es fraglich, ob während eines Pumpvorgangs „fehlendes“ Leimvolumen durch die Zugabe von Luftporenmittel kompensiert werden kann. Eine Bestimmung der Filtratwassermenge war trotz Zugabe des Luftporenmittels nicht möglich, da durch den zu geringen Leimgehalt die Luft durch den Beton entweichen konnte ohne einen gleichmäßigen Druck zu erzeugen (siehe Abbildung 78).

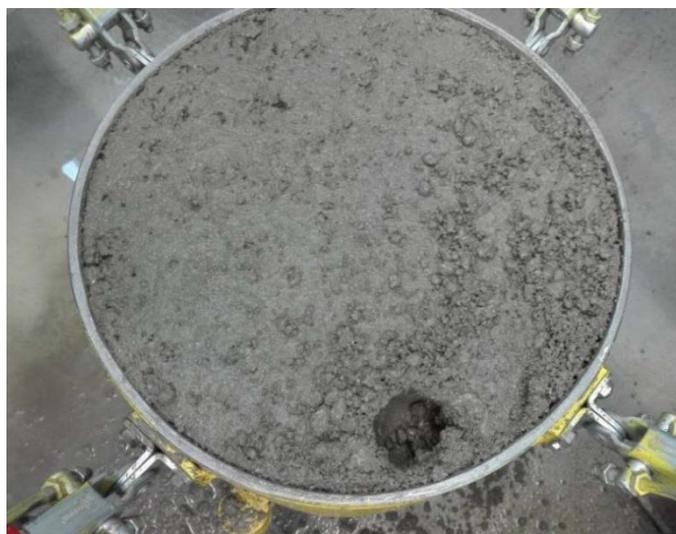


Abbildung 78: Versuch zur Bestimmung der Filtratwassermenge mit der Rezeptur LV_nn_LP [172]

Die genannten Ergebnisse zeigen, dass ein ausreichendes Leimvolumen zum Füllen der Zwischenräume der Gesteinskörnung und der Ausbildung der Gleitschicht erforderlich ist. Bei geringen Leimgehalten wurde mit dem Gleitrohr-Rheometer an die Grenzen der Verarbeitbarkeit gegangen und es wurden hohe Förderdrücke gemessen. Die Versuche mit der Filterpresse erreichten bei zu geringen Leimgehalten die Grenze der Anwendbarkeit. Grundsätzlich ergänzen sich die Ergebnisse der Filterpresse und Messergebnisse des Gleitrohr-Rheometers sinnvoll (weitere Ergebnisse der Versuchsserie siehe Anhang A.3.1).

4.2.1.4 Sieblinie Gesteinskörnung

Das Leimvolumen der Gleitschicht besteht nach Angaben der Literatur aus Wasser, Bindemittel, Luftporen und den Feianteilen des Sandes [15, 16]. Veränderungen der Feianteile des Sandes beeinflussen die rheologischen Eigenschaften der Betonmischungen. In einer Versuchsreihe wurden die Feianteile der Gesteinskörnung variiert [171]. Es wurden eine Sieblinie mit hohem Feinanteil „fein_h“, eine Sieblinie mit geringem Feinanteil „fein_n“ und eine Sieblinie entsprechend der EFNARC Richtlinie [151] „EFNARC“ verwendet (siehe Tabelle 36 und Abbildung 79, ausführliche Rezeptur siehe Anhang A.2.1).

Tabelle 36: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen Sieblinien - Frischbeton

		Referenz	fein_n	fein_h	EFNARC
Zement CEM I 52,5 N SR0	[dm ³ /m ³]	131	131	131	131
Wasser	[dm ³ /m ³]	214	214	214	214
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	37	5	66	67
Luftgehalt (theoretisch)	[dm ³ /m ³]	30	30	30	30
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	413	380	441	443

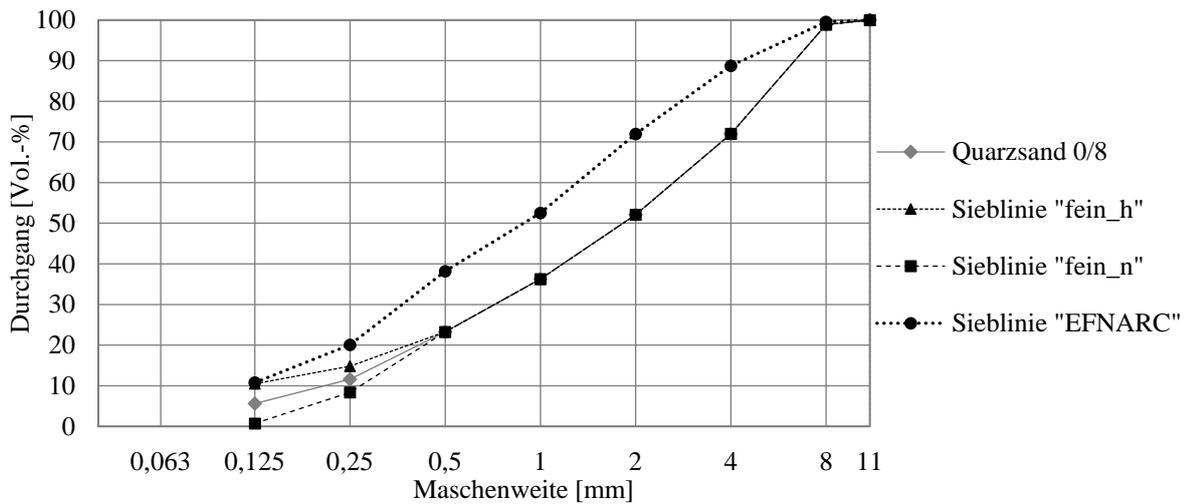


Abbildung 79: Sieblinien mit unterschiedlichen Feianteilen

Die Konsistenz der Mischungen wurde mit Fließmittel auf ein Ausbreitmaß von ca. 60 cm eingestellt. In Abbildung 80 sind die Messergebnisse des Gleitrohr-Rheometers dargestellt. Eine Erhöhung der Feianteile führte in diesem Fall zu einer Erhöhung des Förderdrucks. Die Pumpprognose der Mischungen „fein_h“ und „EFNARC“ ergaben den höchsten Förderdruck. Die Mischung „fein_n“ den geringsten Förderdruck. Bei den Ergebnissen fällt auf, dass die Pumpprognosen der Rezepturen „fein_h“ und „EFNARC“ nahezu übereinstimmten, trotz unterschiedlicher Sieblinie der Gesteinskörnung > 0,125 mm. Beide Rezepturen hatten jedoch das gleiche Leimvolumen (siehe Tabelle 36).

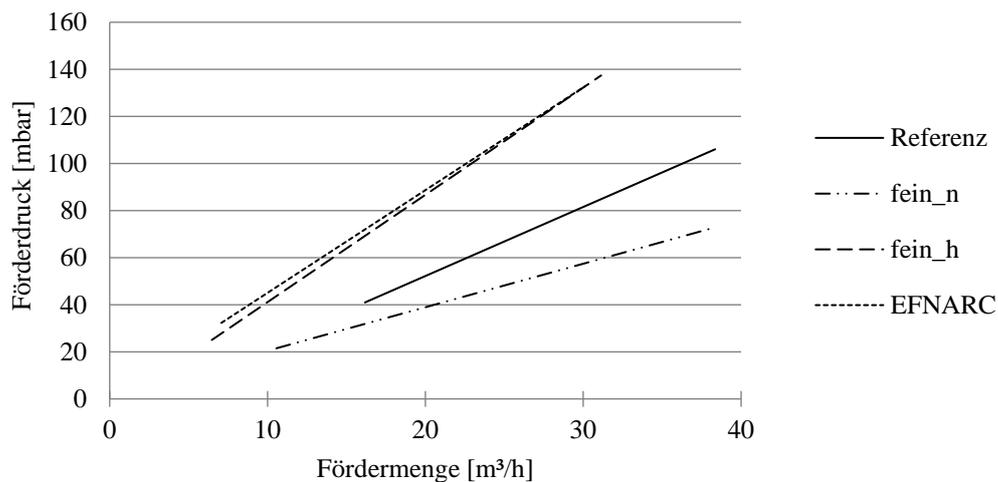


Abbildung 80: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen Sieblinien - Frischbeton

Durch unterschiedliche Feinteilgehalte wurde das Leimvolumen der Mischung verändert. In Kapitel 4.2.1.3 wurde bereits erwähnt, dass sich eine Erhöhung des Leimvolumens positiv auf die Pumpbarkeit auswirken kann. Dies ist jedoch nicht immer der Fall. Hier wurde der Wassergehalt nicht optimal auf die hohen Feinteilgehalte abgestimmt. In diesem Fall war nicht das Leimvolumen der entscheidende Faktor für die Erhöhung des Förderdrucks, sondern vielmehr die rheologischen Eigenschaften des Bindemittelleims. Die Viskosität der Gleitschicht wurde durch den zusätzlichen Feinanteil in der Gesteinskörnung und den im Vergleich zur Referenzmischung unveränderten Wassergehalt erhöht (weitere Ergebnisse der Versuchsserie siehe Anhang A.3.1).

4.2.1.5 Konsistenz

Die Verarbeitbarkeit von Frischbetonmischungen wird häufig anhand des Ausbreitmaßes beurteilt. In der Versuchsreihe mit unterschiedlichen W/B-Werten und der Zugabe von Fließmittel in Kapitel 4.2.1.2 ergaben sich jedoch trotz eines ähnlichen Ausbreitmaßes unterschiedliche Pumpprognosen mit dem Gleitrohr-Rheometer. Je geringer der W/B-Wert war, umso höher war der mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelte Förderdruck. Anhand der Ergebnisse des Ausbreitmaßes konnte man folglich keine Unterschiede der Frischbetoneigenschaften feststellen. Mit dem Gleitrohr-Rheometer war der Einfluss der unterschiedlichen W/B-Werte auf die Pumpbarkeit messtechnisch feststellbar.

In Abbildung 81 ist eine Gegenüberstellung von rheologischen Kennwerten, die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelt wurden, und dem Ausbreitmaß bzw. der Trichterauslaufzeit von weiteren Frischbetonmischungen mit unterschiedlichsten Rezepturen dargestellt. Für das Ausbreitmaß wurden nur Werte größer 49 cm verwendet und bei der Trichterauslaufzeit wurden keine Werte berücksichtigt, die über 60 s waren. Die Gegenüberstellung des Beiwerts a (Fließgrenzparameter des Gleitrohr-Rheometers) mit dem Ausbreitmaß und dem Beiwert b (Viskositätsparameter des Gleitrohr-Rheometers) mit der Trichterauslaufzeit ergab keine Korrelation (siehe Abbildung 81). Es war nicht möglich einen Zusammenhang zwischen den rheologischen Eigenschaften, die für die Erstellung der Pumpprognosen ermittelt wurden, und

den Konsistenzprüfverfahren unabhängig von der Mischungszusammensetzung und den Ausgangsstoffen zu erstellen. Welche Parameter für die Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen tatsächlich geeignet sind, ist nur im Rahmen von Pumpversuchen feststellbar.

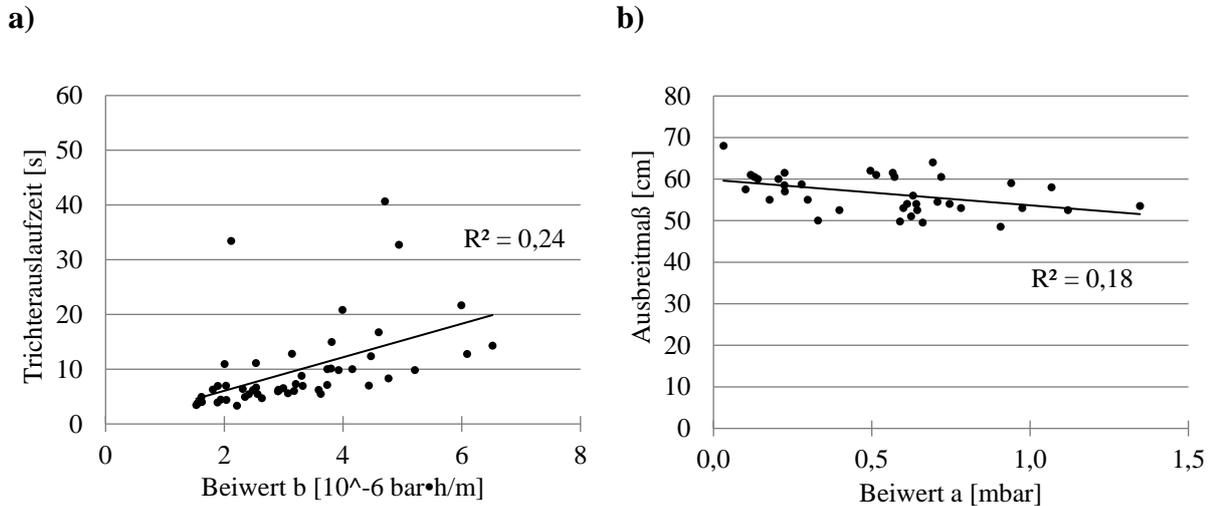


Abbildung 81: a) Vergleich Trichterauslaufzeit zu Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer und b) Vergleich Ausbreitmaß zu Beiwert a ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer

4.2.2 Frischbetonmischung

4.2.2.1 Leimvolumen

In Pumpversuchen mit einer mobilen Spritzbetonmaschine wurde der Einfluss des Leimvolumens auf die Pumpbarkeit untersucht [170]. Bei den Mischungen B3, B5 und B5W wurden der Mehlkorn- und Wassergehalt im Vergleich zur Referenzmischung B2 systematisch reduziert. Das Mehlkorn bestand in diesem Fall aus dem Zement und dem Anteil der Gesteinskörnung $\leq 0,125 \text{ mm}$. Das Leimvolumen aus Zement, Wasser, Gesteinskörnung $\leq 0,125 \text{ mm}$ und Luft blieb durch die Zugabe eines Luftporenbildners annähernd konstant. In Tabelle 37 sind die Volumenanteile der Rezepturen B2, B3, B5 und B5W anhand der tatsächlichen Einwaagen nach Angaben der Lieferscheine und anhand der Ergebnisse der Frischbetonprüfungen enthalten.

Tabelle 37: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen der Versuchsserie_B - Frischbetonmischung

		B2	B3	B5	B5W
Zement	[dm ³ /m ³]	131	100	125	124
Wasser	[dm ³ /m ³]	197	155	182	192
Gesteinskörnung $\leq 0,125 \text{ mm}$	[dm ³ /m ³]	46	46	46	45
Luftgehalt	[dm ³ /m ³]	32	105	50	50
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	406	406	404	411

Die Konsistenz der Mischungen wurde mithilfe des Fließmittels auf ein Ausbreitmaß von ca. 60 cm eingestellt. Im Anhang A.3.2 sind die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen aufgelistet. Parallel zu den Pumpversuchen wurden Versuche mit dem Gleitrohr-Rheometer durchgeführt. Der Förderdruck von Mischungen mit geringerem Mehlkorn- und Wassergehalt war deutlich höher als bei der Referenzmischung B2 (siehe Abbildung 82).

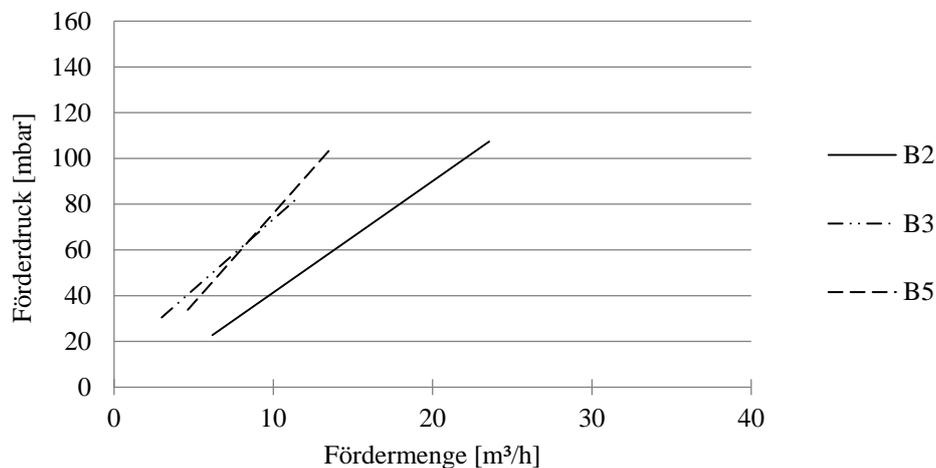


Abbildung 82: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen der Versuchsserie_B - Frischbetonmischung

Der Volumenanteil an Mehlkorn und Wasser betrug bei der Referenzmischung B2 374 l/m³, bei der Mischung B3 301 l/m³ und bei der Mischung B5 353 l/m³.

Im Pumpversuch mit der Spritzbetonmaschine zeigte sich, dass es nicht möglich war die Mischungen B3 und B5 mit geringem Mehlkorn- und Wassergehalt zu pumpen. Der Hydraulikdruck der Pumpe erreichte Werte von 200 bar und folglich wurde der Pumpvorgang abgebrochen (siehe Tabelle 38).

Tabelle 38: Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer, voreingestellte Fördermenge und Hydraulikdruck der Pumpe der Spritzbetonmaschine von Mischungen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen

	Beiwert b [10 ⁻⁶ bar · h/m]	Fördermenge [m ³ /h]	Hydraulikdruck Pumpe [bar]
B2	3,74	12	70
B3	4,70	12	Abbruch > 200
B5	6,02	12	Abbruch > 200
B5W	2,78	8	Abbruch > 200

Die Erkenntnisse der Pumpversuche spiegeln in diesem Fall die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten erhöhten Förderdrücke wider. Anhand der optischen Beurteilung der Mischungen war es nicht möglich auf den geringen Mehlkorn- und Wassergehalt und damit verbunden auf eine schlechte Pumpbarkeit zu schließen (siehe Abbildung 83).



Abbildung 83: Optisch keine Entmischung anhand des Ausbreitmaßes bei Mischung B5 erkennbar (Prüfzeitpunkt ca. 25 min nach Wasserzugabe im Mischer)
[Florian Steindl, TU Graz]

Das Nachdosieren von Wasser führte bei beiden Mischungen zu keiner wesentlichen Verbesserung der Pumpbarkeit. Bei Mischung B3 wurden 10 l/m^3 und bei Mischung B5 wurden $12,5 \text{ l/m}^3$ Wasser nachdosiert (B5W). In beiden Fällen musste der Pumpversuch abgebrochen werden, mit Mischung B5W konnten noch Spritzkisten hergestellt werden.

Obwohl der Pumpversuch der Mischung B5W aufgrund des hohen Hydraulikdrucks der Pumpe von 200 bar abgebrochen werden musste, waren die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Förderdrücke der Pumpprognose sehr gering (siehe Abbildung 84). Die Messung des hohen Hydraulikdrucks der Pumpe an der Spritzbetonmaschine und die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten geringen Förderdrücke sind widersprüchlich (siehe Tabelle 38). Eine mögliche Erklärung liefert die optische Beurteilung der Mischung B5W.

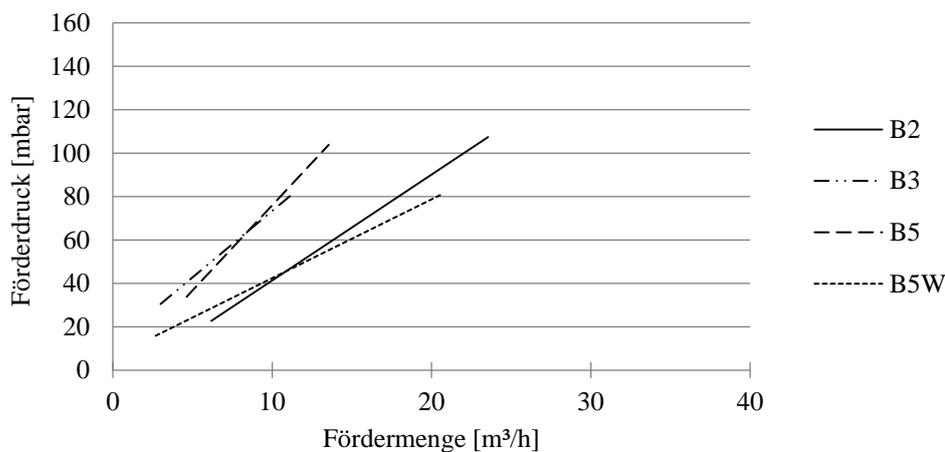


Abbildung 84: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen - Frischbetonmischung

Während der Messung der Mischung B5W mit dem Gleitrohr-Rheometer war optisch eine Wasserabsonderung an der Rohrwandung und an der Betonoberfläche zu erkennen (siehe Abbildung 85).

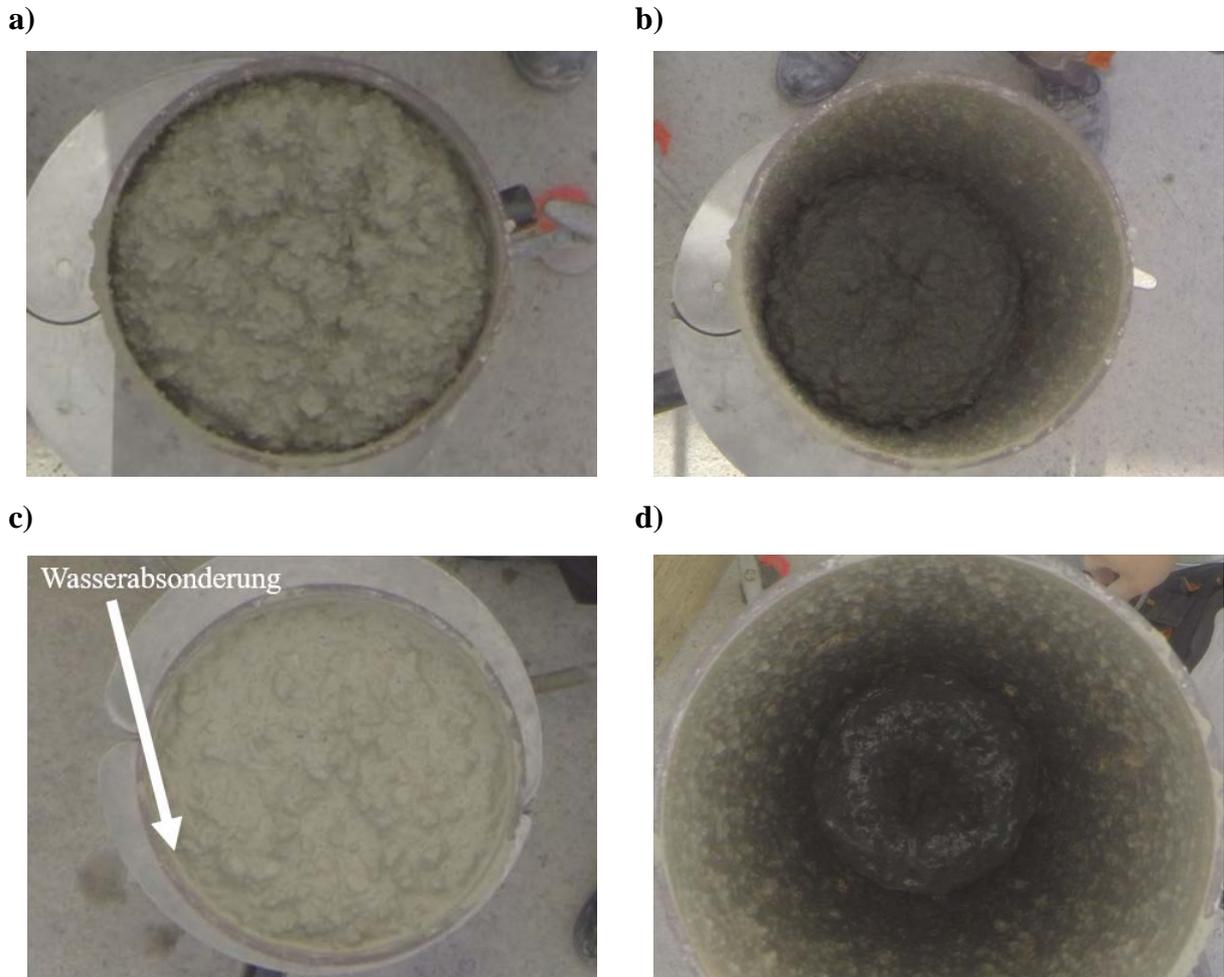


Abbildung 85: a) und b) Messung mit Gleitrohr-Rheometer der Mischungen B5
c) und d) Messung mit Gleitrohr-Rheometer der Mischung B5W

Die Frischbetonmischung B5W wurde durch die nachträgliche Wasserzugabe so verändert, dass nicht mehr der Scherwiderstand der Gleitschicht an der Rohrwandung gemessen wurde, sondern dass vielmehr ein Gleiten aufgrund eines Wasserfilms an der Rohrwandung vorlag. Folglich ergaben sich sehr geringe Werte für den Förderdruck, der mit dem Gleitrohr-Rheometer bestimmt wurde. Der erhöhte Wassergehalt in Verbindung mit dem geringen Mehlkorngehalt bei der Mischung B5W führte außerdem dazu, dass die Mischung unter Druck beim Pumpvorgang instabil wurde und Blockaden zum Abbruch des Pumpvorgangs führten.

