Schlussbericht vom 01.03.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 20947 BG

Thema

Sichere Betonförderung – Pumpbarkeit und Pumpstabilität

Berichtszeitraum

01.01.2020 bis 30.06.2022

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. – FTB

Kooperierende Forschungsvereinigung

Deutscher Beton und Bautechnik Verein E.V.

Forschungseinrichtung(en)

1 Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine und Dipl.-Ing. Daniil Mikhalev

2 Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Haist und Dipl.-Ing. Dario Cotardo

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Förderhinweise und Danksagung

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das vorliegende IGF-Vorhaben Nr. 20947 BG der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. – FTB und des (kooperierenden) Deutschen Beton und Bautechnik-Vereins E.V. wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die ausführenden Forschungseinrichtungen der TU Dresden und der Leibniz Universität Hannover danken den genannten Institutionen für die Förderung des Projekts sowie für die hervorragende Zusammenarbeit und Unterstützung bei den Forschungsarbeiten.

Weiterhin gilt ein Dank den zahlreichen industriellen Partnern bei der Unterstützung des Forschungsprojekts:

Betonpumpenunion GmbH & Co. KG
Putzmeister Concrete Pumps GmbH
Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH
DIBA-Beton Baustoffgesellschaft
Betontechnik Niedersachsen GmbH
ETT Ersatzteil-Technik GmbH
Heinrich Feess GmbH & Co. KG
Master Builders Solution Deutschland GmbH
Wenzelburger Kieswerke GmbH & Co. KG
Holcim (Deutschland) GmbH
HeidelbergCement AG
SCHWING GmbH

Unser Dank gilt darüber hinaus allen weiteren Partnern, die uns in der Forschungsarbeit zu dieser Thematik hilfreich zur Seite gestanden haben.

Inhaltsverzeichnis

1 Wirtschaftliche Relevanz für klein- und mittelständische Unternehmen ... 1
1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung ... 1
1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU ... 3
2 Wissenschaftlich-technischer Ansatz ... 4
2.1 Stand der Forschung und Entwicklung ... 4
2.1.1 Allgemeine Zusammenhänge zum Pumpen von Beton ... 4
2.1.2 Beschreibung des Pumpwiderstands von Beton ... 6
2.1.3 Einflüsse auf den Pumpwiderstand von Beton ... 8
2.1.4 Betontechnische Methoden zur Vorhersage des Pumpwiderstands ... 10
2.1.5 Beschreibung der Pumpstabilität von Beton ... 12
2.1.6 Auslöser von Entmischungen die zu Blockierungen führen können ... 13
2.1.7 Betontechnische Methoden zur Quantifizierung der Pumpstabilität ... 16
2.2 Ziele und Lösungsweg des Forschungsprojekts ... 20
3 Experimentelle Untersuchungen ... 22
3.1 Gesteinskörnungsanalysen ... 22
3.2 Konzipierung von Betonzusammensetzungen ... 22
3.3 Prüftechniken zur Frischbetoncharakterisierung ... 25
3.3.1 Gesteinskörnungsanalysen ... 25
3.3.2 Frischbetoncharakterisierung ... 25
3.3.3 Pumpwiderstandsrelevante Untersuchungen ... 26
3.3.4 Pumpstabilitätsrelevante Untersuchungen ... 28
3.3.5 Versuchsaufbauten und Versuchsdurchführung der Technikum-Pumpversuche ... 32
3.3.6 Durchführung und Versuchsaufbauten der großmaßstäblichen Pumpversuche ... 38
4 Versuchsergebnisse ... 45
4.1 Laboruntersuchungen ... 45
4.1.1 Charakterisierung der Gesteinskörnungen für die Laboruntersuchungen ... 45
4.1.2 Betonentwurf der Laborbetone ... 45
4.1.3 Optimierung des Gleitrohr-Rheometers ... 58
4.2 Technikum-Pumpversuche ... 60
4.2.1 Charakterisierung der Gesteinskörnungen für die Technikum-Pumpversuche ... 60
4.2.2 Betonentwurf der Technikum-Betone ... 63
4.2.3 Technikum-Pumpversuche unter der Verwendung von Pumpleitung 1 (PL1) ... 65
4.2.4 Technikum-Pumpversuche unter der Verwendung von Pumpleitung 2 (PL2) ... 85
4.2.5 Analyse blockierten Betongefüges der Technikum-Pumpversuche (PL2) ... 88
4.2.6 Identifizierung von Blockierungen mittels Hydrauliköldruck-Zeit-Verlauf ... 91

4.2.7 Analysen der Sliper-Prognosen ... 101
4.3 Großmaßstäbliche Pumpversuche ... 122
4.3.1 Charakterisierung der untersuchten Betone ... 124
4.3.2 Einfluss der Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung ... 126
4.3.3 Partikelmigration und Interaktion mit der Vorlaufmischung ... 129
4.3.4 Einfluss der Schwammkugelanordnung auf die Blockierungsneigung ... 129
4.3.5 Untersuchungen zur Gleitschichtneuausbildung ... 130
4.3.6 Identifizierung von Blockierungen mittels Hydrauliköldruck-Zeit-Verlauf ... 130
4.3.7 Analysen blockierter Betongefüge der großmaßstäblichen Pumpversuche ... 132
4.3.8 Füllgradbestimmung der Förderzylinder ... 133
5 Modellbildung und Verfahrensbeschreibung ... 137
5.1 Quantitatives Modell zur Beschreibung wesentlicher betontechnischer ... 137
5.2 Technisches Verfahren zur Vermeidung von Blockierungen in der Praxis ... 149
6 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse ... 152
7 Anwendungshinweise und Handlungsempfehlungen für die Praxis ... 157
7.1 Empfehlungen zum Betonentwurf ... 157
7.2 Empfehlungen zur Förderleitungsführung und zur Verwendung einer Vorlaufmischung sowie Schwammkugel ... 160
7.3 Empfehlungen zur Anwendung eines digitalen Assistenzsystems zur Überwachung des Pumpprozesses ... 161
7.4 Empfehlungen zur Anwendung des Sliper-Geräts ... 161
8 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU ... 163
9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten ... 166
10 Verwendung der Zuwendung ... 167
10.1 Personalkosten ... 167
10.2 Gerätebeschaffung ... 167
11 Umsetzbarkeit und Transfer der Ergebnisse ... 168
11.1 Grad der Umsetzung in die betriebliche Praxis ... 168
11.2 Wirksame Maßnahmen zum Ergebnistransfer ... 170
12 Literaturverzeichnis ... 171

1 Wirtschaftliche Relevanz für klein- und mittelständische Unternehmen

1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Das Pumpen von Beton ist aus bauverfahrenstechnischen und bauablauftechnischen Gründen die wirtschaftlichste Möglichkeit eine große Menge frischen Betons in einer angemessenen Zeit zu fördern, wobei sich die Technik insbesondere für längere Distanzen und große Höhen eignet [BTB – 2020; Aldred – 2010]. In Deutschland wurden Im Jahr 2021 rd. 55 Mio. m^3 Transportbeton produziert. In den vergangenen Jahren wurden rd. 30 % der vertriebenen Menge an Transportbeton mittels Pumpen gefördert und eingebaut [BTB – 2018 bis BTB – 2021]. Dabei kommen Betonpumpen nicht nur bei der Betonage herausragender Ingenieurbauwerke zum Einsatz, sondern vor allem auch im alltäglichen Baugeschehen, beispielsweise im Wohnungs- und Industriebau. Eine besondere Rolle kommt dabei dem weit verzweigten Netz der klein- und mittelständischen Unternehmen der Transportbetonindustrie zu, die nicht nur den Beton produzieren, sondern häufig auch die Betreiber von Betonpumpen sind.

Auf Pumpen basierte Herstellungstechnologien gehen bereits heute über die des Einbaus von Transportbeton auf der Baustelle hinaus. So wird beispielsweise auch in Betonfertigteilwerken zunehmend eine automatisierte Betonförderung durch Pumpen vorgenommen, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern [Kronen – 2005]. In naher Zukunft gewinnen darüber hinaus Bauprozesse mit Hilfe von 3D-Betondrucktechnik an Bedeutung, für die die Pumpförderung i.d.R. ebenfalls einen zentralen Vorgang darstellt [Le – 2012; Perrot – 2015].

Die zunehmende Anwendungsbreite der Pumptechnik stellt sowohl Betontechnologen als auch Maschinenbauer und -betreiber vor neue Herausforderungen. Zum einen werden insbesondere beim Bauen im Bestand komplexe Förderleitungsführungen notwendig (vgl. Abbildung 1-1). Zum anderen sollen moderne Betone mit sehr unterschiedlichen Zusammensetzungen und Eigenschaften sicher gefördert und eingebaut werden.

Abbildung 1-1: Förderschlauchführung beim Bauen im Bestand: Betonage in einer Tiefgarage.

Grundsätzlich sind sämtliche Akteure einer Bauaufgabe aus bauablauftechnischen Gründen an einem reibungslosen Bauablauf interessiert. Das Pumpen von Beton wird dabei oft zum Nadelöhr im Bauablauf. Fällt eine Pumpe aus oder entspricht die Pumpenleistung nicht den Planungen, sind damit erhebliche Störungen auf der Baustelle bei der Maschinen- und Personaleinsatzplanung, beim Bauverfahren, z. B. Gleitbauverfahren sowie beim zeitlichen Ablauf der Maßnahme, u. a. Nachtruhe und Sperrzeiten, verbunden. Noch gravierender sind Schäden am hergestellten Bauteil infolge einer unzureichenden Pumpeignung des Betons, die sich z. B. in Form von Fehlstellen, Lunkern oder auch Verfärbungen und Entmischungen des erhärteten Betons äußern können.

Trotz langjähriger Erfahrungen beim Pumpen von Beton, treten bereits bei alltäglichen Pumpaufgaben nach wie vor Störungen auf [Feys – 2011]. Hierzu gehören vor allem Blockierungen der Förderleitungen [Kaplan – 2005; Feys – 2011] (vgl. Abbildung 1-2) mit hohen Schadenskosten [ACI 304.2R – 1996], die zeitliche Ausfälle im Bauablauf oder gar Personenschäden zur Folge haben können.

Abbildung 1-2: Beispiele blockierter Förderleitungselemente mit erhärtetem Beton [Secrieru – 2018a].

Amerikanische Untersuchungen belegen, dass dauerhaft blockierte Förderleitungen sowie geborstene Leitungen mit direkten Kosten von rd. 2,3 Mio. € pro Jahr quantifiziert werden können [ACI 304.2R – 1996]. Die indirekten Kosten z. B. für Arbeitsleistung zur Reinigung von Förderleitungen sowie möglicher Folgekosten aus Gesundheitsbeeinträchtigungen des Personals infolge dieser schweren körperlichen Tätigkeit werden leider statistisch nicht erfasst, sind jedoch nach Einschätzung der an diesem Forschungsprojekt beteiligten Industriepartner um ein Vielfaches höher anzusiedeln.

Blockierungen – umgangssprachlich als ‚Stopfer' bezeichnet – treten in der Praxis oft ohne erkennbaren Grund auf und konnten zu Beginn des hier vorliegenden Projekts praktisch nicht vorhergesagt werden. Die Bau- bzw. Pumppraxis stützt sich derzeit überwiegend auf ihr erfahrungsbasiertes Wissen der vergangenen Jahrzehnte. Da allerdings Bauprozesse und insbesondere das Baustoffsystem Beton einem stetigen Wandel unterworfen sind, stößt das erfahrungsbasiertes Wissen zunehmen an seine Grenzen. Durch die Verwendung von hochwirksamen Fließmitteln der neusten Generation und zusätzlich durch die zunehmende Substitution von Zementklinker durch das Angebot vielfältiger Zusatzstoffe, ist das Betonsystem vor allem gegenüber Schwankungen im Wassergehalt deutlich sensibler als in der Vergangenheit.

Erschwerend kommt hinzu, dass das Blockierungsverhalten von Beton nicht ausschließlich von der Betonzusammensetzung abhängt, sondern aus einer komplexen Interaktion zwischen der Betonzusammensetzung, den Frischbetoneigenschaften (inkl. aller hier relevanter Einflussgrößen), der Geometrie und Leitungsführung der Förderleitung, der sog. Pumpregie (d. h. dem Ablauf des Pumpprozesses z.B. zeitlicher Verlauf der Fördergeschwindigkeit)

resultiert. Sämtliche Einflüsse wirken sich auf das Pumpverhalten und die Blockierungsneigung beim Pumpen von Beton aus und müssen gesamtheitlich berücksichtigt werden. Zielsichere Vorhersagen zur Blockierungsneigung beim Pumpen von Beton waren zu Projektbeginn nicht möglich. Daraus erwuchs die Notwendigkeit zur Entwicklung neuer Konzepte und Modelle zur zielsicheren Gestaltung eines störungsfreien Pumpprozesses. Derartige Konzepte wurden im hier vorliegenden Forschungsprojekt untersucht.

1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU

Zwischen den Jahren 2018 und 2021 wurden in Deutschland im Schnitt mehr als 15 Mio. m^3 Transportbeton mit Betonpumpen gefördert und eingebaut [BTB – 2018, 2019, 2020, 2021]. Diese Förderleistung wurde im Jahr 2021 von mehr als 1.400 Betonpumpen erbracht [BTB – 2021]. Die Bereitstellung der Betonpumpen erfolgte in hohem Maße durch zahlreiche kleine und mittelständische Unternehmen.

Wie bereits erläutert, gewinnt die Pumptechnik neben dem Einbau von Transportbeton auf der Baustelle zunehmend auch in Betonfertigteilwerken an Bedeutung, da der Einbau des Betons deutlich schneller und damit wirtschaftlicher gestaltet werden kann. Darüber hinaus vollzieht sich aktuell ein Übergang zu einer durchgehenden digital gesteuerten Wertschöpfungskette (Industrie 4.0), die allmählich durch digitale Produktionsprozesse erweitert wird [Mecht – 2018; Haist – 2022]. Damit sind vor allem verschiedenste 3D-Druckverfahren gemeint, für die das Pumpen von Beton einen zentralen Vorgang darstellt [Khosh – 2006; Le – 2012; Henke – 2016; Fritschi – 2016; Nerella – 2016]. Durch HAIST ET AL. wurden derartige Konzepte aber auch für den klassischen Transportbetonsektor vorgestellt [Haist – 2022].

Durch die im Rahmen des Forschungsprojektes erlangten Erkenntnisse kann der Pumpprozess in der Zukunft sicherer und wirtschaftlicher gestaltet werden. Die Häufigkeit von Blockierungen während des Pumpens von Beton, die zu erheblichen Störungen im Baugeschehen, zu hohe Schadenskosten und zu Personenschäden führen können, soll in Zukunft wirkungsvoll verringert werden. Auf diese Weise können Transportbetonhersteller, Pumpendienstleister und bauausführende Unternehmen ihr wirtschaftliches Risiko mindern, was ihre Stellung im Markt nachhaltig und effektiv stärkt. Den beteiligten Akteuren der Baubranche werden wissenschaftlich begründete und praxisgerechte Anwendungshinweise und Empfehlungen bereitgestellt. Dabei werden sowohl Aspekte zur technischen Konzipierung des zu fördernden Betons als auch der Vorlaufmischung sowie zur Anordnung von Bauteilelementen der Förderleitung berücksichtigt. Darüber hinaus wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem es möglich ist drohende Blockierungen bereits in der Entstehungsphase zu erkennen. Darauf aufbauend wird ein wirkungsvolles Vorgehen beschrieben, um eine irreversible Blockierung der Förderleitung nahezu vollständig vermeiden zu können. Das genannte Verfahren sowie ein verallgemeinerbares und wissenschaftlich begründetes Modell zur technischen Konzipierung von Betonzusammensetzung, die sich durch ihre Pumpbarkeit auszeichnen, wurden im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeiten zusätzlich entwickelt und sollen der Pumppraxis bereitgestellt werden, um in Zukunft Blockierungen im Bauablauf nahezu vollständig verhindern zu können. Das Verfahren wurde durch die Berichterstatter zum Patent angemeldet (Amtliches Aktenzeichen 10 2022 116 603.1).

2 Wissenschaftlich-technischer Ansatz

2.1 Stand der Forschung und Entwicklung

2.1.1 Allgemeine Zusammenhänge zum Pumpen von Beton

Beton ist ein heterogenes Stoffgemisch und beinhaltet sämtliche klassischen Aggregatszustände (Flüssigkeiten, Feststoffe und Gase), wobei die enthaltenen Feststoffe und Flüssigkeiten variierende Dichten zwischen 1,0 kg/dm³ und 3,1 kg/dm³ und die Partikeldurchmesser von wenigen Mikrometern bis hin zu mehreren Zentimetern besitzen. Dennoch wird Beton aus makroskopischer Sicht oft als homogenes Stoffgemisch verstanden insbesondere, um eine rheologische Beschreibung seiner Eigenschaften vornehmen zu können. Dabei werden Entmischungsvorgänge, die das Pump- und das Blockierungsverhalten von Beton maßgeblich beeinflussen, oftmals außeracht gelassen, obwohl dieses für die Minimierung des Drucks in der Förderleitung maßgebend ist.

Das Pumpverhalten von Beton kann über den Pumpwiderstad und über die Pumpstabilität beschrieben werden [Browne – 1977; Kaplan – 2005; Kasten – 2011a]. Beide Aspekte müssen für ein vollständiges Verständnis zum Pumpverhalten von Beton berücksichtigt werden. Ein Beton, der sich zum Pumpen eignet, muss gesättigt sein, d.h. die festen Bestandteile (Zement, Zusatzstoffe, Gesteinskörnung) liegen dispergiert vor. Dabei sind die mehlfeinen Stoffe (Zement und Zusatzstoffe) im Anmachwasser und die groben Bestandteile (Sand und Gesteinskörnung) im Zementleim dispergiert (vgl. Abbildung 2-1) [Binns – 2003; Coussot – 2005].

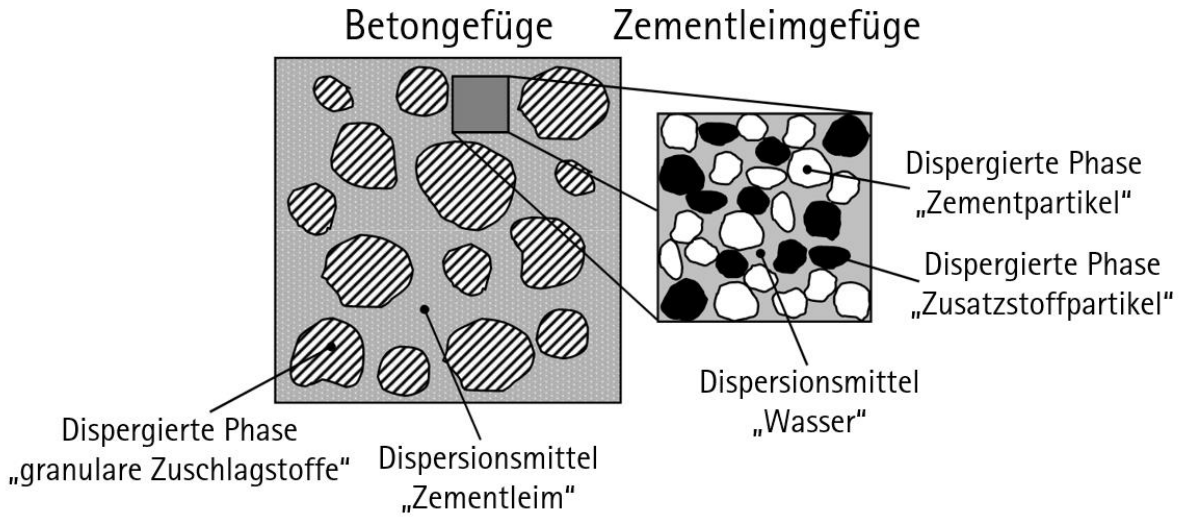


Abbildung 2-1: Definitionen des Beton- und Zementleimgefüges als Dispersion [Geisenh – 2012].

Im gesättigten Zustand sind sämtliche Hohlräume zwischen den Feststoffen mit Wasser bzw. Zementleim gefüllt. Zusätzlich ist ein Überschuss an Wasser und Zementleim vorhanden, wodurch eine Verformbarkeit des Frischbetons ermöglicht wird [Su – 2003]. Je mehr Wasser und/oder Zementleim dem Betongefüge zur Verfügung stehen, desto höher ist der Anteil hydrodynamischer Wechselwirkungen, was den Pumpwiderstand herabsetzt [Kaplan – 2000; Feys – 2009a; Feys – 2011]. Je näher hingegen das Betongefüge an den Sättigungspunkt heranrückt (kleiner werdender Wasser und/oder Zementleimgehalt), desto stärker dominieren direkte Kontaktwechselwirkungen und Bewegungsenergie wird in Form von Reibung dissipiert, was den Pumpwiderstand erhöht (vgl. Abbildung 2-2) [Ede – 1957; Weber – 1963; Mewis – 2012].

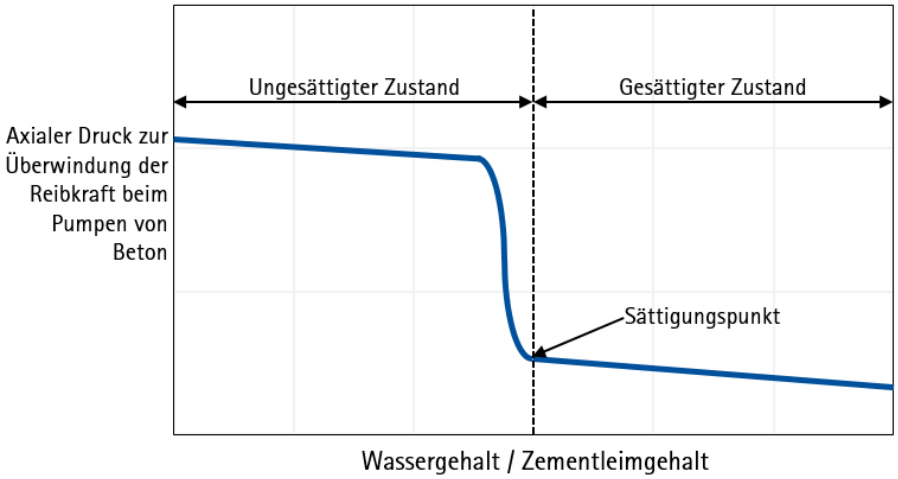


Abbildung 2-2: Qualitativer Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Zementleimgefüges sowie dem Zementleimgehalt des Betongefüges und dem axialen Pumpdruck [Browne – 1977].

Am Übergangspunkt (Sättigungspunkt) hin zum ungesättigten Zustand verliert ein Beton sprunghaft seine Fließ- und Pumpeigenschaften [Kordts – 2004]. Ein vergleichbarer Ansatz wurde von WÜSTHOLZ entwickelt, um die Frischbetoneigenschaften von SVB zu beschreiben [Wüstholz – 2005]. Der entwickelte Ansatz beruht auf der *Excess Paste Theory* von [Kennedy – 1940]. Dabei setzt sich das Zementleimvolumen V_{Leim} im Beton aus zwei Anteilen zusammen: Dem Anteil, der benötigt wird, um die Hohlräume zwischen den Gesteinspartikeln des Kornhaufwerks zu füllen und einem zusätzlichen Anteil (Überschussleimvolumen $V_{Leim,Ü}$), der die Gesteinspartikel dispergiert und auseinanderdrückt, damit eine innere Verformbarkeit des Betongefüges gewährleistet ist (vgl. Abbildung 2-3).

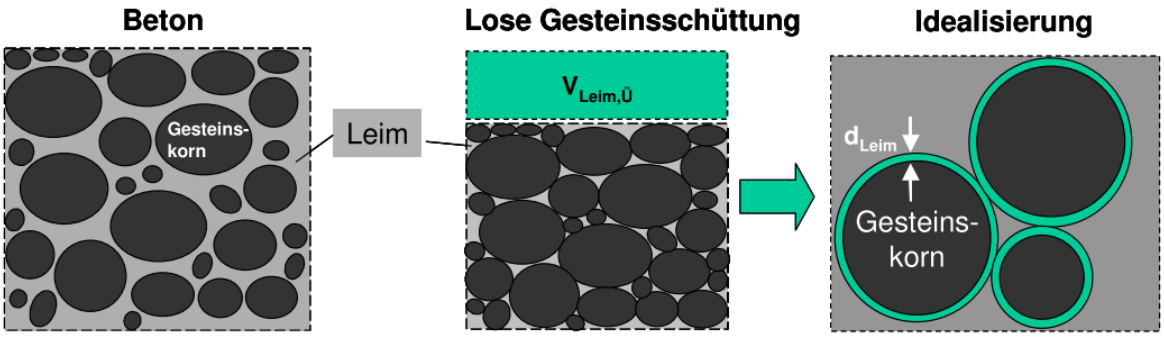


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Überschussleimes $V_{Leim,Ü}$ und der Leimschichtdicke d_{Leim} im Betongefüge nach [Wüstholz – 2005].

Die Leimschicht d_{Leim} wird dabei als gleichmäßig dicke, die Gesteinskornpartikel umhüllende Schicht [Wüstholz – 2005] bzw. als mittlerer Abstand [Bui – 1999] der Gesteinskornpartikel unabhängig von ihrem Durchmesser angenommen [Powers – 1968]. WÜSTHOLZ berücksichtigt in seinem Modell nicht die Kornform, sondern ausschließlich die Partikelgrößenverteilung (Sieblinie). Eine Erweiterung auf unregelmäßig geformte Gesteinskornpartikel erfolgte aufbauend durch HUß, der die Sphärizität *SPHT* zusätzlich berücksichtigte [Huß – 2010]. Modelle zur Quantifizierung des Einflusses der Leimschichtdicke d_{Leim} auf das Pumpverhalten von Beton wurden bislang noch nicht verwendet, bieten sich aber an, um den Sättigungszustand des Betongefüges und damit sein Pumpverhalten zu beschreiben. Die Leimschichtdicke d_{Leim} lässt sich nach WÜSTHOLZ wie folgt berechnen.

$$d_{Leim} = 0{,}634 \cdot \left(\frac{V_{Leim,Ü}}{O_{GK}}\right)^{0{,}91} \tag{2-1}$$

Dabei stellen O_{GK} die gesamte Oberfläche der im Betongefüge enthaltenen Gesteinskörnung (< 0,125 mm) und $V_{Leim,Ü}$ das Überschussleimvolumen dar, welches dafür sorgt, dass die Gesteinskornpartikel dispergiert im Zementleim vorliegen und so eine gegenseitige Beweglichkeit ermöglicht wird. O_{GK} ist dabei eine Funktion von der Zugabemenge an Gesteinskörnung m_{GK} und der massebezogenen spezifischen Oberfläche $O_{GK,spez.}$. Die spezifische Oberfläche $O_{GK,spez.}$ (Fläche je Kilogramm Gesteinskörnung) hängt wiederum von der Granulometrie der Gesteinskörnung ab. Mit Hilfe des Sphärizitätsindexes f_{sph}, der mittels fotooptischer Verfahren bestimmt werden kann, ist es möglich die Kornform der Gesteinskornpartikel zu berücksichtigen. Das zur Berechnung der Leimschichtdicke d_{Leim} erforderliche Überschussleimvolumen $V_{Leim,Ü}$ lässt sich nach Gleichung 2-2 wie folgt berechnen.

$$V_{Leim,Ü} = V_{Leim} - V_{GK,H,Schütt} = V_{Leim} - V_{GK} \cdot \left(\frac{1}{n_{GK,Schütt}} - 1\right)$$

$$V_{Leim,Ü} = V_{Leim} - \frac{m_{GK}}{\rho_{GK}}\left(\frac{\rho_{GK}}{\rho_{GK,Schütt}} - 1\right) \tag{2-2}$$

mit:

$V_{Leim,Ü}$	= Überschussleimvolumen je m³ Beton [dm³/m³]
V_{Leim}	= Leimvolumen je m³ Beton [dm³/m³]
$V_{GK,H,Schütt}$	= Hohlraumvolumen der losen Gesteinsschüttung je m³ Beton [dm³/m³]
V_{GK}	= Volumen der Gesteinskörnung je m³ Beton [dm³/m³]
$n_{GK,Schütt}$	= Feststoffkonzentration bei loser Gesteinsschüttung [-]
m_{GK}	= Masse der Gesteinskörnung je m³ Beton [kg/m³]
ρ_{GK}	= Mittlere Korndichte der Gesteinskörnung [kg/dm³]
$\rho_{GK,Schütt}$	= Schüttdichte der Gesteinskörnung [kg/dm³]

Zur Berechnung der Feststoffkonzentration bei loser Gesteinsschüttung $n_{GK,Schütt}$ kann die Schüttdichte der Gesteinskörnung $\rho_{GK,Schütt}$ experimentell nach DIN EN 1079 bestimmt werden. Der Feststoffgehalt $n_{GK,Schütt}$ errechnet sich nach Gleichung 2-3.

$$n_{GK,Schütt} = \frac{V_{GK}}{V_{ges}} = \frac{m_{GK,Probe}}{V_{ges} \cdot \rho_{GK}} = \frac{\rho_{GK,Schütt}}{\rho_{GK}} \tag{2-3}$$

2.1.2 Beschreibung des Pumpwiderstands von Beton

Für geradeförmig verlaufende Förderleitungen gilt, dass der erforderliche Pumpdruck proportional mit der Förderleitungslänge zunimmt [Feys – 2013a]. Beton bewegt sich nur dann, wenn durch den angelegten Druckgradient die zwischen dem frischen Beton und der Leitungswandung resultierende mechanische Spannung τ größer ist als die Fließgrenze τ_0 des Betons. Dieses Fließverhalten lässt sich rheologisch durch das BINGHAM-Modell [Bingham – 1916] beschreiben (vgl. Gleichung 2-3).

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \tag{2-3}$$

Dabei stellen τ die Schubspannung, τ_0 die Fließgrenze, μ die plastische Viskosität und $\dot{\gamma}$ die Scherrate dar. Die Komplexität des Pumpfördervorgangs von Beton ist auf die Tatsache

zurückzuführen, dass ein Fließen des Betons nur in denjenigen Querschnittsbereichen der Förderleitung eintritt, in denen die Fließgrenze überschritten wird. Während des Pumpens von Beton stellt sich der in Abbildung 2-4 vereinfacht dargestellte Zustand in einer Förderleitung ein [Vassiliev – 1953; Verhoeven – 2005], was die Existenz einer Fließgrenze voraussetzt [Choi – 2013a]. Bei dem als Pfropfenströmung bezeichneten Zustand bildet sich infolge des Wandeffekts [Berge – 1995; Spangen – 2012] und durch scherinduzierte Partikelmigration [Phillips – 1992; Fataei – 2022] eine während des Pumpens stark gescherte Gleitschicht an der Förderleitungswandung aus [Sakuta – 1979; Tanigawa – 1991; Jacobsen – 2009]. Unter der Einwirkung einer Scherung kommt es somit zu einer scherinduzierten Entmischung des Betons im Förderleitungsquerschnitt und gröbere Partikel wandern von Regionen mit hoher Schergeschwindigkeit zu Regionen mit niedriger Schergeschwindigkeit [Lu – 2008][Ingber – 2009]. Der im Inneren liegende Betonpfropfen wird hingegen widerstandsarm durch die Förderleitung transportiert [Choi – 2013b].

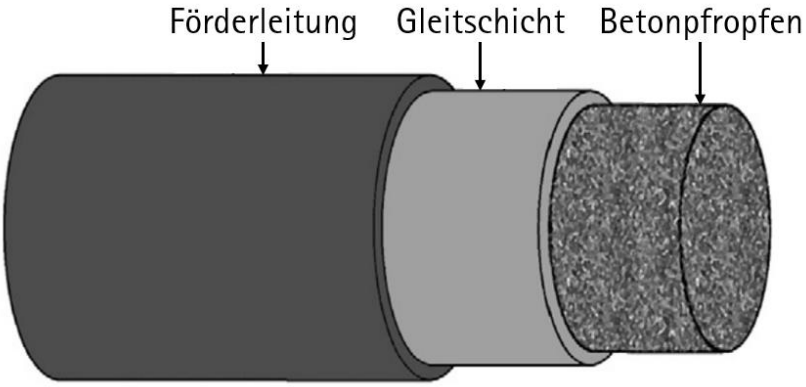


Abbildung 2-4: Vereinfachte schematische Darstellung der Betonbewegung in einer Förderleitung als Pfropfenströmung [Choi – 2013b].

Die Gleitschicht stellt nach vorherrschender Auffassung eine Schicht aus angereichertem Zementleim [Sakuta – 1979] bzw. feinem Mörtel dar [Ngo – 2010a; Le – 2015] und weist gegenüber dem Ausgangsbeton eine geringere plastische Viskosität μ auf [Fataei – 2022], was den Pumpwiderstand verringert [Poiseuille – 1841; Macosko – 1994]. Die Gleitschichtdicke *e* variiert je nach Zusammensetzung des Betons und des Förderleitungsdurchmessers [Vassiliev – 1953; Choi – 2013a; Fataei – 2022] und beträgt wenige Millimeter, wobei nicht von einer klaren Trennung zwischen Gleitschicht und Betonpfropfen auszugehen ist.

Sobald sich eine Gleitschicht ausgebildet hat, stellt sich für gleiche Strömungsbedingungen ein Gleichgewichtszustand zwischen der stofflichen Zusammensetzung der Gleitschicht und der des Betonpfropfens ein. Dies hat zur Folge, dass die Gleitschichtdicke *e* und ihre rheologischen Eigenschaften konstant über die Förderleitungslänge sind [Secrieru – 2018a]. Dies erklärt den proportionalen Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und einer (geradlinig verlaufenden) Förderleitung eines homogenen Betons [Feys – 2013b]. Im Bereich von Bögen, Krümmern oder auch Reduzierstücken wird hingegen die Ausbildung der Gleitschicht gestört und somit das Pumpverhalten beeinträchtigt. Entsprechend steigt infolge solcher Leitungselemente der Pumpendruck überproportional an.

Die Eigenschaften und die Dicke der Gleitschicht werden vor allem durch die Zusammensetzung des Betons beeinflusst. Auf die wesentlichen betontechnischen Einflussgrößen hinsichtlich des Pumpwiderstands von Beton unter der Berücksichtigung seiner rheologischen Eigenschaften und der Ausbildung einer Gleitschicht wird im Folgenden eingegangen.

2.1.3 Einflüsse auf den Pumpwiderstand von Beton

Einfluss des Wassergehalts

Da der Zementleim moderner Betone aus ökonomischen aber zunehmend auch aus ökologischen Gesichtspunkten nur noch selten ausschließlich aus Wasser und Zement zusammengesetzt ist, eignet sich insbesondere zur rheologischen Beschreibung die Feststoffkonzentration ϕ besser als das klassische massebezogene Verhältnis aus Wasser und Zement (w/z-Wert). Die Feststoffkonzentration ϕ stellt das volumetrische Verhältnis der Feststoffe zum Gesamtvolumen der Mischung bestehend aus Feststoffen und Wasser dar und lässt sich nach Gleichung 2-4 berechnen. Dabei gilt: Je höher die Feststoffkonzentration ϕ ist, desto geringer ist der Wassergehalt und umso kleiner ist dementsprechend der w/z-Wert.

$$\phi = \frac{V_{\text{Feststoff}}}{V_{\text{Feststoff}} + V_{Wasser}} \tag{2-4}$$

Mit zunehmender Feststoffkonzentration ϕ sinkt die Leimschichtdicke zwischen den Partikeln und Spannungen, die beim Pumpen auftreten, werden im Wesentlichen durch direkte Kontaktwechselwirkungen zwischen den Gesteinskörnern übertragen [Flatt – 2006]. Entsprechend steigt mit zunehmender Feststoffkonzentration ϕ die plastische Viskosität μ und damit der Pumpwiderstand des Betons an [Krieger – 1959; Mazanec – 2010; Mazanec – 2011; Guazzelli – 2018; Kammer – 2022]. In [Ngo – 2010b] und [Fataei – 2022] wurde darüber hinaus festgestellt, dass durch eine höhere Feststoffkonzentration ϕ die Gleitschichtdicke *e* abnimmt, was den Pumpwiderstand zusätzlich erhöht.

Einfluss des Leimvolumens

Die plastische Viskosität μ des Betons nimmt mit steigendem Leimvolumen V_{Leim} ab, da der Abstand zwischen Gesteinspartikeln zunimmt und der Kornreibungsanteil abnimmt [Wüstholz – 2005]. Dadurch nehmen direkte Kontaktwechselwirkungen ab (vgl. Abbildung 2-5) [Mewis – 2012].

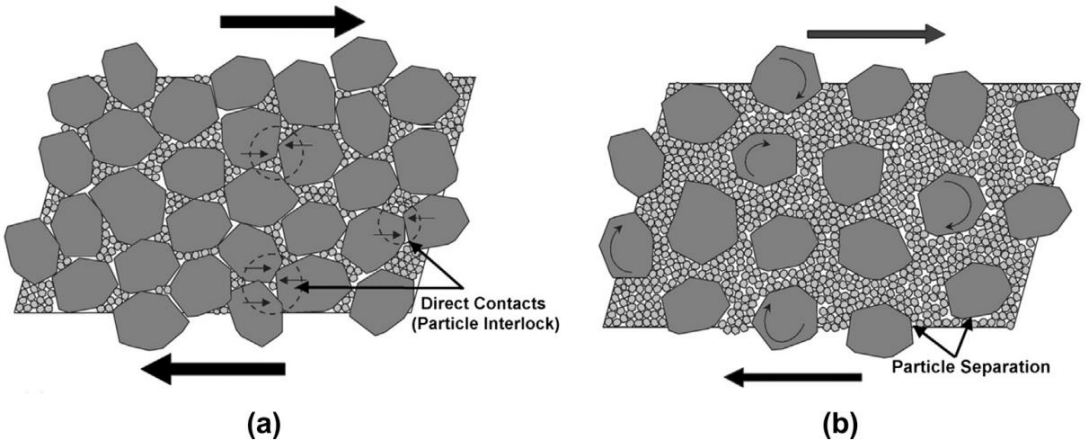


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Betongefüges bei (a) maximal möglicher Packungsdichte der Gesteinskörnung und bei (b) maximaler Fließfähigkeit, von [Mehdipour – 2018] aus [Fung – 2014].

Gleichzeitig erhöht sich mit zunehmendem Leimvolumen V_{Leim} die Gleitschichtdicke *e* während des Pumpens. Dadurch wird der Pumpwiderstand herabgesetzt [Ngo – 2010a]. Das erforderliche Gleitschichtvolumen zur Ausbildung einer bestimmten Gleitschichtdicke *e* hängt zusätzlich vom Förderleitungsdurchmesser ab und steigt mit steigendem Durchmesser [Fataei – 2022].

Im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts setzt sich das Leimvolumen V_{Leim} aus den volumetrischen Anteilen von Zement, Zusatzstoffen und der Gesamtwassermenge im Frischbeton zusammen.

Einfluss von Gesteinskörnung

Aufgrund des antiproportionalen Verhältnisses im Stoffraum des Betons geht eine Änderung des Gesteinskörnungsvolumens gleichzeitig mit einer Änderung des Zementleimvolumens einher. Infolgedessen steigt der Pumpwiderstand eines Betons mit steigendem Anteil grober Gesteinskörnung [Fataei – 2019] und feinem Sand [Guptill – 1996] an, da die zusätzliche Oberfläche mit Zementleim umschlossen werden muss [ACI 211.9R – 2018] und die Gleitschicht an Dicke verliert [Weber – 1963]. Gleichzeitig beeinflusst die Kornform den Pumpwiderstand. Dabei gilt: Je ungleichmäßiger eine Gesteinskörnung geformt ist, desto größer ist die mit Zementleim zu benetzende Oberfläche und umso kleiner ist gemäß HUß und WÜSTHOLZ bei gleichem Zementleimgehalt die Leimschichtdicke d_{Leim}.

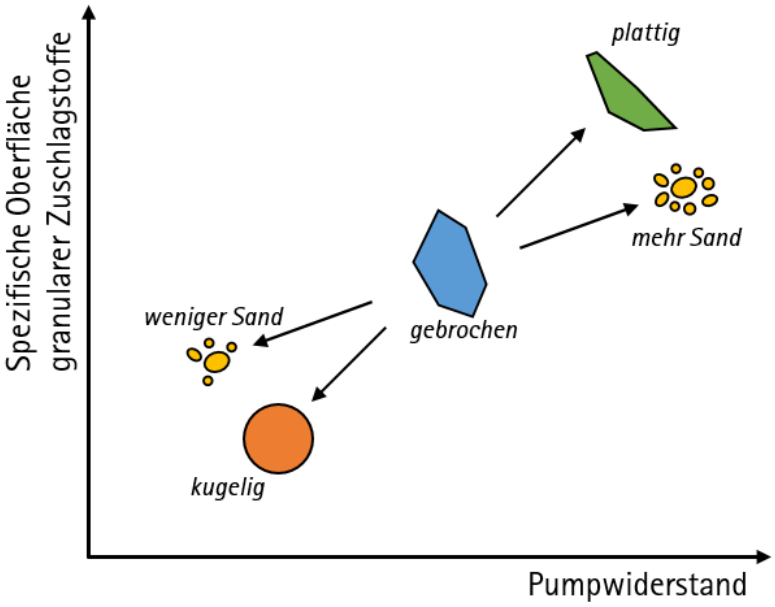


Abbildung 2-6: Qualitativer Zusammenhang zwischen der spezifischen Oberfläche der Gesteinskörnung und dem Pumpwiderstand von Beton in Abhängigkeit von der Kornform und dem Sandgehalt, in Anlehnung an [Wallevik – 2011], aus [Cotardo – 2023].

Um den Pumpwiderstand von Beton zu reduzieren empfiehlt es sich, den Gesteinskörnungsanteil möglichst gering zu wählen [ACI TC 211 – 2018], auch wenn damit steigende Betonkosten verbunden sind. Zum Pumpen eignen sich vor allem Betone, die eine Sieblinie zwischen A und B aufweisen, da die Gesamtoberfläche der Gesteinskörnung vergleichsweise gering ist [Grübl – 2001]. Die wesentlichen Zusammenhänge zum Einfluss von Gesteinskörnung auf den Pumpwiderstand werden durch Abbildung 2-6 veranschaulicht.

Einfluss von Fließmittel

Zu den wesentlichen eigenschaftsbestimmenden Einflussgrößen in der heutigen Betontechnologie zählen vor allem Fließmittel (FM), um die Fließ- und Pumpeigenschaften von Beton gezielt zu steuern, ohne dabei die dauerhaftigkeitsrelevanten und mechanischen Eigenschaften des Festbetons zu beeinflussen. Der Wirkmechanismus moderner Polycarboxylate beruht auf dem sterischen Effekt adsorbierter Polymere an der Oberfläche von Zementpartikeln. Der sterische Effekt wird durch die langen Seitenketten der

Fließmittelpolymere hervorgerufen [Uchikawa – 1997], wodurch eine räumliche Trennung benachbarter Zementpartikel hervorgerufen wird [Björns – 2003]. Auf diese Weise werden Zementpartikel dispergiert und eine Koagulation wird teilweise verhindert [Plank – 2003]. Infolge der Dispergierung ist weniger Wasser in den Hohlräumen von agglomerierten Strukturen eingeschlossen und dem Zementleim steht ein größerer Anteil an Wasser zur Ausbildung seiner rheologischen Eigenschaften zur Verfügung [Blask – 2002]. Bei gleichem Wassergehalt im Beton vergrößert sich auf diese Weise der Partikelabstand *z* zwischen Zement- und Zusatzstoffpartikeln [Yang – 1997]. Bei einem größeren Partikelabstand sind Kontaktwechselwirkungen weniger stark ausgeprägt [Mazanec – 2013], wodurch die Beweglichkeit der Partikel untereinander verbessert wird und Spannungen, die beim Pumpen auftreten, über hydrodynamische Wechselwirkungen übertragen werden [Feys – 2009b]. Deshalb verringert sich bei gleicher Feststoffkonzentration ϕ durch die Zugabe von FM die Fließgrenze τ_0 und der Pumpwiderstand nimmt ab [Spiratos – 2003].

Einfluss von Zusatzstoffen

Der Einfluss von Zusatzstoffen auf den Pumpwiderstand hängt vor allem von den granulometrischen Eigenschaften und von der Zugabemenge ab. Beispielsweise setzt eine geringe Zugabemenge an Flugasche den Pumpwiderstand herab, da Flugaschepartikel gegenüber Zementpartikel eine höhere Sphärizität und damit eine geringere spezifische Oberfläche bei etwa gleicher Partikelgrößenverteilung aufweisen [Aïtcin – 1998d]. Darüber hinaus weisen Partikel höherer Sphärizität geringere Reibungsanteile infolge von Scherung auf (Kugellagereffekt [Bombled – 1966]), da sich direkte Kontaktwechselwirkungen verringern [Anderson – 1977; Mehta – 2006]. Dadurch verringert sich die Fließgrenze τ_0, was den Pumpwiderstand herabsetzt [Riding – 2016]. Gleiches gilt für die Zugabe von Mikrosilika [Vanhove – 2006; Riding – 2016], wobei die Zugabemenge aufgrund der höheren Feinheit (hohe spezifische Oberfläche) begrenzt sein sollte [Riding – 2016]. Andernfalls wird eine zu große Wassermenge an der Oberfläche adhäsiv gebunden [Jeong – 2016]. Der erhöhte Wasseranspruch führt in der Folge zu einer Erhöhung der Fließgrenze τ_0 und der plastischen Viskosität μ des Betons bei gleichem Wassergehalt, was den Pumpwiderstand erhöht [Riding – 2016].

2.1.4 Betontechnische Methoden zur Vorhersage des Pumpwiderstands

Der Pumpwiderstand wird in der Regel durch das Verhältnis aus Pumpdruck *P* zur Förderrate *Q* (Pumpdruck-Förderrate-Diagramm) beschrieben.

Gleitrohr-Rheometer Sliper

Um den Pumpwiderstand eines Betons im Labor zu bestimmen wurde das sogenannte Gleitrohr-Rheometer entwickelt [Kasten – 2010], das von der Firma Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH als Sliper-Gerät (SLIPER = Sliding Pipe Rheometer) kommerziell vertrieben wird (vgl. Abbildung 2-7 links). Das Gleitrohr-Rheometer ermöglicht eine vereinfachte Nachstellung der Materialbewegung in einer Förderleitung. Dabei werden die Verschiebungsgeschwindigkeit zwischen Gleitrohr und Beton und der dadurch induzierte Druck *P* in Abhängigkeit von der Masse der Ballastierung erfasst (vgl. Abbildung 2-, rechts).

Das Gerät lässt auf diese Weise eine Messung des Pumpwiderstands zu. Durch eine Skalierung der experimentellen Ergebnisse ist eine Vorhersage des Pumpdrucks *P* in Abhängigkeit von der Fördermenge *Q* und der Förderleitungsgeometrie (*D*, *L*) in guter Näherung möglich, was durch zahlreiche Forschungsarbeiten belegt werden kann [Secrieru – 2016; Secrieru – 2018a und

2018b]. Betone eignen sich besonders gut zum Pumpen, wenn ihre Fließgrenze τ_0 und ihre plastische Viskosität μ möglichst gering sind, was einen geringen Pumpwiderstand hervorruft, solange das Betongefüge seine Homogenität beibehält.

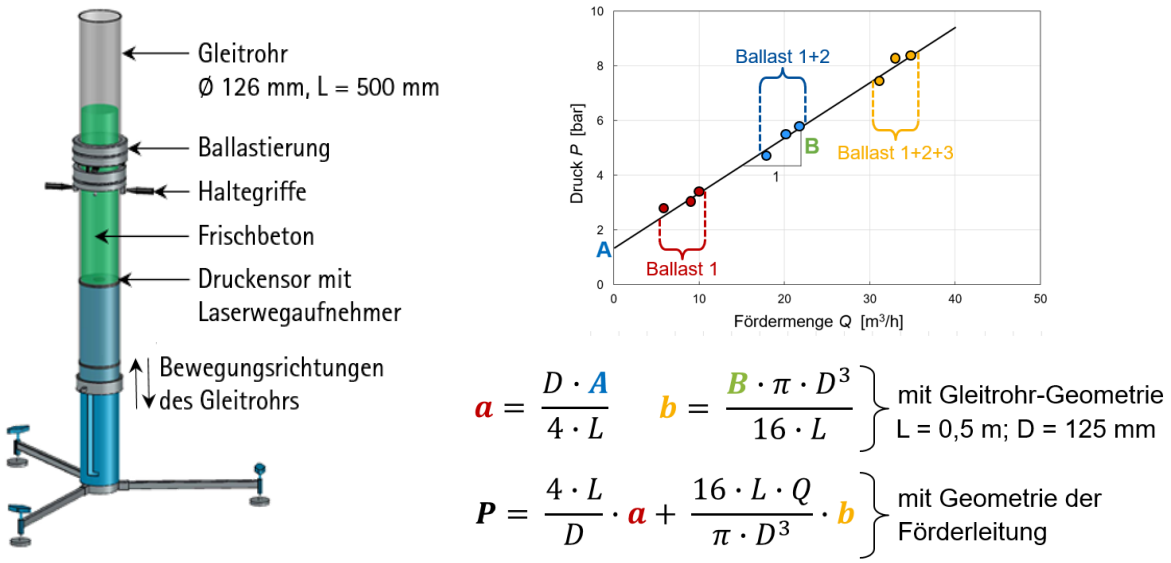


Abbildung 2-7: Darstellung des Gleitrohr-Rheometers der Firma Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH (links) und Schema zur Berechnung des Pumpdrucks (rechts).

Entmischungen des Betongefüges, die zu Blockierungen der Förderleitung führen können, werden im Rahmen einer Sliper-Messung bislang nicht berücksichtigt. Die Entmischungsneigung von Beton muss gesondert geprüft werden (vgl. Abschnitt 2.1.5), um die Blockierungsneigung eines Betons ansatzweise quantifizieren zu können. Eine Vorhersage des Pumpwiderstands infolge einer geradlinig verlaufenden Förderleitung eines homogenen Betons unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen Pfropfenströmung ist mit dem Gleitrohr-Rheometer grundsätzlich möglich. Der Pumpwiderstand eines Betons in einer Förderleitung, bei der sich Strömungsbedingungen beispielsweise durch Rohrbögen ändern, kann hingegen bislang nur mit experimentellen Pumpversuchen bestimmt werden.

Pumpversuche

Der Pumpwiderstand kann durch experimentell angelegte Pumpversuche direkt messtechnisch erfasst werden. Gleichzeitig kann der Einfluss sich verändernder Strömungsbedingungen, die zu Entmischungen des Betongefüges (Betonpfropfen) und in der Folge zur Blockierung der Förderleitung führen können, erfasst werden. Der Pumpwiderstand kann mit Hilfe von Drucksensoren, die über die Förderleitungslänge verteilt angeordnet werden, quantifiziert werden, indem der Druckverlust ΔP bezogen auf eine Einheitslänge zwischen zwei Drucksensoren bestimmt wird. In der Literatur sind vielfältige Pumpversuche dokumentiert, bei denen das Pumpverhalten von Beton durch einen Pumpkreislauf (d. h. eine Kreisförderung des Materials) geprüft wurde [Jolin – 2006; Rio – 2011]. Besonderes Augenmerk bei der Betrachtung des resultierenden Druckverlustes ΔP in einer Förderleitung lag häufig auf Rohrbögen und Reduzierungen [Kaplan – 2000; Secrieru – 2018a], da an diesen Stellen mit einem erhöhten Druckverlust ΔP zu rechnen ist [Bauer – 1971; Sakuta – 1989; Feys – 2015]. In [Morinaga – 1973] wurde der Druckverlust ΔP in einem Rohrbogen gegenüber dem Druckverlust einer äquivalenten geraden Förderlänge mit einem Faktor von 2 angegeben. In [Sakuta – 1989] wurde hingegen ein Faktor von 3 und in [Secrieru – 2018a] gar ein Faktor von bis zu 5 genannt. In [Kaplan – 2000] und in [Chapd – 2007] wurde hingegen angegeben, dass

der Druckverlust ΔP in Rohrbögen nicht viel größer ist, als der Druckverlust ΔP in einer horizontalen Leitung äquivalenter Länge. Diese Beobachtung konnte von [Haist – 2005] und [Khatib – 2013] bestätigt werden. Systematische Untersuchungen zum Einfluss von Rohrbögen auf den Druckverlust in Abhängigkeit von den Eigenschaften eines Betons fehlen, gleichwohl numerische Untersuchungen nahelegen, dass Entmischungsprozesse des Betons zu einem erhöhten Druckverlust ΔP führen können [Jolin – 2006; Tan – 2012].

Darüber hinaus können Rohrquerschnittsreduzierungen einen sprunghaften Druckverlust ΔP während des Pumpens hervorrufen, da sich durch den verringerten Leitungsquerschnitt die Strömungsgeschwindigkeit des Betons überproportional zur Förderleitungslänge erhöht und zusätzlich ein größerer Anteil des Betonvolumens zur Ausbildung der Gleitschicht mit kleiner werdendem Förderleitungsquerschnitt benötigt wird [De Schutter – 2016].

Rohrbögen und / oder Reduzierstücke werden im Rahmen von Pumpversuchen bevorzugt eingesetzt, um kritische Randbedingungen für den Beton zu schaffen. Dadurch lässt sich die Blockierungsneigung von Beton quantifizieren. Die Durchführung von Pumpversuchen sind allerdings sehr aufwändig und zeitintensiv, was hohe Kosten verursacht. Eine präzise Vorhersage des Pumpdrucks P und eine Beurteilung der Blockierungsneigung ist mit Pumpversuchen allerdings möglich. Systematische Untersuchungen zum Einfluss der Betonzusammensetzung und zum Einfluss veränderter Strömungsbedingungen auf die Blockierungsneigung beim Pumpen von Beton wurden bislang noch nicht durchgeführt.

2.1.5 Beschreibung der Pumpstabilität von Beton

Neben einem möglichst geringen Pumpwiderstand gilt als weitere wesentliche Anforderung an einen Beton, der sich zum Pumpen eignet, dass er bei der Pumpförderung nicht blockiert [Gray – 1962; Browne – 1977]. Das Blockieren des Betons wird dabei in der Literatur mit einer lokal stark ausgeprägten Entmischung des Materials in der Förderleitung in Verbindung gebracht. Im Gegensatz zur bereits beschriebenen Ausbildung einer Gleitschicht kommt es dabei in Pumprichtung zu einer Entmischung, die sich überwiegend durch eine Abgabe von Mehlkornleim äußert. Hierdurch kommt es lokal zur Annäherung des Sättigungspunktes, wodurch der Pumpwiderstand überproportional ansteigt (vgl. Abbildung 2-2) [Binns – 2003; Yücel – 2012].

Ein solcher Zustand tritt vor allem dann ein, wenn es infolge von veränderten Strömungsbedingungen zur Trennung zwischen Zementleim und Gesteinskörnung (**Leimabsonderung**) kommt. Die lokale Verzahnung der Gesteinskörnung kann zu einem ausgeprägten Druckgradienten führen, wodurch **Entwässerungsvorgänge** hervorgerufen werden können. Das auf diese Weise lokal stark verdichtete Betongefüge stellt gegenüber des durch die Pumpe induzierten Drucks einen unüberwindbaren Widerstand dar, was eine Blockierung der Förderleitung darstellt (vgl. Abbildung 2-8). Dieses Phänomen wird im Folgenden als entmischungsbedingte Blockierung bezeichnet. Das Auftreten des zuvor beschriebenen Phänomens geht eine veränderte Situation in der Förderleitung voraus, auf deren Auslöser im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

Ein Mindestmaß an Entmischung als Ausdruck einer inneren Verformbarkeit des Betons ist ungeachtet dessen vonnöten, damit sich das Betongefüge beim Passieren von Rohrbögen plastisch verformen kann. Darüber hinaus stellt auch die Bildung einer Gleitschicht, die für das Pumpen eine Grundvoraussetzung darstellt, ein Entmischungsphänomen dar, das auftreten muss, um einen störungsfreien Pumpprozess zu gewährleisten.

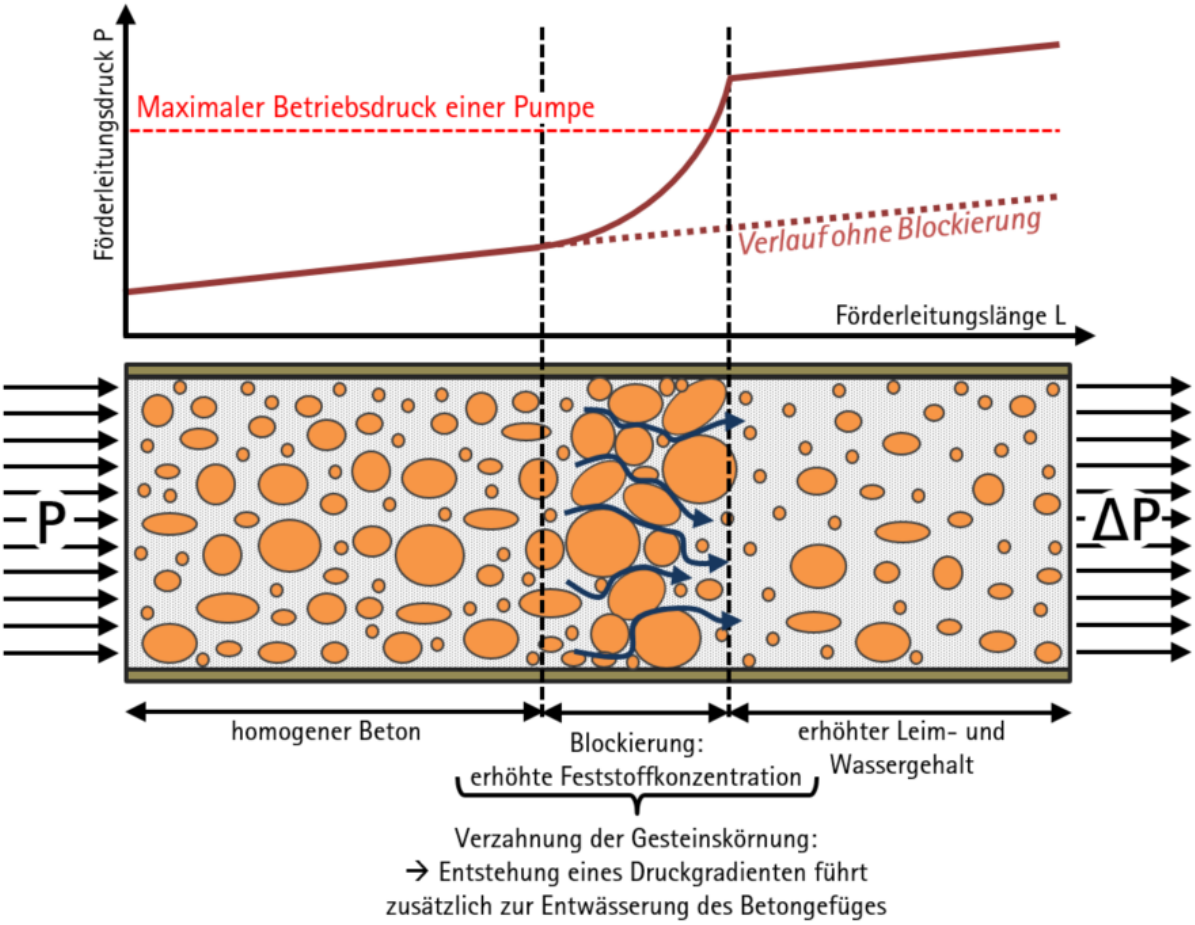


Abbildung 2-8: Qualitative Darstellung des Druckverlusts in einer Förderleitung beim Auftreten einer Blockierung infolge Entmischungen des Betons, in Anlehnung an [Browne – 1977], aus [Cotardo – 2023].

2.1.6 Auslöser von Entmischungen die zu Blockierungen führen können

In der Pumppraxis treten zwar regelmäßig Blockierungen der Förderleitung auf, eine Dokumentation oder gar Ursachenforschung wird in der Regel nur selten durchgeführt, was eine wissenschaftliche Auswertung stark erschwert. Die im Folgenden aufgeführten und beschriebenen Auslöser von entmischungsbedingten Blockierungen stützen sich sowohl auf wissenschaftlich durchgeführten Pumpversuchen als auch auf Erfahrungen von Industriepartnern (Beraterkreis) des hier beschriebenen Forschungsprojekts.

Initiales Anpumpen

Entmischungsbedingte Blockierungen der Förderleitung treten häufig beim initialen Anpumpen des Betons auf [Lannen – 2018]. Als Anpumpen wird dabei der Vorgang bezeichnet, bei dem der frische Beton sukzessive die Förderleitung füllt. Die möglichen Ursachen für Probleme beim Anpumpen sind vielfältig, können aber wie folgt eingegrenzt werden: Da die Durchmesser der Förderzylinder und der Ansaugöffnung deutlich größer sind, als der Durchmesser der Förderleitung, muss der Frischbeton nach dem Verlassen des Förderzylinders eine Reduzierung passieren, die oftmals als S-Rohrweiche ausgeführt ist, um in die Förderleitung zu gelangen. An dieser Stelle können Entmischungen des Betons zur Blockierung der Förderleitung führen [Feys – 2011]. Das initiale Anpumpen wird nicht zuletzt deswegen als Härtetest für den zu fördernden Frischbeton angesehen [Berge – 1995]. Weiterhin können Undichtigkeiten an der Verschleißbrille, die den Übergang zur S-Rohrweiche (oftmals auch als Rock-Ventil ausgeführt) darstellt, während der Druckphase zu Entmischungen des Betons

führen. Dabei werden feiner Zementleim oder Wasser zurück in den Aufgabetrichter der Betonpumpe gedrückt. Die Folge ist ein abgemagerter Beton mit einem geringeren Wasser- und Leimgehalt, der gegenüber dem homogenen Beton einen erhöhten Pumpwiderstand aufweist. Weiterhin wird beim initialen Anpumpen das Auftreten der sogenannten Förderlücke während des Pumpens als Auslöser von Entmischungen genannt. Die Förderlücke entsteht durch die oszillierende Förderung von Kolbenpumpen und beschreibt die Zeit, die notwendig ist, um die S-Rohrweiche oder das Rock-Ventil zwischen den beiden Zylindern einer Doppelkolbenpumpe umzuschalten. Infolge von Trägheitseffekten während der Beschleunigungsphase des Betons kann es zu Entmischungen der Betonfront kommen. Der Grad der Entmischung kann sich bei jedem Förderhub potenzieren und führt in der Folge zum Übergang hin zu einem weniger stark gesättigten Zustand des Betongefüges der Betonfront. Dieser Effekt erhöht den Pumpwiderstand des lokal entmischten Betons stark und kann zur vollständigen Blockierung führen.

Temporäre Unterbrechungen der Förderung

Während des Pumpens von Beton kommt es regelmäßig und unvermeidbar zu kurzweiligen Unterbrechungen des Pumpprozesses, beispielsweise, wenn sich die Beladung des Aufgabetrichters mit frischem Beton verzögert oder der Endschlauch neu positioniert werden muss. Wenn der Beton nicht in Bewegung ist, können Sedimentationsvorgänge zur Entmischung des Betongefüges führen. Dabei sinken grobe Gesteinspartikel ab und verdrängen die Gleitschicht [Hazaree – 2015]. Die Folge ist ein erhöhter Pumpwiderstand beim erneuten Anpumpen des Betons, da Bewegungsenergie durch Reibung an der Förderleitungswandung dissipiert wird [Kasten – 2011b]. Ausgeprägte Formen solcher Entmischungen können zur Blockierung führen.

Rohrbögen

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, können Rohrbögen zu Entmischungen während des Pumpens führen. Der zu fördernde Beton passiert eine Vielzahl an Rohrbögen beim Durchlaufen des Knickverteilermasts einer Autobetonpumpe. Während des Passierens eines Rohrbogens ändern sich Strömungsbedingungen. Beim Eintritt des Betons in einen Rohrbogen weichen Geschwindigkeits- und Kraftvektoren voneinander ab, was dazu führt, dass gröbere Partikel erst nach dem Kontakt mit der Förderleitungswandung umgelenkt werden. Dabei wird die Gleitschicht an der Außenseite des Rohrbogens verdrängt und grobe Gesteinspartikel reichern sich an (vgl. Abbildung 2-9).

Dieses Phänomen wurde durch [Tan – 2012] zwar numerisch nachgewiesen, konnte bislang jedoch noch nicht experimentell bestätigt werden. Dennoch liefert die Praxis einen indirekten Beweis für das Auftreten dieses Entmischungseffekts: Infolge der Entmischungserscheinung werden Kräfte nachweislich durch direkte Kontaktwechselwirkungen insbesondere an die Wandung der Förderleitung übertragen [Tan – 2012], wodurch Energie in Form von Reibung dissipiert wird und zu einer erhöhten Verschleißbeanspruchung an der Außenseite von Rohrbögen führt [Lee – 2014]. Die Untersuchungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit Erfahrungen aus der Praxis (vgl. Abbildung 2-10) [Huber – 1994; Levy – 1998].

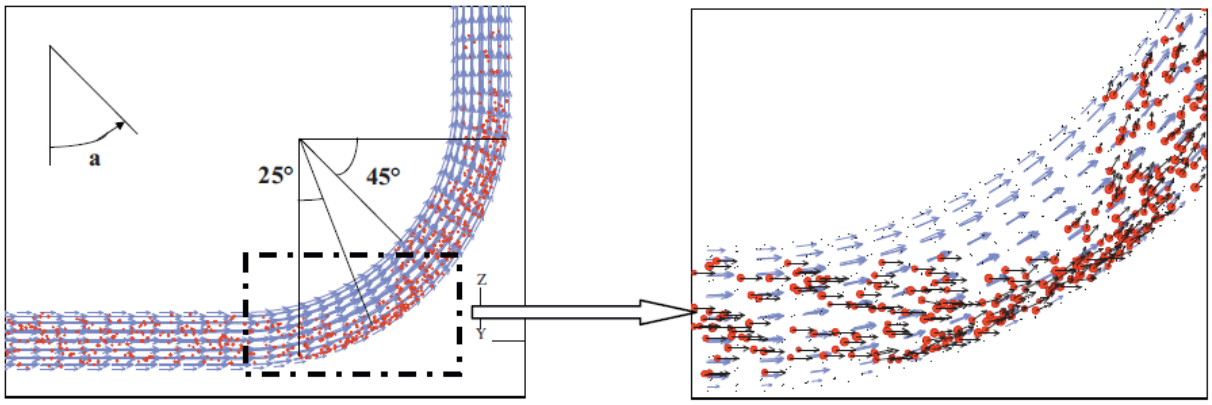


Abbildung 2-9: Räumliche Verteilung von Partikeln beim Passieren eines Rohrbogens [Tan – 2012].

Im Anschluss an einen Rohrbogen benötigt das Betongefüge eine sogenannte Ruhe- und Konsolidierungsphase [Berge – 1995; Kasten – 2011b], die dafür sorgt, dass sich das entmischte Betongefüge erneut in Form einer Pfropfenströmung anordnet. Der Grad der Entmischung kann sich potenzieren, sollte die Ruhe- und Konsolidierungsphase nicht ausreichend lang sein, bevor der Beton erneut einen Rohrbogen durchläuft.

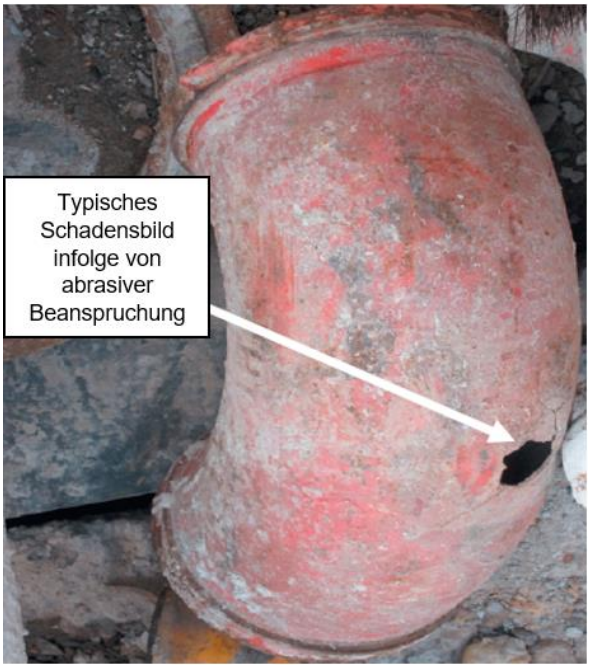


Abbildung 2-10: Typisches in der Praxis auftretendes Schadensbild an Rohrbögen infolge von abrasiver Beanspruchung [Tan – 2012].

Reduzierungen

Reduzierungen des Förderleitungsquerschnitts können infolge höherer Fließgeschwindigkeiten zu Umlagerungseffekten des Betongefüges führen [Kaplan – 2005]. Darüber hinaus führt eine Querschnittsverengung zu einer radialen Kompression der Gesteinspartikel, was zu verstärken direkten Kontaktwechselwirkungen führt [Berge – 1995]. Dadurch erhöht sich die Reibung zur Förderleitungswandung, was einen erhöhten Pumpwiderstand hervorruft. Reduzierungen treten in der Praxis zum einen in der S-Rohrweiche auf. Zum anderen können Querschnittsverjüngen bei komplexen Förderleitungsführen beispielsweise beim Bauen im Bestand notwendig werden. Dabei sollte die Verjüngung des Querschnitts auf einem möglichst langen Weg stattfinden und nicht abrupt ausgebildet sein.

Fall des Betons infolge vertikaler Förderung

Die Praxis berichtet vor allem von Blockierungen die durch Entmischungen infolge von vertikal nach unten gerichteter Förderung auftreten. Dabei kommt es insbesondere während des initialen Anpumpens zu Störungen, da die Förderleitung noch nicht gefüllt ist und ein freier Fall des Betons auftreten kann. Durch den starken Impuls beim Auftreffen des Betons im anschließenden Rohrbogen, kann es zu ausgeprägten Formen der Entmischung kommen. In der Praxis wird aus diesem Grund nach dem vertikalen Abschnitt ein Rohrbogen mit einem möglichst großen Radius angeordnet, um die Energie des Betongefüges schonend abzuleiten und den Grad der Entmischung dadurch gering zu halten. Solche Situationen können insbesondere beim Bauen im Bestand (vgl. Abbildung 1-1) auftreten und bedürfen besonderes Augenmerk.

Weitere Auslöser von Entmischungen

Neben den zuvor genannten unweigerlich auftretenden Auslösern von entmischungsbedingten Blockierungen, können in der Pumppraxis weitere Auslöser genannt werden, die allerdings vermeidbar sind. Dazu zählen zum einen Förderleitungselemente, die durch einen starken Verschleiß gekennzeichnet sind sowie die unsachgemäße Reinigung der Förderleitung. Gummidichtungen können aufgrund von Verschleißerscheinungen ihre Dichtigkeit verlieren und stellen Leckagen an Übergängen von Förderleitungselementen dar [Kaplan – 2005]. An diesen Stellen führt der Druckgradient zur Entwässerung des Betongefüges [Ede – 1958], was dazu führt, dass die Gleitschicht verarmt und die plastische Viskosität μ ansteigt, was den Pumpwiderstand erhöht und in ausgeprägten Fällen zur Blockierung führen kann. Weiterhin sei die Kranzbildung zu nennen, die den Querschnitt der Förderleitung verengen kann. Die Kranzbildung entsteht durch Anhaftungen erhärteten Betons und kann den Förderleitungsquerschnitt stark verengen [Berge – 1995; Lannen – 2018]. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Förderleitung nach dem Pumpprozess mit Hilfe einer Schwammkugel mehrmalig zu reinigen.

2.1.7 Betontechnische Methoden zur Quantifizierung der Pumpstabilität

Die zuvor beschriebenen Auslöser von Entmischungen geben einen Hinweis auf die wesentlichen Arten der Entmischung, die während des Pumpens auftreten und in Folge ein Blockieren der Förderleitung zur Folge haben können. Zum einen kann eine Trennung zwischen Zementleim und Gesteinspartikeln (Leimabsonderung) und zum anderen eine Entwässerung auftreten. Beide Effekte spielen sich auf unterschiedlichen Skalenebenen ab. Während die Leimabsonderung makroskopisch einzuordnen ist, findet die Entwässerung im Zementleimgefüge auf Meso- und Mikroebene statt. Beide Formen der Entmischung stellen dabei eine Trennung zwischen Feststoffen und der jeweiligen flüssigen Phase dar.

Obwohl die Pumpstabilität, als die Fähigkeit des Betons während des Pumpens seine Gefügestabilität aufrecht zu erhalten, als wesentliche Anforderung an einen pumpfähigen Beton genannt wird, existieren nur wenige systematische Untersuchungen zur Quantifizierung der Pumpstabilität.

Quantifizierung des Entwässerungsverhaltens von Beton

Bereits in den 1970er Jahren haben BROWNE und BAMFORTH [Browne – 1977] eine Methode entwickelt, um das Entwässerungsverhalten von Beton mit Blick auf die Pumpstabilität zu quantifizieren. Der in diesem Zusammenhang entwickelte Pressure-Bleed-Test gibt Aufschluss über die Neigung zur Entwässerung des Frischbetons unter Druck (vgl. Abbildung 2-11, links).

Beim Pressure-Bleed-Test wird Beton bzw. Zementleim in einer drainierten Messzelle mit einem definierten Druck beaufschlagt und dabei die Menge des herausgepressten Filtratwassers im Zeitverlauf ermittelt. Gegenübergestellt wurde hier die Kenngröße der Entwässerung der Fließfähigkeit, als Ersatzkenngröße zur Beurteilung des Pumpwiderstandes (vgl. Abbildung 2-11, rechts). Das empirische Modell funktioniert gut für klassische Betonsysteme, bei denen die rheologischen Eigenschaften vor allem über den w/z-Wert gesteuert werden. Durch eine zunehmende Verwendung hochwirksamer Fließmittel verliert der quantitative Zusammenhang allerdings stark an Aussagekraft [Rumman – 2018].

Aufbauend auf dem Grundprinzip des Pressure-Bleed-Tests wurden in der Vergangenheit einige Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten von Beton unter Druck durchgeführt [Zhang – 2003; Khayat – 2004; Draijer – 2007; Yücel – 2012; Vanhove – 2016]. In der Regel wurden dabei betontechnische Einflüsse auf die Filtrationsrate quantifiziert, jedoch kein direkter Zusammenhang zur Blockierungsneigung beim Pumpen von Beton hergestellt.

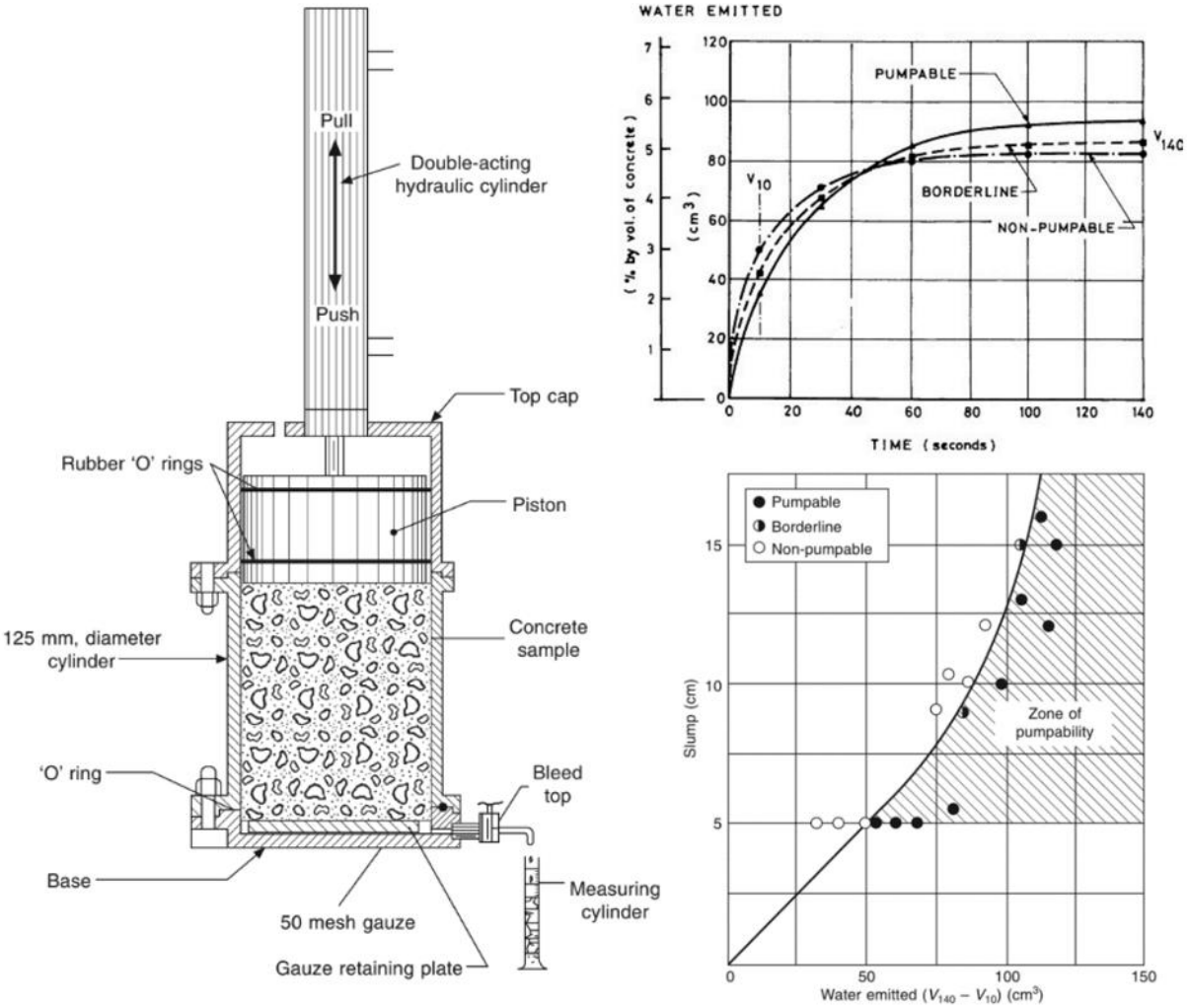


Abbildung 2-11: Schematische Darstellungen des Pressure-Bleed-Tests (links) und die Beurteilung der Pumpbarkeit unter Berücksichtigung von der Fließfähigkeit und des Filtrationsverhaltens des Betons (rechts) [Browne – 1977].

In Vorbereitung zu dem hier beschriebenen Forschungsprojekt wurde von [Lohaus – 2017a] eine Filterpressenprüftechnik entwickelt und erprobt. Es wurden eine Vielzahl an systematischen Untersuchungen zum Einfluss der stofflichen Zusammensetzung von Beton auf das Entwässerungsverhalten durchgeführt [Cotardo – 2018a; Cotardo – 2018b;

Strybny – 2019]. Abbildung 2-12 stellt einige wesentliche Zusammenhänge dieser Untersuchungen dar.

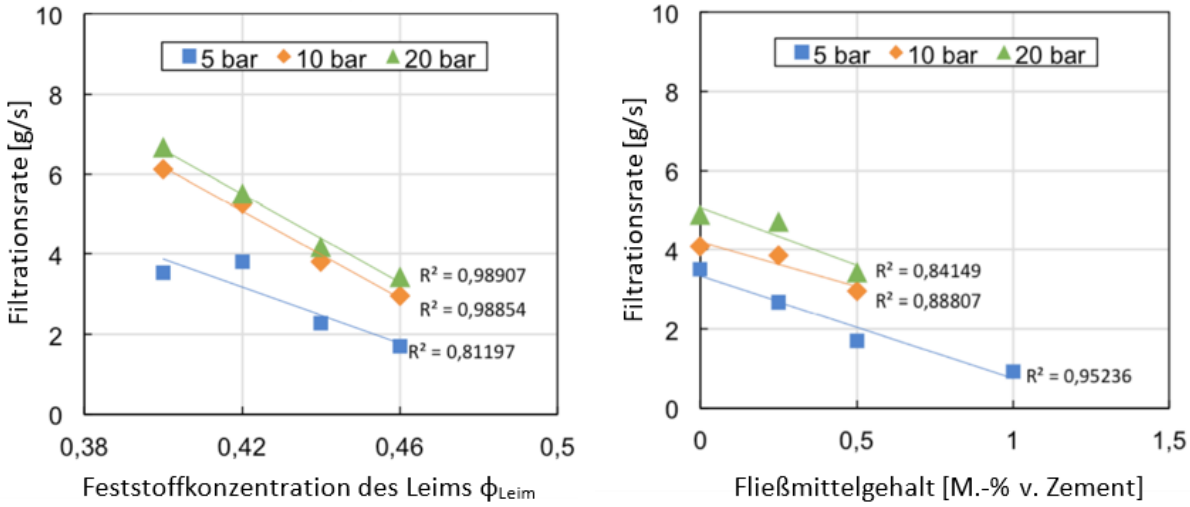


Abbildung 2-12: Einfluss der volumetrischen Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} (links) und des Fließmittelgehalts (rechts) auf die Filtrationsrate unter der Berücksichtigung variierender Prüfdrücke [Strybny - 2019].

