



Forschungsbericht

zum AiF IGF-Vorhaben Nr. 18361 N

Zielsichere betontechnische Gestaltung und Optimierung
des Pumpens von Frischbeton

Bearbeitungszeitraum: 01.12.2015-30.11.2017

Forschungsbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 18361 N

Thema

Zielsichere betontechnische Gestaltung und Optimierung des Pumpens von Frischbeton

Vorhabenszeitraum

01.12.2015 - 30.11.2017

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. – FTB

Forschungsstelle(n)

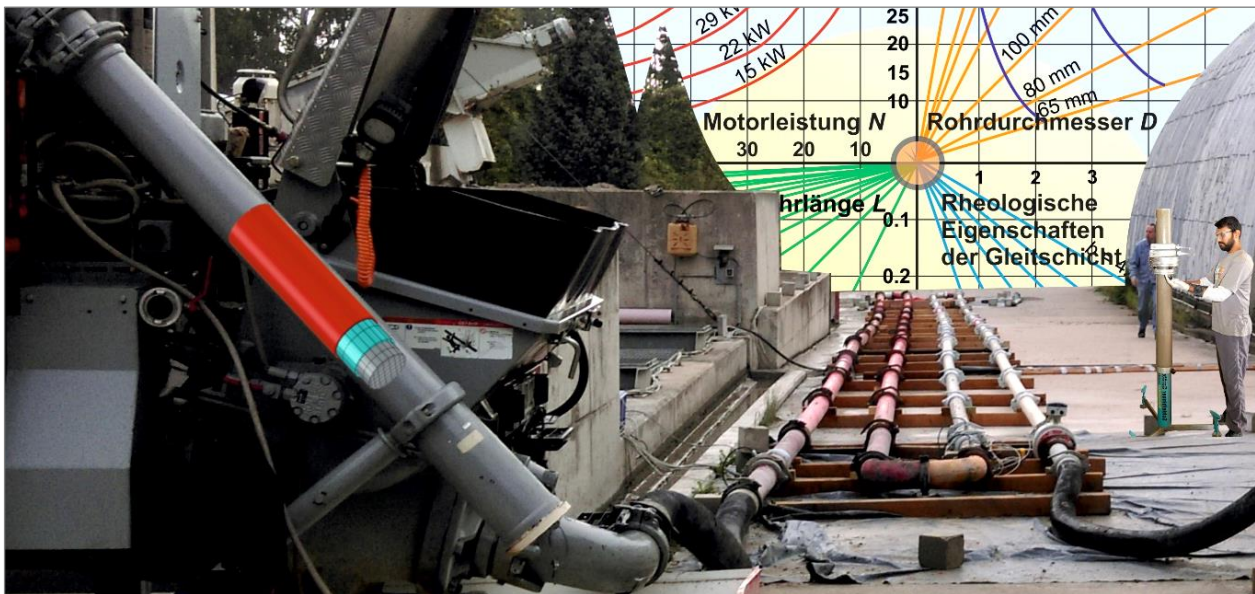
Institut für Baustoffe, Technische Universität Dresden

Projektbearbeiter

Dr.-Ing. Egor Secrieru

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine



Dresden, 31.05.2018

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Gefördert durch:



FÖRDERHINWEIS UND DANKSAGUNG

Das vorliegende IGF-Vorhaben Nr. 18361 N der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. – FTB Berlin wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Das Institut für Baustoffe der TU Dresden dankt den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Weiterhin danken wir unseren industriellen Partnern:

- Betonpumpenunion GmbH & Co. KG;
- BFU Betonförderunion GmbH & Co. KG;
- BPD Ottendorf-Heidenau GmbH & Co. KG;
- Heidelberger Betonpumpen, Bereich Betonpumpen Nord-Ost;
- Jumbo Betonpumpen Service GmbH & Co. KG;
- SCHWENK Beton Dresden GmbH & Co. KG;
- Schwing GmbH;
- Unternehmerverband Mineralische Baustoffe e.V.

für die fachliche Unterstützung sowie die Bereitstellung von Versuchsmaterial und Vorrichtungen zur Durchführung der Versuche und nicht zuletzt der Versuchsfläche für die großmaßstäblichen Pumpversuche.

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALTSVERZEICHNIS

FÖRDERHINWEIS UND DANKSAGUNG	III
1 WIRTSCHAFTLICHE RELEVANZ FÜR KLEINE UND MITTELSTÄNDIGE UNTERNEHMEN (KMU)	1
1.1 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG	1
1.2 QUANTIFIZIERBARE WIRTSCHAFTLICHE VORTEILE FÜR KMU	3
2 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER ANSATZ	5
2.1 STAND DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	5
2.2 ARBEITSHYPOTHESE	9
2.3 ZIELE UND LÖSUNGSWEG	9
3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	11
3.1 ALLGEMEINES	11
3.2 ENTWICKLUNG VON BETONZUSAMMENSETZUNGEN	12
3.3 RHEOLOGISCHE UND PHYSIKALISCHE FRISCHBETONCHARAKTERISIERUNG	17
3.4 GROßMAßSTÄBLICHE PUMPVERSUCHE	21
4 ERGEBNISSE	27
4.1 ALLGEMEINES	27
4.2 RHEOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG DER BETONMISCHUNGEN	27
4.3 VORHERSAGE ZUR BETONPUMPBARKEIT	30
4.3.1 UNTERSUCHUNGEN MIT VISKOSIMETER, TRIBOMETER UND SLIPER	30
4.3.2 OPTIMIERTES NOMOGRAMM	33
4.4 ERGEBNISSE AUS DEN GROßMAßSTÄBLICHEN PUMPVERSUCHEN	36
4.5 VERGLEICH ZWISCHEN DER VORHERSAGE UND DEN TATSÄCHLICHEN ERGEBNISSEN	37
4.6 EINFLUSS DES PUMPENS AUF DIE FRISCH- UND FESTBETONEIGENSCHAFTEN	39
4.7 ERKENNTNISSE UND EMPFEHLUNGEN ZUR PRAKTISCHEN GESTALTUNG DES PUMPVORGANGS	43
4.7.1 VORLAUFMISCHUNGEN	43
4.7.2 ROHRGEOMETRIE	45
4.7.3 STOPFER	52
4.7.4 WETTERBEDINGUNGEN	55
4.7.5 VERTIKALFÖRDERUNG	56
4.7.6 REINIGUNG	57
4.8 GEGENÜBERSTELLUNG VON ERGEBNISSEN UND ZIELSETZUNGEN	58
4.9 GENERIERTE DATENBASIS	62
5 KONZEPT ZUR SICHEREN BESCHREIBUNG UND VORHERSAGE DER BETONPUMPBARKEIT	63
6 ERKENNTNISGEWINN UND TECHNISCHER FORTSCHRITT	66
7 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN	67
8 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG	68

8.1	PERSONALKOSTEN	68
8.2	GERÄTEBESCHAFFUNG	68
9	UMSETZBARKEIT UND TRANSFER DER ERGEBNISSE	69
9.1	GRAD DER UMSETZUNG IN DIE BETRIEBLICHE PRAXIS	69
9.2	WIRKSAME MAßNAHMEN ZUM ERGEBNISTRANSFER	69
	LITERATURVERZEICHNIS	72
	ANHANG 1	75
	ANHANG 2	76
	ANHANG 3	79

1 WIRTSCHAFTLICHE RELEVANZ FÜR KLEINE UND MITTELSTÄNDIGE UNTERNEHMEN (KMU)

1.1 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG

Das Pumpen ist eine verbreitete und effektive Methode für das Fördern und das Einbringen von Frischbeton. Es ermöglicht die effiziente Förderung großer Frischbetonmengen über längere Distanzen, erhebliche Höhen und in kürzester Zeit. In Deutschland werden jährlich ca. 50 Mio. m³ Transportbeton hergestellt und eingebaut. Fast ein Drittel dieses Betonvolumens (über 14 Mio. m³) wird mit Betonpumpen gefördert [1]. Im europäischen Maßstab beträgt die Transportbetonproduktion ca. 560 Mio. m³. Nach Prognosen sowohl der deutschen als auch der europäischen Transportbetonindustrie wird sich der Trend zur zunehmenden Betonförderung durch Pumpen weiter fortsetzen. Dieses Verfahren wird auch in Regionen etabliert werden, in denen bisher andere Transport- und Einbaumethoden dominieren [2].

Der theoretische Wissenstand zum Fördern von Frischbeton in Pumpleitungen ist sehr beschränkt. Die Vorschriften zur Beurteilung der Pumpbarkeit stammen aus Zeiten, als nur wenige Betonarten verwendet wurden, deren Zusammensetzung und rheologischen Eigenschaften in einem schmalen Bereich variierten [3,4]. Sie beziehen sich auf den Ausbreit- oder den Setzversuch als die maßgebende empirische Methode zur Beschreibung der allgemeinen Verarbeitbarkeit von Frischbeton und übertragen die Kennwerte auch auf den Pumpprozess. Umfangreiche Erfahrungen beim Pumpen von verschiedensten Betonzusammensetzungen haben jedoch gezeigt, dass der Ausbreitversuch bzw. der Setzversuch für die Charakterisierung der Pumpbarkeit nicht ausreichen [5–7]. Bei Betonen, in denen neben Zement, Wasser und Gesteinskörnungen auch Zusatzmittel und Zusatzstoffe zur Anwendung kommen, können die Schergrenze und die plastische Viskosität (Zähigkeit) in einem sehr breiten Spektrum variieren [8–10]. Offensichtlich lässt sich die zeitliche Entwicklung dieser beiden BINGHAM-Parameter durch eine gezielte Variation der Betonzusammensetzung beeinflussen, was ggf. zur Optimierung der rheologischen Eigenschaften des Betons genutzt werden kann [11,12]. Außerdem bestimmen betontechnologische Parameter wie Mischintensität [13], Temperatur [14,15], Alter [16,17] etc. das rheologische Verhalten der Mischungen und somit deren Pumpbarkeit. Weitere maßgebliche Einflüsse auf die Pumpbarkeit resultieren aus der zum Pumpen verwendeten Maschinenteknik (Rohrdurchmesser, Krümmungen, Querschnittsreduzierungen, Förderlänge) [5,18–20].