Die Ergebnisse der Pumpversuche von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen zeigen, dass ein Ersatz von Leimvolumen durch Luft nur begrenzt möglich ist. Bei der Unterschreitung eines kritischen Gehalts an Wasser und Mehlkorn führte auch eine Erhöhung des Luftgehalts nicht zu einer pumpbaren Mischung. Der Luftgehalt ist dem Leimvolumen anzurechnen, aber eine Mindestmenge an Mehlkorn und Wasser ist für eine ausreichende Dicke der Gleitschicht erforderlich. Unter hohem Druck wird die Luft komprimiert und steht nicht zur Ausbildung der Gleitschicht zur Verfügung.

4.2.2.2 Luftporen- und Wassergehalt

Inwiefern die Pumpbarkeit durch die Zugabe von Luftporenbildner verbessert werden kann, wurde an der Mischung B6 untersucht [170]. Bei Mischung B6 handelte es sich um die Referenzrezeptur aber mit Zugabe eines Luftporenbildners. Das Leimvolumen wurde durch die Zugabe der Luft um 55 l erhöht und der Volumenanteil an Wasser und Mehlkorn blieb im Vergleich zur Referenzmischung B2 nahezu konstant (siehe Tabelle 39).

Tabelle 39: Volumenanteile von Rezepturen mit erhöhtem Luftgehalt und Wassergehalt - Frischbetonmischung

		B2	B4	B6
Zement	[dm ³ /m ³]	131	132	133
Wasser	[dm ³ /m ³]	197	208	196
Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	[dm ³ /m ³]	46	46	42
Luftgehalt	[dm ³ /m ³]	32	15	90
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	406	401	461

Der Förderdruck der Mischung B6, der mit dem Gleitrohr-Rheometer gemessen wurde, war im Vergleich zur Referenz B2 geringer (siehe Abbildung 86) und der Hydraulikdruck der Pumpe, der an der Spritzbetonmaschine gemessen wurde, war um 13 bar niedriger (siehe Tabelle 40).

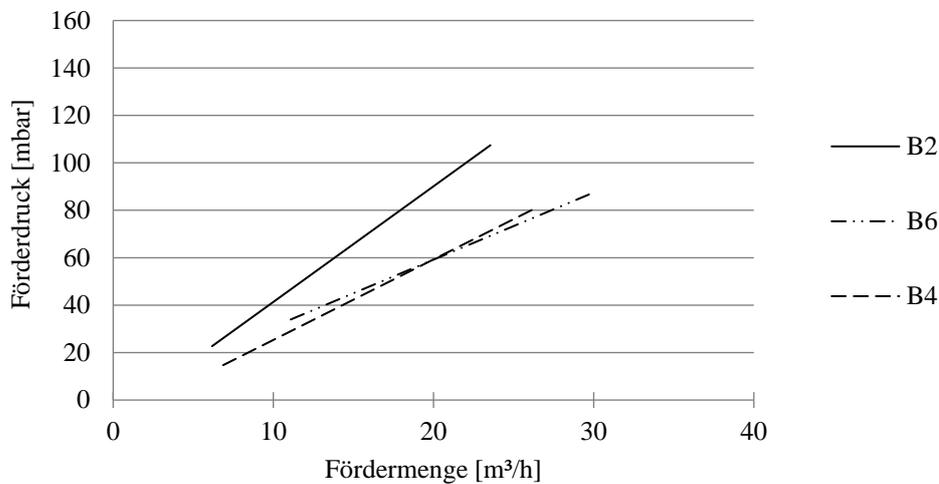


Abbildung 86: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Frischbetonmischungen mit erhöhtem Luftgehalt und Wassergehalt - Frischbetonmischung

Ein ähnliches Verhalten zeigte die Mischung B4 mit einem erhöhten Wassergehalt im Vergleich zur Referenzmischung B2 (siehe Abbildung 86 und Tabelle 40) [170]. Auch bei Mischung B4 waren die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Förderdrücke und der an der Spritzbetonmaschine gemessene Hydraulikdruck geringer als die Ergebnisse der Referenzmischung B2.

Tabelle 40: Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer, voreingestellte Fördermenge und Hydraulikdruck der Pumpe der Spritzbetonmaschine von Frischbetonmischungen mit erhöhtem Luft- und Wassergehalt

	Beiwert b [10^{-6} bar · h/m]	Fördermenge [m ³ /h]	Hydraulikdruck Pumpe [bar]
B2	3,74	12	70
B4	2,60	12	52
B6	2,17	12	57

Durch die Einführung künstlicher Luftporen in die Mischung B6 oder durch eine Erhöhung des W/B-Werts der Mischung B4 wurden die Pumpendrucke an der Spritzbetonmaschine im Vergleich zur Referenzmischung B2 um 13 bzw. 18 bar verringert. Die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Beiwerte b waren um $1,6 \cdot 10^{-6}$ bar · h/m bzw. $1,1 \cdot 10^{-6}$ bar · h/m geringer. Das heißt die geringen Beiwerte b der Mischungen mit erhöhtem Luftgehalt oder Wassergehalt lassen Rückschlüsse auf die an der Spritzbetonmaschine gemessenen geringen Pumpendrucke zu. Der erhöhte Luftgehalt und der erhöhte Wassergehalt der Mischungen B6 und B4 hatten einen positiven Einfluss auf die Pumpbarkeit.

4.2.2.3 Konsistenz

Mit der Mischung B7 wurde untersucht, ob die Konsistenz der Frischbetonmischung, gemessen mit dem Ausbreitmaß, Rückschlüsse auf die Pumpbarkeit zulässt. Es wurden für die Beurteilung der Pumpbarkeit die rheologischen Eigenschaften mit dem Gleitrohr-Rheometer und der Hydraulikdruck der Doppelkolbenpumpe an der Spritzbetonmaschine gemessen. Bei der Frischbetonmischung B7 wurde der Fließmittelgehalt im Vergleich zur Referenz B2 reduziert und das Ausbreitmaß betrug nur 46 cm. Das Ausbreitmaß der Mischung B2 betrug 55 cm. Trotz des geringen Ausbreitmaßes bei Mischung B7 wurde an der Spritzbetonmaschine kein höherer Hydraulikdruck der Pumpe gemessen (siehe Tabelle 41).

Tabelle 41: Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer, voreingestellte Fördermenge und Hydraulikdruck der Pumpe der Spritzbetonmaschine einer Frischbetonmischung mit reduziertem Ausbreitmaß

	Beiwert b [10^{-6} bar · h/m]	Fördermenge [m ³ /h]	Hydraulikdruck Pumpe [bar]
B2	3,74	12	70
B7	3,60	12	66

Die Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer ergaben ebenfalls kaum erhöhten Pumpprognosen (siehe Abbildung 87) und die Beiwerte b waren ähnlich (siehe Tabelle 41).

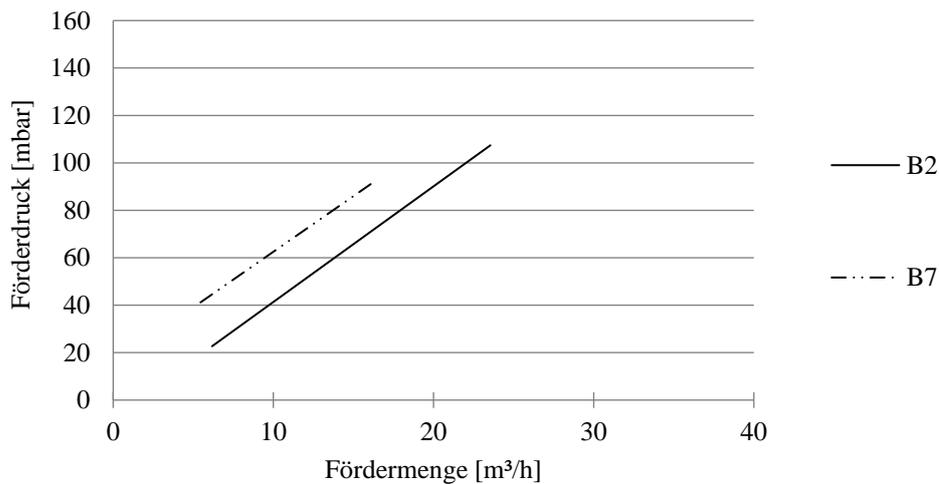


Abbildung 87: *Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer einer Frischbetonmischung mit reduziertem Ausbreitmaß - Frischbetonmischung*

Die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Pumpprognosen und die an der Spritzbetonmaschine gemessenen Pumpendrucke zeigten, dass mit dem Ausbreitmaß keine Rückschlüsse auf die Pumpbarkeit der Mischung gezogen werden können. Es konnte jedoch messtechnisch nicht erfasst werden, ob bei einer steiferen Konsistenz die homogene Untermischung des Beschleunigers gegeben war oder der Füllgrad der Kolben beeinflusst wurde.

4.2.2.4 Sieblinie Gesteinskörnung

Bei Mischung B8 wurde anstelle des dolomitischen Sandes 0/4 silikatischer Sand 0/4 verwendet. Die Sande hatten eine unterschiedliche Feinheit und Kornform. Beim Material Dolomit 0/4 handelte es sich um gebrochenes Gestein, beim silikatischen Sand zeigte die Körnung „eher kantige unregelmäßige Formen mit mäßiger Zurundung. Wenn runde Körner auftreten, dann bevorzugt als plattige Ovale [173]“ (siehe Abbildung 88).

a)



b)



Abbildung 88: *Sand 0/4 a) dolomitisch und b) silikatisch*

In Abbildung 89 sind die Sieblinien der beiden Sande dargestellt.

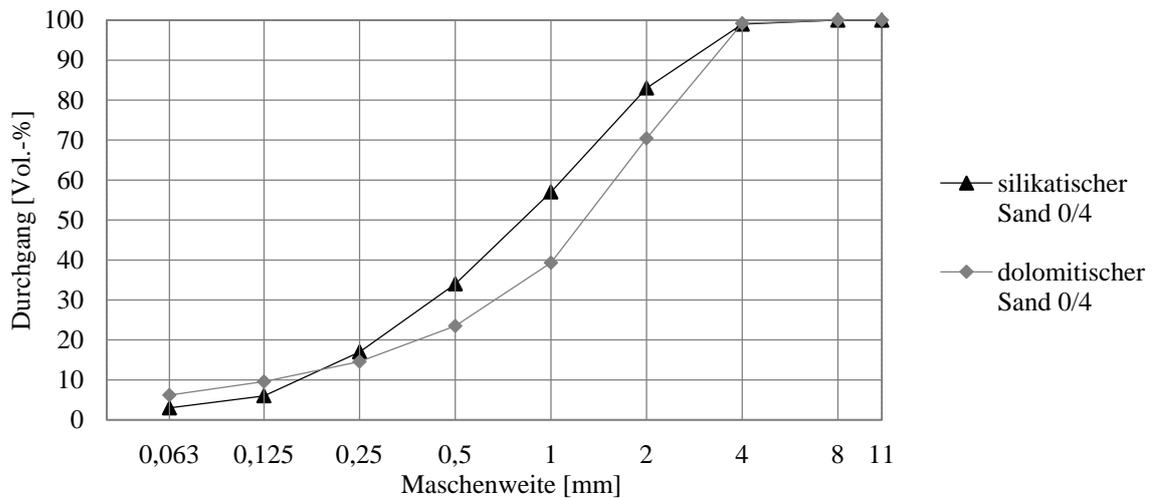


Abbildung 89: Sieblinien der Gesteinskörnung dolomitischer Sand 0/4 und silikatischer Sand 0/4 - Frischbetonmischung

Die unterschiedlichen Sieblinien der Sande, insbesondere der Feinteile $\leq 0,125$ mm, ergaben ein unterschiedliches Leimvolumen (siehe Tabelle 42).

Tabelle 42: Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen 0/4 - Frischbetonmischung

		B2	B8
Zement	[dm ³ /m ³]	131	137
Wasser	[dm ³ /m ³]	197	200
Gesteinskörnung $\leq 0,125$ mm	[dm ³ /m ³]	46	29
Luftgehalt	[dm ³ /m ³]	32	19
Gesamt Leimvolumen	[dm ³ /m ³]	406	385

Die Ergebnisse der Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer zeigten geringe Unterschiede bei der Pumpprognose der beiden Mischungen (siehe Abbildung 90).

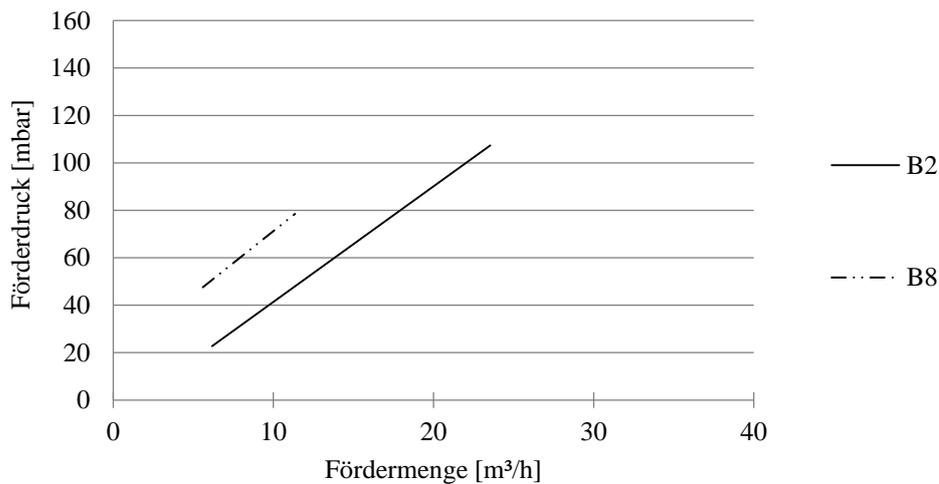


Abbildung 90: Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen 0/4 - Frischbetonmischung

Der Beiwert b der Referenzmischung B2 lag bei $3,74 \cdot 10^{-6} \text{ bar} \cdot \text{h/m}$ und der Beiwert b der Mischung B8 bei $4,12 \cdot 10^{-6} \text{ bar} \cdot \text{h/m}$. Der Hydraulikdruck der Pumpe, der an der Spritzbetonmaschine gemessen wurde, war bei Mischung B8 um 7 bar geringer im Vergleich zur Referenzmischung B2 (siehe Tabelle 43).

Tabelle 43: Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer, voreingestellte Fördermenge und Hydraulikdruck der Pumpe der Spritzbetonmaschine von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen 0/4

	Beiwert b [$10^{-6} \text{ bar} \cdot \text{h/m}$]	Fördermenge [m^3/h]	Hydraulikdruck Pumpe [bar]
B2	3,74	12	70
B8	4,12	12	63

Die Mischung B8 hatte ein geringeres Leimvolumen, was beim Pumpen zu einem geringeren Hydraulikdruck der Pumpe führte. Der mit dem Gleitrohr-Rheometer gemessene Beiwert b war jedoch im Vergleich zur Referenz B2 etwas höher. Hier ergibt sich ein Widerspruch zwischen dem geringeren Hydraulikdruck der Pumpe, der an der Spritzbetonmaschine gemessen wurde, und den mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten erhöhten Förderdrücken bzw. dem Beiwert b .

Das höhere Leimvolumen der Mischung B2 im Vergleich zur Mischung B8 ergab sich vorwiegend aus dem höheren Luftgehalt und dem höheren Anteil an Feinteilen der Gesteinskörnung. Wird der Luftgehalt nicht in die Betrachtung einbezogen, weil die Luft beim Pumpvorgang komprimiert werden kann, so ist der Unterschied deutlich geringer. B8 hatte einen Volumenanteil bestehend aus Zement, Wasser und Gesteinskörnung $\leq 0,125 \text{ mm}$ von 366 l/dm^3 und B2 von 374 l/dm^3 . Trotzdem sind die Ergebnisse der Pumpprognose, die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelt wurden, und die Messung des Hydraulikdrucks der Pumpe an der Spritzbetonmaschine in diesem Fall widersprüchlich.

4.2.2.5 Berechnung Betondruck

Ziel der rheologischen Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer war es, eine Vorhersage über die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen zu ermöglichen. Für einen Vergleich der mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Kennwerte und dem Hydraulikdruck der Pumpe, der an der Spritzbetonmaschine gemessen wurde, war es erforderlich die Kennwerte in einen Betondruck umzurechnen. Die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Kennwerte Beiwert a und Beiwert b können unter Berücksichtigung folgender weiterer Parameter in einen Betondruck umgerechnet werden (siehe auch Kapitel 2.3.3.3): Betondichte, Rohrdurchmesser, Förderhöhe, Fördermenge und Förderlänge.

Bei der Förderlänge wird nicht nur die tatsächliche Länge der Leitungen, sondern die äquivalente Förderlänge verwendet. Bei der äquivalenten Förderlänge wird berücksichtigt, dass der Förderwiderstand in Rohrbögen etc. etwas höher ist als in einer geraden Förderleitung. Aus Erfahrungswerten werden diese Einbauten mit einer äquivalenten Förderlänge berücksichtigt. Die Angaben dazu unterscheiden sich in der Literatur [77, 174], Beispiele siehe Tabelle 44.

Tabelle 44: Annahmen für eine äquivalente Förderlänge [174]

	Bogenradius [mm]	äquivalente Förderlänge [m]
Großrohrbogen 90°	1000	3
Rohrbogen 90°	281	1
Tropfende Kupplung	---	1

Für die mobile Spritzbetonmaschine Sika - PM500 wurden Parameter für eine äquivalente Förderlänge gewählt, um ein Berechnungsbeispiel zu ermöglichen. Sie beruhen auf **keiner** wissenschaftlichen und mit Versuchen belegten Grundlage. Folgende Annahmen wurden getroffen (siehe Tabelle 45):

Tabelle 45: Annahmen für eine äquivalente Förderlänge, Beispiel Sika - PM500

	äquivalente Förderlänge [m]
Bogen 90°	1
Bogen 45°	0,5
Reduktion DN 125 mm auf DN 80, Länge 1000 mm	3
Förderschlauch aus Gummi DN 80, Länge 5000 mm	7,5

Unter Berücksichtigung der oben genannten Annahmen ergab die Berechnung eine äquivalente Förderlänge von 37 m (siehe Anhang A.4). Als Förderhöhe wurden pauschal 5 m angesetzt.

Die Berechnung des Betondrucks anhand der Kennwerte des Gleitrohr-Rheometers erfolgte über folgende Gleichung:

$$p_s = a \cdot 4 \cdot \frac{L_{\ddot{a}}}{D} + b \cdot 16 \cdot Q \cdot \frac{L_{\ddot{a}}}{\pi \cdot D^3} + \rho \cdot g \cdot H \quad (15)$$

p_s	Betondruck_S [bar]
a	Beiwert a [bar]
$L_{\ddot{a}}$	äquivalente Förderlänge [m]
D	Rohrdurchmesser [m]
b	Beiwert b [bar · h/m]
Q	Fördermenge [m ³ /h]
ρ	Rohdichte des Betons [kg/m ³]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
H	Förderhöhe [m]

Der mit Gleichung (15) berechnete Betondruck wird im Folgenden mit dem Begriff „Betondruck_S“ bezeichnet.

Für einen Vergleich von dem Betondruck_S mit dem an der Spritzmaschine gemessenen Hydraulikdruck, muss dieser ebenfalls in den Betondruck umgerechnet werden. Der Hydraulikdruck wird über die geometrische Beziehung zwischen der Abmessung des Hydraulikzylinders und dem Durchmesser der Kolbenpumpe in den Betondruck umgerechnet, siehe Gleichung (16).

$$p_H = \frac{p_{HP}}{F/K} \quad (16)$$

p_H	Betondruck_H [bar]
p_{HP}	Hydraulikdruck der Doppelkolbenpumpe (Spritzbetonmaschine) [bar]
F	Querschnittsfläche der Kolbenpumpe [mm ²]
K	Querschnittsfläche des Hydraulikzylinders [mm ²]

Für die Berechnung sind die Durchmesser des Betonkolbens und des Hydraulikzylinders der Doppelkolbenpumpe der Spritzbetonmaschine erforderlich (siehe Tabelle 46).

Tabelle 46: Angaben Doppelkolbenpumpe der mobilen Spritzbetonmaschine Sika - PM500 aus [175]

	Durchmesser [mm]
Betonkolben	180
Hydraulikzylinder	110

Die Oberfläche des Betonkolbens F ergibt sich aus dem Durchmesser:

$$F = \pi \cdot \frac{D_{\text{Kolben}}^2}{4} = \pi \cdot \frac{18^2}{4} = 254 \text{ cm}^2 \quad (17)$$

Ebenso die Oberfläche des Hydraulikzylinders K:

$$K = \pi \cdot \frac{D_{\text{Zylinder}}^2}{4} = \pi \cdot \frac{11^2}{4} = 95 \text{ cm}^2 \quad (18)$$

Daraus ergibt sich das Verhältnis F/K:

$$\frac{F}{K} = \frac{254}{95} = 2,68 \quad (19)$$

Bei der Umrechnung des Hydraulikdrucks der Doppelkolbenpumpe in den Betondruck nach Gleichung (16) ist zu beachten, dass die mobile Spritzbetonmaschine einen geschlossenen Ölkreislauf hat und ein Niederdruck von 30 bar berücksichtigt werden muss, ab dem die Schaltventile erst öffnen. In Tabelle 47 sind ausgewählte Zahlenwerte für die so erfolgte Berechnung des Betondrucks aufgeführt. Der berechnete Betondruck wird als „Betondruck_H“ bezeichnet.