Es kann erkannt werden, dass die Filtrationsrate umso kleiner ist, je höher die Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} und der Fließmittelgehalt sind. Gleichzeitig sinkt die Filtrationsrate mit sinkendem Druck. Dieses Verhalten deckt sich gut mit den physikalischen Zusammenhängen zur Filtration, die in der Verfahrenstechnik genutzt werden [Kraume – 2004; Tichy – 2007] und auf Beton übertragbar sind [Kaliske – 2022].

Ein Beton, der unter Druck leicht sein Anmachwasser verliert, neigt beim Pumpen dazu, eine größere Gleitschichtdicke mit niedriger Fließgrenze τ_0 und plastischer Viskosität μ auszubilden, was den Pumpwiderstand reduziert [Secrieru – 2018a]. Eine zu hohe Filtrationsrate hingegen weist auf eine zu geringe Pumpstabilität hin, was die Neigung zur Blockierung infolge von Entmischungen erhöht [Abebe – 2017; Secrieru – 2018a]. Experimentell nachgewiesen wurde dieser Zusammenhang allerdings nicht.

Quantifizierung des Leimabsonderungsverhaltens von Beton

In [Draijer – 2007] wurde beschrieben, dass neben dem Entwässerungsverhalten von Beton auch Untersuchungen an Sedimentationszylindern (zur Quantifizierung der schwerkraftgetriebenen Entmischung) ein hohes Potenzial aufweisen, um die Pumpstabilität von Beton zu bewerten. Das Leimabsonderungsverhalten, das beim Pumpen von Beton ein wesentliches Entmischungsphänomen darstellt, kann indirekt durch das Sedimentationsverhalten quantifiziert werden. Dabei wird nicht direkt das Absondern des Leims, sondern das Absinken der groben Gesteinskörnung quantifiziert (reziproke Proportionalität).

Eine Bewertung des Sedimentationsverhaltens von Beton, kann an Sedimentationszylindern in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie [DAfStb – 2012] vorgenommen werden [Lohaus – 2016; Bege – 2017], wobei die Bewertung in der Vergangenheit subjektiv erfolgte [Bege – 2018; Bege – 2019]. Eine objektive Quantifizierung kann hingegen mit fotooptischen Methoden erfolgen. Von NAVARRETE wurde aufbauen auf Untersuchungen von [Esmaeil – 2014] ein Sedimentationsindex VI definiert, der sich aus dem volumetrischen Anteil von Gesteinspartikeln in unterschiedlichen Höhen einer Probe zusammensetzt [Navarrete – 2016].

Die entsprechenden Volumenanteile können durch fotooptische Bildanalysen anhand von zweidimensionalen Fotoaufnahmen bestimmt werden [Mouton – 2002]. Dazu wurde in [Coenen – 2021] eine bildanalytische Methode unter Anwendung eines Convolutional Neural Networks (CNN) entwickelt, um die Segmentierung von Gesteinspartikeln automatisiert vorzunehmen.

Maßgeblichen Einfluss auf die Sedimentation von Gesteinspartikeln im Beton, haben die Korngrößenverteilung [Wallevik – 2003], insbesondere das enthaltene Größtkorn und die Dichte der groben Gesteinskörnung, sowie die plastische Viskosität μ des Zementleims [Esmaeil – 2014] bzw. der Mörtelphase [Navarrete – 2016], was gut mit den physikalischen Grundlagen zur Sedimentation begründet werden kann [Brauer – 1971; Ripperger – 2005].

Zusammenfassung wichtigster Erkenntnisse

Der Pumpwiderstand von Beton wird maßgeblich durch die rheologischen Eigenschaften und durch die Dicke der Gleitschicht beeinflusst, die sich während des Pumpens infolge scherinduzierter Partikelmigration (Pfropfenströmung) ausbildet. Die rheologischen Eigenschaften der Gleitschicht und ihre Dicke hängen von der Zusammensetzung des Betons ab. Die plastische Viskosität μ spielt insbesondere bei modernen Betonen eine entscheidende Rolle. Einflüsse betontechnischer Variationen in der Zusammensetzung des Betons sind gut erforscht. Bislang wird jedoch jede Einflussgröße unabhängig voneinander betrachtet. Ein verallgemeinerbares, physikalisch begründetes Modell zur Vorhersage des Pumpwiderstands existiert nicht. Ansätze aus dem Bereich der selbstverdichtenden Betone stellen eine gute Grundlage dar, um den Pumpwiderstand über die stoffliche Kenngrößen Leimschichtdicke d_{Leim} und Partikelabstand *z* mehlfeiner Stoffe im Zementleim verallgemeinerbar zu quantifizieren. Der Partikelabstand *z*, der nicht direkt messbar ist, kann über die Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} als stoffliche Ersatzkenngröße näherungsweise berücksichtigt werden.

Der Pumpwiderstand eines homogenen Betons kann mittels eines Gleitrohr-Rheometers für eine geradlinig verlaufende Förderleitung im Labor gut prognostiziert werden. Entmischungen, die insbesondere beim Pumpen von Beton infolge von sich ändernden Strömungsbedingungen (z. B. Rohrbögen) auftreten, können dabei nicht berücksichtigt werden. Dafür eignen sich bislang einzig experimentelle Pumpversuche, die den Einfluss von Entmischungen des Betongefüges auf den Pumpwiderstand integral abbilden. Derartige Pumpversuche sind jedoch sehr aufwändig und zeitintensiv und deswegen mit hohen Kosten verbunden.

Im Gegensatz zum Pumpwiderstand, weist der Forschungsstand zur Pumpstabilität (Blockierungsverhalten) sehr große Lücken auf. Als wesentliche Ursachen werden derzeit Entmischungsphänomene wie beispielsweise die Leimabsonderung und die Entwässerung des Betons vermutet, jedoch standen explizite Nachweise dieser Theorien bislang aus. Beiden Entmischungsformen gehen veränderte Strömungsbedingungen (z. B. Rohrbögen) voraus, die als Auslöser der Entmischung angesehen werden können. Eine Entwässerung kann in einer geschlossenen Förderleitung nur infolge eines ausgeprägten Druckgradienten eintreten. Dieser kann erst zustande kommen, wenn bereits eine Verzahnung infolge einer Leimabsonderung stattgefunden hat. Das Entwässerungsverhalten von Beton kann mithilfe einer Filterpresse durch die Bestimmung der Filtrationsrate quantifiziert werden. Das Leimabsonderungsverhalten kann indirekt über eine Sedimentationsrate quantifiziert werden, die mit fotooptischen Methoden bestimmt werden kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass die entmischungsbedingte Blockierungsneigung von Beton mit den Kenngrößen Filtrationsrate und Sedimentationsrate korreliert. Eine Überprüfung kann letztlich nur durch

Pumpversuche vorgenommen werden. Die Blockierungsneigung beim Pumpen von Beton hängt nicht ausschließlich von den Eigenschaften des Betons ab, sondern stellt eine Interaktion aus sämtlichen Einflussgrößen einer Pumpaufgabe dar. Dazu zählen vor allem die Förderleitungsführung (Rohrbögen, Reduzierungen, vertikale Förderung) sowie die Pumpregie (Fördermenge-Zeitverlauf) und der Einfluss einer Vorlaufmischung.

2.2 Ziele und Lösungsweg des Forschungsprojekts

Ziel des Forschungsprojekts war es, wissenschaftliche Grundlagen für einen störungsfreien Pumpprozess bereitzustellen, die in Form von Anwendungshinweisen und -empfehlungen der Pumppraxis zur Verfügung gestellt werden.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden folgende Teileziele definiert:

TZ1: Ableitung von konkreten Grenzbereichen/Orientierungswerten zur Abschätzung der Grenzen der Pumpbarkeit von Betonen einschließlich der Pumpstabilität.

TZ2: Verifikation des Vorhersagemodells mittels Gleitrohr-Rheometer für Förderschläuche als Förderleitung.

TZ3: Ergründung und Beschreibung des Pumpverhaltens bei vertikal nach oben und insbesondere nach unten gerichteter Förderung.

TZ4: Formulierung von Empfehlungen und praxisorientierten Hinweisen für die Herstellung von auf die Pumpaufgabe abgestimmter Vorlaufmischungen.

TZ5: Betrachtung des Pumpverhaltens auch beim wiederholten Anpumpen infolge einer temporären Unterbrechung des Pumpvorgangs.

Um das Forschungsziel zu erreichen, wurde ein Arbeitsprogramm entwickelt, das im Folgenden vorgestellt wird.

Das experimentell ausgerichtete Arbeitsprogramm lässt sich in drei wesentliche Phasen gliedern, wobei der Kern der experimentellen Arbeiten die Pumpversuche unter Technikum-Bedingungen (AP3) darstellten (vgl. Abbildung 2-13). In einem ersten Schritt wurden die Gesteinskörnungen, die für die Konzipierung der Betonzusammensetzungen verwendet wurden, hinsichtlich ihrer granulometrischen Eigenschaften charakterisiert (AP1) um darauf aufbauen die Leimschichtdicke d_{Leim} gemäß dem Modell nach WÜSTHOLZ zu bestimmen.

Darauf aufbauend wurden im Rahmen von Laboruntersuchungen (AP2) Betone mit variierenden Eigenschaften konzipiert und umfangreich charakterisiert. Dazu zählten gängige Frischbetonuntersuchungen (Ausbreitmaß, Rohdichte, LP-Gehalt). Darüber hinaus wurden sämtliche Betone sowie die Vorlaufmischungen, die für die Pumpversuche herangezogen wurden, hinsichtlich ihrer rheologischen Eigenschaften mittels eines mobilen Rheometers charakterisiert. Zusätzlich wurden pumpwiderstands- und pumpstabilitätsrelevante Eigenschaften bestimmt. Dazu wurden Untersuchungen mittels Gleitrohr-Rheometer und Filterpresse sowie Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten durchgeführt. Ziel der Laboruntersuchungen war es, funktionale Zusammenhänge zwischen Kenngrößen der Zusammensetzung und Kenngrößen aus den experimentellen Untersuchungen unter kontrollierbaren und reproduzierbaren Bedingungen herzuleiten. Dieser Schritt ist mit Blick auf die Pumpversuche von zentraler Bedeutung, da die Betonherstellung in Transportbetonwerken vorgenommen wurde und mit Schwankungen in der Herstellungsqualität der Betone zu rechnen war.

Kern des experimentellen Arbeitsprogramms waren die Pumpversuche im Technikum-Maßstab (AP3). Die Untersuchungen hatten das Ziel, den Pumpwiderstand in Abhängigkeit vom Eigenschaftsbild der Betonzusammensetzungen und in Abhängigkeit von der Art des

Förderleitungselements (Rohr/Schlauch, Rohrbogen, Reduzierung) zu quantifizieren. Weiterhin war es das Ziel, die Blockierungsneigung in Abhängigkeit vom Eigenschaftsbild der Betonzusammensetzungen zu bewerten. Gleichzeitig sollten weitere ungünstig wirkende Randbedingungen identifiziert werden. Dazu wurden Untersuchungen zum Einfluss der Pumpregie (temporäre Unterbrechungen) und zum Einfluss der Anordnung von Förderleitungselementen durchgeführt. Zuletzt sollte das Phänomen der Gleitschichtneuausbildung experimentell nachgewiesen und der Einfluss auf den Pumpwiderstand und auf die Blockierungsneigung quantifiziert werden.

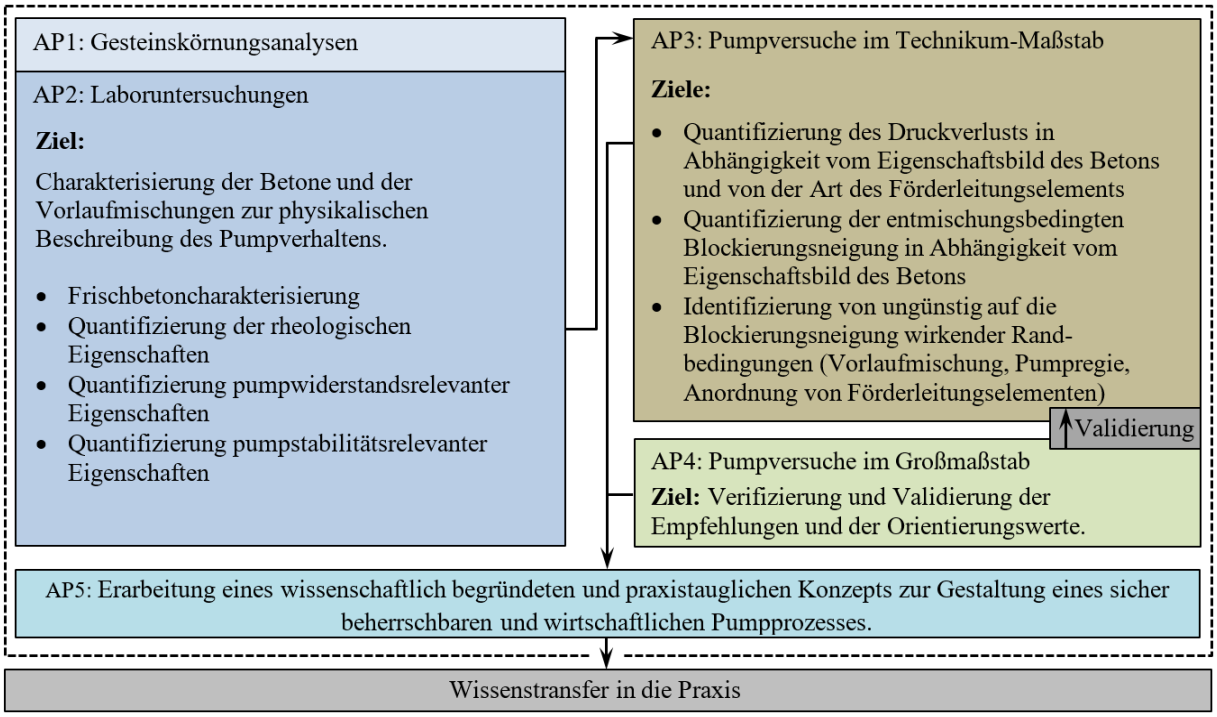


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung des Arbeitsprogramms.

Die Pumpversuche im Großmaßstab (AP4) stellten den Abschluss der experimentellen Arbeiten dar, mit dem Ziel, die Erkenntnisse aus den Pumpversuchen im Technikum-Maßstab unter realen Bedingungen zu verifizieren.

Aufbauend auf den erlangten experimentellen Erkenntnissen wurden abschließend Handlungsempfehlungen und -hinweise erarbeitet, die der Pumppraxis bereitgestellt werden sollen (AP5).

3 Experimentelle Untersuchungen

Das in Kap. 2.2. vorgestellte Arbeitsprogramm des hier vorgestellten Forschungsprojekts war sehr umfangreich und erforderte daher die äußerst enge Zusammenarbeit beider Forschungsstellen – der TU Dresden (TUD) und der Leibniz Universität Hannover (LUH) – sowie der Industriepartner mit den Forschungsstellen. Die experimentellen Arbeiten der Laboruntersuchungen wurden gemäß der zur Verfügung stehenden Laborausstattung auf die beiden Forschungseinrichtungen aufgeteilt. In beiden Laboren wurde die Frischbetoncharakterisierung durchgeführt. Weiterhin wurden von der TUD die Untersuchungen mittels Gleitrohr-Rheometer durchgeführt. Von der LUH wurde die granulometrische Charakterisierung der Gesteinskörnungen, die rheologischen Untersuchungen sowie die pumpstabilitätsrelevanten Untersuchungen durchgeführt.

3.1 Gesteinskörnungsanalysen

Zur Berechnung der Leimschichtdicke d_{Leim} ist es erforderlich die Oberfläche der Gesteinskörnung O_{GK} zu berücksichtigen (vgl. Gleichung 2-1). O_{GK} ist dabei eine Funktion von der Zugabemenge an Gesteinskörnung m_{GK} und der massebezogenen spezifischen Oberfläche $O_{GK,spez.}$. Die massebezogenen spezifischen Oberfläche $O_{GK,spez.}$ lässt sich aus der Korngrößenverteilung $Q_r(a_i)$ und der Kornform, die über die Sphärizität berücksichtigt wird, berechnen. Die Korngrößenverteilung $Q_r(a_i)$ und die Kornform wurden mittels fotooptischer Bildauswertung (Partikelanalysesystem CAMSIZER) bestimmt.

3.2 Konzipierung von Betonzusammensetzungen

Ziel des Betonentwurfs war es, praxisrelevante Betone zu konzipieren und für die Untersuchungen bereitzustellen, die die wesentlichen betontechnologischen Variationen in der Praxis berücksichtigen. Einflussgrößen, die maßgeblich das Pumpverhalten von Beton beeinflussen sind der Wassergehalt, der nachfolgend als volumetrische Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} ausgedrückt wird (vergleichbar mit dem w/z-Wert, aber aus rheologischer Sicht besser geeignet), der Leimgehalt V_{Leim}, die Fließmittelkonzentration sowie die Granulometrie der Gesteinskörnung. Hinsichtlich der Granulometrie wurden die Sieblinie (A und B gemäß DIN 1045-2) und die Kornform (Art der Gesteinskörnung: natürlich und gebrochen) variiert. Darüber hinaus wurden Kalksteinmehl (KSM) als alternativer Zusatzstoff sowie rezyklierte Gesteinskörnung exemplarisch mit in den Betonentwurf der Laboruntersuchungen aufgenommen.

Tabelle 3-1 stellt die Versuchsmatrix zur Betonentwicklung dar. Unter der Berücksichtigung sämtlicher Variationen wurden im Rahmen der Laboruntersuchungen ausgehend von einem praxisüblichen Referenzbeton (F4, C30/37, Größtkorn 16, B-Sieblinie) insgesamt 31 Betonzusammensetzungen konzipiert und charakterisiert.

Tabelle 3-1: Versuchsmatrix des Betonentwurfs im Rahmen der Laboruntersuchungen.

	Einflussgrößen	Kalksteinmehlgehalt [M.-% v. MK.]	vol. Feststoff-konzentration Leim ϕ_{Leim} [-]	Fließmittelgehalt [M.-% v. Z.]	Leimgehalt [dm³/m³]	Gesteinskörung Größtkorn [mm] und Art der Gesteinskörung	Gesteinskörung Sieblinie	Anzahl Versuche
	Referenzbeton	0	0,38	0,3	340	16, natürlich	B	1
I.A	Leimviskosität	0	0,32; 0,38	0,3	340	16, natürlich	B	2
		0	0,35	0,6; 0,9	340	16, natürlich	B	2
		10; 20	0,32; 0,38	0,3	340	16, natürlich	B	4
I.B	Leimgehalt	0	0,32; 0,38	0,3	320; 360	16, natürlich	B	4
		0	0,35	0,6; 0,9	320; 360	16, natürlich	B	4
I.C	Granulometrie der Gesteinskörnung	0	0,32; 0,38	0,3	320 - 360	16, natürlich	B	6
		0	0,32; 0,38	0,3	340	16, gebrochen	A; B	4
		0	0,32; 0,38	0,3	340	16, rezykliert	A; B	4
						Anzahl der Betonzusammensetzungen		31

Tabelle 3-2: Versuchsmatrix des Betonentwurfs im Rahmen der Pumpversuche im Technikum-Maßstab

	Einflussgrößen	vol. Feststoff-konzentration Leim ϕ_{Leim} [-]	Fließmittelgehalt [M.-% v. Z.]	Leimgehalt [dm³/m³]	Gesteinskörung Größtkorn [mm] und Art der Gesteinskörnung	Gesteinskörung Sieblinie	Anzahl Versuche
	Referenzbeton	0,4	0,3	340	16, natürlich	B	1
II.A	Leimviskosität	0,34; 0,37	0,3	340	16, natürlich	B	2
		0,37	0,6; 0,9	340	16, natürlich	B	2
II.B	Leimgehalt	0,34	0,6	320; 360	16, natürlich	B	2
II.C	Granulometrie der Gesteinskörnung	0,34; 0,37	0,6	340	16, natürlich	A	2
		0,34	1,2	280	16, natürlich	A	1
		0,34; 0,37	0,3	340	16, gebrochen	B	2
		0,34; 0,37	0,3	340	16, gebrochen	A	2
		0,34; 0,37	1,2	280	16, gebrochen	A	1
					Anzahl der Betonzusammensetzungen		15

Für die Laboruntersuchungen wurden die im Folgenden tabellarisch aufgeführten Ausgangsstoffe verwendet.

Tabelle 3-3: Ausgangsstoffe für die Konzipierung der Beton für die Laboruntersuchungen.

Ausgangsstoffe			Dichte [kg/dm³]
Zement	CEM I 42,5 R		3,1
Wasser (städtisches Leitungswasser aus Hannover bzw. Dresden)			1,0
Zusatzstoff	Kalksteinmehl		2,7
Zusatzmittel	PCE-Fließmittel	GleniumSky 594	1,05
Gesteinskörnungen	natürliche Gesteinskörnung (Tündern)	0/2	2,65
		2/8	2,57
		8/16	2,58
	gebrochene Gesteinskörnung (Granodiorit)	2/8	2,69
		8/16	2,69
	rezyklierte Gesteinskörnung vom Typ 2	2/16	2,25

Die Versuchsmatrix der Betone für die Durchführung der Pumpversuche im Technikum-Maßstab ist in Tabelle 3-2 dargestellt. Um die absolute Grenze der Pumpbarkeit zu erfassen, wurden zwei Betone exemplarisch konzipiert, die einen vergleichsweise geringen Leimgehalt (280 dm³/m³) und zusätzlich eine Fließmitteldosierung oberhalb des Sättigungspunktes (1,2 M.-%) aufwiesen.

Für die Untersuchungen im Rahmen der Pumpversuche im Technikum-Maßstab musste bedingt durch die Verfügbarkeit der Ausgangstoffe im Transportbetonwerk auf andere Ausgangsstoffe als bei den Laboruntersuchungen zurückgegriffen werden. Kalksteinmehl und rezyklierte Gesteinskörung waren im Transportbetonwerk nicht verfügbar.

Für die Pumpversuche im Technikum-Maßstab wurden die im Folgenden tabellarisch aufgeführten Ausgangsstoffe verwendet.

Tabelle 3-4: Ausgangsstoffe für die Konzipierung der Beton der Pumpversuche im Technikum-Maßstab

Ausgangsstoffe			Dichte [kg/dm³]
Zement	CEM III/A 42,5 N		3,1
Wasser (städtisches Leitungswasser aus Hannover)			1,0
Zusatzmittel	PCE-Fließmittel	PANTARHIT RC17	1,06
Gesteinskörnungen	natürliche Gesteinskörnung (Krähenwinkel)	0/2	2,64
		2/8	2,56
		8/16	2,56
	gebrochene Gesteinskörnung (Mammendorfer)	2/8	2,77
		8/16	2,78

Für die Pumpversuche im Großmaßstab wurden zwei Betone ausgewählt, die im Rahmen der Pumpversuche im Technikum-Maßstab als kritisch und als unkritisch identifiziert wurden. Der SOLL-Betonentwurf kann Tabelle 3-5 entnommen werden.

Tabelle 3-5: Ausgangsstoffe und Betonentwurf sowie stoffliche Kenngrößen der konzipierten Betone zur Durchführung der Pumpversuche im Großmaßstab.

Ausgangsstoffe	Dichte [kg/dm³]	Referenzbeton [kg/m³]	Beton A2 [kg/m³]
CEM II/A-LL 42,5 N	3,05	333	309
Flugasche	2,3	63	58
Wasser	1,0	189	198
0/4 Alpine Moräne	2,68	778	778
4/8 Alpine Moräne	2,68	318	318
8/16 Alpine Moräne	2,68	672	672
Luft	-	-	-
FM: MasterGlenium SKY 697	1,05	0,67	0,62
VZ: MasterSure 900	1,04	2,33	2,16
Sieblinie	[-]	B	B
w/z-Wert	[-]	0,57	0,64
$(w/z)_{eq}$-Wert	[-]	0,53	0,60
FM-Gehalt	[M.-% v. Zement]	0,2	0,2
VZ-Gehalt	[M.-% v. Zement]	0,7	0,7
Leimgehalt	[dm³/m³]	325	325
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim}	[-]	0,42	0,39
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton}	[-]	0,80	0,79

3.3 Prüftechniken zur Frischbetoncharakterisierung

3.3.1 Gesteinskörnungsanalysen

Zur Analyse der verwendeten Gesteinskörnungen wurden die in Tabelle 4-1 aufgeführten Kenngrößen bestimmt, mit dem Ziel die Leimschichtdicke d_{Leim} um die Gesteinspartikel im Betongefüge mit einem Durchmesser von D > 0,125 mm in Abhängigkeit vom jeweiligen Leimgehalt V_{Leim} semi-empirisch zu berechnen. Eine Auflistung ermittelter Kenngrößen und angewandter Methoden kann Tabelle 3-6 entnommen werden.

Tabelle 3-6: Auflistung der ermittelten Kenngrößen der Gesteinskörnungen und Benennung der angewandten Methode bzw. Norm.

Kenngrößen	Angewandte Methode bzw. Norm
Partikelgrößenverteilung $Q_r(a_i)$ (Sieblinie)	Partikelanalysesystem CAMSIZER
mittlere Korndichte der Gesteinskörnung ρ_{GK} Feststoffgehalt der losen Gesteinsschüttung n_{GK} Schüttdichte der Gesteinskörnung $\rho_{GK,Schütt}$ Hohlraumgehalt $n_{GK,H,Schütt}$ volumenbezogene Konzentration der Gesteinskörnung im verdichteten Zustand $\phi_{GK,max}$	DIN EN 1097-3
relative Feststoffkonzentration der Gesteinskörnung $\phi_{GK}/\phi_{GK,max}$	rechnerisch nach Gl. 2-4
Sphärizitätsindex f_{sph}	Partikelanalysesystem CAMSIZER
massebezogene spezifische Oberfläche der Gesteinskörnung $O_{GK,spez.}$	rechnerisch: Partikeloberfläche/Partikelmasse in [m²/kg]

3.3.2 Frischbetoncharakterisierung

Im Rahmen der Frischbetoncharakterisierungen im Labor und begleitend zu den Pumpversuchen im Technikum-Maßstab und im Großmaßstab wurden folgende Untersuchungen durchgeführt.

- Ausbreitmaß gemäß DIN EN 12350-5 und Einordnung in die zugehörige Konsistenzklasse nach DIN EN 206-1

- Frischbetonrohdichte nach DIN EN 12350-6
- Luftporengehalt nach DIN EN 12350-7
- Frischbetontemperatur nach DIN 1045-3 bestimmt.

Die Ausbreitkuchen der Frischbetone wurden zusätzlich fotografisch dokumentiert.

3.3.3 Pumpwiderstandsrelevante Untersuchungen

Untersuchungen mittels Gleitrohr-Rheometer

Zur Untersuchung des benötigten Förderdrucks wurde ein Gleitrohr-Rheometer, wie bereits in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, verwendet. Aufbauend auf der allgemeinen BUCKINGHAM-REINER-Gleichung und unter Annahme einer experimentell abgeleiteten Gleitschichtdicke (zwischen 1 und 5 mm), hat KAPLAN ein Modell zur Pfropfenbewegung für den Rohrtransport von Betonen abgeleitet [Kaplan – 2000]. Diese Erkenntnisse wurden von KASTEN [Kasten – 2010] in ein modifiziertes Modell überführt. Es setzt sich aus der Summe des Druckanteiles der zu überwindenden Fließgrenze, dem Druckanteil der plastischen Viskosität und dem Druckanteil der zu überwindenden Förderhöhe zusammen, siehe Gleichung 3-1.

$$\mathrm{P}_{\mathrm{Sliper}} = a \cdot \frac{4 \cdot L}{D} + b \cdot \frac{16 \cdot Q \cdot L}{\pi \cdot D^3} + \rho \cdot g \cdot h \tag{3-1}$$

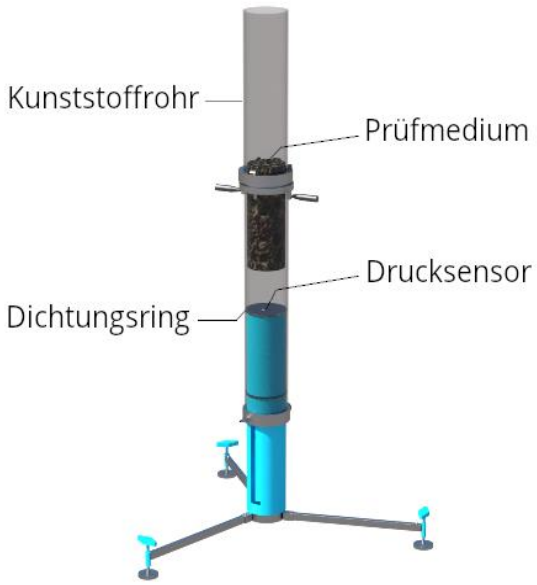
$$a = \frac{Y \cdot D_S}{4 \cdot L_S}$$

$$b = \frac{M \cdot \pi \cdot D_S}{16 \cdot L_S}$$

mit:

P	Druck [N/mm²]
a	Fließgrenzparameter [bar]
L	Länge des Förderrohrs [m]
D	Durchmesser des Förderrohrs [m]
b	Viskositätsparameter [ba·h/m]
Q	Fördermenge [m³/h]
ρ	Probendichte [kg/dm³]
g	Erdbeschleunigung mit 10 m/s²
h	Förderhöhe [m]
Y	Achsenabschnitt der linearisierten Trendlinie einer Slipermessung [bar]
D_s	Durchmesser Sliperrohr [m]
L_s	Länge Sliperrohr [m]
M	Steigung der linearisierten Trendlinie einer Slipermessung [bar·h/m³]

Die Beiwerte a und b der Gleichung (3-1) können mit einem Gleitrohr-Rheometer bestimmt werden. Die angegebene Gleichung bildet die Grundlage für die Auswertung sämtlicher Untersuchungen mit dem Gleitrohr-Rheometer zur Bestimmung des Förderdrucks. Die Arbeitsweise mit dem Gerät wird in Abbildung 3-1 veranschaulicht.



(a)

1. Durchführung einer Reihe von Hüben mit variierender Fallgeschwindigkeit
2. Berechnung von Maximaldruck und Fördermenge aus dem Druck- und Geschwindigkeitsverlauf jedes einzelnen Hubes
3. Bestimmung des Fließgrenzbeiwertes *a* und Viskositätsbeiwertes *b* anhand y-Achsenabschnitt und Steigung einer linearen Regressionsgeraden durch alle Messpunkte im P-Q-Diagramm

(b)

Abb. 3-1: Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer (a) Aufbau (b) Durchführung.

Rheologische Untersuchungen

Für die Bestimmung rheologischer Parameter von Frischbeton wurde das eBT-V Rheometer der Firma Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH verwendet (vgl. Abbildung 3-2). Es handelt sich dabei um ein mobiles, akkubetriebenes Rheometer, welches mit zwei unterschiedlichen Modi die Fließeigenschaften – und hier die Bingham Parameter Fließgrenze und plastische Viskosität – des Betons bestimmen kann. Das eBT-V Schleibinger Rheometer wird im sog. CR-Test gesteuert, das heißt eine Drehzahl wird vorgegeben, im Rheometer eingestellt und das Drehmoment T gemessen [Solbach – 2021]. Dazu wurde die Betonprobe in das Probengefäß eingebracht. Die rheologischen Eigenschaften jeder Betonprobe wurden dreimalig gemessen. Zwischen jeder Messung wurde die Betonprobe homogenisiert.

Abbildung 3-2: eBT-V Rheometer der Firma Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH.

Im Rahmen der rheologischen Untersuchungen wurden die Kenngrößen Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität μ bestimmt. Um die dafür erforderliche Fließkurve zu bestimmen, wurde das in Abbildung 3-3 dargestellte Messprofil angewendet.

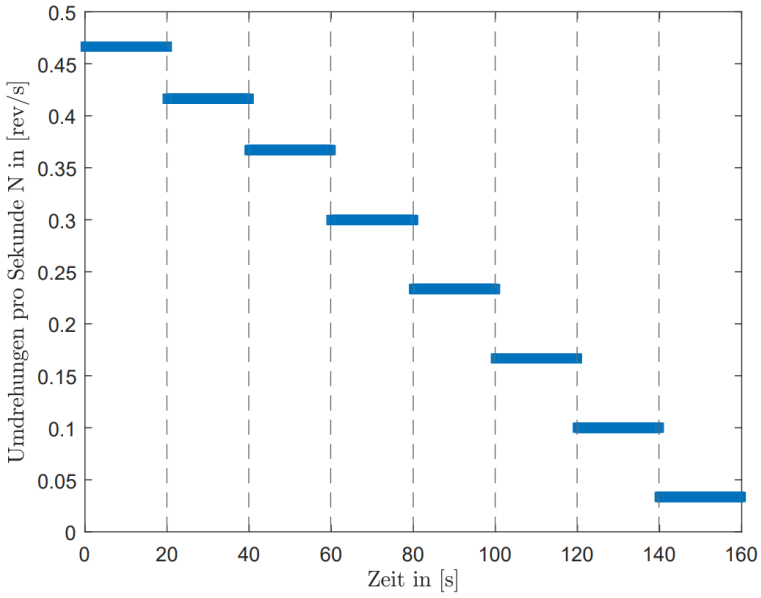


Abbildung 3-3: Gesteuerte Umdrehungsgeschwindigkeit des Messpaddels im Zeitverlauf [Solbach – 2022].

Die eBT-V Software bestimmt selbstständig mittels linearer Regression (BINGHAM) unter der Verwendung der Reiner-Riwlin-Gleichung die rheologischen Kenngrößen Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität µ.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass eine wesentliche Anforderung an die Durchführung einer rheologischen Messung die Homogenität des Betons darstellt. Da im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts bewusst Betone verwendet wurden, die zur Entmischung neigen, um eine Blockierung der Betone in der Förderleitung herbeizuführen, muss beachtet werden, dass eine Entmischung der Betone auch die parallel durchgeführten Frischbetonprüfungen beeinflusst. Die im Folgenden vorgestellten rheologischen Ergebnisse stellen den Mittelwert aus mindestens drei Messungen dar. Zwischen jeder Messung erfolgte stets eine Homogenisierung der Frischbetonprobe.

3.3.4 Pumpstabilitätsrelevante Untersuchungen

Zu den im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten pumpstabilitätsrelevanten Untersuchungen wurden entsprechend der wesentlichen Entmischungsphänomene, die während des Pumpens auftreten und zur Blockierung führen können, das Sedimentationsverhalten und das Filtrationsverhalten quantifiziert. Das Sedimentationsverhalten soll auf makroskopischer Ebene die Trennung zwischen Zementleim und Gesteinskörnung abbilden. Das Filtrationsverhalten soll demgegenüber die Entmischungsprozesse auf mikroskopischer Ebene erfassen.

Untersuchungen zum Filtrationsverhalten

Die verwendete Filterpresse wurde aufbauend auf dem Grundprinzip von BROWNE und BAMFORTH [Browne – 1977] im Rahmen eines vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein e. V. (DBV) geförderten Forschungsprojektes entwickelt und erprobt [Lohaus – 2017a; Lohaus – 2017b]. In [Cotardo – 2023] wurde die Prüfmethode umfangreich validiert, mit dem Ziel einen dokumentierten Nachweis zur Eignung des Verfahrens zu erbringen.

Versuchsaufbau der Filterpresse

Die Filterpresse stellt einen stählernen Zylinder mit einem Volumen von 3,2 dm³ dar, in dem die Betonprobe eingebracht wird (vgl. Abbildung 3-4). Detaillierte Angaben zur Bemaßung und den einzelnen Komponenten können [Cotardo – 2023] entnommen werden.

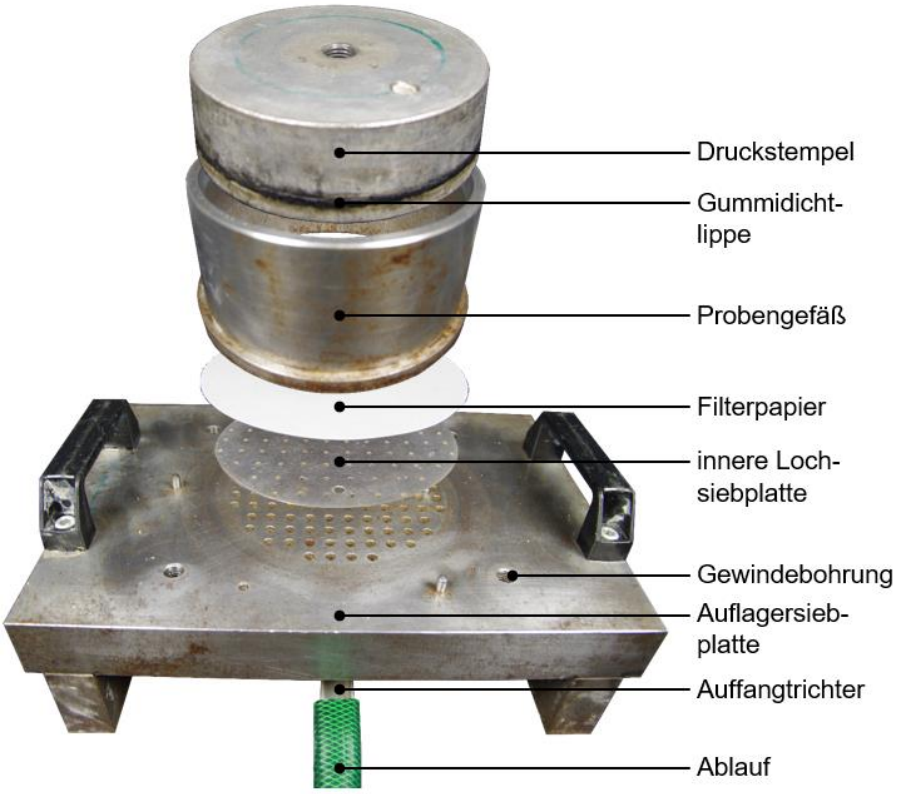


Abbildung 3-4: Filterpresse und die Bezeichnung ihrer Bauteilkomponenten.

Versuchsdurchführung

Die wesentlichen Schritte zur Versuchsdurchführung sind im Folgenden stichpunktartig aufgeführt.

- Benetzung sämtlicher Bauteilkomponenten mit Wasser (matt feucht)
- Positionierung innere Lochsiebplatte auf Auflagersiebplatte
- Anfeuchten und zentrische Positionierung des Filterpapiers
- Aufspannung des Probengefäßes auf Auflagersiebplatte
- Einbringung der Betonprobe mit einem Volumen von 3 dm³ in zwei mit einem Stößel verdichtete Lagen
- Einfetten des Druckstempels umfangsseitig
- Verschließen des Probengefäßes durch Druckstempel

Die Filtrationsversuche wurden im Rahmen der Validierung und der Laboruntersuchungen mit einer servohydraulische Prüfmaschine durchgeführt, um die Druckkraft definiert und präzise auf die Betonproben zu übertragen. Für die der Pumpversuche begleitenden Untersuchungen wurde eine mobile Filterpresse verwendet (vgl. Abbildung 3-5). Für sämtliche Untersuchungen wurde ein Prüfdruck von 20 bar definiert.

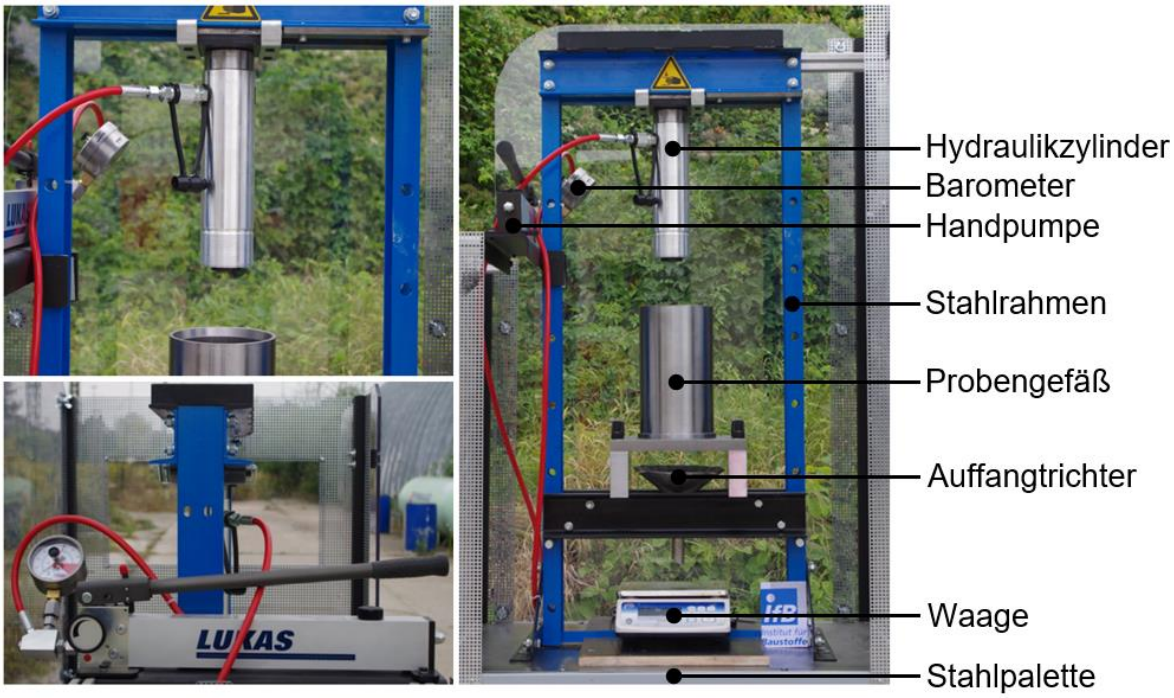


Abbildung 3-5: Mobile Filterpresse zur Durchführung von Filtrationsversuchen unter Baustellenbedingungen [Foto: Cotardo].

Unabhängig von der angewandten Prüftechnik wurde der Prüfdruck aufgebracht und für 5 min konstant gehalten. Das aus der Betonprobe entwichene Filtratwasser wurde in einem Becherglas aufgefangen, das sich auf einer Waage befand. Die Waage zeichnete die Filtratwassermenge als Masse im Zeitverlauf auf. Der Filtratwassermasse-Zeitverlauf wurde zur Bestimmung der Filtrationsrate herangezogen.

Bestimmung der Filtrationsrate

Die gemessene Masse m_{FW} an Filtratwasser wurde in einem zweiten Schritt in ein äquivalentes Volumen V_{FW} unter der Voraussetzung einer Dichte von ρ = 1,0 g/cm³ umgerechnet. Anschließend wurde die Steigung der Filtratwasser-Zeit-Kurve im Intervall zwischen 3 und 6 √s durch lineare Regression bestimmt. Die Steigung des Filtratwasservolumen-(Wurzel-)Zeit-Verlaufs stellt die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW} = \frac{dV_{FW}}{d\sqrt{t}}$ dar (vgl. Abbildung 3-6).

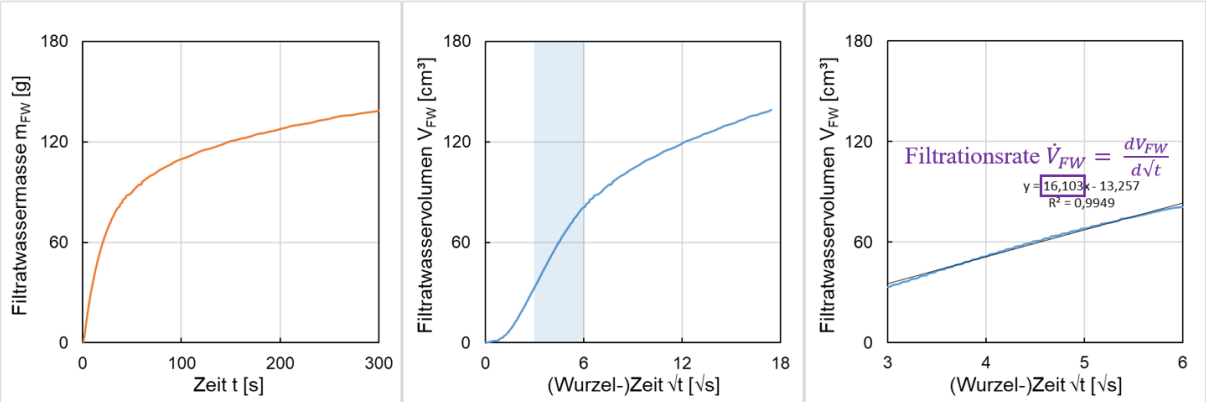


Abbildung 3-6: Exemplarische Darstellung eines charakteristischen Filtratwassermasse-Zeit-Verlaufs (links), eines Filtratwasservolumen-(Wurzel-)Zeit-Verlaufs (Mitte) und die über lineare Regression ermittelte Steigung des Filtratwasservolumen-(Wurzel-)Zeit-Verlaufs im Intervall zwischen (3 und 6)√s (rechts).

Die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ beschreibt den Widerstand des Betons gegenüber der infolge des Druckgradienten (Antriebskraft) hervorgerufenen Trennung zwischen Anmachwasser und Feststoff auf Mikroebene. Je geringer die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ ist, desto höher ist der Widerstand des Betons. Der Widerstand ist dabei proportional zu der durch Reibung dissipierten Energiemenge, die im Fließprozess des Wassers auf das Kornhaufwerk des Betons übertragen wird. Dabei spielen nicht nur die Eigenschaften des Anmachwassers (dynamische Viskosität) eine entscheidende Rolle, sondern auch der Aufbau (Partikelgrößenverteilung) des Kornhaufwerks.

Untersuchungen zum Leimabsonderungsverhalten

Das Leimabsonderungsverhalten wurde indirekt über das Sedimentationsverhalten unter Rütteleinwirkung quantifiziert. Die Sedimentationsversuche wurden in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie [DAfStb – 2012] mit handelsüblichen KG-Rohren durchgeführt (vgl. Abbildung 3-7).

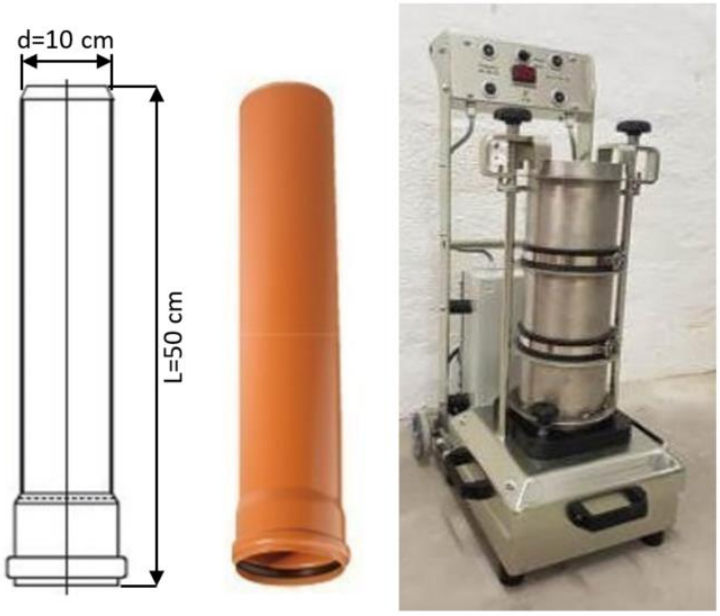


Abbildung 3-7: Sedimentationsrohr (links) und Rüttelgerät (rechts) zur definierten Einbringung der definierten Rüttelenergie.

Das KG-Rohr wurde mit der Betonprobe befüllt, wobei durch leichte Schiefstellung (ca. 15 Grad) des KG-Rohres ein Entmischen des Betons verhindert wurde. Das Sedimentationsrohr wurde für eine bestimmte Rütteldauer bei einer definierten Amplitude (0,22 mm) und Frequenz (75 Hz) gerüttelt. Um die Leimabsonderung im Zeitverlauf quantifizieren zu können, wurden mindestens zwei, vorzugsweise drei Rütteldauern angewandt. Für die Laboruntersuchungen wurden die Rütteldauern 20, 40, 60 Sekunden definiert. Für die begleitenden Untersuchungen der Pumpversuche im Technikum und im Großmaßstab wurde die Rütteldauern 30 und 60 Sekunden definiert. Nach der jeweiligen Rütteleinwirkung wurde das KG-Rohr verschlossen und nach der Erhärtung des Betons entlang der Längsachse aufgesägt. Die Schnittfläche wurde anschließen bei gleichen Lichtbedingungen fotografiert. Der Gesteinskörnungsanteil wurde mithilfe der in [Coenen – 2021] entwickelten fotooptischen Methode quantifiziert (vgl. Abbildung 3-8).

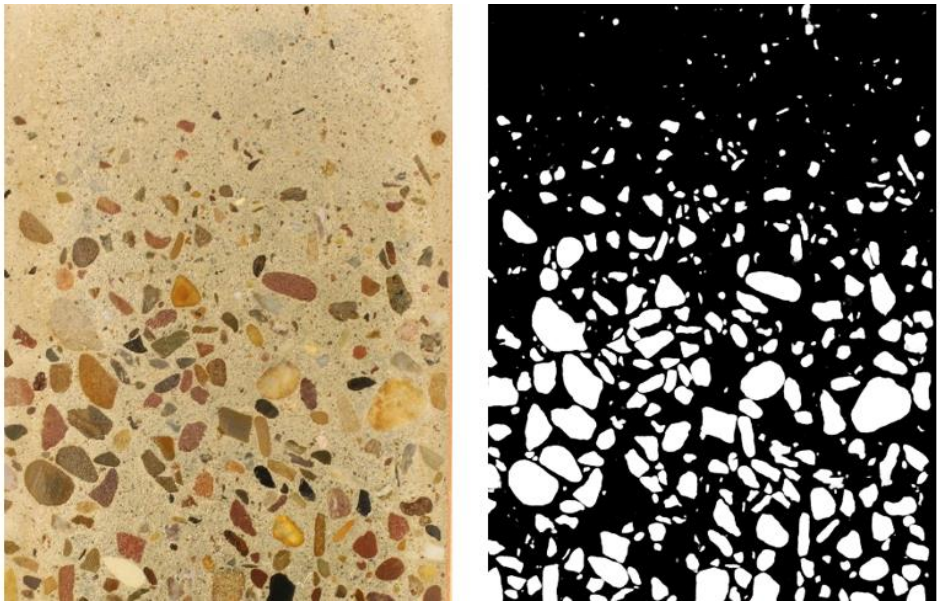


Abbildung 3-8: Foto eines oberen Abschnitts eines erhärteten und entlang der Längsachs aufgesägten Sedimentationsrohres (links) und die dazugehörige semantische Segmentierung der Gesteinspartikel (rechts).

Die Bestimmung der Sedimentationsrate $\dot{S}$ erfolgte in Anlehnung an den Sedimentationsindex VI, der in [Navarrete – 2016] entwickelt wurde und aussagt, wie viel Sedimentation in Vol.-% infolge einer definierten Rütteleinwirkung stattfindet. Um den Einfluss variierender Rütteldauern auf die Sedimentationsneigung zu erfassen, wurde je Rütteldauer eine Sedimentationsrate bestimmt, in dem der jeweilige Sedimentationsindex VI_i einer vorgegebenen Rütteldauer durch die entsprechende Zeit in Sekunden der einwirkenden Rütteldauer dividiert wurde. Die Sedimentationsrate $\dot{S}$ stellt den Mittelwert der auf diese Weise bestimmten Sedimentationsraten dar. Für die Laboruntersuchungen, für die drei variierende Rütteldauern angewandt wurden, wird die Sedimentationsrate $\dot{S}$ wie folgt berechnet.

$$\dot{S} = \left(\frac{VI_{20}}{20\ sek.} + \frac{VI_{40}}{40\ sek.} + \frac{VI_{60}}{60\ sek.}\right)/3 \qquad (3\text{-}2)$$

Demnach stellt die Sedimentationsrate $\dot{S}$ den Mittelwert der einzelnen Sedimentationsraten in Abhängigkeit der einwirkenden Rütteldauer dar. Da bei Beton eine Entmischung bereits ohne Rütteleinwirkung stattfinden kann, ist die Bestimmung einer Sedimentationsrate beispielsweise durch die Bestimmung der Steigung des Sedimentationsindex-Rütteldauer-Verlaufs nicht zielführend, da unter der Berücksichtigung eines y-Achsenabschnitts (VI_0>0) die Sedimentationsrate unterschätzt werden würde. Demnach wurde die Mittelwertbildung gewählt, um den Einfluss variierender Rütteldauern abzubilden.

3.3.5 Versuchsaufbauten und Versuchsdurchführung der Technikum-Pumpversuche

Die Betone wurden mit einer stationären Doppelkolbenpumpe mit S-Rohrweiche (P 720 der Firma Putzmeister) mit einem maximalen Förderdruck von 80 bar und einer maximalen Hubzahl von 29 Hüben pro Minute gepumpt. Die Förderzylinder der Pumpe haben einen Durchmesser von 150 mm und einen Kolbenhub von 700 mm.

Für die Durchführung der hier beschriebenen Pumpversuche wurde das im Folgenden beschriebene Vorgehen definiert. Zunächst wurde eine Schwammkugel mit einem Durchmesser von 100 mm und einer mittleren Härte hinter dem Ausgang der Pumpe in die

Förderleitung eingebracht. Daraufhin wurde eine Vorlaufmischung hergestellt, welche in der Praxis die Aufgabe übernimmt, die Förderleitungswandung zu benetzen. Als Vorlaumischung wurde ein gewöhnlicher Zementleim mit einem w/z-Wert von 0,4 hergestellt und vor dem Pumpversuch in den Aufgabetrichter der Betonpumpe gegeben. Die Vorlaufmischung (V=36 dm^3) wurde durch einige Kolbenhübe in die Förderleitung befördert. Danach wurde der Aufgabetrichter geleert, der Beton über die Rutsche des Betonfahrmischers in den Aufgabetrichter gegeben und dann entsprechend der in Abbildung 3-9 dargestellten Pumpregie für insgesamt 30 min im Kreis gepumpt.

Die sog. Pumpregie bestand aus einem dreistufigen Profil, wobei jede Stufe eine Dauer von vier Minuten aufwies (vgl. Abbildung 3-9).

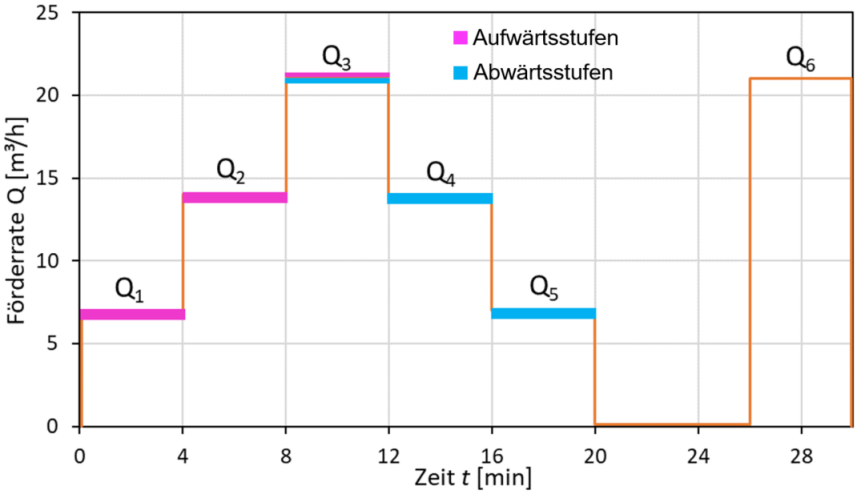


Abbildung 3-9: Darstellung der für die Durchführung der Pumpversuche definierten Pumpregie (Förderrate Q im Zeitverlauf).

Die in Abb. 3-9 dargestellten Förderraten Q_1 bis Q_6 sowie die jeweiligen Pumpdauern wurden in enger Abstimmung mit dem Industrie-Betreuerkreis zum Projekt gewählt. Nach 20 min wurde eine temporäre Pumpunterbrechung mit einer Dauer von 6 Minuten vorgesehen. Sie stellt in der Praxis eine übliche Unterbrechungsdauer im Pumpbetrieb dar, wenn beispielsweise das Transportbetonfahrzeug gewechselt wird oder der Endschlauch neu positioniert werden muss. Im Anschluss an die temporäre Unterbrechung wurde erneut für eine Dauer von 4 min die maximale Fördermenge (Q_6 = 21 m^3/h) angesteuert, um den Einfluss der temporären Unterbrechung auf den Pumpwiderstand zu quantifizieren.

Durch die auf diese Weise definierte Pumpregie, die für sämtliche Pumpversuche unter Technikum-Bedingungen angewandt wurde, konnte zum einen der Pumpdruck P in Abhängigkeit von der Fördermenge Q und zum anderen die zeitliche Abhängigkeit des Pumpwiderstands sowie der Einfluss einer temporären Unterbrechung auf die Blockierungsneigung abgebildet werden.

Die in Abbildung 3-10 eingezeichneten Punkte dienen zur Auswertung des Einflusses der Betonzusammensetzung auf den Pumpwiderstand, der im Folgenden als Pumpdruck P(Q) ausgedrückt wird.

Um den Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf den Pumpwiderstand zu quantifizieren, wurde mit Hilfe der an der Pumpleitung applizierten Drucksensoren (1-11) der Druck P in der Förderleitung über die Dauer des Pumpversuchs aufgezeichnet und der Förderrate Q gegenübergestellt. Für die Auswertung des Einflusses der Betonzusammensetzung auf den

Pumpwiderstand wird der maximal gemessene Druck am Drucksensor 1 bei einer Förderrate von Q=21 m³/h herangezogen (vgl. Abbildung 3-10).

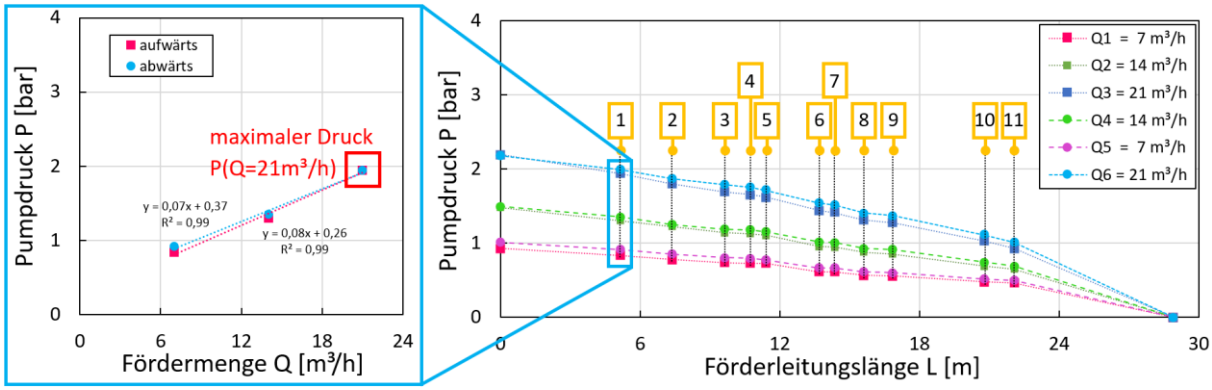


Abbildung 3-10: Gemessener Pumpdruck P in der Förderleitung in Abhängigkeit von der Förderleitungslänge L bei variierender Förderrate Q (rechts) und das Pumpdruck-Förderrate-Diagramm (P-Q-Diagramm) (links).

Pumpleitung 1 zur Quantifizierung des Pumpwiderstandes

Die Pumpleitung 1 (PL1) wurde definiert, um den Einfluss der stofflichen Zusammensetzung der Betone in Abhängigkeit vom Förderleitungselement zu quantifizieren. Der Aufbau der Pumpleitung ist in Abbildung 3-11 dargestellt.

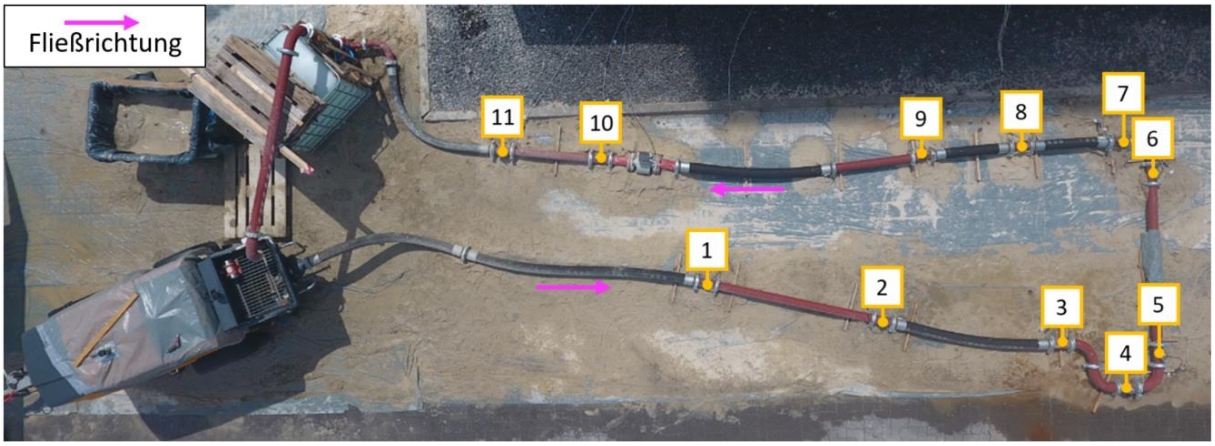


Abbildung 3-11: Luftaufnahme der Pumpleitung 1 mit applizierten Drucksensoren (1-11) an definierten Messstellen [Foto: Cotardo].

Die Pumpleitung wies eine Länge von rd. 29 m bei einem Förderleitungsdurchmesser D von 100 mm auf. Die Pumpleitung bestand aus Förderschläuchen, Förderrohren sowie Rohrbögen (R275), um den Einfluss verschiedener Strömungsbedingungen zu untersuchen. Darüber hinaus wurde zwischen den Drucksensoren 10 und 11 ein Reduktionsrohr verbaut, das die Nennweite von 100 mm auf 80 mm über eine Länge von einem Meter reduzierte. In Tabelle 3-7 sind die Förderleitungselemente und ihre jeweiligen Längen und Nennweiten dargestellt. Zusätzlich zur Messung des Drucks in der Förderleitung wurde der Hydrauliköldruck der Pumpe messtechnisch erfasst. Auf die Untersuchungen zum Hydrauliköldruck wird in Abschnitt 4.2.6 näher eingegangen.

Tabelle 3-7: Förderleitungselemente der Pumpleitung 1 sowie installierte Sensorik.

Pumpleitung 1			
Nennweite des Querschnitts	Bezeichnung des Förderleitungselements	Länge [m]	Sensorbezeichnung und Abstand zur Pumpe
DN100	Förderschlauch	2	
	Förderschlauch	3	
	Passstück	0,25	1 (5,1 m)
	Förderrohr	2	
	Passstück	0,25	2 (7,4 m)
	Förderschlauch	2	
	Passstück	0,25	3 (9,9 m)
	Rohrbogen R275 (rechts)	0,43	
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	4 (10,7 m)
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	5 (11,4 m)
	Förderrohr	2	
	Passstück	0,25	6 (13,7 m)
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	7 (14,4 m)
	Förderschlauch	1	
	Passstück	0,25	8 (15,6 m)
	Förderschlauch	1	
	Passstück	0,25	9 (16,9 m)
	Förderrohr	1	
	Förderschlauch	2	
	Durchflussmesser	0,7	
	Passstück	0,25	10 (20,8 m)
Reduzierung DN100-DN80		1	
DN80	Passstück	0,25	11 (22,1 m)
	Förderschlauch	2	
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Rohrbogen R275 (aufwärts)	0,43	
	Förderrohr	1	
	Rohrbogen R275 (horizontal)	0,43	
	Förderrohr	2	
	Rohrbogen R275 (abwärts)	0,43	
Gesamtlänge:			28,9 m

Pumpleitung 2 zur Quantifizierung der Blockierungsneigung

Die Pumpleitung 2 (PL2) wurde definiert, um die Blockierungsneigung von Beton in Abhängigkeit seiner Eigenschaften zu quantifizieren. Dazu wurde auf der Grundlage der Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung sowie der Untersuchungsergebnisse in Pumpleitung 1 ein vertikal nach oben und anschließend nach unten gerichteter Förderabschnitt (H=3,1m) eingebaut. Hierdurch sollte gezielt eine Entmischung der Betonfront hervorgerufen werden (vgl. Abbildung 3-12). Ziel war es dabei, einen Aufbau bereitzustellen, der es erlaubt, gezielt und reproduzierbar Blockierungen der Förderleitung im Versuch abzubilden.

Nach dem „Fall" des Betons wurde der Beton nach einem Fließweg von rd. 2,5 m in ein Reduzierstück geleitet. An dieser Stelle sollte geprüft werden, ob der ggf. durch den Fallvorgang entmischte Beton zu einer Blockierung führen würde. Die PL2 hatte eine Gesamtlänge von 43,6 m, was der typischen Förderstrecken unter der Verwendung gängiger Autobetonpumpen mit einem Knickverteilermast entspricht.

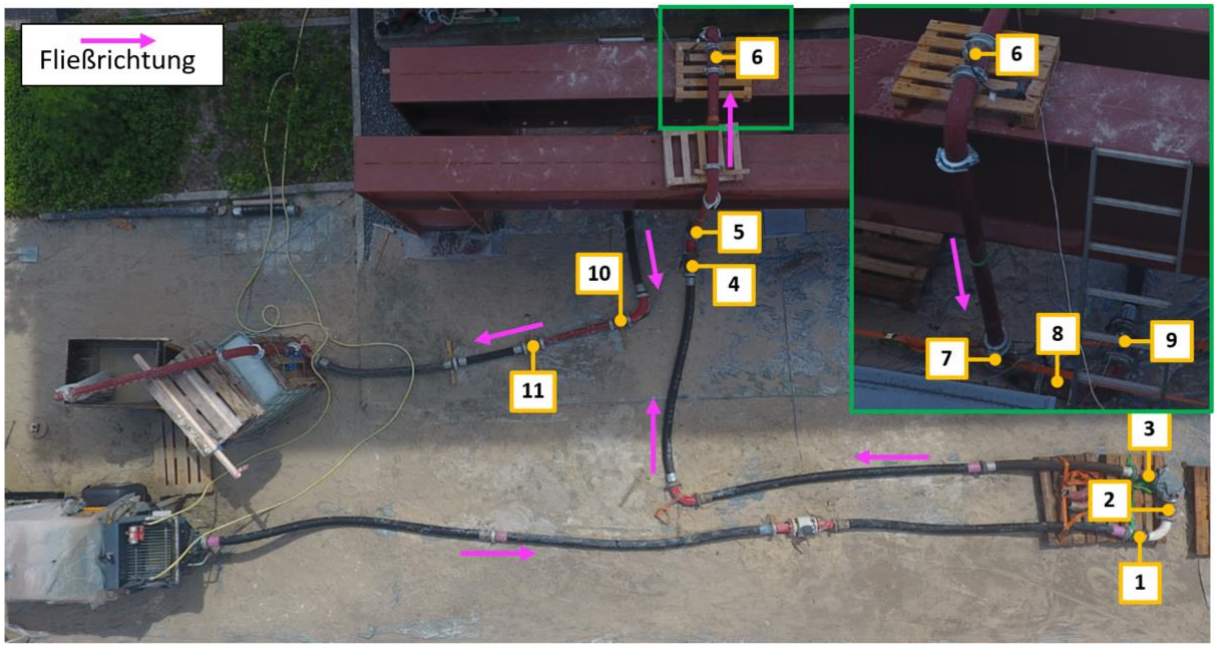


Abbildung 3-12: Luftaufnahme der Pumpleitung 2 mit applizierten Drucksensoren (1-11) an definierten Messstellen [Foto: Cotardo].

Die Förderleitungselemente und ihre jeweiligen Längen und Nennweiten können Tabelle 3-8 entnommen werden.

Tabelle 3-8: Förderleitungselemente der Pumpleitung 2.

Pumpleitung 2			
Nennweite des Querschnitts	Bezeichnung	Länge [m]	Sensorbezeichnung und Abstand zur Pumpe
DN100	Förderschlauch	4	
	Förderschlauch	4	
	Durchflussmesser	0,7	
	Förderschlauch	4	
	Passstück	0,25	1 (12,8 m)
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	2 (13,5 m)
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	3 (14,2 m)
	Förderschlauch	2	
	Förderschlauch	4	
	Rohrbogen R275 (rechts)	0,43	
	Förderschlauch	3	
	Passstück	0,25	4 (23,9 m)
	Rohrbogen R275 (aufwärts)	0,43	
	Passstück	0,25	5 (24,6 m)
	Förderrohr	2	
	Rohrbogen R275 (in Horizontale)	0,43	
	Förderrohr	1	
	Passstück	0,25	6 (28,2 m)
	Rohrbogen R275 (abwärts)	0,43	
	Förderrohr	2	
	Passstück	0,25	7 (30,9 m)
	Rohrbogen R275 (in Horizontale)	0,43	
	Passstück	0,25	8 (31,6 m)
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	9 (32,3 m)
	Förderschlauch	2	

	Rohrbogen R275 (rechts)	0,43	
	Passstück	0,25	10 (35,0 m)
	Reduzierung DN100-DN80	1	
DN80	Passstück	0,25	11 (36,2 m)
	Förderschlauch	1	
	Förderschlauch	2	
	Rohrbogen R275 (aufwärts)	0,43	
	Förderrohr	1	
	Rohrbogen R275 (in Horizontale)	0,43	
	Förderrohr	2	
	Rohrbogen R275 (abwärts)	0,43	
	Gesamtlänge:		43,6 m

Pumpleitung 3 zur Quantifizierung des Einflusses einer Gleitschichtneuausbildung auf den Pumpwiderstand und auf die Blockierungsneigung

Die Pumpleitung 3 (PL3) wurde gegenüber der PL2 geringfügig angepasst, mit dem Ziel, den Einfluss einer Gleitschichtneuausbildung auf den Pumpwiderstand und auf die Blockierungsneigung zu quantifizieren. Dazu wurde die Ruhe- und Konsolidierungsphase nach dem vertikal nach unten führenden Förderabschnitt von 2,5 m auf 6,5 m verlängert (vgl. Abbildung 3-13). Die PL3 wies damit eine Gesamtlänge von 45,6 m auf.

Abbildung 3-13: Foto der Pumpleitung 3 mit verlängerter Ruhe- und Konsolidierungsphase [Foto: Cotardo].

Die Förderleitungselemente und ihre jeweiligen Längen und Nennweiten können Tabelle 3-9 entnommen werden.

Tabelle 3-9: Förderleitungselemente der Pumpleitung 3.

Pumpleitung 3			
Nennweite des Querschnitts	Bezeichnung	Länge [m]	Sensorbezeichnung und Abstand zur Pumpe
DN100	Förderschlauch	4	
	Förderschlauch	4	
	Durchflussmesser	0,7	
	Förderschlauch	4	
	Passstück	0,25	1 (12,8 m)
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	2 (13,5 m)
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	3 (14,2 m)
	Förderschlauch	2	
	Förderschlauch	4	
	Rohrbogen R275 (rechts)	0,43	
	Förderschlauch	3	
	Passstück	0,25	4 (23,9 m)
	Rohrbogen R275 (aufwärts)	0,43	
	Passstück	0,25	5 (24,6 m)
	Förderrohr	2	
	Rohrbogen R275 (in Horizontale)	0,43	
	Förderrohr	1	
	Passstück	0,25	6 (28,2 m)
	Rohrbogen R275 (abwärts)	0,43	
	Förderrohr	2	
	Passstück	0,25	7 (30,9 m)
	Rohrbogen R275 (in Horizontale)	0,43	
	Passstück	0,25	8 (31,6 m)
	Rohrbogen R275 (links)	0,43	
	Passstück	0,25	9 (32,3 m)
	Förderschlauch	4	
	Rohrbogen R275 (rechts)	0,43	
	Förderschlauch	2	
	Passstück	0,25	10 (38,9m)
Reduzierung DN100-DN80		1	
DN80	Passstück	0,25	11 (40,1 m)
	Förderschlauch	1	
	Rohrbogen R275 (aufwärts)	0,43	
	Förderrohr	1	
	Rohrbogen R275 (in Horizontale)	0,43	
	Förderrohr	2	
	Rohrbogen R275 (abwärts)	0,43	
Gesamtlänge:		45,6 m	

3.3.6 Durchführung und Versuchsaufbauten der großmaßstäblichen Pumpversuche

In den großmaßstäblichen Versuchen wurden die Betone mit einer stationären Doppelkolbenpumpe mit S-Rohrweiche (BSA 1405 E der Firma Putzmeister) mit einem maximalen Förderdruck von 106 bar und einer maximalen Hubzahl von 20 Hüben pro Minute gepumpt. Der Förderdruck wurde nach den ersten zwei Versuchen auf maximal 80 bar gedrosselt, um die Bedingungen aus den Technikum-Versuchen nachzubilden. Der Durchmesser der Förderleitung betrug hier 125 mm. Entlang der Förderstrecke wurden zehn Drucksensoren an der Rohrwandung angebracht. Ein weiterer Druckabnehmer befand sich an der Anschlussstelle der Förderhydraulik der Betonpumpe. Die Betone wurden nicht wie in den Technikum-Versuchen im Kreis gepumpt. Stattdessen wurden die Betone über einen

Verteilermast in einen leeren Fahrmischer gefördert. Der Förderleitungsaufbau orientierte sich an den Erfahrungen aus den Versuchen im Technikum-Maßstab und wies vergleichbare Störstellen auf, siehe Abbildung 3-14.

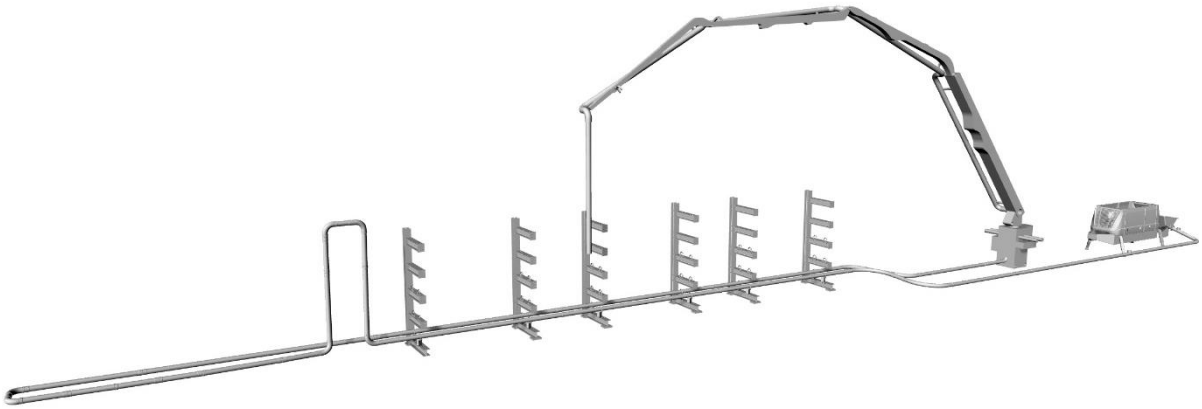


Abbildung 3-14: Pumpstrecke für Großversuche in Aichtal [Rendering: Putzmeister Concrete Pumps GmbH / Mikhalev].

Als Störstelle, nach dem vertikalen Pumpabschnitt, kam statt eines Reduktionsrohrs eine sog. Kiesbremse zum Einsatz. Bei einer Kiesbremse handelt es sich um ein Rohrelement, bei welchem eine Verjüngung und erneute Aufweitung des Querschnitts, auf kurzer Strecke (20 cm) stattfindet. Diese konnte nach dem vertikalen Förderabschnitt in veränderlicher Entfernung positioniert werden, siehe Abbildung 3-15.

Abbildung 3-15: Pumpstrecke für Großversuche in Aichtal mit Aufwärts- und Abwärtspumpanschnitt sowie Kiesbremse [Foto: Mikhalev / Cotardo / Putzmeister Concrete Pumps GmbH].

Die Länge der Förderleitung wurde nach dem ersten Versuch erweitert, indem der vertikale Förderabschnitt verlängert wurde, siehe Abbildung 3-16.

(a) (b)

Abbildung 3-16: Übergang vom vertikalen Förderabschnitt in die Kiesbremse und Unterschied zwischen Versuchsaufbau (a) Pumpleitungsgeometrie 1 und (b) Pumpleitungsgeometrie 2 mit verlängertem vertikalem Abschnitt [Foto: Mikhalev].

Der vertikale Förderabschnitt wurde somit um einen Meter im Steigbereich und einen weiteren Meter im Fallbereich verlängert. Das System erreichte eine Gesamtlänge von 121,8 m. Für die Kiesbremse waren im Laufe der Versuchsreihen drei Positionen vorgesehen. Position 1: direkt nach dem vertikalen Förderabschnitt, Position 2: 2 m nach dem vertikalen Förderabschnitt und Position 3: 5,5 m nach dem vertikalen Förderabschnitt. Die Länge der Förderleitung und die Positionierung der Drucksensoren sind in Tabelle 3-10 angegeben.

Tabelle 3-10: Aufbau der Förderleitung im Großmaßstab und Position der Drucksensoren.

Nennweite des Querschnitts	Bezeichnung	Länge [m]
	BSA	
	F.Bogen SK150 6,0Z/SK125 5,5Z 90GR.	0,45
	Druckstu.SK 6,0Z/150 6L S2015-S2015D	0,14
	Versuch	
	SK-T 7,1 DN125/5,5x 500/130 BP	0,50
	SK-R PM71 DN125/5,5X 500	0,50
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	0,51
	SK-R PM71 DN125/5,5X 500	0,50
	SK-R PM71 DN125/5,5X3500	3,50
	SK-T 7,1 DN125/5,5x 500/130 BP	0,50
DN125	SK-R PM71 DN125/5,5X6000	6,00
	Rohrweiche DVH 5/2 von Goldbeck	0,51
	SK-R PM71 DN125/5,5X3501-4000	3,85
	GROSS-BOG.SK5,5Z 90GR.R=1000HD	1,87
	SK-P PM71 DN125/5,5x 501-1000	0,93
	GROSS-BOG.SK5,5Z 90GR.R=1000HD	1,87
	SK-R PM71 DN125/5,5X6000	18,00
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	0,51
	SK-R PM71 DN125/5,5X2000	2,00
	SK-R PM71 DN125/5,5X1000	1,00
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	0,51

	SK-R PM71 DN125/5,5X 500	0,05
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	0,51
	SK-R PM71 DN125/5,5X1000	1,00
	SK-R PM71 DN125/5,5X2000	2,00
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	0,51
	SK-R PM71 DN125/5,5X1000	1,00
	SK-R PM71 DN125/5,5X2000	2,00
	SK-R PM71 DN125/5,5X1000	4,00
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	0,51
	GVM 2/2 SK 125/5,5 130 G1	0,29
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	0,51
	SK-P PM71 DN125/5,5X2501-3000	2,60
	SK-R PM71 DN125/5,5X6000	24,00
	GROSS-BOG.SK5,5Z 45GR.R=1000HD	1,09
	SK-P PM71 DN125/5,5x 501-1000	0,87
	GROSS-BOG.SK5,5Z 45GR.R=1000HD	1,09
	SK-R PM71 DN125/5,5X 500	0,50
	SK-R PM71 DN125/5,5X3000	3,00
	SK-P PM71 DN125/5,5x1001-1500	1,14
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	0,51
	F.Ltg.R850-T 5,5/5,5 PM5630P	
	Etagenbogen SK125/5,5Z x1024/331	1,26
	SK-P.53P DN125-5,5x1130 67HRC	1,13
	MX - F.Ltg.M28-4-Z-G.3 SK125/5,5 PM40	
	SK-R PM40 DN125/5,5X3000	15,00
	SK-R PM40 DN125/5,5X 275	0,28
	SK-R PM40 DN125/5,5X 434	0,43
	SK-R PM40 DN125/5,5X2237	2,24
	SK-R PM40 DN125/5,5X2239	2,24
	SK-R PM40 DN125/5,5X1644	1,64
	SK-B PM16 DN125/5,5x90° 275S	5,09
	Endschlauch	1,00
	Abstand Stoß zwischen Förderleitungen	0,21
	Gesamtlänge:	121,78
	Position Drcukmessungen	
	Messstelle 1	1,2
	Messstelle 2	16,89
	Messstelle 3	21,77
	Messstelle 4	39,58
	Messstelle 5	43,96
	Messstelle 6	45,82
	Messstelle 7	47,83
	Messstelle 8	61,76
	Messstelle 9	79,57
	Messstelle 10	87,27

Wie bereits bei den Versuchen im Technikum-Maßstab wurde vor jedem Pumpvorgang eine Schwammkugel mittlerer Härte in der Förderleitung eingebracht. Anschließend wurde eine Vorlaufmischung in das leere, befeuchtete Förderrohr gefüllt, siehe Abbildung 3-17.