Aufgrund erhöhter Anforderungen an die Pumpbarkeit moderner Betonzusammensetzungen steigen infolge wachsender Vielfalt der Betonqualitäten auch die Herausforderungen an das Pumpen. Hierzu kommen oft komplexe Rohrführungen, insbesondere beim Bauen im Bestand. Der Pumpprozess zeigt sich jedoch unter verschiedenen Aspekten empfindlich. Die häufigste Störung in einem Pumpvorgang ist die Verstopfung der Pumpleitung. Die direkten Schadenskosten infolge dieser Stopfer hochgerechnet auf alle Betonpumpen in Deutschland belaufen sich auf ca. 2.257.000 €¹ jährlich. Die meisten derartigen Probleme treten bei Einsätzen mit Schlauchverlängerungen auf. Diese Sonderbaustellen werden mit Hallenmastpumpen bis zur

¹ Quelle: Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., Zahlenbasis für 2013

Mastgröße M 31 bedient. Da der Anteil dieser Masttypen bundesweit nicht gesondert erfasst wird, kann der zugehörige Störungsanteil nicht explizit angegeben werden. Die relevante Kostenhöhe hängt in erster Linie davon ab, ob der gesamte Pumpvorgang letztlich abgebrochen werden muss (Stopfer 2 in **Anhang 1**) oder mit einer Zeitverzögerung fortgesetzt werden kann (Stopfer 3 in **Anhang 1**). Die höchste direkte Schadenssumme entsteht bei Schlauchplatzern (Stopfer 1 in **Anhang 1**) sowie bei dauerhafter Verstopfung des Pumpaggregates und zugehöriger Rohrleitungen (vgl. **Bild 1**).



Bild 1. Betonpumprohre mit erhärtetem Beton als Folge von Verstopfern [21].

Die indirekten Kosten für die durch Verstopfungen verursachten Folgeschäden können weit höher liegen und in einzelnen Fällen Millionen von Euro betragen. Genaue Angaben liegen dazu nicht vor. Beispiele für indirekte Schäden und Kosten sind:

- Aufplatzen von Schläuchen mit Verschmutzung von angrenzenden Objekten oder Bauteilen (Fassaden). Besonders kritisch beim Bauen im Bestand (benachbarte Fassaden, Fahrzeuge etc.); Kosten für Schadensbeseitigung bis zum Mietausfall.
- Abbruch der Betonage mit folgender Verzögerung oder Unterbrechung des Bauprozesses. Bei enger Taktung der Arbeiten Auswirkungen auf alle nachfolgenden Gewerke. Hohe Auswirkungen für Bauteile, die ein unterbrechungsfreies Betonieren erfordern (WU-Bauten, Sichtbeton) durch Ausbau/Abbruch und Wiedererrichtung bereits fertiggestellter Bauteilefragmente.
- Personenschäden infolge Unfälle.

Ca. 90 % dieser Störfälle werden durch Betonzusammensetzungen und ungeeignete Vorlaufmischungen verursacht. Die verbleibenden 10 % der Störungen resultieren aus Bedien- oder Prozessfehlern beim Pumpen. Betone mit hoher Störfallquote sind u. a. selbstverdichtende Betone, Leichtbetone und Stahlfaserbetone. Solche bislang als Sonderbetone eingestuftes Zusammensetzungen werden in der Bauwirtschaft zunehmend zur Normalität. Ein weiterer Praxistrend ist der Einsatz von Betonen mit geringen Wasser-Bindemittelwerten. Problematisch ist deren materialspezifische hohe Viskosität und Klebrigkeit.

Hinzu kommt, dass generell für den Pumpprozess schlechter pumpbarer Betone bis zur doppelten Menge Kraftstoff verbraucht wird als für an die Pumpaufgabe angepassten bzw. optimierten Betonen – mit Folgen für die Gesamtkosten, Umwelt und Nachhaltigkeit (Kraftstoffverbrauch, geringere Lebensdauer der Pumpen durch Verschleiß etc.).

Nachfolgend ist die Dringlichkeit und Motivation der Forschungsarbeiten innerhalb des Vorhabens zusammengefasst: Das Pumpen von Frischbeton ist einer der Kernprozesse im heutigen Baugeschehen und wird von Jahr zu Jahr eine immer wichtigere Rolle erlangen. Gleichzeitig ist ein extremer Anstieg mannigfaltiger Herausforderungen im Hinblick auf die Pumpbarkeit zu verzeichnen. Diese resultieren einerseits aus der zunehmenden Vielfalt moderner Betonqualitäten mit stark variierenden anwendungsbezogenen Betonzusammensetzungen. Andererseits ergeben sie sich aus den steigenden Anforderungen beim Pumpen über weite Distanzen und in große Höhen bei oftmals komplexen Rohrführungen, insbesondere beim Bauen im Bestand. Das zielsichere Charakterisieren der Pumpbarkeit und das Aufzeigen von Lösungsansätzen zu ihrer Verbesserung sind demzufolge von beträchtlicher wirtschaftlicher Bedeutung sowohl für Betonhersteller als auch Betonförderer.

1.2 QUANTIFIZIERBARE WIRTSCHAFTLICHE VORTEILE FÜR KMU

Im Jahr 2016 wurden deutschlandweit über 14 Mio. m³ Transportbeton mit Betonpumpen gefördert [1]. Diese Leistung wurde von ca. 1612 im Einsatz befindlichen Betonpumpen erbracht, die zumeist von kleinen und mittelständigen Unternehmen betrieben werden. Dies bedeutet eine durchschnittliche Förderleistung von 8640 m³ je Pumpe und Jahr bzw. von 43 m³ je Pumpe und Tag (bei 200 Einsatztagen pro Jahr). Das Pumpen von Beton wird für die wirtschaftliche und technologische Gestaltung des modernen Betonbaus insbesondere in naher Zukunft ein immer wesentlicherer Faktor werden, da es ein Kernstück für viele moderne Bautechnologien darstellt. Nicht zuletzt genannt sei an dieser Stelle der 3D-Druck mit Beton, mit dem ein neuartiges Anwendungsfeld mit einer weiteren Absatzmöglichkeit erschlossen wird.

Für die Transportbetonhersteller ermöglichen die gewonnenen Ergebnisse des IGF-Projektes die sichere Optimierung der Pumpbarkeit frischer Betone. Für die Betonförderunternehmen ergibt sich der Nutzen aus der erhöhten technologischen Sicherheit von Betonförderprozessen durch Rohrleitungen. Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen sind dafür künftig keine aufwendigen großmaßstäblichen Pumpversuche mehr notwendig – ein großer Erfolg für die Transportbetonindustrie.

Das Risiko des Eintretens von Verstopfern, Pumpenüberlastung oder ähnlichen Ausfällen kann durch die entwickelte Methodik deutlich vermindert werden; hohe Folgekosten werden enorm reduziert. Durch die gezielte Anpassung der Betoneigenschaften im Vorfeld der Pumpprozesse sowie deren einfache Überwachung und Charakterisierung wird zudem die Palette der durch Rohrleitungen zu fördernden Betonarten erweitert. Die höhere Sicherheit und Effizienz der Betonförderprozesse ermöglichen den Betoneinbau mit Pumpen auch in bisher als sehr kritisch angesehenen Szenarien (Tunnelbau, Bauen im Bestand, Herstellung von „weißen Wannen“). Die Gesamtkosten des Pumpens lassen sich infolge gestiegener Prozesssicherheit mit verbesserter Genauigkeit bereits im Vorfeld abschätzen. Zudem verringern sich durch reduzierten Kraftstoffverbrauch sowie längerer Lebensdauer der technischen Ausstattungen negative Umweltauswirkungen. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wird sich der Betoneinbau mit Betonpumpen universeller, technologisch sicherer und kostengünstiger gestalten. Weitere wirtschaftliche

Vorteile sind nachstehend aufgeführt:

- Exakte Berechnung der Pumpstreckengeometrie anhand rheologischer Frischbetoneigenschaften der konkreten Pumpaufgabe bzw. Ermittlung der benötigten Frischbetoneigenschaften für die gegebene Pumpstreckengeometrie;
- Treffsichere Auswahl der erforderlichen Betonpumpenleistung mit Hilfe eines optimierten Nomogramms;
- Vorab-Berechnung des erforderlichen Energieverbrauchs gemäß optimiertem Nomogramm;
- Einsparungspotential von Ressourcen an Baumaterial, Wasser, Energie und Maschinenteknik infolge zielsicherer Vorhersage von Pumpprozessen.