Tabelle 47: Umrechnung Hydraulikdruck der Doppelkolbenpumpe (Spritzbetonmaschine) in Betondruck an ausgewählten Beispielen

Hydraulikdruck Pumpe	[bar]	200	150	100	50
Hydraulikdruck Pumpe abzgl. Niederdruck	[bar]	170	120	70	20
Betondruck_H	[bar]	63	45	26	7

In Abbildung 91 und Tabelle 48 sind der Hydraulikdruck der Pumpe, der an der Spritzbetonmaschine gemessen wurde, der berechnete Betondruck_H und der berechnete Betondruck_S gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass sich die berechneten Betondrücke_S teilweise von den berechneten Betondrücken_H unterscheiden

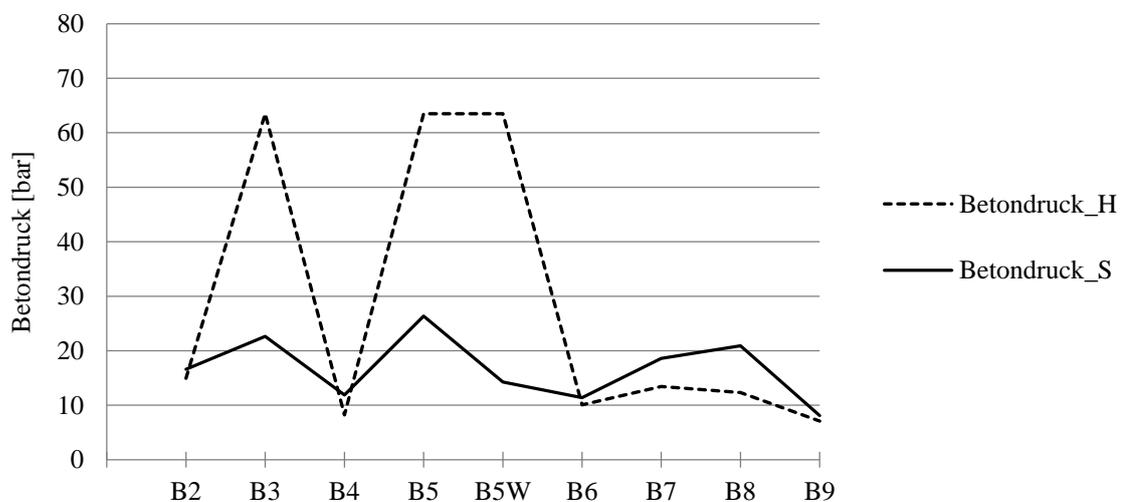


Abbildung 91: Berechneter Betondruck_H und berechneter Betondruck_S

Tabelle 48: Übersicht Fördermenge, Hydraulikdruck Pumpe, berechneter Betondruck_H und berechneter Betondruck_S

	Fördermenge [m ³ /h]	Hydraulikdruck Pumpe [bar]	berechneter Betondruck_H [bar]	berechneter Betondruck_S [bar]
B2	12	70	15	17
B3	12	Abbruch > 200	63	23
B4	12	52	8	12
B5	12	Abbruch > 200	63	26
B5W	8	Abbruch > 200	63	14
B6	12	57	10	11
B7	12	66	13	19
B8	12	63	12	21
B9	12	49	7	8

Eine lineare Korrelation von Betondruck_H und Betondruck_S ist aufgrund der großen Differenzen bei den Mischungen B3, B5 und B5W nicht sinnvoll. Es muss bewusst sein, dass bei der Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer keine hohen Pumpendrucke aufgebracht werden. Die hohen Pumpendrucke, die zu einem automatischen Abbruch der Pumpversuche führten, beeinflussen die Berechnung des Betondrucks_H maßgeblich. Bei den Messungen der Mischungen B3 und B5 wurden zwar hohe zu erwartende Förderdrücke mit dem Gleitrohr-Rheometer bestimmt, jedoch nicht in dem starken Ausmaß wie bei einer Berechnung des Betondrucks_H unter Berücksichtigung des Hydraulikdruckes der Doppelkolbenpumpe. Bei Mischung B5W hingegen zeigten die Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer nur sehr geringe zu erwartenden Förderdrücke an, obwohl der Pumpversuch abgebrochen werden musste.

Das heißt, mit dem Gleitrohr-Rheometer ist eine Tendenz zur Beurteilung der Pumpbarkeit der Frischbetonmischung mit unterschiedlichen Rezepturen möglich. Für eine detailliertere Beurteilung der Pumpbarkeit ist es sinnvoll weitere Parameter mit in die Betrachtung einzubeziehen (siehe Kapitel 4.2.2.6).

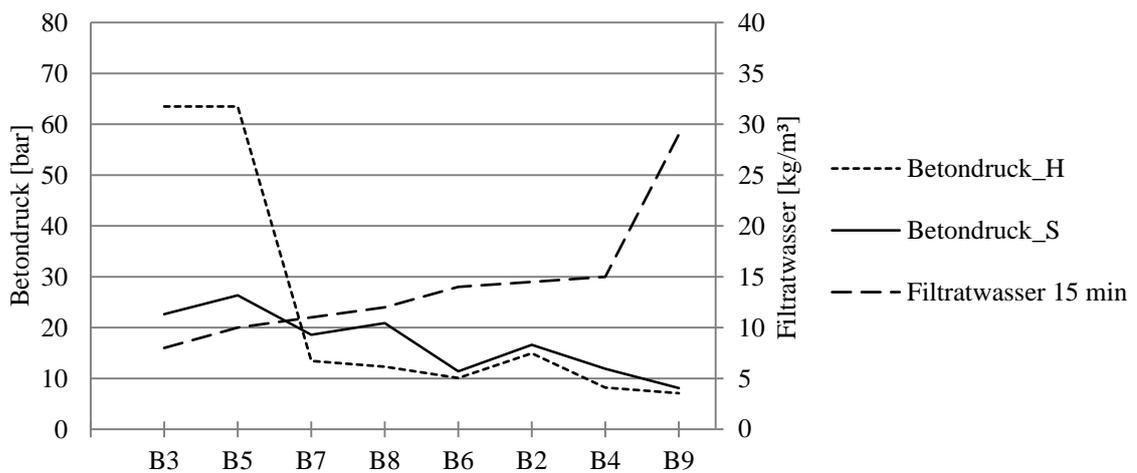
4.2.2.6 Stabilität und rheologische Kennwerte als Beurteilungskriterium für die Pumpbarkeit

Im Folgenden werden Zusammenhänge zwischen den Versuchen zur Bestimmung des Filtratwassers und dem berechneten Betondruck_H sowie dem berechneten Betondruck_S aufgezeigt. In Abbildung 92 sind die Messungen des Filtratwassers der Frischbetonmischungen systematisch aufsteigend dargestellt. Auffällig ist, dass der berechnete Betondruck_H sich vor allem bei sehr hohen Drücken gegenläufig zu den Ergebnissen der Filterpresse verhält (Mischung B3 und B5).

Bei den Mischungen B3 und B5 handelt es sich um Rezepturen mit einem geringen Bindemittel- und Wassergehalt im Vergleich zur Referenz B2. Der geringe Leimgehalt führte sowohl zu

hohen Pumpendrücken und zu einem Abbruch der Pumpversuche als auch zu geringen Filtratwassermengen. Die Berechnungen des Betondrucks anhand der Kennwerte des Gleitrohr-Rheometers zeigen im Vergleich zur Referenz B2 ebenfalls einen erhöhten Druck, jedoch sind die Werte deutlich geringer als bei dem berechneten Betondruck_H. Das heißt, werden die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten Kennwerte in Zusammenhang mit den Ergebnissen der Filterpresse beurteilt, so sind eine geringe Filtratwassermenge und ein erhöhter berechneter Betondruck_S ein Hinweis, dass die Mischungen, z. B. aufgrund eines zu geringen Leimvolumen, schwer oder sogar nicht pumpbar sein werden.

a)



b)

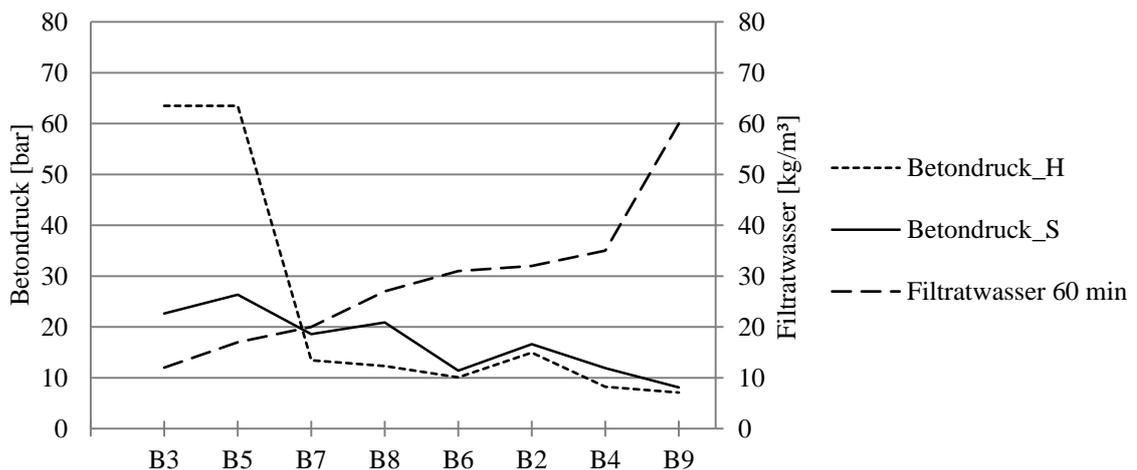


Abbildung 92: Berechneter Betondruck_H und berechneter Betondruck_S im Vergleich zur Filtratwassermenge gemessen a) nach 15 min b) nach 60 min

Anders verhält es sich bei Mischung B9 mit einer hohen Filtratwassermenge und einem geringen berechneten Betondruck_S. Der Beton konnte zwar gepumpt werden, jedoch war nach Einschätzung des Düsenführers und nach Beurteilung des Spritzbildes dieser Beton nur schlecht pump- und spritzbar. Bei den Frischbetonprüfungen zeigte sich optisch, dass die Mischung zum Sedimentieren neigte. In Abbildung 93 ist zu erkennen, dass sich ein Wasserfilm an der Betonoberfläche sammelte sobald der Beton bei der Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer in Ruhe war, also wenn das Rohr sich in der Position oben oder unten befand (siehe Abbildung 93 a und d). Während dem Messvorgang waren keine Auffälligkeiten zu erkennen (siehe Abbildung 93 b und c).

a)



b)



c)



d)



Abbildung 93: Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer der Mischung B9 a) Rohr in Position oben b) und c) Rohr beim Heruntergleiten d) Rohr in Position unten

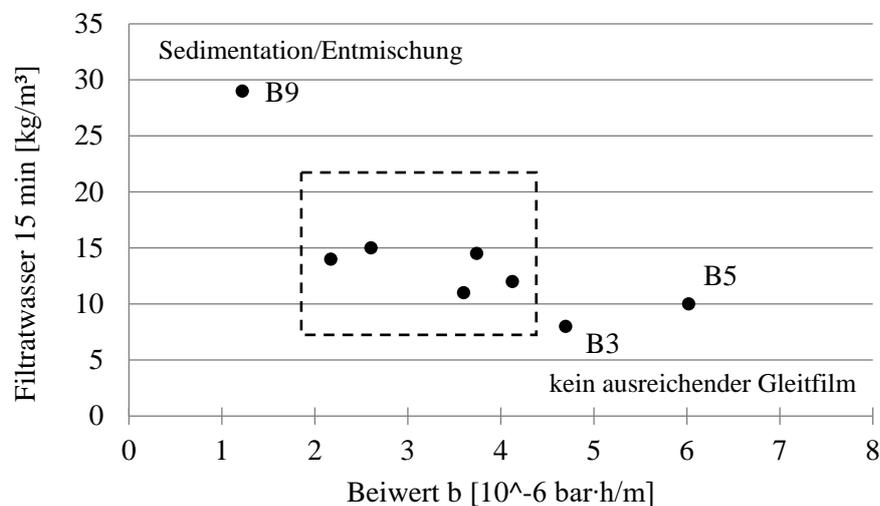
Frischbetonmischungen, die zum Sedimentieren neigen, können unter Druck die Gleitschicht beim Pumpvorgang nur schwer ausbilden und es steigt die Gefahr von Blockaden in der Leitung. Im Gleitrohr-Rheometer kann das messtechnisch nicht erfasst werden, weil die Prüfung nicht unter Druck ausgeführt wird. Die Ergebnisse zeigen tendenziell eine geringe Viskosität und optisch ist eine Ansammlung von Blutwasser an der Betonoberfläche zu erkennen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer in Kombination mit den Ergebnissen der Filtratwasserbestimmung ein umfassendes

Bild über die Pumpbarkeit der Frischbetonmischung geben. Es werden sowohl die rheologischen Eigenschaften des Betons als auch das Verhalten des Betons unter Druck bestimmt.

Für die Kontrolle der Pumpbarkeit der Frischbetonmischung auf der Baustelle ist es ggf. sinnvoll ein Verarbeitungsfenster zwischen der Filtratwassermenge (bestimmt nach 15 min oder nach 60 min) und dem Beiwert b , der mit den Gleitrohr-Rheometer ermittelt wird, zu erstellen. Mithilfe des Verarbeitungsfensters können die Mischungen hinsichtlich Pumpbarkeit beurteilt werden, da sowohl die Stabilität des Betons unter Druck als auch die rheologischen Eigenschaften der Gleitschicht in die Betrachtung mit einbezogen werden. In Abbildung 94 ist ein mögliches Verarbeitungsfenster am Beispiel der Ergebnisse der Großspritzenversuche dargestellt. Außerhalb des Verarbeitungsfensters liegen die Mischungen B3, B5 und B9.

a)



b)

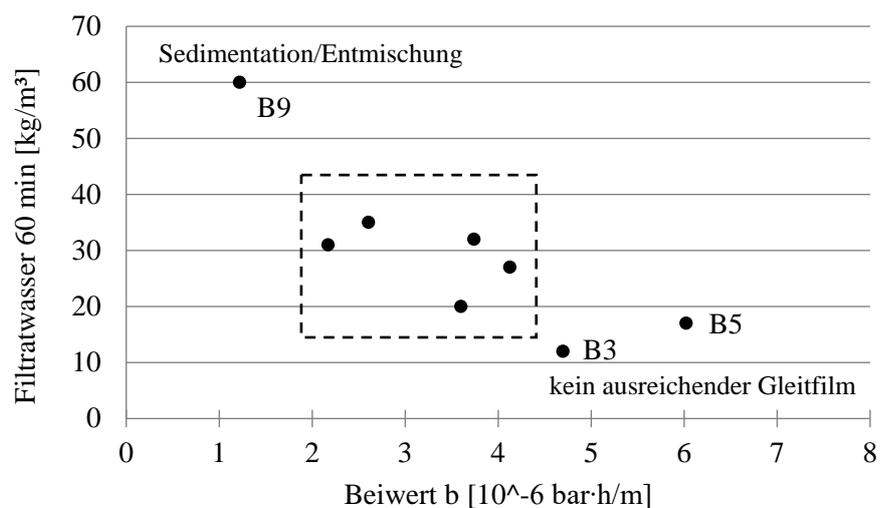


Abbildung 94: Beispiel für „Verarbeitungsfenster“ zur Beurteilung der Pumpbarkeit als Funktion von Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer und Filtratwassermenge gemessen a) nach 15 min und b) nach 60 min

Bei den Mischungen B3 und B5 handelte es sich um die Versuche, die aufgrund des hohen Hydraulikdrucks der Pumpe abgebrochen werden mussten. Bei Mischung B9 wurde ein anderes Bindemittel als bei den Versuchen B2 - B8 verwendet und die Mischung war nach Beurteilung des Düsenführers nur schlecht pumpbar, da sie unter anderem stark zum Sedimentieren neigte.

4.2.3 Zusammenfassung, Gegenüberstellung und Schlussfolgerung

Frischbeton

Die Verarbeitbarkeit von Frischbetonen mit unterschiedlicher Mischungszusammensetzung wurde im Labormaßstab untersucht und insbesondere auch die Aussagekraft von Prüfverfahren zur Beurteilung der Pumpbarkeit geprüft. Es wurden ein rheologisches Prüfverfahren, das Gleitrohr-Rheometer zum Erstellen von Pumpprognosen, und ein Prüfverfahren zur Beurteilung der Stabilität, die Filterpresse, eingesetzt. Außerdem wurden das Ausbreitmaß, die Trichterauslaufzeit und der Luftgehalt bestimmt. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- Ein geringes Leimvolumen und ein geringer W/B-Wert führen zu hohen Förderdrücken, die mit dem Gleitrohr-Rheometer gemessen werden können.
- Die Zugabe von Luftporenbildner führt zu geringeren Pumpprognosen, sofern ein ausreichender Volumenanteil an Mehlkorn und Wasser für die Ausbildung der Gleitschicht und zum Füllen der Zwischenräume der groben Gesteinskörnung vorhanden ist.
- Sowohl der Anteil der Gesteinskörnung $\leq 0,125$ mm wie die Substitution von Klinker durch Zusatzstoffe haben einen Einfluss auf die Pumpprognosen. Die Ergebnisse sind abhängig von der Feinheit, der Kornverteilung, der Packungsdichte und dem Wasseranspruch des Mehlkorns. Eine pauschale Aussage zum Einfluss des Mehlkorns auf die Pumpbarkeit ist nicht möglich.
- Die Stabilität der Mischungen unter Druck wurde mit der Filterpresse beurteilt. Der Einfluss unterschiedlicher Mischungszusammensetzungen auf die Stabilität, z. B. von Mischungen mit unterschiedlichen Wassergehalten, ist messbar.
- Es gibt keine Korrelation zwischen den rheologischen Kennwerten Beiwert a und Beiwert b, die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelt wurden, und dem Ausbreitmaß bzw. der Trichterauslaufzeit.
- Im Labormaßstab ist es nicht möglich die Eignung der Prüfverfahren zur Beurteilung der Pumpbarkeit zu überprüfen. Hierfür sind Pumpversuche mit einer Spritzbetonmaschine erforderlich.

Frischbetonmischungen

Im Rahmen von Pumpversuchen mit einer mobilen Spritzbetonmaschine wurde der Hydraulikdruck der Doppelkolbenpumpe während des Pump- und Spritzvorgangs visuell abgelesen, um die Pumpbarkeit der Frischbetonmischungen messtechnisch beurteilen zu können.

Folgende Erkenntnisse bezüglich der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen mit einer mobilen Spritzbetonmaschine wurden gewonnen:

- Das Leimvolumen beeinflusst die Pumpbarkeit. Bei Mischungen mit geringem Mehlkorn- und Wassergehalt wurden hohe Pumpendrucke an der Spritzbetonmaschine gemessen.
- Ein Mindestvolumenanteil an Mehlkorn- und Wasser ist erforderlich, um die Zwischenräume der Gesteinskörnung zu füllen und eine Gleitschicht ausbilden zu können. Bei zu geringen Mehlkorn- und Wassergehalten (hier $< 360 \text{ l/m}^3$) musste der Pumpvorgang aufgrund der hohen Förderdrücke abgebrochen werden. Fehlendes Mehlkorn- und Wasservolumen können nicht durch einen erhöhten Luftgehalt ausgeglichen werden.
- Bei einem ausreichendem Mehlkorn- und Wasservolumen wird die Pumpbarkeit durch die Zugabe von Luftporenbildner verbessert.
- Die mittels Ausbreitmaß gemessene Konsistenz der Mischungen steht in keinem Zusammenhang mit den an der Spritzmaschine gemessenen Hydraulikdruck der Pumpe und lässt dementsprechend keine Voraussage der Pumpbarkeit zu.

Zusätzlich zu den Pumpversuchen wurde die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischungen mit dem Gleitrohr-Rheometer, der Filterpresse, der Trichterauslaufzeit, dem Ausbreitmaß und dem Luftgehalt geprüft. Es wurde in diesem Zusammenhang untersucht, ob die gewählten Prüfverfahren für die Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen geeignet sind. Mit dem Gleitrohr-Rheometer wurden Pumpprognosen der Frischbetonmischungen erstellt, die größtenteils Rückschlüsse auf die an der Spritzbetonmaschine gemessenen Pumpendrucke ermöglichten. Grenzen ergaben sich, wenn die Mischungen zum Entmischen bzw. Sedimentieren neigten. Im Gleitrohr-Rheometer wurden keine hohen Pumpendrucke, wie sie bei der Förderung in der Spritzbetonmaschine auftreten, aufgebracht und es war messtechnisch keine Entmischung zu erfassen. Eine Entmischung in der Förderleitung führte jedoch bei den Pumpversuchen mit der Spritzbetonmaschine zu hohen Pumpendrucke bzw. zum Abbruch des Pumpversuchs aufgrund von Blockaden. In diesem Fall ist es sinnvoll die Ergebnisse der Filterpresse zu berücksichtigen. Die Filtratwassermenge gibt Rückschlüsse, ob die Mischungen unter Druck stabil bleiben. Hier wurden bei Mischungen, die zum Sedimentieren neigten, Filtratwassermenge $> 25 \text{ kg/m}^3$ nach 15 min und $> 60 \text{ kg/m}^3$ nach 60 min gemessen.

Das heißt, für die Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen sind sowohl die rheologischen Eigenschaften der Gleitschicht als auch die Stabilität der Mischungen von Bedeutung. Mit dem Ausbreitmaß können keine Rückschlüsse auf die Pumpbarkeit gezogen werden.

In weiteren Untersuchungen sollten noch folgende Punkte geklärt werden bzw. Möglichkeiten zur Klärung dieser Fragestellungen gefunden werden:

- Wie hoch ist der kritische Leimgehalt bzw. das Mehlkorn- und Wasservolumen der Frischbetonmischungen, damit die Mischungen pumpbar sind?
- Welche Rolle spielen dabei die genaue Zusammensetzung der Gleitschicht bzw. die rheologischen Eigenschaften der Gleitschicht?

- Wie kann die Dicke der Gleitschicht und ihre Zusammensetzung messtechnisch erfasst werden?
- Kann die Beurteilung der Stabilität durch eine Änderung des Versuchsablaufs mit der Filterpresse, z. B. Luftdruck und Versuchszeitraum, verbessert werden?
- Welche weiteren Ursachen für hohe Pumpendrucke und den damit verbundenem Abbruch des Pumpvorgangs gibt es? Welche Rolle spielen dabei die Eindüsung des Beschleunigers und ggf. Stopfer in der Düse?
- Welche weiteren Erkenntnisse zur Pumpbarkeit können durch die Messung des Betondrucks mithilfe von Drucksensoren an verschiedenen Orten der Leitung anstelle des Hydraulikdrucks der Pumpe gewonnen werden?

Schlussfolgerung

Die Ergebnisse von Versuchen im Labormaßstab mit Frischbeton und in Pumpversuchen mit Frischbetonmischungen führen zu denselben Rückschlüssen. Für die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen ist ein ausreichendes Leimvolumen zum Füllen der Zwischenräume der Gesteinskörnung und zur Ausbildung der Gleitschicht erforderlich und die Mischungen müssen unter Druck ausreichend stabil sein, damit während des Pumpvorgangs keine Blockaden in den Leitungen auftreten. Die Pumpbarkeit wird auch von der Rheologie des Leims, z. B. durch Änderungen des Wassergehalts oder durch den Einsatz von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln, beeinflusst. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren sind Frischbetonmischungen für Spritzbetone, die hinsichtlich Dauerhaftigkeit (u. a. eines reduzierten Versinterungspotentials) optimiert wurden, problemlos pump- und spritzbar. Ein Ansatz um die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen zu beurteilen ist ein Verarbeitungsfenster, das sich aus den für die Pumpbarkeit relevanten rheologischen Kennwerten und Kennwerten zur Beurteilung der Stabilität der Mischungen ergibt.