(a) (b)

Abbildung 3-17: Vorbereitung der Vorlaufmischung (a) einsetzen der Schwammkugel (b) befüllen mit Zementleim [Foto: Mikhalev].

Im Zuge der großmaßstäblichen Versuche wurde zudem der Einfluss der Anordnung der Schwammkugel auf die Blockierungsneigung untersucht. Zusätzlich wurde die Wirksamkeit von Industrieschlempe mit der Wirksamkeit von Zementleim als Vorlaufmischung verglichen. Der Zementleim (w/z = 0,40) wurde wie in den Versuchen im Technikum-Maßstab hergestellt.

Analog zur Pumpregie aus den Technikum-Versuchen wurde für die großmaßstäblichen Pumpversuche eine vergleichbare Pumpregie definiert (vgl. Abbildung 3-18).

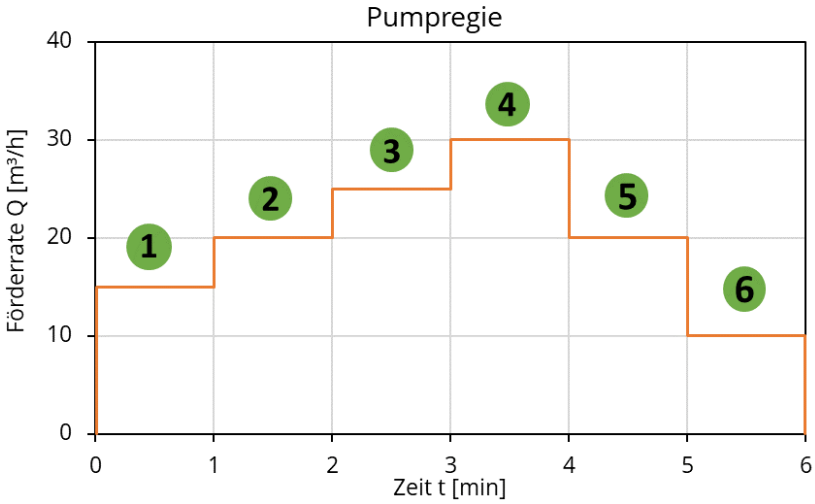


Abbildung 3-18: Pumpregie für die großmaßstäblichen Pumpversuche.

Die Dauer der einzelnen Förderratenstufen musste hier jedoch kürzer definiert werden als in den Technikum-Versuchen, weil der Beton nicht im Kreis, sondern durch das System hindurch gepumpt wurde und dadurch die Förderdauer und die Förderraten durch die Betonmenge begrenzt waren.

Begleituntersuchungen

Im Rahmen umfangreicher Frischbetonuntersuchungen wurden die Eigenschaften der Betone jeweils vor sowie nach dem Pumpen untersucht. Die Frischbetonuntersuchungen waren analog zu denen die im Rahmen der Technikum-Versuche durchgeführt wurden, wie in den Abschnitten 4.2 bis 4.4 beschrieben. In Abbildung 3-19 ist exemplarisch der Aufbau der Frischbetonprüfungen zu sehen.

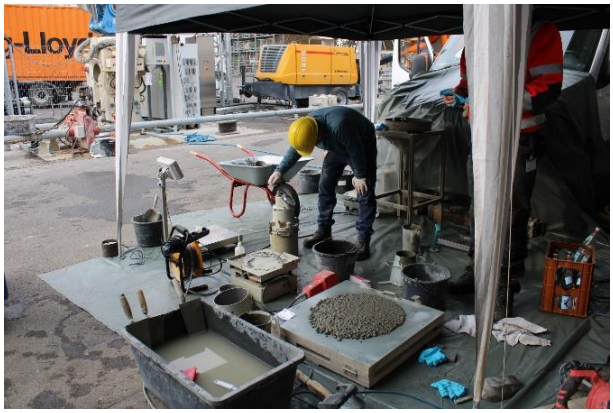


Abbildung 3-19: Durchführung von Begleituntersuchungen vor und nach dem Pumpen [Foto: Mikhalev].

Zusätzlich zu den Frischbetonuntersuchungen wurden nach dem Auftreten von Blockierungen exemplarisch Proben aus der blockierten Förderleitung entnommen und hinsichtlich ihrer Zusammensetzung analysiert. Dazu wurde die Frischbetonrohdichte nach DIN EN 12350-6 bestimmt und der Auswaschversuch in Anlehnung an die SVB-Richtlinie [DAfStb – 2012] durchgeführt, um den Anteil der Gesteinskörnung mit einem Korndurchmesser von > 1 mm zu quantifizieren, siehe Abbildung 3-20.

(a) (b)

Abbildung 3-20: Untersuchung von Blockierung (a) in der Kiesbremse (b) Auswaschversuche der Blockierung [Foto: Mikhalev]

Dadurch soll ein Vergleich zwischen der SOLL- und der IST-Zusammensetzung des Betons vorgenommen werden, um den Zustand des blockierten Betongefüges zu quantifizieren und um zusätzlich Entmischungsprozesse, die während des Blockierens auftreten, beschreiben zu können.

Um das Verhalten der Vorlaufmischung und der Gesteinskörnung in Rohrbögen untersuchen zu können, wurde ein Bogensegment mit 0,5 m Zu- und Ablauf mit pigmentierter Vorlaufmischung durchströmt. Hierzu wurde die Vorlaufmischung mit ca. 1,0 M.-% roten Farbpigments vermischt. Anschließend wurde der Pumpvorgang beendet und das Segment

zum Aushärten aufbewahrt. An der erhärteten Probe sollte der Durchmischungsprozess der Vorlaufmischung, nach dem Aufschneiden der Proben, mit der nachrückenden Betonfront visualisiert werden. Der Aufbau des Bogensegments kann Abbildung 3-21 entnommen werden.

Abbildung 3-21: Rohrbogen an Rohrweiche [Foto: Mikhalev].

4 Versuchsergebnisse

4.1 Laboruntersuchungen

4.1.1 Charakterisierung der Gesteinskörnungen für die Laboruntersuchungen

Im Folgenden wird die Korngrößenverteilung $Q_r(a_i)$ der verwendeten Gesteinskörnungen in Form von Sieblinien, die mittels fotooptischer Bildauswertung (Partikelanalysesystem CAMSIZER) bestimmt wurden gegenüber der in [DIN 1045-2] festgelegten Regelsieblinien dargestellt, siehe Abbildung 4-1.

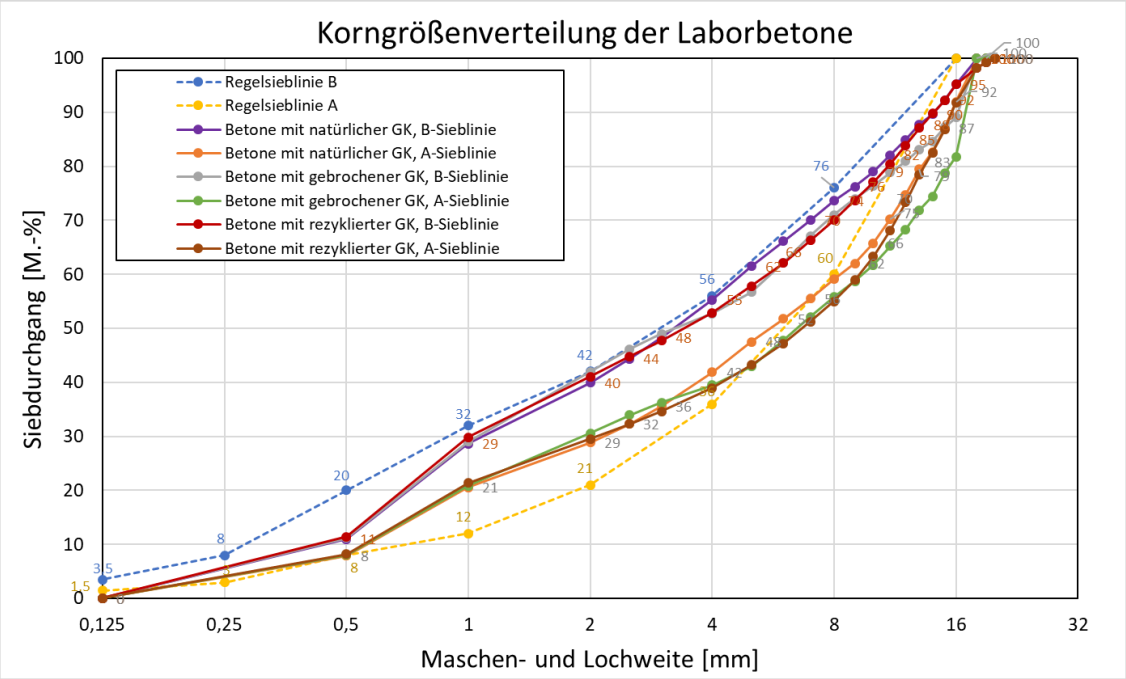


Abbildung 4-1: Gegenüberstellung der Sieblinien der Laborbetone zu den Regelsieblinien A und B gemäß DIN 1045-2.

Anhand von Abbildung 4-1 lässt sich eine gute Übereinstimmung der ausgewählten Gesteinskörnungen entsprechend ihrer massebezogenen Anteile der Kornfraktionen mit den in [DIN 1045-2] festgelegten Regelsieblinien erkennen.

Tabelle 4-1 stellt die granulometrischen Kenngrößen dar, die nach [DIN EN 1097-3] und mittels fotooptischer Bildanalyse bestimmt wurden.

4.1.2 Betonentwurf der Laborbetone

Die Tabellen 4-2 bis 4-4 stellen die Zusammensetzungen der Betone gemäß der in Tabelle 3-1 dargestellten Versuchsmatrix dar. Darüber hinaus werden ausgewählte Kenngrößen inklusive der Leimschichtdicke d_{Leim} tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 4-1: Granulometrische Kenngrößen der Gesteinskörnungen

Art der Gesteinskörnung und Sieblinie	mittlere Korndichte der Gesteins-körnung ρ_{GK}	Feststoffgehalt der losen Gesteins-schüttung ϕ_{GK}	Hohlraumgehalt $\phi_{GK,H,Schütt}$	Schüttdichte der Gesteinskörnung $\rho_{GK,Schütt}$	volumenbezogene Konzentration der Gesteinskörnung im verdichteten Zustand $\phi_{GK,max}$	relative Feststoff-konzentration der Gesteinskörnung $\phi_{GK}/\phi_{GK,max}$	Sphärizität f_{sph}	Sphärizität SPHT = $1/f_{sph}$	masse-bezogene spezifische Oberfläche $O_{GK,spez.}$
	[kg/dm³]	[-]	[-]	[kg/dm³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m²/kg]
Betone mit natürlicher GK, B-Sieblinie	2,606	0,724	0,276	1,886	0,798	0,907	0,849	1,18	2,31
Betone mit natürlicher GK, A-Sieblinie	2,598	0,724	0,276	1,881	0,794	0,912	0,848	1,18	1,77
Betone mit gebrochener GK, B-Sieblinie	2,673	0,708	0,292	1,893	0,783	0,904	0,819	1,22	2,43
Betone mit gebrochener GK, A-Sieblinie	2,678	0,717	0,283	1,921	0,798	0,899	0,815	1,23	1,86
Betone mit rezyklierter GK, Typ 2, B-Sieblinie	2,508	0,697	0,303	1,749	0,790	0,882	0,837	1,20	2,50
Betone mit rezyklierter GK, Typ 2, A-Sieblinie	2,501	0,710	0,290	1,776	0,815	0,872	0,835	1,20	1,91

Tabelle 4-2: Zusammensetzung der Laborbetone in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen.

Ausgangsstoffe	Referenz-beton	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4
Zement	383	322	353	353	353	258	306	193	230	303	342	359	406
Kalksteinmehl	-	-	-	-	-	56	67	112	133	-	-	-	-
Wasser	202	221	211	211	211	221	202	221	202	207	235	189	214
Sand 0/2	735	735	735	735	735	735	735	735	735	757	712	757	712
Kies 2/8	577	577	577	577	577	577	577	577	577	594	559	594	559
Kies 8/16	409	409	409	409	409	409	409	409	409	421	396	421	396
Splitt 2/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Splitt 8/16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rezyklierte Gesteinskörnung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fließmittel	1,15	0,97	1,06	2,12	3,17	0,77	0,92	0,58	0,69	0,91	1,03	1,08	1,22
Sieblinie	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
w/z-Wert [-]	0,53	0,69	0,6	0,6	0,6	0,86	0,66	1,14	0,88	0,69	0,69	0,53	0,53
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,3	0,3	0,3	0,6	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Leimgehalt [dm³/m³]	325	325	325	325	325	325	325	325	325	305	345	305	345
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,38	0,32	0,35	0,35	0,35	0,32	0,38	0,32	0,38	0,32	0,32	0,38	0,38
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,78	0,76	0,77	0,77	0,77	0,76	0,78	0,76	0,78	0,78	0,75	0,80	0,77
Leimschichtdicke d_{Leim} [µm] (berechnet nach Gl. 2-1)	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	13,1	28,6	13,1	28,6

Tabelle 4-3: Zusammensetzung der Laborbetone in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen (Fortsetzung von Tabelle 4-2)

Ausgangsstoffe	B5	B6	B7	B8	C1	C2	C3	C4	C7	C8
Zement	331	331	374	374	303	342	359	406	322	383
Kalksteinmehl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser	198	198	224	224	207	235	189	214	221	202
Sand 0/2	757	757	712	712	541	509	541	509	525	525
Kies 2/8	594	594	559	559	524	493	524	493	509	509
Kies 8/16	421	421	396	396	702	660	702	660	681	681
Splitt 2/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Splitt 8/16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rezyklierte Gesteinskörnung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fließmittel	0,99	1,99	1,12	2,25	0,91	1,03	1,08	1,22	0,97	1,15
Sieblinie	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
w/z-Wert [-]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,69	0,69	0,53	0,53	0,69	0,53
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Leimgehalt [dm³/m³]	305	305	345	345	305	345	305	345	325	325
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,32	0,32	0,38	0,38	0,32	0,38
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,79	0,79	0,76	0,76	0,78	0,75	0,80	0,77	0,76	0,78
Leimschichtdicke d_{Leim} [µm] (berechnet nach Gl. 2-1)	13,1	13,1	28,6	28,6	16,9	36,7	16,9	36,7	26,7	26,7

Tabelle 4-4: Zusammensetzung der Laborbetone in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen (Fortsetzung von Tabelle 4-3)

Ausgangsstoffe	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Zement	322	383	322	383	322	383	322	383
Kalksteinmehl	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser	221	202	221	202	221	202	221	202
Sand 0/2	735	735	525	525	735	735	525	525
Kies 2/8	-	-	-	-	322	322	254	254
Kies 8/16	-	-	-	-	153	153	426	426
Splitt 2/8	604	604	533	533	-	-	-	-
Splitt 8/16	426	426	710	710	-	-	-	-
Rezyklierte Gesteinskörnung	-	-	-	-	446	446	446	446
Fließmittel	0,97	1,15	0,97	1,15	0,97	1,15	0,97	1,15
Sieblinie	B	B	A	A	B	B	A	A
w/z-Wert [-]	0,69	0,53	0,69	0,53	0,69	0,53	0,69	0,53
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Leimgehalt [dm³/m³]	325	325	325	325	325	325	325	325
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,32	0,38	0,32	0,38	0,32	0,38	0,32	0,38
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,76	0,78	0,76	0,78	0,76	0,78	0,76	0,78
Leimschichtdicke d_{Leim} [µm] (berechnet nach Gl. 2-1)	16,0	16,0	24,9	24,9	13,0	13,0	22,0	22,0

Die Ergebnisse der Frischbetoncharakterisierung werden in Tabelle 4-5 dargestellt. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte aus drei Messungen. Es kann beobachtet werden, dass der Betonwurf sämtliche der für die Baupraxis relevanten Konsistenzklassen abdeckt.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Frischbetoncharakterisierung im Labor als Mittelwert von drei Messungen.

Bezeichnung des Betons	Ausbreitmaß [mm]	Konsistenzklasse [-]	Frischbeton-rohdichte [kg/dm³]	Luftporen-gehalt [Vol.-%]	Frischbeton-temperatur [°C]
Referenzbeton	467	F3	2,40	0,9	18,6
A1	603	F5	2,37	0,8	18
A2	572	F5	2,35	0,8	18,2
A3	607	F5	2,36	0,8	17,5
A4	750	F6	2,34	0,4	18,5
A5	573	F5	2,31	0,9	18,3
A6	445	F3	2,28	1,4	17,3
A7	582	F5	2,27	0,5	16,6
A8	472	F3	2,37	1,2	15,3
B1	493	F4	2,34	1,1	19,2
B2	653	F6	2,32	0,8	17,6
B3	450	F3	2,37	1,2	18,6
B4	507	F4	2,38	1,0	17,7
B5	473	F3	2,34	1,3	19,4
B6	563	F5	2,34	1,1	17,5
B7	733	F6	2,32	0,6	15,7
B8	762	F6	2,30	0,4	17,8
C1	588	F5	2,34	0,6	17,8
C2	730	F6	2,30	0,4	18,1
C3	443	F3	2,40	0,9	18,1
C4	612	F5	2,37	0,5	17,2
C7	628	F6	2,35	0,6	17,7
C8	508	F4	2,38	0,6	18,8
C9	567	F5	2,37	0,6	18,3
C10	418	F3	2,41	0,7	18,8
C11	602	F5	2,39	0,2	18,3
C12	502	F4	2,41	0,4	19,3
C13	483	F4	2,25	1,2	16,5
C14	320	F1	2,31	2,0	16,7
C15	552	F4	2,30	1,3	15,6
C16	418	F3	2,28	1,1	15,3

In Tabelle 4-6 werden die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen vorgestellt. Dargestellt sind die Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität μ als Mittelwert aus drei Messungen. Zusätzlich ist die Standardabweichung angegeben.

In Anbetracht der Versuchsergebnisse kann beobachtet werden, dass ein breites Spektrum an rheologischen Eigenschaften durch den Betonentwurf abgedeckt ist. Darüber hinaus können größere Streuungen innerhalb der Messserie unter der Berücksichtigung der angegebenen Standardabweichungen, beobachtet werden. Die Streuungen sind auf die zum Teil erhöhte Entmischungsneigung der Betone zurückzuführen, die eine exakte Messung rheologischer Eigenschaften naturgemäß erschwert.

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Frischbetoncharakterisierung als Mittelwert von drei Messungen.

Bezeichnung des Betons	Fließgrenze τ_0		plastische Viskosität μ	
	[Pa]	Standardabw.	[Pa·s]	Standardabw.
Referenzbeton	280,4	6,8	43,2	9,4
A1	94,7	10,7	27,1	3,2
A2	117,4	11,7	31,4	5,4
A3	81,9	10,8	30,8	6,0
A4	95,2	16,7	18,4	4,1
A5	86,0	7,7	31,8	0,8
A6	235,2	29,6	49,1	4,4
A7	84,3	20,0	31,4	1,7
A8	258,4	51,6	50,7	8,8
B1	88,5	22,7	37,5	6,8
B2	57,2	8,4	18,9	2,3
B3	797,4	123,1	42,1	16,6
B4	104,1	18,0	33,0	2,2
B5	112,5	19,7	37,4	3,3
B6	99,1	8,2	31,7	6,4
B7	49,8	6,1	22,3	3,0
B8	72,0	11,2	14,9	3,1
C1	90,0	26,9	25,1	5,9
C2	120,2	24,4	7,8	1,7
C3	180,0	47,1	37,5	4,7
C4	70,5	7,4	24,1	4,3
C7	105,0	8,7	14,6	0,9
C8	117,2	10,4	31,9	6,1
C9	96,4	10,4	32,2	5,3
C10	178,1	16,1	47,7	3,8
C11	140,6	15,3	21,1	1,0
C12	141,2	15,6	37,0	12,6
C13	103,2	28,0	29,8	1,3
C14	525,8	116,8	53,5	12,0
C15	98,0	47,0	31,0	8,1
C16	249,3	56,3	60,1	7,1

In Tabelle 4-7 sind die Ergebnisse der Filtrationsversuche und der Sedimentationsversuche aufgeführt. Dargestellt sind die Filtrationsrate $\dot{V}_{\mathrm{FW}}$ als Mittelwert aus mindestens zwei, vorzugsweise drei Messungen sowie die Standardabweichung (Ausreißer wurden entfernt) und die Sedimentationsrate $\dot{S}$, die an drei Sedimentationsrohren unter Variation der Rütteldauer gemessen wurde.

Tabelle 4-7: Ergebnisse der Filtrations- und Sedimentationsversuche.

Bezeichnung des Betons	Filtrationsrate $\dot{V}_{\mathrm{FW}}$		Sedimentationsrate $\dot{S}$
	[cm³/√s]	Standardabw.	[Vol.-%/s]
Referenzbeton	19,1	1,5	0,18
A1	29,5	1,2	1,19
A2	25,2	1,0	0,94
A3	19,7	0,5	1,11
A4	11,4	1,4	1,65
A5	30,3	3,4	1,30
A6	21,1	0,6	0,38
A7	30,1	4,9	1,13
A8	18,9	1,8	0,44
B1	22,1	0,9	0,31
B2	31,3	3,5	1,31
B3	9,0	0,9	0,41

B4	28,0	0,8	0,56
B5	12,7	1,7	0,34
B6	8,8	1,1	1,02
B7	20,9	0,5	1,38
B8	11,9	2,0	1,58
C1	21,4	4,2	1,25
C2	33,8	0,6	1,76
C3	17,4	2,0	0,54
C4	25,3	1,2	1,59
C7	39,6	1,1	1,97
C8	24,0	2,5	0,68
C9	26,3	0,7	1,18
C10	18,0	0,2	0,38
C11	34,7	0,4	1,61
C12	19,1	3,5	1,04
C13	12,4	0,9	0,62
C14	8,1	0,3	0,17
C15	21,5	4,5	1,45
C16	14,6	1,1	0,32

Im Folgenden werden die zuvor tabellarisch aufgeführten Werte grafisch dargestellt und diskutiert. Dazu werden die Messwerte ausgewählten Kenngrößen der Zusammensetzung gegenübergestellt.

Anhand von Abbildung 4-2 (a) ist zu erkennen, dass die Fließfähigkeit (Ausbreitmaß) mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} linear sinkt, da der Partikelabstand im Zementleimgefüge abnimmt und direkte Kontaktwechselwirkungen sowie interpartikuläre Wechselwirkungen gegenüber hydrodynamischen Wechselwirkungen dominieren.

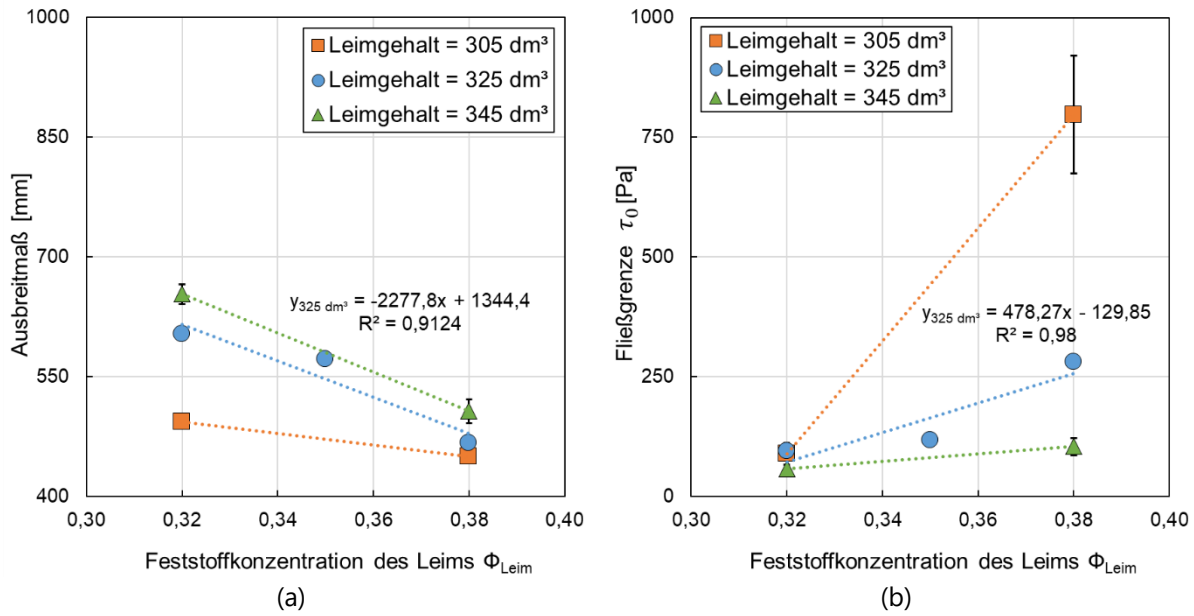
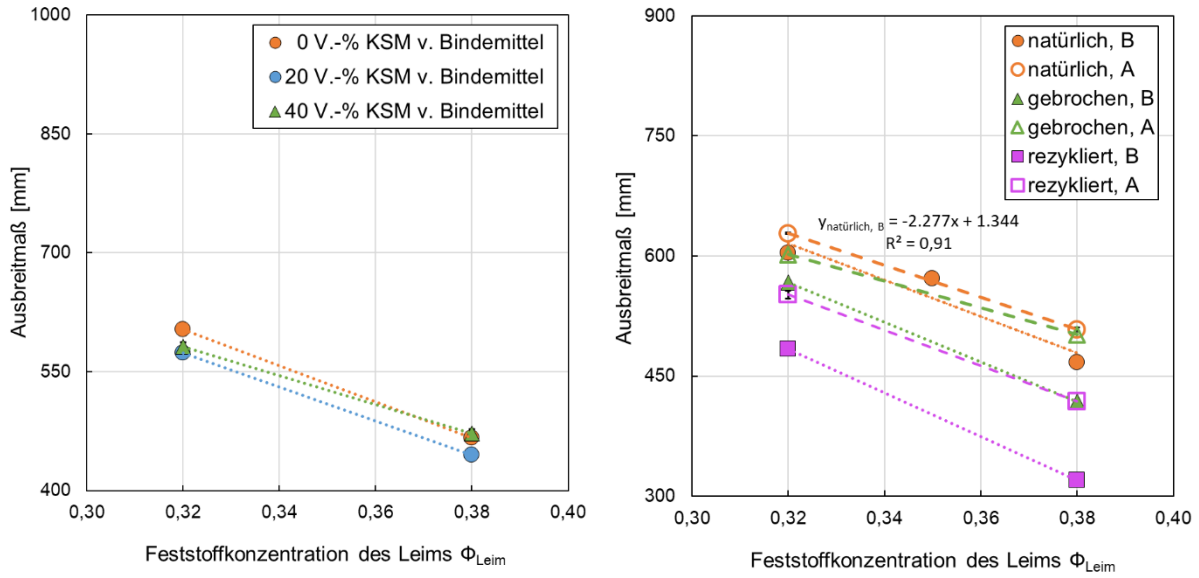


Abbildung 4-2: Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims auf das Ausbreitmaß (a) und auf die Fließgrenze (b) bei variierendem Leimgehalt.

Dadurch nimmt die Fließgrenze τ_0 mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} zu (vgl. Abbildung 4-2, (b)). Gleichzeitig sinkt die Fließfähigkeit mit abnehmendem Leimgehalt V_{Leim}, da die Leimschichtdicke d_{Leim} kleiner ist. Dies wirkt sich auch auf die Fließgrenze τ_0 aus,

die mit sinkendem Leimgehalt V_{Leim} umso größer ist, da direkte Kontaktwechselwirkungen der Gesteinspartikel größer sind. Der Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} auf die Fließgrenze τ_0 ist umso größer, je geringer der Leimgehalt V_{Leim} ist, da das Eigenschaftsbild des Betons stärker durch das Eigenschaftsbild des Leims beeinflusst wird. Anhand von Abbildung 4-3 (a) kann hingegen beobachtet werden, dass ein Einfluss durch die Zugabe von KSM marginal ist.



(a) (b)

Abbildung 4-3: Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims auf das Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Zugabemenge an KSM (a) und der Granulometrie der Gesteinskörnung (b).

Tendenziell nimmt die Fließfähigkeit mit steigendem Gehalt an KSM ab, was wohl auf einen leicht erhöhten Wasseranspruch des KSM gegenüber dem verwendeten Zement in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche zurückzuführen ist.

In Abbildung 4-3 (b) wird das Ausbreitmaß der Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} bei variierender Granulometrie der Gesteinskörnung gegenübergestellt. Es kann beobachtet werden, dass die Fließfähigkeit einer A-Sieblinie im Gegensatz zu einer B-Sieblinie bei gleichem Leimgehalt (325 dm^3/m^3) höher ist, was auf die verbesserte max. mögliche Packungsdichte der Gesteinskörnung zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 4-1). Entsprechend ist auch die Fließfähigkeit der Mischungen mit gebrochener Gesteinskörnung gegenüber der natürlichen Gesteinskörnung geringer. Vergleichbar macht sich der Einfluss der Packungsdiche unter der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung bemerkbar. Verstärkt wird der Rückgang in der Fließfähigkeit zusätzlich durch den höheren Wasseranspruch der rezyklierten Gesteinskörnung, infolge des offenporigen Gefüges der Gesteinspartikel.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Fließfähigkeit mit steigendem Fließmittelgehalt bei konstantem Wassergehalt erwartungsgemäß steigt (vgl. Abbildung 4-4, a), da der sterische Effekt der Fließmittelpolymere eine Dispergierung der Zementpartikel bewirkt. Dadurch erhöht sich bei gleichem Wassergehalt die Wasserfilmdicke d_{Wasser} und hydrodynamische Wechselwirkungen dominieren gegenüber direkten Kontaktwechselwirkungen und interpartikulären Wechselwirkungen, was die Fließgrenze τ_0 verringert (vgl. Abbildung 4-4, b). Der Anstieg der Fließgrenze mit steigendem Fließmittelgehalt bei einem Leimgehalt von 345 dm^3/m^3 lässt sich durch die erhöhte Entmischungsneigung des Betons erklären, was die Genauigkeit einer rheologischen Messung verringert.

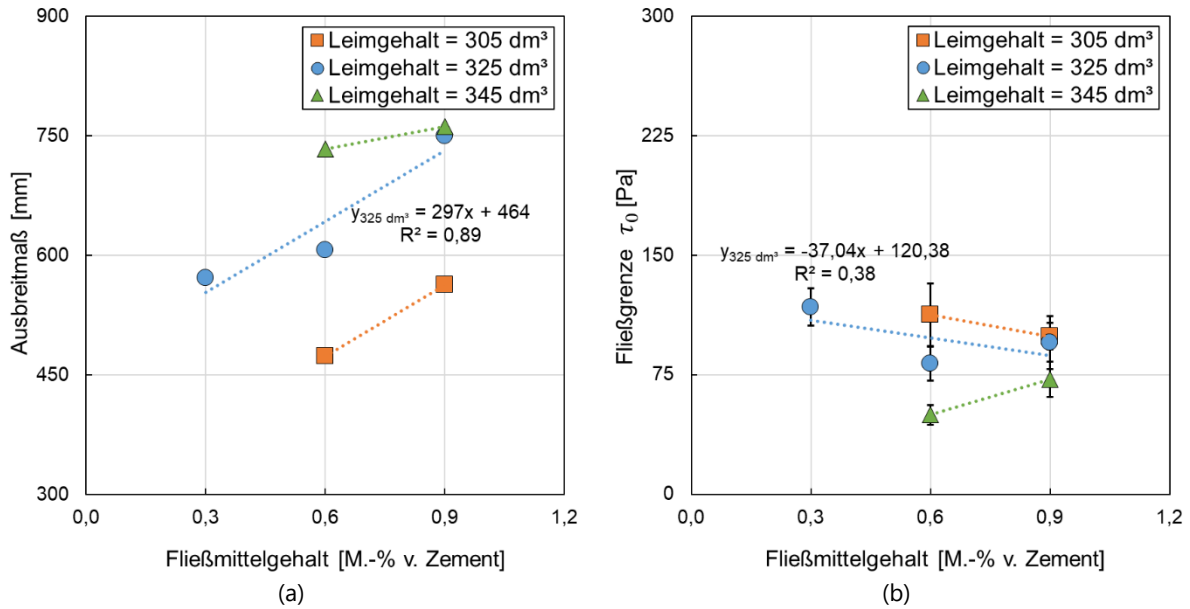


Abbildung 4-4: Einfluss des Fließmittelgehalts auf das Ausbreitmaß (a) und auf die Fließgrenze (b) bei variierendem Leimgehalt.

Um das rheologische Eigenschaftsbild zu komplettieren, werden im Folgenden die Einflüsse auf die plastische Viskosität des Betons μ_{Beton} grafisch dargestellt, siehe Abbildung 4-5.

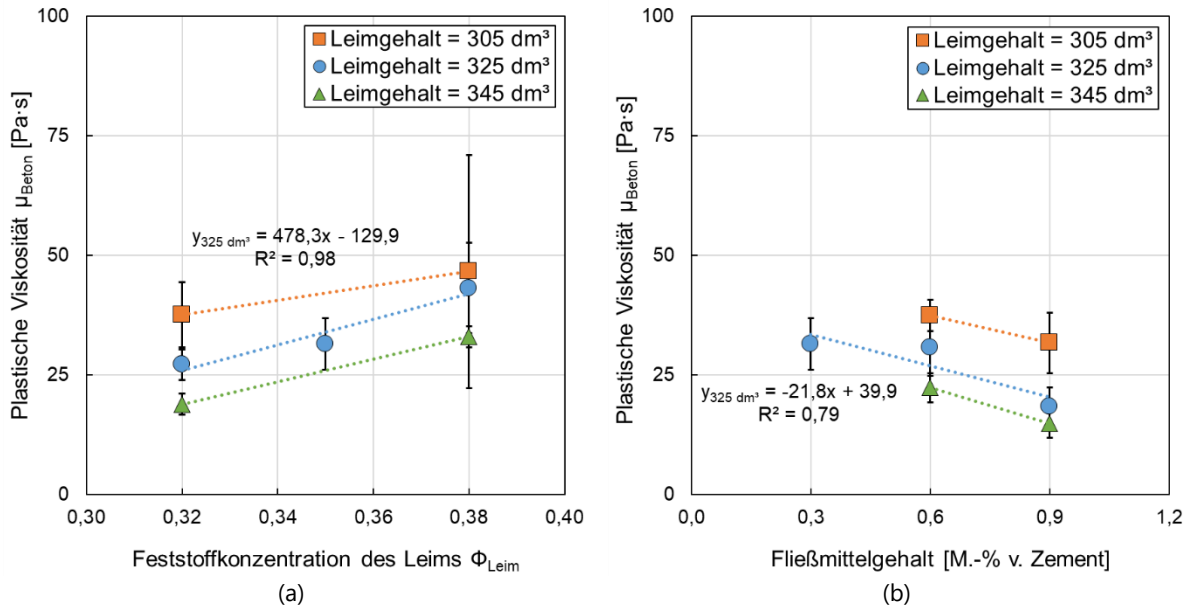


Abbildung 4-5: Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims (a) und des Fließmittelgehalts (b) auf die plastische Viskosität des Betons bei variierendem Leimgehalt.

Es ist zu erkennen, dass die plastische Viskosität des Betons μ_{Beton} mit höherer Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim}, mit geringerem Fließmittelgehalt und mit geringerem Leimgehalt V_{Leim} linear steigt.

Zuletzt kann Abbildung 4-6 entnommen werden, dass ein geringer Einfluss des Kalksteinmehlgehalts auf die plastische Viskosität des Betons μ_{Beton} zu erkennen ist. Die plastische Viskosität des Betons μ_{Beton} steigt durch höhere Austauschgehalte an KSM an.

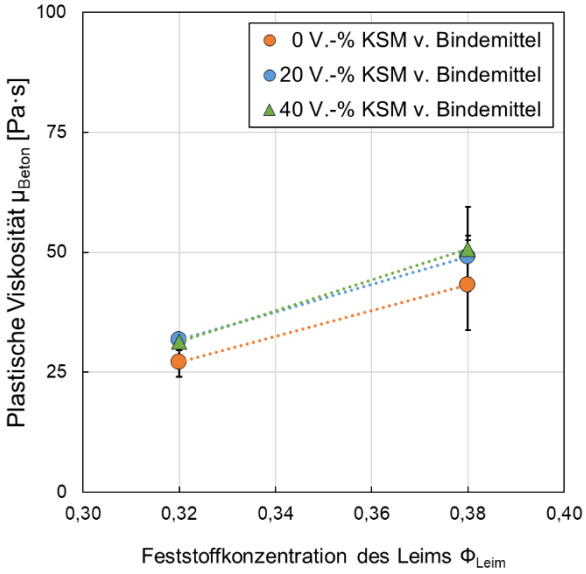


Abbildung 4-6: Einfluss des Kalksteinmehlgehalts auf die plastische Viskosität des Betons in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration des Leims.

Im Folgenden werden die Einflüsse der Betonzusammensetzung auf die Entmischungsneigung (Filtrationsrate $\dot{V}_{\mathrm{FW}}$ und Sedimentationsrate $\dot{S}$) grafisch dargestellt und diskutiert. Zunächst werden die Einflüsse der Zusammensetzung auf das Filtrationsverhalten dargestellt, siehe Abbildung 4-7.

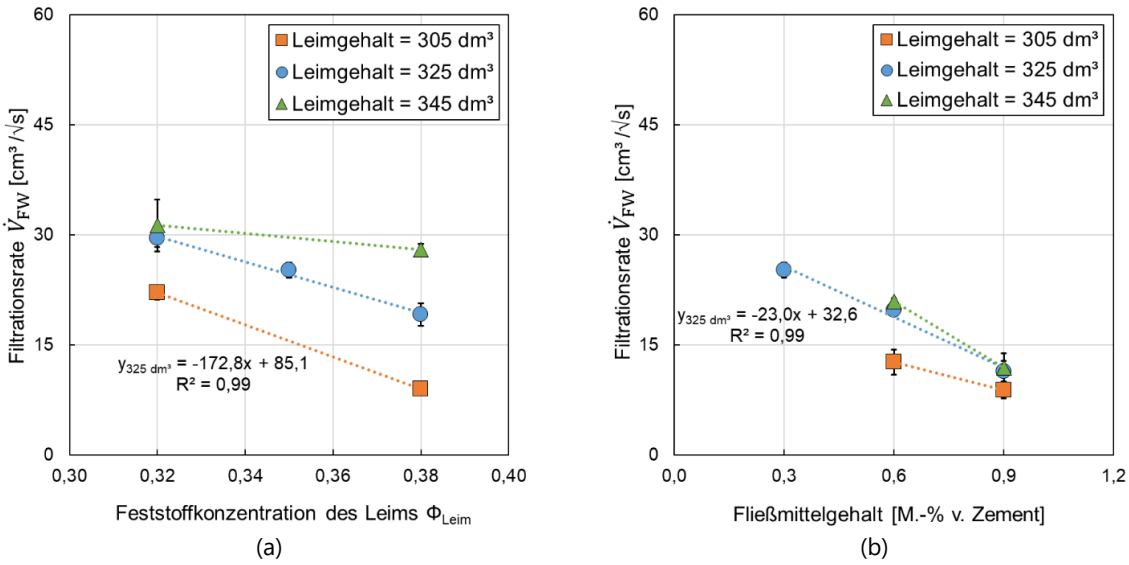


Abbildung 4-7: Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims (a) und des Fließmittelgehalts (b) auf die Filtrationsrate bei variierendem Leimgehalt.

In Abbildung 4-7 wird der Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} (a) und des Fließmittelgehalts (b) auf die Filtrationsrate $\dot{V}_{\mathrm{FW}}$ bei variierendem Leimgehalt dargestellt. Es kann beobachtet werden, dass die Filtrationsrate $\dot{V}_{\mathrm{FW}}$ mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} linear sinkt (vgl. Abbildung 4-7, a). Diese Beobachtung wird dadurch begründet, dass mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} der Partikelabstand bzw. die Wasserfilmdicke d_{Wasser} abnimmt, wodurch der Widerstand des Betons gegenüber einer Entwässerung steigt. Demnach wird ein größerer Anteil an Energie durch Reibung dissipiert,

was die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ verringert. Darüber hinaus ist die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ umso kleiner, je geringer der Leimgehalt V_{Leim} im Beton ist. Dies wird dadurch begründet, dass das Leimgefüge das Anmachwasser beinhaltet und die absolute Menge des Anmachwassers mit höherem Leimgehalt V_{Leim} steigt.

Weiterhin kann beobachtet werden, dass die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ mit steigendem Fließmittelgehalt sinkt. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die dynamische Viskosität η des Filtrats mit steigendem Fließmittelgehalt (bei konstantem Wassergehalt) steigt, was den Widerstand des Betons gegenüber der einwirkenden Druckkraft erhöht. Der Anstieg der dynamische Viskosität η des Filtrats infolge der Erhöhung des Fließmittelgehalts konnte durch Untersuchungen von [Kaliske – 2022] experimentell nachgewiesen werden. Beide zuvor genannten Beobachtungen decken sich gut mit den physikalischen Grundlagen zur Filtration aus der Verfahrenstechnik.

Der Einfluss des Kalksteinmehlgehalts und der Granulometrie der Gesteinskörnung auf das Filtrationsverhalten von Beton wird in Abbildung 4-8 graphisch dargestellt.

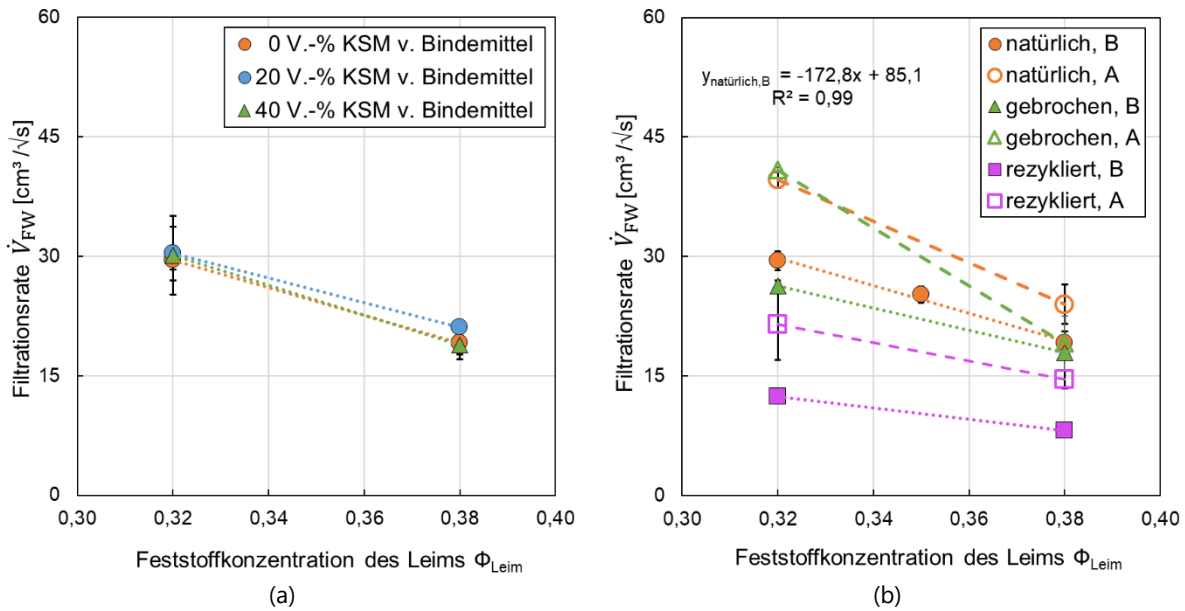


Abbildung 4-8: Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Filtrationsrate bei variierendem Kalksteinmehlgehalt (a) und der Granulometrie der Gesteinskörnung (b).

Abbildung 4-8 (a) zeigt, dass kein Einfluss des Kalksteinmehlgehalts auf die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ erkannt werden kann.

Der Einfluss der Granulometrie auf die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ ist hingegen deutlich ausgeprägt (Abbildung 4-8, b). Es kann beobachtet werden, dass mit steigendem Wasseranspruch der Gesteinskörnung (in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche und ggf. des Porensystems) die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ sinkt (vgl. granulometrische Kenngrößen in Tabelle 4-5). Infolge des erhöhten Wasseranspruchs wird eine größere Wassermenge physikalisch an der Oberfläche der Gesteinskörnung sowie im Porengefüge gebunden, wodurch sich die in-situ Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} erhöht. Dadurch sinkt bei gleichem Leimgehalt die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ (vgl. Abbildung 4-7, a).

Im Folgenden werden die Ergebnisse zum Sedimentationsverhalten grafisch dargestellt und diskutiert. In Abbildung 4-9 (a) ist eine Gegenüberstellung der Sedimentationsrate $\dot{S}$ und der Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} in Abhängigkeit vom Leimgehalt V_{Leim} dargestellt.

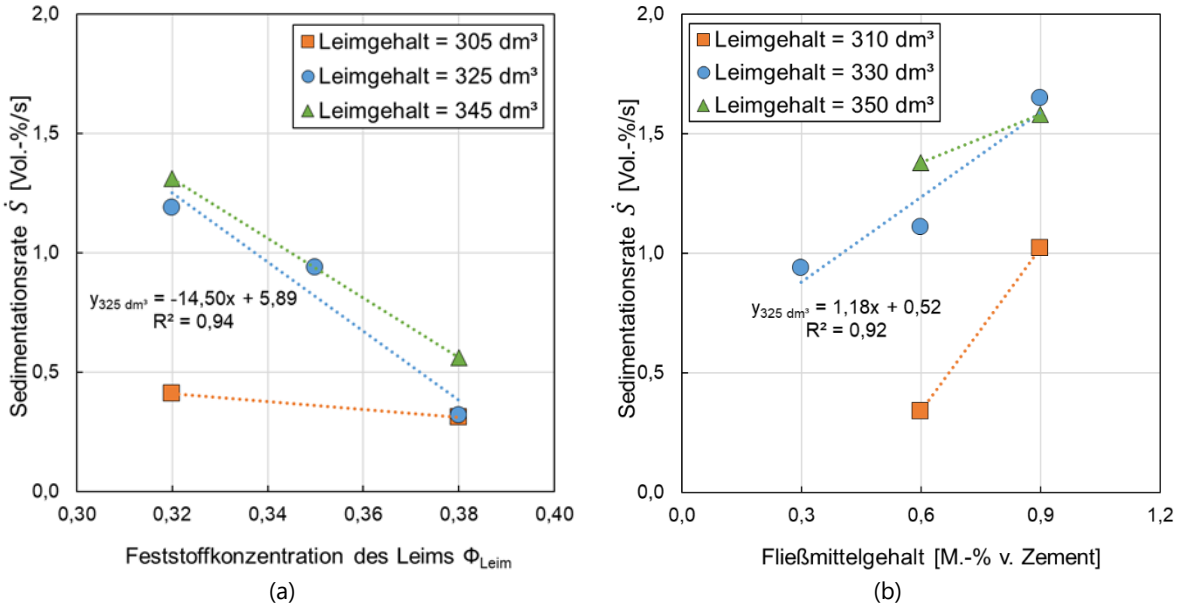


Abbildung 4-9: Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims (a) und des Fließmittelgehalts (b) auf die Sedimentationsrate bei variierendem Leimgehalt.

Es kann beobachtet werden, dass die Sedimentationsrate $\dot{S}$ mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} sinkt, was auf den geringeren Partikelabstand im Zementleim und die dadurch steigende plastische Viskosität des Leims μ_{Leim} zurückzuführen ist, die allerdings nicht direkt gemessen wurde. Ein Hinweis darauf gibt aber Abbildung 4-9 (a). Darüber hinaus sinkt die Sedimentationsrate $\dot{S}$ mit geringerem Leimgehalt V_{Leim}. Begründet wird dies durch die höhere Feststoffkonzentration der Gesteinskörnung im Betongefüge. Da der Leim während der Sedimentation das Korngerüst der Gesteinspartikel durchströmt, steigt der Widerstand mit steigender Feststoffkonzentration der Gesteinskörnung, da der Partikelabstand bzw. die Leimschichtdicke d_{Leim} kleiner wird.

Daneben ist die Sedimentationsrate $\dot{S}$ umso größer, je höher der Fließmittelgehalt ist, was auch auf die plastische Viskosität des Leims μ_{Leim} zurückzuführen ist, die mit steigendem Fließmittelgehalt und gleicher Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} umso geringer ist (Abbildung 4-5, b). Es konnte hingegen kein nennenswerter Einfluss des Kalksteinmehlgehalts auf die Sedimentationsrate $\dot{S}$ beobachtet werden, siehe Abbildung 4-10 (a).

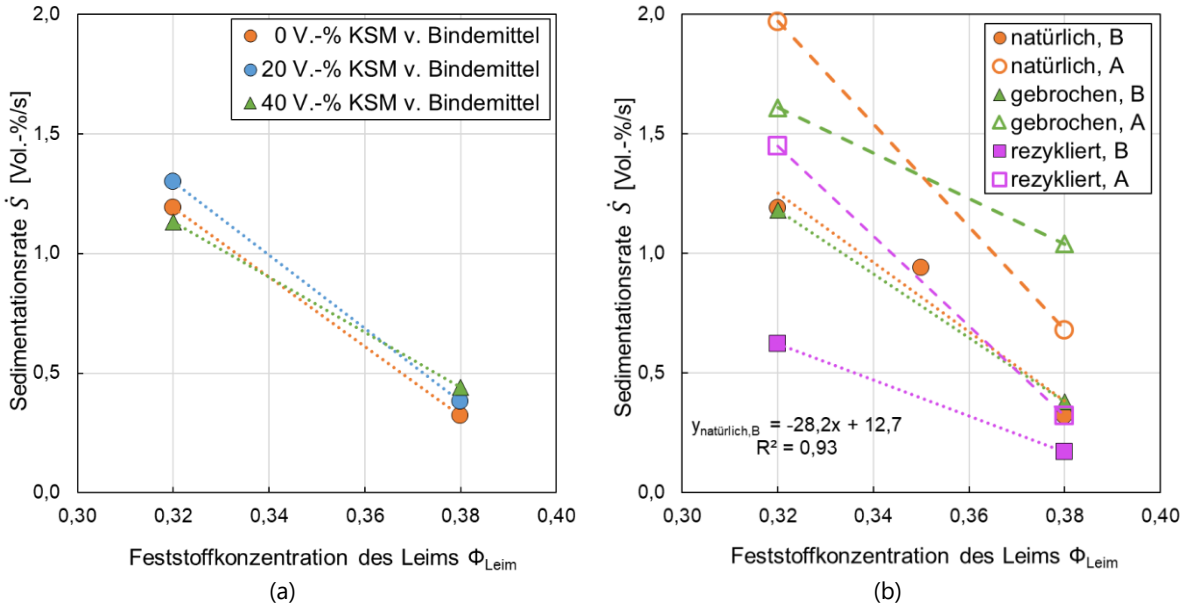


Abbildung 4-10: Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Sedimentationsrate bei variierendem Kalksteinmehlgehalt (a) und der Granulometrie der Gesteinskörnung (b).

Abbildung 4-10 (b) zeigt den Einfluss der Granulometrie der Gesteinskörnung auf die Sedimentationsrate $\dot{S}$. Die Sedimentationsrate $\dot{S}$ ist bei einer A-Sieblinie gegenüber einer B-Sieblinie höher, was bei gleichem Leimgehalt V_{Leim} mit der höheren Leimschichtdicke d_{Leim} begründet werden kann, da die Gesamtoberfläche O_{GK} mit geringerer spezifischen Oberfläche $O_{GK,spez.}$ sinkt. Der gleiche Zusammenhang lässt sich hinsichtlich der Gesteinskörnungsart erkennen. Demnach zeigt die rezyklierte Gesteinskörnung und das gebrochene Korn gegenüber der natürlichen Gesteinskörung eine geringere Sedimentationsrate $\dot{S}$. Einzig die A-Sieblinie mit gebrochenem Korn zeigt nicht diese Tendenz, was mit Packungsdichteeffekten der Gesteinskörung zu tun haben kann (vgl. Tabelle 4-1, $\phi_{GK}/\phi_{GK,max}$).

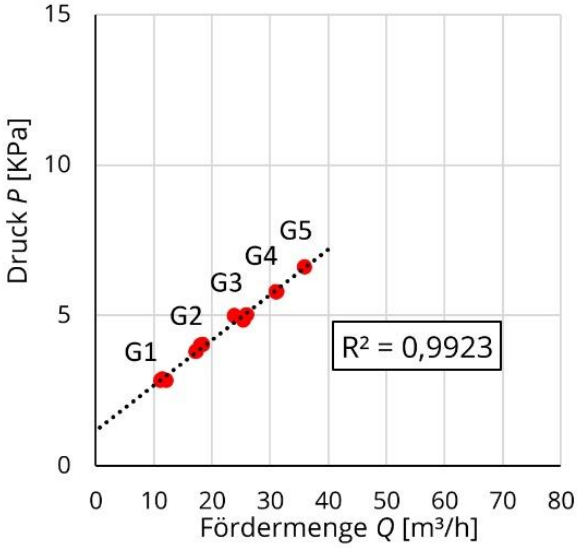
4.1.3 Optimierung des Gleitrohr-Rheometers

Als eine mögliche Ursache für Abweichungen der Sliper-Vorhersagen, sowohl zu den gemessenen Druckwerten in der Förderleitung als auch zwischen zwei parallel betriebenen Geräten, wurde die Konsistenz der untersuchten Mischungen betrachtet. Die bisherigen Erfahrungen der Forschungsgruppe zeigen, dass sich die Beschaffenheit von unter Laborbedingungen hergestellten Mischungen für die Arbeit mit dem Gleitrohr-Rheometer besser eignet als die von den Betonproben aus einem Fahrmischer. Bei Messungen im Feld kam es wiederholt zum Eindringen der Gleitschicht zwischen die Elemente des Sliper-Gerätes, da die Betone auf den Baustellen eher zum Entmischen neigten. Die in Wasser schwebende feine Körnung entwich zwischen dem Gleitrohr und der Gummidichtung. Die zurückgebliebenen feinen Partikelrückstände verhinderten das ungehinderte Gleiten des Rohres und verfälschten die Messdaten. In Abbildung 4-11 (a) ist der Verlust von Leim bei der Prüfung mit dem ursprünglichen Dichtungssystem des Gleitrohr-Rheometers deutlich zu erkennen. Um verwertbare Ergebnisse auch für entmischungsintensive Betone gewinnen zu können, musste eine neue Dichtungslösung entwickelt werden. Unter Verwendung von Lippendichtringen DN125, siehe Abbildung 4-11 (b), die gewöhnlich beim Verbau von KG-Rohren zum Einsatz kommen und Teflonband mit einer Dicke von 0,1 mm, wurde eine Lösung gefunden, die das Gleiten des Kunststoffrohres nicht verhinderte und den Zementleim im Gleitrohr halten konnte. Eine erfolgreiche Messung zeichnet sich dadurch aus, dass der

gemessene Druck und die Fördergeschwindigkeit möglichst linear korrelieren, siehe Abbildung 4-11 (c). Mit den getroffenen Maßnahmen konnte eine signifikante Verbesserung der Reproduzierbarkeit von Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer erreicht werden. Das neue Dichtungssystem erweiterte die Grenzen der mit dem Sliper messbaren Betone deutlich. Fast alle Mischungen der Messreihen konnten mit einem Sliper mit optimiertem Dichtsystem untersucht werden, ohne signifikant Leim zu verlieren, siehe Abbildung 4-11 (d).

(a)

(b)



(c)

(d)

Abb. 4-11: Optimierung des Sliper-Gerätes: (a) Zementleimverlust am originalen Dichtungsring, (b) Dichtungssystem mit Teflonband und Lippendichtring für KG-Rohre, (c) hohe Linearität der Regressionsgeraden im P-Q-Diagramm, (d) kein nennenswerter Zementleimverlust mit optimiertem Dichtungssystem [Mikhalev – 2021].

Ein zusätzliches Problem bei der Prognose des Förderdrucks stellte die Sedimentationsneigung einzelner Proben dar. Zur weiteren Verbesserung der Messmethode wurde daher eine maximale Anzahl für gültige Testhübe ermittelt. Stark sedimentierende Mischungen führen

dazu, dass bereits nach wenigen Hüben nicht mehr 0,5 m homogene Betonsäule vorliegt, was eine Voraussetzung für die Aussagekraft der Messungen darstellt. Messwerte bei denen der Druck, am P-Q-Diagramm der Sliper-Analyse bei höherem Testgewicht und damit einhergehend höherer Gleitgeschwindigkeit, nicht ansteigt sollten daher aus der Ermittlung der Förderdruckprognose ausgeschlossen werden. Aus den vorliegenden Erkenntnissen wird empfohlen, den ersten Testhub nicht in die Auswertung aufzunehmen und darauf folgend maximal neun Hübe für die Förderdruckprognose zu verwenden. Die Abweichung zwischen zwei parallel betriebenen Sliper-Geräten unter Labor-Bedingungen lag bei ca. 7 %.

4.2 Technikum-Pumpversuche

Für die Technikum-Pumpversuche wurden die Betone in einem Transportbetonwerk (TB-Werk) hergestellt. Das TB-Werk lag in unmittelbarer Nähe zum Ort der Versuchsdurchführung, um sicherzustellen, dass der zeitliche Einfluss aus dem Ansteifverhalten der Betone so gering wie möglich war. Exemplarische Laboruntersuchungen wurden vorab durchgeführt, um zu gewährleisten, dass unter der Verwendung der im TB-Werk verfügbaren Ausgangsstoffe, die gleiche Konsistenz wie für die Laborbetone erreicht wurde. Dazu wurden leichte Anpassungen im Wassergehalt (Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim}) gegenüber den Laborbetonen vorgenommen. Der Wassergehalt wurde für die Betone der Technikum-Pumpversuche leicht verringert (Variationsbereich ϕ_{Leim} im Labor: 0,32 – 0,38; Variationsbereich ϕ_{Leim} im Technikum: 0,34 – 0,40).

In Anbetracht der im Folgenden vorgestellten Zusammenhänge gilt es grundsätzlich zu beachten, dass es aufgrund der Genauigkeit bei der Herstellung von Beton im TB-Werk zu Schwankungen in der IST-Zusammensetzung gekommen ist. Sämtliche Ergebnisse bauen auf diese Weise auf Praxisbedingungen auf, was eine Praxistauglichkeit der angewandten Methoden und Konzepte verifiziert. Vor allem die Probenentnahme erschwerte eine gleichmäßige und genaue Charakterisierung der betrachteten Betone. Die Probenentnahme erfolgte direkt nach Anlieferung des Betons am Versuchsort aus der Schurre des Transportbetonfahrzeugs. Die für sämtliche Untersuchungen benötigte Betonmenge wurde in zwei Schubkarren aufgeteilt. Aus der mit Frischbeton gefüllten Schubkarren erfolgte die Probenentnahme für die Durchführung der einzelnen Prüfungen. Da besonders weiche Betone verwendet wurden, konnte eine Entmischung des Betons bereits in der Schubkarre nicht ausgeschlossen werden. Insbesondere aus diesem Grund waren Schwankungen in den Messergebnissen sehr wahrscheinlich. Deshalb werden die Ergebnisse und die davon abgeleiteten Erkenntnisse mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen abgeglichen, um eine Fehlinterpretation auszuschließen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Charakterisierung der Gesteinskörnungen für die Technikum-Pumpversuche sowie der Betonentwurf (IST-Betonzusammensetzungen) vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der Technikum-Pumpversuche in Abhängigkeit der drei verwendeten Pumpleitungen.

4.2.1 Charakterisierung der Gesteinskörnungen für die Technikum-Pumpversuche

Im Folgenden wird die Korngrößenverteilung $Q_r(a_i)$ der verwendeten Gesteinskörnungen in Form von Sieblinien dargestellt, die mittels fotooptischer Bildauswertung (Partikelanalysesystem CAMSIZER) bestimmt wurden. Aus Abbildung 4-12 lässt sich erkennen, dass die im TB-Werk zur Verfügung gestandenen Gesteinskörnungen entsprechend ihrer massebezogenen Anteile der Kornfraktionen im Vergleich zu den in [DIN 1045-2] festgelegten Regelsieblinien deutliche Abweichungen im unteren Kornband aufweisen.

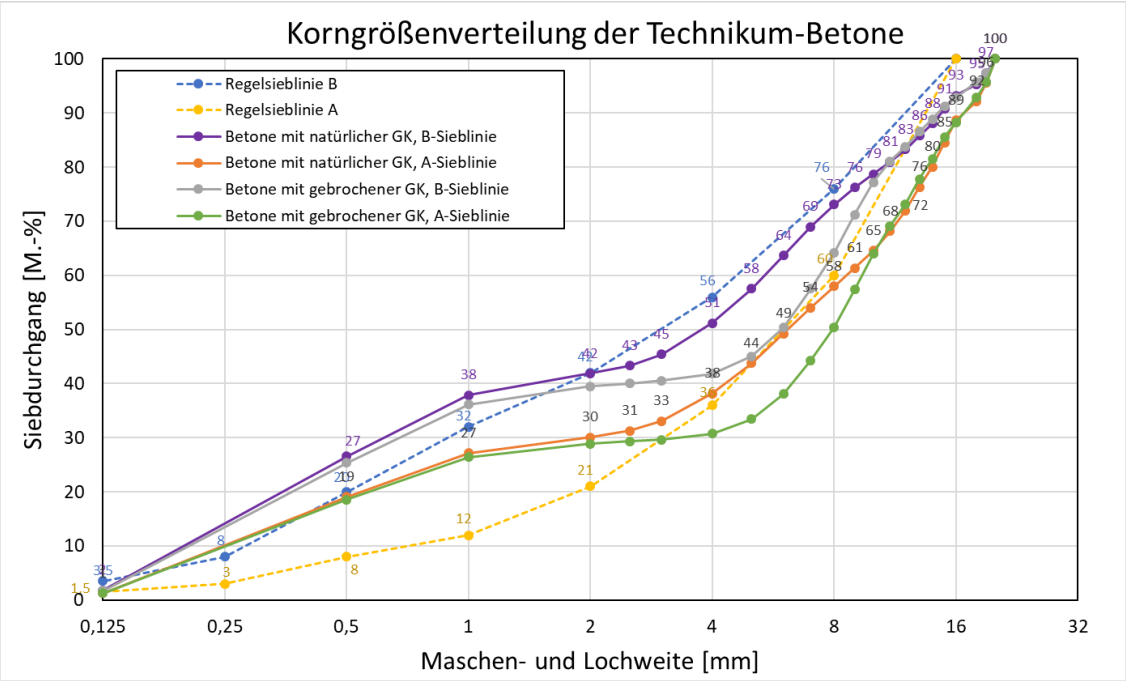


Abb. 4-12: Gegenüberstellung der Sieblinien der Technikum-Betone und der Regelsieblinien A und B, gemäß DIN 1045-2.

Es wird deutlich, dass der Anteil der Kornfraktionen zwischen den Maschen- und Lochweiten 1 bis 4 mm unterrepräsentiert sind, was sowohl für die natürliche als auch für die gebrochene Gesteinskörnung gilt. Hinsichtlich des auf die Sedimentation bzw. Leimabsonderung günstig wirkenden Stützeffektes, stellt dies eine unvorteilhafte Korngrößenverteilung dar.

In Tabelle 4-8 werden die granulometrischen Kenngrößen dargestellt, die nach [DIN EN 1097] und mittels fotooptischer Bildanalyse bestimmt wurden.

Tabelle 4-8: Granulometrische Kenngrößen der Gesteinskörnungen zur Konzipierung der Technikum-Betone

Art der Gesteinskörnung und Sieblinie	mittlere Korndichte der Gesteins-körnung ρ_{GK}	Feststoffgehalt der losen Gesteins-schüttung ϕ_{GK}	Hohlraumgehalt $\phi_{GK,H,Schütt}$	Schüttdichte der Gesteinskörnung $\rho_{GK,Schütt}$	volumenbezogene Konzentration der Gesteinskörnung im verdichteten Zustand $\phi_{GK,max}$	relative Feststoff-konzentration der Gesteinskörnung $\phi_{GK}/\phi_{GK,max}$	Sphärizität		masse-bezogene spezifische Oberfläche $O_{GK,spez.}$
							f_{sph}	SPHT = $1/ f_{sph}$	
	[kg/dm³]	[-]	[-]	[kg/dm³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m²/kg]
Betone mit natürlicher GK, B-Sieblinie	2,594	0,729	0,271	1,891	0,844	0,864	0,838	1,19	3,19
Betone mit natürlicher GK, A-Sieblinie	2,584	0,741	0,259	1,89	0,826	0,897	0,831	1,20	2,42
Betone mit gebrochener GK, B-Sieblinie	2,718	0,721	0,279	1,960	0,804	0,897	0,822	1,22	2,80
Betone mit gebrochener GK, A-Sieblinie	2,735	0,724	0,276	1,979	0,794	0,913	0,817	1,22	2,01

4.2.2 Betonentwurf der Technikum-Betone

Die SOLL-Zusammensetzungen der Betone, die im Rahmen der Technikum-Pumpversuche herangezogen wurden, können Tabellen 4-9 und 4-10 entnommen werden. Darüber hinaus werden ausgewählte Kenngrößen tabellarisch aufgeführt. Um die Reproduzierbarkeit exemplarisch zu prüfen, wurden der Referenzbeton sowie die Betone A2 und C7 insgesamt drei Mal geprüft. Die Betone, die zusätzlich mit einem B gekennzeichnet sind, wurden aufbauend auf dem Betonentwurf der Laborbetone exemplarisch konzipiert, um die absolute Grenze der Pumpbarkeit (Blockierung der Förderzylinder) zu erfassen. Die B-Betone weisen einen sehr geringen Leimgehalt V_{Leim} (rechnerische Leimschichtdicke nah am Wert 0) und einen hohen Fließmittelgehalt auf, der oberhalb des Fließmittelsättigungspunktes liegt.

Tabelle 4-9: SOLL-Zusammensetzungen der Technikum-Betone in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen.

Ausgangsstoffe	Referenzbeton	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Zement	403	343	373	373	373	321	364
Wasser	195	215	205	205	205	201	228
Sand 0/2	732	732	732	732	732	754	710
Kies 2/8	574	574	574	575	575	592	558
Kies 8/16	406	406	406	406	406	418	393
Splitt 2/8	-	-	-	-	-	-	-
Splitt 8/16	-	-	-	-	-	-	-
Fließmittel	1,21	1,03	1,21	2,24	3,35	0,96	1,09
Sieblinie	B	B	B	B	B	B	B
w/z-Wert [-]	0,48	0,63	0,55	0,55	0,55	0,63	0,63
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,3	0,3	0,3	0,6	0,9	0,3	0,3
Leimgehalt [dm³/m³]	340	340	340	340	340	320	360
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,40	0,34	0,37	0,37	0,37	0,34	0,34
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,79	0,77	0,78	0,78	0,78	0,78	0,76

Tabelle 4-10: SOLL-Zusammensetzungen der Technikum-Betone in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen (Fortsetzung Tabelle 4-9).

Ausgangsstoffe	C7	C8	C8-B	C9	C10	C11	C12	C12-B
Zement	343	403	279	343	403	343	403	279
Wasser	215	195	175	215	195	215	195	175
Sand 0/2	523	523	570	732	732	523	523	570
Kies 2/8	507	507	553	-	-	-	-	-
Kies 8/16	676	676	737	-	-	-	-	-
Splitt 2/8	-	-	-	622	622	549	549	598
Splitt 8/16	-	-	-	440	440	734	734	801
Fließmittel	1,03	1,21	3,35	1,03	1,21	1,03	1,21	3,63
Sieblinie	B	A	A	B	B	A	A	A
w/z-Wert [-]	0,63	0,48	0,63	0,63	0,48	0,63	0,48	0,63
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,3	0,3	1,2	0,3	0,3	0,3	0,3	1,2
Leimgehalt [dm³/m³]	340	340	280	340	340	340	340	280
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,34	0,40	0,34	0,34	0,40	0,34	0,40	0,34
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,77	0,79	0,81	0,77	0,79	0,77	0,79	0,81

4.2.3 Technikum-Pumpversuche unter der Verwendung von Pumpleitung 1 (PL1)

IST-Zusammensetzungen der Betone unter der Verwendung von Pumpleitung 1

In Tabellen 4-11 bis 4-13 sind die IST-Zusammensetzungen der mit der Pumpleitung 1 verwendeten Technikum-Betone sowie ausgewählte stoffliche Kenngrößen, inklusive der errechneten Leimschichtdicke d_{Leim} um die Gesteinspartikel (D > 0,125), dargestellt.

Tabelle 4-11: IST-Zusammensetzungen der Technikum-Betone (PL1) in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen.

Ausgangsstoffe	Referenzbeton-1	Referenzbeton-2	Referenzbeton-3	A1	A2-1	A2-2	A2-3
Zement	402	404	400	340	372	370	374
Wasser	192	195	197	214	205	204	203
Sand 0/2	153	753	767	765	776	729	711
Kies 2/8	557	557	567	563	557	557	597
Kies 8/16	398	398	388	387	375	388	388
Splitt 2/8	-	-	-	-	-	-	-
Splitt 8/16	-	-	-	-	-	-	-
Fließmittel	1,25	1,25	1,25	1,08	1,25	1,25	1,15
Sieblinie	B	B	B	B	B	B	B
w/z-Wert [-]	0,48	0,48	0,49	0,63	0,55	0,55	0,54
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,31	0,31	0,31	0,32	0,34	0,34	0,31
Leimgehalt [dm³/m³]	323	326	325	324	325	329	326
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,41	0,41	0,40	0,34	0,37	0,37	0,37
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,80	0,80	0,80	0,78	0,79	0,79	0,79
Leimschichtdicke d_{Leim} [µm] (berechnet nach Gl. 2-1)	13,1	13,7	13,4	13,2	13,5	14,4	13,8

Tabelle 4-12: IST-Zusammensetzungen der Technikum-Betone (PL1) in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen (Fortsetzung Tabelle 4-11).

Ausgangsstoffe	A3	A4	B1	B2	C7-1	C7-2	C7-3
Zement	372	379	318	362	342	342	342
Wasser	199	194	201	227	215	221	214
Sand 0/2	722	743	751	713	523	523	523
Kies 2/8	557	567	577	537	498	527	488
Kies 8/16	388	411	418	378	657	677	687
Splitt 2/8	-	-	-	-	-	-	-
Splitt 8/16	-	-	-	-	-	-	-
Fließmittel	2,25	3,37	1,10	1,25	1,05	1,05	1,20
Sieblinie	B	B	B	B	B	B	B
w/z-Wert [-]	0,53	0,51	0,63	0,63	0,63	0,65	0,63
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,60	0,89	0,35	0,35	0,31	0,31	0,35
Leimgehalt [dm³/m³]	327	322	306	349	329	327	326
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,38	0,39	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,79	0,80	0,79	0,77	0,78	0,78	0,78
Leimschichtdicke d_{Leim} [µm] (berechnet nach Gl. 2-1)	13,9	11,9	9,2	19,1	21,5	20,8	20,6

Tabelle 4-13: IST-Zusammensetzungen der Technikum-Betone (PL1) in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen (Fortsetzung Tabelle 4-12).

Ausgangsstoffe	C8	C8-B	C9	C10	C11	C12	C12-B
Zement	404	282	342	404	342	402	274
Wasser	199	172	215	174	211	194	172
Sand 0/2	523	561	751	732	523	542	561
Kies 2/8	498	557	-	-	-	-	-
Kies 8/16	677	746	-	-	-	-	-
Splitt 2/8	-	-	608	627	537	537	607
Splitt 8/16	-	-	448	438	736	736	896
Fließmittel	1,25	3,35	1,25	1,25	4,5	1,25	1,39
Sieblinie	A	A	B	B	A	A	A
w/z-Wert [-]	0,49	0,61	0,63	0,43	0,62	0,48	0,63
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,31	1,19	0,37	0,31	1,32	0,31	1,39
Leimgehalt [dm³/m³]	333	263	324	311	324	323	253
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,40	0,35	0,34	0,43	0,35	0,40	0,34
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,80	0,83	0,78	0,82	0,78	0,80	0,83
Leimschichtdicke d_{Leim} [µm] (berechnet nach Gl. 2-1)	21,6	2,6	12,6	9,3	17,9	17,6	0,0

Frischbetoncharakterisierung

Eine Übersicht über die Frischbetoncharakterisierung der im Rahmen der PL1-Technikum-Pumpversuche verwendeten Betone wird mit Tabelle 4-14 bereitgestellt.

Tabelle 4-14: Ergebnisse der Frischbetoncharakterisierung der Technikum-Betone (PL1).

Bezeichnung des Betons	Ausbreitmaß [mm]	Konsistenzklasse [-]	Frischbetonrohdichte [kg/dm³]	Luftporengehalt [Vol.-%]	Frischbetontemperatur [°C]
Ref.-1	535	F4	2,30	0,7	18,7
Ref.-2	460	F3	2,31	2,4	16,1
Ref.-3	550	F4	2,32	1,1	16,9
A1	745	F6	2,26	0,1	17,9
A2-1	620	F6	2,30	0,3	18,9
A2-2	645	F6	2,29	0,6	15,6
A2-3	605	F5	2,31	0,3	18,8
A3	620	F5	2,28	0,5	17,7
A4	705	F6	2,25	0,3	19,9
B1	630	F6	2,28	0,5	19,8
B2	745	F6	2,25	0,1	21,0
C7-1	810	F6	2,23	0,4	16,8
C7-2	760	F6	2,21	0,1	17,7
C7-3	775	F6	2,24	0,8	15,9
C8	610	F5	0,30	0,3	24,4
C8-B	720	F6	2,30	0,2	22,5
C9	600	F5	2,32	0,2	23,5
C10	410	F2	2,35	1,9	26,1
C11	730	F6	2,30	0,1	19,4
C12	555	F5	2,34	0,5	24,0
C12-B	415	F3	2,40	1,5	24,0

Es ist zu erkennen, dass – wie angestrebt – ein breites Spektrum an Fließfähigkeiten (Konsistenzklassen) vorlag. Darüber hinaus lässt sich anhand der mehrfach getesteten Betonzusammensetzungen feststellen, dass größere Schwankungen im Eigenschaftsbild auftraten, was auf die Genauigkeit bei der Herstellung von Beton im TB-Werk zurückgeführt werden kann. Weiterhin sind wetterabhängig größere Schwankungen in der Frischbetontemperatur entstanden, die aber keinen nennenswerten Einfluss auf das zeitabhängige Pumpverhalten hatten, worauf im weiteren Verlauf näher eingegangen wird.

Betontechnologische Einflüsse auf den Pumpwiderstand

Im Folgenden werden Einflussgrößen aus der Betonzusammensetzung (ϕ_{Leim} und d_{Leim}) auf den Pumpwiderstand tabellarisch und grafisch dargestellt und diskutiert. Der Pumpwiderstand wird als Druckverlust ΔP in der Einheit bar/m dargestellt, der am Drucksensor 1 (vgl. Abbildung 3-10) bei einer Förderrate von Q_3 = 21 m³/h gemessen wurde. Darüber hinaus wird der Einfluss aus der Betonzusammensetzung anhand der Gegenüberstellung zu relevanten Messwerten der Begleituntersuchungen dargestellt und diskutiert.

In Tabelle 4-15 werden der gemessene Förderleitungsdruck P sowie der daraus errechnete Druckverlust ΔP in Abhängigkeit von der Förderleitungslänge (Drucksensor 1, 23,8 m) der gepumpten Betone dargestellt.

Tabelle 4-15: Pumpdruck und Druckverlust der gepumpten Betone in Pumpleitung 1.

Bezeichnung des Betons	Förderleitungsdruck P [bar]	Druckverlust ΔP [bar/m]
Ref.-1	5,6	0,24
Ref.-2	7,0	0,29
Ref.-3	6,9	0,29
A1	1,9	0,08
A2-1	4,4	0,19
A2-2	3,5	0,15
A2-3	4,6	0,19
A3	4,2	0,18
A4	2,7	0,11
B1	4,8	0,20
B2	1,8	0,07
C7-1	1,6	0,07
C7-2	1,5	0,06
C7-3	1,3	0,05
C8	3,3	0,14
C8-B	2,3	0,10
C9	2,9	0,12
C10	5,9	0,25
C11	1,7	0,07
C12	5,0	0,21
C12-B	-	-

Der Beton C12-B blockierte bereits in den Förderzylindern. Sein Pumpen war nicht möglich, da das Betongefüge nahezu ungesättigt war ($d_{Leim} \approx 0$). Auf Abbildung 4-13 ist ein Foto des Ausbreitkuchens zu sehen, welches diese Gegebenheit veranschaulicht.

Abbildung 4-13: Ausbreitkuchen des Betons C12-B.

Abbildung 4-14 zeigt Schnitte der Sedimentationsrohre des Betons C12-B in Abhängigkeit unterschiedlicher Rütteldauern. Es ist zu erkennen, dass keine Sedimentation infolge der induzierten Rüttelenergie stattgefunden hat. Demnach weist der Beton in Abhängigkeit seiner Leimschichtdicke $d_{Leim} \approx 0$ keine „innere Verformbarkeit" auf und ist nicht in der Lage beim Pumpen eine Gleitschicht auszubilden. In diesem Zustand liegt das Betongefüge nahezu ungesättigt vor, da kein Überschussleim vorhanden ist, um die Gesteinspartikel im Betongefüge zu dispergieren. Bewegungsenergie wird unmittelbar durch direkten Kornkontakt an die Wandung der Förderzylinder übertragen und durch Reibung dissipiert. Dies äußert sich gleichermaßen im Sedimentationsverhalten des Betons. Ein Sedimentieren der Gesteinspartikel fand nicht statt ($\dot{S}$ = 0,1 Vol.-%/s; vgl. Tabelle 4-7). Ein solcher Beton ist nicht zum Pumpen geeignet, was durch die Sedimentationsrate $\dot{S}$ im Rahmen einer Eignungsprüfung erkannt werden kann.

(a) (b)

Abbildung 4-14: Schnitte der Sedimentationsrohre (der obere Abschnitt) mit Beton C12-B bei einer Rütteldauer von 15 Sekunden (a) und 30 Sekunden (b).