Zudem liefert das Vorhaben wissenschaftliche Grundlagen hinsichtlich Quantifizierung der Betonpumpbarkeit, die für die Aktualisierung von Normen und Regelwerken unabdingbar sind. Die Nutzung der Forschungsergebnisse des IGF-Projektes erfolgt in den verschiedenen Stationen des Einbaues von Pumpbeton angefangen von den Transportbetonherstellern bis hin zu den Betonförderunternehmen und Betonpumpenherstellern sowie im Endeffekt den Abnehmern des Betons.

2 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER ANSATZ

2.1 STAND DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Zur Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbeton existieren derzeit keine normativen Regelungen oder Richtlinien. Ebenso gibt es keine fundierten Konzepte für die Anpassung des Betonentwurfs an die Anforderungen aus der Pumpbarkeit. Die Pumppraxis lebt und profitiert heute immer noch von empirischen und teilweise subjektiven Erfahrungen der Betontechnologen, was oft zu brauchbaren, aber nur in seltenen Fällen zu optimalen Lösungen führt [7,22].

Als notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzungen für ein störungsfreies Betonpumpen gelten Konsistenzen ab Klasse F2 sowie eine hohe Stabilität und Homogenität der Mischung [19,23]. Dies gilt insbesondere für Betone mit besonderen Eigenschaften, wie sandarme Normalbetone (max. 30 % Sandanteil) [19], hochfeste Betone [24,25], Faserbetone [26] oder Leichtbetone [27,28].

Die Pumpbarkeit von Frischbeton ist keine direkt messbare, physikalische Größe sondern ein Sammelbegriff für verschiedene rheologische Eigenschaften des Betons, wie Viskosität, Fließgrenze und innere Reibung [29]. Zudem wird sie auch von technologischen Gegebenheiten wie z.B. Pumpregime [30], Rohrleitungsgeometrie [20] und Temperatur [31,32] beeinflusst.

Als empirische Messverfahren für die Konsistenz von Frischbeton stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. In Deutschland sind die Ermittlung von Ausbreitmaß [33], Verdichtungsmaß [34] und Setzfließmaß [35] üblich. Diese Methoden charakterisieren lediglich die allgemeine Verarbeitbarkeit von Frischbeton. Bis dato werden die erhaltenen Kennwerte auf den speziellen Betontransport und -einbau mittels Pumpen übertragen. Das ist weder ausreichend noch zeitgemäß. Sichere Vorhersagen zur Pumpbarkeit des Frischbetons können mit empirischen Methoden in Anbetracht der heutigen großen Vielfalt der Betonzusammensetzungen und -eigenschaften nicht formuliert werden [36,37].

Mit höherer Sicherheit lässt sich die Pumpbarkeit von Beton abschätzen, wenn die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons mit rheometrischen Verfahren charakterisiert werden [38–40]. Zur Ermittlung der Fließeigenschaften von Betonen werden heute immer häufiger moderne rheologische Verfahren eingesetzt, meist unter Verwendung von Rotationsviskosimetern oder Rheometern [41]. Das Grundprinzip eines Rotationsviskosimeters ist die Erzeugung einer Scherung innerhalb des zu untersuchenden Stoffes und das Messen der durch diesen Stoff übertragenen Scherspannung bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [42,43].

Beim Pumpen besteht grundsätzlich ein Zusammenhang zwischen Pumpendruck P und Fördermenge Q . Gemäß der von Kaplan [44,45] eingeführten modellhaften Beschreibung ergibt sich das Verhalten des gepumpten Betons aus den rheologischen Eigenschaften des Kernbetonvolumens im Rohr und den tribologischen Eigenschaften der Gleitschicht, die sich an der Grenzfläche zwischen Kernbeton und Rohrwandung ausbildet. Demzufolge kann der Verlauf einer P - Q -Kurve unter der Berücksichtigung der rheologischen und tribologischen Kennwerte des Betons sowie der Rohrgeometrie vorhergesagt werden.

Das Verhalten der Gleitschicht zwischen Förderrohr und Frischbeton kann mit Hilfe des Bin-

gham-Modells beschrieben werden [46–48], vgl. **Bild 2**. Zur Charakterisierung der Betonströmung im Rohr geht man vereinfachend davon aus, dass aufgrund der Fließgrenze des Betons lediglich die Gleitschicht gesichert wird und der Kernbeton keine Scherung erfährt. Mit zunehmender Fördergeschwindigkeit wird der Durchmesser des Kernbetons im Rohr immer kleiner. Der Gleitschichtring, in dem die Scherung stattfindet, breitet sich weiter zum Zentrum des Rohres aus [36,45].

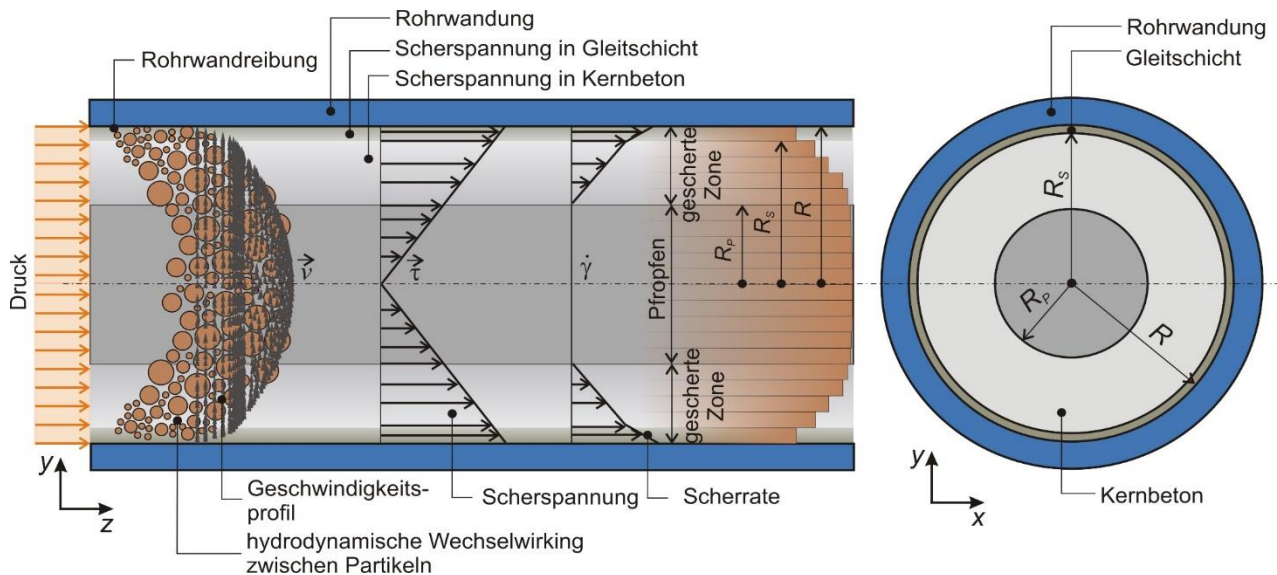


Bild 2. Betonströmung im Rohr [30]

Wird nur die Scherung der Gleitschicht mit ihren tribologischen Eigenschaften betrachtet, gilt zur Beschreibung der P - Q -Beziehung **Gleichung 1**:

$$P = \frac{2L}{R} \left[\tau_{0G} + \frac{Q \cdot \mu_G}{\pi \cdot R^2 \cdot k} \right] \quad (1)$$

Vereinfachend gilt, dass sich der Kernbeton als Pfropfen bewegt. Tritt dagegen im durch die Rohrleitung geförderten Frischbeton neben der Scherung der Gleitschicht auch eine Scherung des Kernbetons auf, dann gilt **Gleichung 2**:

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

Die Größen Fließgrenze τ_{0G} und Viskositätsparameter μ_G der Grenzschicht lassen sich mit dem Tribometer bestimmen. Die weiteren Kennwerte Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität μ des gesicherten Kernbetons können mit dem Viskosimeter ermittelt werden. Die Größe k entspricht dem Füllzustand des Rohrquerschnittes mit Beton, Größe R dem Innenradius und Größe L der Gesamtlänge der Rohrleitung. Die Gleitschichtdicke wird in den **Gleichungen 1** und **2** vernachlässigt, denn der tatsächliche Wert lässt sich in der Praxis kaum bestimmen. In der Literatur werden dafür je nach Betonzusammensetzung und Untersuchungsmethode Werte zwischen 1 und 9 mm angegeben [18,45,49,50]. Veröffentlichte experimentelle [18,38,45,49–54] und numerische [25,40,55] Untersuchungen verweisen darauf, dass gemäß dem am meisten zitierten

theoretischen Modell von Kaplan et al. [45] physikalische Gründe existieren, um die rheologische Kennwerte der Gleitschicht, d. h. τ_0 und μ , mit dem Viskosimeter zu bestimmen sowie die tatsächliche Gleitschichtdicke zu ermitteln. Daher werden in einem Nachfolgeschritt diese Größen als zusätzliche Parameter in den **Gleichungen 1** und **2** berücksichtigt werden (vgl. auch **Abschnitt 3.3**).

Nach den Annahmen des zugrunde gelegten Modells bestimmen vorrangig die Fließgrenze und die plastische Viskosität der Gleitschicht und des Kernbetons das Pumpverhalten von Beton [24], vgl. **Bild 3**.