4.3 Festigkeiten

4.3.1 Junger Spritzbeton

4.3.1.1 Versuchsserie_A

Eine ausreichende Frühfestigkeit des jungen Spritzbetons ist Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Spritzbeton im Tunnelbau. Die Frühfestigkeit ist für den Schutz der Vortriebsmannschaft und die Sicherung des Ausbruchs während des Vortriebs erforderlich. Es konnte bei allen Spritzversuchen der Versuchsserie_A die Frühfestigkeitsklasse J2 erreicht werden (siehe Abbildung 95 bis Abbildung 98) [164, 167], die in der Regel für den Spritzbeton im Tunnelbau gefordert wird. In Abbildung 95 ist die Frühfestigkeitsentwicklung der Referenzmischung mit drei unterschiedlichen Beschleunigern mit einer Dosierung von je 7,7 M.-% vom Bindemittel dargestellt (Rezeptur siehe Kapitel 4.1.3.1, Tabelle 23). Der Verlauf der Frühfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit den Beschleunigern BE_A und BE_F war ähnlich. Die Frühfestigkeit ist vom J2 Bereich ab ca. 4 h in den J3 Bereich angestiegen. Der Spritzbeton mit Beschleuniger BE_D hatte zu Beginn eine höhere Frühfestigkeitsentwicklung. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Zeitraum zwischen 25 min und 4 h keine Messwerte für diese Mischung vorliegen und die grafische Darstellung in diesem Bereich nicht aussagekräftig ist.

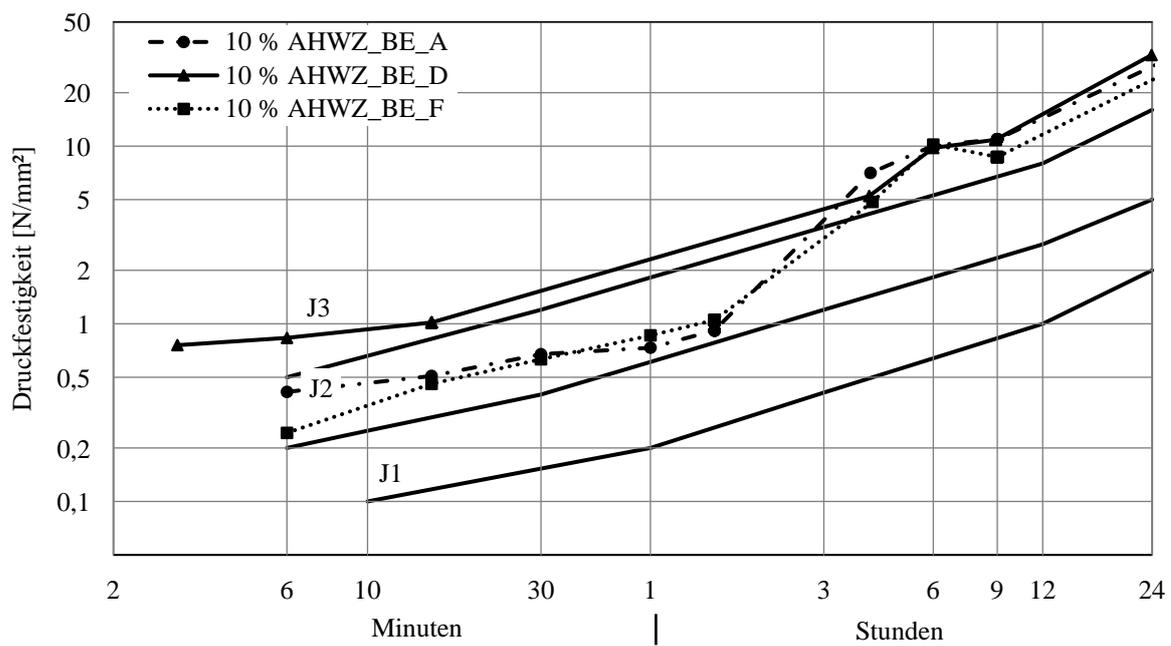


Abbildung 95: Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Referenzrezeptur „10 % AHWZ“ der Versuchsserie_A mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen

Die Frühfestigkeitsentwicklung von Spritzbetonmischungen mit 33 M.-% AHWZ im Bindemittel lag ebenfalls bis ca. 4 h im J2 Bereich und ist dann in den J3 Bereich angestiegen (siehe Abbildung 96, Rezeptur siehe Kapitel 4.1.3.1, Tabelle 23). Der geringere Klinkergehalt im Bindemittel führte im Vergleich zur Referenzmischung nicht zu geringeren Frühfestigkeiten.

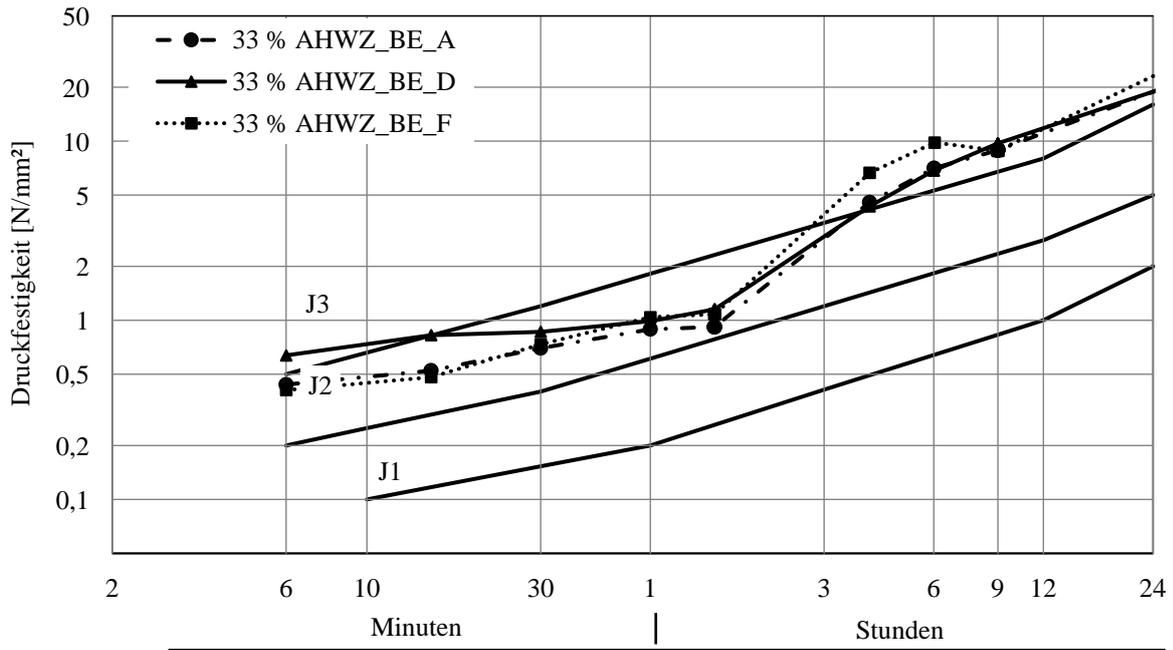


Abbildung 96: Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezeptur „33 % AHWZ“ der Versuchsserie_A mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen

Einen ähnlichen Verlauf wiesen die Ergebnisse der Frühfestigkeitsentwicklung von Spritzbetonen mit 33 M.-% Hütensand_A im Bindemittel auf (siehe Abbildung 97, Rezeptur siehe Kapitel 4.1.3.1, Tabelle 23).

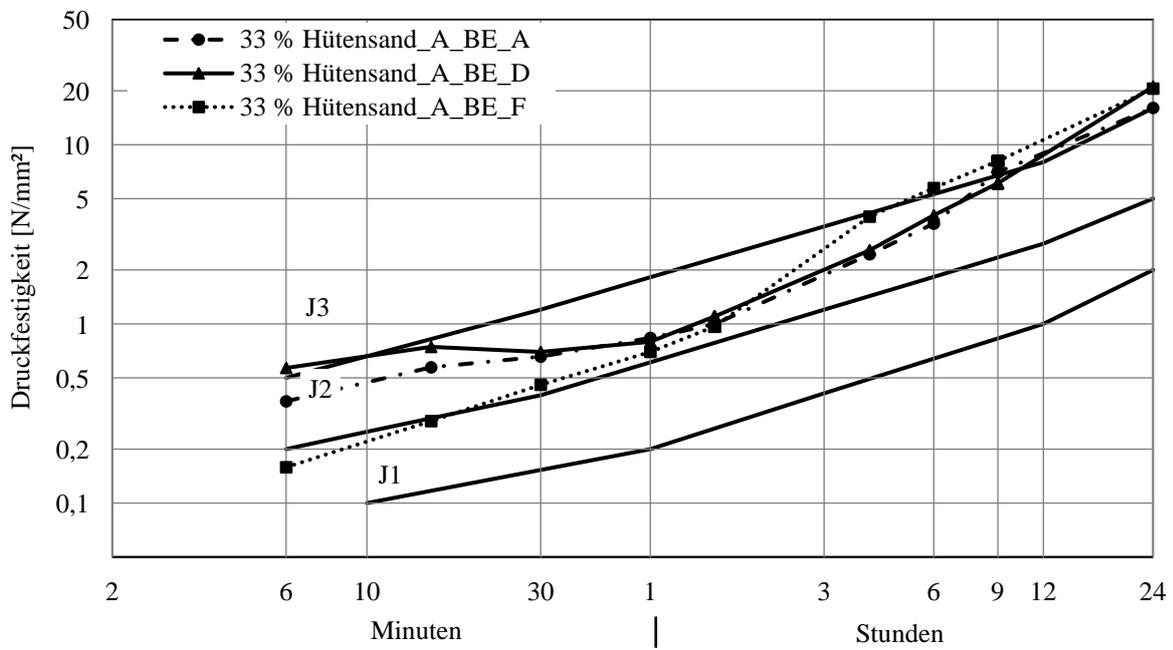


Abbildung 97: Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezeptur „33 % Hütensand_A“ der Versuchsserie_A mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen

Bei den Mischungen mit 23 M.-% Hüttensand_A und 10 M.-% Metakaolin_A im Bindemittel lag die Frühfestigkeitsentwicklung bei allen drei Mischungen mit den Beschleunigern BE_A, BE_D und BE_F bis 30 min im oberen J2 Bereich bzw. unteren J3 Bereich, bis ca. 2 h im J2 Bereich und ist dann in den J3 Bereich angestiegen (siehe Abbildung 98, Rezeptur siehe Kapitel 4.1.3.1, Tabelle 23).

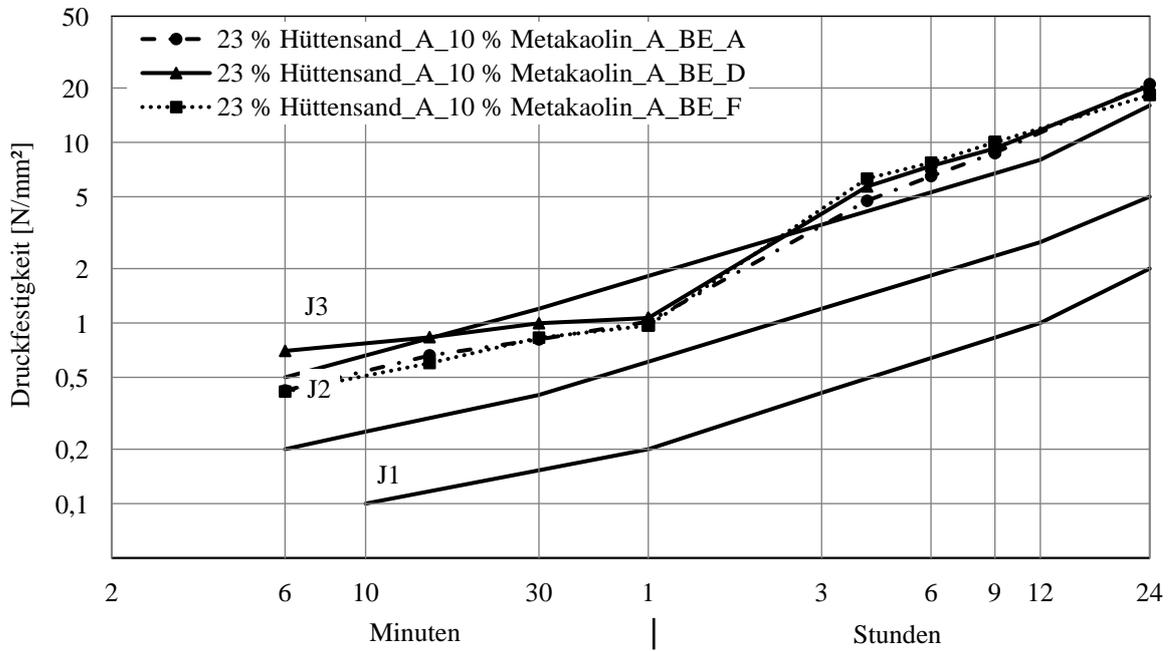


Abbildung 98: Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezeptur „23 % Hüttensand_A und 10 % Metakaolin_A“ der Versuchsserie_A mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen

Alle Mischungen, die hinsichtlich eines geringen Versinterungspotentials entwickelt wurden, erreichten die geforderte Frühfestigkeitsklasse J2. Sie hatten im Vergleich zur Referenzmischung keine geringere Frühfestigkeitsentwicklung.

Bei der Beurteilung der Frühfestigkeitsentwicklung ist aber zu berücksichtigen, dass der Beschleunigergehalt bei allen Mischungen auf das gesamte Bindemittel von 420 kg/m^3 bezogen wurde. Bei den Mischungen mit Zusatzstoffen ergaben sich dadurch höhere Beschleunigergehalte bezogen auf den Klinkergehalt im Bindemittel (siehe Tabelle 49, Angabe Beschleuniger [% v. Z]). Der Beschleunigergehalt der Referenzmischung „10 % AHWZ“ ist mit 8,5 M.-% vom Zement damit um ca. 2 % geringer als bei den weiteren Mischungen. Die Frühfestigkeitsentwicklung war im Vergleich zur Referenzmischung trotz geringerer Klinkergehalte im Bindemittel bei diesen Mischungen nicht niedriger.

Tabelle 49: Beschleunigergehalte der Rezepturen der Versuchsserie_A - Spritzbeton

			10 % AHWZ	33 % Hüttensand _A	33 % AHWZ	23 % Hüttensand_A ⁴ 10 % Metakaolin_A ⁵
Zement	CEM I 52,5 N	[kg/m ³]	380	280	280	280
Zusatzstoff	Zusatzstoff 1	[kg/m ³]	40	140	140	98
	Zusatzstoff 2	[kg/m ³]	---	---	---	42
Beschleuniger	BE_A/BE_D/BE_F	[% v. BM]	7,7	7,0	7,0	7,0
Beschleuniger	BE_A/BE_D/BE_F	[% v. Z]	8,5	10,5	10,5	10,5

4.3.1.2 Versuchsserie_B

Die Spritzbetone der Mischungen B2 bis B8 der Versuchsserie_B erreichten alle die Frühfestigkeitsklasse J2 und sind damit für einen Großteil der Anwendungen von Spritzbeton geeignet (siehe Abbildung 99 und Abbildung 100, Rezeptur siehe Kapitel 4.1.3.2, Tabelle 24 und Tabelle 25).

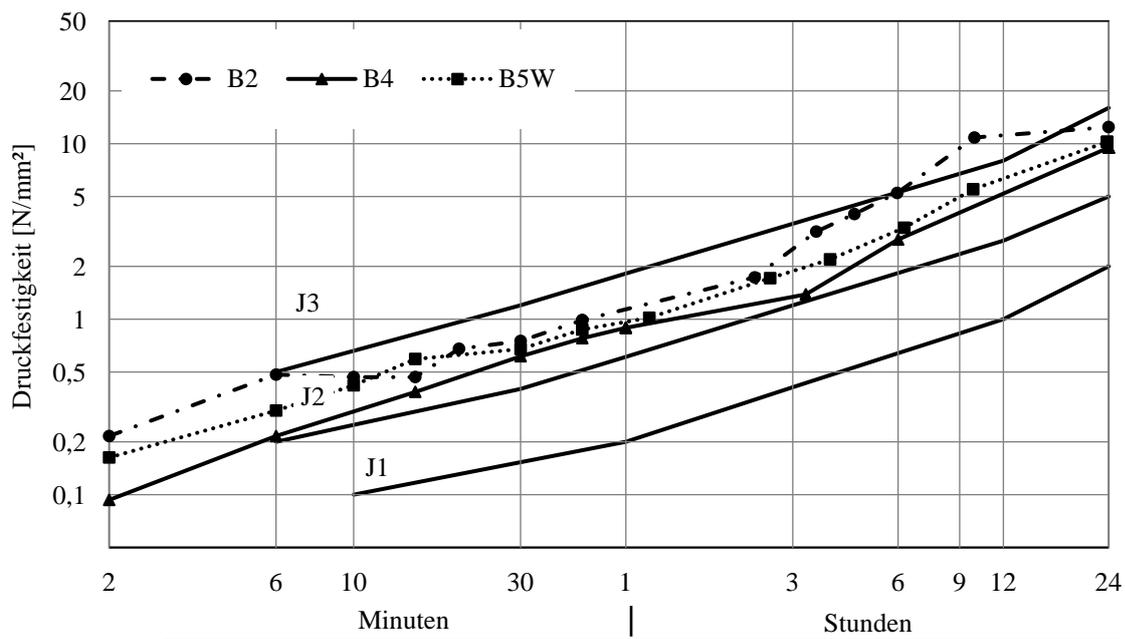


Abbildung 99: Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezepturen B2, B4 und B5W der Versuchsserie_B

Die Baustellenrezeptur, Mischung B9, war zu Beginn im J1 Bereich, erreichte aber nach ca. 30 Minuten ebenfalls die Frühfestigkeitsklasse J2. Bei den Mischungen B2 bis B8 betrug der Klinkergehalt im Bindemittel nur ca. 260 - 275 kg/m³ und war damit im Vergleich zur Mischung B9 mit einem Zementgehalt von 423 kg/m³ sehr gering (siehe Kapitel 3.1.4.1,

⁴ Zusatzstoff 1

⁵ Zusatzstoff 2

Tabelle 10 und Kapitel 4.1.3.2, Tabelle 24 und Tabelle 25). Trotz des geringeren Klinkergehalts im Bindemittel wurden keine geringeren Frühfestigkeiten gemessen.

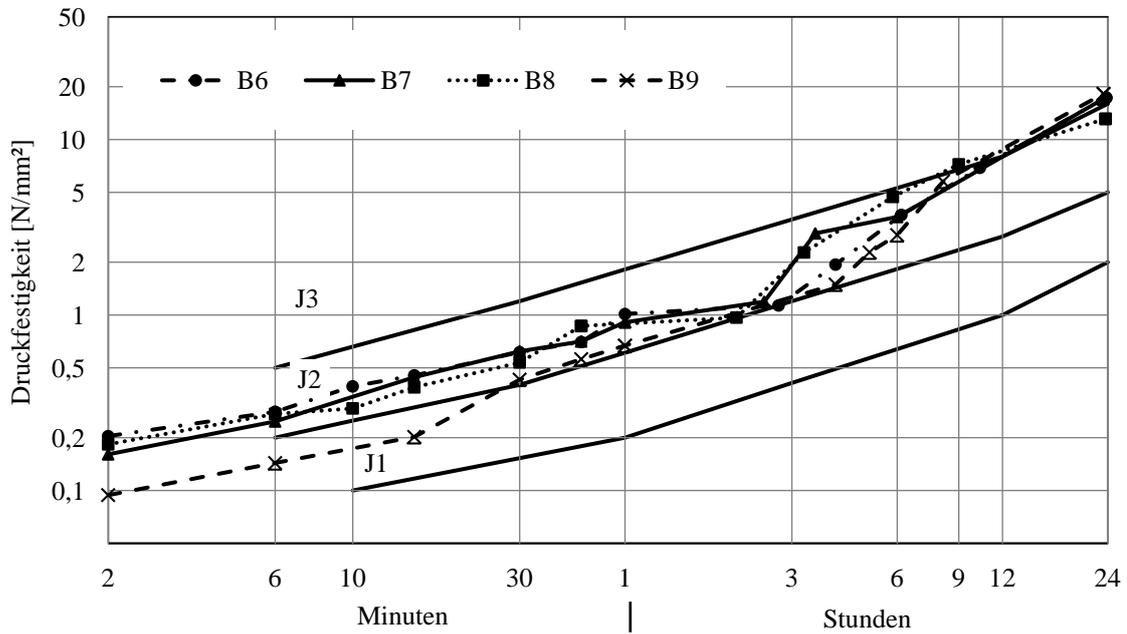


Abbildung 100: Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezepturen B6, B7, B8 und B9 der Versuchsserie_B

Der Beschleunigergehalt betrug bei allen Mischungen 7 M.-% bezogen auf den gesamten Bindemittelgehalt. Betrachtet man den Beschleunigergehalt in Bezug auf den Klinkergehalt, ergeben sich deutliche Unterschiede. Bei Mischung B9 lag der Beschleunigergehalt bezogen auf den Klinker bei 7,0 M.-%, bei den Mischungen B2 - B8 bei 10,6 M.-%. Die Rezepturentwicklung der Mischungen B2 - B8 beruhte auf dem Prinzip der dichten Packung. Inwiefern die Zusatzstoffe im Bindemittel, insbesondere das Feinstkalzit und der Hüttensand sowie die Kombinationen, einen Beitrag zur Frühfestigkeit liefern ist Gegenstand laufender Untersuchungen im Forschungsprojekt „ASSpC - Advanced and Sustainable Sprayed Concrete“ [146, 159, 176].

4.3.2 Spritzbeton

4.3.2.1 Versuchsserie_A

In Abbildung 101 ist die Druckfestigkeit von Bohrkernen der Spritzbetonproben zu einem Prüfzeitpunkt von 28 d dargestellt. Die Druckfestigkeit wurde als Mittelwert aus je sechs Bohrkernen ermittelt. Es wurden je Mischung mit den Beschleunigern BE_A, BE_D und BE_F zwei Bohrkern geprüft. Die höchste Druckfestigkeit von 53 N/mm² wurde bei der Mischung mit 23 M.-% Hüttensand_A und 10 M.-% Metakaolin_A erreicht. Die geringste Druckfestigkeit mit 44 N/mm² hatte die Mischung mit 33 % Hüttensand. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei den hinsichtlich einer Reduzierung des Versinterungspotentials optimierten Mischungen mit 33 M.-% AHWZ, 33 M.-% Hüttensand_A oder der Bindemittelkombination

23 M.-% Hüttensand_A und 10 M.-% Metakaolin_A keine negativen Auswirkungen auf die Festigkeit im Vergleich zur Referenzmischung mit 10 M.-% AHWZ ergeben haben.

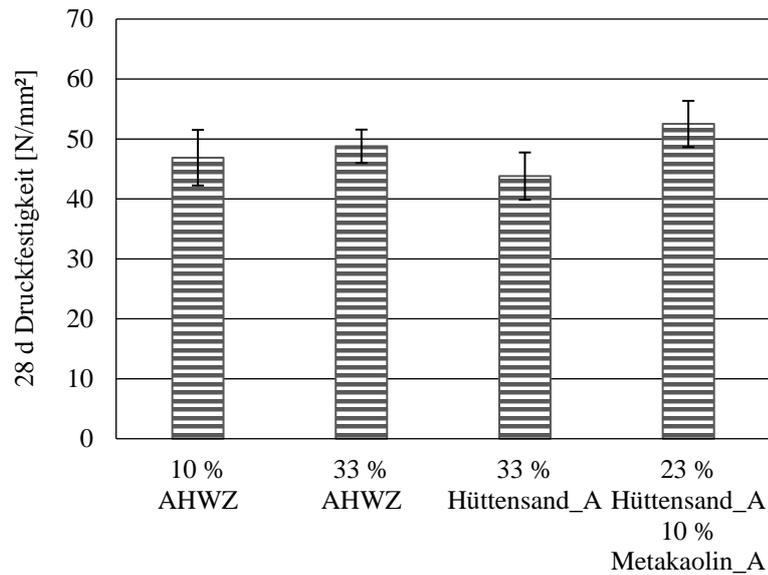


Abbildung 101: 28 d Druckfestigkeit von Bohrkernen aus Spritzkisten (Prüfung durchgeführt durch Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH)

4.3.2.2 Versuchsserie_B

Die Druckfestigkeit des Spritzbetons wurde 28 d nach Herstellung an je drei Bohrkernen, die aus Spritzkisten entnommen wurden, geprüft.