Die anderen Betone ließen sich hingegen ohne Störungen durch die Pumpleitung 1 pumpen und wiesen einen gemessenen Förderleitungsdruck P am Drucksensor 1 zwischen 1,3 bar und 7,0 bar auf. Die Druckunterschiede sind auf das unterschiedliche Eigenschaftsbild der konzipierten Betone zurückzuführen. Auf Abbildung 4-15 (a) ist der gemessene Druckverlust ΔP der gepumpten Betone in Abhängigkeit von der errechneten Leimschichtdicke d_{Leim} bei variierender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} zu sehen. Aufgeführt sind sämtliche Betone mit einem ungefähr gleichen Fließmittelgehalt von 0,33±0,04 M.-%. Es ist zu erkennen, dass der Druckverlust ΔP (Pumpwiderstand) mit zunehmender Leimschichtdicke d_{Leim} überproportional abnimmt. Darüber hinaus nimmt der Druckverlust ΔP mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} zu. Die durchgeführte Regressionsanalyse (Potenzfunktion) zeigt mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,85 für ϕ_{Leim}=0,4 und 0,88 für ϕ_{Leim}=0,34 einen guten Zusammenhang zwischen der Einflussgröße d_{Leim} und dem gemessenen Druckverlust ΔP. Die Streuungen im Druckverlust waren gering (geringe Varianz), trotz der dokumentierten Schwankungen im Fließmittel- und Wassergehalt in der IST-Zusammensetzung der betrachteten Betone.

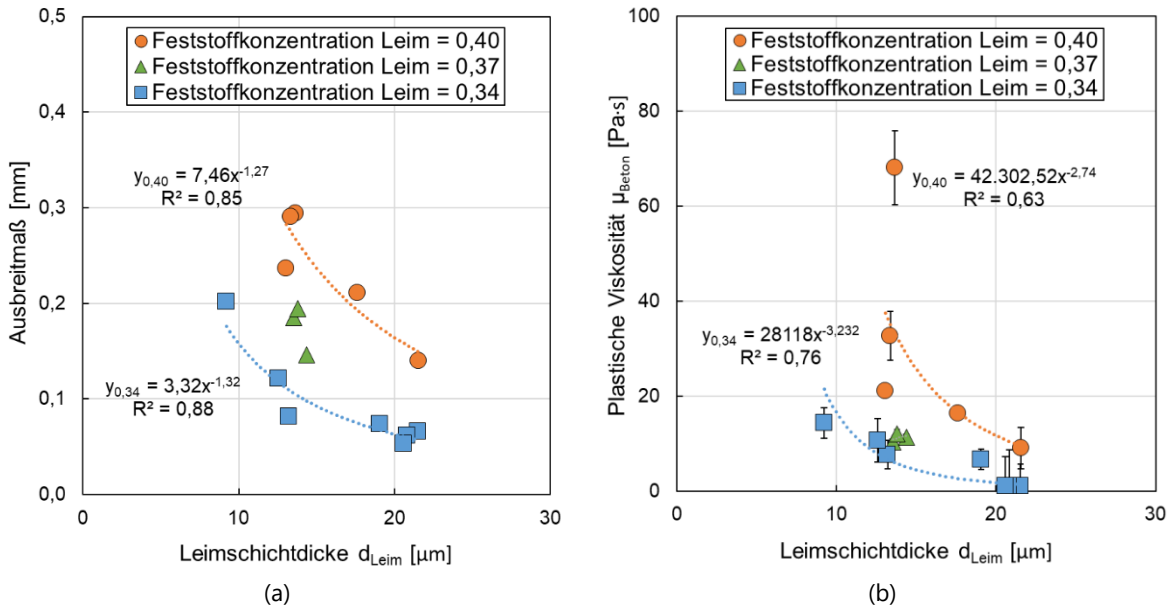
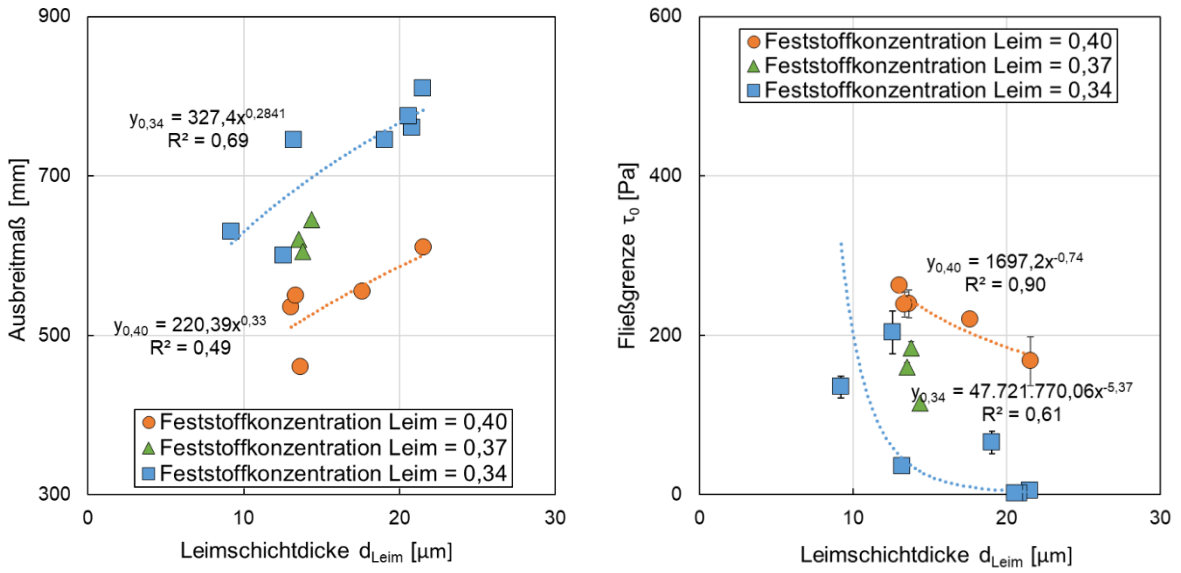


Abbildung 4-15: Einfluss der Leimschichtdicke auf den Druckverlust (a) und auf die plastische Viskosität des Betons (b) bei variierender Feststoffkonzentration des Leims.

Die Potenzfunktion wurde zur Regression gewählt, da der Druckverlust ΔP für kleine Leimschichtdicken d_{Leim} überproportional große Werte annimmt und für sehr große Leimschichtdicken d_{Leim} nicht unter dem Wert Null liegt. Dies ist aus anschaulichen Überlegungen plausibel, da der Pumpdruck bei Annäherung des Sättigungspunktes ($\lim_{d_{\mathrm{Leim}}\to 0} f(d_{\mathrm{Leim}})$) überproportional ansteigt (vgl. Abbildung 2-2), während reiner Leim ($\lim_{d_{\mathrm{Leim}}\to \infty} f(d_{\mathrm{Leim}})$ einen minimalen Pumpdruck benötigt, um gepumpt zu werden.

Hier sei auch auf den in Literatur gut beschriebenen Zusammenhang zwischen der plastischen Viskosität von Beton μ_{Beton} und dem Pumpwiderstand verwiesen. Abbildung 4-15 (b) zeigt deutlich, dass ein Zusammenhang zwischen der Leimschichtdicke d_{Leim} und der gemessenen plastischen Viskosität des Betons μ_{Beton} (Mittelwert aus drei Messungen) in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} vorliegt. Dies ist auf die Sättigungszustände des Beton- und Zementleimgefüges zurückführen. Die Regressionsanalyse (Potenzfunktion) zeigt zwar ein nicht besonders hohes Bestimmtheitsmaß R^2 und damit eine hohe Varianz der Versuchsergebnisse. Dies lässt sich jedoch auf die erhöhte Entmischungsneigung einiger Betone und die damit erhöhte Messungenauigkeit bei der Durchführung von rheologischen Messungen sowie auf den leicht schwankenden Fließmittel- und Wassergehalt zurückführen.

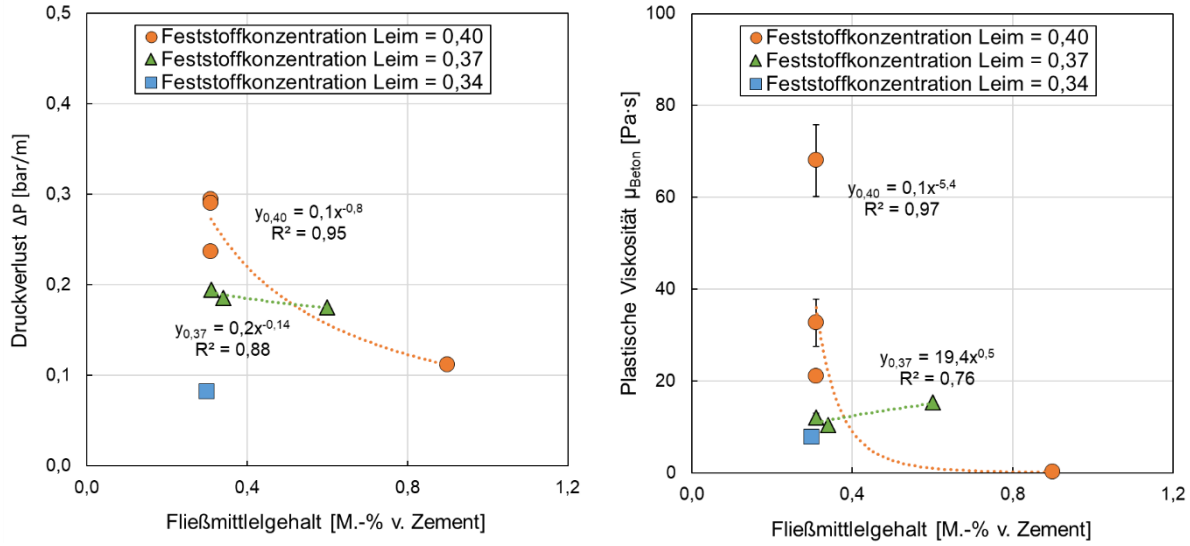
Anhand von Abbildung 4-16 ist außerdem ein Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und der Fließfähigkeit (respektive Ausbreitmaß) und der Fließgrenze τ_0 des Betons ersichtlich. Demnach steigt die Fließfähigkeit (sinkende Fließgrenze τ_0) mit steigender Leimschichtdicke d_{Leim} und Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim}. Dies steht ebenfalls direkt im Zusammenhang mit dem Pumpwiderstand, da sich Fließgrenze und Viskosität von Betonen mit geringem Fließmittelgehalt proportional zueinander verhalten.



(a) (b)

Abbildung 4-16: Einfluss der Leimschichtdicke auf das Ausbreitmaß (a) und auf die Fließgrenze des Betons (b) bei variierender Feststoffkonzentration des Leims.

Der Einfluss des Fließmittelgehalts auf den Druckverlust ΔP und auf die plastische Viskosität des Betons μ_{Beton} wird in Abbildung 4-17 dargestellt. Berücksichtigt wurden die Zusammensetzungen mit ungefähr gleicher Feststoffkonzentration des Leims $\phi_{Leim} = \phi_{Leim,\ SOLL} \pm 0,01$ und ungefähr gleicher Leimschichtdicke von $d_{Leim} = 13,3 \pm 0,4$ µm.



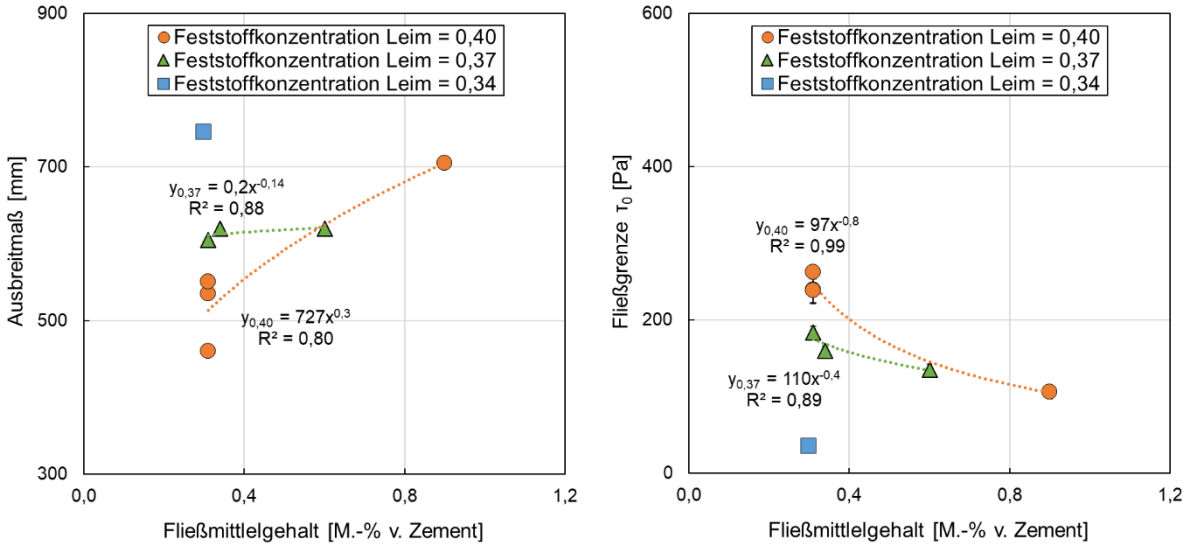
(a) (b)

Abbildung 4-17: Einfluss des Fließmittelgehalts auf den Druckverlust (a) und auf die plastische Viskosität des Betons (b) bei variierender Feststoffkonzentration des Leims.

Es ist zu erkennen, dass der Druckverlust ΔP mit steigendem Fließmittelgehalt sinkt, was mit der sinkenden plastischen Viskosität des Betons μ_{Beton} begründet werden kann. Die Versuchsreihe mit einer Feststoffkonzentration des Leims $\phi_{Leim,\ SOLL} = 0,37$ weicht von dem zuvor genannten Zusammenhang geringfügig ab. Dies ist mit der leicht erhöhten Feststoffkonzentration des Leims $\phi_{Leim,\ IST} = 0,38$ zu erklären; vgl. Beton A3 in Tabelle 4-12. Aus

Abbildung 4-5 (b) (funktionale Zusammenhänge unter Laborbedingungen) kann hingegen entnommen werden, dass dies auf die Ungenauigkeiten im Herstellungsprozess zurückzuführen ist und nicht in einem kausalen Zusammenhang steht.

Abschließend wird der Einfluss des Fließmittelgehalts auf die Fließfähigkeit (respektive Ausbreitmaß) und auf die Fließgrenze τ_0 des Betons grafisch dargestellt. Abbildung 4-18 zeigt, dass die Fließgrenze τ_0 mit steigendem Fließmittelgehalt sinkt, was mit einem Anstieg der Fließfähigkeit (respektive Ausbreitmaß) einhergeht.



(a) (b)

Abbildung 4-18: Einfluss des Fließmittelgehalts auf das Ausbreitmaß (a) und auf die Fließgrenze des Betons (b) bei variierender Feststoffkonzentration des Leims.

Zeitlicher Einfluss auf den Pumpwiderstand

Zur Quantifizierung des zeitlichen Einflusses auf den Pumpwiderstand wird zum einen der zeitliche Einfluss während des kontinuierlichen Pumpens und zum anderen der zeitliche Einfluss infolge einer temporären Unterbrechung des Pumpprozesses untersucht. Für die Quantifizierung des zeitlichen Einflusses während des kontinuierlichen Pumpens wurde der Mittelwert des gemessenen Pumpdrucks P der Förderratestufen Q_5 und Q_1 sowie Q_2 und Q_4 betrachtet. Zur Quantifizierung des zeitlichen Einflusses auf den Pumpwiderstand infolge der temporären Unterbrechung wird der Mittelwert des gemessenen Pumpdrucks P der Förderratestufen Q_3 und Q_6 über die gesamte Dauer der jeweiligen Förderratestufe herangezogen; vgl. Abbildung 4-19. Anhand von Abbildung 4-19 (b) ist ein linearer Zusammenhang zwischen Förderrate Q und Förderleitungsdruck P zu erkennen, der für sämtliche Untersuchungen bestätigt werden kann.

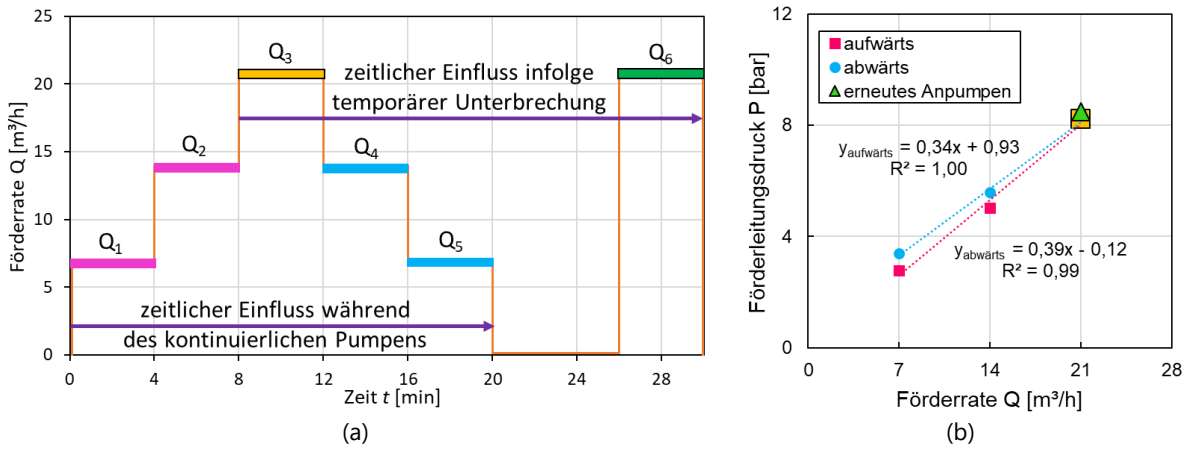


Abbildung 4-19: Darstellung Pumpregie für die Bestimmung der prozentualen Änderung des Förderleitungsdrucks (a) und Beispiel eines Förderleitungsdruck-Förderrate-Diagramms (b).

Die Quantifizierung des zeitlichen Einflusses auf den Pumpwiderstand erfolgt durch die Bestimmung der prozentualen Änderung des Förderleitungsdrucks ΔP(t) gemäß Gleichung 4-1 (am Beispiel von Q_3 und Q_6), der an sämtlichen Drucksensoren gemessen wurde. Anhand der Druckmessungen wurde die Druckänderung prozentual aus dem Mittelwert aller Drucksensoren einer gleichen Förderrate (z. B. $Q_1 = Q_5 = 7\ m^3/h$) berechnet und durch die Zeit in Minuten, die zwischen den betrachteten Förderraten Q_i liegt, dividiert.

$$\Delta P(t) = \frac{\left(\frac{\bar{P}(Q_6)}{\bar{P}(Q_3)} - 1\right) \cdot 100}{18\ \mathrm{min}} \qquad \left[\frac{\%}{\mathrm{min}}\right] \tag{4-1}$$

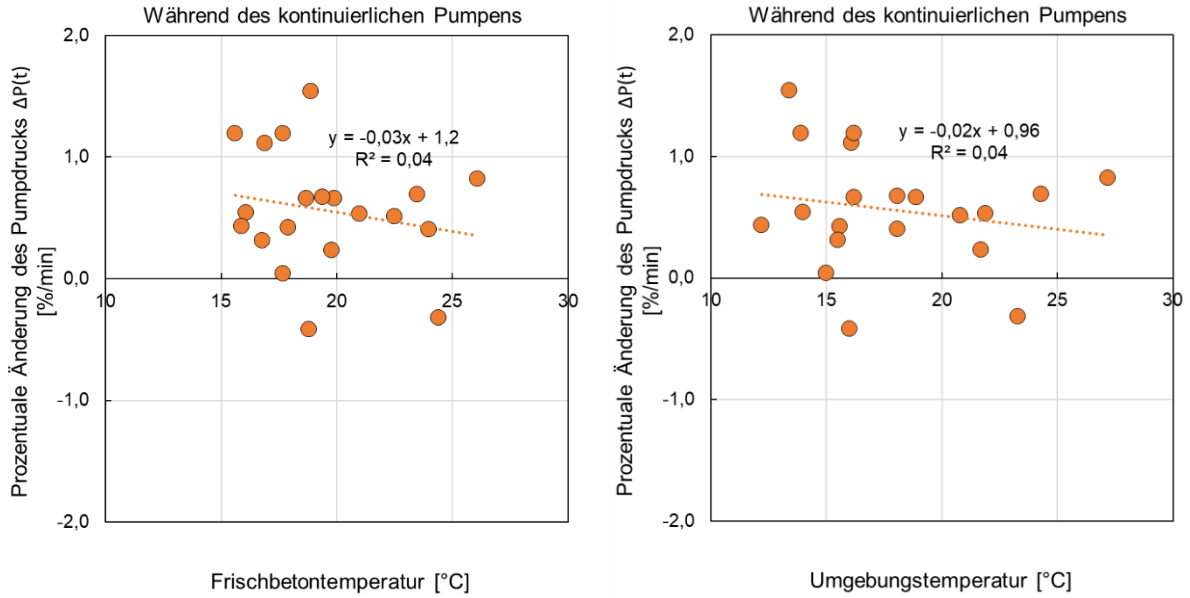
In Tabelle 4-16 wird die prozentuale, zeitliche Änderung des Förderleitungsdrucks ΔP(t) während des Pumpens und infolge der temporären Unterbrechung dargestellt. Zusätzlich sind die gemessene Frischbetontemperatur sowie die Umgebungstemperatur während des Versuchs aufgeführt.

Tabelle 4-16: Prozentuale Änderung des Förderleitungsdrucks pro Minute infolge kontinuierlichen Pumpens und infolge der temporären Unterbrechung sowie die Frischbetontemperatur und die Umgebungstemperatur während des Versuchs.

Bezeichnung des Betons	prozentuale Änderung des Förderleitungsdrucks ΔP(t)		Frischbeton-temperatur	gemessene Umgebungs-temperatur
	während des kontinuierlichen Pumpens	infolge der temporären Unterbrechung		
	[%/min]	[%/min]	[°C]	[°C]
Ref.-1	0,66	-0,10	18,7	16,2
Ref.-2	0,54	0,25	16,1	14,0
Ref.-3	1,11	0,18	16,9	16,1
A1	0,42	0,35	17,9	15,6
A2-1	1,54	-0,62	18,9	13,4
A2-2	1,19	0,60	15,6	13,9
A2-3	-0,42	0,32	18,8	16,0
A3	1,19	0,23	17,7	16,2
A4	0,66	0,67	19,9	18,9
B1	0,23	0,01	19,8	21,7

B2	0,53	0,49	21,0	21,9
C7-1	0,31	0,39	16,8	15,5
C7-2	0,04	0,30	17,7	15,0
C7-3	0,43	1,17	15,9	12,2
C8	-0,32	-1,08	24,4	23,3
C8-B	0,51	0,76	22,5	20,8
C9	0,69	2,11	23,5	24,3
C10	0,82	0,77	26,1	27,2
C11	0,67	0,62	19,4	18,1
C12	0,40	-0,31	24,0	18,1
C12-B	-	-	24,0	26,0

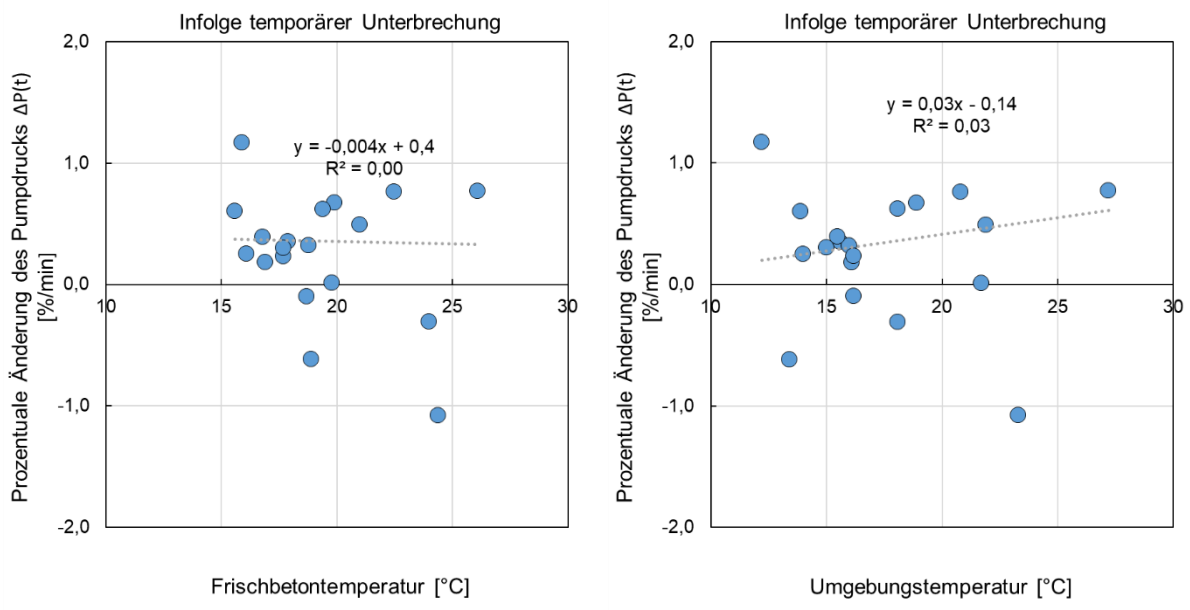
In den Abbildungen 4-20 und 4-21 ist der zeitliche Einfluss auf den Pumpwiderstand grafisch dargestellt.



(a) (b)

Abbildung 4-20: Zeitlicher Einfluss auf den Pumpwiderstand ΔP(t) während des kontinuierlichen Pumpens in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur (a) und von der Umgebungstemperatur (b).

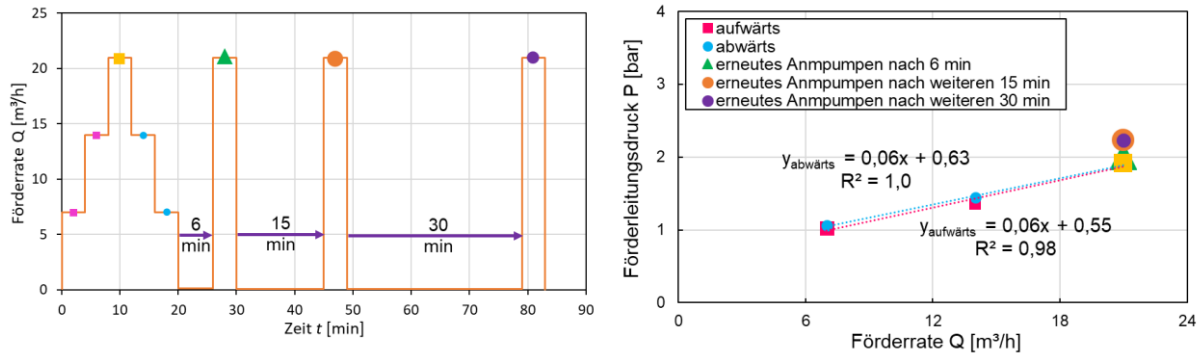
Es kann festgehalten werden, dass ein zeitlicher Einfluss auf den Pumpwiderstand P(t) gemessen werden kann und in der Regel zwischen (0 und 1) %/min liegt, und das sowohl während des kontinuierlichen Pumpens als auch infolge der temporären Unterbrechung. Ein Einfluss der Temperatur kann, trotz des hohen sommerlichen Temperaturniveaus, für die vorliegenden Untersuchungen ausgeschlossen werden. Weiterhin kann ein zeitlicher Einfluss auf den Grad der Entmischung (Sedimentation) infolge der temporären Unterbrechung ausgeschlossen werden, obwohl davon ausgegangen wurde, dass Entmischungen in der Förderleitung des „ruhenden" Betons einen höheren Pumpwiderstand P hervorrufen sollten. Dies geschah jedoch nicht. Grundsätzlich ist der geringfügige zeitliche Einfluss auf den Pumpwiderstand P(t) insbesondere durch die Hydratationskinetik des verwendeten Zements zurückzuführen, der umso höher ist, je größer der Anteil des Zementklinkers im Beton ist und je höher die Mahlfeinheit des Zements ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wahl des verwendeten Zements (CEM III/A 42,5 N) dazu geführt hat, dass der zeitliche Einfluss auf den Pumpwiderstand P(t) begrenzt ist.



(a) (b)

Abbildung 4-21: Zeitlicher Einfluss auf den Pumpwiderstand ΔP(t) infolge der temporären Unterbrechung in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur (a) und Umgebungstemperatur (b).

Exemplarisch wurde der zeitliche Einfluss zusätzlicher, verlängerter temporärer Unterbrechungen auf den Pumpwiderstand P(t) für den Beton C7-1 untersucht (vgl. Abbildung 4-22). Dadurch betrug die Dauer des durchgeführten Pumpversuchs insgesamt 83 min (vgl. Abbildung 4-22, a), was zusammen mit der Fahrtzeit des Transportbetonfahrzeuges zum Ort des Pumpversuchs der maximalen Verarbeitungszeit von 90 min entspricht. In Abbildung 4-22 (b) ist das Förderleitungsdruck-Förderrate-Diagramm des Betons C7-1 zu sehen.



(a) (b)

Abbildung 4-22: Pumpregie mit Erweiterung der temporären Unterbrechung (a) und zeitlicher Einfluss auf den Pumpwiderstand ΔP(t) infolge der temporären Unterbrechung in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur (a) und der Lage im Förderleitungsdruck-Förderrate-Diagramm des Betons C7-1 (b).

Es ist ein zeitlicher Einfluss der zusätzlichen temporären Unterbrechungen zu erkennen. Der Pumpdruck P hat sich innerhalb von 71,5 min von 1,56 bar auf 1,83 bar erhöht, was einer rd. 18 prozentige Druckerhöhung entspricht (ΔP(t) ≈ 0,24 %/min).

Einfluss der Art des Förderleitungselements auf den Pumpwiderstand

Zur Quantifizierung des Einflusses der Art des Förderleitungselements wurden verschiedene Bauteile im Rahmen der Pumpleitung 1 verbaut. Dazu zählten Förderschläuche, Förderrohre

und Bögen (R275) aus gehärtetem Stahl und eine Reduzierung (Stahl), die die Nennweite über eine Länge von 1 Meter von 100 mm auf 80 mm reduziert; vgl. Abbildung 4-23. Der Pumpwiderstand wird im Folgenden als Druckverlust ΔP in der Einheit bar/m angegeben. Zur Quantifizierung des Druckverlusts ΔP wurde der Förderleitungsdruck P bei einer Förderrate von 21 m^3/h (Q_3) herangezogen. Dies stellt eine praxisübliche Förderrate dar.

Die Ermittlung des Druckverlusts ΔP im Förderrohr erfolgte durch die Messung des Förderleitungsdrucks P mit den Drucksensoren an der Förderleitungswandung. Diese wurden vor und hinter jedem betrachteten Förderleitungselement appliziert; vgl. Abbildung 4-23). Für den Druckverlust im Förderschlauch wurde der Förderleitungsdruck P mit den Drucksensoren DS2 und DS3, für die Bogenanordnung mit den Drucksensoren DS3 und DS7 und für die Reduzierung mit den Drucksensoren DS10 und DS11 ermittelt. Zusätzlich wurden zwei Förderschläuche mit einer Länge von jeweils einem Meter nach der Bogenanordnung (instationärer Strömungszustand) angeordnet, um den Einfluss einer Gleitschicht-Neuausbildung auf den Pumpwiderstand zu quantifizieren. Dazu wurde der Förderleitungsdruck P mit den Drucksensoren DS7 bis DS9 erfasst (Förderschlauch 1 instationär, DS7 und DS8; Förderschlauch 2 instationär, DS8 und DS9, vgl. Abbildung 4-23).

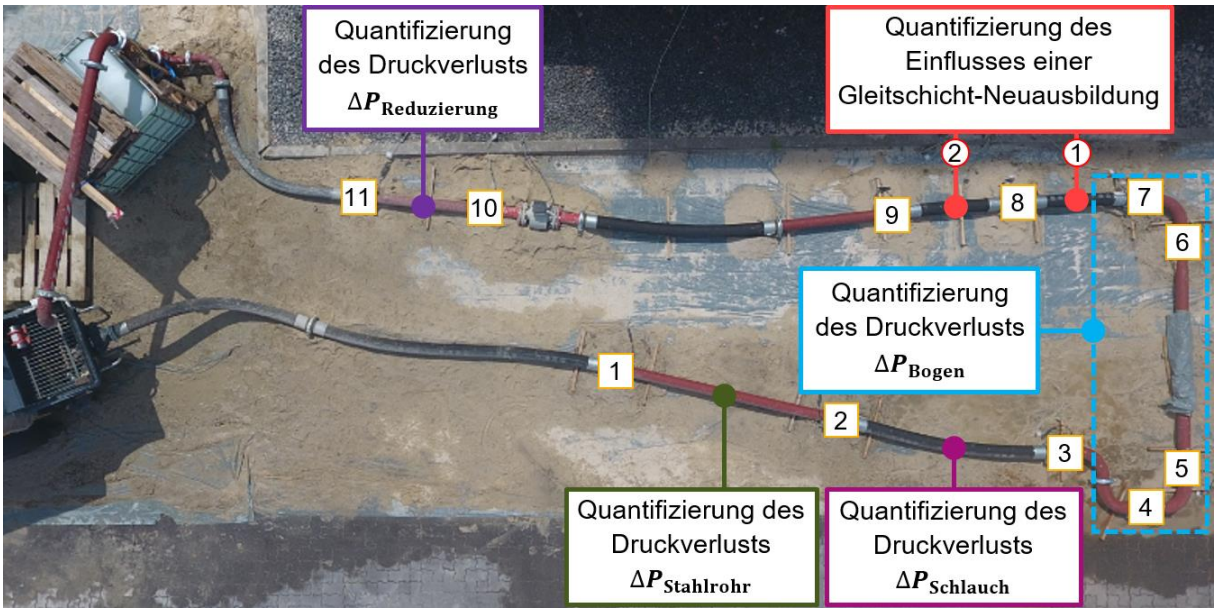


Abb. 4-23: Übersichtsfoto der Pumpleitung 1 zur Quantifizierung des Einflusses variierender Förderleitungselemente auf den Pumpwidersand sowie die Positionierung und die Nummerierung der Drucksensoren von 1 bis 11 [Foto: Cotardo].

In Tabelle 4-17 ist der Druckverlust ΔP in Abhängigkeit von der Förderrate Q für ein Förderrohr aufgeführt.

Tabelle 4-17: Druckverlust ΔP im Förderrohr in Abhängigkeit von der Förderrate Q untersuchter Betone.

Bezeichnung des Betons	Druckverlust ΔP [bar/m]					
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Ref.-1	0,07	0,14	0,21	0,14	0,09	0,20
Ref.-2	0,09	0,13	0,16	0,14	0,10	0,17
Ref.-3	0,08	0,14	0,23	0,16	0,09	0,23
A1	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	0,05
A2-1	0,04	0,07	0,18	0,09	0,06	0,14
A2-2	0,04	0,05	0,11	0,07	0,04	0,10

A2-3	0,07	0,11	0,18	0,09	0,05	0,18
A3	0,02	0,05	0,13	0,08	0,03	0,14
A4	0,06	0,08	0,10	0,08	0,06	0,17
B1	0,05	0,08	0,22	0,15	0,07	0,24
B2	0,04	0,05	0,08	0,07	0,05	0,08
C7-1	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03
C7-2	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,04
C7-3	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
C8	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	0,05
C8-B	0,03	0,04	0,07	0,04	0,03	0,06
C9	0,06	0,09	0,11	0,09	0,07	0,21
C10	0,07	0,13	0,17	0,14	0,10	0,20
C11	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05
C12	0,08	0,16	0,25	0,13	0,07	0,23
C12-B	-	-	-	-	-	-

Der Druckverlust ΔP in Abhängigkeit von der Förderrate Q für einen Förderschlauch ist in Tabelle 4-18 abgebildet.

Tabelle 4-18: Druckverlust ΔP im Förderschlauch in Abhängigkeit von der Förderrate Q untersuchter Betone.

Bezeichnung des Betons	Druckverlust ΔP [bar/m]					
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Ref.-1	0,06	0,12	0,16	0,11	0,07	0,16
Ref.-2	0,13	0,20	0,27	0,21	0,14	0,29
Ref.-3	0,09	0,16	0,25	0,18	0,11	0,27
A1	0,02	0,03	0,05	0,03	0,02	0,04
A2-1	0,03	0,06	0,19	0,10	0,04	0,15
A2-2	0,05	0,07	0,14	0,11	0,06	0,15
A2-3	0,04	0,09	0,15	0,08	0,03	0,14
A3	0,05	0,08	0,17	0,11	0,06	0,16
A4	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03	0,11
B1	0,03	0,06	0,16	0,09	0,03	0,16
B2	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03
C7-1	0,04	0,05	0,07	0,05	0,04	0,07
C7-2	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,01
C7-3	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04
C8	0,03	0,05	0,08	0,05	0,03	0,12
C8-B	0,02	0,04	0,06	0,03	0,02	0,06
C9	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03	0,15
C10	0,00	0,04	0,07	0,05	0,01	0,09
C11	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
C12	0,04	0,07	0,15	0,07	0,03	0,11
C12-B	-	-	-	-	-	-

In Tabelle 4-19 ist der Druckverlust ΔP in Abhängigkeit von der Förderrate Q für die Bogenanordnung dargestellt.

Tabelle 4-19: Druckverlust ΔP in der Bogenanordnung in Abhängigkeit von der Förderrate Q untersuchter Betone.

Bezeichnung des Betons	Druckverlust ΔP [bar/m]					
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Ref.-1	0,07	0,14	0,19	0,14	0,09	0,19
Ref.-2	0,12	0,18	0,23	0,19	0,13	0,25
Ref.-3	0,07	0,15	0,22	0,16	0,09	0,22
A1	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	0,06
A2-1	0,03	0,06	0,15	0,09	0,04	0,14
A2-2	0,03	0,06	0,11	0,10	0,04	0,16
A2-3	0,05	0,10	0,17	0,11	0,06	0,16
A3	0,05	0,08	0,15	0,11	0,05	0,16
A4	0,03	0,05	0,08	0,06	0,04	0,09
B1	0,04	0,06	0,18	0,09	0,04	0,17
B2	0,02	0,03	0,05	0,03	0,02	0,04
C7-1	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02
C7-2	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,05
C7-3	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
C8	0,03	0,06	0,07	0,04	0,03	0,10
C8-B	0,03	0,04	0,06	0,04	0,02	0,07
C9	0,02	0,05	0,07	0,05	0,03	0,13
C10	0,14	0,20	0,26	0,22	0,16	0,29
C11	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,04
C12	0,07	0,10	0,16	0,13	0,06	0,15
C12-B	-	-	-	-	-	-

Tabelle 4-20 kann der Druckverlust ΔP in Abhängigkeit von der Förderrate Q für die Reduzierung entnommen werden.

Tabelle 4-20: Druckverlust ΔP in der Reduzierung in Abhängigkeit von der Förderrate Q untersuchter Betone.

Bezeichnung des Betons	Druckverlust ΔP [bar/m]					
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Ref.-1	0,07	0,15	0,18	0,16	0,09	0,18
Ref.-2	0,23	0,35	0,49	0,35	0,25	0,50
Ref.-3	0,09	0,18	0,30	0,18	0,12	0,30
A1	0,01	0,04	0,08	0,04	0,07	0,08
A2-1	0,04	0,09	0,13	0,10	0,05	0,09
A2-2	0,04	0,07	0,11	0,07	0,04	0,06
A2-3	0,07	0,09	0,14	0,09	0,05	0,14
A3	0,02	0,06	0,11	0,05	0,03	0,10
A4	0,03	0,06	0,12	0,07	0,04	0,11
B1	0,02	0,07	0,15	0,05	0,02	0,13
B2	0,01	0,06	0,07	0,04	0,01	0,07
C7-1	0,02	0,04	0,07	0,04	0,01	0,08
C7-2	0,03	0,05	0,08	0,05	0,03	0,08
C7-3	0,00	0,02	0,04	0,01	0,00	0,05

C8	0,00	0,04	0,12	0,04	0,00	0,12
C8-B	0,04	0,06	0,11	0,07	0,04	0,13
C9	0,03	0,08	0,15	0,09	0,04	0,18
C10	0,15	0,23	0,33	0,26	0,17	0,37
C11	0,01	0,03	0,06	0,04	0,01	0,07
C12	0,09	0,13	0,23	0,13	0,09	0,21
C12-B	-	-	-	-	-	-

Im Folgenden erfolgt die grafische Darstellung zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf den Druckverlust ΔP in Abhängigkeit von der Art des Förderleitungselements für eine Durchflussrate Q von 21 m^3/h (Q_3).

Abbildung 4-24 zeigt, dass der Druckverlust ΔP unabhängig von der Art des Förderleitungselements mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} und ungefähr konstanter Leimschichtdicke (d_{Leim} = 13,3 ± 0,4 µm) überproportional ansteigt. Dies ist auf eine höhere Packungsdichte des Zementleimgefüges zurückzuführen. Dadurch steigt die plastische Viskosität des Betons μ_{Beton}, da interpartikuläre Wechselwirkungen zunehmen, wodurch die innere Verformbarkeit des Betongefüges zurückgeht.

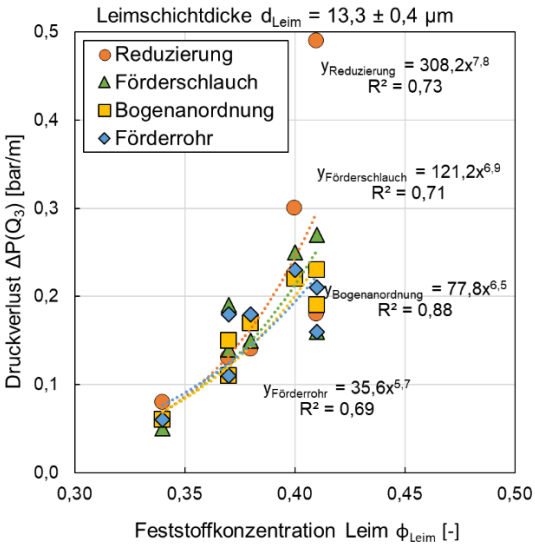
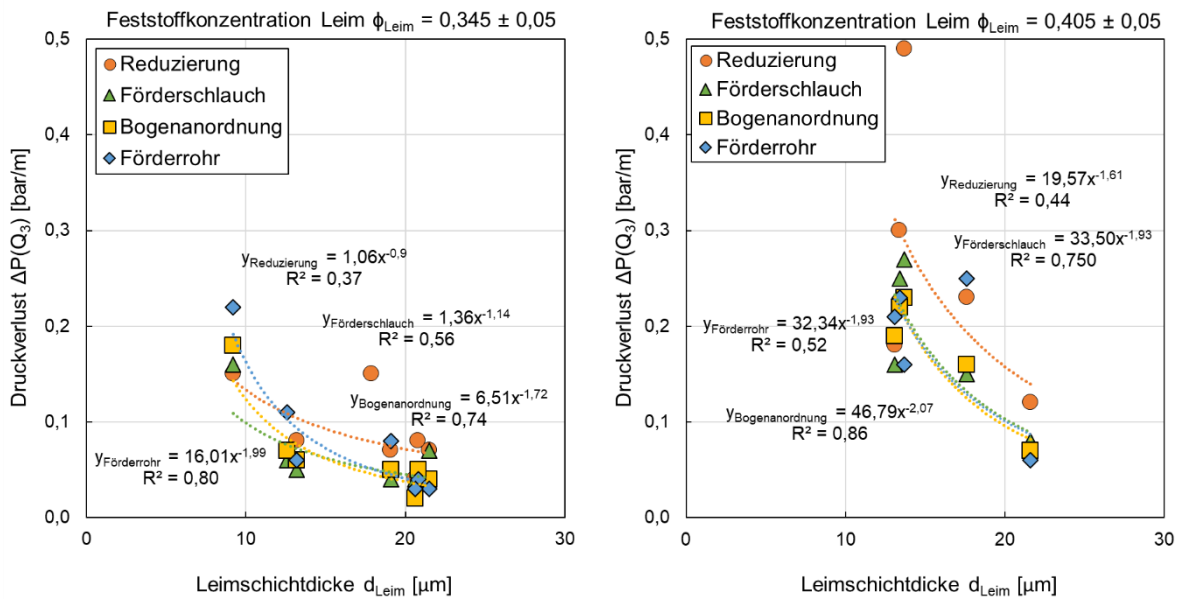


Abbildung 4-24: Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims auf den Druckverlust in Abhängigkeit von der Art des Förderleitungselements für eine Förderrate von 21 m^3/h bei ungefähr gleicher Leimschichtdicke.

Anhand von Abbildung 4-25 kann beobachtet werden, dass der Druckverlust ΔP unabhängig von der Art des Förderleitungselements mit steigender Leimschichtdicke d_{Leim} und ungefähr konstanter Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} (ϕ_{Leim} = 0,345 und ϕ_{Leim} = 0,405) überproportional abnimmt. Dies ist auf eine geringere Packungsdichte des Betongefüges zurückzuführen. Dadurch sinkt die plastische Viskosität des Betons μ_{Beton}, da der Anteil direkter Kontaktwechselwirkungen abnimmt. Es ist weiterhin zu erkennen, dass der Druckverlust ΔP mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} ausgeprägter ist. Beide zuvor genannten Zusammenhänge bestätigen die bereits genannten Erkenntnisse zum Einfluss der Zusammensetzung des Betons auf den Pumpwiderstand.

Es kann darüber hinaus beobachtet werden, dass die Druckverluste ΔP in der Reduzierung insbesondere gegenüber dem Förderrohr unveränderlichem Durchmesser umso größer sind, je kleiner die Leimschichtdicke d_{Leim} bzw. je größer die Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim}

ist. Das wird dadurch begründet, dass die Querschnittsreduzierung zu einer radialen Kompression der Gesteinskörnung führt. Dies setzt eine „innere Verformbarkeit" des Betongefüges voraus, die mit steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} und mit geringerer Leimschichtdicke d_{Leim} abnimmt. Die Druckverluste der weiteren betrachteten Förderleitungselemente variieren in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung im Vergleich zum Förderrohr unveränderlichen Durchmessers nur unwesentlich.



(a) (b)

Abbildung 4-25: Einfluss der Feststoffkonzentration des Leims auf den Druckverlust in Abhängigkeit von der Art des Förderleitungselements für eine Förderrate von 21 m^3/h bei ungefähr gleicher Feststoffkonzentration von 0,345 (a) und 0,405 (b).

Zuletzt wird der Einfluss des Fließmittelgehalts auf den Druckverlust (vgl. Abbildung 4-26) für zwei Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} von 0,345 und 0,405 und ungefähr gleicher Leimschichtdicke d_{Leim} von 13,3±0,4 µm grafisch dargestellt. Zunächst ist zu erkennen, dass der Druckverlust ΔP mit zunehmendem Fließmittelgehalt für die höhere Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} von 0,405 abnimmt und für die kleinere Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} von 0,345 keine Abhängigkeit vom Fließmittelgehalt zeigt. Die Druckverluste der Förderleitungselemente variieren nur unwesentlich. Einzige Ausnahme bildet erneut die Reduzierung, die gegenüber dem Förderrohr einen deutlich erhöhten Druckverlust hervorruft.

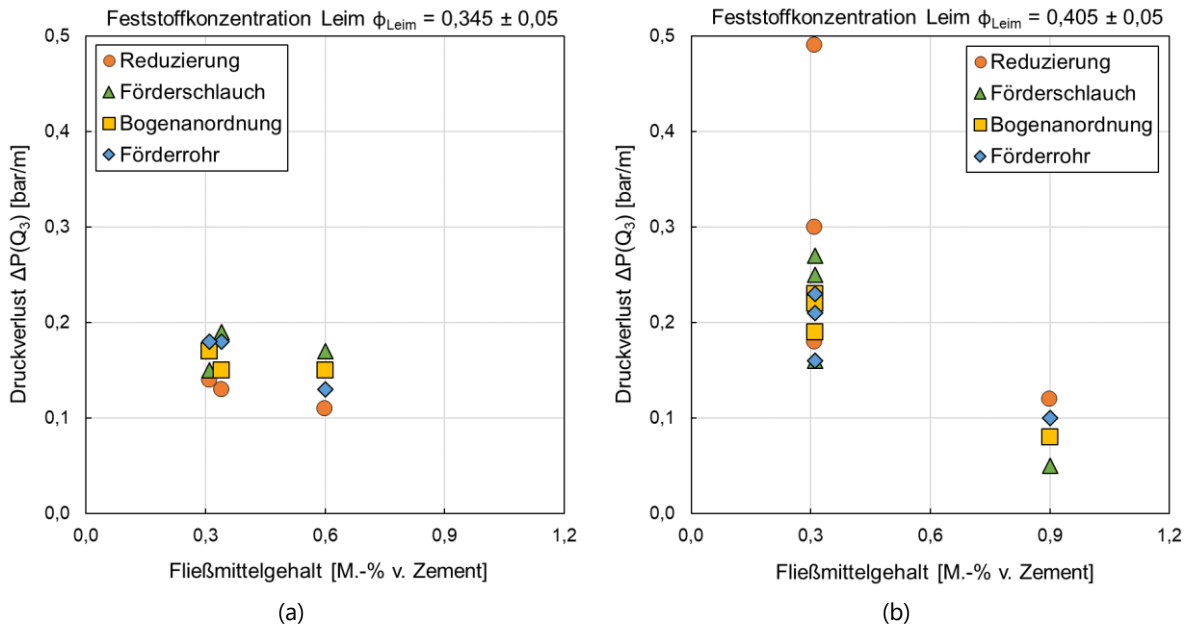


Abbildung 4-26: Einfluss des Fließmittelgehalts auf den Druckverlust in Abhängigkeit von der Art des Förderleitungselements für eine Förderrate von 21 m³/h bei annähernd gleicher Feststoffkonzentration von 0,345 (a) und 0,405 (b) und ungefähr gleicher Leimschichtdicke.

Untersuchungsergebnisse zur Entmischungsneigung

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse der durchgeführten Begleituntersuchungen zur Entmischungsneigung vorgestellt und unter der Berücksichtigung der erlangten Erkenntnisse der Laboruntersuchungen diskutiert. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss ausgewählter betontechnischer Variationen auf die Kenngrößen der Entmischungsneigung dargestellt.

In Tabelle 4-21 sind die ermittelten Kenngrößen $\dot{S}$ und $\dot{V}_{FW}$ zur Charakterisierung der Entmischungsneigung der betrachteten Betone dargestellt.

Tabelle 4-21: Kenngrößen zur Charakterisierung der Entmischungsneigung

Bezeichnung des Betons	Sedimentationsrate $\dot{S}$ [Vol.-%/s]	Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ [cm²/√s]
Ref.-1	0,8	14,6
Ref.-2	0,2	14,6
Ref.-3	0,4	13,1
A1	3,3	21,7
A2-1	1,4	20,6
A2-2	2,4	17,7
A2-3	1,1	17,9
A3	0,9	17,6
A4	2,6	9,3
B1	1,4	16,7
B2	2,9	25,5
C7-1	2,9	23,9
C7-2	4,1	28,8
C7-3	4,5	21,6
C8	1,4	15,4
C8-B	1,1	10,1

C9	1,4	25,2
C10	0,1	11,6
C11	4,1	12,8
C12	1,0	14,8
C12-B	0,1	4,6

Abbildung 4-27 zeigt den Einfluss der Leimschichtdicke d_{Leim} bei variierender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} auf die Sedimentationsrate $\dot{S}$ und auf die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$. Sowohl die Sedimentationsrate $\dot{S}$ als auch die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ nehmen mit steigender Leimschichtdicke d_{Leim} und mit sinkender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} zu. Dies bestätigt die Erkenntnisse der Laboruntersuchungen.

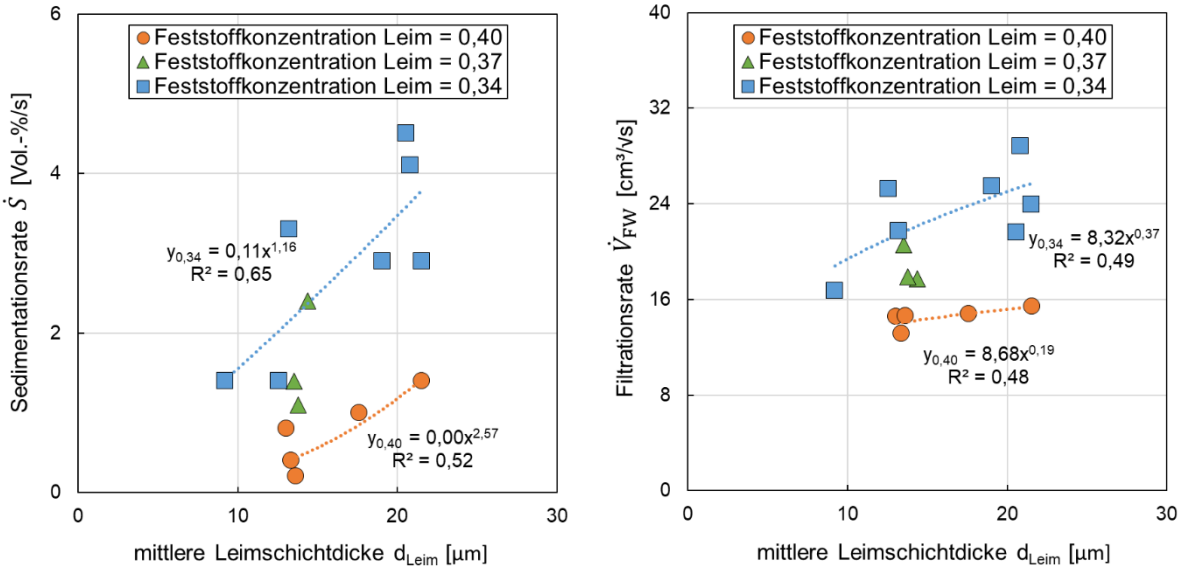


Abbildung 4-27: Einfluss der Leimschichtdicke bei variierender Feststoffkonzentration des Leims auf die Sedimentationsrate (a) und Filtrationsrate (b).

Abbildung 4-28 veranschaulicht den Einfluss des Fließmittelgehalts bei variierender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} auf die Sedimentationsrate $\dot{S}$ und auf die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$. Die Sedimentationsrate $\dot{S}$ nimmt mit steigendem Fließmittelgehalt tendenziell zu, während die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ abnimmt. Auch dieses Ergebnis stimmt mit den Erkenntnissen aus den Laboruntersuchungen überein.

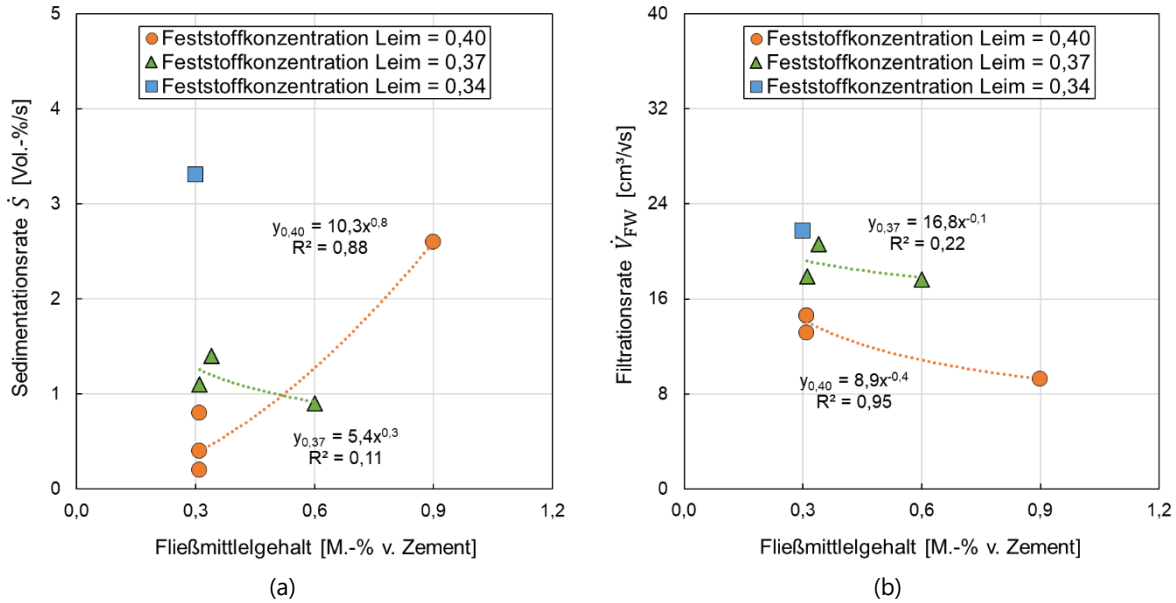


Abbildung 4-28: Einfluss des Fließmittelgehalts bei variierender Feststoffkonzentration des Leims auf die Sedimentationsrate (a) und Filtrationsrate (b).

4.2.4 Technikum-Pumpversuche unter der Verwendung von Pumpleitung 2 (PL2)

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse der Technikum-Pumpversuche unter der Verwendung der Pumpleitung 2 (vgl. Abbildung 3-11) vorgestellt und im Zusammenhang mit den Ergebnissen der durchgeführten Begleituntersuchungen diskutiert.

IST-Zusammensetzungen der Betone unter der Verwendung von Pumpleitung 2

In Tabellen 4-22 und 4-23 werden zunächst die IST-Zusammensetzungen der Technikum-Betone unter der Verwendung der Pumpleitung 2 sowie ausgewählte stoffliche Kenngrößen, inklusive der errechneten Leimschichtdicke d_{Leim}, um die Gesteinspartikel D > 0,125, tabellarisch dargestellt. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden insgesamt 15 Pumpversuche mit 14 unterschiedlichen Betonzusammensetzungen durchgeführt. Der Pumpversuch mit Beton A2 wurde zweimal durchgeführt. Ein Pumpversuch mit Beton C12-B wurde nicht durchgeführt, da dieser Beton unabhängig von der Pumpleitungskonstellation bereits in den Förderzylindern der Pumpe blockierte.

Tabelle 4-22: IST-Zusammensetzungen der Technikum-Betone (PL2) in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen.

Ausgangsstoffe	Referenzbeton	A1	A2-1	A2-2	A3	A4	B1	B2
Zement	403	342	370	372	374	373	322	364
Wasser	189	216	204	203	207	211	200	235
Sand 0/2	705	770	722	722	779	713	741	760
Kies 2/8	557	557	577	567	557	567	567	537
Kies 8/16	388	378	498	388	398	388	408	368
Splitt 2/8	-	-	-	-	-	-	-	-
Splitt 8/16	-	-	-	-	-	-	-	-
Fließmittel	1,20	1,05	1,15	1,15	2,25	3,50	1,00	1,10
Sieblinie	B	B	B	B	B	B	B	B
w/z-Wert [-]	0,47	0,63	0,55	0,55	0,55	0,57	0,62	0,65
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,30	0,31	0,31	0,31	0,6	0,94	0,31	0,30
Leimgehalt [dm³/m³]	329	327	313	328	324	335	310	349
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,41	0,34	0,37	0,38	0,37	0,37	0,35	0,34
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,80	0,78	0,80	0,79	0,79	0,78	0,79	0,76
Leimschichtdicke d_{Leim} [µm] (berechnet nach Gl. 2-1)	14,4	13,9	10,9	14,2	13,3	15,8	9,9	19,2

Tabelle 4-23: IST-Zusammensetzungen der Technikum-Betone (PL2) in [kg/m³] und ausgewählte stoffliche Kenngrößen (Fortsetzung Tabelle 4-22).

Ausgangsstoffe	C7	C8	C8-B	C9	C10	C11	C12
Zement	344	404	280	342	406	346	402
Wasser	216	197	172	216	194	213	196
Sand 0/2	555	561	561	741	743	523	551
Kies 2/8	527	488	527	-	-	-	-
Kies 8/16	697	697	726	-	-	-	-
Splitt 2/8	-	-	-	617	627	527	527
Splitt 8/16	-	-	-	517	438	866	806
Fließmittel	1,15	1,35	3,5	1,05	1,30	4,60	1,35
Sieblinie	B	A	A	B	B	A	A
w/z-Wert [-]	0,63	0,49	0,61	0,63	0,48	0,62	0,49
Fließmittelgehalt [M.-% v. Zement]	0,33	0,33	1,25	0,31	0,32	1,33	0,34
Leimgehalt [dm³/m³]	317	322	268	317	323	312	316
Feststoffkonzentration ϕ_{Leim} [-]	0,34	0,40	0,35	0,34	0,41	0,35	0,40
Feststoffkonzentration ϕ_{Beton} [-]	0,79	0,80	0,82	0,79	0,80	0,79	0,81
Leimschichtdicke d_{Leim} [µm] (berechnet nach Gl. 2-1)	20,0	19,4	4,1	10,7	12,5	14,0	15,4

Frischbetoncharakterisierung der Betone der Technikum-Pumpversuche PL2

Tabelle 4-24 gibt einen Überblick über die Frischbetoncharakterisierung der im Rahmen der Technikum-Pumpversuche unter der Verwendung von PL2 verwendeten Betone.

Tabelle 4-24: Ergebnisse der Frischbetoncharakterisierung der Technikum-Betone (PL2)

Bezeichnung des Betons	Ausbreit-maß	Konsistenz-klasse	Frischbeton-rohdichte	Luftporengehalt	Frischbeton-temperatur
	[mm]	[-]	[kg/dm³]	[Vol.-%]	[°C]
Ref.-Beton	510	F4	2,32	1,40	23,5
A1	535	F4	2,29	1,12	25,2
A2-1	610	F5	2,30	0,90	27,8
A2-2	645	F6	2,26	1,30	26,5
A3	765	F6	2,23	0,58	19,8
A4	740	F6	2,27	0,20	24,4
B1	645	F6	2,27	1,40	21,9
B2	650	F6	2,28	0,10	28,4
C7	700	F6	2,25	0,70	22,8
C8	700	F6	2,26	0,10	22,1
C8-B	645	F6	2,32	0,90	22,5
C9	520	F4	2,32	0,85	23,3
C10	435	F3	2,35	0,80	22,1
C11	525	F4	2,37	0,95	22,8
C12	545	F4	2,36	0,75	21,5

Wie erwartet lag ein breites Spektrum an Fließfähigkeiten (Konsistenzklassen) vor, wobei acht der 15 gelieferten Betone der Konsistenzklasse F6 zuzuordnen waren. Weiterhin sind wetterabhängig größere Schwankungen in der Frischbetontemperatur entstanden, die aber keinen signifikanten Einfluss auf das Pumpverhalten aufwiesen.

Einflüsse auf die Blockierungsneigung

Tabelle 4-25 gibt einen Überblick über die aufgetretenen Blockierungen. Darüber hinaus werden Angaben zum Ort und zum Betriebszustand gegeben. Es fällt auf, dass sämtliche Betone während des Betriebszustandes des initialen Anpumpens entstanden sind. Ebenso ist ersichtlich, dass der Großteil Blockierungen wie gewünscht im Bereich der Reduzierung nach dem vertikalen Förderabschnitt aufgetreten sind. Die hohe Anzahl im Experiment blockierter Betone zeigt, wie hoch der Einfluss der Förderleitungsführung auf die Blockierungsneigung ist und dass der definierte Versuchsaufbau das Resultat der Blockierung hervorgebracht hat.

Tabelle 4-25: Aufgetretene Blockierungen und Angaben zum Ort in der Förderleitung.

Bezeichnung des Betons	Blockierung eingetreten [ja/nein]	Pumpversuch fortgeführt [ja/nein]	Ort der Blockierung	Betriebszustand	Entnahme blockierten Betongefüges [ja/nein]
Referenzbeton	nein	-	-	-	-
A1	ja	ja	kurz hinter DS11	initiales Anpumpen	nein
A2-1	ja	nein	kurz hinter DS11	initiales Anpumpen	ja
A2-2	ja	ja	zwischen DS10 und DS11	initiales Anpumpen	nein
A3	nein	-	-	-	-
A4	ja	ja	zwischen DS10 und DS11	initiales Anpumpen	nein
B1	nein	-	-	-	-
B2	nein	-	-	-	-
C7	nein	-	-	-	-
C8	nein	-	-	-	-
C8-B	ja	nein	kurz hinter DS1	initiales Anpumpen	nein
C9	ja	ja	zwischen DS10 und DS11	initiales Anpumpen	nein
C10	ja	ja	zwischen DS10 und DS11	initiales Anpumpen	ja
C11	ja	nein	im zweiten Förderschlauch nach 6,5 m, vor DS1	initiales Anpumpen	nein
C12	ja	ja	zwischen DS10 und DS11	initiales Anpumpen	nein

4.2.5 Analyse blockierten Betongefüges der Technikum-Pumpversuche (PL2)

Zur Ergründung der Blockierungsbildung wurden während der Pumpversuche exemplarisch Proben des blockierten Betongefüges von Betonen A2-1, A2-2, A1 und C10 entnommen (vgl. Abbildung 4-29) und hinsichtlich der Zusammensetzung analysiert.

Abbildung 4-29: Übersichtsfoto der geöffneten Förderleitung mit blockiertem Beton A2-1 [Foto: Mikhalev / Cotardo].

Um die Eigenschaften des blockierten Betons ortsaufgelöst bestimmen zu können, wurden in bestimmten Abständen vor und nach der mittels Drucksensoren vorgenommenen Ortung Proben aus den betroffenen Förderleitungsabschnitten entnommen. Die entnommenen Proben wurden gewogen und die Masse *m* wurde ermittelt. Darüber hinaus wurde die Dichte ρ bestimmt, um über die Probenmasse *m* auf das Volumen *V* schließen zu können, wodurch die Länge *L* der entnommenen Probe berechnet werden konnte. Die Proben wurden anschließend auf einem Sieb mit einer Maschenweite von 1 mm ausgewaschen, um die Volumenanteile der Gesteinskörnung V_{GK} und die des Zementleims V_Z zu bestimmen. Da aus den Proben der Gesteinskörnungsanteil < 1 mm herausgewaschen wurde, erfolgte eine rechnerische Ergänzung aus den Sieblinien; vgl. Abbildung 4-12. Auf Abbildung 4-30 sind Fotos einer Blockierung im frischen und im erhärteten Zustand zu sehen. Es ist zu erkennen, dass das blockierte Betongefüge im frischen Zustand keine Fließeigenschaften besitzt, da es stark komprimiert wurde und eine stark erhöhte Feststoffkonzentration ϕ aufweist.

(a)

(b)

Abbildung 4-30: Fotos einer Blockierung im frischen (a) und im erhärteten Zustand (b) [Fotos: Mikhalev].

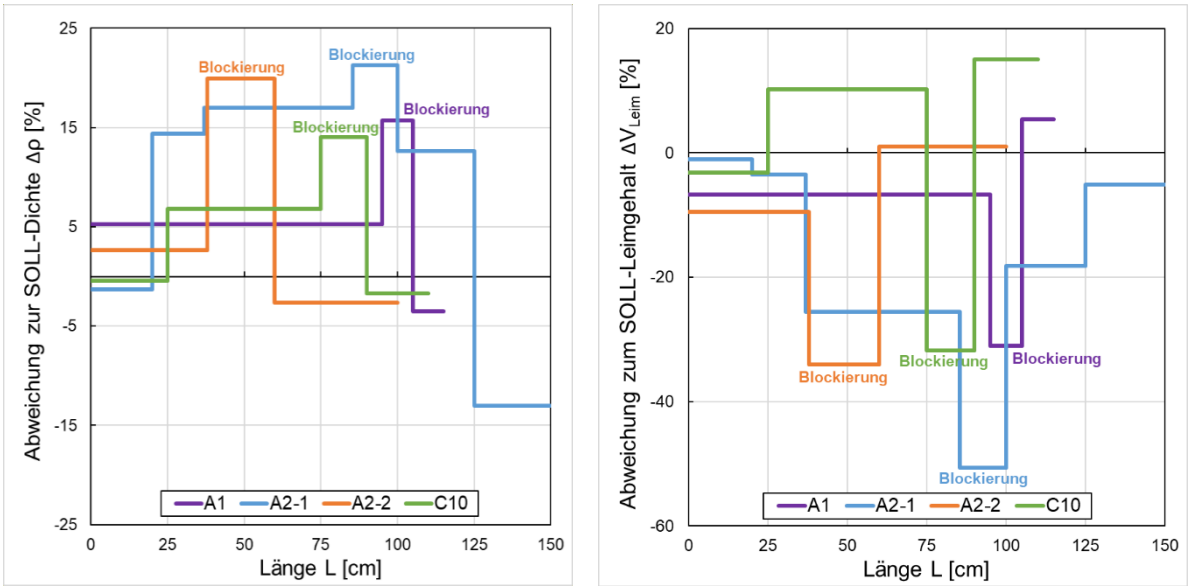
In Tabelle 4-26 sind die Ergebnisse der analysierten Blockierungen dargestellt.

Tabelle 4-26: Werte zur Dichte und zum Leimgehalt entnommener Proben blockierter Betone.

Betonbezeichnung			A1	
SOLL-Dichte [kg/dm³]			2,29	
SOLL-Leimgehalt [dm³/m³]			387	
Länge der Probe [cm]	IST-Dichte der Probe [kg/dm³]	Abweichung zur SOLL-Dichte [%]	IST-Leimgehalt der Probe [dm³/m³]	Abweichung zum SOLL-Leimgehalt [%]
95	2,41	5,2	361	-6,7
10	2,65	15,7	267	-31,0
10	2,21	-3,5	408	5,4
Betonbezeichnung			A2-1	
SOLL-Dichte [kg/dm³]			2,30	
SOLL-Leimgehalt [dm³/m³]			375	
Länge der Probe [cm]	IST-Dichte der Probe [kg/dm³]	Abweichung zur SOLL-Dichte [%]	IST-Leimgehalt der Probe [dm³/m³]	Abweichung zum SOLL-Leimgehalt [%]
20	2,27	-1,3	371	-1,1
17	2,63	14,3	362	-3,5
48,5	2,69	17	279	-25,6
14,5	2,79	21,3	185	-50,7
25	2,59	12,6	307	-18,1
25	2,02	-12,2	356	-5,1

Betonbezeichnung			A2-2	
SOLL-Dichte [kg/dm³]			2,26	
SOLL-Leimgehalt [dm³/m³]			388	
Länge der Probe [cm]	IST-Dichte der Probe [kg/dm³]	Abweichung zur SOLL-Dichte [%]	IST-Leimgehalt der Probe [dm³/m³]	Abweichung zum SOLL-Leimgehalt [%]
38	2,32	2,7	351	-9,5
22	2,71	19,9	256	-34,0
40	2,20	-2,7	392	1,0
Betonbezeichnung			C10	
SOLL-Dichte [kg/dm³]			2,35	
SOLL-Leimgehalt [dm³/m³]			310	
Länge der Probe [cm]	IST-Dichte der Probe [kg/dm³]	Abweichung zur SOLL-Dichte [%]	IST-Leimgehalt der Probe [dm³/m³]	Abweichung zum SOLL-Leimgehalt [%]
25	2,34	-0,4	301	-3,2
25	2,51	6,8	343	10,3
15	2,68	14	212	-31,8
20	2,31	-1,7	358	15,1

Es kann beobachtet werden, dass die gemessene Dichte im Bereich der Blockierung zum Teil deutlich von der SOLL-Dichte des unverdichteten Betongefüges abweicht; vgl. Abbildung 4-31 (a). Es werden Dichten von über 2,7 kg/dm³ erreicht, die nur entstehen können, wenn neben einer Leimabsonderung zusätzlich eine Entwässerung stattfindet. Die Betonproben nach der Blockierung zeigen demgegenüber einen deutlichen Abfall in der Dichte. Das lässt sich damit begründen, dass der Bereich nach der Blockierung durch eine Zementleim- und/oder Wasseraufnahme geprägt ist. Dies wird durch den zum Teil erhöhten Leimgehalt bestätigt; vgl. Abbildung 4-31 (b). Neben der erhöhten Dichte im Bereich der Blockierung ist das Betongefüge darüber hinaus durch einen geringen Leimgehalt gekennzeichnet, was den Anstieg in der Dichte begründet.



(a) (b)

Abbildung 4-31: Abweichung zur SOLL-Dichte (a) und Abweichung zum SOLL-Leimgehalt (b) der Betonproben aus dem blockierten Bereich der Förderleitung.

Es zeigt sich demnach, dass es im Bereich der Blockierung einerseits zu einer Verdichtung der Gesteinskörnung kommt und dass darüber hinaus eine Entwässerung der Betonfront

stattfindet. Eine Entwässerung kann nur durch einen Druckgradienten ausgelöst werden. Dieser Zusammenhang weist auf die Bildungsmechanismen einer Blockierung hin. Demnach tritt in einem ersten Schritt infolge von Entmischung eine Verzahnung der Gesteinspartikel auf. Dadurch erhöht sich der Reibwiderstand in diesem Bereich, wodurch sich ein erhöhter Druck vor der Blockierung (in Richtung der Pumpe) aufbaut. So bildet sich ein ausgeprägter Druckgradient in Fließrichtung. Der durch die Verzahnung der Gesteinskörnung ausgelöste Druckgradient führt in einem zweiten Schritt zur Entwässerung der Betonfront, was eine zusätzliche Verdichtung (Erhöhung der Feststoffkonzentration) hervorruft. Die zusätzliche, infolge der Entwässerung stattfindende Verdichtung stellt eine irreversible Blockierung der Förderleitung dar. Sie lässt den Druck schrittweise bis an die Leistungsgrenze der Pumpe ansteigen, was durch Abbildung 4-32 veranschaulicht wird.

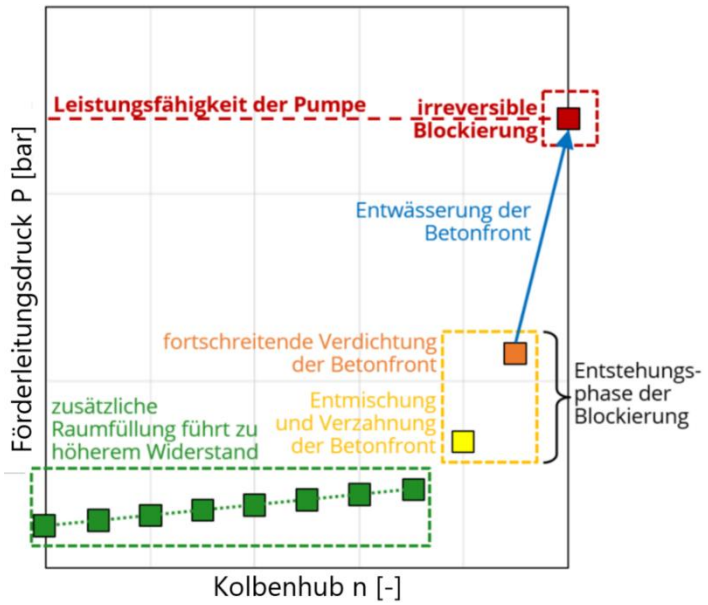


Abbildung 4-32: Schematische Darstellung des Förderleitungsdrucks im Kolbenhubverlauf beim Eintritt einer Verzahnung bis hin zur irreversiblen Blockierung infolge zusätzlicher Entwässerung.

4.2.6 Identifizierung von Blockierungen mittels Hydrauliköldruck-Zeit-Verlauf

Blockierungen der Förderleitung können bislang nicht vorhergesagt werden. Eine Methode zum frühzeitigen Erkennen einer Blockierung während des Pumpbetriebs würde die Einleitung einschlägiger Gegenmaßnahmen ermöglichen und hiermit für die Praxis ein wirkungsvolles Instrument darstellen. Da im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts eine Vielzahl von Blockierungen experimentell beobachtet und wissenschaftlich dokumentiert wurden, bot sich durch die erhobenen Messdaten erstmalig die Möglichkeit, die Blockierungsbildung durch entsprechende Messtechnik zeitaufgelöst zu beobachten und verallgemeinerbare Zusammenhänge zur Bildung von Blockierungen aufzudecken.

Da in der Praxis keine Druckmessung in der Förderleitung zweckmäßig erscheint, wurde der von der Pumpe aufgebrachte Hydrauliköldruck im Zeitverlauf aufgezeichnet. Zur Messung des Hydrauliköldrucks wurde ein elektronischer Druckmessumformer des Herstellers HYDAC (Messbereich des Sensors zwischen 0 bar und 600 bar) verwendet. Der Druckmessumformer wurde mit einem Minimess-Adapter an das Wartungsventil des Hochdrucks der Betonpumpe angeschlossen; vgl. Abbildung 4-33.

Auf diese Weise kann der Hydrauliköldruck der gängigsten Pumpen in der Praxis messtechnisch erfasst werden [Mikhalev – 2021]. Der Hydrauliköldruck wurde mit einer Messrate von 50 Hz während der Pumpversuche im Technikum aufgezeichnet. Ziel der durchgeführten Messungen war es, anhand des Hydrauliköldruck-Zeit-Verlaufs zu quantifizieren, wie sich das Eintreten einer Blockierung der Förderleitung auf den Hydrauliköldruck auswirkt und ob sich Blockierungen der Förderleitung im Hydrauliköldruck-Zeit-Verlauf ankündigen.

Abbildung 4-33: Foto der Betonpumpe (links) und Anschluss des Druckmessumformers im Motorraum der Betonpumpe (rechts) [Fotos: Mikhalev].

In Abbildung 4-34 wird ein Ausschnitt eines Hydrauliköldruck-Zeit-Verlaufs während eines Kolbenhubs exemplarisch gezeigt.

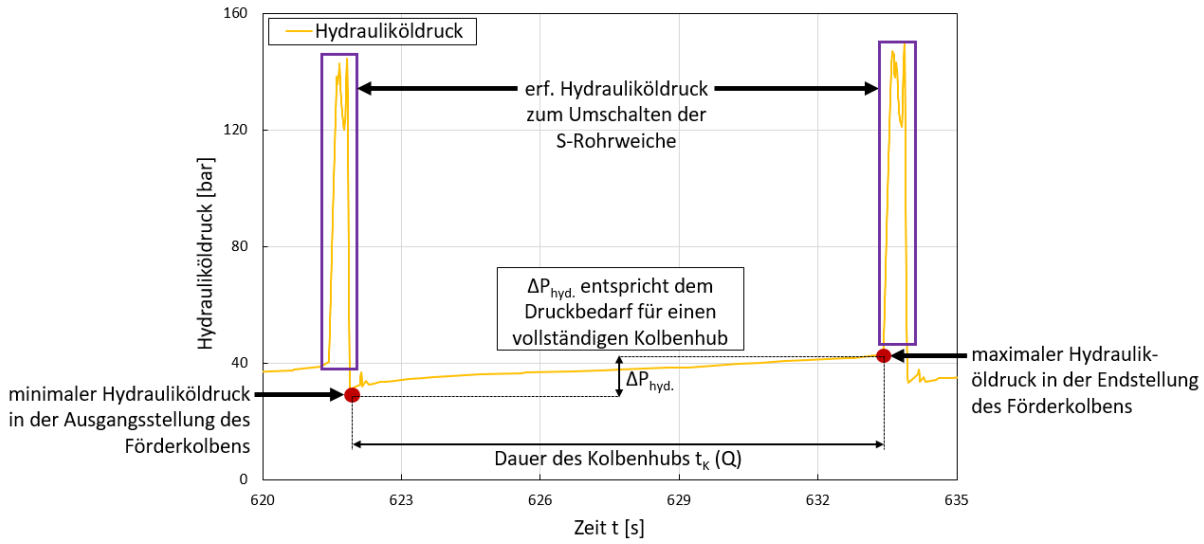


Abbildung 4-34: Hydrauliköldruck-Zeit-Verlauf eines Kolbenhubs zur Berechnung des Druckbedarfs [Cotardo – 2023].

Es kann beobachtet werden, dass der Hydrauliköldruck während eines Kolbenhubs ausgehend von einem Minimum (Hydrauliköldruck in der Ausgangsstellung des Förderkolbens) auf ein Maximum (Hydrauliköldruck in der Endstellung des Förderkolbens) ansteigt. Die sprunghaften Ausschläge vor und nach dem abgebildeten Kolbenhub kommen durch das Umschalten der S-Rohrweiche zustande, da die Förderzylinder und die S-Rohrweiche abhängig vom Typ der Pumpe über denselben Hydraulikkreislauf gesteuert werden.