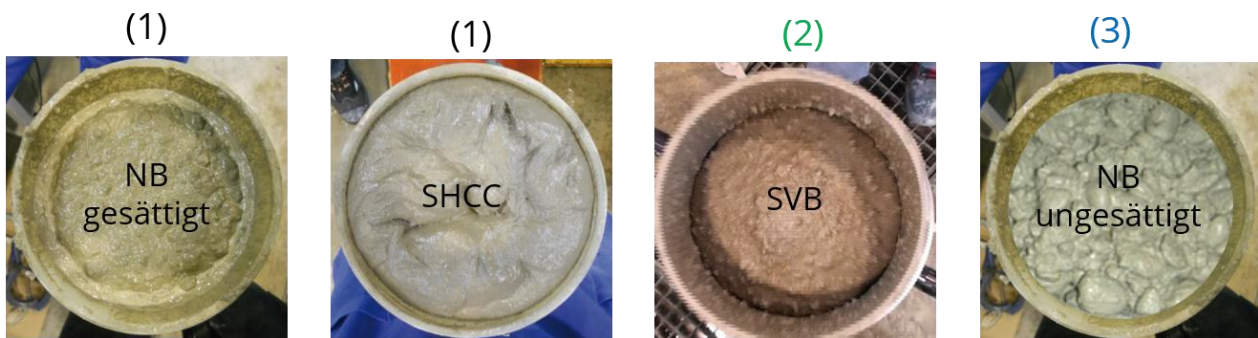
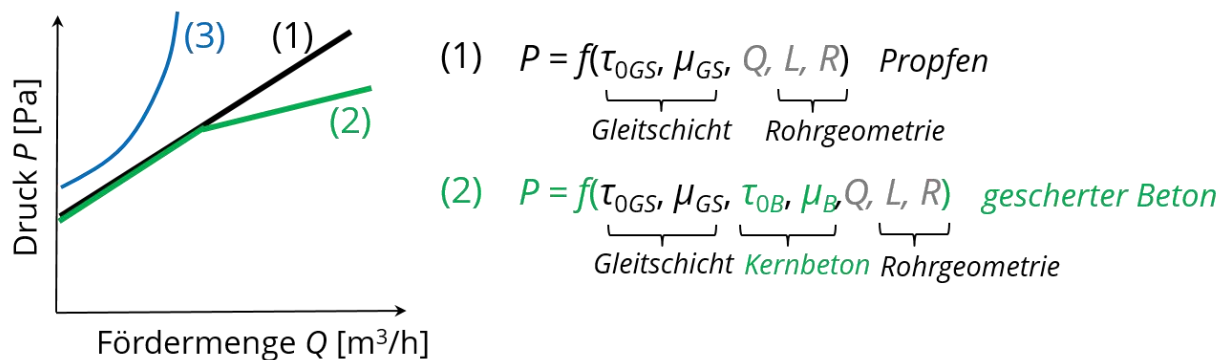


Bild 3. Analytische Modelle für die Strömungen in Rohrleitungen verschiedener Betonarten: Normalbeton (NB), hochduktiler Beton (strain-hardening cement-based composite (SHCC)) und selbstverdichtender Beton (SVB) [30,45].

Im Falle nicht mit Bindemittel- und Feinststoffleim gesättigter Betone wird die Betonpumpbarkeit abrupt reduziert, d. h. der erforderliche Pumpendruck steigt drastisch an, da die gröbere Gesteinskörnung nicht vollständig mit Schmierfilm umhüllt ist. Dadurch wird die innere Reibung zwischen den Gesteinskörnungen bzw. die Reibung zur Wandung deutlich erhöht, was zu einem Stopfer in der Rohrleitung führen kann.

Zu den Zusammenhängen zwischen der Gleitschichtausbildung und dem Segregationsverhalten des Frischbetons und sowie deren Einfluss auf Verstopfungen in Leitungen liegen keine abgesicherten Untersuchungen vor [56]. Ebenso wird in zahlreichen bisherigen Betrachtungen die Gleitschicht an der Grenzfläche zwischen Beton und Rohr nur in ungenügendem Maße berücksichtigt und den (mutmaßlich) realen Verhältnissen im Pumprohr nur unzulänglich Rechnung getragen [57].

Als eine robuste, baustellentaugliche rheologische Messtechnik zur Beschreibung der Pumpbarkeit von Betonen bietet sich das Gleitrohr-Rheometer (Sliding Pipe Rheometer, Sliper)

[58] an. Dieses Prüfverfahren ermöglicht erstmals eine einfache, weitgehend zutreffende Nachstellung der Materialbewegung im Förderrohr bei gleichzeitiger Erfassung der Belastungs- und Bewegungsparameter zwischen Rohr und Beton [37,58–60]. Durch eine Skalierung der experimentellen Ergebnisse lassen sich Aussagen zur maximalen Förderlänge bzw. Förderhöhe des Betons in Abhängigkeit vom Pumpendruck treffen.

In **Bild 4a** sind beispielhaft Messergebnisse aus den Untersuchungen mit dem Gleitrohr-Rheometer für einen hochfesten Beton sowie zwei normalfeste Betone aufbereitet. Die Betone wiesen das gleiche Ausbreitmaß auf. Im Gleitrohr-Rheometer jedoch führt die höhere Viskosität des hochfesten Betons zu einem deutlich höheren (Pumpen)druck als beim Normalbeton. Zudem steigt beim hochfesten Beton der Druck mit zunehmender Fördergeschwindigkeit viel stärker an als beim Normalbeton.

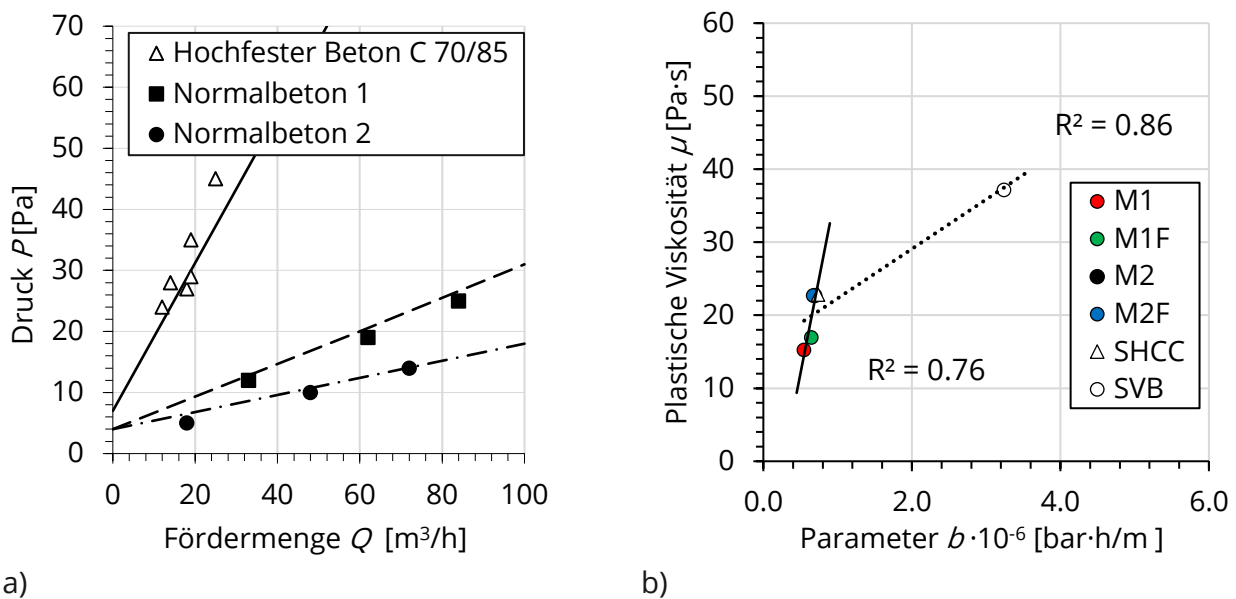


Bild 4. a) Vergleich der prognostizierten Daten mittels Sliper-Messungen und der realen Messwerte aus Pumpversuchen für drei verschiedene Betone [58]; b) Vergleich von Kennwerten aus den Versuchen mit dem Sliper und dem Rotationsviskosimeter [27].

Der Zusammenhang zwischen den Kennwerten aus dem Gleitrohr-Rheometer und den Messwerten eines „klassischen“ Rotationsviskosimeters ist in **Bild 4b** dargestellt. Die Gegenüberstellung der Viskositätsparameter μ (Viskosimeter) und b (Sliper) weist für die meisten betrachteten Betone eine recht gute Korrelation auf. Daher kann prinzipiell eine erweiterte, über die Möglichkeiten des Gleitrohr-Rheometers hinausgehende Betoncharakterisierung auch mit Rotationsviskosimetern erfolgen [37,59]. Jedoch lässt sich bei rheologischen Untersuchungen mit einem Viskosimeter – wegen der profilierten Messgeometrie – ein wesentliches Phänomen beim Betonpumpen nicht berücksichtigen: Das Ausbilden einer Gleitschicht an der Rohrwandung [40,45,57]. Diese Schicht entsteht durch Segregation von Wasser und Feinststoffen aus dem Frischbeton an den Rohrwandungen und führt einer Reduzierung des Reibungswiderstandes zwischen Beton und Förderrohr [18,40,45]. Im Gegenzug bildet sich im Inneren des Rohres ein

an Bindemittelleim und Feinstoffen verarmter Betonpfropfen aus [21]. Eine beschränkte Segregation im Frischbeton ist demnach hilfreich für das Betonpumpen. Andererseits kann eine zu starke Segregationsneigung auch zur Absonderung des Grobkorns und damit zur Verstopfung des Pumprohrsystems führen [7,51].