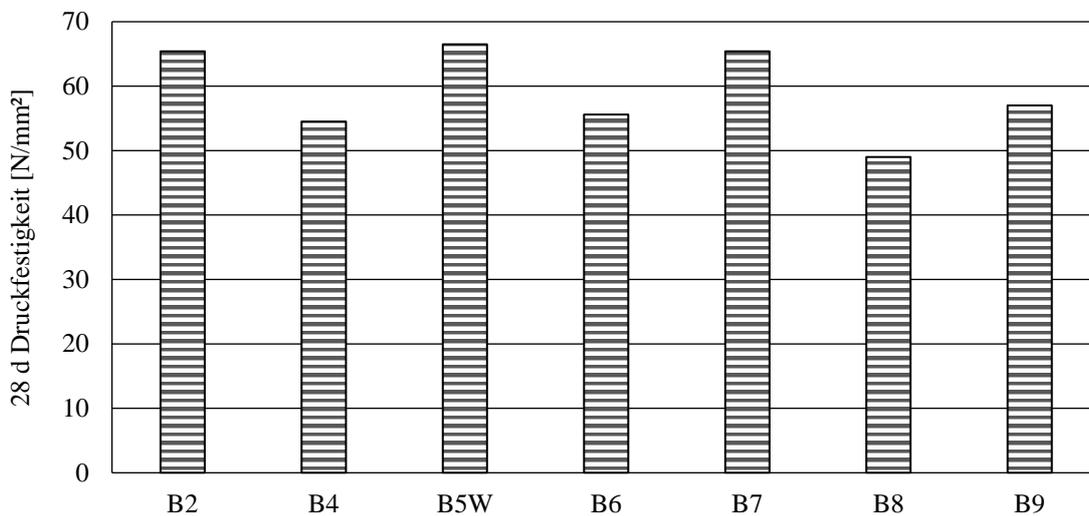


Abbildung 102: 28 d Druckfestigkeit von Bohrkernen aus Spritzkisten (Prüfung durchgeführt an der TU Graz)

Bei den Mischungen B2 bis B8 wurde ein hinsichtlich Dauerhaftigkeit optimierter Zement CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N eingesetzt. Die Druckfestigkeit dieser Mischungen lag im Bereich zwischen 49 N/mm² und 65 N/mm². Mischung B9 mit einem CEM I 42,5 R SR0 hatte eine

Druckfestigkeit von 57 N/mm² (siehe Abbildung 102). Es sind keine negativen Auswirkungen auf die Druckfestigkeit bei Verwendung des CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N zu erwarten.

4.3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Frühfestigkeitsentwicklung und der 28 d Druckfestigkeit von Spritzbetonen, die hinsichtlich einer Reduzierung des Versinterungspotentials optimiert wurden, zeigten keine negativen Auswirkungen im Vergleich zu den Referenzmischungen. Sie sind für den Einsatz in der Praxis geeignet. Jedoch sind weitere Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit des Spritzbetons, z. B. durch eine auf den Klinkergehalt bezogene hohe Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers, im Einzelfall zu untersuchen.

5 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung von Spritzbetonrezepturen mit einem reduzierten Versinterungspotential, welche die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischungen sowie die Frühfestigkeitsentwicklung der jungen Spritzbetone und die Festigkeitsentwicklung der Spritzbetone erfüllen.

Das Versinterungspotential wurde in Auslaugversuchen an Mörtel-, Spritzmörtel- und Spritzbetonproben mit unterschiedlicher Mischungszusammensetzung untersucht und mittels des sogenannten RV-Werts (RV=Reduziertes Versinterungspotential) nach dem Merkblatt „Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials“ [3] beurteilt.

Versuchsreihen an Mörtelproben mit W/B-Werten im Bereich zwischen 0,40 und 0,55 ergaben, dass eine Verringerung des W/B-Werts mit einer Verringerung des RV-Werts korreliert. Die Calciumauslaugung wurde bei der Mischung W/B-Wert=0,40 um ca. 35 % im Vergleich zur Mischung W/B-Wert=0,55 reduziert. Die geringere Calciumauslaugung ist auf eine geringere Porosität der Mischungen mit niedrigen W/B-Werten zurückzuführen. Mörtelproben mit einer Substitution des Klinkers von jeweils 30 M.-% Flugasche, Hüttensand_A oder AHWZ erreichten einen RV-Wert im Bereich zwischen 0,62 - 0,65 kg/t und waren damit um ca. 30 - 35 % geringer als der Mittelwert der Referenzmischung mit RV=0,97 kg/t. Die geringste Calciumauslaugung einer Mörtelprobe wurde mit RV=0,43 kg/t bei einer Substitution von 15 M.-% des Klinkers mit Metakaolin_A erreicht. Der RV-Wert ist um ca. 55 % geringer als der Mittelwert der Referenzmischung. Die geringen RV-Werte von Mischungen mit Zusatzstoffen im Bindemittel sind auf Verdünnungseffekte, durch einen geringeren Anteil an Klinker im Bindemittel, auf chemisch-reaktive Einflüsse der Zusatzstoffe und eine Gefügeverdichtung zurückzuführen.

Die Erkenntnisse der Mörtelversuche waren auf die Ergebnisse von Spritzmörtelproben mit gleichen Ausgangsstoffen übertragbar. Bei nahezu gleicher Mischungszusammensetzung, mit Ausnahme des Beschleunigers und des Fließmittels, waren die Ergebnisse der Auslaugversuche von Mörtel- und Spritzmörtelproben ähnlich. Es konnte diesbezüglich kein Einfluss des Beschleunigers oder des Spritzverfahrens festgestellt werden.

Das Auslaugverhalten wurde außerdem an Spritzbetonen, welche mit gleichen Bindemittel(kombinationen) wie die Mörtel- und Spritzmörtelproben hergestellt wurden, untersucht. Die geringste Auslaugung mit RV=0,33 kg/t wurde bei Spritzbetonen mit einer Bindemittelkombination von 23 M.-% Hüttensand_A und 10 M.-% Metakaolin_A erreicht. Der RV-Wert war um ca. 60 % geringer als der Mittelwert von Spritzbetonen mit 10 M.-% AHWZ im Bindemittel. In einer weiteren Versuchsreihe wurde das Versinterungspotential von Spritzbetonen mit einer Bindemittelkombination aus 66 M.-% CEM I, 19 M.-% Hüttensand_B, 8 M.-% Metakaolin_C und 7 M.-% Feinstkalzit untersucht. Die RV-Werte waren ebenfalls sehr gering und lagen im Bereich 0,28 kg/t - 0,32 kg/t.

Die Ergebnisse der Auslaugversuche mit Mörtel-, Spritzmörtel- und Spritzbetonproben ergaben die gleichen Erkenntnisse. Die Calciumauslaugung wird durch den Klinkergehalt im Bindemittel, den Einsatz von chemisch-reaktiven Zusatzstoffen und der Porosität der Proben wesentlich beeinflusst. Die weiterführende Untersuchung dieser Einflussfaktoren ist

Gegenstand des laufenden Forschungsprojektes „ASSpC - Advanced and Sustainable Sprayed Concrete“ [145, 159].

Für den erfolgreichen Einsatz von Spritzbetonrezepturen mit reduziertem Versinterungspotential ist die Verarbeitbarkeit (Pumpbarkeit) der Frischbetonmischungen Voraussetzung. Die Änderung der Bindemittelzusammensetzung hat Auswirkungen auf den Leimgehalt, den Wasserbedarf und den Klinkergehalt, z. B. durch die meist geringere Dichte von Zusatzstoffen. Inwiefern diese Änderungen die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen beeinflussen, wurde an Frischbetonen im Labormaßstab und im Rahmen von Pumpversuchen mit einer mobilen Spritzbetonmaschine an Frischbetonmischungen untersucht.

Im Labormaßstab wurde die Untersuchung der Pumpbarkeit mit einem rheologischen Prüfverfahren, einem Gleitrohr-Rheometer, und einem Prüfverfahren zur Beurteilung der Stabilität, einer Filterpresse, durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass ein geringes Leimvolumen und ein geringer W/B-Wert zu hohen Pumpprognosen führten. Die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelten rheologischen Kennwerte ergaben keine Korrelation zu den Ergebnissen der parallel durchgeführten Konsistenzprüfungen (Ausbreitmaß und Trichterlaufzeit). Welche Parameter für die Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen geeignet sind, wurde in Pumpversuchen mit einer Spritzbetonmaschine verifiziert.

Die Pumpversuche zeigten, dass Frischbetonmischungen mit einem zu geringem Mehlkorn- und Wasservolumen nicht pumpbar sind (hier $< 360 \text{ l/m}^3$). Der Pumpendruck der Spritzmaschine erreichte 200 bar, was zum automatischen Abbruch des Pumpvorgangs führte. Die parallel durchgeführten Versuche mit dem Gleitrohr-Rheometer ergaben bei diesen Mischungen ebenfalls hohe Pumpprognosen. Ungünstig für die Pumpbarkeit sind auch Frischbetonmischungen mit hohen Filtratwassermengen. Bei den hier untersuchten Mischungen waren es Filtratwassermengen $> 25 \text{ kg/m}^3$ nach 15 min und $> 60 \text{ kg/m}^3$ nach 60 min, die mit der Filterpresse gemessen wurden. Eine hohe Filtratwassermenge ist ein Hinweis, dass die Mischungen unter Druck nicht ausreichend stabil bleiben und Blockaden in den Förderleitungen auftreten. Es ist sinnvoll bei der Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen sowohl die rheologischen Messergebnisse als auch die Ergebnisse zur Stabilität zu betrachten. Geringe Förderdrücke, die mit dem Gleitrohr-Rheometer bestimmt werden, weisen auf eine gute Pumpbarkeit hin. Jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Mischung auch unter Druck ausreichend stabil ist. Das Ausbreitmaß ist nicht geeignet, um die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen zu beurteilen.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Entwicklung von Spritzbetonrezepturen berücksichtigt werden muss, ist die Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons und die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons. Bei der Frühfestigkeit konnte die Klasse J2 erreicht werden, die für einen Großteil der Anwendungen im Tunnelbau ausreichend ist.

Die aufgeführten Untersuchungsergebnisse lieferten ein umfassendes Bild, welche Parameter bei der Rezepturentwicklung von Spritzbetonen mit reduziertem Versinterungspotential berücksichtigt werden müssen, damit die Mischungen in der Praxis eingesetzt werden können. Die wichtigsten Faktoren sind nachfolgend zusammengefasst.

Für die Reduzierung des Versinterungspotentials von Spritzbeton ist ein wesentlicher Einflussfaktor der Klinkergehalt im Bindemittel. Der Klinkergehalt kann durch den Einsatz von Zusatzstoffen verringert werden. Die Calciumauslaugung wird dabei zum einen durch Verdünnungseffekte und darüber hinaus durch den chemisch-reaktiven Einfluss der Zusatzstoffe reduziert. Des Weiteren beeinflusst der Wassergehalt der Mischungen und damit die Porosität des Spritzbetons das Versinterungspotential. Je dichter das Gefüge, umso weniger versinterungsrelevante Stoffe werden aus dem Spritzbeton ausgelaugt.

Die Änderung der Bindemittelzusammensetzung und des Wassergehalts hat aber nicht nur Auswirkungen auf das Versinterungspotential des Spritzbetons, sondern auch auf die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischungen. Sofern diese Mischungen ein ausreichendes Leimvolumen zum Füllen der Zwischenräume der groben Gesteinskörnung und zur Ausbildung einer Gleitschicht beim Pumpvorgang aufweisen und die Mischungen unter Druck ausreichend stabil bleiben, sind jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Pumpbarkeit der Frischbetonmischungen zu erwarten. Darüber hinaus wird die Pumpbarkeit der Frischbetonmischungen von den rheologischen Eigenschaften des Leims beeinflusst.

Eine weitere Einschränkung bei der Rezepturentwicklung ergibt sich aufgrund der Anforderungen an die Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons und an die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons. Die Festbetoneigenschaften werden durch den Klinkergehalt, die Bindemittelzusammensetzung, den Wassergehalt und den Beschleunigergehalt beeinflusst. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zur Festigkeitsentwicklung keine systematischen Versuchsreihen durchgeführt. Es wurde aber gezeigt, dass mit den hinsichtlich eines reduzierten Versinterungspotentials entwickelten Rezepturen eine für den Praxiseinsatz ausreichende Frühfestigkeit und Festigkeit erreicht werden kann.

Diese Arbeit zeigt, welche Aspekte bei der Entwicklung von Spritzbetonen mit einem reduzierten Versinterungspotential berücksichtigt werden müssen, um die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischungen und der Festbetoneigenschaften des Spritzbetons zu berücksichtigen.

Literatur

- [1] DIN EN 14487-1: Spritzbeton - Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität. Ausgabe März 2006.
- [2] ÖVBB-Richtlinie: Spritzbeton. Ausgabe Dezember 2009.
- [3] öbv-Merkblatt: Festlegung des Reduzierten Versinterungspotentials. Ausgabe Juli 2012.
- [4] ÖNORM B 3309-1: Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) - Teil 1: Kombinationsprodukte (GC/GC-HS). Ausgabe Dezember 2010.
- [5] ÖNORM B 3309-2: Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) - Teil 2: Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel (GS/GS-HS). Ausgabe Dezember 2010.
- [6] Kusterle, W.; Jäger, J.; John, M. et al.: Spritzbeton im Tunnelbau. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Betonkalender 2014 - Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7, Band 103. Ernst & Sohn, 2014, S. 303-390.
- [7] ÖNORM B 2203-1: Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 1: Zyklischer Vortrieb. Ausgabe Dezember 2001.
- [8] DIN EN 14487-2: Spritzbeton - Teil 2: Ausführung. Ausgabe Januar 2007.
- [9] DIN 18551: Spritzbeton - Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen. Ausgabe August 2014.
- [10] ZTV-ING Teil 5: Tunnelbau. Ausgabe Januar 2018.
- [11] Breitenbücher, R.: Zusammenhänge zwischen verschiedenen Regelwerken für Spritzbetone/-Mörtel in Deutschland. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2015. Eigenverlag, Alpbach, 2015.
- [12] Brux, G.; Linder, R.; Ruffert, G.: Spritzbeton, Spritzmörtel, Spritzputz - Herstellung, Prüfung und Ausführung. Müller, Köln-Braunsfeld, 1981.
- [13] Springenschmid, R.: Betontechnologie für die Praxis. Bauwerk Verlag, Berlin, 2007.
- [14] Schorn, H.; Sonnenberg, R.; Maurer, P.: Spritzbeton, Edition Beton Heft 6, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2005.
- [15] Eckardstein, K.E. v.: Pumpbeton und Betonpumpen, Herne Ausgabe 1983.
- [16] Ngo, T.T.; Kadri, E.H.; Cussigh, F. et al.: Relationship between concrete composition and boundary layer composition to optimise concrete pumpability. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16 (2012), Heft 2, S. 157-177.
- [17] Kaplan, D.; Larrard, F. de; Sedran, T.: Design of Concrete Pumping Circuit. *ACI Materials Journal* Volume 102 (2005), Heft 2, S. 110-117.
- [18] DIN EN 14488-2: Prüfung von Spritzbeton - Teil 2: Druckfestigkeit von jungem Spritzbeton. Ausgabe September 2006.
- [19] Galler, R.: Der zyklische Vortrieb von der Planung bis zur Ausführung - ein zusammenfassender Überblick. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Betonkalender 2014 - Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7, Band 103. Ernst & Sohn, 2014, S. 89-119.
- [20] Chabot, J.D.; Rehbock-Sander, M.: Entwässerung bergmännischer Tunnel - neue Tendenzen. *Schweizerische Bauzeitung* (2000), Heft 12, S. 244-248.

- [21] Lemke, S.; Bracher, G.; Klapperich, H.: Technologies for Waterproofing Systems of Underground Structures. Felsbau (2005), Heft 3, S. 50-54.
- [22] Kirschke, D.: Neue Tendenzen bei der Dränage und Abdichtung bergmännisch aufgefahrener Tunnel. Bautechnik (1997), Heft 1, S. 11-20.
- [23] Maidl, B.; Kirschke, D.: Abdichtungs- und Entwässerungssysteme bei Verkehrstunnelbauwerken - Forschungsbericht FE-Nr. 15.273/1996/ER. Ausgabe August 1998.
- [24] ÖVBB-Richtlinie: Tunnelentwässerung. Ausgabe April 2010.
- [25] Meinlschmidt, A.; Roschig, F.: Härtestabilisation von Dränagewässern - ein Beitrag zur Reduzierung der Betriebskosten in Tunnelbauwerken. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Tunnelbau 2002. Glückauf Verlag, Essen, 2001, S. 255-268.
- [26] Girmscheid, G.; Gamisch, T.; Meinlschmidt, A.: Versinterung von Tunneldrainagen - Empfehlungen für die Instandhaltung von Tunneln. Bauingenieur (2003), Vorab-Sonderdruck, S. 25-33.
- [27] Gamisch, T.; Girmscheid, G.: Versinterungsprobleme in Bauwerksentwässerungen. Bauwerk Verlag, Berlin, 2007.
- [28] Breitenbücher, R.; Springenschmid, R.; Dorner, H.W.: Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch besondere Auswahl von Zementen und Betonzusätzen. Beton-Information (1992), Heft 32, S. 10-15.
- [29] Wegmüller, M. C.: Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau / Tunnelbau. Stäubli, Zürich, 2001.
- [30] Abel, F.: Einsatz der Beobachtungsmethode zur Optimierung von Tunneldränagesystemen. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2003.
- [31] Maidl, B.; Maier, G.; Abel, F.: Untersuchungen und Maßnahmen zur Reduzierung des versinterungsbedingten Wartungsaufwandes am Saukopftunnel. Bauingenieur 76 (2001), S. 392-403.
- [32] Naumann, J.; Maidl, B.; Heimbecher, F. et al.: Verbesserung von Tunneldrainagen unter Berücksichtigung des versinterungsbedingten Wartungsaufwands. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2002. Glückauf Verlag, Essen, 2001, S. 352-407.
- [33] RI-BWD-TU: Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln. Ausgabe Dezember 2007.
- [34] Schockemöhle, B.: Kriterien zur Wahl der Abdichtungs- und Entwässerungskonzepte von Verkehrstunnelbauwerken. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1999.
- [35] Gamisch, T.; Meinlschmidt, A.; Muncke, M. et al.: Versinterung der Entwässerungsanlagen von Eisenbahntunneln - Verringerung des Reinigungsaufwands durch Härtestabilisation. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2004. Glückauf Verlag, Essen, 2003, S. 293-333.
- [36] Girmscheid, G.; Gamisch, T.; Meinlschmidt, A.: Versinterung von Tunneldrainagen - Empfehlungen für die Planung und Bauausführung von Tunneln in deszendente Wässern. Bauingenieur (2003), Sonderdruck, S. 478-487.
- [37] Galli, M.: Härtestabilisierung in kalkführenden Entwässerungen. Schweizerische Bauzeitung (2000), Heft 12, S. 249-253.

-
- [38] Galli, M.; Wirth, P.: Bereits bei der Entstehung gestoppt - Härtestabilisierung - Verfahren zur Verhinderung von Kalkablagerungen. Schweizer Bauwirtschaft 98 (1999), Heft 11, S. 23-25.
- [39] Girmscheid, G.; Gamisch, T.: Bauwerksentwässerung vor dem Hintergrund der Versinterung. Bau Praxis (2005), Heft 15, S. 22-24.
- [40] Girmscheid, G.; Gamisch, T.: Härtestabilisation reduziert Instandhaltungskosten von Tunneln (Teil I). Tunnel (2005), Heft 5, S. 38-45.
- [41] Girmscheid, G.; Gamisch, T.: Härtestabilisation reduziert Instandhaltungskosten von Tunneln (Teil II). Tunnel (2005), Heft 6, S. 20-35.
- [42] Vollmann, G.: Zur Härtestabilisierung als versinterungsreduzierende Maßnahme für Tunneldränagesysteme. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2005.
- [43] Wegmüller, M. C.: Anlagen und Produkte zur Verhinderung von Kalkablagerungen in Entwässerungssystemen (Produktwerbung), Riehen.
- [44] Wegmüller, M. C.: Verfahren zur Verhinderung von Ablagerungen in einem Entwässerungssystem. Erfinder: M. C. Wegmüller. Anmeldung: 14. Februar 1994, EP0638049B2.
- [45] Wegmüller, M. C.: Verfahren zur Konditionierung von Bergwässern in primären Entwässerungssystemen von Tunnelbauwerken. Erfinder: M. C. Wegmüller. Anmeldung: 17. Mai 2005, EP 1724240B1.
- [46] Wegmüller, M. C.: Depotsteine und Verfahren zur Verhinderung bzw. Verminderung der Bildung von Ablagerungen in Bauwerksentwässerungssystemen. Erfinder: M. C. Wegmüller. Anmeldung: 22. März 1999, EP 0950641A3.
- [47] Heimbecher, F.: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme Spritzbetone - Bericht zum Forschungsprojekt 98233, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Brücken- und Ingenieurbau Heft 30, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2000.
- [48] Kusterle, W.; Pichler, W.; Saxer, A.: Prüfverfahren zur Bestimmung des Versinterungspotentials von Spritzbeton - Einflussfaktoren. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 12, S. 847-852.
- [49] Breitenbücher, R.; Springenschmid, R.; Dorner, H.W. et al.: Verringerung chemischer Auslaugungen aus Spritzbetonauskleidungen zum Schutz von Tunneldränagen und Umwelt. Forschung+Praxis 34, S. 153-156.
- [50] Breitenbücher, R.: Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch Betonzusätze. In: Elkem GmbH (Hrsg.): Microsilica in der modernen Biontechnologie 1991, Allensbach, 1991, S. 36-51.
- [51] Pichler, W.; Wagner, H.; Insam, R.: Spritzbeton mit reduziertem Versinterungspotential - Praktische Anwendung auf österreichischen Großbaustellen. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2015. Eigenverlag, Alpbach, 2015.
- [52] Locher, F.W.; Rechenberg, W.; Sprung, S.: Beton nach 20jähriger Einwirkung von kalklösender Kohlensäure. Betontechnische Berichte (1984-85), S. 41-56.
- [53] Stein, V.: Untersuchungen zur Optimierung und Bewertung des Auslaugverhaltens versinterungsrelevanter Stoffe aus Spritzbetonen als Beitrag zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2004.
-

- [54] Chabot, J.D.: Umsetzen der Erkenntnisse in die Praxis: Probleme und Fallbeispiele Gotthard Basistunnel und Uetlibergtunnel. In: Romer, M. (Hrsg.): Symposium Bergwasserproblematik in Tunnelbauwerken. EMPA-Dübendorf, Dübendorf, 2001, S. 65-79.
- [55] Maidl, B.; Tallarek, F.; Rohrbeck, M.: Prüfverfahren zum Nachweis der Umweltverträglichkeit von Spritzbeton. Bauingenieur 71 (1996), S. 497-503.
- [56] Dietzel, M.; Rinder, T.; Leis, A. et al.: Koralm Tunnel as a Case Study for Sinter Formation in Drainage Systems - Precipitation Mechanisms and Retaliatory Action. Geomechanik und Tunnelbau 1 (2008), Heft 4, S. 271-278.
- [57] Dietzel, M.; Stadler, H.; Purgstaller, B. et al.: Aktuelle Herausforderungen bei der Versinterung von Tunneldränagen - Modellierungsansätze, Monitoringwerkzeuge und Präventionsstrategien. Geomechanik und Tunnelbau (2013), Heft 6, S. 743-753.
- [58] Dietzel, M.; Rinder, T.; Niedermayr, A. et al.: Ursachen und Mechanismen der Versinterung von Tunneldrainagen. BHM 153 (2008), Heft 10, S. 369-373.
- [59] Rinder, T.: Precipitation of Calcium Carbonates - Field Studies and Laboratory Experiments. Graz, TU Graz, Dissertation, 2012.
- [60] Pichler, C.; Saxer, A.; Lackner, R.: Differential-scheme based dissolution/diffusion model for calcium leaching in cement-based materials accounting for mix design and binder composition. Cement and Concrete Research 42 (2012), S. 686-699.
- [61] Pichler, C.; Saxer, A.; Unterberger, S. et al.: Reply to discussion of paper "Differential-scheme based dissolution/diffusion model for calcium leaching in cement-based materials accounting for mix design and binder composition". Cement & Concrete Research 58 (2014), S. 99-102.
- [62] Heissenberger, R.; Holcik, A.: Instandhaltung von Eisenbahntunneln - Strategie und Weitblick. Geomechanics and Tunneling 10 (2017), Heft 5, S. 516-523.
- [63] Schachinger, T.; Zagar, B.; Schwab, C. et al.: Aktuelle Forschungen der ÖBB Infrastruktur-AG zu Versinterungsmonitoring ohne Einschränkung des Eisenbahnbetriebs. Geomechanics and Tunneling 11 (2018), Heft 3, S. 277-285.
- [64] Benedix, R.: Bauchemie - Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [65] Hohberg, I.: Modellierung des Auslaugverhaltens - Abschlussbericht. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1999.
- [66] Hohberg, I.: Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [67] Hohberg, I.: Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe - Sachstandsbericht, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 458, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1996.
- [68] ÖNORM S 2116-4: Untersuchung verfestigter Abfälle Elutionstests über 24 Stunden, 64 Tage, 2 Tage. Ausgabe Januar 2001.
- [69] Sakoparnig, M.; Baldermann, A.; Thumann, M. et al.: Bestimmung der experimentellen Calcium-Auslaugung an Spritzbeton-Bohrkernen: Methodenvergleich und Update. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Eigenverlag, Alpbach, 2018.
- [70] Mayer, L.: Beton - keine Gefahr für Boden und Grundwasser. Vortrag auf dem Deutschen Betontag 1993. Veröffentlichung der Philipp Holzmann AG, Berlin, 1993.