Die Messwerte des Hydrauliköldruck-Zeit-Verlaufs sämtlicher Kolbenhübe während des initialen Anpumpens wurden herangezogen, um den Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ für einen vollständigen Kolbenhub zu bestimmen. Der Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ stellt die Differenz zwischen dem maximalen Hydrauliköldruck in der Endstellung des Förderkolbens und dem minimalen Hydrauliköldruck in der Ausgangsstellung des Förderkolbens dar. Der sich so berechnende Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ stellt integral den Gesamtwiderstand der Betonsäule in der Förderleitung dar, der dem Förderzylinder während der Vorwärtsbewegung entgegengebracht wird. Der Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ ist abhängig vom Volumen des Förderzylinders V_z, vom Durchmesser der Förderleitung D_L, von den rheologischen Eigenschaften des Betons (τ_0, μ) und ggf. eines zusätzlichen, durch die Dichte ρ des Betons bestimmten hydrostatischen Anteils. Damit ist der Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ sowohl von den spezifischen Eigenschaften der Pumpe und der Pumpleitung als auch von den Eigenschaften des Betons abhängig. Da während des initialen Anpumpens mit jedem Kolbenhub eine zusätzliche Raumfüllung der Förderleitung stattfindet (in Abhängigkeit von V_z und D_L), steigt der Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ mit jedem weiteren Kolbenhub linear an, sofern sich die rheologischen Eigenschaften des Betons nicht verändern und kein zusätzlicher hydrostatischer Anteil infolge vertikal nach oben führender Förderung hinzukommt. Im Umkehrschluss bedeutet dies gleichzeitig, dass sich eine Änderung der rheologischen Eigenschaften des Betons beispielsweise infolge von Entmischungen im Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ bemerkbar machen, da der Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ direkt mit dem rheologischen Verhalten des Betons in der Förderleitung gekoppelt ist.

In Abbildung 4-35 sind beispielhaft Druckbedarfe im Kolbenhubverlauf eines Pumpversuchs ohne (a) und mit Eintreten einer Blockierung (b) dargestellt.

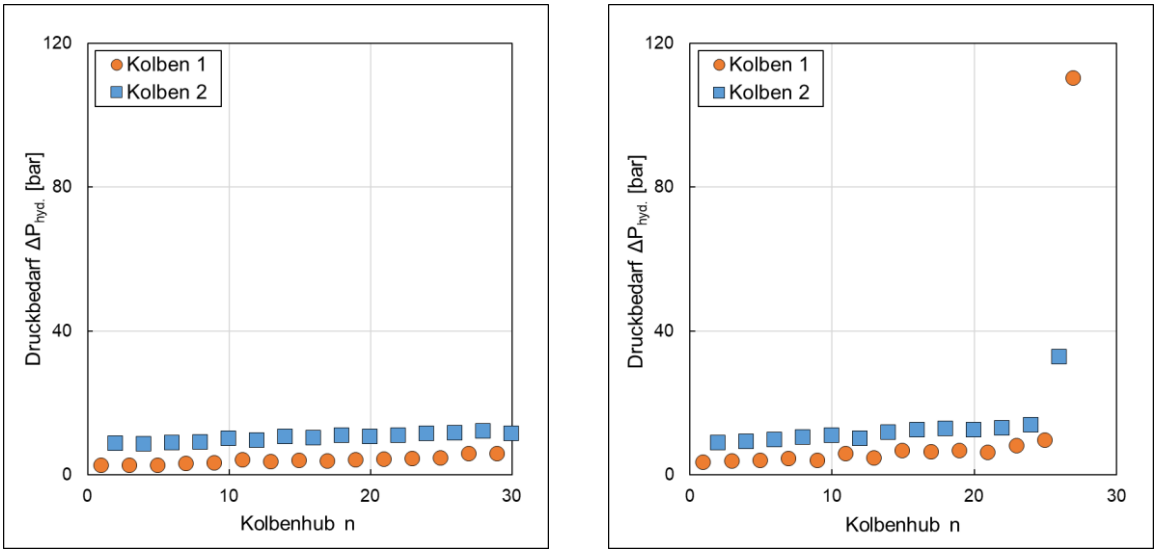


Abbildung 4-35: Druckbedarfe je Kolbenhub: Kurvenverlauf eines Pumpversuchs ohne Blockierung (a) und mit Blockierung (b) der Förderleitung [Cotardo – 2023].

Es kann beobachtet werden, dass der Druckbedarf infolge zusätzlicher Raumfüllung der Förderleitung näherungsweise linear zunimmt. Beim Eintreten einer Blockierung (vgl. Abbildung 4-35 (b)) steigt der Druckbedarf innerhalb weniger Kolbenhübe sprunghaft an, bis ein Maximum erreicht wird, das die Leistungsgrenze der Pumpe widerspiegelt. Das Erreichen der Leistungsgrenze stellt in der Folge eine (irreversible) Blockierung der Pumpleitung dar, was mit einem Stillstand der Betonsäule trotz vorherrschenden Druckgradienten einhergeht. Infolge des überproportionalen Druckaufbaus in der Förderleitung kommt es zu einer voranschreitenden Verdichtung des blockierten Betongefüges, was den Reibungswiderstand, der dem Förderkolben in seiner Vorwärtsbewegung entgegengebracht wird, zusätzlich erhöht. Die Druckmessungen innerhalb der Förderleitung belegen, dass ein ausgeprägter Druckgradient innerhalb der blockierten Betonfront entsteht, der eine Entwässerung des selbigen auslöst, was einer zusätzlichen Verdichtung (Erhöhung der Feststoffkonzentration) gleichkommt.

Es kann darüber hinaus beobachtet werden, dass ein Anstieg des Druckbedarfs bis zum Erreichen der Leistungsgrenze der Pumpe nicht plötzlich und unmittelbar stattfindet, sondern dass ein schrittweiser Anstieg erfolgt. Damit zeigt sich, dass sich Blockierungen in einem überproportionalen Anstieg im Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ schrittweise ankündigen. Diese Erkenntnis deutet auf den Nutzen hin, den Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ als Indikator für eine drohende Blockierung heranzuziehen. Damit kann der Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ einen brauchbaren Kennwert bilden, um Blockierungen während des Pumpbetriebs frühzeitig erkennen zu können.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die absoluten Druckbedarfe $\Delta P_{hyd.}$ der einzelnen Förderkolben einer Doppelkolbenpumpe voneinander abweichen können. Dies lässt sich durch Undichtigkeiten an der Verschleißbrille, die den Übergang zwischen Förderzylinder und S-Rohrweiche darstellt, erklären. Diese können je nach Verschleißzustand variieren. Solche Undichtigkeiten können dazu führen, dass neben dem sich ausbildenden Druckgradienten innerhalb der blockierten Betonfront zusätzlich ein Druckgradient zwischen dem Betongefüge im Förderzylinder und dem Beton im Aufgabetrichter entsteht. Dieser Druckgradient resultiert in einer Entwässerung und damit Verdichtung des Betongefüges im Förderzylinder, was den Reibungswiderstand bereits im Förderzylinder drastisch erhöhen kann. Aus maschinentechnischer Sicht führt eine solche Blockierung im Förderzylinder dazu, dass bereits in den Förderzylindern keinerlei Bewegung stattfinden kann und damit ein Umschalten der S-Rohrweiche ausbleibt; die Endstellung des Förderkolbens wird nicht erreicht. Dadurch ist auch das Pumpen in Saugstellung (rückwärtsgerichtete Kolbenbewegung) nicht möglich, was ein aufwändiges Reinigen der Förderzylinder voraussetzt, um massive Schäden an der Pumpe zu verhindern. Die unausweichliche Folge ist der Abbruch des Pumpprozesses für einen längeren Zeitraum, was mit erheblichen Ausfallzeiten im Bauprozess einhergeht.

Zuletzt ist anzumerken, dass ein Anstieg des Druckbedarfs $\Delta P_{hyd.}$ infolge zusätzlicher Raumfüllung nicht streng linear verläuft, sondern gewisse Streuungen ausgehend von der Arbeitsweise des Hydrauliksystems auftreten können, die als unkritisch zu bewerten sind, also kein Indiz für eine Blockierung darstellen. Damit stellt sich die Frage, welcher Anstieg im Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ eine Blockierung ankündigt und welcher Anstieg unkritisch ist.

Da sämtliche Randbedingungen einer Pumpaufgabe (Förderzylindergeometrie, Förderleitungsgeometrie und Eigenschaften des Betons) Einfluss auf den resultierenden Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ nehmen, kann zwar eine Blockierung qualitativ für jeden einzelnen

Pumpversuch identifiziert werden, jedoch ist der absolute Wert des Druckbedarfs $\Delta P_{hyd.}$ nicht als Kennwert für eine verallgemeinerbare quantitative Identifizierung einer Blockierung geeignet. Folglich war es erforderlich, aufbauend auf dem Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ einen Kennwert abzuleiten, der in der Lage ist, variierende Randbedingungen einer Pumpaufgabe zuverlässig zu berücksichtigen. Weiterhin ist es erforderlich, dass unkritische Streuungen sowie variierende Undichtigkeiten an der Verschleißbrille zusätzlich berücksichtigt werden.

Zunächst war es das Ziel, einen Kennwert herzuleiten, der die zuvor beschriebenen Anforderungen erfüllt. Darauf aufbauend wurde ein statistisch abgesicherter Grenzwert bestimmt, der bei Überschreitung eine Blockierung induziert. Zusätzlich wurden die Hydrauliköldruck-Zeit-Verläufe hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften untersucht, mit dem Ziel, Systematiken zu erkennen und Zusammenhänge hinsichtlich des Auftretens einer Blockierung aufzudecken.

Herleitung eines Kennwertes

Auf der Grundlage des bereits beschriebenen Druckbedarfs $\Delta P_{hyd.}$ wurde ein Blockierungsparameter B definiert, mit dem der IST-Zustand des Betons in der Förderleitung quantifiziert werden kann. Der Blockierungsparameter B stellt einen prozentualen Wert dar und ist wie folgt definiert:

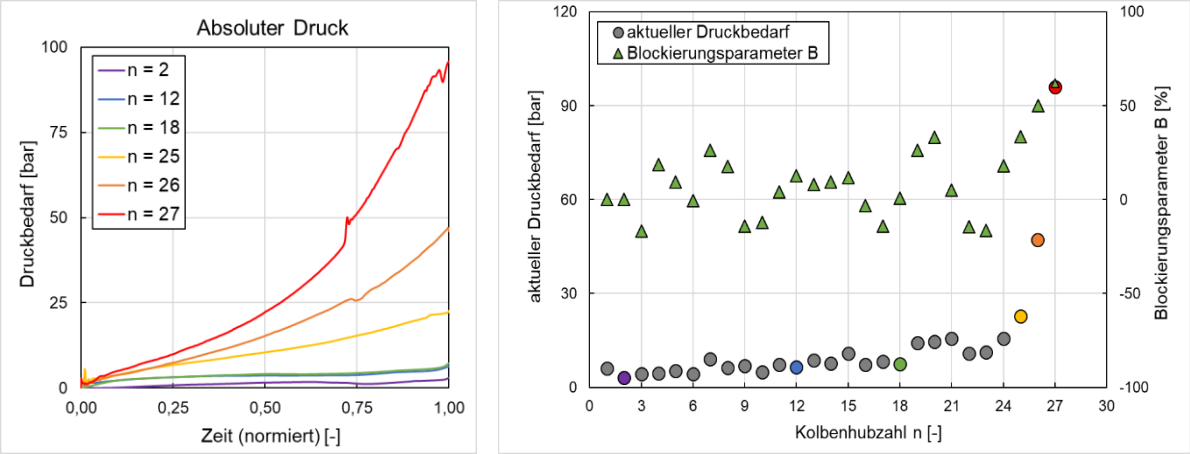
$$B = \left(\frac{\Delta P_n}{\Delta \overline{P}_n} - 1\right) \cdot 100 \tag{4-2}$$

ΔP_n ist der aktuell gemessene Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$. $\Delta \overline{P}_n$ stellt hingegen den Mittelwert aus dem aktuellen Druckbedarf ΔP_n und dem vorangegangenen Druckbedarf ΔP_{n-1} desselben Förderzylinders dar.

$$\Delta \overline{P}_n = \frac{\Delta P_n + \Delta P_{n-1}}{2} \tag{4-3}$$

Der Bezug zum selben Förderzylinder berücksichtigt auf diese Weise Unterschiede im Druckbedarf der einzelnen Förderzylinder infolge von Undichtigkeiten an der Verschleißbrille; vgl. Abbildung 4-35. Durch die Bildung des Mittelwerts wird der Einfluss unkritischer Streuungen im resultierenden Druckbedarf auf die Berechnung des Blockierungsparameters B abgemindert, sodass die Wahrscheinlichkeit verringert wird, dass unkritische Streuungen eine Blockierung vortäuschen. Der Blockierungsparameter B ist damit zwar abhängig vom absoluten Hydrauliköldruck und nimmt mit steigendem absoluten Hydrauliköldruck ab, spiegelt aber einen stetigen Anstieg im Druckbedarf wider und reagiert gering auf unkritische Streuungen. Die Sensibilität des Blockierungsparameters B ist umso größer je geringer der absolute Hydrauliköldruck ist, demnach beim Beginn des Pumpprozesses und für Betone, die einen geringen Pumpwiderstand aufweisen und deswegen erfahrungsgemäß stärker zur Entmischung neigen, weil sie eine geringe Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität μ aufweisen. Die hohe Sensibilität für geringe Druckwerte ist für die Identifikation von Blockierungen für den Betriebszustand des initialen Anpumpens besonders vorteilhaft.

Auf Abbildung 4-36 wird der Zusammenhang zwischen dem aktuellen Druckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ und dem Blockierungsparameter B beispielhaft für einen Pumpversuch dargestellt, bei dem eine Blockierung aufgetreten ist.



(a) (b)

Abbildung 4-36: Aktueller Druckbedarf im normierten Zeitverlauf ausgewählter Kolbenhübe (a) und aktueller Druckbedarf und Blockierungsparameter im Kolbenhubverlauf (b) [Cotardo – 2023].

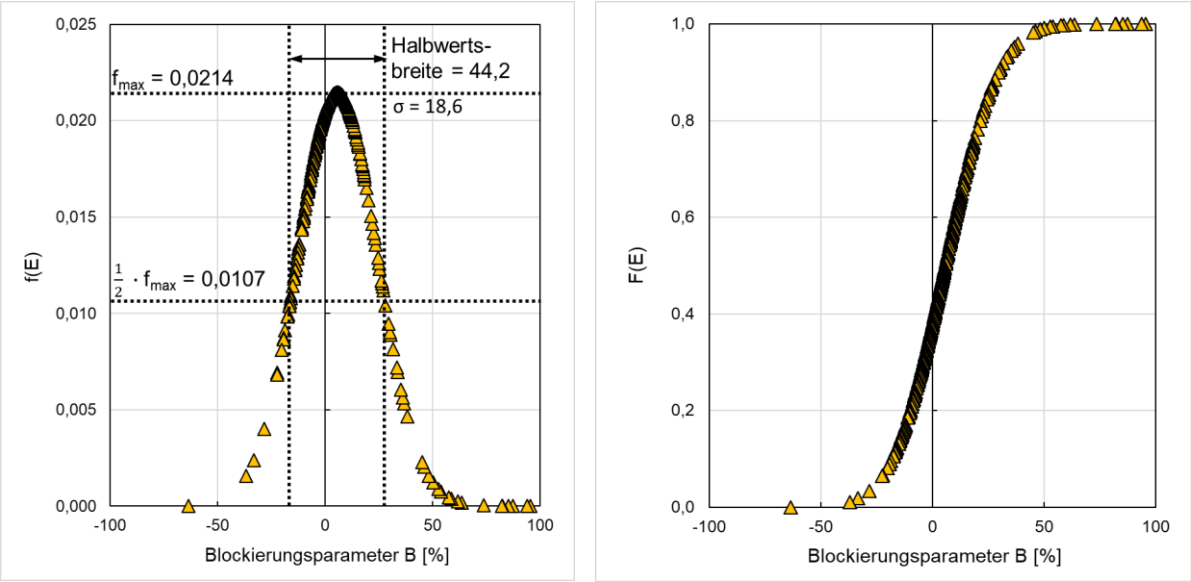
Auf Abbildung 4-36 (a) ist der aktuelle Druckbedarf (im Folgenden als ΔP_n bezeichnet) je Kolbenhub n im Zeitverlauf (normiert) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Druckbedarf ΔP_n beim Eintreten einer Blockierung (n = 25) überproportional ansteigt. Auf Abbildung 4-36 (b) sind demgegenüber der aktuelle Druckbedarf ΔP_n sowie der sich nach Gleichung 4-2 berechnete Blockierungsparameter B im Kolbenhubverlauf bis zum Ende des Pumpversuchs (Eintritt einer irreversiblen Blockierung) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der aktuelle Druckbedarf ΔP_n mit zunehmender Raumfüllung bis zum Eintreten der Blockierung näherungsweise linear ansteigt und dass gewisse Streuungen zu beobachten sind.

Der Blockierungsparameter B zeigt, in Abhängigkeit vom aktuellen Druckbedarf ΔP_n, deutliche Streuungen auf und nimmt sowohl positive als auch negative Werte an. Beim Eintreten der im Experiment hervorgerufenen Blockierung (ab dem 25. Kolbenhub) beginnen sowohl der aktuelle Druckbedarf ΔP_n als auch der Blockierungsparameter B monoton anzusteigen, was numerisch die Blockierung ankündigt.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen ist es zuletzt erforderlich für den Blockierungsparameter B einen Grenzwert zu bestimmen, der zuverlässig eine Blockierung ankündigt.

Bestimmung eines Grenzwerts auf Grundlage des Blockierungsparameters B

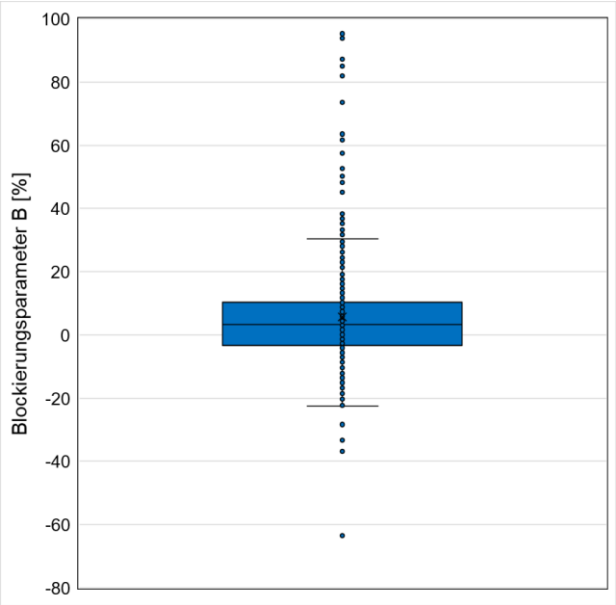
Zur Identifikation einer Blockierung der Förderleitung im Pumpbetrieb und insbesondere während des initialen Anpumpens wird im Folgenden ein Grenzwert $B_{Grenz.}$ statistisch bestimmt. Dazu werden sämtliche Messwerte aus den Technikum-Pumpversuchen herangezogen (vgl. Abbildung 4-37).



(a) (b)

Abbildung 4-37: Dichte- (a) und Verteilungsfunktion (b) der berechneten Blockierungsparameter für sämtliche Kolbenhübe aus den Technikum-Pumpversuchen [Cotardo – 2023].

Anhand von Abbildung 4-37 wird deutlich, dass die Dichtefunktion f(E) des Blockierungsparameters B näherungsweise einer Normalverteilung folgt (Halbwertsbreite = 44,2 ~ 2,4 · σ = 44,6). Negative Werte kommen vor allem durch unkritische Streuungen zustande, positive Werte hingegen auch durch den Anstieg des Blockierungsparameters B infolge einer drohenden Blockierung. Auf der Grundlage der Datenbasis wurde ein Grenzwert $B_{Grenz.}$ statistisch mithilfe eines Box-Whisker-Plots, der als Ausreißertest dient, bestimmt; vgl. Abbildung 4-38.



Streuungs- und Lageparameter	Blockierungsparameter B [%]
Minimum	-63,50
Quartil 1	-3,28
Median	3,23
Quartil 3	10,33
Maximum	95,34
Interquantilabstand IQA	13,61
1,5 · IQA	20,41
Obere Ausreißergrenze OA	30,74
untere Ausreißergrenze UA	-23,69
Grenzwert $B_{Grenz.}$	30,7

(a) (b)

Abbildung 4-38: Grafische Darstellung des Box-Plots (links) und die dazugehörigen Streuungs- und Lageparameter aus den Technikum-Pumpversuchen [Cotardo – 2023].

Die obere Ausreißergrenze (Summe aus 3. Quartil und 1,5-fachen Interquartilsabstand) stellt den Grenzwert für den Blockierungsparameter $B_{Grenz.}$ dar, der einen Wert von 30,7 % annimmt,

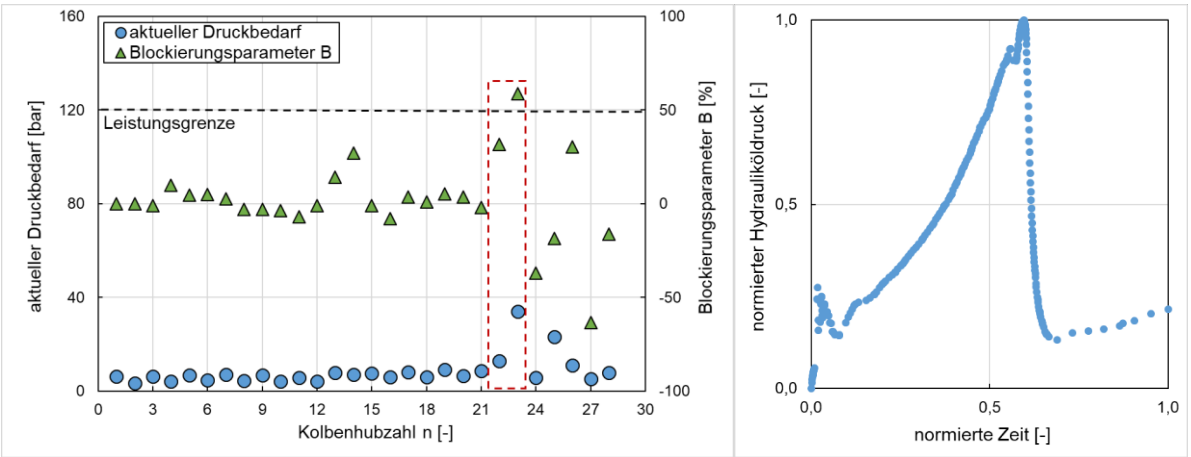
also ungefähr bei einem Drittel liegt. Demnach weisen Werte des Blockierungsparameters B von größer als 30,7 % daraufhin, dass eine Blockierung der Förderleitung eintritt. Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit des aufgestellten Grenzwertes $B_{Grenz.}$ erfolgt durch Tabelle 4-27 eine Gegenüberstellung der im Experiment unter der Verwendung von Pumpleitung 3 eingetretenen Blockierung und der durch die Überschreitung des Grenzwerts angezeigten Blockierung.

Tabelle 4-27: Gegenüberstellung der im Experiment unter der Verwendung von Pumpleitung 3 eingetretenen Blockierung und der durch eine Überschreitung des Grenzwerts induzierten Blockierung.

Bezeichnung des Betons	Blockierung im Experiment	Überschreitung des Grenzwerts $B_{Grenz.}$	Kolbenhub-Nr. bei Eintritt einer Blockierung	Kolbenhub-Nr. bei Überschreitung des Grenzwerts $B_{Grenz.}$
Referezbeton	nein	nein	-	-
A1	ja	ja	27	20, 25, 26, 27
A2-1	ja	ja	16	14, 15, 16
A2-2	ja	ja	19	17, 18, 19
A3	nein	nein	-	-
A4	ja	ja	23	22, 23, 26
B1	nein	nein	-	-
B2	nein	nein	-	-
C7	nein	nein	-	-
C8	nein	nein	-	-
C8-B	ja	ja	5	4, 5
C9	ja	ja	37	35, 36, 37
C10	ja	ja	32	30, 31, 32
C11	ja	ja	6	5, 6
C12	ja	ja	29	11, 29

Anhand der tabelarischen Gegenüberstellung wird deutlich, dass sämtliche im Experiment aufgetretenen Blockierungen durch eine Überschreitung des Grenzwertes $B_{Grenz.}$ gekennzeichnet sind. Es kann beobachtet werden, dass eine Überschreitung des Grenzwertes $B_{Grenz.}$ stets einige Kolbenhübe vor dem Eintreten einer Blockierung eintrat, was die Möglichkeit eröffnet, den Pumpprozess zu unterbrechen und Gegenmaßnahmen einzuleiten, die eine irreversible Blockierung der Förderleitung verhindern. Weiterhin kann beobachtet werden, dass in sämtlichen Pumpversuchen ohne Blockierung keine Überschreitung des Grenzwerts $B_{Grenz.}$ auftrat.

An einem Pumpversuch mit Beton A4 wird deutlich, dass nicht jede auftretende Verzahnung der Gesteinspartikel im Betongefüge (Erhöhung des Druckbedarfs) zu einer irreversiblen Blockierung führen muss (vgl. Abbildung 4-39).



(a) (b)

Abbildung 4-39: Aktueller Druckbedarf und Blockierungsparameter im Kolbenhubverlauf (a) und normierte Darstellung des Hydrauliköldruck-Zeit-Verlaufs des 23. Kolbenhubs (b) des Pumpversuchs mit dem Beton A4 [Cotardo – 2023].

Ein Blick in die Daten des durchgeführten Versuchs belegt, dass eine temporäre Blockierung innerhalb der Reduzierung (zwischen DS10 und DS11) eingetreten ist. Da die Pumpe ausreichend hohe Leistungsreserven aufwies, kam es zum „Durchrutschen" der blockierten Betonfront im Bereich der Reduzierung, sodass der Pumpversuch fortgesetzt werden konnte. Aus betontechnologischer Sicht kann davon ausgegangen werden, dass der hohe Fließmittelgehalt des A4-Betons eine entscheidende Rolle gespielt hat. Nachweislich sinkt mit steigendem Fließmittelgehalt die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$; vgl. Abbildungen 4-7 (b) sowie Tabelle 4-22. Das Anmachwasser weist aufgrund der Anreicherung von Fließmittelpolymeren eine erhöhte dynamische Viskosität η auf, wodruch eine höhere Menge an Bewegungsenergie durch den Impulsaustauch auf die Feststoffe übertragen werden kann. Ein Mitführen der Feststoffe in Förderrichtung kann auf diese Weise besser stattfinden (geringerer Geschwindigkeitsgradient zwischen Wasser und Feststoffen). Auf diese Weise sinkt das Risiko eines überproporionalen Druckaufbaus bis an die Leistungsgrenze der Pumpe, was das Risiko zur irreversiblen Blockierungsbildung reduziert.

Gegenmaßnahmen zur Restrukturierung eines blockierten Betongefüges

Nachdem eine Kenngröße (Blockierungsparameter B) und darauf aufbauend ein Grenzwert ($B_{Grenz.}$) zur Identifizierung von Blockierungen während des Pumpbetriebs hergeleitet wurden, stellt sich die Frage, welche Gegenmaßnahmen getroffen werden können, um eine irreversible Blockierung der Förderleitung in der Praxis zu verhindern. Da eine Überschreitung des hergeleiteten Grenzwerts $B_{Grenz.}$ in der Regel nicht plötzlich auftritt, sondern sich schrittweise ankündigt, besteht die Möglichkeit den Pumpprozess temporär zu unterbrechen, damit sich das blockierte Betongefüge infolge der stetigen Druckerhöhung und der dadurch ausgelösten zusätzlichen Entwässerung der Betonfront nicht zunehmend verdichtet.

Auf Abbildung 4-40 ist ein Pumpversuch mit Beton A1 zu sehen, bei dem sich eine Blockierung der Förderleitung durch den Anstieg des Förderleitungsdrucks und durch eine Überschreitung des Grenzwerts $B_{Grenz.}$ angekündigt hat.

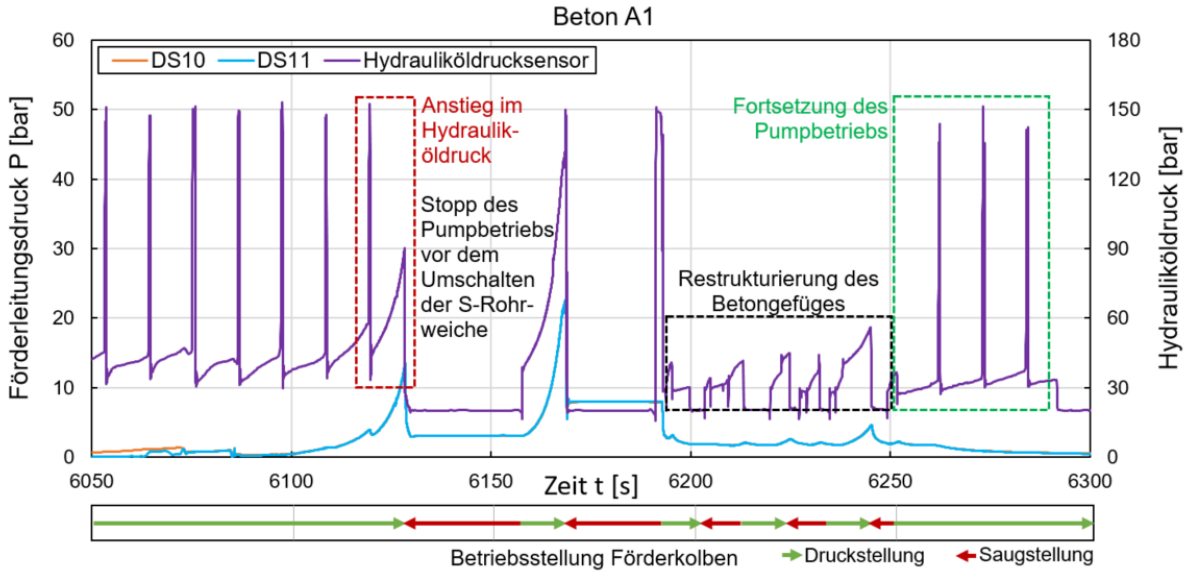


Abbildung 4-40: Förderleitungsdruck und Hydrauliköldruck im Zeitverlauf eines Pumpversuchs mit Eintritt einer Blockierung und Anpassung der Pumpregie zur Restrukturierung des blockierten Betongefüges und der daran anschließenden Fortsetzung des Pumpbetriebs [Cotardo – 2023].

Im Experiment konnte der Anstieg des Drucks in der Förderleitung frühzeitig erkannt und ein Stopp des Pumpbetriebs noch vor dem Umschalten der S-Rohrweiche erzwungen werden. Im Folgenden wurde in die Pumpregie eingegriffen und die Förderkolben wurden von Druck- in Saugstellung gebracht. Der Wechsel zwischen Druck- und Saugstellung wurde mehrmalig wiederholt. Der alternierende Wechsel zwischen Druck- und Saugstellung führte in wenigen Schritten dazu, dass der Druckgradient in der Förderleitung abgebaut wurde. Der dadurch entstandene Gegendruck gegenüber der Atmosphäre (ΔP_{max}<1 bar) führte zur Restrukturierung des blockierten Betongefüges zwischen den Drucksensoren DS10 und DS11. In der Folge konnte die Blockierung gelöst und der Pumpbetrieb fortgesetzt werden. Diese Maßnahme wurde bei drei Pumpversuchen (A1, C9 und C12) durchgeführt und erfolgreich angewandt. Bei den drei Pumpversuchen, bei denen mit Hilfe der angepassten Pumpregie durch den mehrmaligen Wechsel zwischen Druck- und Saugstellung eine Restrukturierung des Betongefüges und damit eine Fortsetzung des Pumpbetriebs erwirkt wurde, betrug die Unterbrechung des Pumpbetiebs wenige Minuten. Demgegenüber betrugen die Unterbrechungen des Pumpbetriebs bei Pumpversuchen, bei denen die Blockierung aufwendig durch das Öffnen der Förderleitung gelöst werden musste, zwischen 30 min und 60 min. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Prozess in der Praxis deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt (Ortung der Blockierung und Zugänglichkeit im Experiment einfacher), was neben der Gefahr eines dauerhaften Schadens an der Förderleitung und des Pumpaggregats auch mit erheblichen Ausfallzeiten und Einbußen in der Bauteilqualität einhergeht.

Das beschriebene Vorgehen zur Restrukturierung des blockierten Betongefüges, durch den alternierenden Wechsel zwischen Druck- und Saugstellung der Förderkolben, funktioniert nachweislich, sofern sich der Hydrauliköldruck nicht bis zur Leistungsgrenze aufgebaut hat.

In Abbildung 4-41 wird ein Beispiel eines Pumpversuchs mit Beton A2-1 gezeigt, bei dem sich zwar eine Blockierung der Förderleitung durch die Überschreitung des Grenzwerts $E_{Grenz.}$ frühzeitig angekündigte jedoch keine Gegenmaßnahme erfolgte. Als Folge baute sich der Hydrauliköldruck bis zur Leistungsgrenze der Pumpe auf.

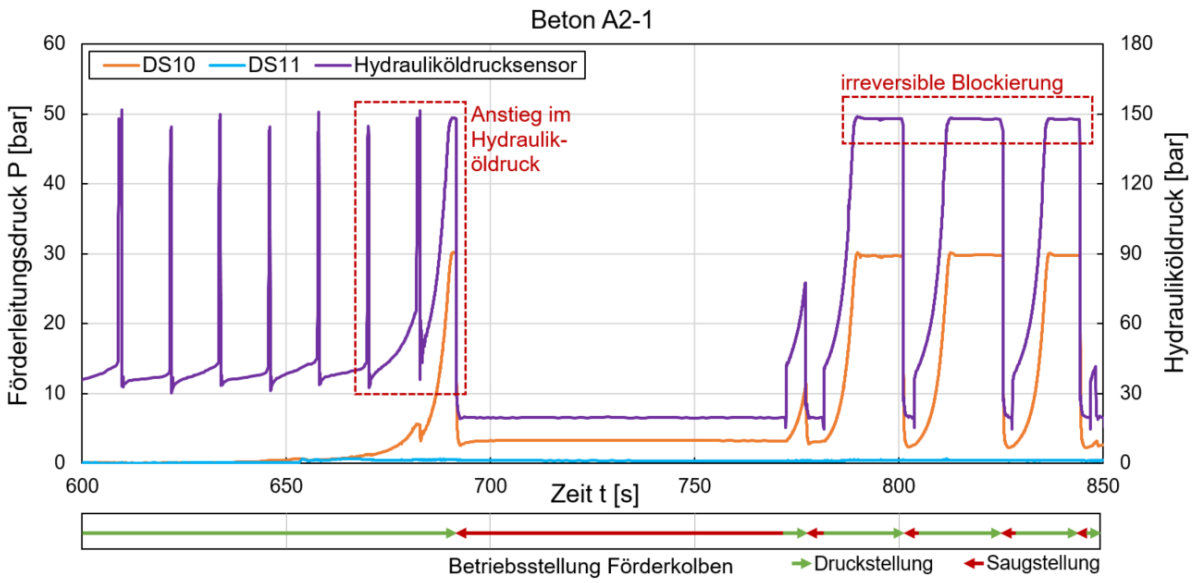


Abbildung 4-41: Förderleitungsdruck und Hydrauliköldruck im Zeitverlauf eines Pumpversuchs mit Eintritt einer irreversiblen Blockierung durch das Erreichen der Leistungsgrenze [Cotardo – 2023].

Das Erreichen der Leistungsgrenze stellt eine irreversible Blockierung der Förderleitung dar, da der Druckgradient zusätzlich zur Entwässerung der Betonfront geführt haben muss und der Reibungswiderstand des blockierten Betongefüges in der Folge drastisch angestiegen ist. Obwohl eine Blockierung durch einen Anstieg des Förderleitungsdrucks im Experiment erkannt wurde und ein Stopp der Pumpe erzwungen wurde, bestand nicht mehr die Möglichkeit die Blockierung in der Förderleitung durch Anpassung der Pumpregie zu lösen.

Auch wenn die Anwendung der hier beschriebenen Maßnahme zur Restrukturierung eines blockierten Betongefüges in der Förderleitung nur exemplarisch an wenigen Pumpversuchen durchgeführt werden konnte, so zeigt sich dennoch, dass es möglich ist den Pumpbetrieb auf diese Weise erfolgreich fortzusetzen, ohne dass durch das Öffnen der Förderleitung lange Ausfallzeiten entstehen.

Das hier beschriebene Verfahren zur frühzeitigen Erkennung einer drohenden Blockierung und die anschließende Maßnahme zur Restrukturierung des blockierten Betongefüges durch alternierende Druck- und Saugstellung der Förderkolben wurde zum Patent (Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2022 116 603.1) angemeldet.

4.2.7 Analysen der Sliper-Prognosen

Die mittels Sliper-Gerät generierten Messdaten wurden im Rahmen einer Regressionsanalyse verarbeitet. Die Messdaten auf dem P-Q-Diagramm stellen die Koeffizienten der Trendlinie dar, aus der sich die Parameter des dynamischen Anteils der betrachteten Sliper-Messung berechnen lässt. Weisen die Messdaten keine ausreichende Linearität auf, dann äußert sich das auch in der Prognosegenauigkeit des Gleitrohr-Rheometers. Um Messwertstreuungen zu erfassen und mögliche Abweichungen innerhalb der durchgeführten Untersuchungen mit dem Gleitrohr-Rheometer zu erkennen, wurde der Grad der Bestimmtheit R^2 ermittelt. Der Bestimmtheitsgrad R^2 gibt Auskunft über die Linearität der Messwerte einer Sliper-Untersuchung und kann als Indikator für die Plausibilität vorliegender Messergebnisse herangezogen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass dieser Parameter keine direkten Rückschlüsse auf die Prognosegenauigkeit des Sliper-Gerätes zulässt.

In Abbildung 4-42 sind die P-Q-Diagramme zweier verschiedener Betonmischungen dargestellt, die parallel mit zwei Gleitrohr-Rheometern gemessen wurden.

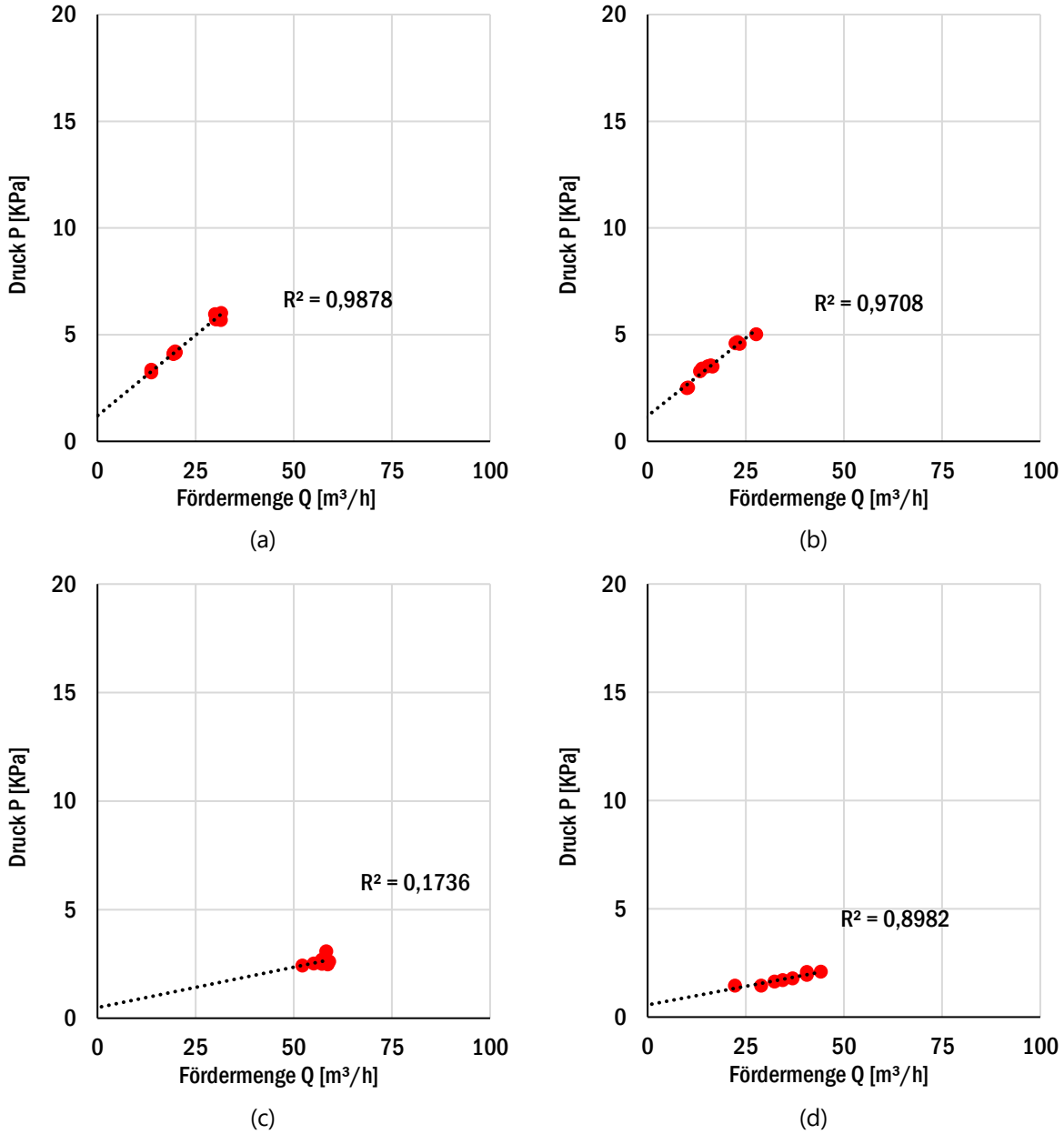


Abbildung 4-42: P-Q-Diagramme aus Sliper-Messungen (a) Messung Ref_1 Sliper-TUD: hohe Linearität und gute Messbarkeit der Probe (b) Messung Ref_1 Sliper-Zweitgerät-Schleibinger: hohe Linearität und gute Messbarkeit der Probe (c) Betonmischung B2 Sliper-TUD: geringe Linearität (d) Betonmischung B2 Sliper-Zweitgerät-Schleibinger: hohe Linearität.

Bei der Messung der Referenz-Betonmischung konnten mit beiden Geräten vergleichbare Förderdruckprognosen generiert werden. Die Streuung der Ergebnisse war bei den Messungen an den Referenz-Betonmischungen sehr niedrig. Bei der Messung der Betonmischung B2 fällt auf, dass die Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer der TUD (d) ein deutlich geringeres Bestimmtheitsmaß R^2 aufweist. Bei den Frischbetonuntersuchungen der Betonmischung B2 wurde eine besonders weiche Konsistenz (Ausbreitmaß - 745 mm), eine hohe Blutungsrate sowie eine hohe Sedimentationsneigung festgestellt. Dennoch konnte auch diese Betonmischung mit einem der zwei Gleitrohr-Rheometer mit verhältnismäßig hohem Bestimmtheitsmaß untersucht werden. Die Unterschiede ergeben sich unter anderem aus der

Betonprobenentnahme. Die Streuung der Betonprobeneigenschaften bei der Entnahme aus einer stark sedimentierenden Betonmischung erschwert eine realistische Abbildung der Betoneigenschaften. Eine hohe Entmischungsneigung wirkt sich negativ auf die Genauigkeit der Förderdruckprognosen mit dem Gleitrohr-Rheometer aus.

Während ein hoher Bestimmtheitsgrad R^2 somit nicht zwangsläufig eine genauere Förderdruckprognose zur Folge hat, kann bei einem geringen Bestimmtheitsmaß R^2 davon ausgegangen werden, dass die Messung nicht störungsfrei abgelaufen ist. Dies lässt jedoch keinen unmittelbaren Rückschluss auf die Pumpbarkeit einer Mischung zu. Die Erfahrungen der Forschungsgruppe zeigen, dass es sinnvoll sein kann eine Mischung, deren Messung zu einem geringem Bestimmtheitsmaß (R^2 kleiner 0,80) im Gleitrohr-Rheometer führt, kritisch zu prüfen und die Messung gegebenenfalls zu wiederholen. In Abbildung 4-43 sind die P-Q-Diagramme der Gleitrohr-Rheometer-Messungen zweier unterschiedlicher Chargen der Betonmischung C11 zu sehen. Während die Charge der Betonmischung C11 am 07.06.2021 ohne weiteres pumpbar war, führte die Charge der Betonmischung C11 am 25.06.2021 zu einer Blockierung der Pumpleitung. Zudem wies die Sliper-Messung der Charge vom 07.06.2021 eine hohe Linearität auf, während die Messung der Charge vom 25.06.2021 zu einer geringen Linearität und einem geringen Bestimmtheitsmaß führte. Die Chargen unterschieden sich dahingehend, dass die letztere einen deutlich reduzierten Leimgehalt aufwies. In diesem Fall konnte bereits anhand der Linearität der Gleitrohr-Rheometer-Messung erkannt werden, dass die Mischung zu Komplikationen beim Pumpen führen kann. Es ist an dieser Stelle wichtig zu betonen, dass sich die Linearität der Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer nur als Indikator für die Einordnung der Pumpbarkeit einer Mischung eignet.

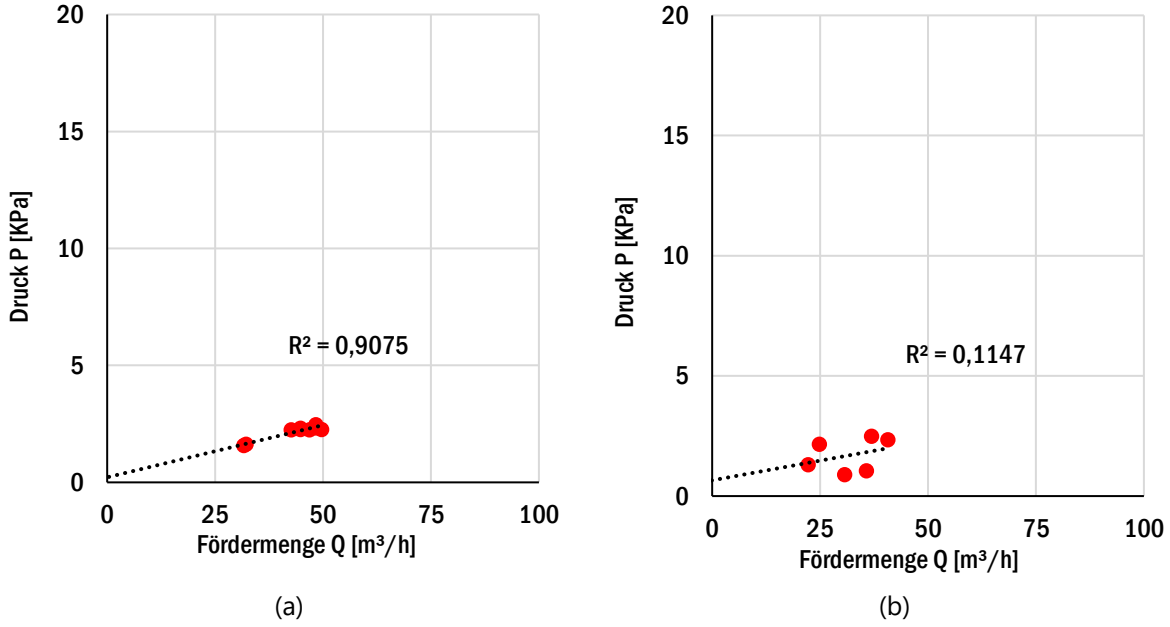


Abbildung 4-43: Ergebnisse aus Messungen (a) am 07.06.2021 Messung C11 Sliper-TUD: hohe Linearität und gute Messbarkeit der Probe, Mischung pumpbar; (b) am 25.06.2021 Messung C11 Sliper-TUD: geringe Linearität und Verzerrung der Messung, Blockierung der Pumpleitung

Es kann zudem durchaus vorkommen, dass die Extrapolation der Regressionsgerade auf die P-Achse im P-Q-Diagramm einen negativen Wert ergibt, obwohl eine Messung eigentlich ungestört verlaufen ist. Dies ist zum Beispiel bei der Messung C7_1 der Fall, siehe Tabelle 4-34. Dies ist insoweit relevant, dass die Förderdruckprognosen mit dem Gleitrohr-Rheometer unter Verwendung zweier Beiwerte der Messungen berechnet werden. Zum einen aus dem Beiwert

der Fließgrenze *a*, zum anderen aus dem Beiwert *b* der Viskosität. Der Beiwert *a* wird mit Hilfe der o.g. Extrapolation ermittelt.

Um Vorhersagen bezüglich des benötigten Förderdruckes treffen zu können, werden zunächst beide Beiwerte *a* und *b* jeder untersuchten Charge bestimmt und ausgewertet, siehe Gleichung 3-1. Sie bilden die Basis für die Berechnung der Sliper-Prognosen und werden nachfolgend, gemeinsam mit den Bestimmtheitsgraden R^2 der zugehörigen Messungen, dargestellt. Es wurden mehr Werte mit dem Zweitgerät generiert als mit dem Sliper der TU Dresden, weil dieses vor Beendigung aller Versuchsreihen ausfiel. In Tabelle 4-28 sind die Ergebnisse aus der Analyse der P-Q-Diagramme der Sliper-Untersuchungen verschiedener Chargen der Referenzbetonmischung mit dem Gleitrohr-Rheometer der TU Dresden zusammengefasst.

Tabelle 4-28: Ergebnisse aus Sliper-Messungen mit Gerät der TU Dresden – Referenzmischung Ref.

Vor dem Pumpen	Fließgrenzbeiwert *a* [Pa]	Viskositätsbeiwert *b* [Pa·s/m]	Bestimmtheitsmaß R^2 [-]
Ref_1_PL1	88	396	0,99
Ref_2_PL1	140	547	0,99
Ref_3_PL1	55	638	0,97
Ref_1_PL2	111	346	0,95
Nach dem Pumpen			
Ref_1_PL1	118	445	0,99
Ref_2_PL1	132	667	0,94
Ref_3_PL1	115	599	0,98
Ref_1_PL2	Gerät ausgefallen – keine Messung möglich		

In Tabelle 4-29 sind die Messungen aus den parallel durchgeführten Versuchen mit dem Zweitgerät abgebildet.

Tabelle 4-29: Ergebnisse aus Sliper-Messungen mit Zweitgerät von Schleibinger – Referenzmischung.

Vor dem Pumpen	Fließgrenzbeiwert *a* [Pa]	Viskositätsbeiwert *b* [Pa·s/m]	Bestimmtheitsmaß R^2 [-]
Ref_1_PL1	79	396	0,97
Ref_2_PL1	60	841	0,85
Ref_3_PL1	51	559	0,99
Ref_1_PL2	197	232	0,95
Nach dem Pumpen			
Ref_1_PL1	112	443	0,89
Ref_2_PL1	120	653	0,87
Ref_3_PL1	135	457	0,99
Ref_1_PL2	113	407	0,92

Die Messungen der Referenzbetonmischungen konnten mit beiden Gleit-Rohr-Rheometern durchgeführt werden. Sie wiesen hohe Bestimmtheitsmaße auf und lieferten bei beiden Geräten vergleichbare Druckprognosen. Während die Rezeptur der Referenzbetonmischungen über alle Chargen hinweg nicht verändert wurde, wurde in den Rezepturen der A-Mischungen die Leimviskosität variiert. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der A-Mischungen mit Gleitrohr-Rheometer der TU Dresden sind in Tabelle 4-30 abgebildet.

Tabelle 4-30: Ergebnisse aus Sliper-Messungen mit Gerät von TU Dresden – A-Mischungen.

Vor dem Pumpen	Fließgrenzbeiwert *a* [Pa]	Viskositätsbeiwert *b* [Pa·s/m]	Bestimmtheitsmaß R^2 [-]

A1_1_PL1	60	76	0,44
A2_1_PL1	66	210	0,99
A2_2_PL1	89	167	0,97
A2_3_PL1	117	212	0,92
A2_1_PL2	79	80	0,93
A3_1_PL2	81	176	0,99
A4_1_PL2	106	100	0,82
Nach dem Pumpen			
A1_1_PL1	88	60	0,91
A2_1_PL1	108	166	0,99
A2_2_PL1	84	180	0,95
A2_3_PL1	176	153	0,57
A2_1_PL2	-	Blockierung	-
A3_1_PL2	129	172	0,97
A4_1_PL2	79	192	0,97

Bei der Untersuchung der Mischung A4_1 mit dem Zweitgerät sticht das geringere Bestimmtheitsmaß hervor. Grund für die Streuung der Messwerte im P-Q-Diagramm dieser Betoncharge war entweichender Zementleim, und zwar trotz des optimierten Dichtungssystems. Die in Tabelle 4-31 aufgeführten Ergebnisse schließen die Untersuchungen aller A-Betonmischungen mit dem Zweitgerät ein.

Tabelle 4-31: Ergebnisse aus Sliper-Messungen mit Zweitgerät von Schleibinger - A-Mischungen.

Vor dem Pumpen	Fließgrenzbeiwert *a* [Pa]	Viskositätsbeiwert *b* [Pa·s/m]	Bestimmtheitsmaß R^2 [-]
A1_1_PL1	42	98	0,97
A1_2_PL2	98	216	0,96
A2_1_PL1	33	244	0,97
A2_2_PL1	69	191	0,98
A2_1_PL2	89	82	0,97
A2_2_PL2	55	153	0,8
A2_1_PL3	19	92	0,88
A2_2_PL3	92	95	0,95
A3_1_PL1	65	216	0,99
A3_1_PL2	60	68	0,89
A4_1_PL1	103	141	0,91
A4_2_PL2	-1	185	0,99
Nach dem Pumpen			
A1_1_PL1	40	107	0,98
A1_2_PL2	89	299	0,96
A2_1_PL1	55	249	0,98
A2_2_PL1	87	154	0,97
A2_1_PL2	-	Blockierung	-
A2_2_PL2	210	27	0,17
A2_1_PL3	83	50	0,86
A2_2_PL3	102	95	0,94
A3_1_PL1	108	216	0,98
A3_1_PL2	55	94	0,88

A4_1_PL1	75	142	0,2
A4_2_PL2	39	132	0,98

Nach erfolgter Betrachtung der Untersuchungen von Betonmischungsrezepturen mit variierender Leimviskosität folgt die Untersuchung von Betonmischungsrezepturen mit variierendem Leimvolumen. In Tabelle 4-32 sind die Werte aus den Untersuchungen der B-Mischungen mit dem Sliper der TU Dresden dargestellt.

Tabelle 4-32: Ergebnisse aus Sliper-Messungen mit Gerät von TU Dresden – B-Mischungen.

Vor dem Pumpen	Fließgrenzbeiwert *a* [Pa]	Viskositätsbeiwert *b* [Pa·s/m]	Bestimmtheitsmaß R^2 [-]
B1_1_PL1	16	230	0,89
B2_1_PL1	31	105	0,17
Nach dem Pumpen			
B1_1_PL1	57	198	0,94
B2_1_PL1	-19	157	0,66

Bei den betrachteten Betonen fallen ein geringerer Fließgrenzbeiwert *a* und ein geringes Bestimmtheitsmaß der Messung B2_1_PL1 auf. Die Messungen mit dem Zweitgerät wichen von denen mit dem ersten Gleitrohr-Rheometer ab, siehe Tabelle 4-33. Auf mögliche Ursachen wird im weiteren Verlauf näher eingegangen.

Tabelle 4-33: Ergebnisse aus Sliper-Messungen mit Zweitgerät von Schleibinger – B-Mischungen.

Vor dem Pumpen	Fließgrenzbeiwert *a* [Pa]	Viskositätsbeiwert *b* [Pa·s/m]	Bestimmtheitsmaß R^2 [-]
B1_1_PL1	70	139	0,97
B1_1_PL2	74	112	0,94
B2_1_PL1	35	97	0,90
B2_1_PL2	70	94	0,96
Nach dem Pumpen			
B1_1_PL1	102	155	0,96
B1_1_PL2	66	146	0,98
B2_1_PL1	102	37	0,31
B2_1_PL2	75	136	0,94

Bei den Betonmischungen des Typs C wurde zusätzlich die Granulometrie der Gesteinskörnung variiert. Aus Tabelle 4-34 lassen sich die Auswertungen der unterschiedlichen C-Mischungen mit dem Gleitrohr-Rheometer der TU Dresden entnehmen.

Tabelle 4-34: Ergebnisse aus Sliper-Messungen mit Gerät von TU Dresden - C-Mischungen.

Vor dem Pumpen	Fließgrenzbeiwert *a* [Pa]	Viskositätsbeiwert *b* [Pa·s/m]	Bestimmtheitsmaß R^2 [-]
C7_1_PL1	-21	106	0,92
C7_2_PL1	52	32	0,02
C7_3_PL1	21	74	0,96
C8_1_PL1	54	201	0,83
C8B_1_PL1	49	118	0,89
C9_1_PL1	62	158	0,59
C10_1_PL1	-11	823	0,98
C11_1_PL1	14	126	0,91

C12_1_PL1	88	231	0,92
C12B_PL1	102	302	0,97
Nach dem Pumpen			
C7_1_PL1	19	89	0,18
C7_2_PL1	4	117	0,9
C7_3_PL1	8	98	0,61
C8_1_PL1	141	230	0,83
C8B_1_PL1	31	173	0,94
C9_1_PL1	9	255	0,89
C10_1_PL1	132	892	0,77
C11_1_PL1	26	122	0,88
C12_1_PL1	199	107	0,72
C12B_PL1	-	Blockierung	-

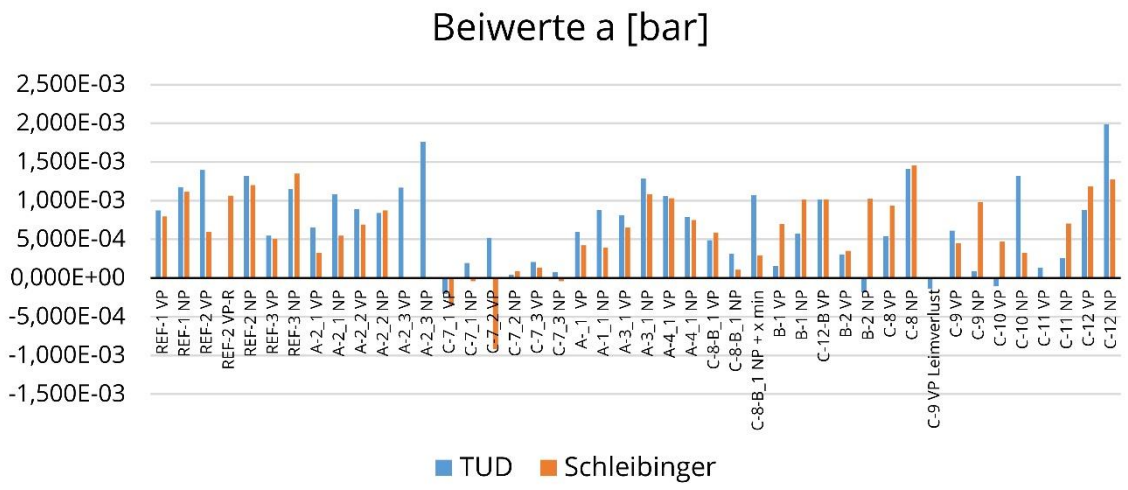
Aus Tabelle 4-35 lassen sich die Auswertungen der unterschiedlichen C-Mischungen mit dem Zweitgerät entnehmen.

Tabelle 4-35: Ergebnisse aus Sliper-Messungen mit Zweitgerät von Schleibinger - C-Mischungen.

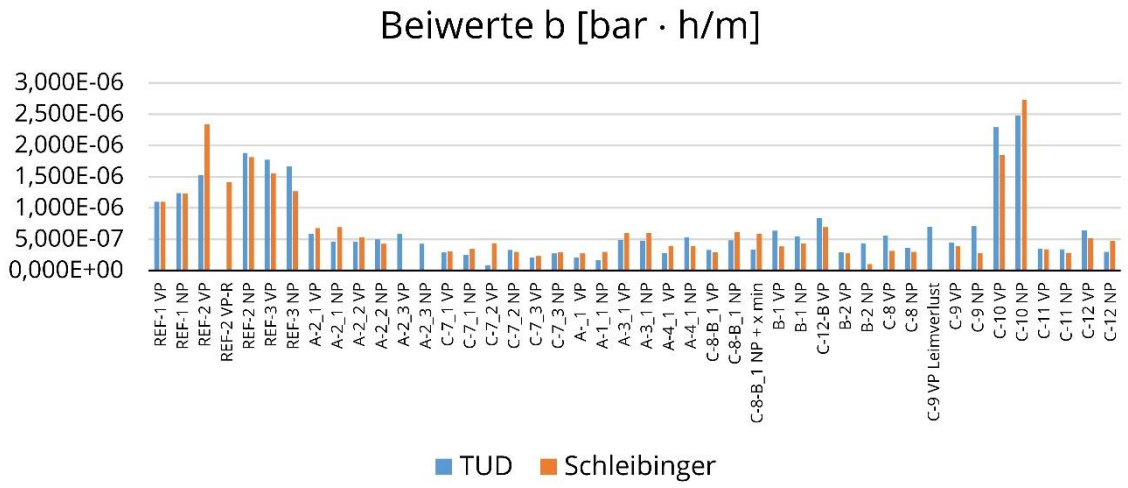
Vor dem Pumpen	Fließgrenzbeiwert *a* [Pa]	Viskositätsbeiwert *b* [Pa·s/m]	Bestimmtheitsmaß R^2 [-]
C7_1_PL1	-35	109	0,94
C7_2_PL1	-92	156	0,87
C7_3_PL1	14	82	0,99
C7_1_PL2	26	58	0,98
C8_1_PL1	94	113	0,97
C8_1_PL2	17	102	0,99
C8B_1_PL1	59	105	0,68
C8B_1_PL2	24	119	0,95
C9_1_PL1	45	141	0,98
C9_1_PL2	66	142	0,98
C10_1_PL1	47	666	0,93
C10_1_PL2	134	397	0,97
C11_1_PL1	0,3	122	0,94
C11_1_PL2	41	93	0,11
C12_1_PL1	119	184	0,74
C12_1_PL2	95	215	0,98
C12B_PL1	102	249	0,76
Nach dem Pumpen			
C7_1_PL1	-4	124	0,92
C7_2_PL1	9	107	0,75
C7_3_PL1	-4	103	1
C7_1_PL2	16	85	0,81
C8_1_PL1	145	108	0,75
C8_1_PL2	61	69	0,71
C8B_1_PL1	11	220	0,92
C8B_1_PL2	94	51	0,16
C9_1_PL1	98	99	0,98
C9_1_PL2	94	134	0,95

C10_1_PL1	33	982	0,42
C10_1_PL2	150	556	0,61
C11_1_PL1	71	101	0,69
C11_1_PL2	-	Blockierung	-
C12_1_PL1	128	170	0,85
C12_1_PL2	146	256	0,97
C12B_PL1	-	Blockierung	-

Einige Betone neigten mitunter zum Sedimentieren im Sliper-Gerät während der Messung. Während durch das neue Dichtungssystem kaum Leim verloren ging, segregierten Mischungen mit hoher Entmischungsneigung in den ersten Testhüben des Sliper-Geräts. Dadurch konnte die Homogenität der Betonprobe über die Höhe der Betonsäule bei der Versuchsdurchführung nicht gewährleistet werden. Bei solchen Mischungen muss die Anzahl der Hubwiederholungen mit dem Sliper möglichst klein gehalten werden, weil sonst nicht mit einer gleichmäßigen Betonsäule gearbeitet werden kann. Bei Mischung C7_2 konnten zum Beispiel lediglich zwei Hübe des Slipers ausgewertet werden. Das Bestimmtheitsmaß ist daher an dieser Stelle nicht belastbar. Es fällt auf, dass die gemessenen Fließgrenzbeiwerte *a* stärker streuen als die gemessenen Viskositätsbeiwerte *b*. In Abbildung 4-44 sind die Streuungen bei der Ermittlung der Beiwerte *a* und *b* abgebildet.



(a)



(b)

Abbildung 4-44: Gegenüberstellung der (a) Fließgrenzbeiwerte *a* und (b) Viskositätsbeiwerte *b* aus dem Sliper der TU Dresden und dem Schleibinger Zweitgerät aus Versuchen im Technikum-Maßstab [Mikhalev – 2021].

In Tabelle 4-36 werden die Abweichungen der Beiwerte *a* und *b* des Gleitrohr-Rheometers der TU Dresden vom Zweitgerät jeweils vor und nach dem Pumpen dargestellt.

Tabelle 4-36: Abweichung der TUD-Sliper Beiwerte von Schleibinger-Sliper (Zweitgerät) Beiwerten in %.

Mischung	**Abweichung TU Dresden-Sliper von Schleibinger-Sliper**			
	Vor dem Pumpen	**Nach dem Pumpen**	**Vor dem Pumpen**	**Nach dem Pumpen**
	a	*a*	*b*	*b*
Ref_1_PL1	9,35	5,02	-0,10	0,58
Ref_2_PL1	57,20	9,06	-53,80	3,56
Ref_3_PL1	7,00	-17,64	12,38	23,74
A2_1_PL1	50,02	49,43	-16,26	-50,13
A2_2_PL1	22,40	-3,72	-14,62	14,71
C7_1_PL1	-68,34	121,37	-3,13	-39,59
C7_2_PL1	275,95	-100,03	-386,14	8,70
C7_3_PL1	32,60	151,81	-12,06	-5,06
A1_1_PL1	29,19	55,10	-28,38	-78,12
A3_1_PL1	20,01	16,21	-22,73	-25,62
A4_1_PL1	2,23	4,65	-41,10	26,39
C8B_PL1	-20,98	64,66	11,22	-27,06
B1_1_PL1	-351,92	-76,77	39,28	21,86
B2_1_PL1	-14,53	649,83	7,55	76,11
C8_1_PL1	-74,21	-3,16	43,87	16,98
C9_1_PL1	26,72	-1050,31	10,87	61,05
C10_1_PL1	548,18	75,21	19,10	-10,03
C11_1_PL1	97,72	-170,08	3,24	17,15
C12_1_PL1	-34,69	35,89	20,11	-58,52

Es zeigt sich, dass die Viskositätsbeiwerte *b* deutlich besser miteinander korrelieren, vgl. Abbildung 4-36. Der Beiwert *b* beschreibt die Neigung der Regressionsgerade, aus der Analyse der Messwerte im P-Q-Diagramm. Stimmen die Neigungen aus zwei Sliper-Messungen überein, dann wird die endgültige Förderdruckprognose über eine höhere Breite an Fördergeschwindigkeiten eine ähnliche Abweichung aufweisen. Die Beiwerte *a* schwanken besonders stark bei der Messung von Betonen mit einer hohen Entwässerungsrate. Die Entwässerungsrate korreliert wiederum mit der Fließfähigkeit. Das ist nur folgerichtig, weil fließfähige Betone für gewöhnlich mehr Wasser beinhalten. Wie auf den Histogrammen in Abbildung 4-45 zu erkennen ist, hatte die Mehrheit aller untersuchten Betone eine sehr hohe Fließfähigkeit. Die meisten Betone können der Konsistenzklasse F6 zugeordnet werden.

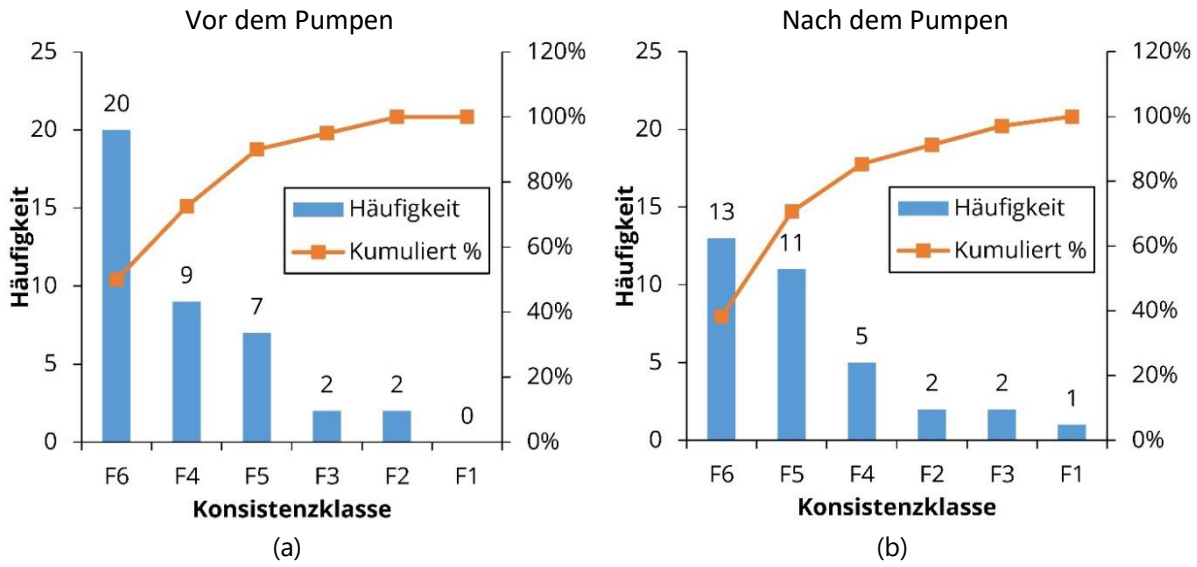


Abbildung 4-45: Fließgrenzwerte im Histogramm (a) vor dem Pumpen (b) nach dem Pumpen [Mikhalev – 2021].

Aus Abb. 4-45 wird deutlich, dass die Fließfähigkeit nach dem Pumpen im Durchschnitt sinkt. Ein geringeres Ausbreitmaß korreliert mit der Messung einer höheren Fließgrenze und einer höheren Viskosität. Die Korrelation zwischen der Betonkonsistenz und der gemessenen Viskosität kann deutlich erkannt werden (vgl. Abbildung4-46).

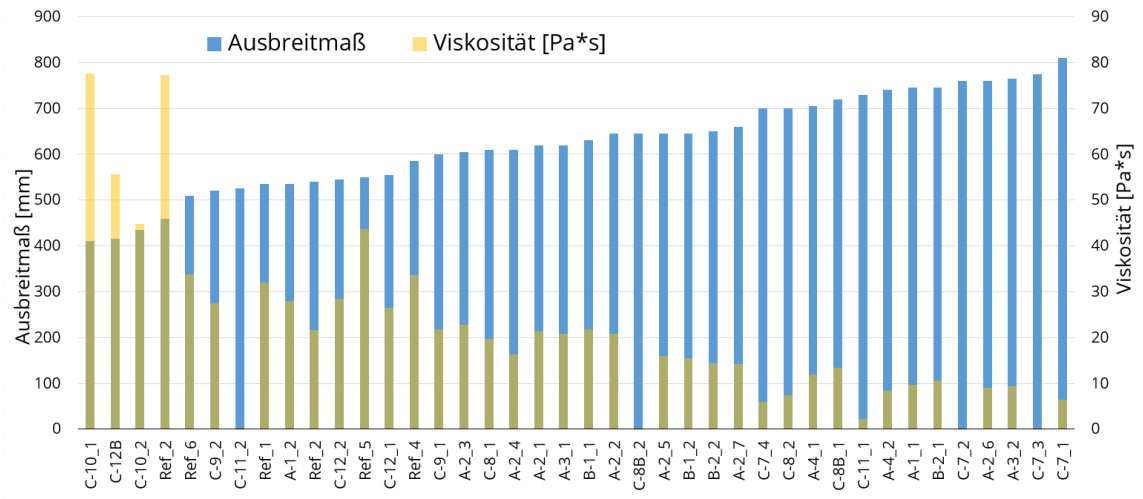


Abbildung 4-46: Korrelation zwischen Ausbreitmaß und rheologischen Messungen.

Bei der Arbeit mit dem Gleitrohr-Rheometer fiel auf, dass Betone mit erhöhtem Entwässerungsverhalten einen negativen Einfluss auf die Prüfbarkeit mit dem Gleitrohr-Rheometer haben. Bei Mischungen mit einer Entwässerungsrate unter 15 g/s konnte eine deutlich höhere Übereinstimmung der zwei Sliper-Messungen untereinander beobachtet werden.

Um einen Vergleich zwischen Vorhersagen des Gleitrohr-Rheometers und Messwerten aus den Druckabnehmern zu ermöglichen, werden die ermittelten Beiwerte mit Informationen zur Förderrohrgeometrie, Höhe des Pumpvorganges und der jeweiligen Dichte des betrachteten Materials kombiniert. Der gemessene Druckabfall entlang der Förderleitung

(Pumpleitungsgeometrie 1) und der Abgleich mit den Sliper-Vorhersagen werden anhand von vier unterschiedlichen Betonen beispielhaft in Abbildung 4-47 graphisch dargestellt.

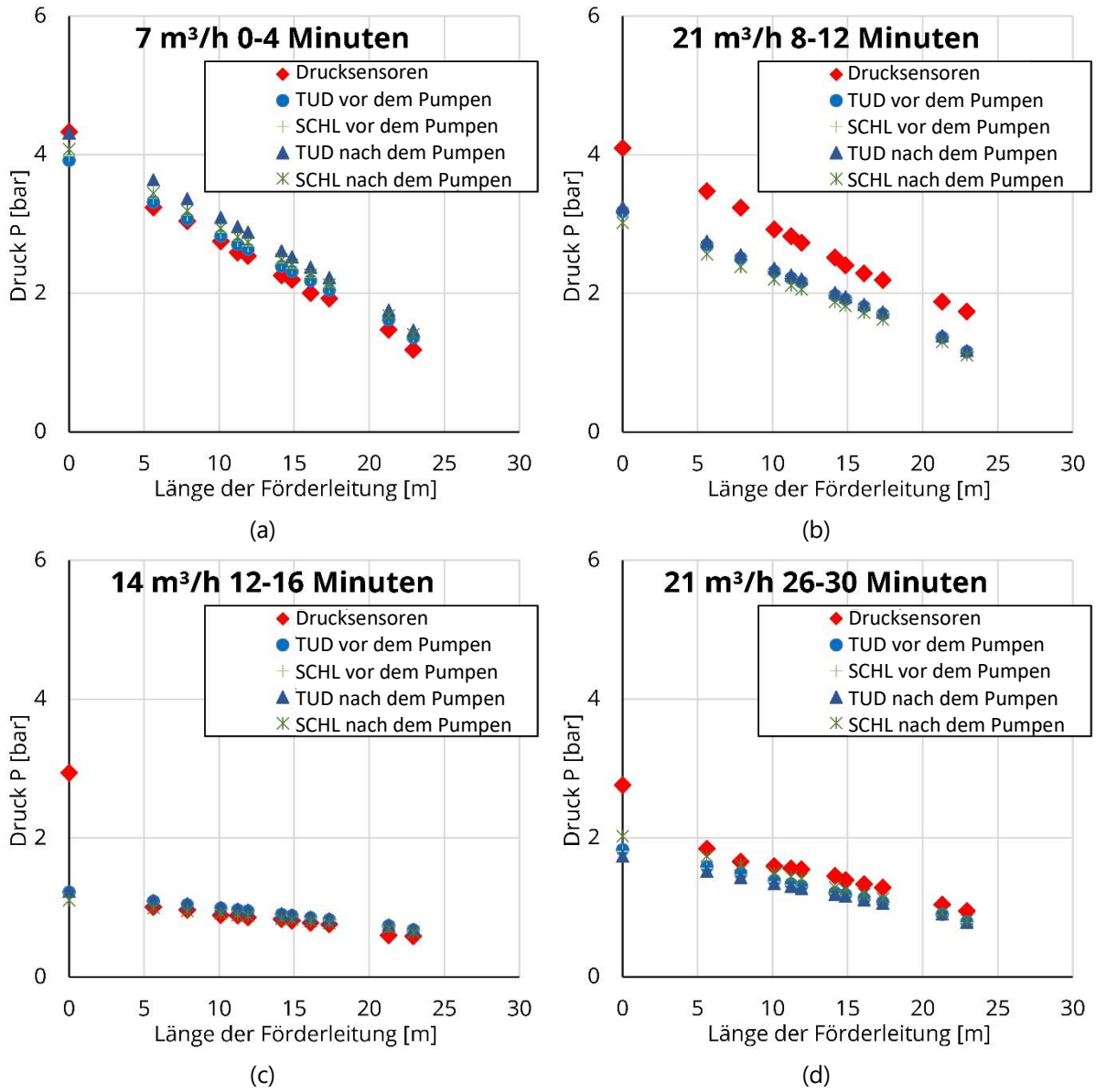


Abbildung 4-47: Gegenüberstellung des beim Pumpen gemessenen, Hydraulik- und Betondrucks mit den Druckprognosen anhand Sliper-Messungen (siehe Tabelle 3-7 für Position der Sensoren): (a) Mischung Ref_2_PL1, (b) Mischung A2_2_PL1, (c) Mischung C7_3_PL1, (d) Mischung B2_1_PL1 [Mikhalev – 2021].

In Tabelle 4-37 sind die mittleren Abweichungen und Standardabweichungen (STBW) aus der Gegenüberstellung von Drucksensorwerten und Sliper-Prognosen aufgeführt. Sie wurden aus der prozentuellen Abweichung jeder Sliper-Vorhersage vom zugehörigen Drucksensor bei allen gefahrenen Fördermengen errechnet.

Tabelle 4-37: Abweichung der TUD-Sliper-Vorhersagen von Drucksensormessungen in %.

Mischung	Vor dem Pumpen				Nach dem Pumpen			
	Beton		Hydraulik		Beton		Hydraulik	
	MW	STBW	MW	STBW	MW	STBW	MW	STBW
Ref_1_PL1	11,45	13,35	37,89	4,89	15,48	17,91	27,88	4,21
Ref_2_PL1	5,76	6,34	10,67	10,71	8,76	6,82	8,60	12,26

Ref_3_PL1	11,24	14,06	6,10	9,35	19,09	19,68	8,72	8,05
A2_1_PL1	30,13	32,80	23,75	5,03	38,92	40,97	16,13	6,11
A2_2_PL1	25,62	28,11	23,03	7,00	24,93	27,43	22,57	6,49
A2_3_PL1	20,05	23,58	18,43	4,01	28,45	32,33	11,88	10,65
C7_1_PL1	30,09	8,05	68,68	8,47	12,49	11,69	55,40	5,86
C7_2_PL1	18,49	21,12	57,45	2,41	6,76	7,12	58,19	10,59
C7_3_PL1	15,57	13,83	56,70	5,43	14,55	10,77	56,56	8,24
A1_1_PL1	23,07	24,80	45,34	6,67	33,41	32,36	37,27	5,27
A3_1_PL1	25,30	28,04	24,16	5,13	39,48	37,85	9,54	9,09
A4_1_PL1	27,67	29,86	26,04	3,92	28,32	23,93	17,72	9,20
C8B_PL1	20,96	20,76	44,74	7,65	18,18	17,74	39,60	11,96
B1_1_PL1	24,45	20,96	56,61	4,88	30,16	32,75	49,28	7,30
B2_1_PL1	13,35	14,01	47,60	11,80	10,64	7,53	57,15	17,30
C8_1_PL1	8,93	11,89	36,13	8,59	25,53	24,58	19,30	4,54
C9_1_PL1	22,75	27,01	38,55	8,13	14,15	17,95	39,81	14,50
C10_1_PL1	11,62	13,32	25,21	27,47	42,20	11,04	24,83	26,74
C11_1_PL1	9,14	9,85	43,80	8,26	9,81	11,68	38,34	7,51
C12_1_PL1	15,81	17,09	25,72	2,49	27,30	31,62	15,64	14,93

Die Standardabweichung beschreibt in diesem Fall wie weit die errechneten Abweichungen um die mittlere Abweichung streuen. Eine geringe Standardabweichung spricht also für eine zuverlässigere Messung mit besserer Reproduzierbarkeit. Es fällt auf, dass die Werte bei dem Vergleich mit den Drucksensoren stärker streuen als die Vergleiche mit der Betonpumpenhydraulik.