Weiterführende grundlegende experimentelle und theoretische Erkenntnisse sind in aller Ausführlichkeit in der Dissertationsschrift „Pumping behaviour of modern concretes – Characterisation and prediction“ zu finden [30].

2.2 ARBEITSHYPOTHESE

Für eine zielsichere Gestaltung von Betonpumpprozessen sind vertiefte Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen Betonzusammensetzung, maschinentechnischen und betontechnologischen Parametern sowie Umweltbedingungen einerseits und der Rheologie der Betone andererseits unumgänglich. Zur zutreffenden experimentellen Beschreibung der Betonförderprozesse in Rohrleitungen sind systemadäquate, exakte rheologische Messverfahren unentbehrlich. Diese wurden zum Teil bereits entwickelt und bilden eine Basis für die Forschungsarbeiten im Vorhaben. Auf Grundlage dessen und mit Hilfe von Versuchen bzw. Messungen lassen sich analytische Modelle für den Betonfluss parametrisieren. Auf diese Weise wird die Entwicklung eines praxistauglichen, wissenschaftlich begründeten Konzeptes zur sicheren Charakterisierung von Betonförderprozessen in Pumpleitungen als möglich avanciert.

Das zu entwickelnde Konzept soll eine solide Grundlage zur Gestaltung und Optimierung von Betonförderprozessen in Rohrleitungen bilden und damit die bisher dominierende, weitgehend auf Expertenwissen und Erfahrungen beruhende, empirische Vorgehensweise ablösen. Inhalt des Konzeptes sollen keine physikalisch eindeutig begründeten und mathematisch exakten formelmäßigen Beziehungen sein, die für eine direkte praktische Anwendung auf der Baustelle zu kompliziert und theoretisch sind. Vielmehr liegt das Augenmerk darauf, die ermittelten Ergebnisse und erhaltenen Tendenzen in Form von verbesserten Nomogrammen, Tabellen, Empfehlungen etc. so aufzubereiten, dass sie dem Praktiker auf der Baustelle direkt an die Hand gegeben und sofort angewendet werden können.

2.3 ZIELE UND LÖSUNGSWEG

Das Hauptziel des IGF-Forschungsvorhabens bestand in der wissenschaftlich begründeten Entwicklung und Bereitstellung einer robusten, praxistauglichen Methode zur Charakterisierung von Betonförderprozessen in realen Pumpleitungen sowie in der Schaffung von wissenschaftlichen Grundlagen zur Optimierung der stofflichen Zusammensetzung unterschiedlicher Betonarten hinsichtlich deren Pumpbarkeit. **Bild 5** zeigt eine Übersicht der für die Forschungsarbeiten gewählten Vorgehensweise. Inhalt und Ablauf der praktischen Arbeiten wurde in mehreren Projektberatungen und darüber hinaus in Gesprächen und auf dem Schriftweg mit der FTB und den involvierten Industriepartnern kontinuierlich besprochen und abgestimmt.

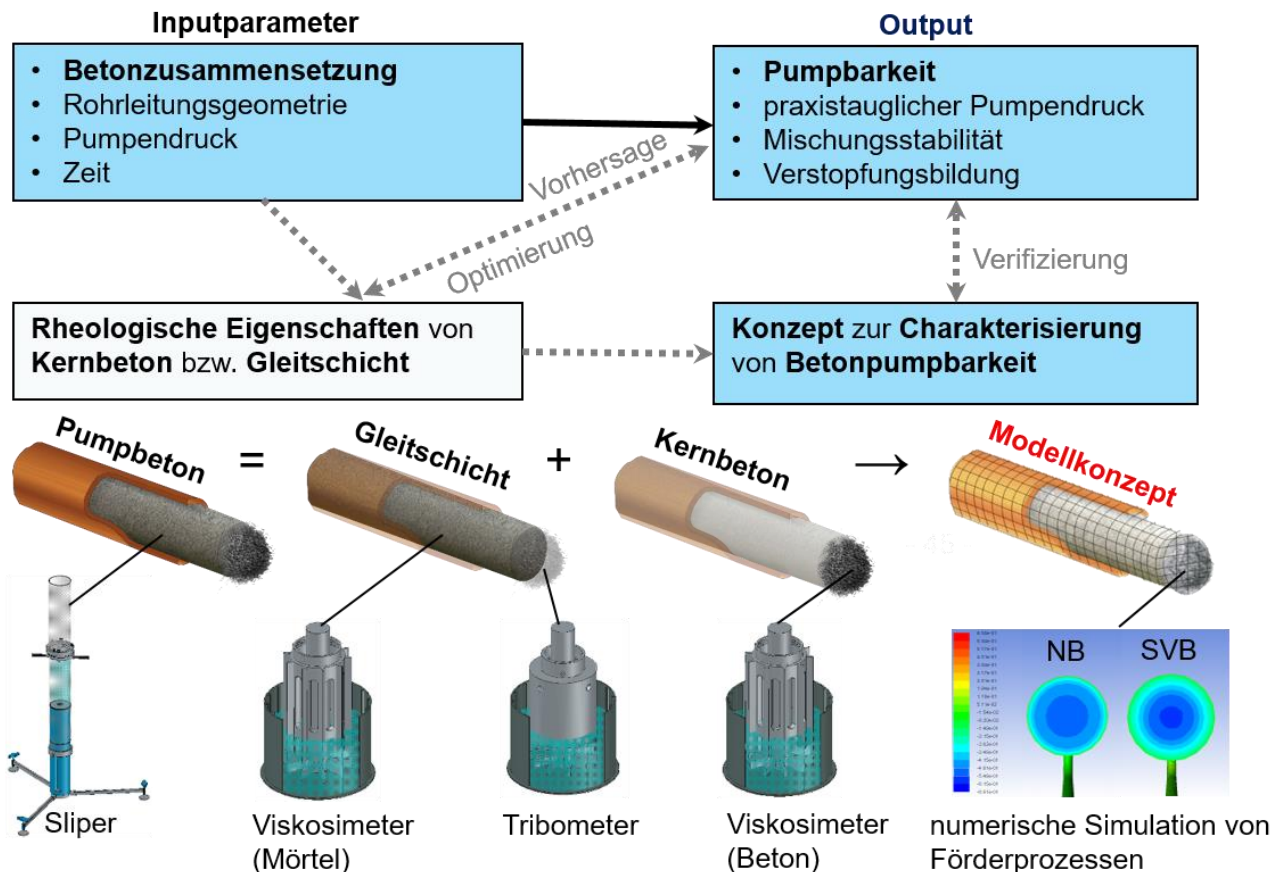


Bild 5. Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Problemstellung.

Teilziele der Projektbearbeitung waren:

- Untersuchung des rheologischen Verhaltens einer großen Bandbreite von Frischbetonen inkl. der den Kernbeton im Pumprohr umhüllenden Gleitschicht in Abhängigkeit von Betonzusammensetzung, Pumpendruck und Betonalter (Laborversuche);
- Umfassende Prüfung des Pumpverhaltens von herkömmlichen und modernen Betonen (einschließlich selbstverdichtendem Beton und Stahlfaserbeton) in großmaßstäblichen Versuchen in einer realen Pumpstrecke (Großversuche);
- Etablierung einer praxistauglichen Methode zur rheologischen Charakterisierung der Pumpbarkeit;
- Wissenschaftliche Analyse der die Pumpbarkeit bestimmenden Mechanismen sowie Extraktion wesentlicher Einflussparameter;
- Formulierung und Verifizierung eines Konzeptes zur Vorhersage der Betonpumpbarkeit für reibungsloses Frischbetonpumpen.

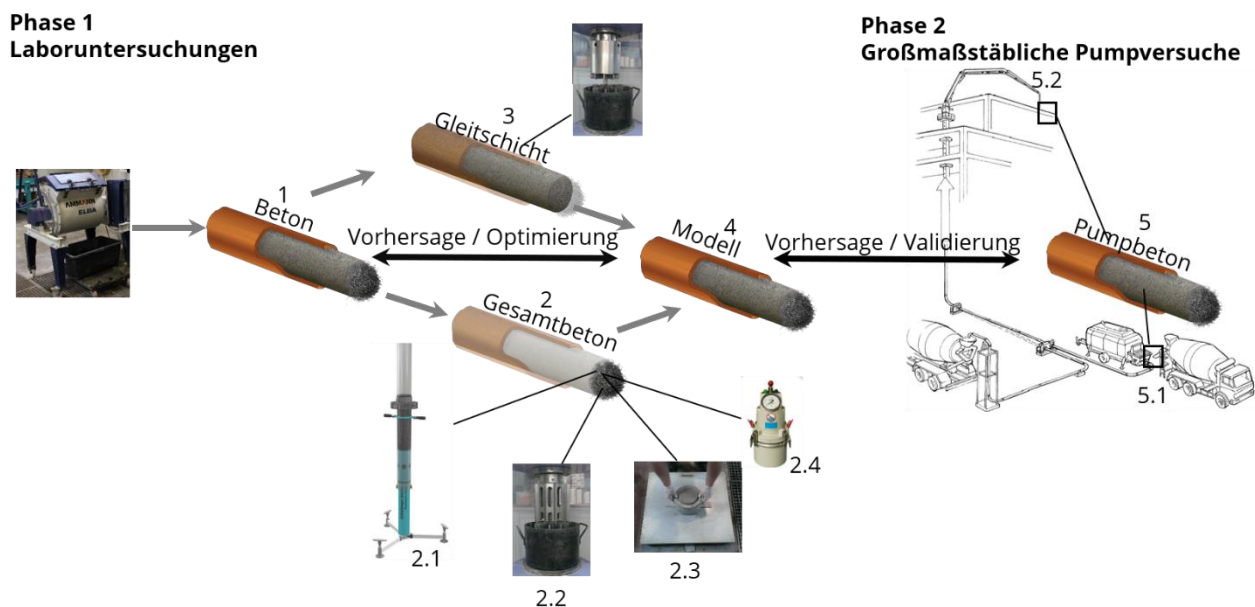
Darüber hinaus wurde vom Projektbearbeiter im Rahmen seiner Promotion begleitende numerische Simulation des Fließvorganges in der Rohrleitung mittels Strömungsmechanik durchgeführt [29].