-
- [71] ÖNORM S 2072 - Eluatklassen; (Gefährdungspotential) von Abfällen. Ausgabe Dezember 1990 (Februar 2000 zurückgezogen).
- [72] Sakoparnig, M.: Bestimmung der experimentellen Calcium-Auslaugung an Spritzbeton-Bohrkernen: Methodenvergleich und Update (Vortrag), Spritzbeton-Tagung 2018, Alpbach, 2018.
- [73] Secrieru, E.; Butler, M.; Mechtcherine, V.: Prüfen der Pumpbarkeit von Beton - Vom Labor in die Praxis. Bautechnik 91 (2014), Heft 11, S. 797-811.
- [74] Reinhold, M.: Methoden zur zielsicheren Vorhersage der Pumpbarkeit von Betonen mit nicht idealer Gesteinskörnungs-Sieblinie. BetonWerk International (2014), Heft 1, S. 56-59.
- [75] Secrieru, E.; Mechtcherine, V.: Zur Prüfung der Pumpbarkeit von Beton. Beton (2016), Heft 1+2, S. 18-23.
- [76] Secrieru, E.; Shirin, F.; Schröfl, C. et al.: Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology. Construction and Building Materials 114 (2017).
- [77] Kasten, K.: Gleitrohr-Rheometer. Ein Verfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Dickstoffen in Rohrleitungen. Dresden, Techn. Univ. Dresden, Dissertation, 2009.
- [78] Kaplan, D.: Pompage des bétons. Paris, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Doctorate Thesis, 2000.
- [79] Jacobsen, S.; Håvard, M.; Foon Lee, S. et al.: Pumping of concrete and mortar - State of the art. COIN Project report 5, Oslo Ausgabe 2008.
- [80] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zement-Taschenbuch. Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf, 2008.
- [81] Mezger, T.: Das Rheologie-Handbuch - Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. Vincentz Network, Hannover, 2010.
- [82] Nübling, F.: Förderung des Frischbetons durch Rohre. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1971.
- [83] Weber, R.: Rohrförderung von Beton. Beton Verlag GmbH, Düsseldorf, 1963.
- [84] Kaplan, D.; Larrard, F. de; Sedran, T.: Avoidance of Blockages in Concrete Pumping Process. ACI Materials Journal 102 (2005), Heft 3, S. 183-191.
- [85] Jolin, M.; Burns, D.; Bissonette, B. et al.: Understanding the Pumpability of Concrete. In: ECI Conference (Hrsg.): Proceedings Shotcrete for Underground Support XI, Davos, 2009.
- [86] Secrieru, E.: Pumping behaviour of modern concretes - Characterisation and prediction. Dresden, Technische Universität. Dresden, Dissertation, 2018.
- [87] Choi, M.; Kim, Y.J.; Kwon, S.H.: Prediction on pipe flow of pumped concrete based on shear-induced particle migration. Cement and Concrete Research 52 (2013), S. 216-224.
- [88] Phillips, R.J.; Armstrong, R.C.; Brown, R.A. et al.: A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics 4 (1992), Heft 1, S. 30-40.
- [89] Choi, M.; Roussel, N.; Kim, Y. et al.: Lubrication layer properties during concrete pumping. Cement and Concrete Research 45 (2013), S. 69-78.
-

- [90] Spangenberg, J.; Roussel, N.; Hattel, J.H. et al.: Flow induced particle migration in fresh concrete: Theoretical frame, numerical simulations and experimental results on model fluids. *Cement and Concrete Research* 42 (2012), S. 633-641.
- [91] Krause, T.; Oettel, B.: Baumaschinen. In: Krause, T.; Ulke, B. (Hrsg.): *Zahlentafeln für den Baubetrieb*. Springer Verlag, Wiesbaden, 2016.
- [92] DIN EN 1342-1: Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe. Ausgabe November 2003.
- [93] Ferraris, C.F.; Brower, L.E.: Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC, 2001.
- [94] Ngo, T.T.; Kadri, E.H.; Bennacer, R. et al.: Use of tribometer to estimate interface friction and concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping. *Construction and Building Materials* (2010), Heft 24, S. 1253-1261.
- [95] Chapdelaine, F.: *Etude fondamentale et pratique sur le pompage du béton*. Quebec, Canada, Laval University, Ph.D. Thesis, 2007.
- [96] Schleibinger: Sliper, http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%26nbsp%3B:.recent_news:SLIPER_%96_Determining_the_pumping_capacity_of_concrete.
- [97] Browne, R.; Bamforth, P.: Tests to Establish Concrete Pumpability. *ACI Journal* 74 (1977), Heft 5, S. 193-203.
- [98] Cleven, S.: Überprüfung des Wasserabsonderns von Beton - Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines Prüfverfahrens. *Beton* (2016), Heft 4, S. 136-142.
- [99] AS 1012.6: Methods of testing concrete - Method 6 - Method for the determination of bleeding concrete. Ausgabe 2014.
- [100] ASTM C232/C232M-14: Standard Test Method for Bleeding of Concrete. Ausgabe 2014.
- [101] ASTM C243-95: Standard Test Method for Bleeding of Cement Pastes and Mortars. Ausgabe 1995.
- [102] ASTM C940-10a: Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced -Aggregate Concrete in the Laboratory. Ausgabe 2010.
- [103] DBV Merkblatt: Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton. Ausgabe 2014.
- [104] DIN EN 480-4: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren - Teil 4: Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten). Ausgabe 2006.
- [105] Jossierand, L.; Larrard, F. de: A method for concrete bleeding measurement. *Materials and Structures* 37 (2004), Heft 274, S. 666-670.
- [106] Lieber, W.: Das Sedimentieren (Bluten) von Zementen. *Zement Kalk Gips* 21 (1968), Heft 11, S. 457-463.
- [107] Paus, H.: Die Wasserabsonderung bei frischen Zementleimen und nassen Steinmehlen. Aachen, Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1957.
- [108] RILEM Draft Recommendation; Concrete Permanent Committee: Bleeding of Concrete CPC-16. *Matériaux et Constructions* 16 (1983), Heft 91, S. 49-52.
- [109] Powers, T.: *The Properties of Fresh Concrete*. John Wiley & Sons, New York, 1968.
- [110] ASTM C941-10: Standard Test Method for Water Retentivity of Grout Mixtures for Preplaced -Aggregate Concrete in the Laboratory. Ausgabe 2010.
- [111] Hornung, F.: Vorgänge im Frischbeton bei der Entwässerung unter hohem Druck. München, Technische Universität München, Dissertation, 1986.

-
- [112] BAUER Unternehmensgruppe: Bedienungsanleitung BAUER Betonfilterpresse Ausgabe Mai 2015.
- [113] ÖVBB-Merkblatt: Weiche Betone. Ausgabe Dezember 2009.
- [114] Alonso, M.T.; Schäffel, P.: Das Wasserabsondern von Beton für Industrieböden - Laborergebnisse und Übertragbarkeit auf praktische Verhältnisse; Teil 2. Beton 2014 (12), S. 509-515.
- [115] Alonso, M.T.; Schäffel, P.: Das Wasserabsondern von Beton für Industrieböden - Laborergebnisse und Übertragbarkeit auf praktische Verhältnisse; Teil 1. Beton (2014), Heft 11, S. 49-65.
- [116] Alonso, M.T.; Schäffel, P.: Zielsichere Herstellung von Industriebetonböden - Praxis- und Laborergebnisse sowie Hinweise zur Stabilität; Teil 1. Beton (2015), Heft 1 + 2, S. 49-57.
- [117] Alonso, M.T.; Schäffel, P.: Zielsichere Herstellung von Industriebetonböden - Praxis- und Laborergebnisse sowie Hinweise zur Stabilität; Teil 2. Beton 2015 (2015), Heft 3, S. 110-114.
- [118] Bohrmann, B.: Prüfung des Blutens von Beton: ist die Prüfung mit der Betonfilterpresse nach ÖVBB-Merkblatt "Weiche Betone" eine Alternative?, Leimen Ausgabe Dezember 2014.
- [119] Heese, C.; Breit, W.: Ermittlung der Blutneigung im Eimerverfahren - Verfahrensbedingte Einflussparameter. Beton (2012), Heft 4, S. 110-116.
- [120] Cotardo, D.; Lohaus, L.; Begemann, C.: Zum Entwässerungsverhalten von Beton unter hohem Druck - Einfluss der Fließgrenze des Feinstmörtels. In: Tue; N.V.; Krüger, M. et al. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium. TU Graz, Graz, 2018, S. 193-200.
- [121] Friedle, R.: Blüten des Frischbetons - Ursachen und Einflussgrößen auf die Wasserabsonderung des Frischbetons, Auswirkungen der Blutwasserabsonderung auf die Festbetoneigenschaften. Innsbruck, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Dissertation, 1998.
- [122] Beaupré, D.: Rheology of High Performance Shotcrete. Vancouver, University of British Columbia, PhD Thesis, 1994.
- [123] Bartos, P.: Fresh Concrete - Properties and Tests. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1992.
- [124] Feys, D.; Verhoeven, R.; Schutter, G. de: Pipe flow velocity profiles of complex suspensions, like concrete. Applied Rheology 18 (2008).
- [125] Jo, S.D.; Park, C.K.; Jeong, J.H. et al.: A Computational Approach to Estimating a Lubricating Layer in Concrete Pumping. Computers, Materials and Continua 27 (2012), S. 189-210.
- [126] Mechtcherine, V.; Nerella, V.N.; Kasten, K.: Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer. Construction and Building Materials 53 (2014), S. 312-323.
- [127] Schutter, G. de: Smart casting of concrete structures by active control of rheology, https://cordis.europa.eu/project/rcn/202650_en.html [Zugriff am: 19.02.2019].
- [128] Jolin, M.; Beaupré, D.: Understanding Wet-Mix Shotcrete: Mix Design, Specifications and Placement. In: Surface Support Liners 2003, Quebec City, Canada, 2003.
- [129] Thielen, G.; Spanka, G.; Grube, H.: Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel. Beton 47 (1997), Heft 8, S. 470-475.
-

- [130] Neumann, T.: Einflüsse auf die Pumpbarkeit von Beton. Beton (2012), Heft 5, S. 166-171.
- [131] DIN EN 206: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Ausgabe Januar 2017.
- [132] Höfler, J.; Schlumpf, J.; Jahn, M.: Sika Spritzbeton Handbuch, Zürich, 4. Ausgabe Februar 2012.
- [133] Schmidt, W.; Brouwers, H.J.H.; Kühne, H.-C. et al.: Optimierung der Robustheit von selbstverdichtendem Beton gegenüber Temperatureinflüssen. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 1, S. 13-21.
- [134] Kordts, S.: Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2005.
- [135] Puntke, W.: Forschen, Messen, Optimieren - Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. Beton (2002), Heft 5, S. 242-248.
- [136] Geisenhanslüke, C.: Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. Kassel, Universität Kassel, Dissertation, 2009.
- [137] Teichmann, T.: Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein. Kassel, Universität Kassel, Dissertation, 2007.
- [138] Reschke, T.: Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Dissertation, 2000.
- [139] Schwanda, F.: Der Bestwert der Kornzusammensetzung. Der Bauingenieur 31 (1956), Heft 2, S. 41-46.
- [140] Schwanda, F.: Der Hohlraumgehalt von Korngemischen. Beton 9 (1959), Heft 1, S. 12-17.
- [141] Andreasen, A.H.M.; Andersen, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). Kolloid-Zeitschrift 50 (1930), S. 217-228.
- [142] Fennis, S.: Design of ecological concrete by particle packing optimization. Delft, TU Delft, Dissertation, 2010.
- [143] Larrard, F. de; Sedran, T.: Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. Cement and Concrete Research 24 (1994), Heft 6, S. 997-1009.
- [144] Fuller, W.B.; Thompson, S.E.: The laws of proportioning concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers 33 (1907), S. 222-298.
- [145] Pauser, M.; Mittermayr, F.; Kusterle, W.: Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone - Forschungsantrag FFG Collective Research (unveröffentlicht) Ausgabe 2016.
- [146] Juhart, J.; Briendl, L.; Mittermayer, F. et al.: Optimierte Eigenschaften von Spritzbeton durch kombinierte Zusatzstoffe. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Eigenverlag, Alpbach, 2018.
- [147] Marquardt, I.: Ein Mischungskonzept für selbstverdichtenden Beton auf der Basis der Volumenkenngößen und Wasseransprüche der Ausgangsstoffe. Rostock, Universität Rostock, Dissertation, 2001.
- [148] Okamura, H.; Ouchi, M.: Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology (2003), Heft 1, S. 5-15.

-
- [149] DIN EN 1015-3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch). Ausgabe Mai 2007.
- [150] Mustafa, N.: Optimierung von Korngemischen für Ressourcen effizienten Beton mit Hilfe eines computerunterstützten Modells. Graz, Technische Universität Graz, Masterarbeit, 2015.
- [151] Efnarc: European Specification for Sprayed Concrete. Ausgabe 1996.
- [152] Maidl, B.: Handbuch für Spritzbeton. Ernst, Berlin, 1992.
- [153] Murr, R.; Hofman, M.; Cordes, T. et al.: Spritzbeton mit aufbereitetem Bündner Schiefer im Bauprojekt Brenner Basistunnel. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Eigenverlag, Alpbach, 2018.
- [154] DIN EN 12620: Gesteinskörnung für Beton. Ausgabe Juli 2008.
- [155] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [156] Locher, F.W.: Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2000.
- [157] Stark, J.; Wicht, B.: Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser Verlag, Basel, 2000.
- [158] Mindess, S.; Young, J.F.; Darwin, D.: Concrete. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [159] Kusterle, W.; Thumann, M.; Mittermayr, F.: ASSpC - Ein Forschungsprogramm für den Spritzbeton von Morgen. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Eigenverlag, Alpbach, 2018.
- [160] DIN EN 12350-5: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß. Ausgabe August 2009.
- [161] DIN EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren. Ausgabe August 2009.
- [162] DIN EN 12350-9: Prüfung von Frischbeton - Teil 9: Selbstverdichtender Beton - Auslauftrichterversuch. Ausgabe Dezember 2010.
- [163] Thumann, M.; Saxer, A.; Kusterle, W.: Precipitations in the Tunnel Drainage System - The Influence of Sprayed Concrete and Other Cement Bound Materials. In: Beck, T.; Woldmo, O.; Engen, S. (Hrsg.): 7th International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Sandefjord, Norway, 2014, S. 375-386.
- [164] Thumann, M.; Saxer, A.; Astner, M. et al.: Precipitations in the Tunnel Drainage System - Optimized Shotcrete Mix-Design. In: ECI Conference (Hrsg.): Shotcrete for Underground Support XII, 2014.
- [165] Thumann, M.; Saxer, A.; Hartmaier, M. et al.: Versinterungspotential von Spritzbeton - Laboruntersuchungen und Kleinspritzversuche zur Reduzierung der Calciumfreisetzung. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2015. Eigenverlag, Alpbach, 2015.
- [166] Thumann, M.; Kusterle, W.: Enhanced durability of shotcrete - reduced potential for precipitations. In: Maekawa, K.; Kasuga, A.; Yamazaki, J. (Hrsg.): The 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Tokyo, Japan, 2016, S. 221-228.
-

- [167] Thumann, M.; Kusterle, W.; Christlmeier, P. et al.: Reduzierung von versinterungsbedingten Reinigungsarbeiten in Tunneldränagen durch Optimierung der Spritzbetonzusammensetzung. *Beton* (2018), Heft 11, S. 416-421.
- [168] DIN EN 196-6: Prüfverfahren für Zement - Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit. Ausgabe März 2019.
- [169] DIN EN 480-11: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren. Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton. Ausgabe Dezember 2005.
- [170] Thumann, M.; Briendl, L.; Juhart, J. et al.: Rheologische Untersuchungen an Frischbetonmischungen für Spritzbeton. In: Greim, M.; Kusterle, W.; Teubert, O. (Hrsg.): *Rheologische Messungen an Baustoffen 2019 - Tagungsband zum 28. Workshop und Kolloquium*. tredition GmbH, Regensburg, 2019, S. 84-100.
- [171] Thumann, M.; Kusterle, W.: Pumpability of wet mix sprayed concrete with reduced clinker content. In: Beck, T.; Myren, S.; Engen, S. (Hrsg.): *8th International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Trondheim, Norway, 2018, S. 313-323.
- [172] Götz, L.; Haug, D.: Untersuchungen zur Pumpbarkeit des Nass-Mischguts von Spritzbetonen mit reduziertem Versinterungspotential. Regensburg, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Bachelorarbeit, 2018.
- [173] Matl, H.: Petrografisch-mineralogische Beschreibung eines Flussschottervorkommens im Ötztal bei Längenfeld Ausgabe Februar 2011.
- [174] Putzmeister Concrete Pumps GmbH (Hrsg.): *Betontechnologie für Betonpumpen*, Technischer Bericht, Aichtal, 2011.
- [175] Putzmeister AG: Sika - PM500 (Technisches Datenblatt).
- [176] Galan, I.; Thumann, M.; Briendl, L. et al.: From lab scale spraying to real shotcreting and back to the lab. In: Beck, T.; Myren, S.; Engen, S. (Hrsg.): *8th International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Trondheim, Norway, 2018, S. 129-143.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Spritzverfahren in Anlehnung an [12] (abweichend zur Originalgrafik wurde bei Nassspritzbeton mit Dünnstromförderung der Beitrag „ggf. flüssige Zusätze“ hinzugefügt).....	5
Abbildung 2:	Beispiel einer mobilen Spritzbetonmaschine für Nassspritzverfahren mit Dichtstromförderung [Florian Steindl, TU Graz]	6
Abbildung 3:	Auftrag Spritzbeton in Spritzkisten [Benedikt Lindlar, Sika].....	7
Abbildung 4:	Setzbolzenverfahren zur Bestimmung der Frühfestigkeit des Jungen Spritzbetons a) Eintreiben der Bolzen b) Ermittlung der Ausziehkraft [Florian Steindl, TU Graz]	8
Abbildung 5:	Frühfestigkeitsklassen des Jungen Spritzbetons in Anlehnung an [2]	8
Abbildung 6:	Wasserdruckaufbau beim Zufluss zum Tunnelhohlraum in Anlehnung an [20] (abweichend zur Originalgrafik fehlen die Darstellung für „Wasserverdrängung durch Injektionen“ und „zusätzliche Druckentlastung durch Entwässerungsbohrung“).....	11
Abbildung 7:	Drainageleitung mit Versinterung [24]	12
Abbildung 8:	Weg des Bergwassers in die Ulmendrainage in Anlehnung an [24].....	13
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Versinterungsvorgänge in Anlehnung an [24]	14
Abbildung 10:	Wasserfassende und -ableitende Einzelkomponenten in Anlehnung an [30]	15
Abbildung 11:	Schemaskizze der elektrosterischen Stabilisation von Härtestabilisatoren in Anlehnung an [43]	16
Abbildung 12:	Ermittlung der Freisetzungsmechanismen (schematisch) in Anlehnung an [68].....	21
Abbildung 13:	Prüfverfahren zur Untersuchung des Auslaugverhaltens in Anlehnung an [66]	21
Abbildung 14:	Schematische Darstellung der Auslaugzelle der Philipp Holzmann AG in Anlehnung an [53] und [70].....	23
Abbildung 15:	Schematische Darstellung der Durchströmungszelle in Anlehnung an [28]	24
Abbildung 16:	Schematische Darstellung der zulässigen Anordnung der Probekörper im Eluens in Anlehnung an [3]	25
Abbildung 17:	Schematische Darstellung der Umströmungsanlage in Anlehnung an [55]	26
Abbildung 18:	Schematische Darstellung des Multireaktors in Anlehnung an [72].....	26
Abbildung 19:	Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit im Spalt des Zwei-Platten-Modells für Scherversuche in Anlehnung an [81]	29
Abbildung 20:	Newton Modell.....	30
Abbildung 21:	Gleichgewichtsbetrachtung am Flüssigkeitselement im Rohr in Anlehnung an [77].....	30
Abbildung 22:	Bingham Modell.....	31