Das kann unter anderem auf die Positionierung der Betondrucksensoren, an der Rohrwandung, zurückzuführen sein. Die Anordnung der Sensoren an der Wandung der Förderleitung eignet sich eher zur Erfassung des statischen Druckes. Für die Erfassung des Gesamtdruckes, der auch vom Gleitrohr-Rheometer prognostiziert wird, würde sich z. B. ein Pitot-Rohr eignen. Da dieser jedoch den ungehinderten Betonfluss im Rohr stören würde, wurde auf eine solche Lösung verzichtet. Stattdessen wurden Drucksensoren an die Wandungen angebracht und bei der Auswertung der Drucksensordaten die Peaks der Druckmessungen bei jedem Kolbenstoß als tatsächlicher Druck angenommen. Bei jedem Kolbenhub muss die Fließgrenze des Betons überschritten werden, erst dann fängt er an zu fließen. Bis dies geschieht wirkt der Druck gleichmäßig in alle Richtungen der Betonsäule im Rohr. Sobald die Fließgrenze überschritten wird, fängt der Beton an zu fließen und der gemessene Druck fällt für den Schubvorgang auf ein Plateau, welcher den Statischen Druck darstellt. In Abbildung 4-48 sind beispielhaft die Kolbenhübe einer Messung an Sensor 9 (Press9) bei einer konstanten Fördergeschwindigkeit dargestellt.

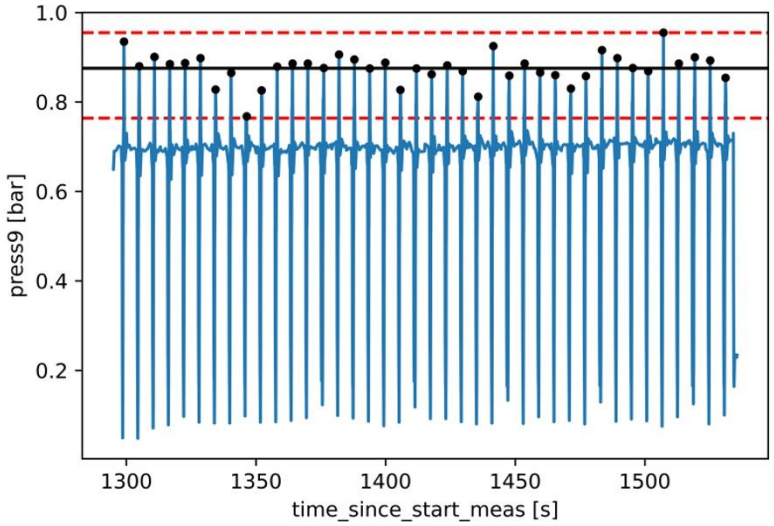


Abbildung 4-48: Bestimmung des Betondrucks anhand des maximalen Ausschlags je Kolbenhub.

Die höhere Streuung beim Vergleich von Drucksensor-Daten, aus den Sensoren an der Förderleitung, mit den Druckprognosen aus dem Gleitrohr-Rheometer ist darauf zurückzuführen, dass die Messungen der Betondrucksensoren nicht direkt den Gesamtdruck messen, sondern diese Werte annähernd aus den Sensorausschlägen ermittelt werden müssen. Dieser Zwischenschritt führt zu zusätzlichen Streuungen. Ein Vergleich mit den Werten aus der Förderhydraulik führt hingegen zu geringeren Streuungen der Ergebnisse, weil stets der Gesamtdruck betrachtet werden kann. Die Werte aus dem Hydraulikdrucksensor eignen sich daher besser für die Beurteilung der Prognosegenauigkeit des Gleitrohr-Rheometers als die aus den Betondrucksensoren.

In Tabelle 4-38 wurden die Abweichungen innerhalb der Mischungsvariationen gruppiert.

Tabelle 4-38: Abweichung der TUD-Sliper-Vorhersagen von Drucksensormessungen in % in Abhängigkeit der Mischungsvariation.

Mischung	**Vor dem Pumpen**				**Nach dem Pumpen**			
	Beton		**Hydraulik**		**Beton**		**Hydraulik**	
	MW	STBW	MW	STBW	MW	STBW	MW	STBW
Ref	9,48	11,25	18,22	8,32	14,44	14,80	15,07	8,17
A	25,31	27,87	26,79	5,29	32,25	32,48	19,18	7,80
B	18,90	17,49	52,11	8,34	20,40	20,14	53,22	12,30
C	17,04	15,88	44,11	8,77	19,00	16,02	38,63	11,65

Es lässt sich beobachten, dass die Prognosen nach dem Pumpen stärker von den Messwerten aus den Drucksensoren abweichen als die Prognosen mit Betonmischungen die vor dem Pumpen untersucht wurden. Die Auswertung der Prognoseabweichung mit dem Zweitgerät ist in Tabelle 4-39 aufgeführt.

Tabelle 4-39: Abweichung der Schleibinger-Sliper-Vorhersagen von Drucksensormessungen in %.

Mischung	Vor dem Pumpen				Nach dem Pumpen			
	Beton		Hydraulik		Beton		Hydraulik	
	MW	STBW	MW	STBW	MW	STBW	MW	STBW
Ref_1_PL1	12,45	13,37	39,36	4,63	13,33	16,28	29,11	4,63
Ref_2_PL1	5,51	6,05	11,34	13,76	5,58	6,18	10,22	12,42
Ref_3_PL1	12,76	13,16	13,25	8,13	17,10	20,77	8,62	8,35
A2_1_PL1	24,52	27,18	29,82	7,05	29,48	31,32	20,93	6,57
A2_2_PL1	22,48	24,53	26,00	5,66	25,12	27,61	26,36	7,03
C7_1_PL1	38,46	8,92	73,92	9,21	11,85	8,04	56,53	9,49
C7_2_PL1	58,94	25,02	90,42	16,28	7,08	8,20	58,66	9,54
C7_3_PL1	13,08	12,09	57,77	6,48	7,93	9,89	61,31	9,22
A1_1_PL1	18,01	19,95	47,74	8,80	17,67	18,91	46,87	9,71
A3_1_PL1	23,11	24,97	22,87	4,69	35,97	33,47	7,66	6,41
A4_1_PL1	30,31	28,79	18,57	5,40	21,49	23,45	29,50	5,99
C8B_PL1	23,06	22,79	43,74	6,56	15,18	14,37	37,11	15,73
B1_1_PL1	31,10	33,94	53,34	8,80	37,78	41,30	42,74	11,70
B2_1_PL1	14,42	15,26	47,52	10,98	36,16	32,85	32,28	6,65
C8_1_PL1	15,79	17,73	38,05	3,53	23,29	24,90	21,65	4,84
C9_1_PL1	21,73	23,47	47,44	7,23	29,07	34,46	36,32	7,26
C10_1_PL1	7,16	8,82	22,47	20,85	30,77	14,33	25,65	31,89
C11_1_PL1	16,40	9,04	51,66	8,56	25,98	19,46	21,04	7,36
C12_1_PL1	18,89	21,01	23,32	5,84	19,84	22,12	22,84	6,99
Ref_1_PL2	29,48	16,47	9,41	8,03	31,67	9,73	14,92	17,44
C10_1_PL2	17,32	9,67	12,07	15,77	45,94	13,21	27,95	23,48
C7_1_PL2	20,01	23,42	54,43	10,24	18,67	22,84	52,00	13,81
C8_1_PL2	10,78	13,51	44,36	12,89	26,83	23,98	27,86	8,57
C12_1_PL2	13,11	14,63	19,98	7,85	21,76	19,34	8,39	8,72
A2_1_PL2	11,38	10,27	26,52	11,90	52,64	29,48	12,10	6,98
B1_1_PL2	22,96	24,70	21,77	4,58	25,91	23,17	17,18	4,19
A1_1_PL2	10,99	13,52	26,67	9,45	18,49	12,87	17,80	14,59
B2_1_PL2	31,90	17,95	28,13	16,29	40,01	23,69	22,32	12,44
C9_1_PL2	11,74	12,46	25,94	6,41	20,83	15,67	15,13	5,08
A4_1_PL2	20,13	11,54	32,53	24,25	28,87	15,88	25,12	16,75
A3_1_PL2	16,44	16,46	31,14	8,32	20,27	14,56	26,11	11,29
A2_1_PL3	24,48	15,92	45,75	10,86	68,43	25,75	19,45	5,01
A2_2_PL3	51,21	17,84	7,42	7,07	58,26	19,05	5,10	7,20

Mit dem Zweitgerät wurden alle durchgeführten Frischbetonuntersuchungen begleitet. Es fällt auf, dass eine hohe Übereinstimmung der Gleitrohr-Rheometer-Prognosen mit den Betondrucksensoren auch von einer geringen Standardabweichung begleitet wird. Betone, die zum Entmischen neigen sind zum für die Testung mit dem Gleitrohr-Rheometer weniger geeignet. Dazu zählen Mischungen der C-Reihe, zum Beispiel Mischung C11_2. Die schlechte Testbarkeit äußert sich dabei auch durch ein geringes Bestimmtheitsmaß. Die Zusammenfassung der Abweichungen zwischen dem Schleibinger Sliper und den Druckmesswerten ist in Tabelle 4-40 aufgeführt.

Tabelle 4-40: Abweichung der Schleibinger-Sliper-Vorhersagen von Drucksensormessungen in % in Abhängigkeit der Mischungsvariation.

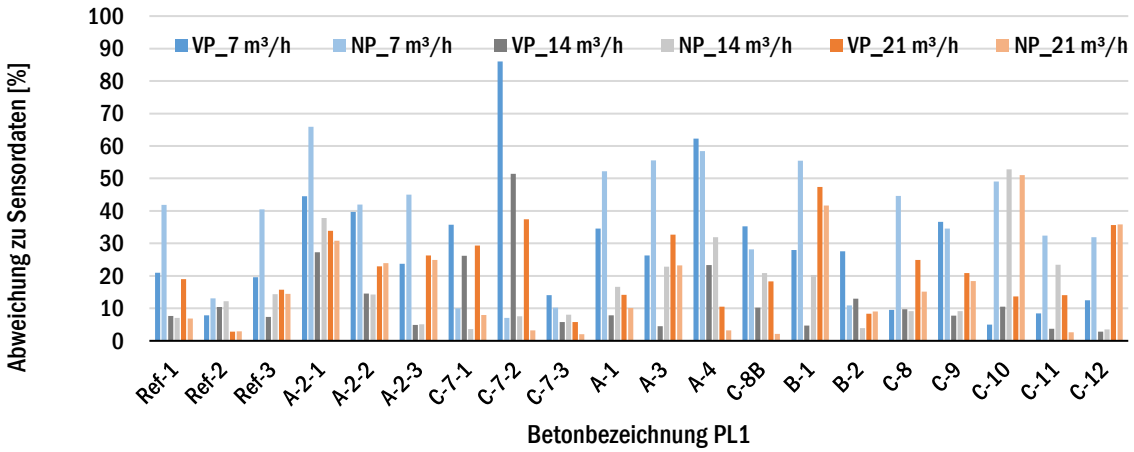
Mischung	Vor dem Pumpen				Nach dem Pumpen			
	Beton		Hydraulik		Beton		Hydraulik	
	MW	STBW	MW	STBW	MW	STBW	MW	STBW
Ref	15,05	12,26	18,34	8,64	16,92	13,24	15,72	10,71
A	23,00	19,18	28,64	9,40	34,24	22,94	21,54	8,87
B	25,10	22,96	37,69	10,16	34,96	30,26	28,63	8,74
C	20,46	15,90	43,25	9,84	21,79	17,91	33,75	11,57

Aus Tabelle 4-41 wird die Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit auf die Genauigkeit der Sliper-Prognosen erkennbar [Mattheis - 2022].

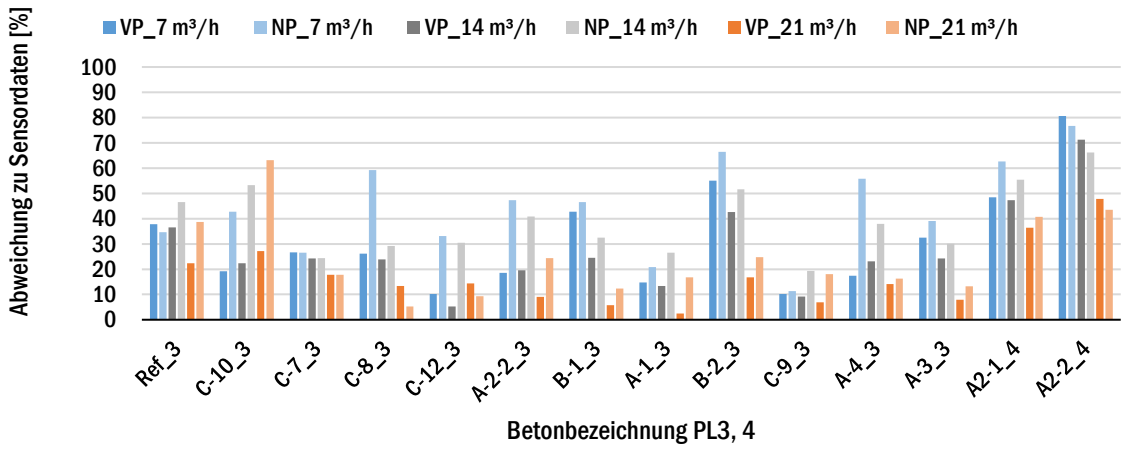
Tabelle 4-41: Mittlere Abweichung der Schleibinger- und TUD-Sliper-Vorhersagen und Standard-abweichung von Druckmessungen in %.

Fördermenge [m³/h]	Vor dem Pumpen MW			Nach dem Pumpen MW		
	PL1	PL3, 4	PL1, 3, 4	PL1	PL3, 4	PL1, 3, 4
7	28,91	31,43	29,95	36,54	47,78	41,12
14	12,68	27,65	18,85	16,23	41,66	26,70
21	21,69	17,28	19,87	16,48	26,14	20,46
	Gesamtmittelwert		22,89	Gesamtmittelwert		29,43
Fördermenge [m³/h]	**Vor dem Pumpen STBW**			**Nach dem Pumpen STBW**		
	PL1	**PL3, 4**	**PL1, 3, 4**	**PL1**	**PL3, 4**	**PL1, 3, 4**
7	5,77	11,45	8,11	4,95	12,06	7,99
14	4,05	8,53	5,89	3,25	8,47	5,49
21	3,52	4,74	4,02	3,38	5,57	4,32
	Gesamtmittelwert		11,35	Gesamtmittelwert		13,57

Die aufgeführten Abweichungen beziehen sich ausschließlich auf die Versuchsreihen im Technikum-Maßstab. Auf Abbildung 4-49 sind die Abweichungen von Sliper-Prognosen und Drucksensoren bei unterschiedlichen Fördergeschwindigkeiten graphisch dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 4-49: Mittlere Abweichung der Sliper-Prognosen zu Sensormessungen je Beton und Fördergeschwindigkeit über alle Abschnitte der Pumpleitungsgeometrie (a) PL1 und (b) PL3, 4 [Mattheis - 2022].

Der Vergleich der Prognosen aus zwei parallel betriebenen Sliper-Geräten konnte die Reproduzierbarkeit der Methode bestätigen. Auf Abbildung 4-50 sind die Abweichungen der Förderdruckprognosen von den Sensoraufzeichnungen beider Geräte zu sehen. Dabei wird prozentual dargestellt wie stark die Prognose aus dem jeweiligen Sliper, bei einer bestimmten Mischung über alle Sensoren und Fördergeschwindigkeiten gemittelt, von den Drucksensoren abwich.

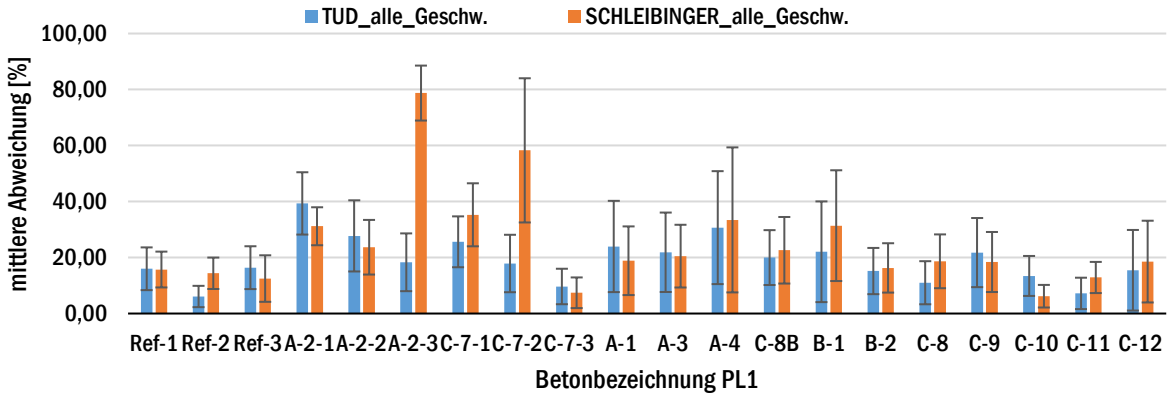


Abbildung 4-50: Vergleich mittlerer Abweichungen über alle Pumpleitungsabschnitte der Betone in PL1 mit Darstellung der Standardabweichung für die Prognosen mit TUD- und Schleibinger-Sliper. [Mattheis - 2022]

Im Mittel wichen die Förderdruckprognosen des TUD-Slipers um ca. 19 % und die des Zweitgerätes um ca. 26 % von den gemessenen Druckwerten ab. Einzelne Ausreißer, z. B. Mischungen A2_3 und C7_2, können mitunter auf ein stark sedimentierendes Verhalten der Mischungen und eine inhomogene Probeentnahme zurückgeführt werden.

Das Sedimentationsverhalten der untersuchten Mischungen hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Sliper-Messungen. Nach dem Sortieren der Sedimentationsrohre der Betonproben nach dem Grad ihrer Sedimentation auf einer Skala von null bis sechs, können klare Korrelationen zwischen Sedimentationsneigung und Sliper-Messungen erkannt werden.

[Mattheis – 2022] So korrelieren zum Beispiel Sedimentationsneigung und das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden aus den Sliper-Messungen, siehe Abbildung 4-51.

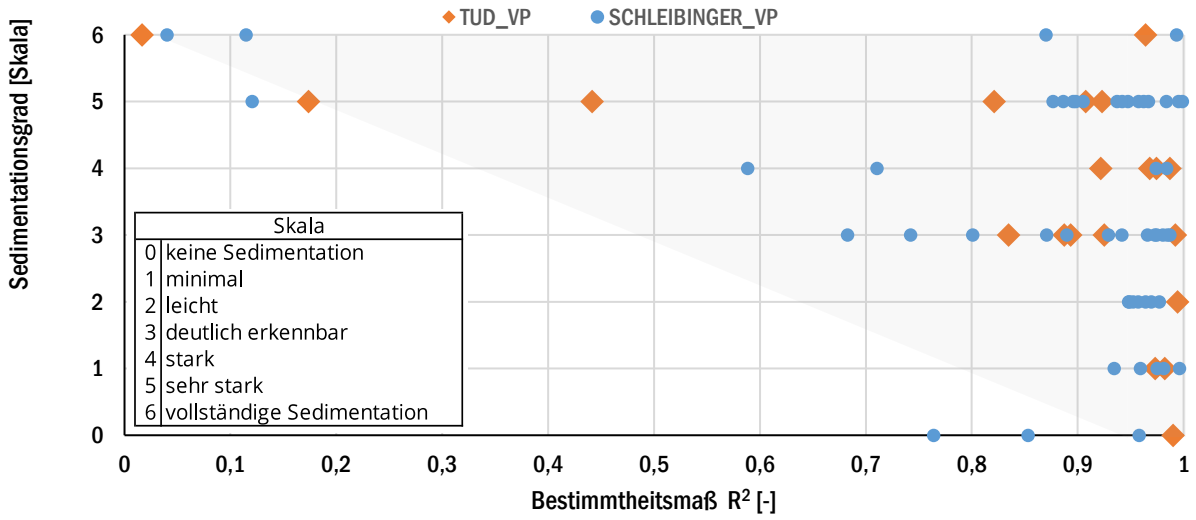


Abbildung 4-51: Korrelation zwischen Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden aus P-Q-Diagramm der Sliper-Versuche und der Sedimentationsneigung untersuchter Mischungen Skala: 0 – keine Sedimentation; 1 – minimal; 2 – leicht; 3 – deutlich erkennbar; 4 – stark; 5 – sehr stark; 6 vollständige Sedimentation [Mattheis - 2022].

Mit zunehmender Sedimentationsneigung der untersuchten Betone sinkt die Anzahl verwertbarer Messpunkte für die Sliper-Prognosen, siehe Abbildung 4-52.

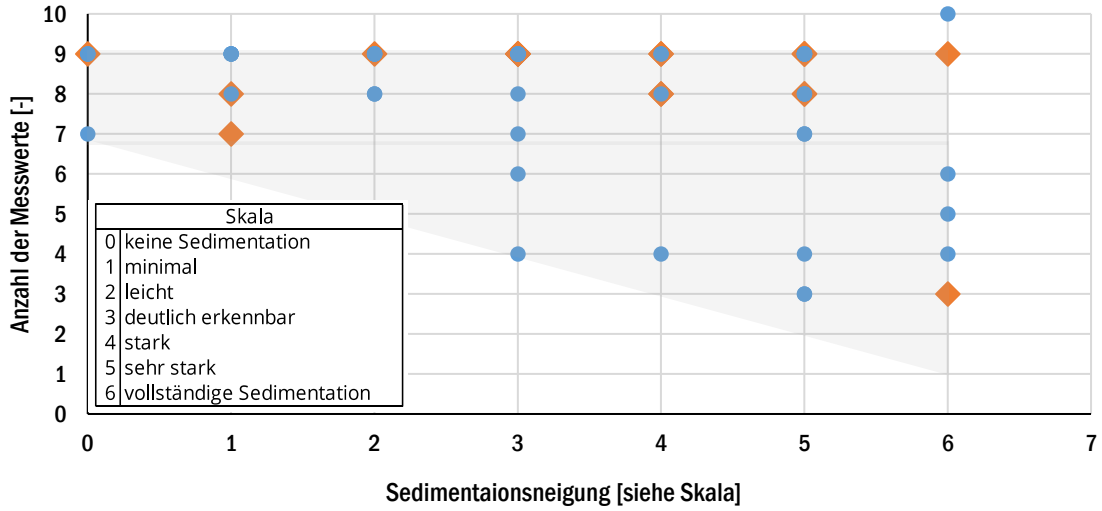


Abbildung 4-52: Korrelation zwischen Anzahl und Sedimentationsneigung [Mattheis - 2022].

Weiterhin fällt auf, dass die Abweichung der Sliper-Prognosen mit zunehmender Sedimentationsneigung der Betone steigt (vgl. Abbildung 4-53).

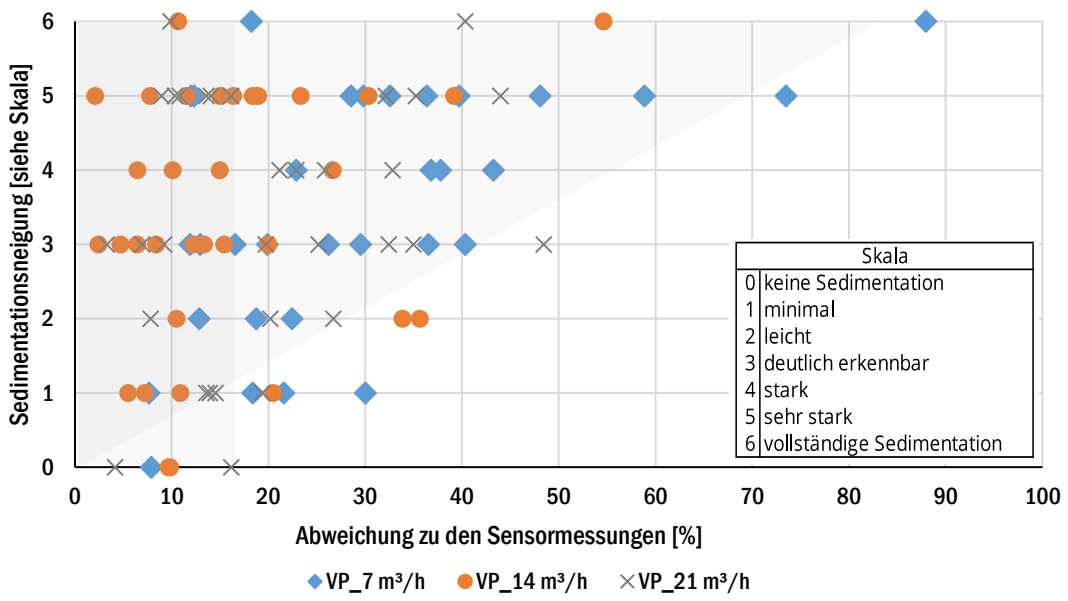
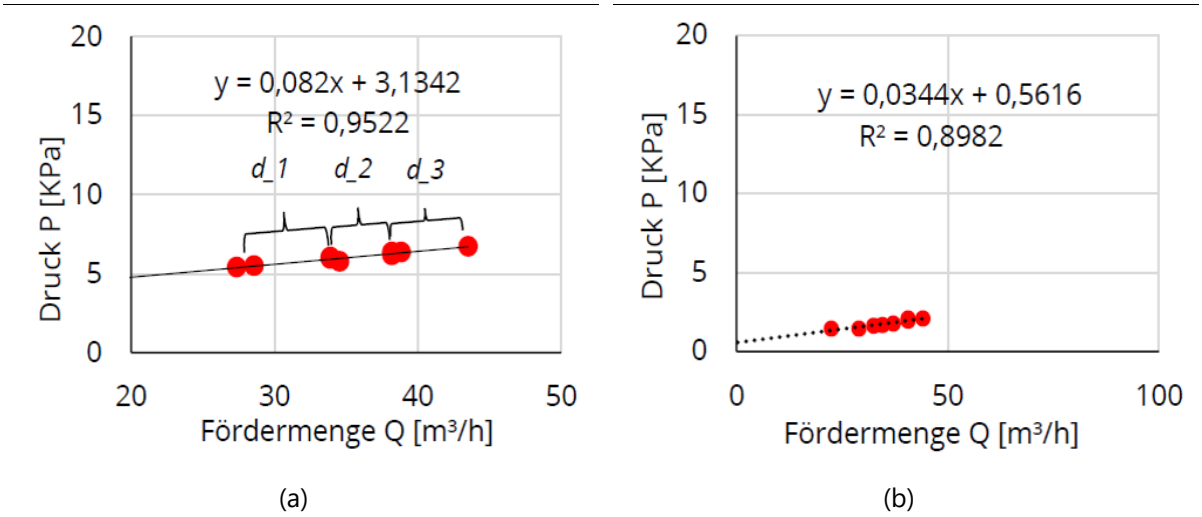


Abbildung 4-53: Korrelation zwischen Prognoseabweichungen und Sedimentationsneigung [Mattheis - 2022].

Der Zusammenhang zwischen Sedimentationsneigung und Gleitrohr-Rheometer-Ergebnissen wirft unmittelbar die Frage auf, ob die Sedimentationsneigung bereits während der Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer erkannt werden kann. Unter Betrachtung der Abstände zwischen den Messpunkten entlang der Regressionsgeraden im P-Q-Diagramm einer Sliper-Messung können Rückschlüsse auf das Sedimentationsverhalten der untersuchten Betonprobe gezogen werden [Mattheis – 2022]. Ein hohes Bestimmtheitsmaß einer Probe ist dabei nicht das ausschließliche Kriterium. Eine zum Sedimentieren neigende Betonmischung führt bei der Prüfung mit dem Gleitrohr-Rheometer dazu, dass das Verhältnis zwischen Fördergeschwindigkeit und gemessenem Druck nicht länger stabil bleibt. Dabei verdichtet sich das Material am Boden der Probe und verfälscht die Messung. Die Rate mit der diese Veränderung eintritt kann Aufschluss über die Sedimentationsrate geben.

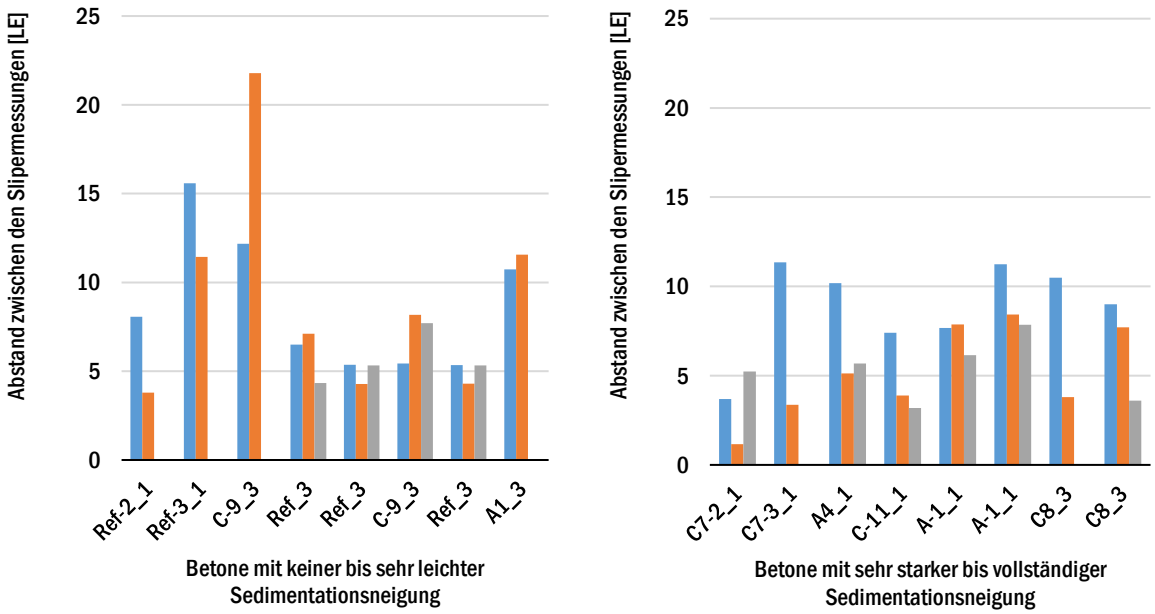
Ein Beispiel für den genannten Zusammenhang zwischen Druck und Förderrate ist in Abbildung 4-54 zu sehen. Wenn eine Betonmischung nicht sedimentiert führt eine Testwiederholung, bei gleichbleibender Belastung, zu einem vergleichbaren Druckwert. Sedimentiert die Betonmischung hingegen, dann führt eine Testwiederholung, mit gleichbleibender Belastung, zu einem veränderten Druckwert.



(a) (b)

Abbildung 4-54: Abstände zwischen den Sliper-Messungen entlang der Regressionsgeraden (a) klar differenzierbare Messeinheiten (b) Streuung entlang der Regressionsgeraden [Mikhalev - 2021, Mattheis - 2022].

Vergleicht man nun die eben beschriebenen Messabstände (z. B. d_1, d_2 und d_3 in Abbildung 4-54 (a)) in unterschiedlichen Messungen dann wird ersichtlich, dass sich diese bei sedimentierenden Mischungen deutlich über den Verlauf der Messung verändert (vgl. Abbildung 4-55).



(a) (b)

Abbildung 4-55: Vergleich der Abstände zwischen den Sliper-Messungen entlang der Regressionsgeraden für (a) Betone mit keiner bis leichter Sedimentation sowie (b) Betone mit sehr starker bis vollständiger Sedimentation [Mattheis - 2022].

Bei den Messungen mit dem Gleitrohr-Rheometer wurde nach jeder dritten Versuchswiederholung mehr Gewicht auf das Gerät gelegt. Das sollte zu einem schnelleren Fall des Rohres und damit einhergehende höherem gemessenen Druck im Drucksensor des Gerätes führen. Bei gleichartiger Belastung müssten die Abstände zwischen den Messpunkten konstant bleiben. Bei Betonen mit sehr starker bis vollständiger Sedimentationsneigung waren die Abstände zwischen den Messungen im Durchschnitt weniger gleichmäßig verteilt als bei

Betonen mit kleiner bis sehr leichter Sedimentationsneigung. Das Gleitrohr-Rheometer kann folglich Informationen zur Veränderung der Mischung im Messprozess liefern. Diese können auf eine Sedimentation der Probe zurückgeführt werden.

Die Entmischungsneigung einer Mischung korreliert jedoch nur bedingt mit dem Druckverlust entlang der Pumpleitung, siehe Abbildung 4-56.

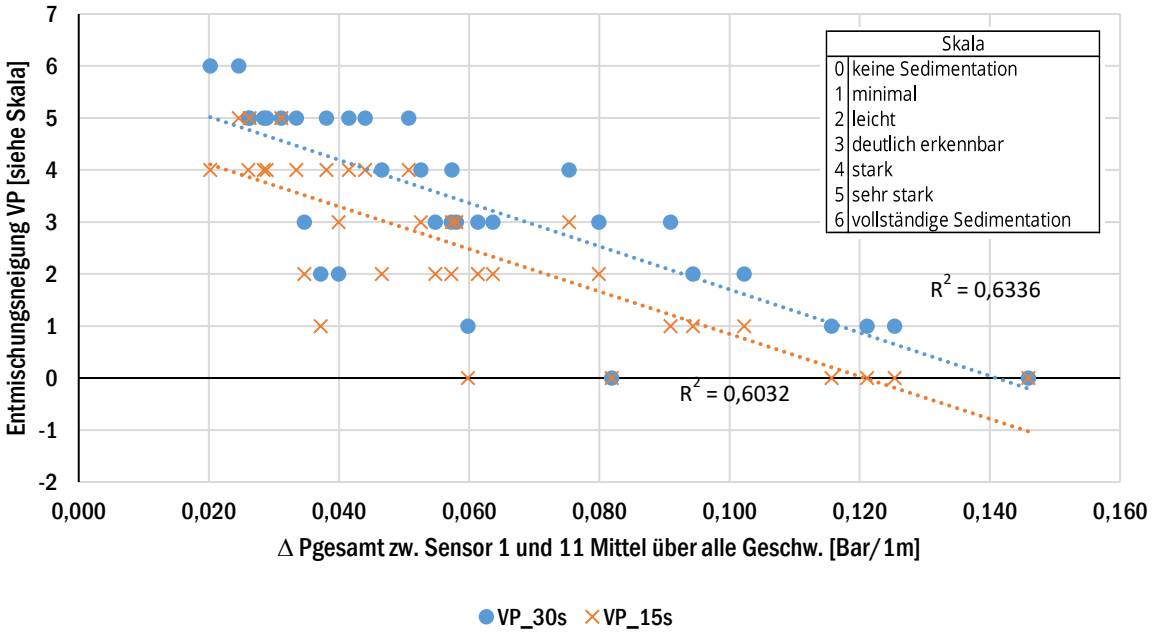


Abbildung 4-56: Abhängigkeit der Sedimentationsneigung zu dem Gesamtdruckverlust der Betone [Mattheis - 2022].

Gleiches gilt für die Aussagekraft der Sedimentationsneigung auf die Blockierungsneigung. Es ist konsequent zu sagen, dass eine Mischung die völlig entmischt mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Blockierung der Pumpleitung führen wird. Informationen zur Sedimentationsneigung können jedoch sinnvoll dazu genutzt werden die Verwertbarkeit gewonnener Messwerte zu validieren und gegebenenfalls anzupassen. Eine Mischung die völlig entmischt wird in der Regel aber gar nicht erst gepumpt, sondern entsorgt.

Weiterhin lässt sich beobachten, dass die Prognosegenauigkeit für Betonmischungen mit geringem Druckverlust stärkeren Streuungen unterliegt, siehe Abbildung 4-57.

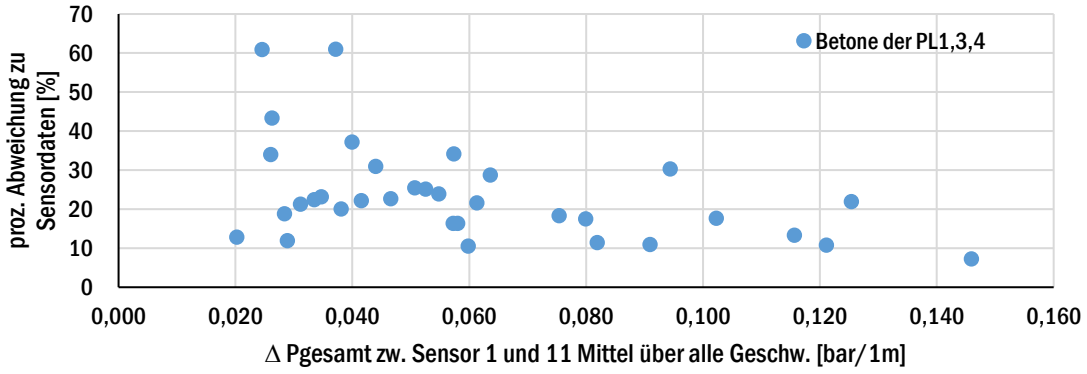


Abbildung 4-57: Abweichung der Sliper-Prognosen von Druckmessungen zu dem Gesamtdruckverlust zwischen Sensor 1 und 11, gemittelt über alle Fördergeschwindigkeiten [Mattheis - 2022].

Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass weniger viskose Betonmischungen stärker sedimentieren und daher zu größeren Streuungen bei den Prognosen führen. Zudem kann die Tendenz beobachtet werden, dass Betonmischungen mit einer geringeren Rohdichte mit einer höheren Abweichung der Sliper-Prognosen zu den Sensordaten an der Förderrohrwandung einhergehen (vgl. Abbildung 4-58).

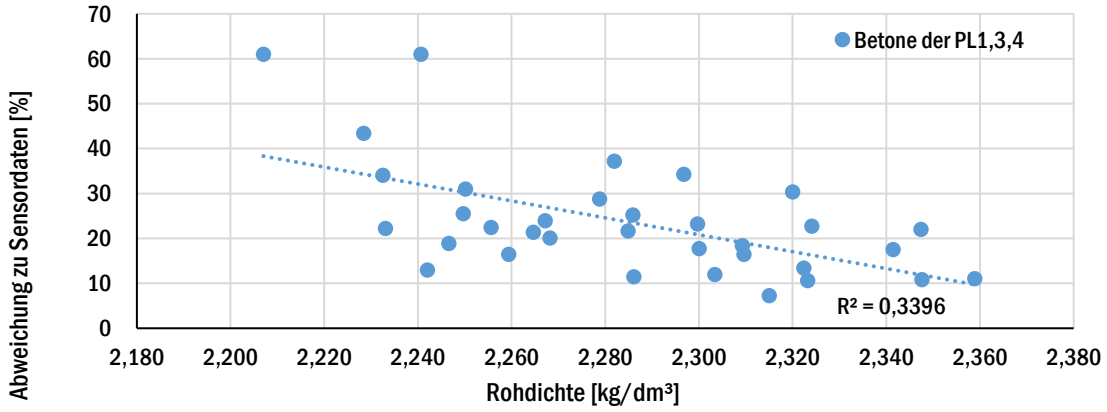


Abbildung 4-58: Tendenz zwischen Rohdichte und prozentualer Abweichung der Sliper-Prognosen [Mattheis - 2022].

Der Einfluss der Rohdichte auf die Prognosegenauigkeit kann unter anderem auf die Herausforderung zurückgeführt werden eine homogene Probe aus einer stark entmischenden Charge zu entnehmen.

Die Höhe des Druckverlustes entlang der gesamten Förderlänge hängt vom Förderabschnitt ab. Die Gleitrohr-Rheometer-Versuche werden an einem geraden Kunststoffrohr durchgeführt. Es ist daher naheliegend die Prognoseergebnisse auf ein gerades Rohrstück zu beziehen. Bei der Berechnung einer Förderstrecke mit Modelllängen, kann der geometrieabhängige Druckverlust zu einem gewissen Grad mit einbezogen werden. Die Prognosen des Slipers können unter Verwendung von Modelleitungslängen verbessert werden. Nachdem alle Abschnitte ins Verhältnis zu einem Meter geradem Stahlrohr (zwischen Sensoren 1 und 2) gesetzt werden, können Faktoren zur Bestimmung einer neuen Modelllänge bestimmt werden (vgl. Tabelle 4-42) [Mattheis - 2022].

Tabelle 4-42: Modellängen-Faktoren bezogen auf einen Meter gerades Stahlrohr, PL1.

	Sensor Nr.	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11
Faktor Modelllänge je Abschnitt [-]	7 m³/h	1,000	1,013	0,878	1,031	0,958	1,619	1,135	0,553	1,035	0,913
	14 m³/h	1,000	0,945	0,844	1,038	0,899	1,371	1,089	0,629	1,056	0,910
	21 m³/h	1,000	0,929	0,869	1,080	0,854	1,185	1,056	0,548	0,970	0,927
	Mittelwert	1,000	0,962	0,864	1,050	0,903	1,392	1,093	0,577	1,020	0,916

Auf Abbildung 4-59 werden die Abweichungen der Sliper-Prognosen auf Grundlage der realen Pumpleitungslängen und der Modellleitungslängen gegenübergestellt [Mattheis – 2022].

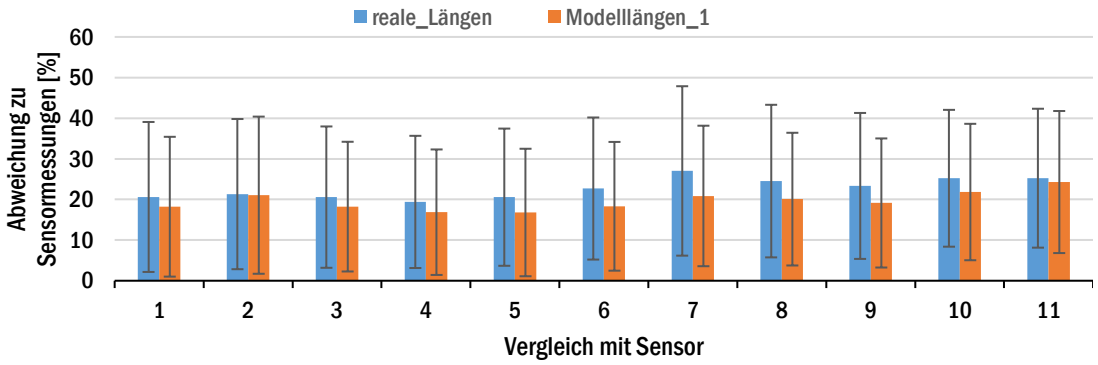


Abbildung 4-59: Sliper-Prognoseabweichung mit realer Pumpleitungslänge und Modellleitungslänge im Vergleich zu Druckmessungen im Mittel über alle Fördermengen; mit Standardabweichung [Mattheis - 2022].

Unter Verwendung von Modellleitungslängen konnte die Abweichung der Sliper-Prognosen für alle Pumpleitungsgeometrien gesenkt werden (vgl. Abbildung 4-60).

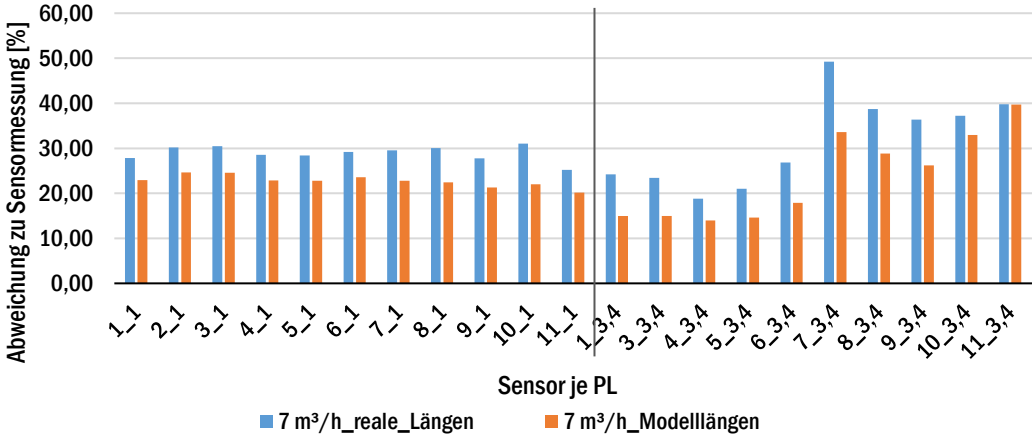


Abbildung 4-60: Gegenüberstellung der prozentualen Abweichungen der Sliper-Prognose zu den Drucksensormessungen bei der Fördermenge von 7 m³/h unter Einbezug realer sowie Modelllängen für jede Pumpleitungsgeometrie (_1 – PL1; _3,4 – PL3,4). [Mattheis - 2022].

4.3 Großmaßstäbliche Pumpversuche

Die großmaßstäblichen Pumpversuche hatten zum Ziel, die Erkenntnisse aus dem Technikum unter Praxisbedingungen zu bestätigen und zu erweitern. Neben einer deutlich längeren Förderleitung, die zu höheren Betriebsdrücken führte, wurde ein Förderleitungsdurchmesser von 125 mm verwendet, der üblicherweise in der Praxis Anwendung findet. Die für die

Pumpversuche benötigen Betone wurden von der Firma Wenzelburger Transportbetonwerk GmbH & Co. KG bereitgestellt. Das Transportbetonwerk befindet sich in unmittelbare Nähe zum Werksgelände der Firma Putzmeister, auf dem die Pumpversuche durchgeführt wurden. Dazu hat die Firma Putzmeister die Förderleitung und entsprechendes Personal zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Großpumpversuche wurden 11 Versuche durchgeführt. Die Tabelle 4-43 gibt einen Überblick über die Versuchsmatrix, die vorgenommenen Variationen und das Ziel der Untersuchungen.

Tabelle 4-43: Versuchsmatrix der großmaßstäblichen Pumpversuche.

Bezeichnung des Versuchs	Beton-bezeichnung	Art der Vorlauf-mischung	Anordnung Schwamm-kugel	Anordnung Kies-bremse	Ziel der Untersuchungen
V1-1	A2	Zementschlempe	1	1	Ankopplung an das Technikum
V1-2					
V1b-1	A2	Zementschlempe	1	2	Einfluss der Betonzusammensetzung und der Vorlaufmischung auf die Blockierungs-neigung
V1b-2					
V2b-1	Referenz-beton	Zementschlempe	1	2	Einfluss der Beton-zusammensetzung auf die Blockierungsneigung
V2b-2					
V3b-1	A2	Industrieschlempe	1	2	Einfluss der Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung
V3b-2					
V4b	A2	Zementschlempe	2	2	Einfluss der Anordnung der Schwammkugel
V5b			1	3	Einfluss einer Gleitschicht-neuausbildung
V6b	Referenzbeton der Firma Putzmeister	Zementschlempe	1	2	Einfluss der Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung

Zunächst wurden zwei Pumpversuche durchgeführt, mittels derer untersucht wurde, ob der Versuchsaufbau im Großmaßstab geeignet war, eine Blockierung der Förderleitung zu erzeugen. Hierzu wurde der Beton A2. Es konnte beobachtet werden, dass dieser Beton mit dem ersten Versuchsaufbau zwar am Ende der Förderstrecke kurzzeitig blockierte, aber nicht wie gewünscht im Bereich der Kiesbremse. Aus diesem Grund wurde der Versuchsaufbau geringfügig angepasst, indem der vertikale Förderabschnitt in seiner Höhe um einen Meter erweitert wurde und die Kiesbremse näher an den vertikalen Abschnitt vorgelegt wurde.

Die so durchgeführten Versuche V1b und V2b hatten den Zweck den Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Blockierungsneigung zu ergründen. Vergleichbar wie im Technikum sollte der Nachweis erbracht werden, dass der Referenzbeton entsprechend seiner gutmütigen Eigenschaften nicht blockiert und der Beton A2 aufgrund seiner Entmischungsneigung blockiert. Im Vergleich zwischen den Untersuchungen V1b und V3b sollte der Einfluss der Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung quantifiziert werden. Der Versuch V4b wurde herangezogen, um im Vergleich zu V1b exemplarisch den Einfluss der Anordnung der Schwammkugel zu ergründen. V5b wurde durchgeführt, um im Vergleich zu

V1b den Einfluss einer Gleitschichtneuausbildung darzustellen. Bei dem letzten Versuch V6b hingegen wurde exemplarisch ein Versuchsbeton der Firma Putzmeister gepumpt.

Da bei vorangegangenen Versuchen unter der Verwendung einer Industrieschlempe regelmäßig, aber zufällig Blockierungen der Förderleitung auftraten, war es das Ziel den Einfluss der zementgebundenen Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung zusätzlich nachzuweisen.

4.3.1 Charakterisierung der untersuchten Betone

In Tabelle 4-44 sind die Zusammensetzungen der Betone dargestellt, die zunächst für die Großpumpversuche definiert wurden. Die vom Transportbetonwerk bereitgestellten IST-Zusammensetzungen der einzelnen Betone können Tabelle 4-45 entnommen werden. Im Gegensatz zu den Technikum-Pumpversuchen wurden für die Betone zusätzlich eine Flugasche als Zusatzstoff verwendet (20 Vol.-% von Zement). Die einzelnen Chargenprotokolle befinden sich im digitalen Anhang dieses Berichtes. Die letzte Mischung (REF.-PM_V6b-1) wurde von der Firma Putzmeister konzipiert. Es handelte sich dabei um eine Betonmischung die zu Blockierungen der Förderleitung bei Pumpversuchen in Aichtal führte, die vor den in diesem Bericht beschriebenen großmaßstäblichen Versuchen stattgefunden haben. Diese Mischung führte bei einem Versuchsaufbau, der dem der großmaßstäblichen Versuche ähnelte, zu Blockierungen am Verteilermast. Anhand dieser problematischen Mischung, im Versuchsaufbau der großmaßstäblichen Versuche, sollte die Wirksamkeit der entwickelten Maßnahmen zur Vermeidung von Blockierungen verifiziert werden.

Tabelle 4-44: Entwurf-Zusammensetzungen der Betone in großmaßstäblichen Versuchen in kg/m³ und ausgewählte stoffliche Kenngrößen.

Ausgangsstoffe	Referenzbeton	A2
Zement	332	309
Flugasche	64	60
Wasser	180	194
Sand 0/4	714	715
Kies 4/8	320	323
Kies 8/16	750	745
Fließmittel	2,00	1,6
Sieblinie	B	B
w/z-Wert [-]	0,54	0,63

Tabelle 4-45: IST- Zusammensetzungen der Betone in großmaßstäblichen Versuchen in kg/m³ und ausgewählte stoffliche Kenngrößen.

Versuchsbezeichnung	V1-1	V1-2	V1b-1	V1b-2	V2b-1	V2b-2	V3b-1	V3b-2	V4b-1	V5b-1	V6b-1
Ausgangsstoffe und Betonbezeichnung	A2	A2	A2	A2	Referenz-beton	Referenz-beton	A2	A2	A2	A2	Referenz-beton-PM
Zement	308,4	309,3	308,9	309,8	332,9	333,3	308,4	309,8	308,4	309,8	309,8
Wasser	196,3	191,2	189,7	192,9	178,2	181,5	194,9	195,1	193,8	193,8	170,3
Sand 0/4	783,8	787,1	712	712,9	713,1	715,1	711,6	708,0	715,8	714,7	809,3
Kies 4/8	328,4	318	330,4	317,3	321,3	320,9	317,1	321,6	323,3	319,3	332,4
Kies 8/16	676,7	677,1	749,8	744,7	755,6	751,6	742,2	750,9	744,4	747,8	695,6
Fließmittel	1,87	1,89	1,88	1,88	2,01	1,99	1,54	1,56	1,56	1,54	2,01
Flugasche	56,4	58,7	59,6	56,9	63,1	63,6	57,3	57,8	58,2	57,3	59,6
Verzögerer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,29
Sieblinie	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
w/z-Wert [-]	0,63	0,63	0,62	0,62	0,53	0,54	0,63	0,63	0,63	0,63	0,55

Die Tabelle 4-46 fasst die Werte der Frischbetonuntersuchungen zusammen.

Tabelle 4-46: Messwerte der Frischbetoncharakterisierung.

Bezeichnung des Versuchs	Beton-bezeichnung	Ausbreit-maß [mm]	Roh-dichte [kg/dm³]	LP-Gehalt [Vol.-%]	Fließ-grenze [Pa]	plastische Viskosität [Pa·s]	Filtrations-rate [g/√s]	Sedi-mentations-rate [Vol.-%/s]
V1-1	A2	500	2,35	0,7	98,6	25,3	16,9	0,8
V1-2		585	2,32	0,7	84,5	21,4	15,22	1,1
V1b-1	A2	640	2,33	0,5	89,0	14,3	12,9	1,7
V1b-2		625	2,33	0,5	80,8	17,7	13	1,6
V2b-1	Referenz-beton	560	2,35	1,0	116,4	29,7	10,1	0,9
V2b-2		600	2,32	0,7	51,9	23,7	10,9	1,1
V3b-1	A2	675	2,32	0,5	95,7	18,1	11,3	1,8
V3b-2		650	2,32	0,4	73,6	16,4	11,9	1,6
V4b	A2	660	2,33	0,5	75,3	19,6	12,6	1,7
V5b		625	2,31	0,6	90,2	19,2	14	1,5
V6b	Ref.-PM	470	2,33	1,3	182,9	56,3	7,1	0,6

4.3.2 Einfluss der Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung

Um den Einfluss der Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung zu untersuchen, wurden zwei Vorlaufmischungen herangezogen, die sich in ihrer Zusammensetzung und in ihrem Eigenschaftsbild stark unterschieden. Zum einen wurde die zementgebundene Vorlaufmischung aus dem Technikum mit einem w/z-Wert von 0,4 verwendet. Zum anderen wurde eine sogenannte ‚Industrieschlempe' der Firma Putzmeister verwendet. Die Industrieschlempe wird als Pulver bereitgestellt und wird mit Wasser aufgemischt. Das Pulver sorgt dafür, dass das Wasser andickt (Erhöhung der Viskosität) und ist in seiner Konsistenz vergleichbar mit Tapetenkleister. Um die Interaktion zwischen Beton und Vorlaufmischung nachzuvollziehen, wurden die jeweiligen Vorlaumischungen mit roten Pigmenten eingefärbt.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Vorlaufmischung wurden mit dem Beton A2 durchgeführt. Dazu wurde der Beton mit jeder Vorlaufmischung zweimal gepumpt (V1b-1 und V1b-2 mit zementgebundener Vorlaufmischung und V3b-1 und V3b-2 mit Industrieschlempe).

Bei den Versuchen mit der Industrieschlempe (V3b-1 und V3b-2) ist bei beiden Versuchen eine Blockierung bereits beim Passieren der Betonfront der Kiesbremse entstanden. Bei den Versuchen mit der zementgebundenen Vorlaufmischung kam es lediglich beim Versuch V1b-1 zu einer temporären Blockierung am Ende der Förderleitung, die allerdings nur einen geringen Anstieg im Förderdruck verursachte. Dieses Ergebnis zeigt die Bedeutung der Vorlaumischung für den Pumpprozess. In erster Linie soll die Vorlaufmischung in der Praxis die Benetzung der leeren Förderleitung übernehmen. Dadurch soll die Vorlaufmischung die Bildung einer Gleitschicht an der Förderleitungswandung unterstützen, die ohne eine Vorlaufmischung allein aus der Partikelmigration im Beton gebildet wird. Insbesondere mit

Blick auf die Betonfront während des initialen Anpumpens verhindert die Vorlaufmischung auf diese Weise die Erhöhung der Feststoffkonzentration durch die stetige Benetzung der Förderleitungswandung, was einen erhöhten Pumpwiderstand innerhalb der Betonfront hervorruft (siehe Abbildung 4-61).

(a) (b)

Abbildung 4-61: Industrieschlempe (a) benetzt den Außenbereich der Betonsäule ohne sich nennenswert mit dem Beton zu vermischen und (b) Großteil der Industrieschlempe wird vor der Betonfront geschoben [Fotos: Mikhalev].

Es konnte beobachtet werden, dass die Industrieschlempe zwar die Aufgabe zur Benetzung der Förderleitungswandung übernommen hat, aber keinerlei Durchmischung mit dem Beton stattgefunden hat. Demnach bildet die Industrieschlempe zwar einen dünnen Film an der Förderleitungswandung, aber die sich ausbildende Gleitschicht des Betons erfolgt durch die Partikelmigration innerhalb des Betons. Dadurch entsteht ein Betonpfropfen, der reich an Gesteinspartikeln ist, aber wenig Zementleim besitzt. Dadurch ist die innere Verformbarkeit des Betonpfropfens eingeschränkt, was das Passieren von Querschnittsreduzierungen erschwert. Die Folge war eine Blockierung des Betons in der Kiesbremse, da keine radiale Kompression des Kornhaufwerkes stattfinden kann. Anders verhält sich eine zementgebundene Vorlaufmischung. Eine zementgebundene Vorlaufmischung benetzt nicht nur die Förderleitung mit einem dünnen Schmierfilm, sondern sorgt gleichzeitig für eine Gleitschicht, welche die Partikelmigration im Beton zur Ausbildung einer gleichmäßigen Pfropfenströmung wirkungsvoll unterstützt (vgl. Abbildung 4-62).

(a) (b)

Abbildung 4-62: Durchmischung der Betonfront mit pigmentierter Vorlaufmischung mit (a) Zementleim und (b) Industrieschlempe [Fotos: Mikhalev].

In den Untersuchungen konnte weiterhin festgestellt werden, dass sich eine Vorlaufmischung aus Zementleim vollständig mit der nachrückenden Betonfront vermischt und deutlich weicher und damit verformbarer ist (vgl. Abbildung 4-63). Hierzu wurde die Vorlaufmischung mit roten Pigmenten versetzt und die Verfärbung des gepumpten Betons bewertet.

(a) (b)

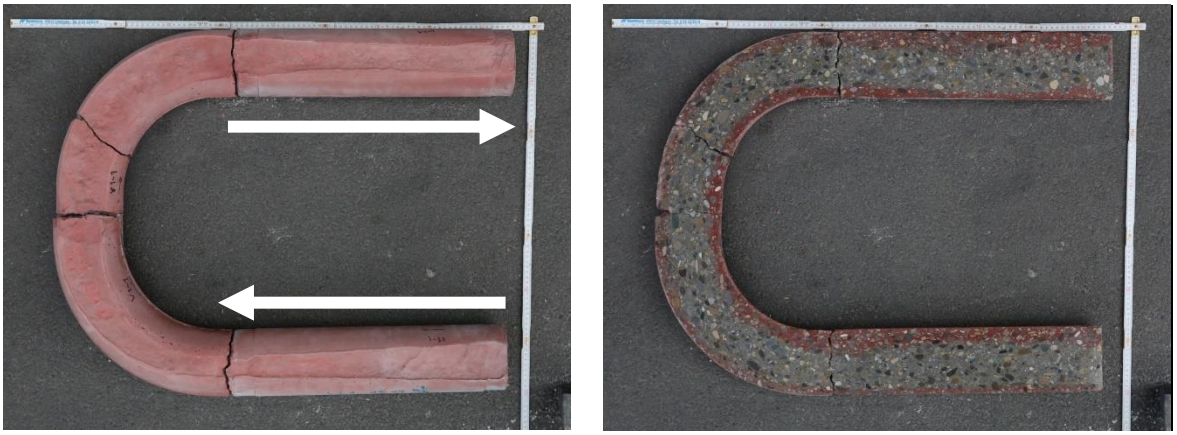
Abbildung 4-63: Ausbreitmaß nach dem Pumpen bei Entnahme der Betonfront (a) die sich mit der Vorlaufmischung vermischt hat und (b) Ausbreitmaß des nachrückenden, gepumpten Betons, der keinen Kontakt zur Vorlaufmischung aufwies [Fotos: Mikhalev]

Zusätzlich wurde ein Referenzbeton der Firma Putzmeister (V6b) verwendet, der aufgrund des geringen Ausbreitmaßes und der hohen Viskosität in vorangegangenen Untersuchungen der Firma Putzmeister gelegentlich und eher zufällig während durchgeführter Pumpversuche blockierte. Die Pumpversuche mit dem Referenzbeton wurden in der Vergangenheit mit der Industrieschlempe durchgeführt. Es konnte während der Versuche beobachtet werden, dass die Betonfront zunehmend an Zementleim/Schmierfilm verarmte, also an Zementleim und dadurch an innerer Verformbarkeit verlor. Unter der Verwendung der zementgebundenen Vorlaufmischung blockierte der Beton im Rahmen der hier beschriebenen Pumpversuche nicht, was exemplarisch die Wirksamkeit einer zementgebundenen Vorlaufmischung im Gegensatz zur Industrieschlempe auf die Blockierungsneigung beweist.

4.3.3 Partikelmigration und Interaktion mit der Vorlaufmischung

Um das Verhalten des Flusses eines Betons beschreiben zu können, muss das Phänomen der Partikelmigration betrachtet werden. Wenn Beton durch eine Förderleitung gefördert wird, reibt die äußerste Betonschicht an der Förderleitung. Dadurch entstehen Reibungskräfte, die eine Scherung des Materials bewirken. Bei scherinduzierter Partikelmigration werden Partikel von der Oberfläche des Betonzylinders in tiefere Schichten des Querschnittes bewegt. Die Bewegung findet hauptsächlich, aber nicht ausschließlich im Scherbereich zwischen der Pfropfenströmung und der Gleitschichtströmung statt. Beim Verwenden einer Vorlaufmischung mischt sich diese durch Scherung in die nachrückende Betonfront und geht somit in den Beton über.

Um diesen Effekt beobachten zu können, wurden Rohrbogenproben mit pigmentierter Vorlaufmischung und nachrückendem, nicht pigmentiertem, Beton durchströmt. Der Förderprozess wurde dann abrupt angehalten, die Proben versiegelt und anschließend zum Aushärten gelagert. Als die Proben ausgehärtet waren, wurden sie längs der Strömungsrichtung aufgeschnitten (vgl. Abbildung 4-64).



(a) (b)

Abbildung 4-64: Ausgehärtete Bogenprobe mit (a) benetztem Außenbereich und gekennzeichneter Fließrichtung und (b) Längsschnitt der Probe mit sichtbarer Durchmischung der pigmentierten zementgebundenen Vorlaufmischung im Scherbereich [Fotos: Mikhalev].

Anhand der gewonnenen Proben können der für Beton charakteristische Scherbereich und die Pfropfenströmung klar quantifiziert werden.

4.3.4 Einfluss der Schwammkugelanordnung auf die Blockierungsneigung

Im Zuge der großmaßstäblichen Versuche wurde zudem der Einfluss der Anordnung der Schwammkugel auf die Blockierungsneigung exemplarisch untersucht (Versuchsbezeichnung V4b). Dazu wurde eine zusätzliche Schwammkugel zwischen Vorlaufmischung und Beton angeordnet (vgl. Abbildung 4-65). Eine solche Anordnung ist für die Praxis unüblich, sollte aber die Wirkung der Vorlaufmischung veranschaulichen.

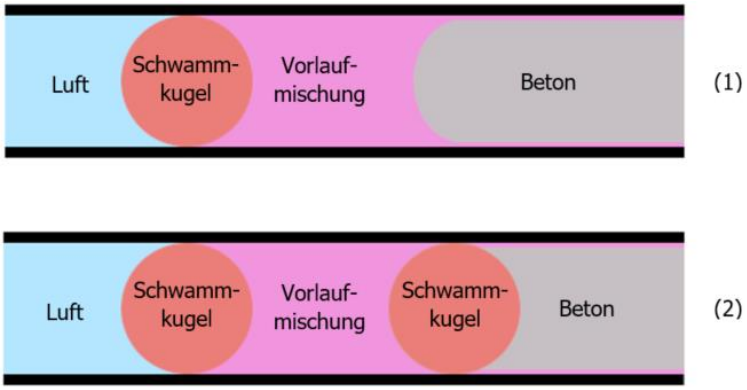


Abbildung 4-65: Schwammkugelanordnung (1) mit direktem Kontakt von Beton und Vorlaufmischung (2) ohne direkten Kontakt von Beton und Vorlaufmischung.

Wie im Abschnitt 4.3.2 beschrieben, vermischte sich die Betonfront mit der Vorlaufmischung aus Zementleim und weichte die Konsistenz im Kontaktbereich auf. Der zusätzliche Zementleim erleichtert die innere Verformbarkeit des Betongefüges, was die Blockierungsneigung reduziert. In Abbildung 4-65 (1) sorgt die zusätzliche Schwammkugel dafür, dass die Vorlaufmischung nicht uneinheitlich durch die Betonfront verdrängt wird. Für einige Anwendungen, wie zum Beispiel in Fertigteilwerken, ist es zweckmäßig die Vorlaufmischung von dem nachrückenden Beton zu trennen, damit die Festbetoneigenschaften der hergestellten Bauteile nicht beeinflusst werden.

Während der Untersuchungen trat bei der Anordnung mit zwei Schwammkugeln eine Blockierung auf. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die zweite Schwammkugel vor der Betonfront eine Durchmischung mit dem Beton verhindert. In der Folge verarmt die Betonfront durch die stetige Ausbildung einer Gleitschicht, wodurch die innere Verformbarkeit der Betonfront beeinträchtigt wird, was Auslöser der Blockierung war.

4.3.5 Untersuchungen zur Gleitschichtneuausbildung

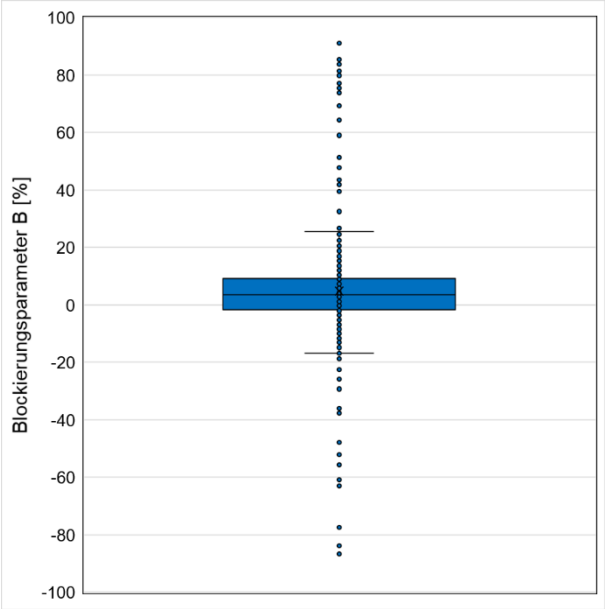
Zuletzt wurde auch das Phänomen der Gleitschichtneuausbildung exemplarisch im Rahmen der Großpumpversuche untersucht. Dazu wurde die Distanz zwischen vertikalem Förderabschnitt und Kiesbremse erweitert, damit die durch den Fall entmischte Betonfront infolge der erweiterten Ruhe- und Konsolidierungshase erneut in die Pfropfenströmung übergehen kann, was die Gefahr einer Blockierung verringern sollte.

In den Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass die Verlängerung der Ruhe- und Konsolidierungshase vergleichbar wie im Technikum dazu geführt hat, dass der Beton A2 nicht im Bereich der Kiesbremse blockierte. Auch wenn es zu einem späteren Zeitpunkt am Ende der Pumpstrecke unerwartet zu einer temporären Blockierung kam, zeigt der veränderte Versuchsaufbau den Einfluss der Gleitschichtneuausbildung auf die Blockierungsneigung. Demnach führt eine Erweiterung der Ruhe- und Konsolidierungshase zu einer Restrukturierung der entmischten Betonfront, was einen Übergang hin zur günstig wirkenden Pfropfenströmung bewirkt. Dieser Effekt reduziert das Risiko einer Blockierung nach entsprechenden Störstellen, wie im Experiment bewiesen.

4.3.6 Identifizierung von Blockierungen mittels Hydrauliköldruck-Zeit-Verlauf

Wie in Kapitel 4.2.6 beschrieben, wurde auch für die großmaßstäblichen Pumpversuche anhand der Hydrauliköldruck-Zeit-Verläufe der Blockierungsparameter B für jeden Kolbenhub während des initialen Anpumpens bestimmt.

Auf der Grundlage des Blockierungsparameters B wurde für die großmaßstäblichen Pumpversuche mittels Box-Whisker-Plots statistisch ein Grenzwert $B_{Grenz.}$ ermittelt (vgl. Abbildung 4-66), bei dessen Überschreitung mit einer erheblichen Zunahme der Blockierneigung zu rechnen ist.



(a)

Streuungs- und Lageparameter	Blockierungsparameter B [%]
Minimum	-85,59
Quartil 1	-1,71
Median	3,44
Quartil 3	9,27
Maximum	91,12
Interquantilabstand IQA	10,98
1,5 · IQA	16,47
Obere Ausreißergrenze OA	25,74
untere Ausreißergrenze UA	-18,18
Grenzwert $B_{Grenz.}$	25,70

(b)

Abbildung 4-66: Grafische Darstellung des Box-Plots (links) und die dazugehörigen Streuungs- und Lageparameter aus den großmaßstäblichen Pumpversuchen [Cotardo – 2023].

Es zeigt sich, dass der Grenzwert $B_{Grenz.}$ mit 25,7 % im Gegensatz zum Grenzwert, der anhand der Technikum-Pumpversuche bestimmt wurde (vgl. Kap. 4.2.6; $E_{Grenz,Tech}$ = 30,7), geringer ist.

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit des aufgestellten Grenzwertes $B_{Grenz.}$ der großmaßstäblichen Pumpversuche erfolgt eine Gegenüberstellung der im Experiment eingetretenen Blockierung und der durch die Überschreitung des Grenzwerts indizierten Blockierung (vgl. Tabelle 4-47).

Tabelle 4-47: Gegenüberstellung der in den großmaßstäblichen Pumpversuchen eingetretenen Blockierung und der durch eine Überschreitung des Grenzwerts induzierten Blockierung.

Bezeichnung des Pumpversuchs	Blockierung im Experiment	Überschreitung des Grenzwerts $B_{Grenz.}$	Kolbenhub-Nr. bei Eintritt einer Blockierung im Experiment	Kolbenhub-Nr. bei Überschreitung des Grenzwerts $B_{Grenz.}$
V1-1	ja	ja	45	5, 44, 45
V1-2	ja	ja	41	41
V1b-1	ja	ja	48	47, 48
V1b-2	nein	nein	-	-
V2b-1	nein	nein	-	-
V2b-2	nein	nein	-	-
V3b-1	ja	ja	20	17-20, 40, 52
V3b-2	ja	ja	21	15-21
V4b	ja	ja	21, 38	19-21, 26, 33, 39-38
V5b	ja	ja	38	36-38, 48
V6b	nein	nein	-	-

Es zeigt sich, dass erneut sämtliche Blockierungen, die im Experiment eingetreten sind, durch eine Überschreitung von Grenzwert $B_{Grenz.}$ gekennzeichnet waren und eine Überschreitung von $B_{Grenz.}$ deutlich vor dem Eintreten eine irreversiblen Blockierung stattgefunden hat. Bei den Pumpversuchen V1-1 und V1-2 sind im Experiment keine irreversiblen Blockierungen aufgetreten, obwohl es zu einer Überschreitung des Grenzwerts $B_{Grenz.}$ gekommen ist. Ein Blick in die Daten offenbart jedoch, dass in beiden Fällen eine temporäre Blockierung eingetreten ist. Da in beiden Fällen eine ausreichend hohe Leistungsreserve der Pumpe vorhanden war, kam es zum „Durchrutschen" der blockierten Betonfront.

4.3.7 Analysen blockierter Betongefüge der großmaßstäblichen Pumpversuche

Vergleichbar wie in Abschnitt 4.2.6 beschrieben erfolgte auch während der großmaßstäblichen Pumpversuche eine Entnahme und Analyse blockierter Betongefüge aus der Förderleitung, um Veränderungen in der Betonzusammensetzung zu quantifizieren.

Exemplarisch wurden während drei Versuchen, bei denen im Experiment eine Blockierung eintratt, Proben entnommen (vgl. Abbildung 4-67). Dabei handelte es ich um die Versuche V3b-1, V3b-2 und V4b-1. Zur Quantifizierung der Betonzusammensetzung wurde die Rohdichte der Betonproben bestimmt. In Abbildung 4-68 wird das Ergebnis der Messungen grafisch dargestellt.

(a) (b)

Abbildung 4-67: Foto eine blockierten Förderleitung (a) und eine entnommene Betonprobe auf dem Sieb zur Auswaschung [Fotos: Mikhalev].

Die Blockierungen traten bei den drei genannten Versuchen wie gewünscht unmittelbar an der Kiesbremse auf. Es ist vergleichbar wie bei den Technikum-Versuchen zu erkennen, dass das blockierte Betongefüge (Position 1) eine erhöhte Dichte gegenüber der SOLL-Dichte des homogenen Betons aufweist, siehe Abbildung 4-68.

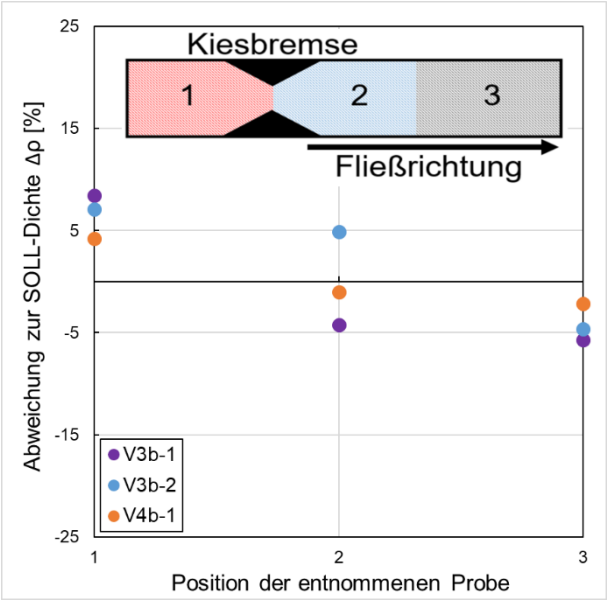


Abbildung 4-68: Abweichung zur SOLL-Dichte in Abhängigkeit von der Position der Entnahme.

Die Bereiche nach dem blockierten Betongefüge weisen demgegenüber eine verringerte Dichte gegenüber der SOLL-Dichte auf, was für einen höheren Wasser- und/oder Zementleimanteil des entnommenen Betongefüges spricht. Die Messungen legen nahe, dass der entstehende Druckgradient im Bereich der Blockierung zu einer Absonderung von Zementleim und Wasser führt.

4.3.8 Füllgradbestimmung der Förderzylinder

Da in einigen Literaturstellen Angaben zum Füllgrad der Förderzylinder gemacht wurden, die allerdings nicht mit den Erfahrungen aus der Praxis übereinstimmen, wurden die durchgeführten Untersuchungen weiterhin dazu genutzt um abgesicherte Erkenntnisse zum Füllgrad von Förderzylindern bereitzustellen.

Der Füllgrad gibt an, wie viel Volumenprozent des gesamten Volumens eines Förderzylinders nach dem Erreichen der Endposition des Förderkolbens in Saugstellung mit Beton befüllt ist. Der Füllgrad ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Zum einen von der Förderrate Q, da sie vorgibt, wie viel Zeit dem Beton zur Verfügung gestellt wird, um in Saugstellung des Förderkolbens in den Förderzylinder zu fließen. Zum anderen ist der Füllgrad von der Ansaugöffnung (Querschnittsfläche) des Förderzylinders abhängig. Je größer die Ansaugöffnung ist, desto höher ist der Füllgrad des Förderzylinders, was den großen Vorteil einer S-Rohrweiche darstellt. Darüber hinaus ist der Füllgrad von den Fließeigenschaften des Betons abhängig, da die plastische Viskosität μ die Fließgeschwindigkeit in den Förderzylinder beeinflusst. Je geringer die plastische Viskosität μ der Betons ist, desto höher ist die Fließgeschwindigkeit bei gleicher Einwirkung und desto höher ist der Füllgrad bei gleicher Ansaugzeit. Des Weiteren ist die Fließgeschwindigkeit des Betons vom hydrostatischen Druck abhängig, der von der Füllhöhe des Aufgabetrichters abhängig ist. Bei beispielsweise einem Meter Füllhöhe des Betons im Aufgabetrichter entsteht ein maximaler Druckgradient von ungefähr 1,25 bar (für $\rho \approx 2{,}5$ kg/dm^3), der als treibende Kraft wirkt. Weiterhin ist der Füllgrad vom Luftporengehalt des Betons abhängig. Da Luft kompressibel ist, kann ein Füllgrad von 100 Vol.-% unter keinen Umständen vorliegen. Zuletzt kann es während des Umschaltens der S-Rohrweiche zu einem Rückfluss des Betons aus der Förderleitung bzw. der S-Rohrweiche kommen, da sich für kurze Zeit ein Druckgradient (max. 1 bar = Atmosphärischer Druck) in

Richtung der Pumpe aufbaut, bevor der Betriebsdruck in Druckstellung wirkt. Durch einen Rückfluss kann sich der effektive Füllgrad reduzieren. Auf diese Weise kommt die bereits erwähnte Förderlücke zustande.

Die ortsaufgelösten Druckmessungen in der Förderleitung wurde genutzt, um den Füllgrad im Rahmen der großmaßstäblichen Pumpversuche zu bestimmen. Die lange Förderstrecke bei den großmaßstäblichen Pumpversuchen führte zu einer relativ hohen Messgenauigkeit, gegenüber den Technikum-Pumpversuchen. Zur Bestimmung des Füllgrads wurden das Volumen der Förderzylinder V_Z sowie der Durchmesser der Förderleitung D_L herangezogen. Bei einem Volumen des Förderzylinders von V_Z = 44 dm³ und einem Förderleitungsdurchmesser von D_L = 125 mm ergibt sich für jeden Kolbenhub bei einem Füllgrad von 100 Vol.-% eine um 3,548 m mit Beton gefüllte Förderleitung (Fülllänge $V_{L,100}$ = 3,548 m). Diese Kenntnis wurde genutzt, um mit Hilfe der positionsgenauen Messung des Förderleitungsdrucks den Füllgrad zu bestimmen. Da der Abstand jedes Drucksensors zur Pumpe bekannt ist, kann in Abhängigkeit von der Fülllänge $V_{L,100}$ bei einem Füllgrad von 100 Vol.-% auf den Füllgrad geschlossen werden, indem die Kolbenhubzahl bestimmt wird, bis der jeweilige Drucksensor von der Betonfront erreicht wurde.

Zur Bestimmung der Förderkolbenhubzahl wurden die Drucksensoren 4, 7, 8, 9 und 10 verwendet, da zwischen den Drucksensoren möglichst viel Wegstrecke lag. Tabelle 4-48 stellt den Abstand des Drucksensors und den daran gebundenen Füllgrad der Förderleitung (Gesamtlänge der Förderleitung L = 121,8 m) für die Drucksensoren dar.

Tabelle 4-48: Abstand der Drucksensoren zur Betonpumpe und Füllgrad der Förderleitung beim Erreichen des Betons des Drucksensors.