Bedingung für eine erfolgreiche Bearbeitung war die strenge Fokussierung auf die anzuwendende Methodologie sowie die sichere Beherrschung der im Vorhaben einzusetzenden einzelnen Prüfmethode, vgl. dazu **Kapitel 3**.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

3.1 ALLGEMEINES

Bild 6 gibt eine Übersicht der durchgeführten Arbeiten im Vorhaben sowie deren Interaktionen. Die Arbeiten sind in zwei Phasen gegliedert. In Phase 1 wurden die zu untersuchenden Betone mit den nachfolgend angegebenen Methoden im Labor charakterisiert sowie die Modellvorstellungen zur Vorhersage der Pumpbarkeit von Betonen formuliert. In Phase 2 fanden großmaßstäbliche Pumpversuche unter Praxisbedingungen zur Verifikation und ggf. Validierung des formulierten Konzeptes statt. Neben der Erfassung der globalen Pumpendruck-Fördermenge-Beziehungen und lokal anliegenden Drücken in der Pumpleitung wurden die untersuchten Betone vor dem Pumpen und nach dem Pumpen entnommen und rheologisch in genau festgelegten Zeitintervallen charakterisiert.



- | | |
|---|---|
| 1 Beton aus Labormischer | 3. Betrachtung Gleitschicht |
| 2 Betrachtung Gesamtbeton | Messungen mit Tribometer |
| 2.1 Messungen mit Gleitrohr-Rheometer | 4. Formulierung eines Modells |
| 2.2 Messungen mit Viskosimeter | 5. Beton aus Großversuch (M5) |
| 2.3 Messung Ausbreit-/Setzfließmaß | 5.1 Beton, gewonnen aus dem Fahrmischer |
| 2.4 Messung Luftporengehalt und Rohdichte | 5.2 Beton, gewonnen aus dem Endrohr |
- Bild 6.** Schematische Darstellung der Untersuchungen am Frischbeton.

Die exakte rheologische Beschreibung der Frischbetoneigenschaften und der dazu gehörenden, die Gleitschicht repräsentierenden Feinmörtel erfolgte mit dem ConTec Viskosimeter 5 und mit dem Tribometer [21,26,60]. Mit dem Gleitrohr-Rheometer wurden Messergebnisse zum effektiven Pumpendruck und der resultierenden Fördermenge ermittelt und diese anschließend auf die reale Pumpstreckengeometrie skaliert; die Praxistauglichkeit auf der Baustelle war zu überprüfen.

3.2 ENTWICKLUNG VON BETONZUSAMMENSETZUNGEN

In der Phase 1 „Laboruntersuchungen“ fanden Untersuchungen zur Festlegung und ggf. Optimierung von Betonzusammensetzungen für die Phase 2 „Großmaßstäblichen Pumpversuche“ an insgesamt 14 Betonen (M1-M13) statt. Deren stoffliche Merkmale und Konsistenzklassen wurden gemeinsam mit den Industriepartnern festgelegt. Als Hauptparameter für den Entwurf der Normalbetone dienten die Konsistenzklasse, der Leimgehalt, der Einsatz sowohl verschiedener Zusatzstoffe (Flugasche, Kalksteinmehl und Stahlfaser) als auch Zusatzmittel (Fließmittel und Luftporenbildner). Die Zusammensetzungen wurden gemäß statistischer Versuchsplanung konzipiert. **Bild 7** stellt diese Untersuchungsparameter graphisch dar. Die konkreten Mischungszusammensetzungen sind der **Tabelle 1** zu entnehmen.

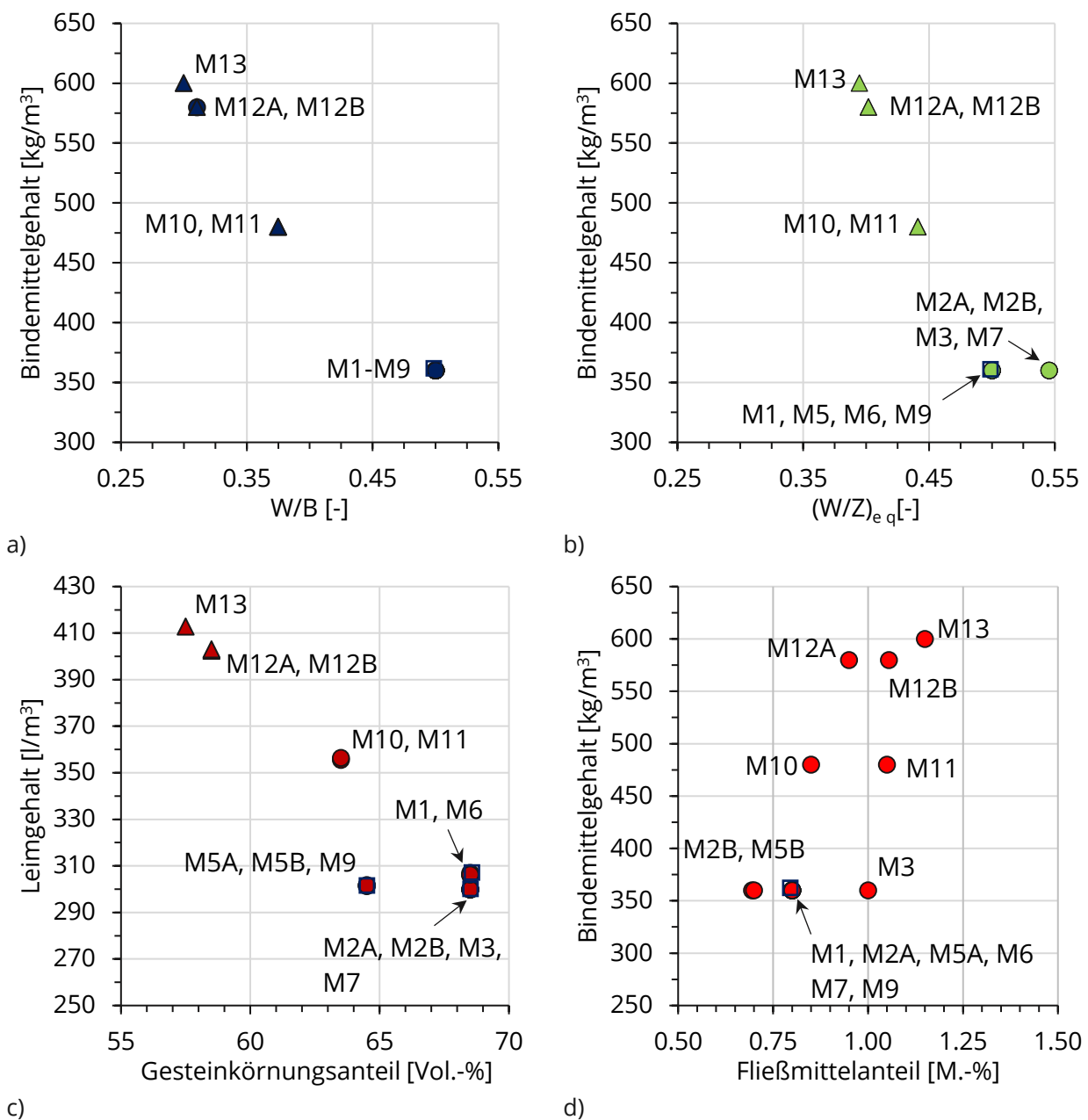


Bild 7. Untersuchungsparameter für die Betonmischungen a) Wasser-Bindemittelwert W/B, b) Wasser-Zementwert äquivalent (W/Z)_{eq}, c) Leimgehalt und d) Fließmittelgehalt.

Nachstehende Materialien wurden für die Betone verwendet:

- Zement CEM III/A 42,5 N, Schwenk, Bernburg;
- Flugasche Opole, Polen;
- Kalksteinmehl, Schwenk, Bernburg;
- Quarzsand 0/2, Zeithain;
- Quarzsand/Quarzkies 2/8, Borsberg;
- Splitt 8/16, Oberottendorf;
- Stahlfaser 50/1,0 N, KrampeHarex, Hamm;
- Luftporenbildner Master Air 77, BASF, Trostberg;
- Fließmittel Master Glenium Sky 688, BASF, Trostberg;
- Fließmittel MasterEase 3000, BASF, Trostberg.