Abbildung 23:	Kaplans Modell zur Darstellung des Fließvorgangs in der Pumpleitung in Anlehnung an [17] und Darstellung der Geschwindigkeitsprofile in Anlehnung an [85]	32
Abbildung 24:	Schematische Darstellung der Gleitschichtbildung in einer Förderleitung aufgrund der scherinduzierten Partikelmigration während des Pumpvorgangs [86].....	33
Abbildung 25:	Nomogramm zur Ermittlung der Grundleistung von Betonpumpen (Schwing) in Anlehnung an [91]	35
Abbildung 26:	Aufbau eines Tribometers und Versuchsablauf in Anlehnung an [94]	36
Abbildung 27:	Systemskizze Gleitrohr-Rheometer in Anlehnung an [96].....	37
Abbildung 28:	a) Aufzeichnung der Geschwindigkeit als Weg über Zeit und b) Aufzeichnung des Druckes zweier Hübe von einer Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer	37
Abbildung 29:	Beispiel für ein Förderdruck zu Fördermengen Diagramm (p-Q Diagramm) ermittelt mit dem Gleitrohr-Rheometer.....	38
Abbildung 30:	Beurteilung der Pumpbarkeit als Funktion von Setzmaß und Blutwassermenge in Anlehnung an [97].....	41
Abbildung 31:	Steigerung der Konsistenz von Konstruktionsbeton durch Erhöhung des Zementleimgehalts bzw. durch Änderung der rheologischen Eigenschaften des Zementleims infolge einer Erhöhung des Wasserzementwertes in Anlehnung an [129]	43
Abbildung 32:	Einfluss des Leimvolumens auf den Betondruck in Anlehnung an [130].....	44
Abbildung 33:	Einfluss der Feianteile auf die Frischbetonmischung und den Spritzbeton [132]	46
Abbildung 34:	Einfluss von a) Wasser und b) Fließmittel auf die Suspensionseigenschaften eines Mehlkornleims in Anlehnung an [134].....	47
Abbildung 35:	Prinzip der Packungsdichte-Optimierung eines Bindemittel-Leimes durch „Mikrofüller“ und „Mesofüller“ in Anlehnung an [146].....	49
Abbildung 36:	Günstige Bereiche der Sieblinie für Spritzbeton nach a) der österreichischen Richtlinie Spritzbeton [2] und b) der EFNARC Richtlinie [151]	50
Abbildung 37:	Querschnitt durch einen Förderschlauch a) eines schlecht pumpbaren Betons und b) eines gut pumpbaren Betons beurteilt nach dem Leimvolumen [15]	51
Abbildung 38:	Reaktionsablauf (anhand der Wärmeentwicklungsrate) und Hydratationsstadien des C ₃ S und des Portlandzementes in Anlehnung an Mindess and Young 1981 [158] bzw. [155]	53
Abbildung 39:	Systemskizze Spritzmörtelversuche	57
Abbildung 40:	Versuchsaufbau Spritzversuche.....	61
Abbildung 41:	Mobile Spritzbetonmaschine vor Versuchsstollen	62
Abbildung 42:	Quarzitischer Sand a) Kornfraktion 0,1-0,5 mm b) Kornfraktion 3-5 mm	64

Abbildung 43:	Schemaskizze Filterpresse in Anlehnung an [113]	65
Abbildung 44:	Messvorgang Gleitrohr-Rheometer a) Position des Rohres zu Beginn des Messvorgangs oben b) Position des Rohres nach Durchführung eines Hubes unten.....	66
Abbildung 45:	RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Lagerungsbedingungen der Würfel“ - Mörtel.....	69
Abbildung 46:	RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Labortemperatur“ - Mörtel.....	69
Abbildung 47:	RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Art der Behälter“ - Mörtel	70
Abbildung 48:	RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Bewegung des Eluens/Eluats“ - Mörtel	71
Abbildung 49:	RV-Werte der Versuchsserie „Einflüsse auf die Prüfergebnisse - Leitfähigkeit des Eluens“ - Mörtel	71
Abbildung 50:	RV-Werte der Versuchsserie „Variation Bindemittel“ - Mörtel.....	72
Abbildung 51:	RV-Werte der Versuchsserie „Variation Bindemittel - Metakaolin“ - Mörtel.....	74
Abbildung 52:	RV-Werte der Versuchsserie „Variation Bindemittel - Probenalter 56 d und 1 a“ - Mörtel	76
Abbildung 53:	RV-Werte der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - W/B-Wert konstant“ - Mörtel	77
Abbildung 54:	RV-Werte der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - Wassergehalt konstant“ - Mörtel	78
Abbildung 55:	RV-Werte der Versuchsserie „Variation W/B-Wert“ - Mörtel.....	79
Abbildung 56:	RV-Werte von Mörtelversuchen im Vergleich zu RV-Werten von Spritzmörtelversuchen der Versuchsserie „Beschleunigertyp“	80
Abbildung 57:	RV-Werte von Mörtelversuchen im Vergleich zu RV-Werten von Spritzmörtelversuchen der Versuchsserie „Beschleunigergehalt“	81
Abbildung 58:	RV-Werte von Mörtelversuchen im Vergleich zu RV-Werten von Spritzmörtelversuchen der Versuchsserie „Variation Bindemittel“	82
Abbildung 59:	RV-Werte der Versuchsserie_A - Spritzbeton	84
Abbildung 60:	RV-Werte der Versuchsserie_B - Spritzbeton	85
Abbildung 61:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse - Frischbeton.....	89
Abbildung 62:	Ausbreitmaß von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton	90
Abbildung 63:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton.....	91
Abbildung 64:	Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton.....	92
Abbildung 65:	Trichterauslaufzeit von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton	92

Abbildung 66:	Filtratwasser nach 15 min und 60 min von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton	93
Abbildung 67:	Korrelation Filtratwasser und Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten - Frischbeton	94
Abbildung 68:	Korrelation Filtratwasser und Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) ohne Fließmittel b) mit Fließmittel - Frischbeton.....	94
Abbildung 69:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit Zusatzstoffen - Frischbeton	96
Abbildung 70:	Korngrößenverteilung von Metakaolin_C, Hüttensand_B und CEM I 52,5 N SR0 (Messung durchgeführt an der TU Graz).....	96
Abbildung 71:	Korngrößenverteilung CEM I 52,5 R, Kalksteinmehl und Feinstkalzit (Messung durchgeführt an der TU Graz).....	97
Abbildung 72:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit optimierter Packungsdichte a) Rezepturen mit CEM I 52,5 N SR0 b) Rezepturen mit CEM I 52,5 R - Frischbeton.....	99
Abbildung 73:	Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit optimierter Packungsdichte a) Rezepturen mit CEM I 52,5 N SR0 b) Rezepturen mit CEM I 52,5 R - Frischbeton.....	100
Abbildung 74:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) Volumen Leim konstant b) Masse Bindemittel konstant - Frischbeton.....	102
Abbildung 75:	Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten a) Volumen Leim konstant b) Masse Bindemittel konstant - Frischbeton.....	103
Abbildung 76:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Frischbeton	104
Abbildung 77:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Frischbeton	105
Abbildung 78:	Versuch zur Bestimmung der Filtratwassermenge mit der Rezeptur LV_nn_LP [172].....	105
Abbildung 79:	Sieblinien mit unterschiedlichen Feinanteilen.....	106
Abbildung 80:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Rezepturen mit unterschiedlichen Sieblinien - Frischbeton.....	107
Abbildung 81:	a) Vergleich Trichterauslaufzeit zu Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer und b) Vergleich Ausbreitmaß zu Beiwert a ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer	108
Abbildung 82:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen der Versuchsserie_B - Frischbetonmischung.....	109

Abbildung 83:	Optisch keine Entmischung anhand des Ausbreitmaßes bei Mischung B5 erkennbar (Prüfzeitpunkt ca. 25 min nach Wasserzugabe im Mischer) [Florian Steindl, TU Graz].....	110
Abbildung 84:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen - Frischbetonmischung	110
Abbildung 85:	a) und b) Messung mit Gleitrohr-Rheometer der Mischungen B5 c) und d) Messung mit Gleitrohr-Rheometer der Mischung B5W.....	111
Abbildung 86:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Frischbetonmischungen mit erhöhtem Luftgehalt und Wassergehalt - Frischbetonmischung	112
Abbildung 87:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer einer Frischbetonmischung mit reduziertem Ausbreitmaß - Frischbetonmischung	114
Abbildung 88:	Sand 0/4 a) dolomitisch und b) silikatisch	114
Abbildung 89:	Sieblinien der Gesteinskörnung dolomitischer Sand 0/4 und silikatischer Sand 0/4 - Frischbetonmischung.....	115
Abbildung 90:	Pumpprognose ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen 0/4 - Frischbetonmischung	116
Abbildung 91:	Berechneter Betondruck_H und berechneter Betondruck_S	119
Abbildung 92:	Berechneter Betondruck_H und berechneter Betondruck_S im Vergleich zur Filtratwassermenge gemessen a) nach 15 min b) nach 60 min.....	121
Abbildung 93:	Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer der Mischung B9 a) Rohr in Position oben b) und c) Rohr beim Heruntergleiten d) Rohr in Position unten	122
Abbildung 94:	Beispiel für „Verarbeitungsfenster“ zur Beurteilung der Pumpbarkeit als Funktion von Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer und Filtratwassermenge gemessen a) nach 15 min und b) nach 60 min	123
Abbildung 95:	Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Referenzrezeptur „10 % AHWZ“ der Versuchsserie_A mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen.....	127
Abbildung 96:	Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezeptur „33 % AHWZ“ der Versuchsserie_A mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen	128
Abbildung 97:	Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezeptur „33 % Hüttensand_A“ der Versuchsserie_A mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen.....	128
Abbildung 98:	Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezeptur „23 % Hüttensand_A und 10 % Metakaolin_A“ der Versuchsserie_A mit drei unterschiedlichen Beschleunigertypen	129
Abbildung 99:	Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezepturen B2, B4 und B5W der Versuchsserie_B.....	130

Abbildung 100:	Frühfestigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons der Rezepturen B6, B7, B8 und B9 der Versuchsserie_B	131
Abbildung 101:	28 d Druckfestigkeit von Bohrkernen aus Spritzkisten (Prüfung durchgeführt durch Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH)	132
Abbildung 102:	28 d Druckfestigkeit von Bohrkernen aus Spritzkisten (Prüfung durchgeführt an der TU Graz)	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definitionen bezüglich Spritzbeton, Teil 1, Auswahl in Anlehnung an [6]	3
Tabelle 2:	Definitionen bezüglich Spritzbeton, Teil 2, Auswahl in Anlehnung an [6]	4
Tabelle 3:	Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der abgesonderten Wassermenge nach [98]	40
Tabelle 4:	Perioden der C ₃ S Reaktion in Anlehnung an [155].....	53
Tabelle 5:	Referenzrezeptur - Mörtel	54
Tabelle 6:	Mischregime - Mörtel.....	55
Tabelle 7:	Referenzrezeptur - Spritzmörtel	56
Tabelle 8:	Referenzrezeptur Versuchsserie_A - Spritzbeton	58
Tabelle 9:	Referenzrezeptur Versuchsserie_B - Spritzbeton	59
Tabelle 10:	Rezeptur Baustellenmischung (B9) Versuchsserie_B - Spritzbeton.....	60
Tabelle 11:	Versuchsbezeichnung und charakteristische Kurzbeschreibung der Rezepturen der Versuchsserie_B - Spritzbeton.....	60
Tabelle 12:	Referenzrezeptur - Frischbeton	63
Tabelle 13:	Mischregime - Frischbeton.....	64
Tabelle 14:	Rezepturen der Versuchsserie „Variation Bindemittel“ - Mörtel	72
Tabelle 15:	Rezepturen der Versuchsserie „Variation Bindemittel - Metakaolin_A“ - Mörtel.....	74
Tabelle 16:	Rezepturen der Versuchsserie „Variation Bindemittel - Metakaolin_B“ - Mörtel	74
Tabelle 17:	Rezepturen der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - W/B-Wert konstant“ - Mörtel	76
Tabelle 18:	Rezepturen der Versuchsserie „Verdünnungseffekt - Wassergehalt konstant“ - Laborversuch	77
Tabelle 19:	Rezepturen der Versuchsserie „Variation W/B-Wert“ - Mörtel	79
Tabelle 20:	Rezepturen der Versuchsserie „Beschleunigertyp“ - Spritzmörtel	80
Tabelle 21:	Rezepturen der Versuchsserie „Beschleunigergehalt“ - Spritzmörtel.....	81
Tabelle 22:	Rezepturen der Versuchsserie „Variation Bindemittel“ - Spritzmörtel und Mörtel	82
Tabelle 23:	Rezepturen der Versuchsserie_A - Spritzbeton	83
Tabelle 24:	Rezepturen B2, B4 und B5W der Versuchsserie_B - Spritzbeton.....	84
Tabelle 25:	Rezepturen B6, B7 und B8 der Versuchsserie_B - Spritzbeton.....	85
Tabelle 26:	RV-Werte und Abstandsfaktor L der Versuchsserie_B - Spritzbeton	86
Tabelle 27:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten - Frischbeton.....	90
Tabelle 28:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten mit Fließmittel - Frischbeton.....	90
Tabelle 29:	Volumenanteile von Rezepturen mit Zusatzstoffen - Frischbeton.....	95
Tabelle 30:	Volumenanteile von Rezepturen mit optimierter Packungsdichte mit CEM I 52,5 N SR0 - Frischbeton.....	98

Tabelle 31:	Volumenanteile von Rezepturen mit optimierter Packungsdichte mit CEM I 52,5 R - Frischbeton	98
Tabelle 32:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B Werten - Leimvolumen konstant - Frischbeton	101
Tabelle 33:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen W/B Werten - Masse Bindemittel konstant - Frischbeton.....	101
Tabelle 34:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Frischbeton.....	103
Tabelle 35:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Frischbeton.....	104
Tabelle 36:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen Sieblinien - Frischbeton	106
Tabelle 37:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen der Versuchsserie_B - Frischbetonmischung.....	108
Tabelle 38:	Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer, voreingestellte Fördermenge und Hydraulikdruck der Pumpe der Spritzbetonmaschine von Mischungen mit unterschiedlichem Mehlkorn- und Wasservolumen	109
Tabelle 39:	Volumenanteile von Rezepturen mit erhöhtem Luftgehalt und Wassergehalt - Frischbetonmischung	112
Tabelle 40:	Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer, voreingestellte Fördermenge und Hydraulikdruck der Pumpe der Spritzbetonmaschine von Frischbetonmischungen mit erhöhtem Luft- und Wassergehalt.....	113
Tabelle 41:	Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer, voreingestellte Fördermenge und Hydraulikdruck der Pumpe der Spritzbetonmaschine einer Frischbetonmischung mit reduziertem Ausbreitmaß.....	113
Tabelle 42:	Volumenanteile von Rezepturen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen 0/4 - Frischbetonmischung.....	115
Tabelle 43:	Beiwert b ermittelt mit Gleitrohr-Rheometer, voreingestellte Fördermenge und Hydraulikdruck der Pumpe der Spritzbetonmaschine von Frischbetonmischungen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen 0/4	116
Tabelle 44:	Annahmen für eine äquivalente Förderlänge [174]	117
Tabelle 45:	Annahmen für eine äquivalente Förderlänge, Beispiel Sika - PM500	117
Tabelle 46:	Angaben Doppelkolbenpumpe der mobilen Spritzbetonmaschine Sika - PM500 aus [175]	118
Tabelle 47:	Umrechnung Hydraulikdruck der Doppelkolbenpumpe (Spritzbetonmaschine) in Betondruck an ausgewählten Beispielen.....	119
Tabelle 48:	Übersicht Fördermenge, Hydraulikdruck Pumpe, berechneter Betondruck_H und berechneter Betondruck_S	120
Tabelle 49:	Beschleunigergehalte der Rezepturen der Versuchsserie_A - Spritzbeton.....	130

Anhang

A.1 Ausgangsstoffe

A.1.1 Zemente

Tabelle A 1: Physikalische Kennwerte Zement - Teil 1; Angaben Hersteller bzw. TU Graz

		CEM I 52,5 N	CEM I 52,5 R	CEM I 52,5 N - SR0
Dichte	[kg/dm ³]	3,1	3,2	3,3
Blaine	[cm ² /g]	4.980	5.200	4.500
Wasseranspruch	[%]	34	---	---
Erstarrungsbeginn	[min]	190	---	---
Druckfestigkeit 1 d	[N/mm ²]	26	---	---
Druckfestigkeit 28 d	[N/mm ²]	64	---	---
d ₅₀	[µm]	---	7,1	8,0

Tabelle A 2: Physikalische Kennwerte Zement - Teil 2; Angaben Hersteller bzw. TU Graz

		CEM II/A-S 42,5 R	CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N
Dichte	[kg/dm ³]	3,1	3,0
Blaine	[cm ² /g]	4.450	7.430
Wasseranspruch	[%]	31	35
Erstarrungsbeginn	[min]	180	150
Druckfestigkeit 1 d	[N/mm ²]	10	12
Druckfestigkeit 28 d	[N/mm ²]	60	72
d ₅₀	[µm]	10,8	7,1

Tabelle A 3: Chemische Kennwerte Zement (Rietveld) - Teil 1; Angaben Hersteller bzw. TU Graz

		CEM I 52,5 N	CEM I 52,5 R	CEM I 52,5 N - SR0
CaO	[%]	63,2	61,6	64,0
SiO ₂	[%]	19,5	20,0	20,2
Al ₂ O ₃	[%]	5,8	5,4	2,9
Fe ₂ O ₃	[%]	3,0	2,8	4,3
SO ₃	[%]	3,4	3,0	2,3
MgO	[%]	3,3	4,0	1,2
K ₂ O	[%]	0,8	1,0	0,4

Tabelle A 4: Chemische Kennwerte Zement (Rietveld) - Teil 2; Angaben Hersteller bzw. TU Graz

		CEM II/A-S 42,5 R	CEM II/B-M(S,L,Q) 52,5 N
CaO	[%]	54,3	54,0
SiO ₂	[%]	21,7	25,5
Al ₂ O ₃	[%]	4,8	9,7
Fe ₂ O ₃	[%]	3,1	2,1
SO ₃	[%]	3,5	3,5
MgO	[%]	3,9	3,3
K ₂ O	[%]	0,5	0,5

A.1.2 Zusatzstoffe

Tabelle A 5: *Physikalische und chemische Kennwerte Zusatzstoffe - Teil 1; Angaben Hersteller bzw. TU Graz*

		Flugasche	Hüttensand_A	Hüttensand_B	AHWZ
Dichte	[g/cm ³]	2,4	2,9	2,9	2,7
Aktivitätsindex		78/94	---	---	95/---
Glühverlust	[M.-%]	2,28	---	---	---
Sulfat	[M.-%]	0,85	---	---	---
Chlorid	[M.-%]	0,005	---	---	---
Blaine	[cm ² /g]	2.400	3.200	4.500	4.300
d ₁₀	[µm]	---	---	---	---
d ₅₀	[µm]	---	---	8,6	---
d ₉₀	[µm]	---	---	---	---
BET	[m ² /g]	---	---	---	---

Tabelle A 6: *Physikalische und chemische Kennwerte Zusatzstoffe - Teil 2; Angaben Hersteller bzw. TU Graz*

		Metakaolin_A	Metakaolin_B	Metakaolin_C
Dichte	[g/cm ³]	2,6	2,6	2,5
Aktivitätsindex		---	---	---
Glühverlust	[M.-%]	< 1,0	---	---
Sulfat	[M.-%]	< 0,05	---	---
Chlorid	[M.-%]	---	---	---
Blaine	[cm ² /g]	26.000	24.000	28.000
d ₁₀	[µm]	2	---	2,1
d ₅₀	[µm]	5	---	---
d ₉₀	[µm]	25	---	---
BET	[m ² /g]	20	12	9

Tabelle A 7: Physikalische und chemische Kennwerte Zusatzstoffe; Angaben Hersteller bzw. TU Graz

		Kalksteinmehl	Feinstkalzit	Microsilica
Dichte	[g/cm ³]	2,8	2,7	2,2
Aktivitätsindex		---	---	---
Glühverlust	[M.-%]	---	---	---
Sulfat	[M.-%]	---	---	---
Chlorid	[M.-%]	---	---	---
Blaine	[cm ² /g]	4.790	---	---
d ₁₀	[µm]	---	---	---
d ₅₀	[µm]	5,0	1,2	---
d ₉₀	[µm]	---	---	---
BET	[m ² /g]	2	6	18