Bezeichnung des Drucksensors [-]	Abstand des Drucksensors zur Betonpumpe [m]	Füllgrad der Förderleitung beim Erreichen des Betons am Drucksensor [Vol.-%]
4	39,58	32,50
7	47,83	39,27
8	61,76	50,71
9	79,57	65,33
10	87,27	71,65

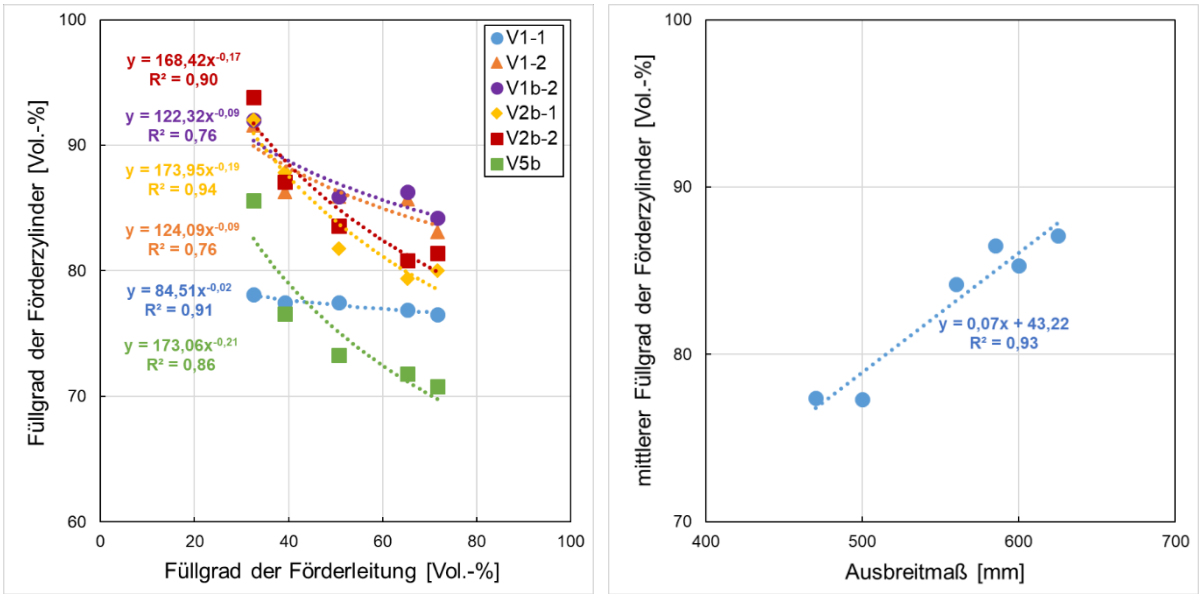
In Tabelle 4-49 ist der Füllgrad der Förderzylinder mit Angaben zur Berechnung des Füllgrads der einzelnen Pumpversuche dargestellt. Da während der Pumpversuche Blockierungen aufgetreten sind und die Förderleitung geöffnet wurde, um die Blockierung zu beseitigen, konnte nicht für jeden Pumpversuch ein Füllgrad verlässlich bestimmt werden, da eine undefinierte Betonmenge bei der Beseitigung der Blockierung verloren ging.

Tabelle 4-49: Angaben zur Bestimmung des Füllgrads der Förderzylinder.

Bezeichnung des Pump-versuchs	Bezeichnung des Druck-sensors [-]	Förderkolben-hubzahl bis zum Erreichen des Drucksensors [-]	Fülllänge $V_{L,100}$ bei einem Füllgrad von 100 Vol.-% in Abhängigkeit von der Förderkolbenhubzahl [m]	Füllgrad der Förderzylinder [Vol.-%]	Mittlerer Füllgrad der Förderzylinder [Vol.-%]
V1-1	4	14,13	50,65	78,1	77,3
	7	17,22	61,72	77,5	
	8	22,24	79,72	77,5	
	9	28,87	103,47	76,9	
	10	31,82	114,03	76,5	
V1-2	4	12,05	43,20	91,6	86,5
	7	15,47	55,43	86,3	
	8	20,05	71,86	85,9	

	9	25,92	92,88	85,7	
	10	29,31	105,04	83,1	
V1b-2	4	12,01	43,05	92,0	87,1
	7	15,30	54,83	87,2	
	8	20,06	71,90	85,9	
	9	25,71	92,16	86,3	
	10	28,92	103,65	84,2	
V2b-1	4	12,00	43,02	92,0	84,2
	7	15,19	54,45	87,8	
	8	21,07	75,51	81,8	
	9	27,95	100,17	79,4	
	10	30,43	109,05	80,0	
V2b-2	4	11,77	42,20	93,8	85,3
	7	15,32	54,92	87,1	
	8	20,62	73,90	83,6	
	9	27,46	98,41	80,8	
	10	29,91	107,18	81,4	
V5b	4	12,09	46,24	85,6	77,4
	7	17,42	62,44	76,6	
	8	23,05	84,21	73,3	
	9	30,92	110,82	71,8	
	10	34,37	123,18	70,8	
Mittelwert sämtlicher Messungen					82,2

Die Berechnungen zur Füllgradbestimmung der Förderzylinder ergeben einen Mittelwert über sämtliche Messungen von 82,2 Vol.-%, was gut mit den empirischen Erfahrungen der Praxis übereinstimmt. Es ist zu erkennen, dass der Füllgrad überproportional zunimmt, je kleiner der Füllgrad der Förderleitung ist (vgl. Abbildung 4-67, a). Da mit höherem Füllgrad der Förderleitung der Druck im Förderzylinder näherungsweise linear zunimmt, kann von einem druckabhängigen Füllgrad der Förderzylinder ausgegangen werden, was aus physikalischen Gesichtspunkten plausibel erscheint (gemäß BOYLE-MARIOTTE'sches Gesetz). Darüber hinaus ist ersichtlich, dass der mittlere Füllgrad der Förderzylinder proportional mit steigendem Ausbreitmaß ansteigt (vgl. Abbildung 4-69, b), was beweist, dass der Füllgrad der Förderzylinder von der Fließfähigkeit des Betons abhängig ist und umso größer ist, je höher die Fließfähigkeit des Betons ist.



(a) (b)

Abbildung 4-69: Füllgrad der Förderzylinder in Abhängigkeit vom Füllgrad der Förderleitung (a) und mittlerer Füllgrad der Förderzylinder in Abhängigkeit vom Ausbreitmaß (b).

Die Untersuchungen zum Füllgrad der Förderzylinder werden durch Untersuchungen im Technikum bestätigt (vgl. Abbildung 4-70), wobei die Messgenauigkeit bei den deutlich kürzeren Förderstrecken im Technikum geringer war. Es zeigt sich, dass der mittlere Füllgrad (Stichprobe n = 20) der Förderzylinder bei 83 Vol.-% liegt, was in guter Übereinstimmung mit den Messungen während der großmaßstäblichen Pumpversuche steht. Gleichzeitig ist tendenziell ein Zusammenhang zwischen dem Füllgrad der Förderzylinder und dem Ausbreitmaß des Betons ersichtlich, gleichwohl der Zusammenhang deutlich geringer ausgeprägt ist, als es bei den großmaßstäblichen Pumpversuchen der Fall ist.

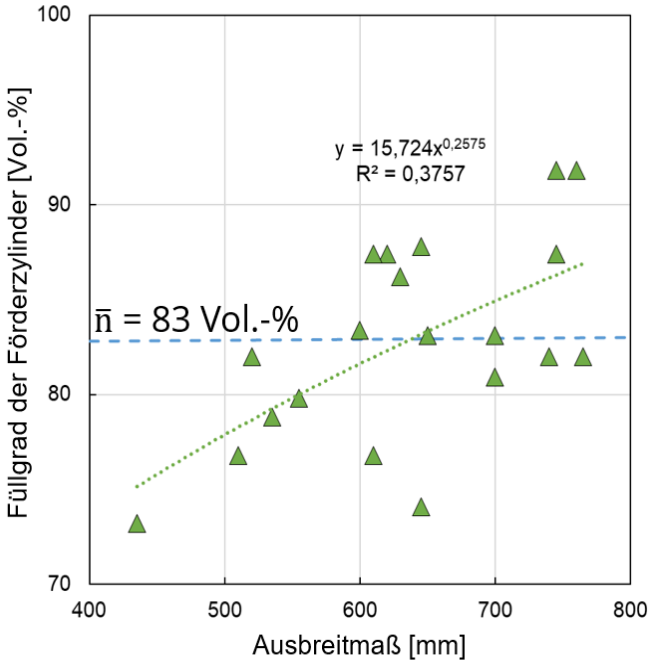


Abbildung 4-70: Füllgrad der Förderzylinder in Abhängigkeit vom Ausbreitmaß des Betons aus den Technikum-Pumpversuchen.

5 Modellbildung und Verfahrensbeschreibung

5.1 Quantitatives Modell zur Beschreibung wesentlicher betontechnischer Einflüsse auf das Pumpverhalten von Beton

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung wurde zunächst eine Modellvorstellung zur Beschreibung des qualitativen Zusammenhangs zwischen der stofflichen Zusammensetzung des Betons und dem Pumpverhalten entwickelt. Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen war es, diese Modellvorstellung in ein quantitatives Modell zu überführen.

Die in Abbildung 5-1 dargestellte Modellvorstellung beruht auf einer Idealisierung des Betongefüges. Das Betongefüge setzt sich anteilig aus Gesteinskörnung und Zementleim zusammen, deren Volumenanteile in Summe das Gesamtbetonvolumen ergeben.

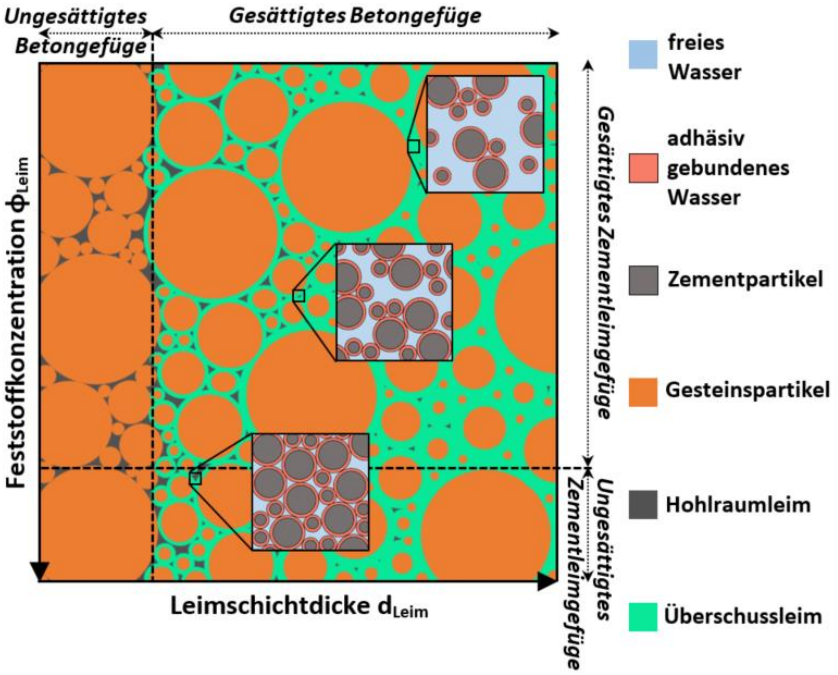


Abbildung 5-1: Modellvorstellung zur qualitativen Beschreibung des Betongefüges durch zwei wesentliche Modellgrößen ϕ_{Leim} und d_{Leim} [Cotardo – 2023].

Der Zementleim dient dabei als Trägerflüssigkeit für die groben Gesteinspartikel. Die Modellgröße Leimschichtdicke d_{Leim} beschreibt das Verhältnis zwischen Zementleim und Gesteinspartikel, wobei nicht bloß der volumenbezogene Anteil der Gesteinskörnung, sondern auch die Kornform und die Partikelgrößenverteilung berücksichtigt werden. ‚Unendlich' große Leimschichtdicken d_{Leim} beschreiben einen „Beton", der keine groben Gesteinspartikel beinhaltet – als reinen Leim. Ist die Leimschichtdicke d_{Leim} demgegenüber gleich Null, liegt ein Gemisch vor, bei dem ausschließlich die Hohlräume im Kornhaufwerk bestehend aus Gesteinskörnung mit Leimgefüllt sind und die groben Gesteinspartikel im direkten Kontakt miteinander stehen.

Zusätzlich wird über die Modellgröße Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} das Zementleimgefüge in seiner Zusammensetzung beschrieben. Das Zementleimgefüge setzt sich aus dem Anmachwasser und mehlfeinen Stoffen (Zement und Zusatzstoffe) zusammen, wobei das Wasser als Dispersionsmittel für die mehlfeinen Feststoffe fungiert. Die Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} dient als Ersatzkenngröße für eine Wasserfilmdicke d_W um die feinen Feststoffpartikel, äquivalent zur Leimschichtdicke d_{Leim} um die groben Partikel.

Die Wasserfilmdicke d_W kann allerdings nicht direkt gemessen oder aus geometrischen Abhängigkeiten berechnet werden, da sie neben den volumenbezogenen Anteilen von Wasser und Feststoff zusätzlich von der Fließmittelwirkung abhängt. Die Fließmittelwirkung kann hingegen nicht durch die Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} ausgedrückt werden, was ein Manko der hier vorgestellten Modellvorstellung darstellt.

Nichtsdestotrotz kann durch die vorgenommene Idealisierung des Beton- und Zementleimgefüges ein qualitativer Zusammenhang zum Eigenschaftsbild des Betons hergeleitet werden. Aus den Erkenntnissen, die die Literatur bereitstellt, können die folgenden qualitativen Zusammenhänge beschrieben werden. Je höher die Leimschichtdicke d_{Leim} und je geringer die Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} sind, desto geringer ist der Pumpwiderstand des Betons. Dies ist einerseits durch die verbesserte Fließfähigkeit des Betons zu erklären, denn sowohl die Fließgrenze τ_0 als auch die plastische Viskosität μ des Betons nehmen mit den oben angegeben Veränderungen der Parameter d_{Leim} und ϕ_{Leim} ab, da hydrodynamische Wechselwirkungen gegenüber interpartikulären Wechselwirkungen und direkte Kontaktwechselwirkungen dominieren. Anderseits steigt auch die Entmischungsneigung des Betons, die zur Ausbildung der fürs Pumpen fördernden Gleitschicht beiträgt. Gleichzeitig steigt mit der zunehmenden Entmischungsneigung auch die Blockierungsneigung des Betons. Für das vorliegende Modell wird vereinfachend angenommen, dass die Auswirkung der Gleitschicht durch die anderen Parameter des Modells mitabgebildet ist.

Um aufbauend auf der Modellvorstellung eine Quantifizierung zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Eigenschaftsbild vorzunehmen, wurden in einem ersten Schritt die Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen herangezogen. Diese Versuche wurden unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt und die IST-Zusammensetzung der Betone war genau bekannt. Zunächst wird der Einfluss der Modellgrößen auf das Ausbreitmaß und auf die plastische Viskosität μ dargestellt (vgl. Abbildung 5-2), da das Ausbreitmaß für die Praxis eine wesentliche Kenngröße zur Beurteilung der Betoneigenschaften und -qualität darstellt und mit der Fließgrenze τ_0 korreliert und die plastische Viskosität μ des Betons maßgeblich das Pumpverhalten bei praxisrelevanten Förderraten beeinflusst.

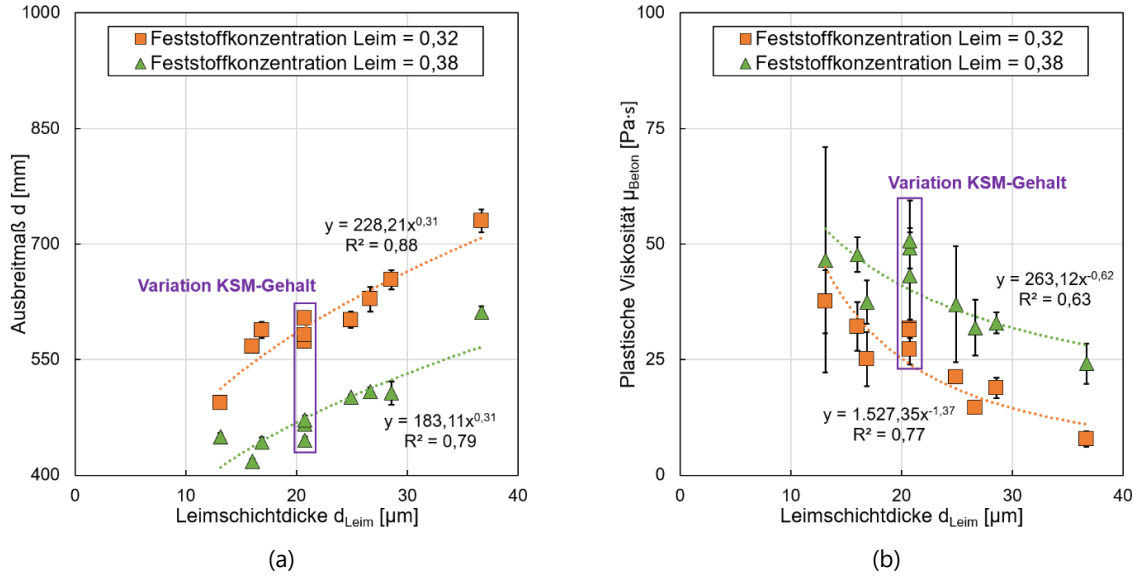


Abbildung 5-2: Ausbreitmaß (a) und plastische Viskosität (b) in Abhängigkeit von der Leimschichtdicke bei variierender Feststoffkonzentration des Leims [Cotardo – 2023].

Es kann beobachtet werden, dass das Ausbreitmaß mit sinkender Leimschichtdicke d_{Leim} überproportional abnimmt und mit sinkender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} zunimmt. Die plastische Viskosität μ des Betons steigt hingegen überproportional mit abnehmender Leimschichtdicke d_{Leim} und nimmt kleinere Werte für höhere Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} an. Da die Leimschichtdicke d_{Leim} nicht bloß das Leimvolumen V_{Leim}, sondern auch die Granulometrie der Gesteinskörnung berücksichtigt, ist mit einem hohen Bestimmtheitsmaß R^2 eine gute Korrelation zwischen der Modellgröße und dem Ausbreitmaß zu erkennen. Der Zusammenhang zur plastischen Viskosität μ des Betons ist hingegen weniger stark ausgeprägt, was jedoch auf die geringere Genauigkeit einer rheologischen Messung insbesondere bei zur Entmischung neigenden Betonen zurückzuführen ist.

Mit Blick auf die Entmischungsneigung von Beton wird aus Abbildung 5-3 deutlich, dass mit steigender Leimschichtdicke d_{Leim} und mit sinkender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ und die Sedimentationsrate $\dot{S}$ näherungsweise linear ansteigen, was die qualitativen Zusammenhänge der Modellvorstellung quantitativ belegt.

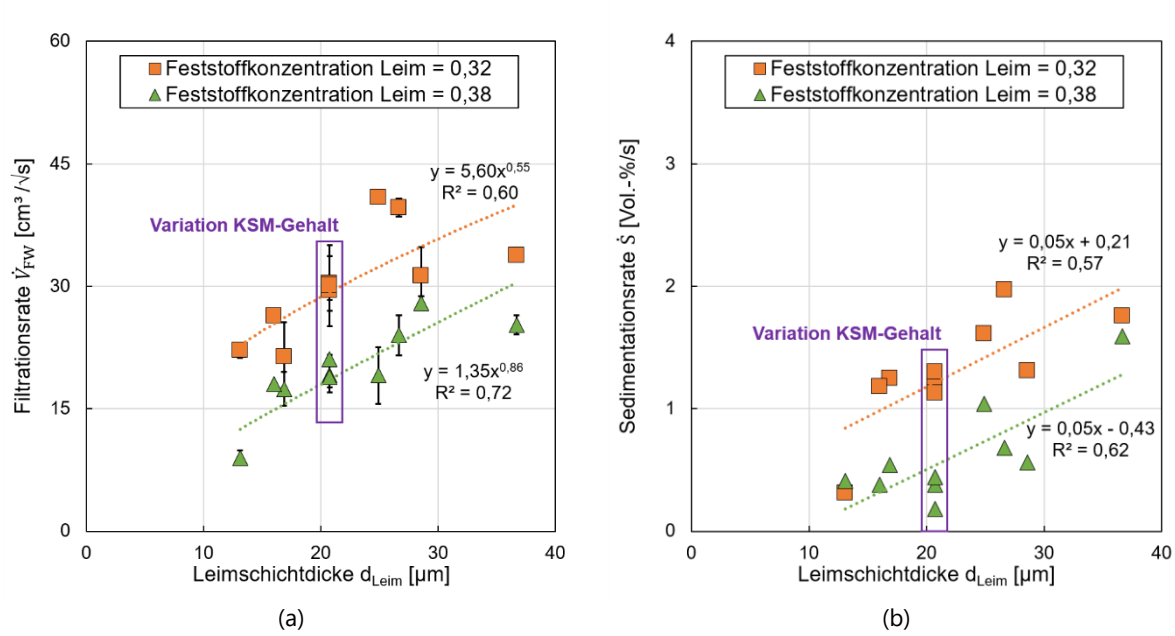


Abbildung 5-3: Filtrationsrate (a) und Sedimentationsrate (b) in Abhängigkeit von der Leimschichtdicke bei variierender Feststoffkonzentration des Leims [Cotardo – 2023].

Zuletzt wurde anhand der Pumpversuche ein Zusammenhang zwischen den Modellgrößen und dem Druckverlust ΔP als Ausdruck des Pumpwiderstandes aufgestellt; vgl. Abbildung 5-4. Der Druckverlust ΔP nimmt mit sinkender Leimschichtdicke d_{Leim} überproportional zu, während mit zunehmender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} ein näherungsweise proportionaler Anstieg zu beobachten ist.

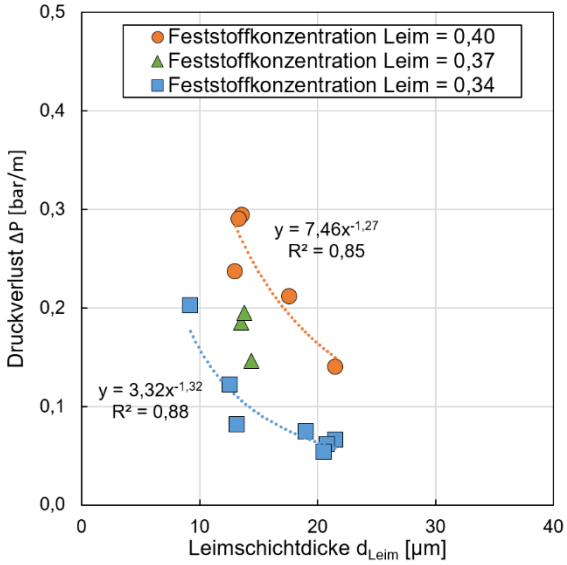
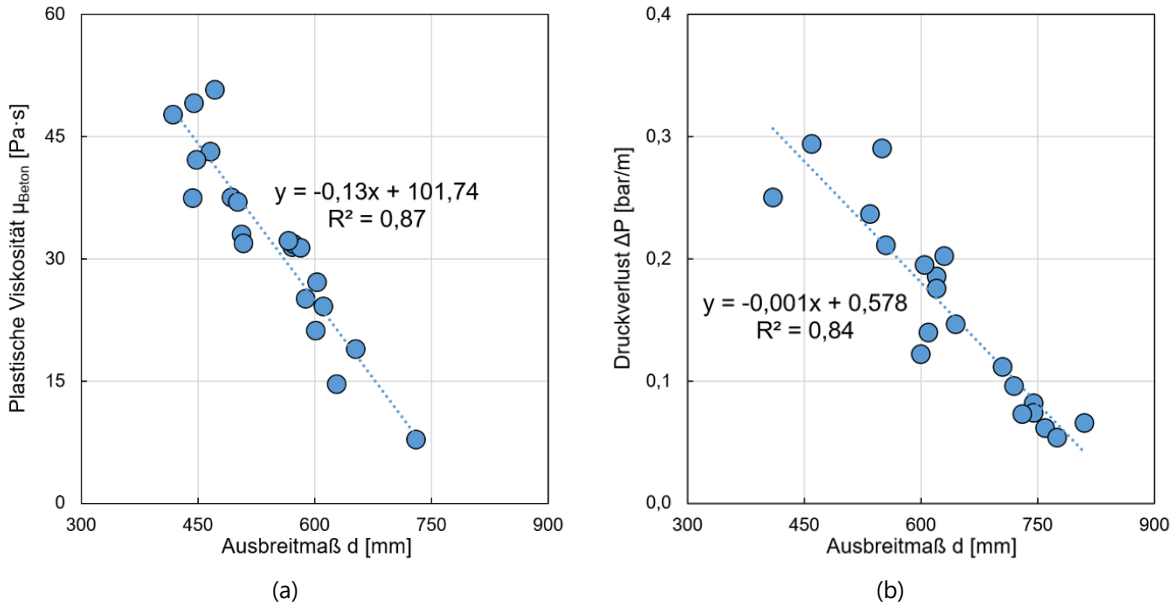
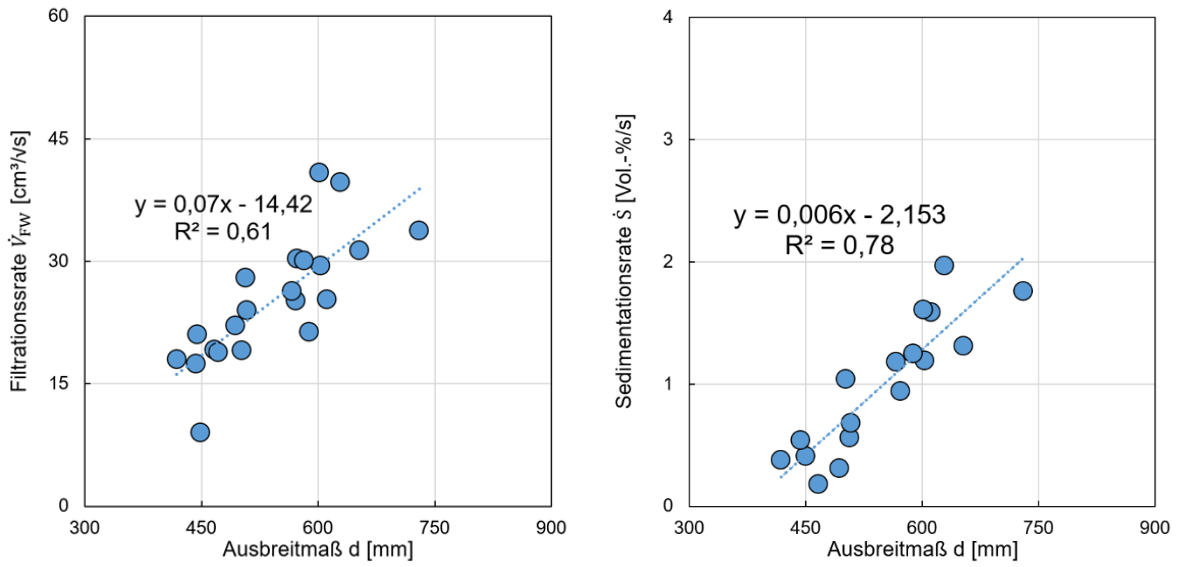


Abbildung 5-4: Druckverlust in Abhängigkeit von der Leimschichtdicke bei variierender Feststoffkonzentration des Leims [Cotardo – 2023].

Da das Ausbreitmaß für die Praxis nach wie vor als wesentlichste Kenngröße zur Beurteilung der Eigenschaft des Betons gilt – es ist einfach auf der Baustelle zu bestimmen und es liegen jahrzehntelange Erfahrungen vor – wurde eine Gegenüberstellung zwischen Ausbreitmaß und den weiteren Kenngrößen, die das Pumpverhalten widerspiegeln, durchgeführt; vgl. Abbildung 5-5.



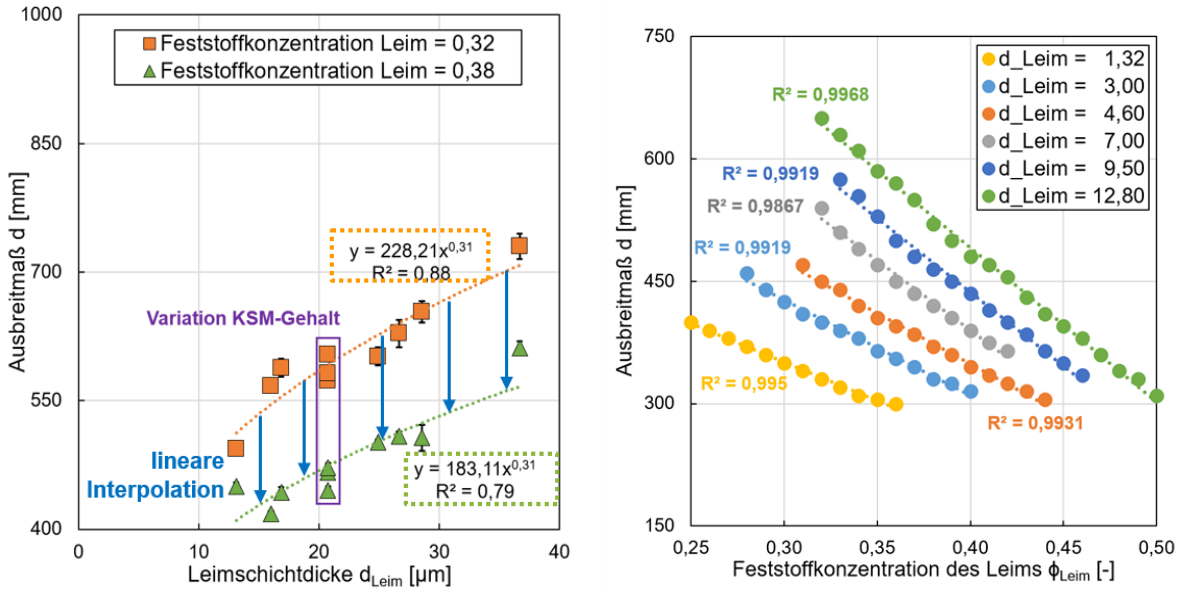


(c) (d)

Abbildung 5-5: Korrelation zwischen Ausbreitmaß und plastischer Viskosität des Betons (a), Druckverlust (b), Filtrationsrate (c) und Sedimentationsrate (d) [Cotardo – 2023].

Es besteht ein ausgeprägter linearer Zusammenhang zwischen dem Ausbreitmaß und den anderen in Abbildung 5-5 dargestellten Kenngrößen. Demnach sinken die plastische Viskosität μ des Betons und der Druckverlust ΔP proportional mit steigendem Ausbreitmaß, während die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ und die Sedimentationsrate $\dot{S}$ proportional zunehmen. Diese Erkenntnisse wurden genutzt, um aufbauend auf einer detaillierten Analyse zum Einfluss der Modellgrößen des Modells auf das Ausbreitmaß zu erweitern.

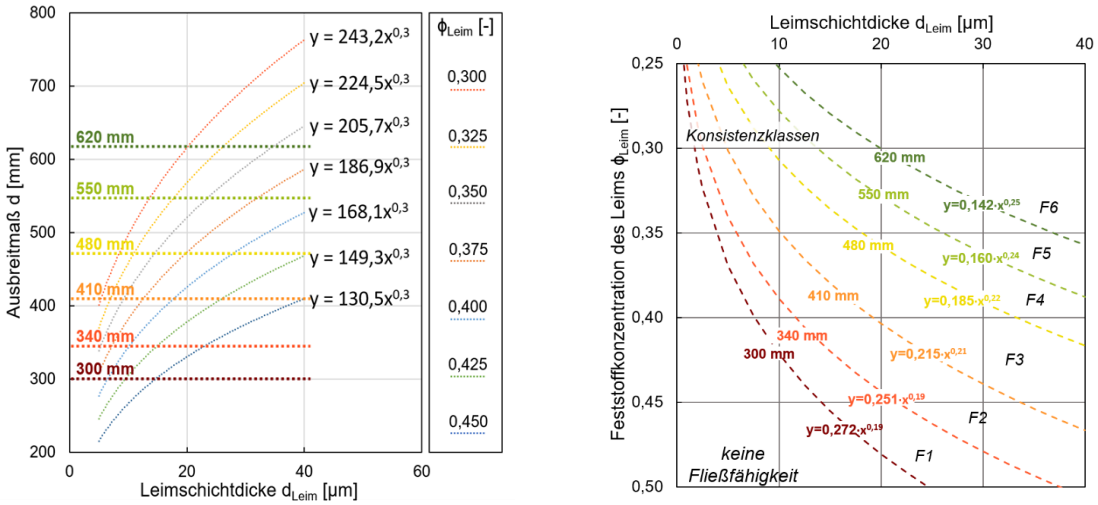
Zusätzlich zu den bereits vorgestellten Ergebnissen (vgl. Abbildung 5-6, a) wurden umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss der Modellgrößen auf die Fließfähigkeit (respektive Ausbreitmaß) im Labor durchgeführt; vgl. Abbildung 5-6, b.



(a) (b)

Abbildung 5-6: Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Leimschichtdicke (a) und von der Feststoffkonzentration bei variierender Leimschichtdicke (b) [Cotardo – 2023].

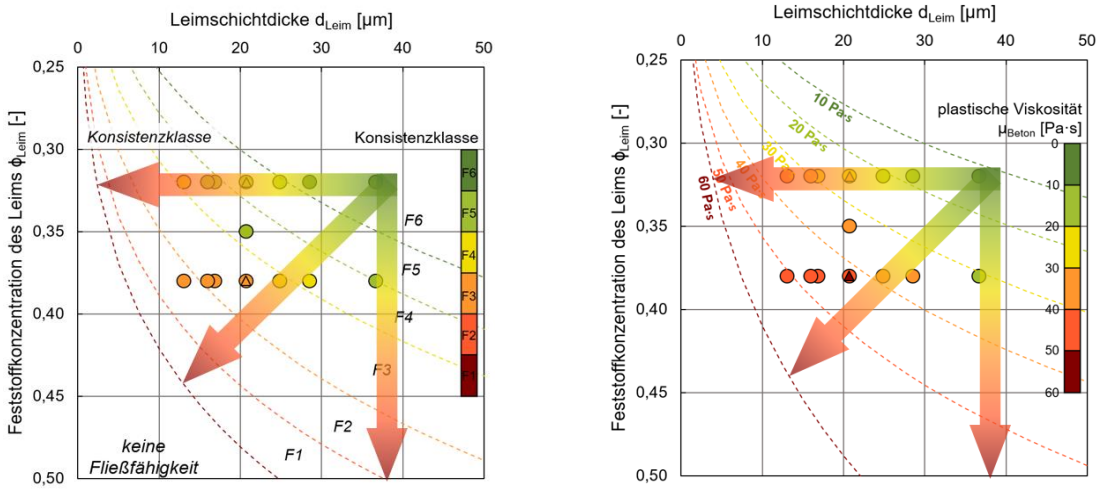
Anhand von Abbildung 5-6, b ist zu erkennen, dass ein ausgeprägter linearer Zusammenhang zwischen der Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} und dem Ausbreitmaß zu beobachten ist und die für sämtliche praxisrelevanten Leimschichtdicken d_{Leim} der Fall ist. Diese Erkenntnis begründet eine lineare Interpolation zwischen den beiden Regressionskurven (vgl. Abbildung 5-6, a), die den Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Leimschichtdicke d_{Leim} in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} beschreiben. Ausgehend von den durchgeführten Regressionsanalysen zum Einfluss der Leimschichtdicke d_{Leim} und des Einflusses der Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} auf das Ausbreitmaß (vgl. Abbildung 5-7, a) wurden Modelllinien gleicher Fließfähigkeit (vgl. Abbildung 5-7, b), die die Grenzen der Konsistenzklassen widerspiegeln, in Abhängigkeit der beiden Modellgrößen gebildet.



(a) (b)

Abbildung 5-7: Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Leimschichtdicke und der Feststoffkonzentration zur Bildung von Modelllinien gleicher Fließfähigkeit (a) und Abhängigkeit der Konsistenzklasse von den Modellgrößen (b) [Cotardo – 2023].

Unter der Berücksichtigung der in Abbildung 5-5 dargestellten Zusammenhänge, können die weiteren Kenngrößen (Druckverlust, plastische Viskosität, Filtrationsrate, Sedimentationsrate) die das Pumpverhalten von Beton beschreiben, auf diese Weise in das Modell überführt werden; vgl. Abbildung 5-8.



(a) (b)

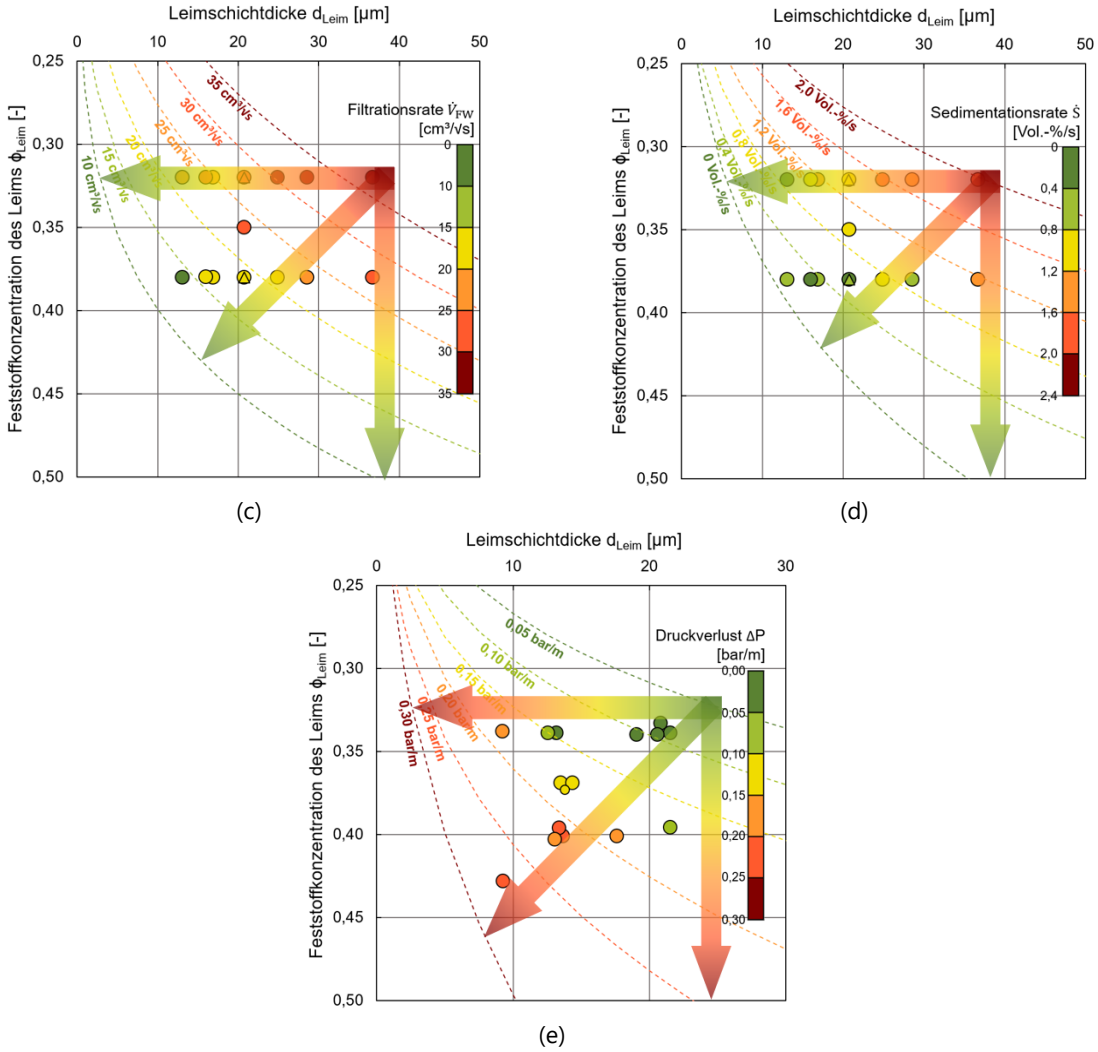


Abbildung 5-8: Korrelationen zwischen Ausbreitmaß und Konsistenzklasse des Betons (a), plastische Viskosität (b), Filtrationsrate (c), Sedimentationsrate (d) und Druckverlust (e) [Cotardo – 2023].

Aus Abbildung 5-8 ist ersichtlich, welchen Einfluss die beiden Modellgrößen d_{Leim} und ϕ_{Leim} auf die verschiedenen Eigenschaften von Beton nehmen. Bei den farblich gekennzeichneten Punkten handelt es sich um Messerwerte aus den Laboruntersuchungen und aus den Pumpversuchen. Die farbliche Skala auf der rechten Seite der grafischen Darstellungen spiegeln den quantitativen Werte der Eigenschaft wider. Abbildung 5-8 (a) zeigt den Zusammenhang zwischen den Modellgrößen und der Fließfähigkeit (respektive Konsistenzklasse). Die untere Grenze der F1-Konsistenz bildet den absoluten Verlust der Fließfähigkeit ab. Es kann eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Modelllinien beobachtet werden. Demnach steigt mit zunehmender Leimschichtdicke d_{Leim} und mit sinkender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} die Fließfähigkeit des Betons. Der gleiche Zusammenhang ergibt sich für die plastische Viskosität µ (b) und den Druckverlust ΔP (e). Für die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ und die Sedimentationsrate $\dot{S}$ ergibt sich ein umgekehrter Zusammenhang. Beide Kenngrößen sinken mit kleinerer Leimschichtdicke d_{Leim} und steigender Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim}. Es wird ersichtlich, dass der Pumpwiderstand und die Pumpstabilität konkurrierende Eigenschaften darstellen, die mithilfe der Modellgrößen in Einklang gebracht werden können. Ist die plastische Viskosität µ des Betons hoch, ist die Fließfähigkeit (Ausbreitmaß) in der Regel gering und der Pumpwiderstand ΔP hoch, während eine geringe Entmischungsneigung vorliegt. Demgegenüber geht eine geringe plastische Viskosität µ des Betons mit einer hohen Fließfähigkeit und geringem Pumpwiderstand ΔP

einher, während die Entmischungsneigung höher ausfällt. Das vorgestellte Modell ist demnach in der Lage, mit Hilfe der eingeführten Modellgrößen d_{Leim} und ϕ_{Leim}, die die Zusammensetzung des Betons beschreiben, verschiedene Eigenschaften zu quantifizieren, die entweder direkt das Pumpverhalten beschreiben (Druckverlust ΔP) oder Einfluss auf das Pumpverhalten (plastische Viskosität μ) nehmen. Auf diese Weise kann das Modell zur Konzipierung von Betonzusammensetzungen herangezogen werden, um das Pumpverhalten in einer ersten Näherung durch den Betonentwurf zu steuern.

Zuletzt war es das Ziel die Blockierungsneigung mithilfe des Modells prognostizieren zu können, um der Praxis konkrete Orientierungswerte hinsichtlich der Zusammensetzung breitstellen zu können. Als Arbeitshypothese diente folgender Zusammenhang: Blockierungen entstehen durch Entmischungen des Betongefüges. Je höher die Entmischungsneigung des Betons ist, desto höher ist die Blockierungsneigung.

Abbildung 5-9 stellt die Betonzusammensetzungen aus den Technikum-Pumpversuchen unter der Verwendung von Pumpleitung 3 dar, bei welcher Blockierungen beobachtet wurden. Dargestellt sind die Positionen der gepumpten Betone in Abhängigkeit ihrer IST-Zusammensetzungen. Mit rot gekennzeichnete Datenpunkte kennzeichnen eine Blockierung. Demgegenüber sind die Betone, bei denen keine Blockierung aufgetreten sind mit grün gekennzeichnet. Die runden Datensymbole spiegeln Betone mit natürlicher Gesteinskörnung wider und die Raute kennzeichnet demgegenüber Betone mit gebrochener Gesteinskörnung. Die Pluszeichen beziehen sich auf die Fließmitteldosierung (+ → ~0,3 M.-% von Zement, ++ → ~0,6 M.-% von Zement, +++ → >0,9 M.-% von Zement).

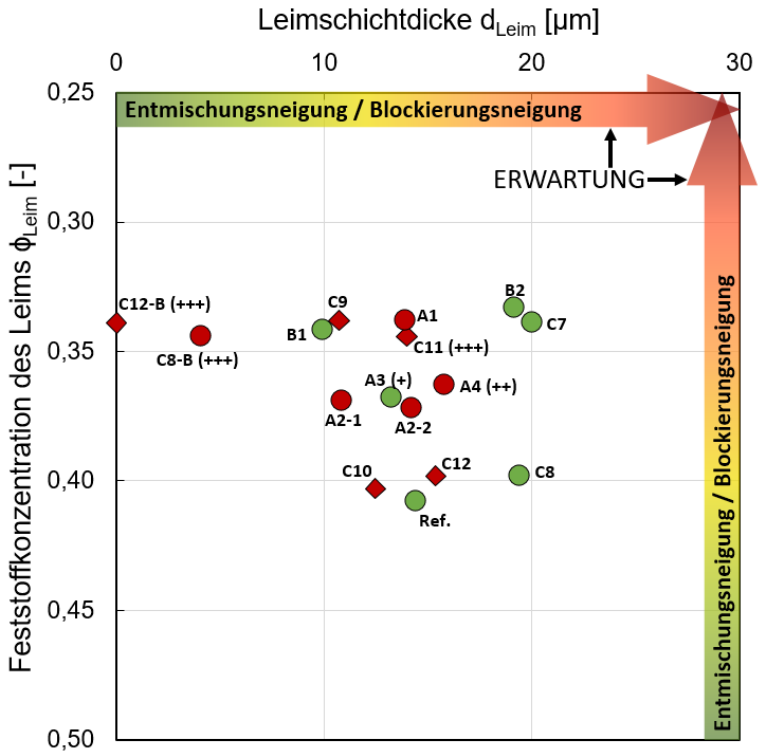
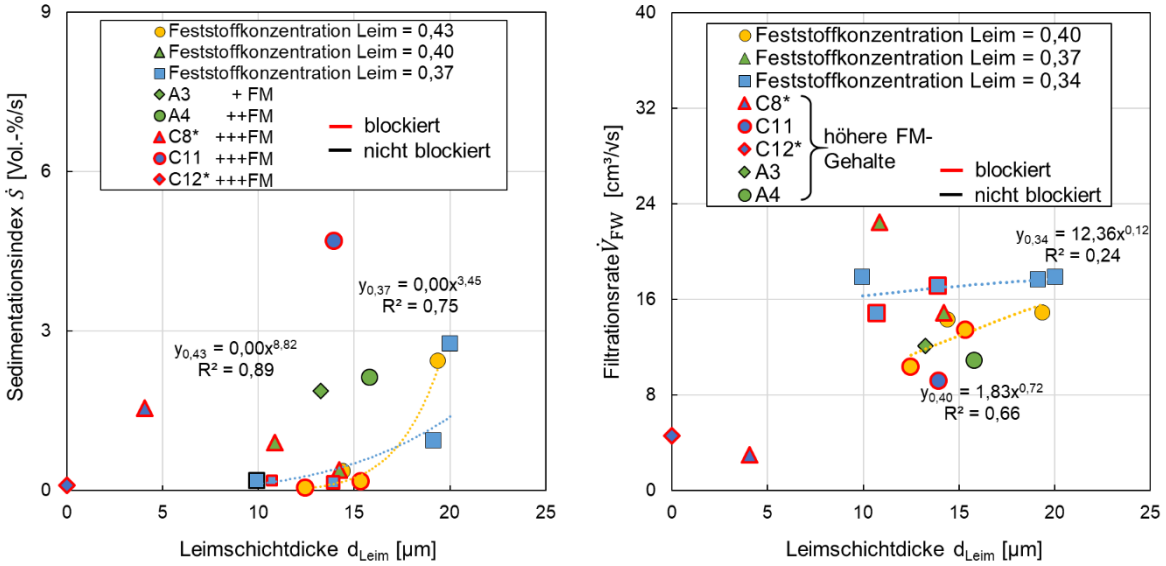


Abbildung 5-9: Betonzusammensetzungen aus den Technikum-Pumpversuchen unter der Verwendung von Pumpleitung 3 [Cotardo – 2023].

Es zeigt sich, dass insbesondere Betone blockiert sind, die eine hohe Fließmitteldosierung und dadurch auch eine erhöhte Entmischungsneigung besitzen. Des Weiteren sind Betone im Experiment blockiert, die gebrochenes Korn besaßen, da die Gefahr einer Verzahnung der Gesteinskörnung infolge einer Entmischung höher ist als bei natürlicher Gesteinskörnung.

Demgegenüber zeigt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den eingeführten Modellgrößen und der Blockierungsneigung unter der Berücksichtigung des Entmischungsverhaltens; vgl. Abbildung 5-10.



(a) (b)

Abbildung 5-10: Sedimentationsrate (a) und Filtrationsrate (b) in Abhängigkeit von der Leimschichtdicke und variierenden Feststoffkonzentrationen des Leims.

Zum einen muss festgestellt werden, dass die Datenmenge (vgl. Abbildung 5-9) nicht ausreichend groß ist, um einen verallgemeinerbaren Zusammenhang zwischen den Modellgrößen und der Blockierungsneigung herzustellen. Darüber hinaus ist infrage zu stellen, ob die gemäß Lieferschein nachvollziehbare Zusammensetzung mit der tatsächlichen IST-Zusammensetzung der dargestellten Betone (Position der Datenpunkte im Modell) übereinstimmt. Da für die Pumpversuche eine relativ kleine Betonmenge von nur 1 m³ geliefert wurde, können bereits geringe Restwassermengen im Fahrmischer zu einer starken Veränderung des Eigenschaftsbilds des Betons führen, was bei der Bewertung der experimentellen Untersuchungen berücksichtigt werden muss.

Um zu verifizieren, ob das Eigenschaftsbild des jeweiligen Betons mit der angegebenen Zusammensetzung übereinstimmt, wurden die Eigenschaften von ausgewählten Datenpunkten vergleichend gegenübergestellt (vgl. Abbildung 5-12), die im Modell gemäß ihrer nachvollziehbaren Zusammensetzung (Angaben auf dem Lieferschein) näherungsweise übereinstimmen; vgl. Abbildung 5-11.

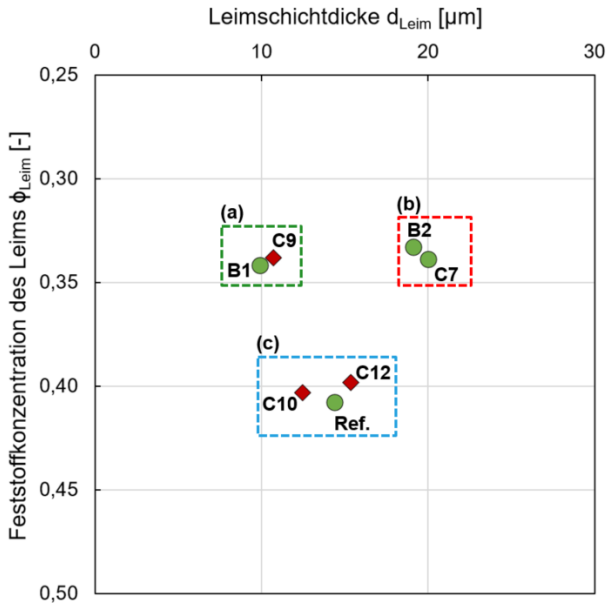
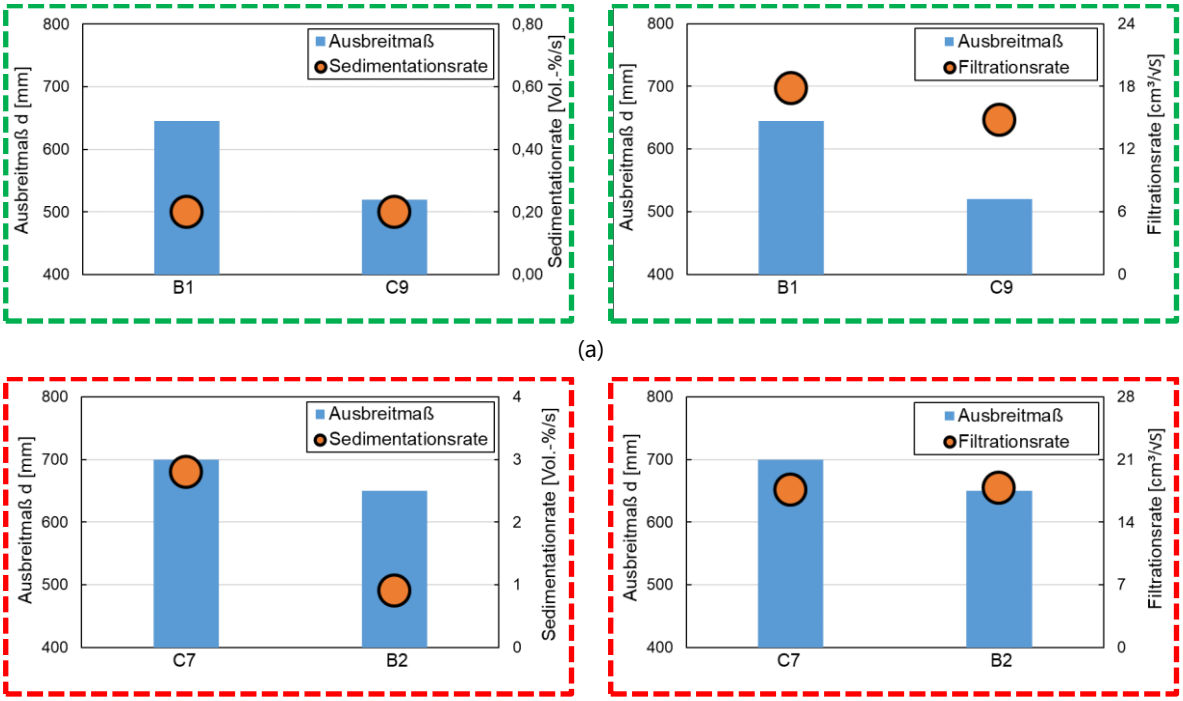
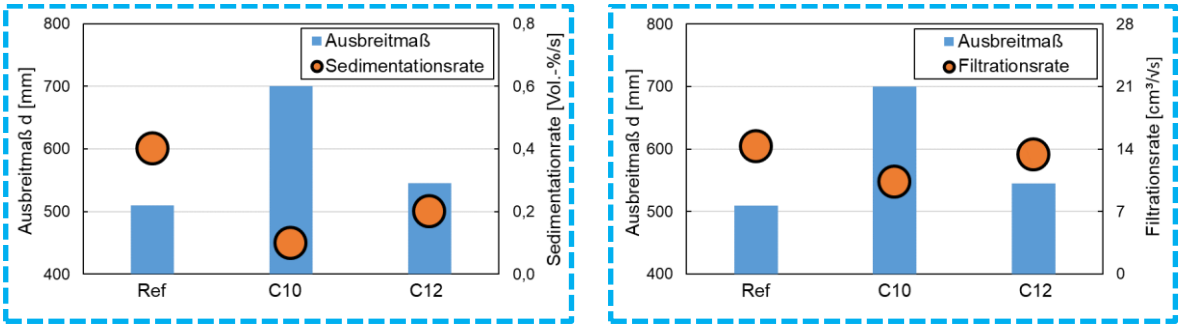


Abbildung 5-11: Ausgewählte Betone mit einer vergleichbaren IST-Zusammensetzung gemäß Lieferschein.

Abbildung 5-12 stellt einzelne Eigenschaften ausgewählter Betone vergleichend gegenüber. Dazu wurden das Ausbreitmaß, die Sedimentationsrate und die Filtrationsrate gewählt, da für die Bestimmung dieser Eigenschaften verschiedene Betonproben (zwei Schubkarren aus einer Charge) entnommen wurden.



(b)



(c)

Abbildung 5-12: Gegenüberstellung von Eigenschaften ausgewählter Betone, deren Zusammensetzung gemäß ihrer Position im Modell näherungsweise vergleichbar sein sollte.

Es wird deutlich, dass zwar einige Eigenschaften der Betone entsprechend ihrer vergleichbaren Zusammensetzung übereinstimmen, dass aber auch erhebliche Differenzen der Kennwerte vorliegen. Dies wird unter anderem auf die Art der Probennahme zurückgeführt. Eine Entnahme von repräsentativen, gleichmäßigen Proben – insbesondere für Betone, die bereits unter dem Einfluss der Schwerkraft sedimentierten – war auch rückblickend nicht möglich.

Demnach bestehen begründete Zweifel daran, ob die im Modell hinterlegten Datenpunkte das tatsächliche Eigenschaftsbild des Betons widerspiegeln und ob deren Position im Modell mit der tatsächlichen IST-Zusammensetzung übereinstimmt.

Nichtsdestotrotz liefern insbesondere die Laboruntersuchungen aber auch die Pumpversuche hinsichtlich der Einflüsse auf den Pumpwiderstand gesicherte Erkenntnisse, die für die Praxis genutzt werden können, um das Pumpverhalten von Beton mithilfe des entwickelten Modells zu beeinflussen. Da die eingeführten Modellgrößen die stoffliche Zusammensetzung des Betons beschreiben, kann das Modell als Instrument für die Konzipierung von pumpfähigen Betonen unter der Berücksichtigung sowohl des Pumpwiderstandes als auch der Pumpstabilität herangezogen werden. Dafür wurde das Modell durch abgesicherte, halbquantitative Zusammenhänge praxisgerecht gestaltet, indem das Modell für den baupraktisch relevanten Bereich durch Angaben zu üblichen Kenngrößen V_{Leim} und w/z-Wert, die die Zusammensetzung von Beton beschreiben, erweitert wurde; vgl. Abbildung 5-13. Zusätzlich wurden auch rheo-physikalische sowie ökonomische und ökologische Aspekte berücksichtigt.

Dargestellt sind halbquantitative Zusammenhänge zwischen verschiedenen pumprelevanten Eigenschaften in Abhängigkeit von der Zusammensetzung von Beton. Für eine B-Sieblinie mit einem Größtkorn von 16 mm und natürlicher Gesteinskörnung wurde entsprechend der rechnerischen Leimschichtdicke d_{Leim} (vgl. Gleichung 2-1) ein äquivalentes Leimvolumen V_{Leim} ausgerechnet. Gebrochene Gesteinskörnungen können ein höheres Leimvolumen erfordern. Für A-Sieblinien können sich aufgrund der geringeren spezifischen Oberfläche der Gesteinskörnung hingegen geringere Leimvolumen ergeben. Vergleichbar dazu wurde die Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} in einen äquivalenten w/z-Wert umgerechnet, der in der Praxis normativ eine Einteilung in Druckfestigkeits- und Expositionsklassen erlaubt.

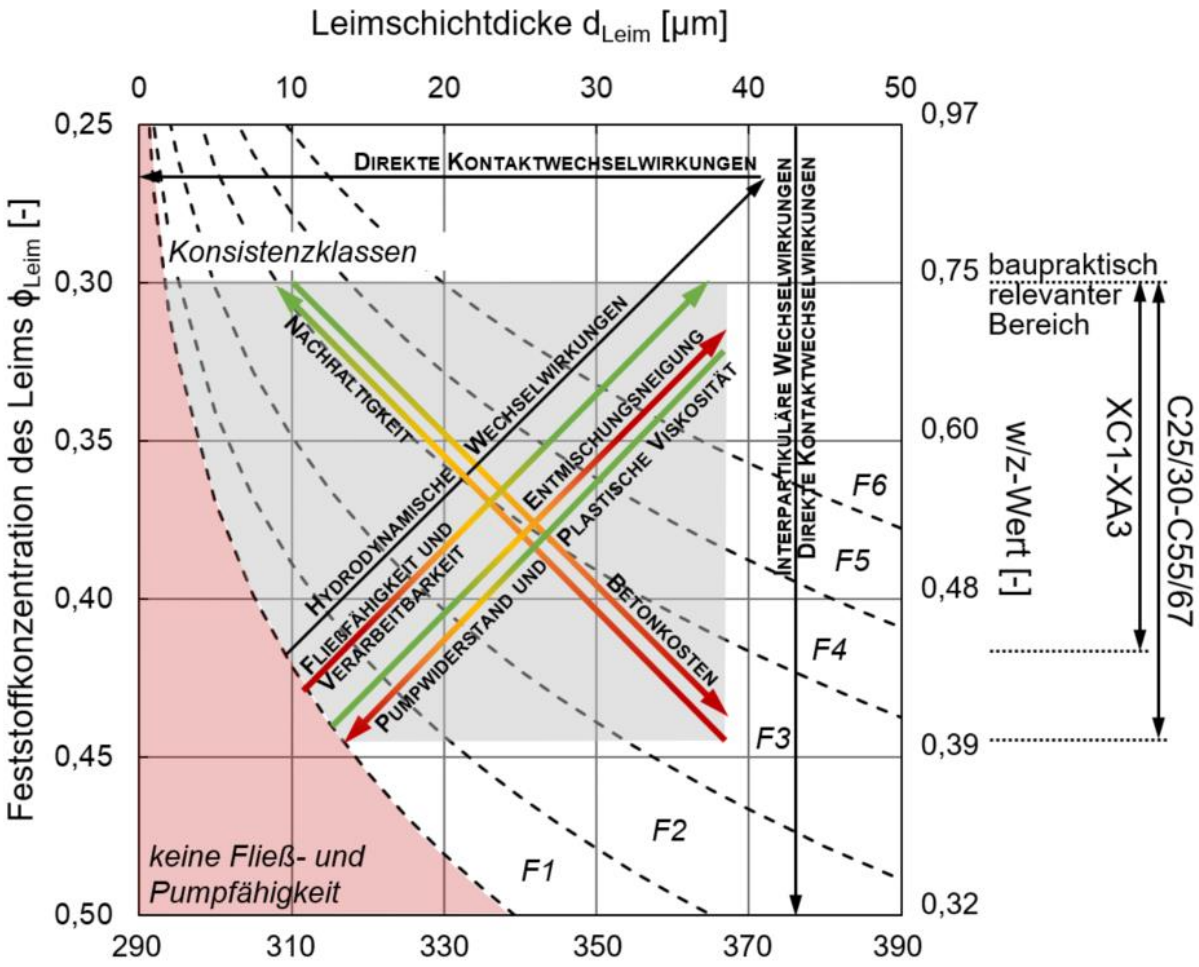


Abbildung 5-13: Halbquantitative Darstellung des entwickelten Modells zur Steuerung pumprelevanter Betoneigenschaften unter Berücksichtigung der stofflichen Zusammensetzung von Beton als Hilfsmittel für die Pumppraxis [Cotardo – 2023].

Der baupraktisch relevante Bereich ergibt sich aus den praxisrelevanten Druckfestigkeits- und Expositionsklassen und spiegelt in guter Näherung den Bereich wider, der im Rahmen der Laboruntersuchungen und der Pumpversuche geprüft wurde. Die dargestellten Pfeile spiegeln in Pfeilrichtung qualitativ den Einfluss der Modellgrößen auf die entsprechende Eigenschaft aufsteigend wider. Die Pfeile sind zusätzlich durch einen farblichen Verlauf gekennzeichnet, der eine betontechnologische Bewertung der jeweiligen Eigenschaft ausdrückt (grün=positive Eigenschaft; rot=negative Eigenschaft). Zusätzlich sind Konsistenzklassen angegeben, die anhand der hergeleiteten Modelllinien zur Fließfähigkeit (vgl. Abbildung 5-7, b) die grundsätzliche Verarbeitbarkeit des Betons widerspiegeln und der Praxis als erfahrungsbasierte Orientierung dienen sollen. Die Darstellung soll der Pumppraxis bereitgestellt werden und als Hilfsmittel dienen, um eine Abschätzung zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf pumprelevante Eigenschaften unter der Berücksichtigung der erforderlichen Druckfestigkeits- und Expositionsklasse in Abhängigkeit des w/z-Werts machen zu können. Dabei soll das Modell wesentliche Zusammenhänge zwischen der Betonzusammensetzung und dem Pumpverhalten veranschaulichen und als Orientierung dienen, um verschiedenste pumprelevante Eigenschaften im Betonentwurf auf einander abzustimmen. Manko der Darstellung ist die Nichtberücksichtigung des Einflusses variierender Fließmittelgehalte auf das Eigenschaftsbild von Beton. Die quantitativen Angaben berücksichtigen allerdings Fließmitteldosierungen von ca. 0,3 M.-% von Zement, die in der Praxis üblicherweise für die Herstellung von Pumpbeton

im Wohnungs- und Industriebau verwendet werden und demnach den größten Anteil des gepumpten Transportbetons in der Praxis darstellen.

5.2 Technisches Verfahren zur Vermeidung von Blockierungen in der Praxis

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Abschnitten 4.2.7 und 4.3.6 wird zusammenfassend ein technisches Verfahren beschrieben, mit diesem in der Praxis wirkungsvoll irreversible Blockierungen der Förderleitung verhindert werden können. Das Verfahren kann die Grundlage für ein digitales Assistenzsystem bilden, dass in der Praxis standardmäßig für die Überwachung des Pumpprozesses eingesetzt werden kann.

Verfahrensbeschreibung

Das Verfahren (vgl. Abbildung 5-14) basiert auf der Aufzeichnung des Hydrauliköldrucks im Zeitverlauf. Die Messdaten (Kraftparameter), die mindestens mit einer Frequenz von 50 Hz aufgezeichnet werden sollten, werden in einem ersten Schritt verwendet, um den Hydrauliköldruckbedarf $\Delta P_{hyd.}$ (im Folgenden als Kraftzunahmeparameter bezeichnet) eines vollständigen Kolbenhubs zu berechnen, der sich aus der Differenz zwischen maximalen Kraftparameter in der Endstellung des Förderkolbens und dem minimalen Kraftparameter in der Ausgangsstellung des Förderkolbens ergibt. Der Kraftzunahmeparameter $\Delta P_{hyd.}$ wird in einem zweiten Schritt genutzt, um einen Blockierungsparameters B zu berechnen, der eine Änderung im Widerstand des Betons in der Förderleitung indiziert, der insbesondere aus rheologischen Veränderungen des Betons infolge von Entmischungen während des Pumpbetriebs resultiert. Der Blockierungsparameters B setzt sich wie folgt zusammen.

$$B_{\mathrm{n}} = \left(\frac{\Delta \mathrm{P_n}}{\Delta \overline{\mathrm{P}}_{\mathrm{n}}} - 1\right) \cdot 100 \qquad \text{mit:} \quad \Delta \overline{\mathrm{P}}_{\mathrm{n}} = \frac{\Delta \mathrm{P_n} + \Delta \mathrm{P_{n-1}}}{2} \tag{5-1}$$

Die Berechnung des Blockierungsparameters B muss sich auf den Kraftzunahmeparameter desselben Förderkolbens beziehen, um variierende Undichtigkeiten an der Verschleißbrille berücksichtigen zu können. Durch die Mittelwertbildung aus dem aktuellen Kraftzunahmeparameter und dem vorangegangenen Kraftzunahmeparameter desselben Förderkolbens können unkritische Schwankungen im Hydrauliköldruck berücksichtigt werden.

In einem dritten Schritt erfolgt ein Abgleich zwischen dem aktuellen Blockierungsparameter B_n und einem statistisch hergeleiteten Grenzwert $B_{Grenz.}$. Aus den Ergebnissen der Technikum-Pumpversuche und der großmaßstäblichen Pumpversuche ergaben sich zwei unterschiedliche Grenzwerte. Der Unterschied ist zwar relativ klein, belegt aber, dass der Grenzwert vom Typ der Betonpumpe abhängig sein kann. Für die Bestimmung eines statistisch abgesicherten Grenzwerts sind erfahrungsgemäß deutlich mehr Messdaten erforderlich, was die Validität und damit die Zuverlässigkeit der Anwendung eines Grenzwerts erhöht. Dazu wird die Empfehlung ausgesprochen, die Datenbasis durch Praxisbegleitungen zu erweitern.

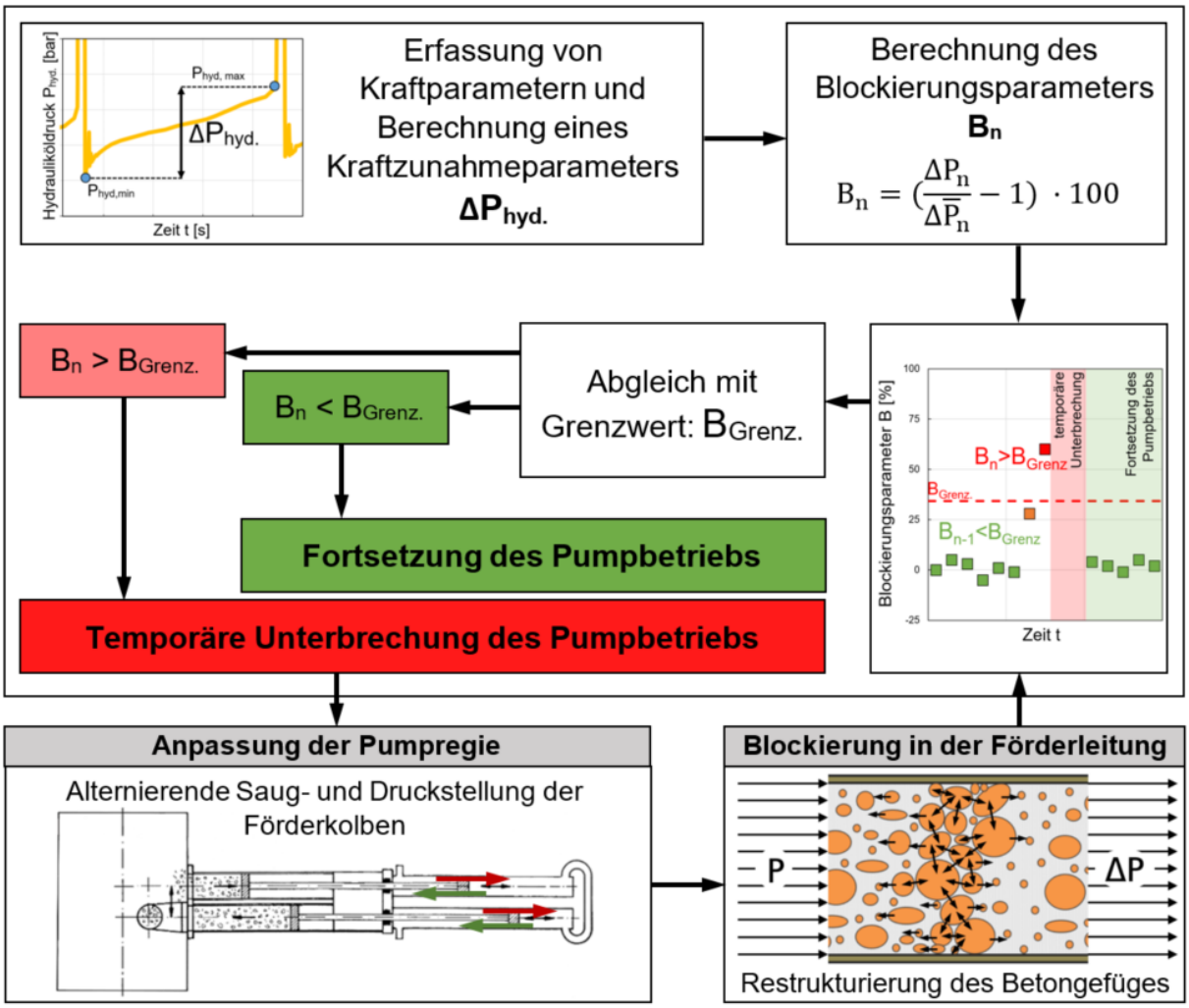


Abbildung 5-14: Schematische Darstellung eines digitalen Assistenzsystems zur Überwachung des Pumpprozesses [Cotardo – 2023].

Ist der aktuelle Blockierungsparameter B_n kleiner als $B_{Grenz.}$, dann wird der Pumpprozess ohne Einschränkung fortgesetzt. Bei Überschreitung von $B_{Grenz.}$ sollte der Pumpprozess temporär unterbrochen werden. Da eine Überschreitung von $B_{Grenz.}$ innerhalb weniger Kolbenhübe zu einer irreversiblen Blockierung führen kann, wird empfohlen, die Unterbrechung des Pumpbetriebs zu automatisieren. Daraufhin kann durch eine manuelle Anpassung der Pumpregie die Blockierung gelöst werden, indem die Förderkolben abwechselnd in Saug- und Druckstellung gebracht werden. Diese Maßnahme kann erfahrungsgemäß zur Restrukturierung des blockierten Betongefüges führen. Die Folge der beschriebenen Maßnahme ist eine Reduzierung des aktuellen Blockierungsparameter B_n unterhalb des definierten Grenzwerts $B_{Grenz.}$, was eine Fortsetzung des Pumpbetriebs erlaubt.

Anwendungsbereich des Verfahrens

Das hier beschriebene Verfahren eignet sich vor allem für die Überwachung des Pumpprozesses während des initialen Anpumpens, aber auch für den laufenden Pumpbetrieb der vollständig gefüllten Förderleitung. Das Verfahren bezieht sich aus maschinentechnischer Sicht auf Hubkolbenpumpen, bei denen der Stofftransport durch die Verdrängung des Volumens in einem Zylinder infolge eines geradlinig oszillierenden, hydraulisch angetriebenen Kolbens hervorgerufen wird. Der Zu- und Ablauf der Förderzylinder wird bei der Betonförderung in der Regel über die sogenannte S-Rohrweiche oder den ROCK-Schieber, die

als Ventile fungieren, gesteuert. Die Förderkolben werden über ein Hydraulikaggregat angetrieben. Obwohl für die Förderung von Beton in der Praxis in der Regel eine Rohrweichenpumpe verwendet wird, lässt sich das Verfahren auch auf weitere Pumpenarten (Sitzventilpumpen, Kugelventilpumpen) übertragen, die auf dem Grundprinzip einer hydraulisch angetriebenen Doppelkolbenpumpe (oszillierendes Saugen und Drücken) beruhen. Weiterhin lässt sich das Verfahren auf hydraulische Kolbenpumpen anwenden, bei denen die Zylinderfüllung nach dem Stopfprinzip (Einzylinder-Kolbenpumpen, Kalottenpumpen) erfolgt.

Das Verfahren lässt sich für den Stofftransport verschiedener Medien anwenden, die allgemein als Dickstoffe bezeichnet werden können. Dickstoffe stellen Gemische aus flüssigen und festen Bestandteilen variierender Feststoffkonzentrationen dar, die sich plastisch verformen lassen. Neben der Betonförderung können vor allem die Klärschlammförderung, die Förderung von sandbeladenem Grubenwasser, die Förderung von Kohle- und Mineralsuspensionen sowie die Abraumförderung im Bergbau genannt werden. Das Verfahren bietet sich vor allem für solche Dickstoffe an, die durch stark ausgeprägte Gradienten hinsichtlich der Dichte und der Partikelgrößenverteilung gekennzeichnet sind, was besonders beim Dickstoff Beton der Fall ist. Insbesondere solche Dickstoffe neigen infolge veränderter Strömungsbedingungen zur Entmischung des Dickstoffgefüges, was eine Blockierung der Förderleitung begünstigt.

Neben dem Ziel, eine drohende Blockierung der Förderleitung identifizieren zu können, besteht weiterhin die Möglichkeit mithilfe der hier beschriebenen Funktionsweise eines digitalen Assistenzsystems den Verschleißzustand einer Doppelkolbenpumpe bewerten zu können. Stark voneinander abweichende Kraftzunahmeparameter $\Delta P_{hyd.}$ der beiden Förderkolben einer Doppelkolbenpumpe weisen auf einen unregelmäßigen Verschleiß und Undichtigkeiten hin. Undichtigkeiten an der Verschleißbrille am Übergang zwischen Förderzylinder und Ventilmechanismus (S-Rohrweiche oder ROCK-Schieber) können dazu führen, dass flüssige Bestandteile aus dem Betongefüge (Wasser und dünner Zementleim) herausgepresst werden. Die flüssige Phase trennt sich dabei von den Feststoffen des Betons und wird anstatt in die Förderleitung, zurück in den Aufgabetrichter gepresst, was eine verminderte Betonqualität hervorruft. Die Folge ist eine erhöhte Feststoffkonzentration ϕ des Betons in der Förderleitung, was einen höheren Pumpwiderstand sowie einen höheren Kraftzunahmeparameter $\Delta P_{hyd.}$ hervorruft. Das hier beschriebene Assistenzsystem bietet daher die Möglichkeit den Verschleißzustand anhand des Kraftzunahmeparameters $\Delta P_{hyd.}$ zu bewerten. Auf dieser Grundlage kann der Betreiber einer Pumpe einen Austausch von Verschleißteilen veranlassen, um die Effizienz der Pumpe und damit die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und gleichzeitig für eine höhere Betonqualität zu sorgen.

6 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse des vorliegenden Forschungsprojekts beschrieben. Darauf aufbauend werden in Kapitel 7 Anwendungshinweise und Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet.

Quantitatives Modell zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Pumpverhalten zur technischen Konzipierung pumpwiderstandsreduzierter und blockierungsresistenter Betone.

Die Anwendung verschiedenster Methoden zur Quantifizierung des Pumpverhaltens von Beton sowie die praxisrelevanten Variationen in der Betonzusammensetzung, die sowohl im Rahmen der Laboruntersuchungen als auch im Rahmen der Pumpversuche vorgenommen wurden, liefern ein umfangreiches Verständnis zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Pumpverhalten von Beton. Durch die eingeführten Modellgrößen (Leimschichtdicke d_{Leim} und Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim}) können auf das Pumpverhalten wesentliche betontechnologische Einflüsse mit zwei Kenngrößen abgebildet werden. Die Leimschichtdicke d_{Leim} erfasst dabei sowohl den Leimgehalt V_{Leim} als auch granulometrische Variationen wie die Partikelgrößenverteilung und die Kornform der Gesteinskörnung. Die Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} ermöglicht es als volumenbezogenes Verhältnis auch den Einfluss von Zusatzstoffen zu berücksichtigen. Durch das Modell können verschiedenste pumprelevante Eigenschaften in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung beschrieben werden. Dazu zählen die Fließfähigkeit (Konsistenz), der Pumpwiderstand gekoppelt mit der plastischen Viskosität μ des Betons sowie Kenngrößen, die die Entmischungsneigung von Beton widerspiegeln. Für eine konkrete Vorhersage von Blockierungen eignet sich dieses Modell bislang nicht. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die im Rahmen des Projekts gewinnbare Datenmenge für eine valide Prognose nicht ausreicht und zum anderen, dass die Blockierungsbildung nicht ausschließlich von der Betonzusammensetzung, sondern darüber hinaus von der Wechselwirkung der Betone mit der Förderleitung und von der Pumpregie abhängig ist. Ob eine Blockierung eintritt oder nicht, kann nach wie vor mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht zweifelsfrei vorhergesagt werden.

Wichtig und als wesentliches Projektergebnis anzusehen ist jedoch, dass das Model eine Vorhersage gestattet, unter welchen Randbedingungen ein erhöhtes Risiko zum Eintreten einer Blockierung besteht. Im Rahmen der Untersuchungen konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Entmischungsverhalten und insbesondere dem Sedimentationsverhalten von Beton und der Neigung des Betons zum Blockieren festgestellt werden. Durch eine praxisgerechte Aufbereitung der gewonnenen Erkenntnisse kann das Modell für eine betontechnologische Abstimmung einzelner pumprelevanter Eigenschaften unter der Berücksichtigung normativer Aspekte genutzt werden (vgl. Kapitel 7). Dadurch erlaubt das Modell die technische Konzipierung von pumpfähigen Betonen mit aufeinander abgestimmten Eigenschaften hinsichtlich des Pumpwiderstands und der Pumpstabilität.

Manko des bereitgestellten Modells ist die unberücksichtigte Wirkung von Fließmitteln durch die Modellgrößen. Auch wenn der Einfluss von Fließmitteln nicht durch die beiden eingeführten Modellgrößen direkt berücksichtigt werden kann, können auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse einige wesentliche Hinweise zur Wirkung von Fließmitteln auf das Pumpverhalten von Beton geliefert werden. Durch den Einsatz von Fließmitteln in praxisüblichen Mengen kann Wasser ohne Beeinträchtigung der Frischbetoneigenschaften eingespart werden. Durch die Zugabe von Fließmitteln lässt sich der Pumpwiderstand wirkungsvoll reduzieren und sorgt gleichzeitig für ein stabiles Betongefüge. Auf diese Weise kann das Entwässerungsverhalten

von Beton positiv beeinflusst werden. Durch die Erhöhung der Viskosität μ des Anmachwassers infolge der Zugabe von Fließmittel, kann der Widerstand gegenüber der Trennung zwischen Wasser und Feststoffe erhöht werden, was dazu führt, dass die Bewegungsenergie des Wassers verstärkt auf die Feststoffe in Fließrichtung übertragen werden kann. Dadurch wird der Bildung eines ausgeprägten Geschwindigkeitsgradienten zwischen Wasser und Feststoffen entgegengewirkt, was den Grad der Entmischung insbesondere beim Auftreten einer temporären Blockierung reduziert.

Identifizierung wesentlicher praxisrelevanter Einflüsse (Vorlaufmischung, Anordnung Schwammkugeln, Förderleitungsgeometrie und zeitlicher Einfluss aus der Hydratationskinetik) auf das Pumpverhalten von Beton unter der Berücksichtigung des Pumpwiderstands und der Blockierungsneigung.