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Zementes, der Flugasche und des Kalksteinmehls sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Tabelle 2. Physikalische und chemische Charakterisierung des Zementes und der Flugasche

Ausgangsstoff	Dichte [kg/m ³]	Blaine- Feinheit [cm ² /g]	Chemische Zusammensetzung [%]									
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	CO ₂
Zement	3075	4780	22,5	6,7	2,4	53,2	4,79	3,08	0,82	0,24	0,08	-
Flugasche	2200	3000	47,5	26,0	11,5	1,0	-	-	-	-	-	-
Kalksteinmehl	2730	5030	4,8	2,09	1,12	40,7	2,50	0,18	0,66	0,07	0,04	39,9

Die entwickelten Referenzmischungen für Normalbetone (K und S) besitzen folgende Merkmale: Zementgehalt 360 kg/m³, W/Z-Wert 0,5 sowie natürlich gerundete (Kies) oder gebrochene (Splitt) normalschwere Gesteinskörnungen mit Größtkorn von 16 mm. Die Sieblinien für die Gesteinskörnung wurden gemäß folgender Größenabstufung angepasst: 0/2 mm: 43 M.- %, 2/8 mm: 28 M.- % und 8/16 mm: 29 M.- %, vgl. **Bild 8**.

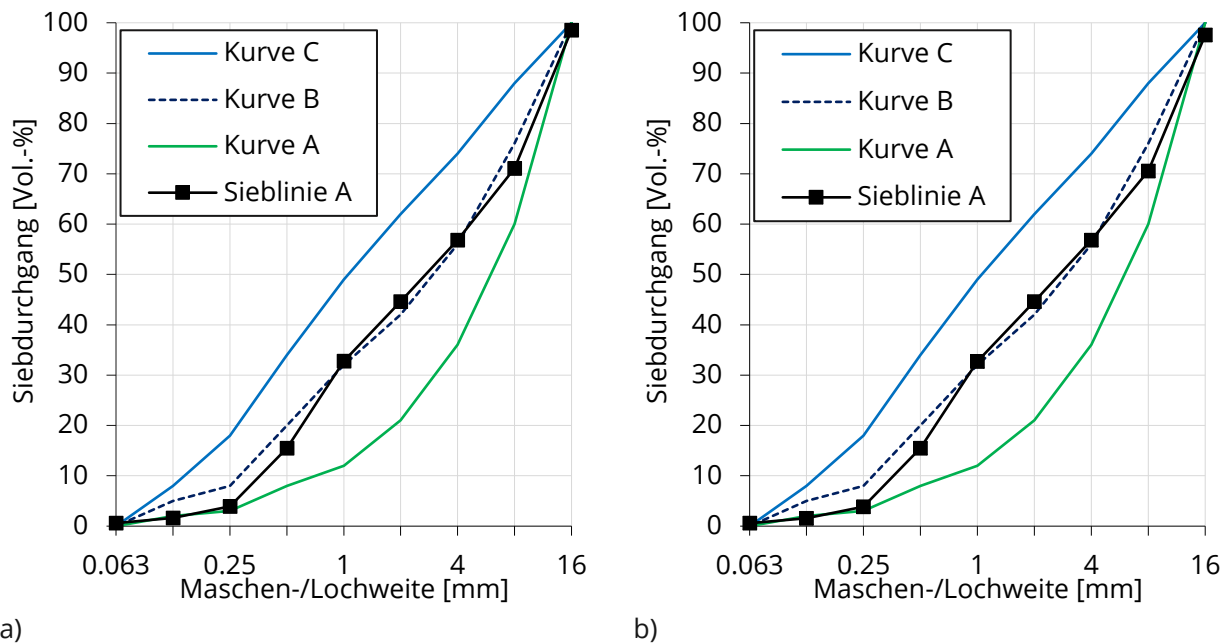


Bild 8. Sieblinien für die Mischungen mit a) Kies und b) Splitt.

Für die Bezeichnung der in dieser Arbeit untersuchten Betonzusammensetzungen wird ein selbsterklärendes Kürzel unter Berücksichtigung der variierten Parameter eingeführt:

- **K** – Normalbeton, Referenzmischung mit Kies als Zuschlagstoff;
- **S** – Normalbeton, Referenzmischung mit Splitt als Zuschlagstoff;
- **K+FA** – Normalbeton Kies als Zuschlagstoff und Flugasche;
- **K+FA-FM** – Normalbeton mit Kies als Zuschlagstoff, Flugasche und mit einer reduzierten Fließmittelmenge im Vergleich mit der Referenzmischung;
- **S+LP** – Normalbeton mit Splitt als Zuschlagstoff und Luftporenbildern;
- **HF, SVB** und **SFB** – Hochfester Beton, selbstverdichtender Beton und Stahlfaserbeton.

In **Bild 9** sind die Ergebnisse hinsichtlich Ausbreit- bzw. Setzfließmaße bereits optimierte Mischungen, ausgeführt unter Laborbedingungen, veranschaulichend dargestellt.



a) K



b) K+FA



c) K+FA+FM



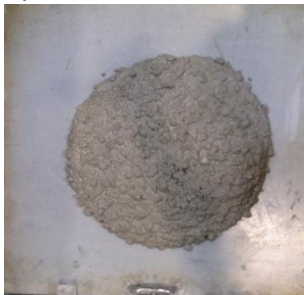
d) K+KM¹⁴



e) K+LP



f) S



g) S+FA



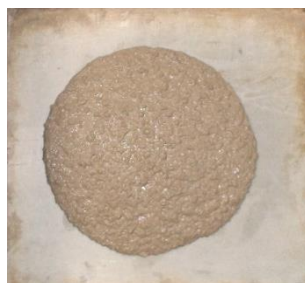
h) S+KM¹⁴



i) S+LP



j) HF



k) HF+FM



l) SVB



m) SVB2



n) SFB

Bild 9. Ergebnisse der Ausbreitmaß- und Setzfließmaßuntersuchungen für die optimierten Mischungen im Rahmen der Vorversuche im Labor¹⁵.

¹⁴ Mischungen K+KM (M4) und S+KM (M8) wurden nur im Labor untersucht und wegen der niedrigen Verarbeitbarkeit (Konsistenzklasse F3 bzw. F2) aus weiteren Versuchen ausgeschlossen.

¹⁵ Die Mischungen K+FA-FM und K+LP-FM haben sich während der großtechnischen Pumpversuche ergeben und wurden nachträglich zum Versuchsprogramm hinzugefügt.

Vor den Pumpversuchen wurde die Referenzmischung M1/S im Betonwerk eingehend auf ihre Brauchbarkeit getestet. Sie erfüllte die Konsistenzeigenschaften ($\geq F4$) und Stabilitätskriterien (kein Wasserabsondern) und erwies sich insbesondere hinsichtlich der geplanten Praxisversuche als geeignet, vgl. **Bild 10**.



Bild 10. Vorversuche am Betonwerk für die Anpassung der Konsistenz von Referenzmischung K (M1).

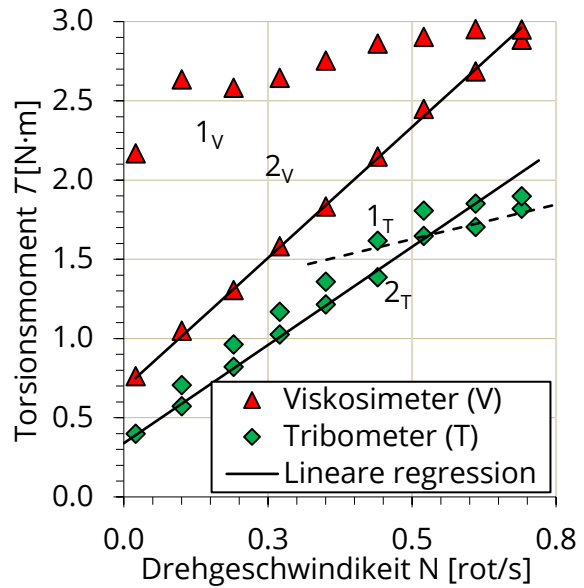
Als Sonderbetone kamen zwei selbstverdichtende Betone, zwei hochfeste Betone und ein Stahlfaserbeton zum Einsatz, vgl. Mischungen HF, HF+FM, SVB, SVB2 und SFB (M10A-M13). Die SVB-Mischung erfüllte nach einer gezielten Anpassung der Fließmitteldosierung die Konsistenzeigenschaften ($\geq F6$) und Stabilitätskriterien (kein Wasserabsondern) und war für die Praxisversuche tauglich.

Ein wesentliches Ergebnis der Laboruntersuchungen war die Auswahl und Qualifizierung der Betone für die großmaßstäblichen Pumpversuche.

3.3 RHEOLOGISCHE UND PHYSIKALISCHE FRISCHBETONCHARAKTERISIERUNG

Die rheologische Charakterisierung der frischen Betone erfolgte mit empirischen und wissenschaftlich fundierten, exakten Verfahren. Als empirisches Kernverfahren wurde das Ausbreitmaß [61] genutzt. Weiterhin wurde das Setzfließmaß ohne Blockierring [62] eingesetzt.

Die exakte rheologische Charakterisierung der Frischbetone und der dazugehörigen, die Gleitschicht repräsentierenden Feinmörtel erfolgte mit dem ConTec Viskosimeter 5, das nach dem Prinzip der coaxialen Zylinder funktioniert, **Bild 11a**.



a)

b)

c)

Bild 11. Rheologische Geräte für die Messungen am Frischbeton: a) Viskosimeter; b) Tribometer; c) Beispiel für die Auswertung der Messdaten.