A.1.3 Gesteinskörnungen

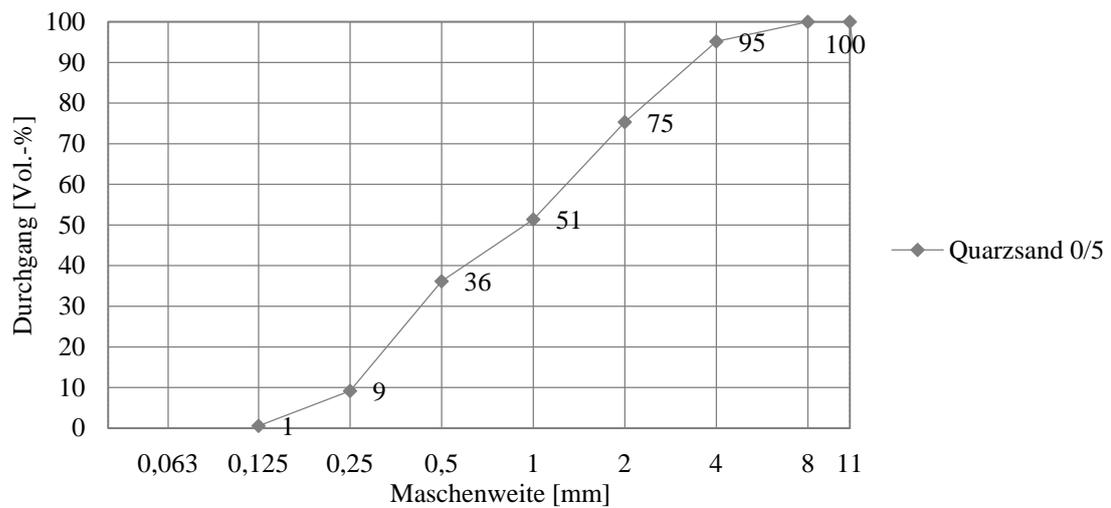


Abbildung A 1: Sieblinie Quarz 0/5 - Mörtel

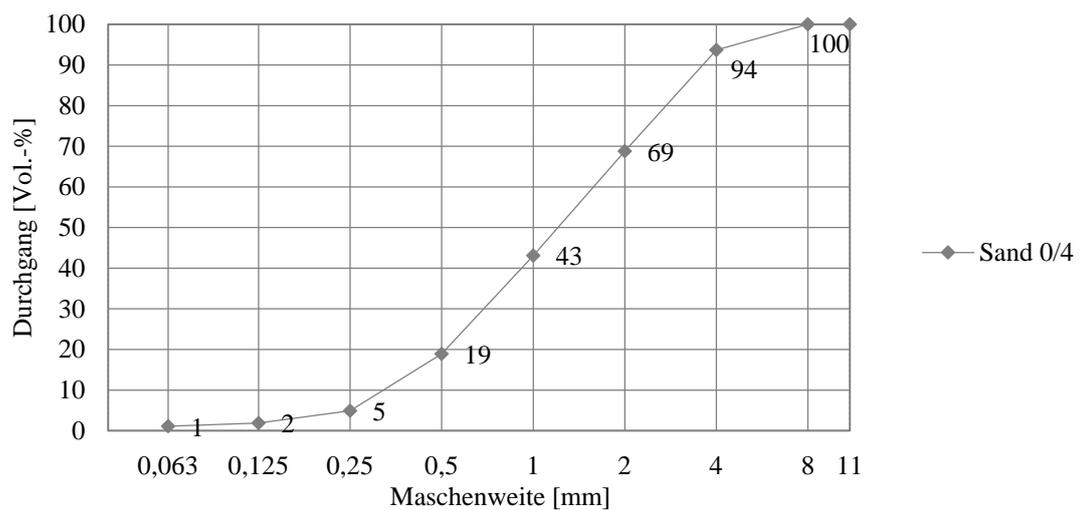


Abbildung A 2: Sieblinie Gesteinskörnung 0/4 Versuchsserie_A - Spritzbeton

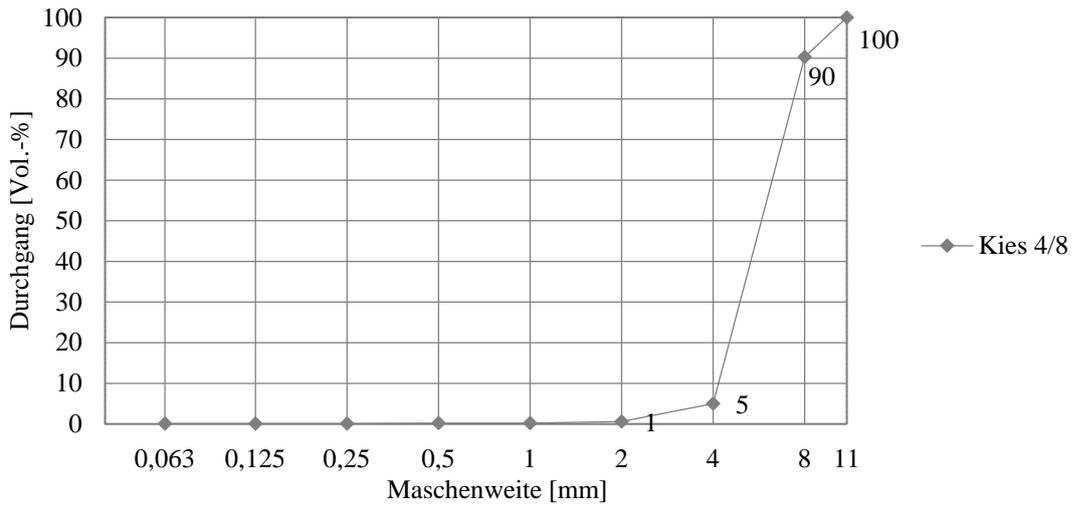


Abbildung A 3: Sieblinie Gesteinskörnung 4/8 Versuchsserie_A - Spritzbeton

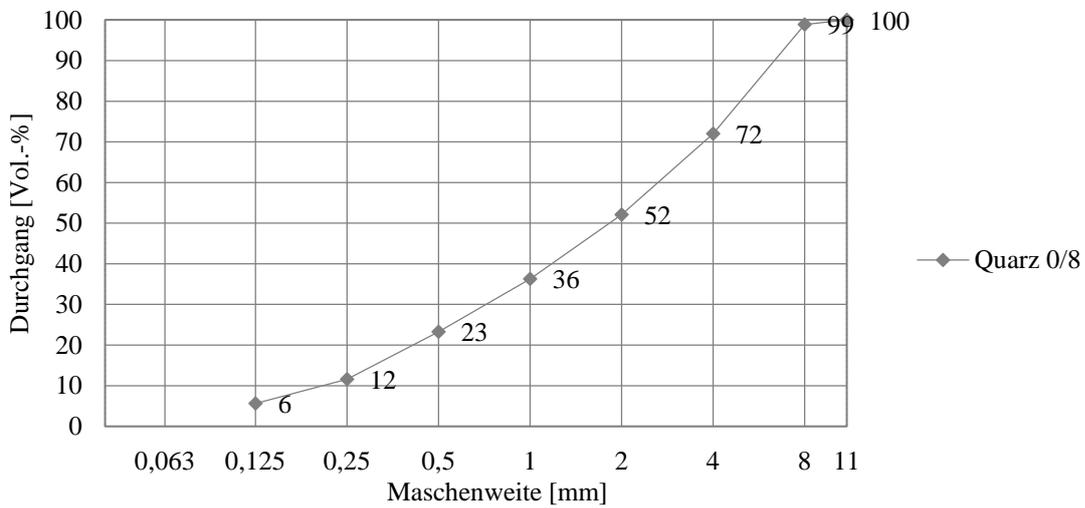


Abbildung A 4: Sieblinie Quarz 0/8 - Frischbeton

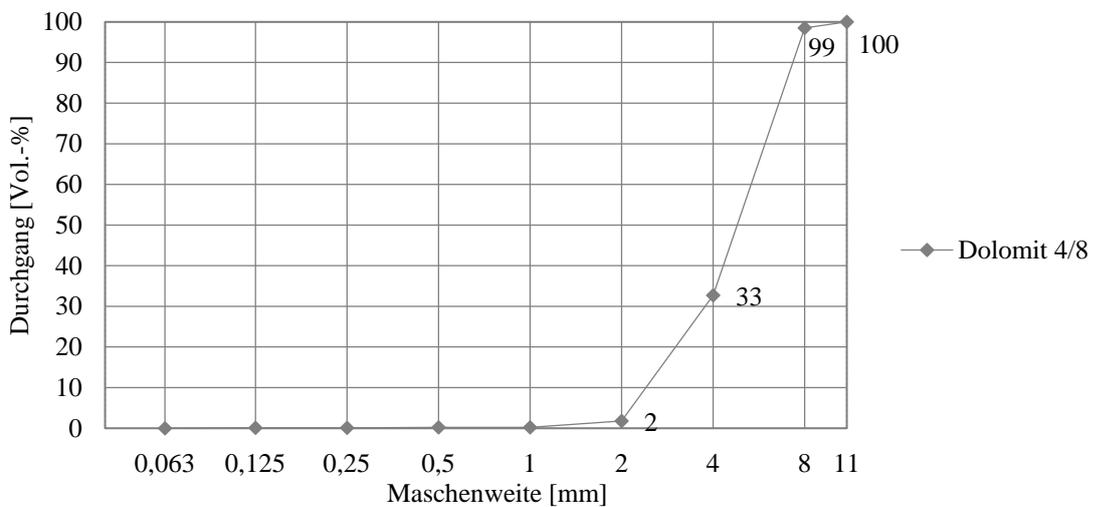


Abbildung A 5: Sieblinie Dolomit 4/8 Versuchsserie_B - Frischbetonmischung und Spritzbeton

A.1.4 Zusatzmittel

Tabelle A 8: Produktinformationen Fließmittel - Teil 1; Angaben Hersteller

Bezeichnung		FM_A	FM_B
Dichte	[g/cm ³]	1,04 - 1,08	1,05 - 1,09
Chemische Basis		Polycarboxylatether	Polycarboxylatether
pH-Wert		5 - 7	5,5 - 7,5
Empfohlener Dosierbereich	[% v. Z.]	0,2 - 2,0	0,2 - 2,0

Tabelle A 9: Produktinformationen Fließmittel - Teil 2; Angaben Hersteller

Bezeichnung		FM_C	FM_D
Dichte	[g/cm ³]	ca. 1,05	ca. 1,06
Chemische Basis		Polycarboxylatether	Polycarboxylatether
pH-Wert		ca. 5,5	ca. 4
Empfohlener Dosierbereich	[% v. Z.]	0,6 - 1,4	0,4 - 1,8

Tabelle A 10: Produktinformationen Fließmittel - Teil 3; Angaben Hersteller

Bezeichnung		FM_E
Dichte	[g/cm ³]	ca. 1,04
Chemische Basis		Polycarboxylatether
pH-Wert		ca. 5,5
Empfohlener Dosierbereich	[% v. Z.]	0,3 - 2,0

Tabelle A 11: Produktinformationen alkalifreie Beschleuniger - Teil 1, Angaben Hersteller

Bezeichnung		BE_A	BE_B	BE_C	BE_D
Dichte	[g/cm ³]	ca. 1,35	ca. 1,44	ca. 1,49	ca. 1,44
pH-Wert		ca. 3,0	ca. 3,0	ca. 3,0	ca. 3,0
Alkaligehalt	[M.-%]	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Empfohlener Dosierbereich	[% v. Z.]	3 - 8	max. 10	3 - 10	3 - 6
Üblicher Feststoffgehalt	[%]	ca. 41	ca. 50	---	ca. 52

Tabelle A 12: Produktinformationen alkalifreie Beschleuniger - Teil 2, Angaben Hersteller

Bezeichnung		BE_E	BE_F
Dichte	[g/cm ³]	ca. 1,44	ca. 1,47
pH-Wert		ca. 2,5	ca. 3,0
Alkaligehalt	[M.-%]	≤ 1,0	≤ 1,0
Empfohlener Dosierbereich	[% v. Z]	5 - 8	3 - 8
Üblicher Feststoffgehalt	[%]	ca. 55	ca. 58

Tabelle A 13: Produktinformationen Luftporenmittel; Angaben Hersteller

Bezeichnung		LP_A	LP_B	LP_C
Dichte	[g/cm ³]	ca. 1,00	ca. 2,7	ca. 1,0
pH-Wert		ca. 7,6	---	---
Empfohlener Dosierbereich	[% v. Z]	0,1 - 0,8	0,4 - 1,5	0,1 - 0,5

Tabelle A 14: Produktinformationen Stabilisierer; Angaben Hersteller

Bezeichnung		ST_A
Dichte	[g/cm ³]	ca. 1,1
Empfohlener Dosierbereich	[% v. Z]	0,2 - 2,0

A.2 Rezepturen

A.2.1 Rezepturen Frischbetone

Tabelle A 15: Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten - Frischbeton

			W/B=0,55	W/B=0,50	W/B=0,45
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	403	428	457
Wasser		[kg/m ³]	222	214	205
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1655	1655

Tabelle A 16: Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten mit Fließmittel - Frischbeton

			W/B=0,55 _FM	W/B=0,50 _FM	W/B=0,45 _FM
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	403	428	457
Wasser		[kg/m ³]	222	214	205
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1655	1655
Fließmittel	FM_C	[% v. BM]	0,2	0,4	0,6

Tabelle A 17: Rezepturen mit Zusatzstoffen - Frischbeton

			10 % Metakaolin _C	30 % Hüttensand _B	50 % Hüttensand _B
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	381	296	209
Zusatzstoff		[kg/m ³]	42	127	209
Wasser		[kg/m ³]	212	211	209
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1655	1655

Tabelle A 18: Rezepturen mit unterschiedlichen W/B Werten - Volumen Leim konstant - Frischbeton

			$V_{\frac{W}{B}=0,55}$	$V_{\frac{W}{B}=0,50}$	$V_{\frac{W}{B}=0,45}$	$V_{\frac{W}{B}=0,40}$
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	403	428	457	489
Wasser		[kg/m ³]	222	214	205	196
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1655	1655	1655
Fließmittel	FM_C	[% v. BM]	---	0,4	0,4	0,6

Tabelle A 19: Rezepturen mit unterschiedlichen W/B Werten - Masse Bindemittel konstant - Frischbeton

			$M_{\frac{W}{B}=0,55}$	$M_{\frac{W}{B}=0,50}$	$M_{\frac{W}{B}=0,45}$	$M_{\frac{W}{B}=0,40}$
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	420	420	420	420
Wasser		[kg/m ³]	231	210	189	168
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1617	1673	1728	1784
Fließmittel	FM_C	[% v. BM]	0,2	0,4	0,7	1,1

Tabelle A 20: Rezepturen mit optimierter Packungsdichte mit CEM I 52,5 N SR0 - Frischbeton

			CEM I 52,5 N SR0	PD 1	PD 2	PD 3
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	428	383	249	295
Zusatzstoff	Hüttensand_B	[kg/m ³]	---	---	75	84
	Kalksteinmehl	[kg/m ³]	---	---	---	---
	Feinstkalzit	[kg/m ³]	---	43	62	42
	Metakaolin_C	[kg/m ³]	---	---	---	---
	Microsilica	[kg/m ³]	---	---	29	---
Wasser		[kg/m ³]	214	213	207	211
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1655	1655	1655
Fließmittel	FM_C	[% v. BM]	0,4	0,4	0,5	0,3

Tabelle A 21: Rezepturen mit optimierter Packungsdichte mit CEM I 52,5 R - Frischbeton

			CEM I 52,5 R	PD 4	PD 5	PD 6
Zement	CEM I 52,5 R	[kg/m ³]	423	401	222	223
Zusatzstoff	Hüttensand_B	[kg/m ³]	---	---	66	66
	Kalksteinmehl	[kg/m ³]	---	---	41	41
	Feinstkalzit	[kg/m ³]	---	21	53	54
	Metakaolin_C	[kg/m ³]	---	---	---	29
	Microsilica	[kg/m ³]	---	---	29	---
Wasser		[kg/m ³]	212	211	205	206
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1655	1655	1655
Fließmittel	FM_C	[% v. BM]	1,5	1,2	1,0	1,0

Tabelle A 22: Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Teil 1 - Frischbeton

			Referenz	LV_n	LV_n_LP
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	428	384	384
Wasser		[kg/m ³]	214	192	192
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1749	1749
Luftporenbildner	LP_A	[% v. BM]	---	---	0,8

Tabelle A 23: Rezepturen mit unterschiedlichen Leimvolumen und Luftgehalten - Teil 2 - Frischbeton

			Referenz	LV_mn	LV_mn_LP
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	428	347	347
Wasser		[kg/m ³]	214	173	173
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1829	1829
Luftporenbildner	LP_A	[% v. BM]	---	---	0,8

Tabelle A 24: Rezepturen mit unterschiedlichen Sieblinien - Frischbeton

			Referenz	fein_n	fein_h	EFNARC
Zement	CEM I 52,5 N SR0	[kg/m ³]	428	428	428	428
Wasser		[kg/m ³]	214	214	214	214
Gesteinskörnung	Quarz 0/8	[kg/m ³]	1655	1655	1655	1655
Fließmittel	FM_C	[% v. BM]	0,4	0,4	0,5	0,6

A.2.2 Rezepturen Frischbetonmischungen - Versuchsserie_B

Tabelle A 25: Zusammensetzung der Leim- und Mörtelanteile nach Volumen und Masse von Frischbetonmischungen, ausgewählte Ergebnisse zur Verarbeitbarkeit⁶

	Volumen							Masse					Hydraulik- druck [bar]	Beiwert b [10 ⁻⁶ bar · h/m]	Filtrat- wasser	
	[dm ³ /m ³]							[kg/m ³]							15	60
	Z	Z, W	Z, GK≤0,125	Z, W, GK≤0,125	Z, W, LP	Z, W, LP, GK≤0,125	Z, W, LP, GK≤4	Z	Z, W	Z, GK≤0,125	Z, W, GK≤0,125	Z, W, GK≤4			min	min
B2	131	328	177	374	360	406	843	398	595	528	725	1965	70	3,7	15	32
B3	100	255	146	301	360	406	854	303	458	433	589	1861	> 200 Abbruch	4,7	8	12
B4	132	340	178	387	355	402	839	400	608	531	740	1980	63	2,6	15	35
B5	125	307	171	354	357	404	835	380	562	510	693	1918	> 200 Abbruch	6,02	10	17
B5W	124	316	169	361	366	411	837	375	567	504	696	1905	> 200 Abbruch	2,78	---	---
B6	133	329	175	371	419	461	857	403	599	521	718	1842	57	2,17	14	31
B7	135	332	180	377	372	417	842	410	607	538	735	1942	66	3,6	11	20
B8	137	337	166	366	356	385	837	415	615	492	692	1890	63	4,12	12	27
B9	130	335	175	380	354	399	838	423	628	550	756	2004	49	1,22	29	60

⁶ Z: Zement, W: Wasser, GK≤0,125: Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm, LP: Luftgehalt, GK≤4: Gesteinskörnung ≤ 4 mm

A.3 Versuchsergebnisse

A.3.1 Frischbetone

Tabelle A 26: Übersicht Versuchsergebnisse - Teil 1 - Frischbeton

Rezeptur	Trichterauslaufzeit [s]	Ausbreitmaß [cm]	Luftgehalt [%]	Beiwert a [mbar]	Beiwert b [10 ⁻⁶ bar · h/m]	Filtratwasser 15 min [kg/m ³]	Filtratwasser 60 min [kg/m ³]
Referenz_M1_15 min	---	43	3,4	0,72	2,24	---	---
Referenz_M2_15 min	---	40	3,6	1,58	2,07	56	84
Referenz_M1_90 min	---	42	3,6	1,25	2,03	---	---
Referenz_M2_90 min	---	42	3,6	1,54	2,17	---	---
W/B=0,55	---	41	3,3	1,55	1,69	64	92
W/B=0,50	---	40	3,6	1,58	2,07	56	84
W/B=0,45	---	28	3,4	1,72	2,79	42	66
W/B=0,55_FM	4,9	54	3,1	0,67	2,06	63	93
W/B=0,50_FM	6,9	56	3,6	-0,17	2,92	53	83
W/B=0,45_FM	10	58	3,5	-0,33	3,28	44	70
Referenz	---	40	3,6	1,58	2,07	56	84
10 % Metakaolin_C	---	28	3,6	2,56	3,42	38	62
30 % Hüttensand_B	---	37	3,0	1,29	2,38	58	85
50 % Hüttensand_B	---	36	3,2	0,96	2,61	58	87
CEM I 52,5 N SR0	5,6	59	---	-0,28	2,70	---	---
PD 1	3,8	61	---	0,64	1,37	---	---
PD 2	4,4	53	---	0,35	1,70	---	---
PD 3	6,3	55	---	0,63	1,59	---	---
CEM I 52,5 R	21,7	56	---	-0,77	5,26	---	---
PD 4	---	53	---	-0,18	3,24	---	---
PD 5	6,7	53	---	1,00	2,23	---	---
PD 6	5,9	61	---	0,12	2,55	---	---

Tabelle A 27: Übersicht Versuchsergebnisse - Teil 2 - Frischbeton

Rezeptur	Trichterauslaufzeit [s]	Ausbreitmaß [cm]	Luftgehalt [%]	Beiwert a [mbar]	Beiwert b [10 ⁻⁶ bar · h/m]	Filtratwasser 15 min [kg/m ³]	Filtratwasser 60 min [kg/m ³]
V_W/B=0,55	3,9	54	---	1,20	1,65	---	---
V_W/B=0,50	5,4	61	---	-0,40	2,25	---	---
V_W/B=0,45	5,5	59	---	0,20	3,19	---	---
V_W/B=0,40	9,8	61	---	0,51	4,58	---	---
M_W/B=0,55	3,7	62	---	0,51	1,36	---	---
M_W/B=0,50	7,3	58	---	-0,60	2,81	---	---
M_W/B=0,45	16,8	64	---	-0,40	4,04	---	---
M_W/B=0,40	---	62	---	-1,47	7,34	---	---
Referenz	---	40	3,6	1,58	2,07	56	84
LV_n	---	26	3,8	1,71	2,85	31	47
LV_n_LP	---	32	7,6	0,96	2,51	42	62
LV_nn	---	---	3,8	---	---	---	---
LV_nn_LP	---	27	5,6	0,61	4,65	---	---
Referenz	5,4	61	---	-0,40	2,25	---	---
Fein_n	4,9	60	---	0,12	1,42	---	---
Fein_h	4,5	61	---	-0,28	3,49	---	---
EFNARC	15,0	58	---	0,09	3,35	---	---

A.3.2 Frischbetonmischungen

Tabelle A 28: Ergebnisse Frischbetonprüfungen Versuchsserie_B - Frischbetonmischung

Bez.	Zeit nach Wasserzugabe [h:min]	Prüfart ⁷	Betontemp. [°C]	Fließmaß [cm]	Ausbreitmaß [cm]	Frischbetondichte [kg/m ³]	Luftgehalt [%]	Wassergehalt [l/m ³]	Filtratwasser 15 min [kg/m ³]	Filtratwasser 60 min [kg/m ³]
B2	0:09	L	19,0	42,0	62,0	2451	1,2	201,3	14,5	32,0
	0:33	VS	21,3	30,5	55,0	2402	3,2	9,5 ⁸		
	1:00	VS	22,5	31,5	53,0	---	---	---	---	
B3	0:10	L	19,4	44,0	56,5	2268	8,7	152,5	8,0	12,0
	0:30	VS	21,3	33,0	51,0	2193	10,5	---		
B4	0:07	L	18,4	47,5	63,0	2400	2,9	201,0	15,0	35,0
	0:19	VS	---	42,5	62,5	---	---	11,4 ⁸		
	0:39	VS	---	34,5	56,0	2413	1,5	---	---	
B5 Bzw. B5W	0:10	L	16,6	33,0	52,5	2325	6,5	166,3	10,0	17,0 ⁹
	0:25	VS	18,4	37,5	56,5	2266	---	---		
	0:42	VS	---	44,0	62,0	2339	5,0	179	---	
		VS	---	---	---	---	---	9,0 ⁸	---	
B6	0:08	L	17,4	49,0	64,0	2215	8,7	186,0	14,0	31,0
	0:28	VS	---	51,0	67,5	2212	9,0	9,6 ⁸		
B7	0:12	L	20,1	22,0	37,0	2370	3,2	191,6	11,0	20,0
	0:17	VS	---	23,0	42,5	---	---	---		
	0:26	VS	22,7	25,0	46,0	2365	4,0	8,9 ⁸	---	
B8	0:10	L	19,5	32,0	49,0	2350	4,2	193,0	12,0	27,0
	0:18	VS	---	32,5	54,0	---	---	---		
	0:29	VS	21,7	42,5	64,5	2411	1,9	10,3 ⁸	---	
B9	0:08	L	19,0	46	64,0	2290	6,6	201,0	29,0	60,0
	0:14	VS	---	49	65,0	2435	1,9	8,8 ⁸		

⁷ L: Prüfung beim Labor, VS: Prüfung beim Versuchsstollen⁸ Wassergehalt in M.-% vor Versuchsstollen am Spritzbeton bestimmt⁹ Messwert bereits nach 45 min

A.4 Berechnung äquivalente Förderlänge

Tabelle A 29: Berechnung der äquivalenten Förderlänge, Beispiel Sika - PM500

Beschreibung	Anzahl [-]	äquiv. Länge [m]	Summe [m]
Bogen 90 Grad, DN 125 mm	1	1	1
Bogen 45 Grad, DN 125 mm	1	0,5	0,5
Reduktion DN 125 mm auf DN 80 mm, Länge 1000 mm	1	3	3
Bogen 45 Grad, DN 80 mm	1	0,5	0,5
Stahlrohr DN 80 mm, Länge 5912 mm	1	5,912	5,912
Bogen 90 Grad, DN 80 mm	1	1	1
Stahlrohr DN 80 mm, Länge 925 mm	1	0,925	0,925
Bogen 90 Grad, DN 80 mm	1	1	1
Stahlrohr DN 80 mm, Länge 480 mm	1	0,48	0,48
Bogen 90 Grad, DN 80 mm mit angeschweißtem geradem Stahlrohr, DN 80, 75 mm	1	3,075	3,075
Bogen 90 Grad, DN 80 mm	1	1	1
Stahlrohr DN 80 mm Länge 3000 mm	1	3	3
Bogen 45 Grad DN 80 mm	1	0,5	0,5
Förderschlauch aus Gummi DN 80 mm, 5000 mm Länge	2	7,5	15
Düsenhalter aus Stahl DN 80 mm 200 mm	1	0,2	0,2
Länge gesamt DN 125 + DN 80			37

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Maria Thumann

Geburtsdatum: 12.06.1987

Berufliche Tätigkeit

seit 04.2013 Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Ostbayerische Technische
Hochschule Regensburg

Studium

10.2011 - 03.2013 Studiengang Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt „Bauen im
Bestand“, Hochschule Regensburg
Abschluss: Master of Engineering

03.2008 - 09.2011 Studiengang Bauingenieurwesen, Hochschule Regensburg
Abschluss: Bachelor of Engineering

Schulbildung

09.1998 - 06.2007 Willibald-Gymnasium Eichstätt
Abschluss: Abitur

Auslandsaufenthalte

02.2010 - 09.2010 Praktikum BAUER Spezialtiefbau Schweiz AG, Schweiz

08.2007 - 12.2007 Praktikum Phoenix Safaris (K) Ltd., Kenia