Neben dem Einfluss der Betonzusammensetzung bzw. der Betoneigenschaften auf die Blockierungsneigung, konnten im Rahmen der Untersuchungen verschiedene weitere wesentliche praxisrelevante Einflüsse auf das Pumpverhalten von Beton identifiziert werden. Es konnte z. B. gezeigt werden, dass die Eigenschaften der Vorlaufmischung insbesondere während des initialen Anpumpens Einfluss auf die Betoneigenschaften und damit auf das Pumpverhalten nehmen. Demnach eigenen sich vor allem zementgebundene Vorlaufmischungen, um die Benetzung der Oberfläche der Förderleitung sicherzustellen. Derartige Mischungen sorgen infolge der nachgewiesenen Interaktion zwischen Vorlaufmischung und nachrückendem Beton zur Reduzierung des Pumpwiderstands und zur Reduzierung der Blockierungsgefahr.

Ein zentrales Ergebnis der Untersuchungen ist weiterhin, dass insbesondere die nach unten gerichtete Förderung während des initialen Anpumpens mit einer stark erhöhten Gefahr der Blockierung einhergeht. Dies gilt insbesondere, wenn die gepumpten Betone eine erhöhte Entmischungsneigung aufweisen. Dies konnte auf eine ausgeprägte Entmischung des Betons in der Fallstrecke der Leitung zurückgeführt werden, was Blockierungen der Förderleitung begünstigt. Die Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass Schwammkugeln zwischen Vorlaufmischung und Beton vor allem für lange Fallstrecken das Risiko der Blockierung signifikant verhindern, da diese die Fallgeschwindigkeit des Betons reduzieren. Um die Energie des fallenden Betons schonend abzuleiten, bietet es sich nach der Fallstrecke an, einen Bogen mit einem großen Radius anzuordnen. Gleichzeitig wird die Empfehlung ausgesprochen, mit möglichst geringer Förderrate Q anzupumpen, um die Bewegungsgeschwindigkeit des Betons in der Förderleitung zu reduzieren, was die Gefahr von entmischungsbedingten Blockierungen mindert.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch die Wahl des Zements der hydratationsbedingte Anstieg im Pumpwiderstand wirkungsvoll beeinflusst werden kann. Demnach eignet sich die Wahl eines klinkerreduzierten Betonsystems, um dem Prozess des Ansteifens insbesondere auf langen Pumpstrecken, infolge längerer Unterbrechungen des Pumpbetriebs und unter sommerlichen Randbedingungen zu begegnen. Hierfür bieten sich Zementarten nach DIN EN 197-1 an, die einen geringeren Zementklinkeranteil von kleiner als 80 M.-% besitzen. Reine Portlandzemente sind demnach nicht geeignet, um dem hydratationsbedingten Ansteifen wirkungsvoll zu begegnen. Die gleichzeitige Nutzung von latent-hydraulischen Zusatzstoffen wie beispielsweise Hüttensande, kann zusätzlich den Zementklinkeranteil verringern und führt zu einem zeitverzögerten Ansteifen des Betons.

Entwicklung eines digitalen Verfahrens zur frühzeitigen Erkennung von Blockierungen während des Pumpbetriebs mittels Hydrauliköldrucksensor und Erprobung entsprechender Gegenmaßnahmen zur Verhinderung irreversibler Blockierungen.

Das aus Sicht der Forschungsstellen wichtigste Arbeitsergebnis des hier vorliegenden Projekts war die Erkenntnis, dass sich die Gefahr einer Blockierung im Zeitverlauf des Hydraulikdrucksignals der Betonpumpe frühzeitig durch hier entwickelte Datenanalysemethoden erkennen und durch abgeleitete Gegenmaßnahmen reduzieren bzw. die Blockierungsbildung vermeiden lässt.

Hierzu wird der Hydrauliköldruck, der vom Hydraulikaggregat aufgebracht wird, um die Förderkolben in Druckstellung zur Verdrängung des Betons in die Förderleitung in Förderrichtung zu bewegen kontinuierlich durch Sensoren erfasst. Dadurch, dass der erforderliche Hydrauliköldruck den Gesamtwiderstand des Betons in der Förderleitung widerspiegelt, können Veränderungen in der Zusammensetzung des Betons (u. a. Entmischungen) während des Pumpens unmittelbar erfasst werden. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich Blockierungen der Förderleitung bereits in der Entstehungsphase noch vor dem Eintritt einer irreversiblen Blockierung ankündigen. Dazu wurde auf der Grundlage eines eingeführten Blockierungsparameters B_n, ein Grenzwert statistisch abgeleitet, der bei Überschreitung eine drohende Blockierung induziert. Der Blockierungsparameter B_n ist Ausdruck der Kraftzunahme infolge eines Kolbenhubs insbesondere während des initialen Anpumpens und steht in Relation zum vorangegangenen Hubvorgang desselben Kolbens. Auf diese Weise können kritische Veränderungen während des Pumpens messtechnisch wahrgenommen werden.

Dadurch, dass Blockierungen bereits in der Entstehungsphase identifiziert werden können, besteht die Möglichkeit rechtzeitig in den Pumpbetrieb einzugreifen, um so Blockierungen verhindern zu können. Mögliche Gegenmaßnahmen beruhen dabei auf der Tatsache, dass der Beton durch ein wiederholtes, in kurzen Intervallen durchgeführtes Anpumpen und Zurückziehen (d. h. durch den Wechsel der Förderrichtung in kurzen Intervallen) eine Restrukturierung des blockierten Betongefüges erfährt. Auf diese Weise können Blockierungen in der Förderleitung gelöst und der Pumpbetrieb nach kurzer Zeit fortgesetzt werden, ohne die Förderleitung öffnen zu müssen. Dies spart nicht nur Zeit und schont die technischen Anlagen, sondern ist auch aus Sicht des Arbeitsschutzes zur Vermeidung der schweren körperlichen Arbeit beim Beseitigen von Blockierungen als besonders wertvoll anzusehen.

Das Verfahren lässt sich auf sämtliche Pumpenarten übertragen, die auf dem Grundprinzip einer hydraulisch angetriebenen Doppelkolbenpumpe (oszillierendes Saugen und Drücken) beruhen. Das entwickelte Verfahren kann in Form eines digitalen Assistenzsystems in der Praxis angewendet werden, um eine Überwachung des in-situ Zustandes des Betons in der Förderleitung zu ermöglichen, wodurch Blockierungen der Förderleitung wirkungsvoll verhindert werden können.

Zusätzlich kann das Verfahren genutzt werden, um den Verschleißzustand einer Doppelkolbenpumpe zu bewerten. Auf dieser Grundlage kann der Betreiber einer Pumpe einen Austausch von Verschleißteilen vornehmen, um die Effizienz der Pumpe und damit die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und gleichzeitig für eine hohe Betonqualität zu sorgen.

Erkenntnisse zur Bildung einer irreversiblen Blockierung von Beton in Förderleitungen unter der Berücksichtigung des Entwässerungsverhaltens von Beton unter Druck.

Die Untersuchungsergebnisse entnommener Blockierungen aus der Förderleitung liefern wertvolle Hinweise zu den Mechanismen der Blockierungsbildung von Beton. Unter der

Berücksichtigung physikalischer Zusammenhänge deuten die Untersuchungen darauf hin, dass zunächst eine Erhöhung des Widerstandes infolge einer Verzahnung der Gesteinskörnung auftritt. Eine Verzahnung der Gesteinskörnung kommt durch Entmischungen des Betongefüges zustande. Dabei trennt sich die Gesteinskörnung vom Zementleim nicht wie üblich in radialer Richtung (Gleitschichtbildung) sondern in axialer Richtung, was den Pumpwiderstand lokal erhöht. Dieser Zustand stellt eine reversible und räumlich begrenzte Blockierung dar. Die Erhöhung des Pumpwiderstands führt zu einem Druckgradienten innerhalb des verzahnten Betongefüges, der Entwässerungsvorgänge auslöst. Ein Beton, der eine geringe Entwässerungsrate aufweist, ist in der Lage die verzahnte Betonfront in Förderrichtung zu bewegen, ohne dass eine übermäßige Entwässerung auftritt. Im Gegensatz dazu findet bei einem Beton der eine hohe Entwässerungsrate aufweist, eine starke Entwässerung der Betonfront statt. Dadurch erhöht sich die Feststoffkonzentration des Betons zunehmend, was durch Untersuchungen zur Rohdichte nachgewiesen werden konnte. Hierdurch wird der lokale Pumpwiderstand infolge von Reibung zusätzlich erhöht. Die Folge des stetig steigenden Reibwiderstandes des Betons stellt eine irreversible Blockierung dar, sobald die Leistungsfähigkeit der Pumpe überschritten wird.

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse lässt sich das Entwässerungsverhalten von Beton wirkungsvoll beeinflussen. Es zeigt sich, dass eine erhöhte Feststoffkonzentration des Leims ϕ_{Leim} die Entwässerungsrate reduziert. Zusätzlich können Fließmittelpolymere die Viskosität μ des Anmachwassers erhöhen, was den Widerstand gegenüber einer Entwässerung erhöht. Ein erhöhter Leimgehalt V_{Leim} hingegen sorgt dafür, dass die Kraftübertragung an die grobe Gesteinskörnung erhöht wird, was für die Vorwärtsbewegung des Betons in Fließrichtung günstig ist. Auf diese Weise kann der Gefahr von Blockierungen entgegengewirkt werden.

Optimierung des Gleitrohr-Rheometers zur verbesserten Vorhersage des Förderdrucks in der Praxis. Erweiterung der Anwendbarkeit auf Förderschläuche und entmischungsintensive Betone.

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen zur Pumpfähigkeit (Pumpwiderstand) von Betonen, kam das Gleitrohr-Rheometer (Sliper) zum Einsatz, mit dem Ziel, den erforderlichen Pumpdruck im Rahmen der experimentellen Pumpversuche für verschiedene Förderleitungsführungen unter der Verwendung variierender Förderleitungskomponenten (Rohre, Schläuche, Rohrbögen etc.) vorherzusagen. Im Rahmen der Laboruntersuchungen konnte zweifelsfrei beobachtet werden, dass die Messgenauigkeit des Verfahrens stark von den Betoneigenschaften abhängt. Betone, die stark zur Entmischung neigen, wiesen eine schlechtere Messgenauigkeit auf, da feiner Zementleim aus dem Betongefüge entweichen kann und sich zwischen Gleitrohr und Dichtungsring ansammelt. Die Folge ist ein erhöhter Widerstand während der Messung, der das Ergebnis verfälscht. Aufbauend auf dieser Beobachtung wurde das Dichtungssystem zwischen Kunststoff-Rohr und Stativ des Slipers optimiert, sodass sich auch solche Betone untersuchen ließen die zum starken Entmischen neigen. Durch die Optimierung des Dichtungssystems wird das Auslaufen feinen Materials aus der Versuchsanordnung verhindert. Diese Maßnahme erhöht die Vorhersagegenauigkeit des Verfahrens signifikant, was durch den Vergleich zwischen dem tatsächlich gemessenen Druck während der Pumpversuche bestätigt werden konnte.

Betone, die bereits infolge der einwirkenden Schwerkraft zur Sedimentation der Gesteinskörnung neigen, zeigen auch während der Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer starke Entmischungserscheinungen, die zur Folge haben, dass nicht die Eigenschaften einer

homogenen Betonprobe gemessen werden können. Durch solche Formen der Entmischung während der Messung, kann keine exakte Vorhersage des erforderlichen Pumpdrucks erfolgen.

Diese Erkenntnis kann genutzt werden, um kritische Betone, die zur Blockierung der Förderleitung führen können, bereits während der Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer zu identifizieren. Durch die Beobachtung der einzelnen Hübe der Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer kann der Verlust der Homogenität einer Betonprobe während der Prüfung erkannt werden. Eine softwaregesteuerte Überwachung des Messvorgangs kann dazu genutzt werden, z. B. bei starker Streuung der Messwerte, ein Warnsignal auszugeben. In einem solchen Fall muss das Gleitrohr-Rheometer gegebenenfalls neu befüllt und die Messung wiederholt werden. Ein solches Assistenz-System könnte dabei helfen, fehlerhafte Förderdruckprognosen zu vermeiden, die anhand schlechter Messwerte berechnet wurden.

Experimenteller Nachweis einer Gleitschicht-Neuausbildung nach veränderten Strömungsbedingungen zur Optimierung der Förderleitungsgeometrie in der Praxis.

Während des Pumpens von Beton kommt es wiederkehrend zu veränderten Strömungsbedingungen, die Entmischungen des Betongefüges auslösen können. Dies gilt insbesondere für sog. Fallstrecken, d.h. Leitungsabschnitte, in denen der Beton nach unten gepumpt wird. Im Anschluss an eine solche kritischen Situationen empfiehlt es sich, ein ausreichend langes, gerades Streckenelement ohne Verjüngung des Leitungsquerschnitts anzuordnen. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen konnte erstmalig nachgewiesen werden, dass hierdurch das Betongefüge durch gleichbleibende Strömungsverhältnisse in der Lage ist, erneut in die günstig wirkende Pfropfenströmung (Gleitschicht-Neuausbildung) überzugehen, was den Pumpwiderstand während des Fließprozesses verringert, weil der Grad der Entmischung abnimmt.

7 Anwendungshinweise und Handlungsempfehlungen für die Praxis

Im Folgenden werden aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen konkrete Anwendungshinweise und Handlungsempfehlungen für die Praxis vorgestellt, mit denen es möglich ist, das Risiko zur Blockierungsbildung zu verringern. Es sei darauf hingewiesen, dass die Einhaltung der hier zusammengefassten Empfehlungen nicht zwangsläufig sicherstellen kann, dass Blockierungen der Förderleitung verhindert werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Blockierungsneigung, also die Gefahr, dass Blockierungen auftreten, auf diese Weise signifikant gemindert werden kann.

7.1 Empfehlungen zum Betonentwurf

Aufbauend auf dem in Kapitel 5.1 vorgestelltem Modell (vgl. Abbildung 5-13) werden Anwendungsempfehlungen gegeben, die es der Praxis ermöglichen sollen, Betone mittels Betonentwurf zu konzipieren, die sich zum Pumpen eignen. Die Eignung eines Betons zum Pumpen äußert sich in einem möglichst geringen Pumpwiderstand und in einem entmischungsstabilen und damit blockierungsresistenten Beton.

Veränderte Strömungsbedingungen, die zwangsläufig während des Pumpens stattfinden (z. B. infolge von Rohrbögen, Reduzierungen oder vertikalen Förderpassagen) können zu einer Trennung zwischen Zementleim und Gesteinspartikeln führen. In der Folge werden Partikelabstände kleiner, wodurch direkte Kontaktwechselwirkungen gegenüber hydrodynamischen Effekten dominieren. Dadurch nimmt einerseits der Reibwiderstand zu, was den Pumpwiderstand lokal erhöht. Andererseits kann eine zunehmende Verdichtung des Kornhaufwerks zu einer Verzahnung der Gesteinspartikel führen, was Blockierungen der Förderleitung begünstigt. Demnach gilt es durch den Betonentwurf zu gewährleisten, dass solche Entmischungseffekte nicht auftreten.

Die Trennung zwischen Zementleim und Gesteinspartikel wurde im Rahmen des Forschungsprojekts durch die Einführung des sog. Sedimentationsindexes $\dot{S}$ quantifiziert (vgl. Abschnitt 3.3.4). Mithilfe der Modellgrößen ϕ_{Leim} und d_{Leim} lässt sich das Sedimentationsverhalten von Beton im Betonentwurf quantifizieren (vgl. Abbildung 7-1). Abbildung 7-1 zeigt verschiedene Bereiche der Sedimentationsneigung in Abhängigkeit von den Modellgrößen. Ein Beton, der sich zum Pumpen eignet und eine geringe Blockierungsneigung aufweist, muss zunächst in der Lage sein eine Gleitschicht an der Förderleitungswandung auszubilden (Pfropfenströmung). Dazu ist ein gewisser Überschuss an Wasser und Zementleim erforderlich. Durch die Gewährleistung einer ausreichend hohen inneren Verformbarkeit ist das Betongefüge in der Lage sich radial zu entmischen und eine Gleitschicht auszubilden, die als Grundvoraussetzung für einen pumpfähigen Beton angesehen wird. Betone mit einem geringen Leimgehalt V_{Leim} (geringe Leimschichtdicke d_{Leim}) und einer hohen Feststoffkonzentration des Zementleims ϕ_{Leim} sind nicht oder nur eingeschränkt hierzu in der Lage. Gleichzeitig weisen solche Betone einen erhöhten Widerstand beim Passieren von Rohrbögen auf, da sie eine eingeschränkte plastische Verformbarkeit besitzen. Im Rahmen einer Eignungsprüfung kann das Pumpverhalten des Betons durch die Prüfung der Sedimentationsrate $\dot{S}$ bestimmt werden (vgl. beschriebener Versuchsaufbau in Abschnitt 3.3.4). Es wird empfohlen, dass die Sedimentationsrate $\dot{S}$ größer sein sollte als 0,6 Vol.-%/s. Gleichzeitig sollte die Sedimentationsneigung nicht zu stark ausgeprägt sein, da mit steigender Sedimentationsneigung die Gefahr einer Blockierung infolge einer Verzahnung der Gesteinspartikel ansteigt. Es kann eine Sedimentationsrate $\dot{S}$ von 1,6 Vol.-%/s als empfohlene Obergrenze angesehen werden.

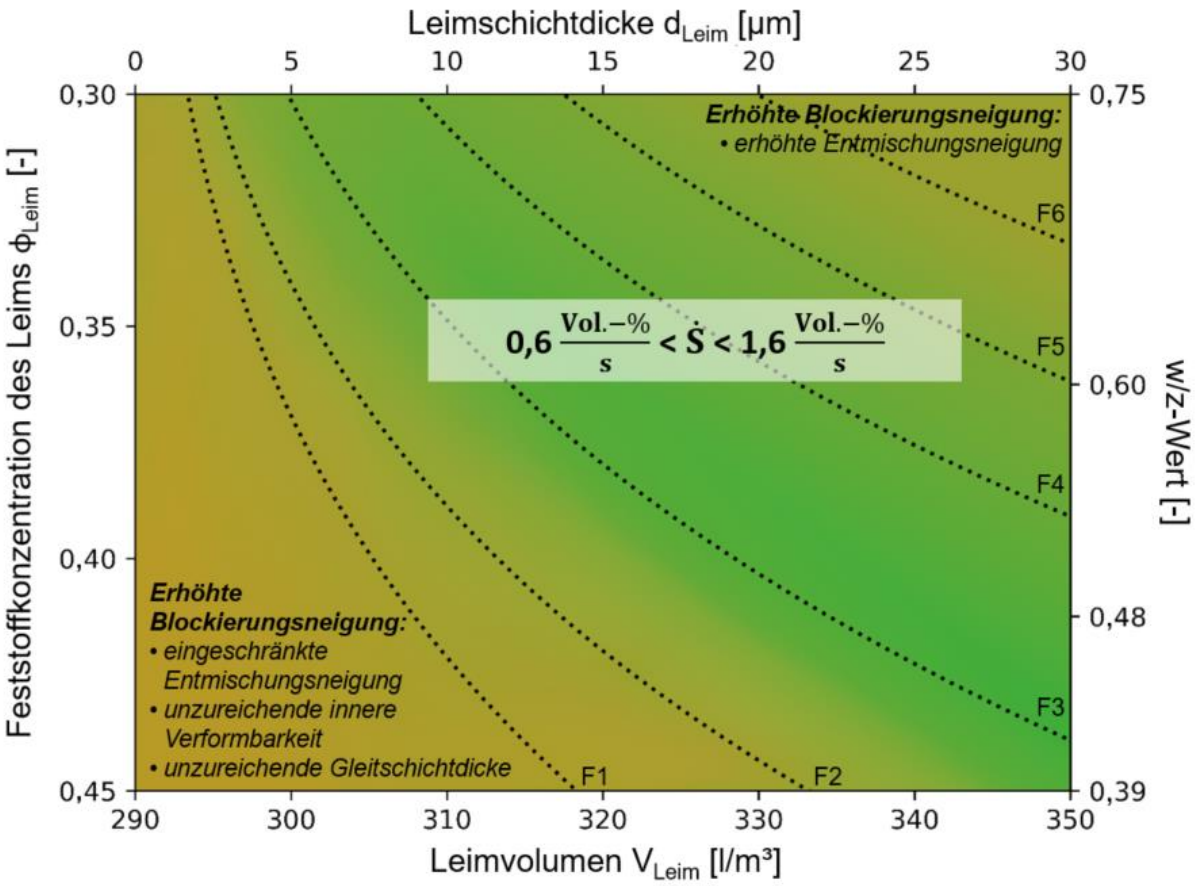


Abbildung 7-1: Sedimentationsneigung und daraus abgeleitetes Blockierungsrisiko in Abhängigkeit der Modellgrößen ϕ_{Leim} und d_{Leim}.

Der in Abbildung 7-1 grün markierte Bereich (0,6 Vol.-%/s < $\dot{S}$ < 1,6 Vol.-%/s) ist gleichzeitig durch eine praxisübliche Fließfähigkeit und eine gute Verarbeitbarkeit sowie durch einen moderaten Pumpwiderstand zwischen (0,10 und 0,22) bar/m bei einer plastischen Viskosität µ zwischen (20 und 45) Pa·s gekennzeichnet (vgl. Abbildung 5-8, e und Abbildung 5-8, b). Die hier angegebenen Sedimentationsraten sind dabei unbenommen von Anforderungen die Beispielsweise aus der Homogenität des herzustellenden Bauteils resultieren. Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass nicht alle Betone, die ein Ausbreitmaß ≥ F5 aufweisen, per se schlechter zum Pumpen geeignet sind oder gar zwangsläufig Blockierungen der Förderleitung hervorrufen. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass der Großteil der hier verwendeten Betone Normalbetone darstellte und durch einen erhöhten Leim- und Wassergehalt gekennzeichnet waren, die in der Praxis zum Teil unüblich sind. Diese Betone waren ganz bewusst in ihrer Zusammensetzung so eingestellt worden, dass eine Entmischung stattfand. Beispielsweise können Selbstverdichtende Betone (SVBs) ohne eine erhöhte Blockierungsneigung in der Praxis gepumpt werden, die sich allerdings durch einen abgestimmten Betonentwurf (Mehlkorntyp, Stabilisierertyp, Kombinationstyp) auszeichnen. Gleichzeitig weisen solche Betone infolge ihrer erhöhten plastischen Viskosität µ insbesondere für höhere Förderraten *Q* einen erhöhten Pumpwiderstand auf. SVBs wurden im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts nicht berücksichtigt, sodass keinerlei Aussage zum Pumpverhalten (Blockierungsneigung) von SVB getroffen werden kann. Gleichzeitig geht der Trend in der modernen Betontechnologie hin zu leicht verarbeitbaren Betonen (LVB) (Konsistenzklassen F5 und F6), die gegenüber zu Normalbetonen eine verringerte Fließgrenze τ_0 aufweisen. Um entmischungsbedingte Blockierungen während des Pumpens von Beton

vermeiden zu können, sollte die plastische Viskosität μ des Frischbetons näherungsweise die hier beschriebenen Anforderungen (20 Pa·s < μ < 45 Pa·s) erfüllen.

Zusätzlich zum Sedimentationsverhalten kann das Entwässerungsverhalten von Beton das Blockierungsverhalten beeinflussen. Zur Entwässerung des Betongefüges in einer geschlossenen Förderleitung kommt es durch die Bildung eines Druckgradienten, der durch die Verzahnung von Gesteinspartikeln im Betongefüge entsteht. Damit Feststoffpartikel während des Pumpens in Fließrichtung transportiert werden können, müssen Kräfte infolge eines Impulsaustauschs übertragen werden. Eine Kraftübertragung kann besser stattfinden, je geringer die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ ist. Für das Pumpen von Beton gilt: Je geringer die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ ist, desto geringer ist die Gefahr einer Blockierung, da das lokal entmischte Betongefüge in Fließrichtung mitgeführt werden und sich während des Fließens restrukturieren kann. Dabei gilt es jedoch eine Einschränkung zu beachten. Ein Beton, der eine sehr kleine Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ aufweist, ist eingeschränkt in der Ausbildung einer Gleitschicht, die es zum Pumpen benötigt. Die experimentellen Untersuchungen haben zweifelsfrei gezeigt, dass der Einsatz von Fließmittel bei gleichzeitiger Verringerung des Wassergehalts zu einer signifikanten Reduzierung der Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ führt, was das Risiko einer irreversiblen Blockierung deutlich verringert. Für die Pumppraxis wird eine Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ zwischen (15 und 30) $cm^3/\sqrt{s}$ empfohlen, die mithilfe einer Filterpresse im Rahmen einer Eignungsprüfung bestimmt werden kann (vgl. Abbildung 7-2).

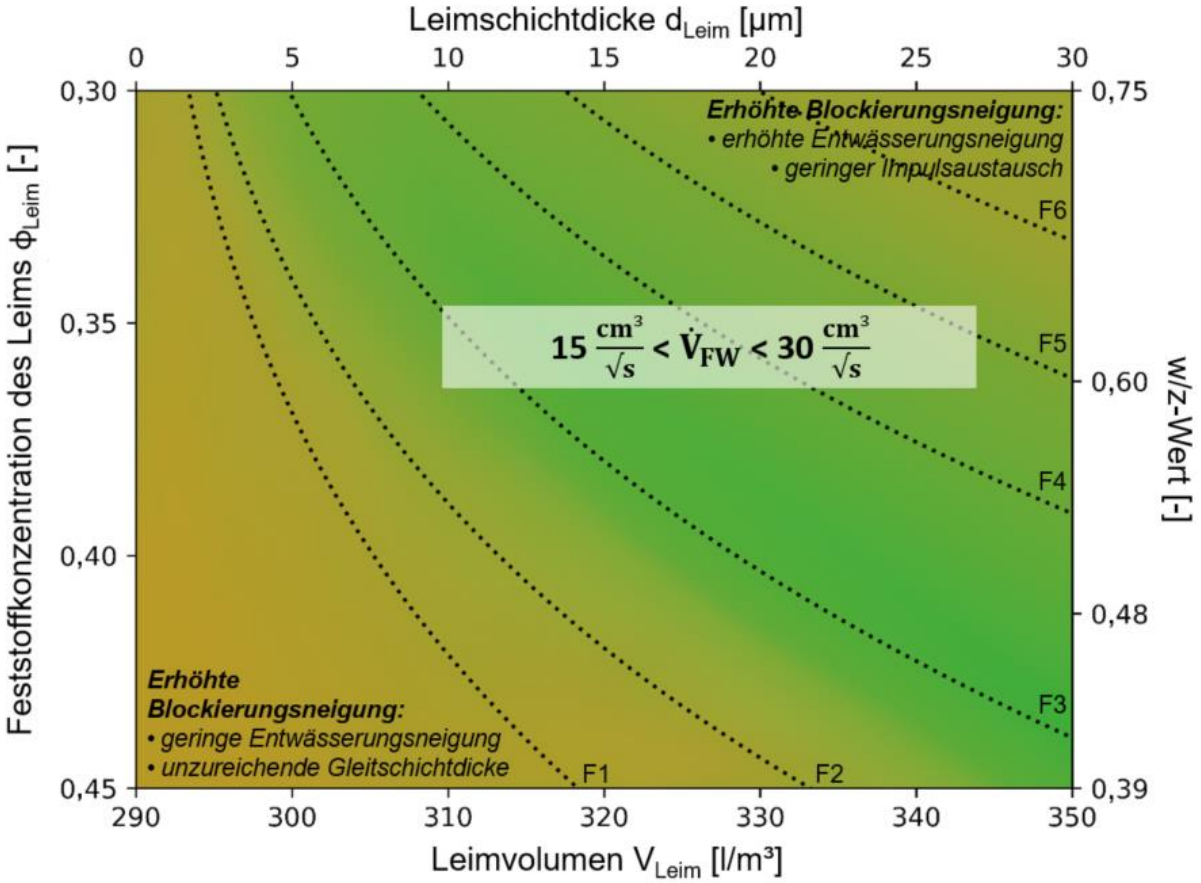


Abbildung 7-2: Entwässerungsverhalten in Abhängigkeit von den Modellgrößen ϕ_{Leim} und d_{Leim}.

Die zuvor getroffenen Angaben gelten ausschließlich für die in diesem Forschungsprojekt definierten Prüfrandbedingungen (Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung, vgl. Abschnitt 3.3.4).

Hinsichtlich der Aussagekraft des im Vorgängerprojekt (AiF IGF-Vorhaben Nr. 18361 N) entwickelten Betondruck-Leistungs-Nomogramms sei angemerkt, dass die Angaben zum Viskositätsparameter *b* (Eingangsgröße zur Berücksichtigung der Betoneigenschaft) im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts nicht explizit überprüft wurden. Auf der Grundlage der hier erlangten Erkenntnisse kann kein Widerspruch zu den im Vorgängerprojekt gewonnenen Erkenntnissen erkannt werden, sodass davon ausgegangen werden kann, dass das entwickelte Betondruck-Leistungs-Nomogramm zur Vorhersage des effektiven Pumpendrucks nach wie vor Gültigkeit besitzt. Jedoch planen die Berichterstatter die Datenauswertung im Hinblick auf diese Fragestellung weiter zu vertiefen. Über die Ergebnisse dieser Analysen wird separat berichtet.

7.2 Empfehlungen zur Förderleitungsführung und zur Verwendung einer Vorlaufmischung sowie Schwammkugel

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass neben der Betonzusammensetzung im gleichen Maße die Förderleitungsführung Einfluss auf die Blockierungsneigung nimmt. Insbesondere die nach unten gerichtete Förderung während des initialen Anpumpens kann erhebliche Entmischungen des Betongefüges auslösen, die Blockierungen der Förderleitung begünstigen. Da solche Förderabschnitte insbesondere beim Bauen im Bestand nicht verhindert werden können, bietet es sich an, die Fallenergie durch einen Rohrbogen mit einem möglichst großen Radius schonend abzuleiten, um den Grad der ggf. auftretenden Entmischung zu reduzieren. Bei längeren Fallstrecken empfiehlt es sich darüber hinaus eine Schwammkugel vor die Betonfront anzuordnen, die den Grad der Entmischung beim Fallen reduziert und auf diese Weise der Gefahr einer Blockierung entgegenwirkt.

Weiterhin stellt die Anordnung einer ausreichend langen Konsolidierungsphase (Förderabschnitt mit unveränderlicher Krümmung und unveränderlichem Durchmesser) nach einem fallenden Förderabschnitt eine wirkungsvolle Maßnahme dar, um der Gefahr einer Blockierung entgegenzuwirken. Eine solche Konsolidierungsphase führt zu einer Restrukturierung des Betongefüges (Gleitschichtneuausbildung durch den Übergang in die Pfropfenströmung). Die Berichterstatter empfehlen hier mindestens eine Abschnittslänge der geraden Förderleitung von 2 m. Für größere „Fallstrecken" empfiehlt es sich die Abschnittslänge der geraden Förderleitung (Konsolidierungsstrecke) zu erweitern, wobei anhand der Versuchsergebnisse keine konkrete Aussage zu einem Verhältnis zwischen der Länge der Fallstrecke und der Länge der daran anschließenden Konsolidierungsstrecke getroffen werden kann. Dazu sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

Weiterhin haben die Untersuchungen zum Einfluss einer Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung nachgewiesen, dass sich die Verwendung einer zementgebundenen Vorlaufmischung gegenüber einer Industrieschlempe empfiehlt. Je mehr sich die Eigenschaften der Gleitschicht und die der Vorlaufmischung ähneln, desto ausgeprägter ist die Interaktion zwischen Vorlaumischung und Beton. Auf diese Weise wird das Betongefüge im Prozess der radialen Entmischung zur Ausbildung einer Gleitschicht unterstützt. Dadurch findet eine optimale Schmierung zwischen Förderleitungswandung und Betonpfropfen statt, der widerstandsarm gepumpt werden kann. Gleichzeitig erfolgt die Ausbildung der Gleitschicht nicht ausschließlich aus der Betonzusammensetzung, sodass sich das Eigenschaftsbild des Betons insbesondere während des initialen Anpumpens nicht maßgeblich verändert. Dadurch reduziert sich die Gefahr von Blockierungen der Förderleitung. Für die Verwendung einer Vorlaufmischung empfiehlt sich ein Zementleim mit einem w/z-Wert, der den Wassergehalt des Betons widerspiegelt. Vorstellbar ist auch die Verwendung eines Sandbetons mit einem Größtkorn von 2 mm und einem vergleichbaren w/z-Wert wie der Beton, da eine solche

Zusammensetzung der der Gleitschicht ähnelt, gleichwohl eine derartige Vorlaufmischung im Rahmen der experimentellen Untersuchungen nicht genutzt wurde. Die Berichterstatter weisen darauf hin, dass weiterführende, systematische Untersuchungen zum Einfluss der Vorlaufmischung auf die Blockierungsneigung notwendig sind.

7.3 Empfehlungen zur Anwendung eines digitalen Assistenzsystems zur Überwachung des Pumpprozesses

Das hier entwickelte und zum Patent angemeldete Verfahren zur digitalen Überwachung des in-situ Zustandes des Betons in der Förderleitung, kann in der Praxis genutzt werden, um Blockierungen der Förderleitung nahezu vollständig zu verhindern. Die gewonnenen Daten stellen eine erfolgshöffige Grundlage dar, um ein Assistenzsystem zu entwickeln. Ein derartiges datenbasiertes Modell benötigt jedoch zwingend weitere Trainingsdaten, insbesondere um einen statistisch abgesicherten und damit validen Grenzwert $B_{Grenz.}$ abzuleiten. Die Berichterstatter empfehlen daher die stetige Aufzeichnung von Hydraulikdaten im Praxisalltag. Es wird weiterhin empfohlen die Hydraulikdaten von verschiedenen Betonpumpenherstellern zu verwenden, damit maschinentechnische Spezifikationen in einem validen Grenzwert $B_{Grenz.}$ berücksichtigt werden können. Darüber hinaus empfiehlt es sich im Rahmen eines auf den Erkenntnissen aufbauenden Forschungsprojekts gezielt die erforderliche Messtechnik zu entwickeln und zu erproben. Dies hat den Vorteil, dass unter variierenden und definierten Randbedingungen gezielt Blockierungen produziert und beobachtet werden können, die in der Praxis ehr zufällig und schlecht nachvollziehbar auftreten. Einen entsprechenden Vorschlag für ein Folgeprojekt wurden von den Berichterstattern gegenüber der Forschungsvereinigung vorgestellt. Auf diese Weise können unter wissenschaftlichen Randbedingungen systematische Zusammenhänge aufgedeckt und ergründet werden. Nach einer erfolgreichen Generierung von aussagekräftigen und verlässlichen Daten für einen abgesicherten, pumpentypunabhängigen Grenzwert $B_{Grenz.}$, können Algorithmen entwickelt werden, die eine digitalgesteuerte Ermittlung von Kennwerten (Kraftzunahmeparameter ΔP_n und Blockierungsparameter B_n) ermöglichen. Das Resultat derartiger Forschungs- und Entwicklungsbemühungen wäre ein vermarktungsfähiges Produkt, dass standardmäßig in der Pumppraxis eingesetzt wird, um Blockierungen der Förderleitung nahezu vollständig zu verhindern.

7.4 Empfehlungen zur Anwendung des Sliper-Geräts

Um möglichst vergleichbare Werte aus der Arbeit mit dem Sliper zu erhalten empfiehlt es sich, das Dichtungs-System weiter zu optimieren und den ersten Hub zum vorscheren des Materials zu nutzen und dann maximal neun weitere Hübe in die Auswertung einer Messung einzubeziehen. Durch die Beschränkung der Versuchswiederholungen soll sichergestellt werden, dass möglichst homogenes Material geprüft wird.

Prognosen aus Gleitrohr-Rheometer-Messungen mit geringer Linearität der Regressionsgeraden im P-Q-Diagramm führten erfahrungsgemäß zu stark abweichenden Förderdruckprognosen. Die Forschungseinrichtungen empfehlen daher die Einführung eines Warnsystems im Auswertungs-System des Prüfgerätes, für Messungen mit geringer Linearität der Regressionsgeraden im P-Q-Diagramm. Aus den durchgeführten Untersuchungen erscheint es sinnvoll eine Warnung auszugeben, wenn die gemessenen Werte einer Betonprobe zu einem Bestimmtheitsmaß unter 0,80 führen. In einem solchen Fall sollten die

Versuche mit dem Gleitrohr-Rheometer, nach erfolgter Entleerung, Reinigung und Befüllung, erneut durchgeführt werden.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Gleichmäßigkeit der Abstände zwischen den Messpunkten auf der Regressionsgeraden einer Gleitrohr-Rheometer-Messung auf dem P-Q-Diagramm dazu genutzt werden können um Aussagen zur Entmischungsneigung von Mischungen zu treffen. Diese Beobachtung kann dazu verwendet werden um das Gleitrohr-Rheometer dahingehend weiterzuentwickeln, dass das System eine Warnung ausgibt wenn die Probe zu stark segregiert und nicht mehr messbar ist.

8 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

Die gewonnenen Erkenntnisse können direkt in Form der abgeleiteten Empfehlungen in der Praxis genutzt werden, um das Risiko von Blockierungen der Förderleitung wirkungsvoll zu reduzieren.

Zum einen wurde ein quantitatives Modell bereitgestellt, mit dem es erstmalig möglich ist sämtliche pumprelevanten Eigenschaften im Betonentwurf durch die Abstimmung zwischen dem w/z-Wert (äquivalent zur Modellgröße ϕ_{Leim}) und dem Leimgehalt V_{Leim} (äquivalent zur Modellgröße d_{Leim}) zu steuern. Als einfache Methode zur Beurteilung des entmischungsbedingten Blockierungsverhaltens von Beton kann ein Sedimentationsversuch (vgl. Abschnitt 3.3.4) im Rahmen einer Eignungsprüfung herangezogen werden. Es wurden wissenschaftlich begründete Grenzbereiche hinsichtlich der Sedimentationsrate $\dot{S}$ in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung des Frischbetons angegeben. Die Sedimentationsrate $\dot{S}$ drückt die Neigung zur Trennung zwischen Zementleim und Gesteinskörnung aus, was das wesentlichste Entmischungsphänomen, das zur Blockierung der Förderleitung während des Pumpens von Beton führen kann, darstellt. Innerhalb des angegebenen Bereichs (0,6 Vol.-%/s < $\dot{S}$ < 1,6 Vol.-%/s) verfügt das Frischbetongefüge über die Fähigkeit eine Gleitschicht auszubilden und sich beim Passieren von Rohrbögen und Reduzierungen plastisch verformen zu können. Gleichzeitig ist der Grad der Entmischung des Betongefüges infolge sich verändernder Strömungsbedingungen moderat, sodass die Gefahr von entmischungsbedingten Blockierungen als gering einzustufen ist. Ist die Sedimentationsrate $\dot{S}$ größer als 1,6 Vol.-%/s, ist dies ein Hinweis darauf, dass veränderte Strömungsbedingen zu einer ausgeprägten Entmischung des Betonsystems führen können, was die Gefahr einer entmischungsbedingten Blockierung erhöht (eine Gleitschicht kann sich natürlich ungehindert ausbilden). Der günstig hinsichtlich der Blockierungsneigung wirkende Bereich zeichnet sich gleichzeitig durch einen geringen Pumpwiderstand, eine hohe Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit des Betons aus, was mit der plastischen Viskosität des Betons μ begründet werden kann. Auf diese Weise können unter der Berücksichtigung normativer Aspekte, pumpwiderstandsarme und zugleich entmischungsstabile Betone konzipiert werden, die gleichzeitig die Gefahr einer Blockierung reduzieren. Das Modell kann von der Praxis als Instrument genutzt werden, um einen zielgerichteten Betonentwurf vorzunehmen. Dies stellt einen erheblichen Fortschritt für die Pumppraxis dar.

Ferner wurde der Prozess der Blockierungsbildung wissenschaftlich ergründet und in einem Zusammenhang mit dem Entwässerungsverhalten des Betons gestellt. Es konnte durch entnommene Betonproben lokal blockierter Bereiche nachgewiesen werden, dass der Prozess der Entwässerung maßgeblich mit der Bildung einer irreversiblen Blockierung zusammenhängt. Es konnte nachvollzogen werden, dass ein lokal entmischtes Betongefüge (Trennung zwischen Zementleim und Gesteinskörnung) weniger stark dazu neigt sich irreversibel zu verzahnen je geringer die Neigung zur Entwässerung ist. Das Wissen über die gezielte Beeinflussung des Entwässerungsverhaltens im Rahmen eines Betonentwurfs, kann genutzt werden, um die Gefahr einer Blockierung während des Pumpens von Beton zu reduzieren. Das Entwässerungsverhalten kann durch eine Filterpresse (vgl. Abschnitt 3.3.4) über die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ quantifiziert werden. Weist ein Beton eine Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ zwischen 15 $cm^3/\sqrt{s}$ und 30 $cm^3/\sqrt{s}$ auf, dann ist der Frischbeton in der Lage eine für das Pumpen von Beton notwendige Gleitschicht auszubilden und besitzt zusätzlich die Fähigkeit Feststoffe in Bewegungsrichtung adäquat mitzuführen. Bei einer kleineren Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ (< 15 $cm^3/\sqrt{s}$) verliert ein Beton zunehmend die Fähigkeit eine Gleitschicht auszubilden. Ist die Filtrationsrate

$\dot{V}_{FW}$ hingegen größer als 30 cm³/√s ist dies ein Anzeichen dafür, dass ein Beton infolge eines Druckgradienten zu schnell sein Anmachwasser verliert, was die Gefahr einer irreversiblen Blockierung erhöht.

Die Erkenntnisse zur technischen Konzipierung von widerstandsarmen und entmischungsresistenten Betonen können von der Praxis genutzt werden, um im Rahmen einer Eignungsprüfung die Pumpfähigkeit nachzuweisen. Auf diese Weise stellt das Modell ein nützliches Instrument für die Praxis dar. Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich hinsichtlich der genannten Bereiche mit Blick auf die Sedimentationsrate $\dot{S}$ und die Filtrationsrate $\dot{V}_{FW}$ um eine Empfehlung handelt. Betone, die ein Materialverhalten außerhalb dieser Bereiche aufweisen, neigen nicht zwangsläufig zum Blockieren. Jedoch ist die Gefahr grundsätzlich größer, dass unter ungünstigen Randbedingungen (Einwirkungsseite) Blockierungen der Förderleitung entstehen können.

Gleichzeitig konnte ein vertieftes Verständnis zum Einfluss weiterer Randbedingungen einer Pumpaufgabe auf das Pumpverhalten und die Blockierungsneigung geschaffen werden. Demnach müssen für eine vollständige Kontrolle des Pumpprozesses nicht nur die Betoneigenschaften (Widerstandsseite) berücksichtigt werden, sondern darüber hinaus auch die Einwirkungsseite, auf die durch die Planung der Pumpstrecke Einfluss genommen werden kann. Die Kenntnis darüber, welche Förderleitungselemente zu veränderten Strömungsbedingungen führen und dadurch die Eigenschaften des Betons verändern und Blockierungen auslösen können, kann in der Planung einer Pumpaufgabe genutzt werden, um gutmütige Randbedingungen zu schaffen, indem beispielsweise Konsolidierungsabschnitte eingeplant werden oder Rohrbögen mit größerem Radius die Entmischungsneigung von Beton reduzieren. Durch die Umsetzung der erlangten Erkenntnisse besteht eine verringerte Gefahr, dass in der Praxis unerwartet Blockierungen der Förderleitung entstehen.

Zusätzlich dazu kann durch die Umsetzung des vorgestellten Verfahrens, zur frühzeitigen Erkennung einer drohenden Blockierung der Förderleitung, ein digitales Assistenzsystem zur Überwachung des Pumpprozesses bereitgestellt werden, dass das Potenzial hat, durch Big-Data-Methoden und angeschlossene Regelalgorithmen, die Anzahl von in der Praxis auftretenden Blockierungen wirkungsvoll zu reduzieren. Dadurch können potenziell Sach- und Personenschäden reduziert und Ausfallzeiten vermieden werden, wodurch die Wirtschaftlichkeit von Betonpumpendienstleistern direkt gesteigert werden könnte. Durch den zuverlässigeren Einsatz von Betonpumpen, können Bauabläufe und Personaleinsätze besser geplant und aufeinander abgestimmt werden, was für bauausführende Unternehmen mit einer höheren Planungssicherheit und einer effizienten Nutzung von Kapazitäten und Ressourcen einhergeht. Weiterhin liefert ein ungestörter Pumpprozess eine höhere Bauteilqualität, da unterbrechungsfrei betoniert werden kann. Ebenso können durch einen ungestörten und planmäßig verlaufenden Pumpprozesse Konventionalstrafen verhindert werden, die beispielsweise durch die nicht Einhaltung von Sperrzeiten entstehen würden.

Zuletzt kann die Optimierungen des Gleitrohr-Rheometers (Sliper) zu einer höheren Prognosegenauigkeit des erforderlichen Pumpdrucks führen, wodurch die Leistung einer Pumpe optimal ausgenutzt werden kann. Dies kann direkt zu einem wirtschaftlichen Vorteil von Betonpumpendienstleistern führen, da Betonpumpen bereitgestellt werden können, die der Aufgabe zielsicher entsprechen.

Das durchgeführte Forschungsprojekt liefert zum ersten Mal abgesicherte und ganzheitliche Erkenntnisse zur Durchführung von Pumpprozessen in der Praxis. Die wesentlichen Randbedingungen und Interaktionen, vor allem zwischen Beton und Förderleitung konnten auf diese Weise berücksichtigt werden und liefern für die Pumppraxis verschiedenste und zugleich

wirkungsvolle Ansätze zur Reduzierung der Blockierungsneigung beim Pumpen von Beton. Dadurch lässt sich der Pumpprozess der Zukunft sicherer und wirtschaftlicher gestalten.

9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die im Berichtszeitraum geleisteten Arbeiten entsprechen dem im Projektantrag skizzierten Lösungsweg und waren für die Durchführung des Forschungsprojekts notwendig und angemessen.

Das im Forschungsantrag postulierte Ziel wurde vollständig erreicht und sogar übertroffen. Die im Rahmen der Technikum-Pumpversuche durchgeführte Parameterstudie wurde in Absprache mit dem Beraterkreis deutlich erweitert und liefert praxisrelevante Erkenntnisse zum Pumpverhalten stark variierender Betonzusammensetzungen und zum Einfluss der Pumpleitungsgeometrie sowie zum Einfluss der Pumpregie auf die Blockierungsneigung von Beton. Die Erkenntnisse konnten im Rahmen von großmaßstäblichen Pumpversuchen bestätigt und erweitert werden.

Der Erkenntnisgewinn zeichnet sich durch wissenschaftlich begründete, praxisorientierte und unmittelbar anwendbare Anwendungsregeln und Anwendungsempfehlungen für die Praxis aus.

10 Verwendung der Zuwendung

10.1 Personalkosten

Die folgende Tabelle stellt die Personenmonate für das wissenschaftlich-technische Personal gemäß Beleg über die Beschäftigungszeiten dar.

Tabelle 10-1: Beschäftigungszeiten des wissenschaftlich-technischen Personals

Verwendung der Zuwendung	Personenmonate	
	FE1	FE2
wissenschaftlich-technisches Personal	25,92	25,75

10.2 Gerätebeschaffung

Es wurden keine Geräte angeschafft.

11 Umsetzbarkeit und Transfer der Ergebnisse

11.1 Grad der Umsetzung in die betriebliche Praxis

Die Erkenntnisse sollen zeitnah in Form von Anwendungsregeln und Anwendungsempfehlungen der Praxis bereitgestellt werden, die gemeinsam mit den Praxispartnern erarbeitet werden sollen.

Zusätzlich wird ein Sachstandsbericht zum Thema Pumpen von Beton erarbeitet. Dieser Sachstandsbericht entsteht im Technical Committee: Pumping of Concrete (TC PCC) der Organisation „The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)", in dem Vertreter der Forschungseinrichtungen als Mitglieder tätig sind. Im Sachstandsbericht sollen die im Forschungsprojekt erzielten Erkenntnisse Eingang finden, die dann von der nationalen Wirtschaft abgerufen werden können und als Leitfaden dienen.

Weiterhin werden die genannten Erkenntnisse in einer Dissertation sowie in nationalen als auch internationalen Journals veröffentlicht.

Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahmen/Ziele	Ort/Rahmen	Zeitraum
Information der Mitglieder des BTB zum Planungs- und Sachstand im Vorhaben. Diskussion der Teilziele, geplanten Methoden, zu untersuchenden Stoffgemenge sowie Ansätze bei der Auswertung	Vorträge in den Arbeitssitzungen der Fachgruppen, Abteilungen, Verbände von FTB und BTB (OnlineKonferenzen, bilateral oder multilateral), Telefongespräche	08/2020 10/2020 11/2020 12/2020
Information von Fa. Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH über das Forschungsvorhaben. Einbeziehung eines zweiten Sliper (Gleitrohrrheometer) in die Betonentwicklung und -charakterisierung im Labormaßstab	Dresden / Laborarbeiten zur Entwicklung und Charakterisierung der Betone für die Pumpversuche im Technikum-Maßstab	09/2020
Information regionaler Transportbetonunternehmen zum Forschungsvorhaben. Diskussionen zur Möglichkeiten der Bereitstellung relativ kleiner Betonvolumina (1-2 m^3) mit besonderen, reproduzierbaren Eigenschaften für die Pumpversuche im Technikums-Maßstab. Sondierungen zur Lieferung von Betonkomponenten für die Laborversuche im Vorfeld der Pumpversuche.	Region Hannover, Telefongespräche	09/2020 10/2020
Information von Fa. Putzmeister Holding GmbH zum Forschungsvorhaben und resultierenden Anforderungen an Betonpumpen. Sondierungen zur Bereitstellung einer Betonpumpe für die Technikum-Pumpversuche.	Hannover, Aichtal, lokale Niederlassungen/Vertriebspartner der Fa. Putzmeister; Online-Konferenzen (bilateral), Telefongespräche, (bilateral)	10/2020 11/2020
Masterarbeit zum Thema: Entwicklung einer Modellvorstellung zur Beschreibung des	Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe	12/2020

Blockierungsverhaltens beim Pumpen von Beton		
Diplomarbeit zu den Druckverhältnissen in Pumprohrleitungen bei verschiedenen Förderströmen von Beton	Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe	03/2021
Austausch und Abstimmung mit der Fa. Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH zur Anpassung des Sliper-Geräts (Gleitrohrrheometer)	Online-Konferenzen, Telefongespräche, E-Mails	07/2021 08/2021 10/2021 11/2021 12/2021
Regelmäßige Information der Mitglieder des BTB zum Planungs- und Sachstand im Vorhaben, Diskussion der Teilziele und Forschungsergebnisse	Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses in Online-Konferenzen, Vorträge in den Arbeitssitzungen der Fachgruppe	04/2021 06/2021 12/2021 01/2022 02/2022
Austausch und Vorbereitungen mit der Firma Putzmeister Concrete Pumps GmbH zur Umsetzung der großmaßstäblichen Pumpversuche	Aichtal, Online-Konferenzen, Telefongespräche	08/2021 09/2021 10/2021 11/2021 12/2021
Austausch und Abstimmung mit dem Leiter der Betreuungsgruppe (Christian Klafszky, Betonpumpenunion GmbH & Co KG, Ulm)	Online-Konferenzen, Telefongespräche, E-Mails	04/2021 05/2021 06/2021 08/2021 10/2021 11/2021 12/2021
Interdisziplinäres Projekt zum Thema: Herleitung eines Modellansatzes zur Berechnung des Filtrationsverhaltens von Zementsuspensionen unter Druck	Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe	12/2021
Masterarbeit zum Thema: Erweiterung eines Modellansatzes zur Berechnung des Filtrationsverhaltens von Zementsuspensionen unter Druck auf Beton	Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe	12/2021
Präsentation von ausgewählten Forschungsergebnissen auf Fachtagungen	Regensburg, 31. Internationalen Konferenz „Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen“	03/2022
Einbindung von Forschungsergebnissen im Sachstandsbericht des Technical Committee: Pumping of Concrete (TC PCC) der Organisation „The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)“	Sitzungen des TC PCC, Online-Konferenzen	03/2022

Veröffentlichung in Fachzeitschriften	beton (Verlag Bau+Technik), Bautechnik (Verlag Ernst und Sohn)	06/2022
Bericht der Forschungsarbeiten	Mitgliederzeitschrift der Transportbetonindustrie TB-iNFO Ausgabe 88	09/2022

11.2 Wirksame Maßnahmen zum Ergebnistransfer

Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahmen/Ziele	Ort/Rahmen	Zeitraum
Ausschreibung und Vergabe von Beleg- bzw. Diplom/Masterthemen	Graduiertenarbeiten	laufend
Dissertation zum Thema: Ein Verfahren zur digitalen Überwachung des Pumpprozesses von Beton zur Vermeidung von Blockierungen der Förderleitung	Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe	06/2023
Präsentation von ausgewählten Forschungsergebnissen auf Fachtagungen	Transportbeton im Dialog 2023	09/2023
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Ausbildung	Vorlesungen, Praktika, Einbeziehung von Doktoranden in die Projektanschlussphase	nach Projektabschluss und Publikation der Projektergebnisse
Formulierung und Verbreitung von Arbeitshilfen (Tabellen, Nomogramme, einfache Software)	Verbreitung mit Hilfe der FTB bzw. Partnerorganisationen auf Konferenzen, Messen etc., DBV Rundschreiben	nach Projektabschluss
Weitergabe ausführlicher Forschungsberichte an verbandsangehörige Firmen	Auf Anforderung	nach Projektabschluss
Beratung von Unternehmen	Bilaterale Gespräche, Online-Konferenzen, Telefongespräche, E-Mails	nach Projektabschluss

12 Literaturverzeichnis

[Aïtcin – 1998d] Aïtcin, P.-C. Supplementary cementitious materials. In: High-Performance Concrete, E&F SPON (1998) 139-161.

[Aldred – 2010] Aldred, J.: Burj Khalifa – a new high for high-performance concrete. In: Proc. ICE - Civ. Eng. 163 (2010) 66-73.

[Anderson – 1977] Anderson, W.G.: Analyzing Concrete Mixtures for Pumpability. In: ACI Journal 74, 42 (1977) 447-451.

[Bauer – 1971] Bauer, H.: Über das Pumpen von Beton durch Rohre. In: Baumaschine und Bautechnik 7 (1971) 277-281.

[Begemann – 2017] Begemann, C.; Cotardo, D.; Lohaus, L.: Mischungsstabilität und Robustheit von Beton. In: Tagungsband zur 8. Betonfachtagung Nord - Betone und Hochleistungsbetone baustellentauglich und dauerhaft, beton (2017) 157-169.

[Begemann – 2018] Begemann, C.; Cotardo, D.; Lohaus, L.: Mischungsstabilität fließfähiger Betone: Konzeption und Prüfung. In: Bautechnik 95, 4 (2018) 316-323.

[Begemann – 2019] Begemann, C.; Haist, M.; Lohaus, L.: Prüfverfahren zur Bewertung der Mischungsstabilität von Beton unter Rütteleinwirkung. In: 60. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2019) 232-244.

[Berge – 1995] Bergemann D.: Betontechnologie für Pumpen. Putzmeister AG – Aichtal (1995).

[Bingham – 1916] Bingham, E.C.: An Investigation of the Laws of Plastic Flow. In: Bulletin of the Bureau of Standards 13 (1916) 309-353.

[Binns – 2003] Binns, T.: Advanced concrete technology – Pumped Concrete. In: Adv. Concr. Tech. 4 (2003) 1-33.

[Björns – 2003] Björnström, J.; Chandra, S.: Effect of Superplasticizers on the Rheological Properties of Cements. In: Mater. Struct. 36, 10 (2003) 685-692.

[Blask – 2002] Blask, O.: Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen (2002).

[Bombled – 1966] Bombled, J.P.: Rheologie des Frischbetons. In: Zement-Kalk-Gips 5 (1966) 242-245.

[Brauer – 1971] Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmung. In: Verlag Sauerlander, Aarau-Frankfurt (1971).

[Browne – 1977] Browne, R.D.; Bamforth P.: Tests to Establish Concrete Pumpability. In: ACI J. 74, 5 (1977) 193-203.

[BTB – 2018] Jahresbericht 2018 des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., Berlin (2018).

[BTB – 2019] Jahresbericht 2019 des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., Berlin (2019), unveröffentlicht.

[BTB – 2020] Leitfaden des BTB – Pumpen von Beton (2020), unveröffentlicht.

[BTB – 2021] Jahresbericht 2021 vom Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V., Neue Zeiten, 2021.

[Bui – 1999] Bui, V.K.; Montgomery, D.: Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume. In: International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm (1999) 373-384.

[Chapd – 2007] Chapdelaine, F.: Étude Fondamentale et Pratique sur le Pompage De Beton. Dissertation, Laval University, Quebec, Canada (2007).

[Choi – 2013a] Choi, M.S.; Roussel, N.; Kim, Y.; Kim, J.: Lubrication layer properties during concrete pumping. In: Cem. Concr. Res. 45 (2013) 69-78.

[Choi – 2013b] Choi, M.S.; Kim, Y.J.; Kwon, S.H.: Prediction on pipe flow of pumped concrete based on shear-induced particle migration. In: Cem. Conc. Res. 52 (2013) 216-224.

[Coenen – 2021] Coenen, M.; Schack, T.; Beyer, D.; Heipke, C.; Haist, M.: Semi-supervised segmentation of concrete aggregate using consensus regularisation and prior guidance, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V-2-2021 [Wallevik – 2003] Wallevik, Ó.H.: Rheology - A Scientific Approach to develop Self-Compacting Concrete. In: Self-Compacting Concrete, Proc. of the 3rd Inter RILEM Symposium 2003, Reykjavik, RILEM Publication PRO 33 (2003).

[Cotardo – 2018a] Cotardo, D.; Lohaus, L.; Schack, T.; Begemann, C.: Zur Pumpstabilität von Beton – Steuerung des Entwässerungsverhaltens von Beton unter hohem Druck. In: Tagungsband der 20. Internationalen Baustofftagung (ibausil), Weimar, Deutschland (2018) 1169-1176.

[Cotardo – 2018b] Cotardo, D.; Lohaus, L.; Begemann, C.: Zum Entwässerungsverhalten von Beton unter hohem Druck – Einfluss der Fließgrenze des Feinstmörtels, 4. Grazer Betonkolloquium, Graz, Österreich (2018) 193-200.

[Cotardo – 2023] Cotardo, D.: Ein Verfahren zur digitalen Überwachung des Pumpprozesses von Beton zur Vermeidung von Blockierungen der Förderleitung, Dissertation, Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover (2023), *unveröffentlicht*.

[Coussot – 2005] Coussot, P.: Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials. In: Application in industry and environment, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey (2005).

[De Schutter – 2016] De Schutter, G.; Feys, D.: Pumping of Fresh Concrete: Insights and Challenges. In: RILEM Technical Letters 1 (2016) 76-80.

[Draijer – 2007] Draijer, W.M.: Assessing the pumpability of concrete with slump and pressure bleeding test, University of Twente (2007).

[Ede – 1957] Ede, A.N.: The resistance of concrete pumped through pipelines. In: Mag. Concr. Res. 9 (1957) 129-140.

[Esmaeil – 2014] Esmaeilkhanian, B.; Khayat, K.H.; Yahia, A.; Feys, D.: Effects of mix design parameters and rheological properties on dynamic stability of self-consolidating concrete. In: Cem. Concr. Compos. 54 (2014).

[Fataei – 2019] Fataei, S.; Secrieru, E.; Mechtcherine, V.: Influence of aggregate volume fraction on concrete pumping behaviour. In: Rheo. Proc. Const. Mater. (2019) 303-310.

[Fataei – 2022] Fataei, S.: Flow-induced particle migration in concrete under high shear rates. Dissertation, TU Dresden (2022).

[Feys – 2009a] Feys, D.; Verhoeven, R.; De Schutter, G.: Relationship between rheological properties and pumping of fresh self-compacting concrete. In: 2nd Int. Symp. on Design, Performance and Use of SCC (2009) 64-73.

[Feys – 2009b] Feys, D.: Interactions between rheological properties and pumping of self-compacting concrete. Dissertation, Gent University (2009).

[Feys – 2011] Feys, D.: Understanding the pumping of conventional vibrated and self-compacting concrete. In: N. Roussel (Ed.), Underst. Rheol. Concr., Woodhead Publishing Limited, Cambridge (2011) 331-353.

[Feys – 2013a] Feys, D.; De Schutter, G.; Verhoeven, R.: Parameters influencing pressure during pumping of self-compacting concrete. In: Mater. and Struct. 46 (2013) 533-555.

[Feys – 2013b] Feys, D.; Khayat, K.H.; Perez-Schell, A.; Khatib, R.: Relation between rheological and tribological properties of highly-workable concrete, in view of estimating pumping pressures. In: Fifth North Am. Conf. Des. Use Self-Consolidating Concr., Chicago (2013).

[Feys – 2015] Feys, D.; Khayat, K.H.; Khatib, R.: How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure?. In: Cem. Concr. Compos. 66 (2015) 38-46.

[Flatt – 2006] Flatt, R.J.; Bowen, P.: A Yield Stress Model for Suspensions. In: J. Am. Cerm. Soc. 89, 4 (2006) 1244-1256.

[Fritschi – 2016] Fritschi, E.L.: Smart dynamic casting. PhD thesis, ETH Zurich (2016).

[Fung – 2014] Fung, W.W.S.; Kwan, A.K.H.: Effect of particle interlock on flow of aggregate through opening. Powder Technol. 253 (2014) 198–206.

[Geisenh – 2009] Geisenhanslüke, C.: Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. Dissertation, Universität Kassel (2009).

[Gray – 1962] Gray, J.: Laboratory procedure for comparing pumpability of concrete mixtures. In: Sixty-Fifth Annual Meeting of the Society, National Crushed Stone Association, Washington, DC (1962) 964-971.

[Grübl – 2001] Grübl, P. Weigler, H. Karl, S.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften. In: Ernst und Sohn (2001).

[Guazzelli – 2018] Guazzelli, E.; Pouliquen, O.: Rheology of dense granular suspensions. In: Journal of Fluid Mechanics, 852, 1 (2018) 1-73.

[Guptill – 1996] Guptill, N.R.; Akers, D.J.; A, K.R.; Pierce, J.S.; Bognacki, C.; King, J.C.; Reinhart, P.E.; Cope, J.L.; Krell, W.C.; Rhoads, R.J.; Garner, M.; Mass, G.R.; Saucier, K.L.; Green, D.J.; McDowell, P.; Stodola, P.R.; Holland, T.C.; Parekh, D.T.; Sypher, W.X.; Johnson, T.A.; Phares, R.J.; Tobin, R.E.; Kalat, S.A.; Wolf, K.: Placing Concrete by Pumping Methods-Report by ACI Committee 304. In: ACI 304.2R-96 (1996) 1-25.

[Haist – 2009] Haist, M.: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zement-suspensionen. Dissertation, Karlsruhe (2009).

[Haist – 2022] Haist, M.; Heipke, C.; Beyer, D.; Coenen, M.; Vogel, Ch.; Schack, T.; Ponnick, A.; Langer, A.: Digitization of the concrete production chain using computer vision and artificial intelligence. In: Proceedings of the fib Symposium in Oslo 2022.

[Hazaree – 2015] Hazaree, C.; Mahadevan, V.: Single stage concrete pumping through 2.432 km (1.51 miles): Weather and execution challenges. In: Case Studies in Construction Materials 3 (2015) 56-69.

[Henke – 2016] Henke, K.: Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton. Dissertation, Technische Universität München (2016).

[Huber – 1994] Huber, N.; Sommerfeld, M.: Characterization of the cross-sectional particle concentration distribution in the pneumatic conveying systems. In: Powder Technology 79 (1994) 191-210.

[Huß – 2010] Huß, A.: Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtetem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung. Dissertation, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA) (2010).

[Ingber – 2009] Ingber, M.S.; Graham, A.L.; Mondy, L.A.; Fang, Z.: An improved constitutive model for concentrated suspensions accounting for shear-induced particle migration rate dependence on particle radius. In: Int. J. Multiph. Flow 35 (2009) 270-276.

[Jacobsen – 2009] Jacobsen, S.; Haugan, L.; Hammer, T.A.; Kalogiannidis, E.: Flow conditions of fresh mortar and concrete in different pipes. In: Cem. Concr. Res. 39, 11 (2009) 997-1006.

[Jeong – 2016] Jeong, J.H.; Jang, K.P.; Park, C.K.; Lee, S.H.; Kwon, S.H.: Effect of admixtures on pump ability for high-strength concrete. In: ACI Mater. J. 113, 3 (2016) 323-333.

[Jolin – 2006] Jolin, M.; Chapdelaine, F.; Gagnon, F.; Beaupré, D.: Pumping concrete: A Fundamental and Practical Approach. In: Proc. 10th Conf. on Shotcrete for Underground Support, Canada (2006) 334-347.

[Kaliske – 2022] Kaliske, M.: Ein Modellansatz zur Berechnung des Filtrationsverhaltens von Beton unter Druck. Masterarbeit, Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover (2022).

[Kammer – 2022] Kammer, C.; Blackwell, B.; Arratia, P.E.: A homogenization model for the rheology and local field statistics of suspensions of particles in yield stress fluids. In: Journal of Rheology 66, 3 (2022) 535-549.

[Kaplan – 2000] Kaplan, D.: Pompage des bétons. Dissertation, École des Ponts ParisTech (2000).

[Kaplan – 2005] Kaplan, D.; De Larrard, F.; Sedran, T.: Avoidance of blockages in concrete pumping process. In: ACI Mater. J. 102 (2005) 183-191.

[Kasten – 2010] Kasten, K.: Gleitrohr-Rheometer – Ein Verfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Dickstoffen in Rohrleitungen. Dissertation, TU Dresden (2010).

[Kasten – 2011a] Kasten, K.: Betontechnologie für Betonpumpen. Putzmeister Concrete Pumps GmbH, Aichtal, 6. Auflage, BP 2158-6 (2011).

[Kasten – 2011b] Kasten, K.; Wirsching, H.-J.: Betontechnologie für Betonpumpen. In: Putzmeister Concrete Pumps GmbH, Aichtal (2011).

[Kennedy – 1940] Kennedy, C.T.: The Design of Concrete Mixes. In: Proceedings of Concrete Institute, 36, 2 (1940) 373-400.

[Khatib – 2013] Khatib, R.: Analysis and prediction of pumping characteristics of high-strength self-consolidating concrete. Dissertation, Université de Sherbrooke (2013).

[Khayat – 2004] Khayat, K.H.; Assaad, J.; Daczko, J.: Comparison of Field-Oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of SCC. In: ACI Mater. J. (2004) 168-176.

[Khosh – 2006] Khoshnevis, B.; Hwang, D.; Yao, K.-T.; Epstein, Z.Y.: Mega-scale fabrication by contour crafting. In: Int. J. Ind. Syst. Eng. 1 (2006) 301-320.

[Kordts – 2004] Kordts, S.; Grube, H.: Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von Selbstverdichtendem Beton als Transportbeton. In: Betontechnische Berichte/VDZ, Verl. Bau und Technik, Bibliographische Deskription nach 2001-2003 (2004) 103-112.

[Kraume – 2004] Kraume, M.: Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. In: 5. Auflage, Springer, Berlin (2004).

[Kronen – 2005] Kronenberg, J.: Automated concrete placement in the precasting plant. In: Concrete Plant International 5 (2005) 180-181.

[Lannen – 2018] Lannen, T.; Skinner, N.D.: Pumping Cement-Based Materials. In: Final Report ST-2018-2584-02 (2018).

[Le – 2012] Le, T.T.; Austin, S.A.; Lim, S.; Buswell, R.A.; Law, R.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T.: Hardened properties of high-performance printing concrete. In: Cem. Concr. Res. 42 (2012) 558-566.

[Le – 2015] Le, H.D.; Kadri, E.-H.; Aggoun, S.; Vierendeels, J.; Troch, P.; De Schutter, G.: Effect of lubrication layer on velocity profile of concrete in a pumping pipe. In: Mater. Struct. 48 (2015) 3991-4003.

[Lee – 2014] Lee, L.Y.; Quek, T.Y.; Deng, R.S.; Ray, M.B.; Wang, C.H: Pneumatic transport of granule materials through a bend. In: Chemical Engineering Science 59, 21 (2004) 4637-4651.

[Levy – 1998] Levy, A.; Mason, D.J.: The effect of a bend on the particle cross-section concentration and segregation in pneumatic conveying systems. In: Powder Technology 98 (1998) 95-103.

[Lohaus – 2016] Lohaus, L.; Steinhäuser, H.; Begemann, C.: Annahmeprüfverfahren zur Beurteilung der Mischungsstabilität von fließfähigen Betonen. Abschlussbericht zum DBV-Forschungsvorhaben 301, Leibniz Universität Hannover (2016).

[Lohaus – 2017a] Lohaus, L.: Titel des Forschungsvorhabens: Pumpstabilität von Beton – Prüfverfahren zur Mischungsstabilität bei hohem Druck, DBV-Forschungsvorhaben 301 und 308, Bearbeitungszeitraum 01.01.2014 - 30.09.2017.

[Lohaus – 2017b] Lohaus, L.; Cotardo, D.: Pumpstabilität von Beton - Prüfverfahren zur Mischungsstabilität bei hohem Druck. Schlussbericht zum DBV Forschungsvorhaben 308 (2017).

[Lu – 2008] Lu, G.; Wang, K.; Rudolphi, T.J.: Modeling rheological behavior of highly flowable mortar using concepts of particle ad fluid mechanics. In: Cem. Concr. Compos. 30 (2008) 1-12.

[Macosko – 1994] Macosko, C.: Rheology Principles, Measurements and Applications. In: Wiley-VCH, New York (1994).

[Mattheis – 2022] Mattheis, H.: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Entmischungsneigung von frischen Betonen sowie deren Druckverslust bei deren Förderung in Pumpleitungen. Diplomarbeit, TU Dresden (2022).

[Mazanec – 2010] Mazanec, O.; Lowke, D.; Schießl, P.: Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. In: Mater. Struct. 43, 3 (2010) 357-365.

[Mazanec – 2011] Mazanec, O.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Fließmitteladsorption und deren Auswirkung auf die Misch- und Verarbeitungszeit ultrahochfester Betone. TU München (2011).

[Mazanec – 2013] Mazanec, O.: Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikuläre Wechselwirkungen. Dissertation, TU München (2013).

[Mecht – 2018] Mechtcherine, V.; Nerella V.N.: 3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen. In: Bautechnik 95, 4 (2018) 275-287.

[Mehdipour – 2018] Mehdipour, I.; Khayat, K.H.: Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. Constr. Build. Mater. 161 (2018) 340–353.

[Mehta – 2006] Mehta, P.K.; Monteiro, P.J.: Concrete - Microstructures, Properties and Materials, New York: McGraw-Hill (2006).

[Mewis – 2012] Mewis, J.; Wagner, N.J.: Colloidal Suspension Rheology. Cambridge University Press (2012).

[Mikhalev – 2021] Mikhalev, D.: Experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung der Vorhersage-genauigkeit des Pumpverhaltens von Frischbeton mittels Gleitrohr-Rheometer „Sliper". Diplomarbeit, TU Dresden (2021).

[Morinaga – 1973] Morinaga, M.: Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines, Fresh concrete: Important properties and their measurement. In: Proc. RILEM Conf. 7 (1973) 1-39.

[Mouton – 2002] Mouton, P.R.: Principles and Practices of Unbiased Stereology: An Introduction for Bioscientists; JHU Press: Baltimore, MD, USS (2002).

[Navarette – 2016] Navarrete, I.; Lopez, M.: Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy. In: Constr. Build. Mater. 122 (2016) 384-390.

[Nerella – 2016] Nerella, V.N.; Krause, M.; Näther, M.; Mechtcherine, V.: CONPrint3D – 3D printing technology for on site construction. In: Concr. Plant Int. (2016) 36-41.

[Ngo – 2010a] Ngo, T.-T.; Kadri, E.-H.; Bennacer, R.; Cussigh, F.: Use of tribometer to estimate interface friction and concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping In: Constr. Build. Mater. 24 (2010) 1253-1261.

[Ngo – 2010b] Ngo, T.-T.; Kadri, E.-H.; Cussigh, F.; Bennacer, R.; Duval, R.: Practical tribometer to estimate pumpability of fresh concrete. In: J.of Asian Archit. Build. Eng. 9 (2010) 229-236.

[Perrot – 2015] Perrot, A.; Rangeard, D.; Pierre, A.: Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. In: Materials and Strucures (2015) 1-8.

[Phillips – 1992] Phillips, R.J.; Armstrong, R.C.; Brown, R.A.; Graham, A.L.; Abbott, J.R.: A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration. In: Phys. Fluids A: Fluid Dyn. 4 (1992) 30-40.

[Plank – 2003] Plank, J.: Applications of Biopolymers in Construction Engineering. In: Biopolymers 10, General Aspects and Special Applications, (Herausgeber: A. Steinbüchel), Wiley-VCH, Weinheim (2003) 29-95.

[Poiseuille – 1841] Poiseuille, J.: Recherches expèrimentales Sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres. In: C. R. Hebd. Seances Acad. Sci. 12 (1841) 112-115.

[Powers – 1968] Powers, T.C.: The Properties of Fresh Concrete. In: John Wiley & Sons, New York (1968) 533-652.

[Riding – 2016] Riding, K.A.; Vosahlik, J.; Feys, D.; Malone, T.; Lindquist, W.: Best Practices for Concrete Pumping. In: Report No. K-TRAN: KSU-14-2, Kansas Department of Transportation (2016).

[Río – 2011] Río, O.; Rodríguez, Á.; Nabulsi, S.; Álvarez, M.: Pumping Quality Control Method Based on Online Concrete Pumpability Assessment. In: ACI Mater. J. 108-M45 (2011) 423-431.

[Rumman – 2018] Rumman, R.: Mix design for durable and pumpable concrete unsing locally available materials. In: Master Thesis, Dhaka, Bangladesh (2018).

[Ripperger – 2005] Ripperger, S.; Babick, F.: Vorlesungsskript, Grundlagen der Verfahrenstechnik 1 – Teilgebiet: Mechanische Verfahrenstechnik, TU Dresden, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik (2005).

[Sakuta – 1979] Sakuta, M.; Yamane, S.; Kasami, H.; Sakamoto, A.: Pumpability and rheological properties of fresh concrete. In: Proc. of Conf. on Quality Control of Concr. Struct. 2 (1979) 125-132.

[Sakuta 1989] Sakuta, M.; Kasanu, I.; Yamane, S.; Sakamoto, A.: Pumpability of fresh concrete. In: Takenaka Technical Research Laboratory (1989) 125-133.

[Secrieru – 2016] Secrieru, E. Mechtcherine, V. Schröfl, C. Borin, D.: Rheological characterisation and prediction of pumpability of Strain-Hardening Cement-Based-Composites (SHCC) at various temperatures. In: Const. Build. Mater. 112 (2016) 581-594.

[Secrieru – 2018a] Secrieru E.: Pumping behaviour of modern concretes - Characterisation and prediction. Dissertation, TU Dresden (2018).

[Secrieru – 2018b] Secrieru, E.; Khodor, J.; Schröfl, C.; Mechtcherine, V.: Formation of lubricating layer and flow type during pumping of cement-based materials. In: Const. Build. Mater. 178 (2018) 507-517

[Solbach – 2021] Solbach, V.: Vergleichende rheologische Untersuchungen an Frischbeton zur Entwicklung einer zielsicheren Auswertemethodik von Betonrheometern unter Praxisbedingungen, Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover (2021).

[Spangen – 2012] Spangenberg, J.; Roussel, N.; Hattel, J.H.; Stang, H.; Skocek, J.; Geiker, M.R.: Flow induced particle migration in fresh concrete: theoretical frame, numerical simulations and experimental results on model fluids. In: Cem. Concr. Res. 42 (2012) 633-641.

[Spiratos – 2003] Spiratos, N. Page, M. Mailvaganam, N.P. Malhotra, V.M. Jolicoeur, C.: Superplasticizers for concrete. In: Supplementary Cementing Mater. for Sustainable Development Inc., Ottawa (2003).

[Strybny – 2019] Strybny, B.: Beschreibung von Entwässerungsvorgängen von Zementsuspensionen und Quantifizierung des Einflusses rheologischer Kennwerte auf das Entwässerungs-verhalten von Zementsuspensionen. In: Seminararbeit, Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover (2019).

[Su – 2003] Su, N.; Miao, B.: A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. In: Cem. Concr. Comp., 25, 2 (2003) 215-222.

[Tan – 2012] Tan, Y.; Zhang, H.; Yang, D.; Jiang, S.; Song, J.; Sheng, Y.: Numerical simulation of concrete pumping process and investigation of wear mechanism of the piping wall. In: Tribol. Int. 46 (2012) 137-144.

[Tanigawa – 1991] Tanigawa, Y.; Mori, H.; Noda, Y.: Theoretical study on pumping of fresh concrete. In: Transaction of the Japan Concrete Institute 13 (1991).

[Tichy – 2007] Tichy, J.W.: Zum Einfluss des Filtermittels und der auftretenden Interferenzen zwischen Filterkuchen und Filtermittel bei der Kuchenfiltration. In: Dissertationsschrift, Technische Universität Kaiserslautern (2007).

[Uchikawa – 1997] Uchikawa, H.; Hanehara, S.; Sawakim, D.: The role of steric respulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. In: Cem. Concr. Res. 27 (1997) 37-50.

[Vassiliev – 1953] Vassiliev, V.: Flow Regime in a Concrete Pipe. In: Edition 7 (1953) 42-44.

[Vanhove – 2006] Vanhove, Y.; Djelal, C.; Magnin, A.: A device to study fresh concrete friction. In: Cem. Conc. Aggr. 26 (2006) 35-41.

[Vanhove – 2016] Vanhove, Y.; Khayat, K.H.: Forced Bleeding Test to Assess Stability of Flowable Concrete. In: ACI Mater. J. 113, 6 (2016) 753-758.

[Verhoeven – 2005] Verhoeven, R.; Feys, D.; De Schutter, G.: Pipe flow velocity profiles of complex suspensions, like concrete. Gent University (2005).

[Wallevik – 2011] Wallevik, Ó.H.; Wallevik, J.E.: Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. In: Cem. Concr. Res. 41 (2011) 1279-1288.

[Weber – 1963] Weber, R.: Rohrförderung von Beton. Beton-Verlag GmbH (1963).

[Wüstholz – 2005] Wüstholz, T.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbeton-eigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. Dissertation, Universität Stuttgart (2005).

[Yang – 1997] Yang, M.; Neubauer, C.M.; Jennings, H.M.: Interparticle Potential and Sedimentation Behavior of Cement Suspensions. In: Adv. Cem. Based Mater. 5, 1 (1997) 1-7.

[Yücel – 2012] Yücel, K.T.: Examination of Behavior of Fresh Concrete under Pressure. In: International Journal of Thermophysics, 33, 5 (2012) 885-894.

[Zhang – 2003] Zhang, M.Y.: Coal-water paste water-seeping properties under pressure and its pumpability. In: J. Eng. for Thermal Energy & Power (2003) 78-81.

Normen und Richtlinien:

[ACI TC 211– 2018] American Concrete Institute TC 211: Guide to Selection Proportions for Pumpable Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI (2018).

[ACI 211.9R – 2018] American Concrete Institute 211.9R-18: Guide to Selecting Proportions for Pumpable Concrete, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute (2018).

[ACI 304.2R – 1996] American Concrete Institute: Placing concrete by pumping methods, ACI 304.2R-96, reapproved 2008 (1996).

[DAfStb – 2012] DAfStb-Richtlinie, Selbstverdichtender Beton: 2012-09.

[DIN EN 206-1] DIN EN 206-1:2001-07, Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1 (2001).

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

[DIN 1045-3] DIN 1045-3:2012-03, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN EN 13670 (2012).

[DIN EN 1097-3] DIN EN 1097-3: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt (1998).

[DIN EN 12350-6] DIN EN 12350-6:2019-09, Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohdichte; Deutsche Fassung EN 12350-6 (2019).

[DIN EN 12350-7] DIN EN 12350-7:2019-09, Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7 (2019).