Dessen Messgeometrie besteht aus einem inneren und einem äußeren Zylinder mit Radien von entsprechend 100 bzw. 145 mm. Bei der Messung wird die feststehende Krone (Stator) in den Topf abgesenkt und dieser in Rotation versetzt. Sowohl der rotierende als auch der feststehende Teil der Messgeometrie weisen spezielle Profilierungen auf, die ein Gleiten des Betons an den Kontaktflächen verhindert. Zur Erfassung der Reibung an der Grenzfläche Stahl(rohr)-Beton wird das Viskosimeter mit einer modifizierten Messgeometrie ausgestattet und als Tribometer genutzt, vgl. **Bild 11b**. Als Stator dient hier ein Zylinder ohne Oberflächenprofilierung. Mit Hilfe von messgeometrieabhängigen Kalibrierfaktoren werden die Umdrehungsgeschwindigkeit des Topfes N bzw. des Stators und das Torsionsmoment T am Stator als Wertepaar von Scherrate und Schubspannung aufgezeichnet, vgl. **Bild 11c**. Mit dem ConTec-5-Viskosimeter können Betone bis zu einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 16 mm untersucht werden [46]. **Tabelle 3** zeigt den zeitlichen Ablauf einer rheologischen Messung mit dem Viskosimeter bzw. Tribometer.

Tabelle 3. Messprofil für Viskosimeter (V) und Tribometer (T)

Segment	Zeit [s]	Beschreibung des Ablaufes
0	5	Absenken der Krone in die Messposition
1 _V , 1 _T	40	Rotationsversuch, $\Omega = 0,025 \rightarrow 0,750$ U/s, 10 Schritte
2 _V , 2 _T	40	Rotationsversuch, $\Omega = 0,750 \rightarrow 0,025$ U/s, 10 Schritte

Der darauffolgende Rotationsversuch, d.h. Segmente 1_V/1_T und 2_V/2_T (vgl. **Bild 11c**) dient zur Bestimmung der rheologischen Parameter μ und τ_0 des gescherten Betons mit Regressionsanalyse der Abwärtskurve und der Anwendung der REINER-RIVLIN-Gleichung für die Messungen mit dem Viskosimeter, **Gleichung 3**:

$$2\pi \cdot N = \frac{T}{4\pi \cdot \mu \cdot h} \cdot \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{r_o^2}{r_i^2} \right) \quad (3)$$

und dem Cauchy'sche Fundamentaltheorem für die Tribometer-Messungen [44,46], **Gleichungen 4 und 5**

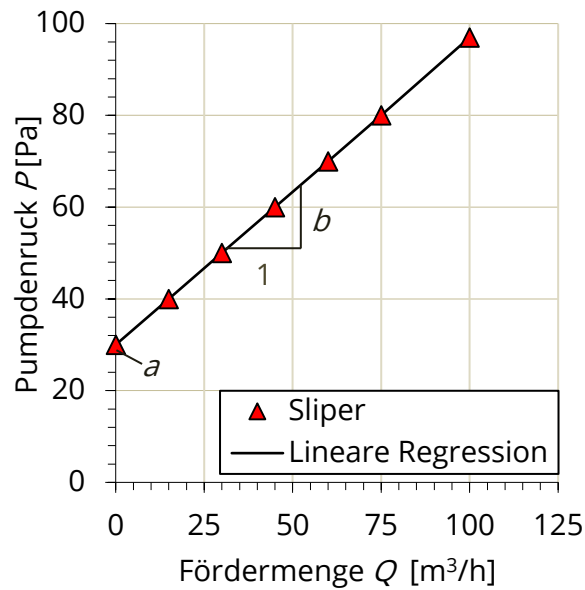
$$\tau_{0G} = \frac{G}{2\pi \cdot r_i^2 \cdot h} \quad (4)$$

$$\mu_G = \frac{H}{(2\pi)^2 \cdot r_i^3 \cdot h} \quad (5)$$

Hierbei entsprechen N [rot/s] der Rotationsgeschwindigkeit des Außenzylinders, T dem wirkenden Torsionsmoment, r_o [m] und r_i [m] den Radien des äußeren und des inneren Zylinders, h [m] der Eintauchhöhe im Frischbeton. Die Größen τ_0 [Pa] und μ [Pa·s] bezeichnen die Fließgrenze und die plastische Viskosität des gescherten Kernbetons; die Größen τ_{0G} [Pa] und μ_G [Pa·s/m] bedeuten die Fließgrenze und der Viskositätsparameter der Grenzschicht, vgl. mit **Gleichungen 1 und 2**.

Eine weitere essentielle rheologische Experimentieranordnung ist das Gleitrohr-Rheometer nach Kasten [25], vgl. **Bild 12a**. Dieses auch als Sliper bezeichnete Gerät besteht aus einem zylindrischen, auf dem Boden stehenden Stator und einem beweglichen, sich über den Stator schiebenden Gleitrohr. Während der Messung ist das Gleitrohr mit Beton gefüllt und wird, angetrieben durch Ballastringe, über den Frischbetonzylinder und den Stator hinab bewegt. Die Relativverschiebung zwischen Gleitrohr und Stator sowie der Druck im Frischbeton werden erfasst. Der gemessene Druck entspricht dem wirkenden Druck des Frischbetons einen halben Meter vor dem Förderrohrende, die Relativgeschwindigkeit zwischen Gleitrohr und Stator hingegen der auftretenden Fördergeschwindigkeit des Betons. Zur Aufnahme der Kennlinie eines Betons wird ein Messzyklus mit verschiedenen Förderdrücken durchfahren. Diese werden durch eine stufenweise zunehmende Ballastierung des Gleitrohres durch veränderliche Gewichte eingestellt [58].

Die Messwerte von Förderdruck und Fördergeschwindigkeit werden kontinuierlich aufgezeichnet, drahtlos auf einen mobilen Rechner übertragen, dort grafisch dargestellt und abgespeichert, vgl. **Bild 12b**.



a)

b)

Bild 12. a) Gleitrohr-Rheometer (Sliper) mit Gewichten b) eine mittels Sliper ermittelte Pumpendruck-Fördermenge-Beziehung.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Methode ist, dass kein reines Gleiten an der Wand sondern eine Scherung der Gleitschicht im Sliper stattfindet [58,59]. Unter dieser Annahme besitzt **Gleichung 1** Gültigkeit und nimmt unter Einbeziehung von gemessenen P - Q -Messwerten die folgende Form in **Gleichung 6** an:

$$P = \frac{4l}{d} \cdot \tau_{0g} + \frac{16 \cdot l}{\pi \cdot d^3} \cdot \frac{\mu_g}{e} \cdot Q = A + B \cdot Q \quad (6)$$

mit $l = 0,5$ m Rohrlänge und $d = 0,126$ m Rohrdurchmesser des Sliper's. Da die Gleitschichtdicke e nicht unmittelbar experimentell bestimmt werden kann, wird **Gleichung 6** durch die Parametrisierung der Größen A und B vereinfacht, **Gleichung 7**:

$$a = \frac{d \cdot A}{4l}, \quad b = \frac{B \cdot \pi \cdot d^3}{16 \cdot l} \quad (7)$$

so dass sich aus **Gleichung 6** die nachstehende **Gleichung 8** ergibt:

$$P = \frac{4l}{d} \cdot a + \frac{16 \cdot l \cdot Q}{\pi \cdot d^3} \cdot b = A + B \cdot Q \quad (8)$$

wobei $a \cdot 10^{-3}$ [bar] der Parameter für die Fließgrenze und $b \cdot 10^{-6}$ [bar·h/m] der Parameter für die plastische Viskosität sind.

Es ist bekannt, dass die plastische Viskosität eine signifikante Wirkung auf das Pumpverhalten von Beton aufweist [6,63,64]. Eine höhere Viskosität ist mit einem größeren Pumpendruck für eine gleiche Fördermenge verbunden. Sie beeinflusst das Geschwindigkeitsprofil in der Rohrleitung und reduziert damit die Fördermenge. Besonders deutlich ist dieser Einfluss – aufgrund seiner spezifischen Zusammensetzung – auf die Pumpbarkeit von SVB: Die hohe Viskosität äußert sich in der starken Neigung (Größen B bzw. b) der P - Q -Kurve.

Die tatsächlichen Größen A und B der Rohrleitung können mit den durch die Sliper-Messung ermittelten Werte a und b unter Verwendung von **Gleichung 6** berechnet werden, wobei anstatt der Geometrie des Gleitrohrs (Länge l , Durchmesser d) die Länge L und der Durchmesser D der

Rohrleitung einzusetzen sind. Äußerst vorteilhaft und von starkem praktischem Nutzen ist, dass mit dem Sliper-Gerät eine große Bandbreite an Betonzusammensetzungen charakterisiert werden kann. Grenzen werden nur durch zu hohen Förderdruck (vollständige Ballastierung führt zu keiner Relativverschiebung zwischen Gleitrohr und Stator) bzw. bei zu niedrigem Förderdruck (hohe Relativverschiebungsgeschwindigkeit schon bei Eigenlast des Gleitrohres) erreicht. Mit dem Gleitrohr-Rheometer kann eine große Bandbreite an Betonzusammensetzungen charakterisiert werden [58–60]. Das System ist transportabel, robust, netzunabhängig und für den Baustelleneinsatz ausgelegt.

Zusätzlich zu den rheologischen Messungen am Frischbeton wurden bei den Großversuchen der Luftgehalt und die Rohdichte mit dem Druckausgleichsverfahren [65] ermittelt.

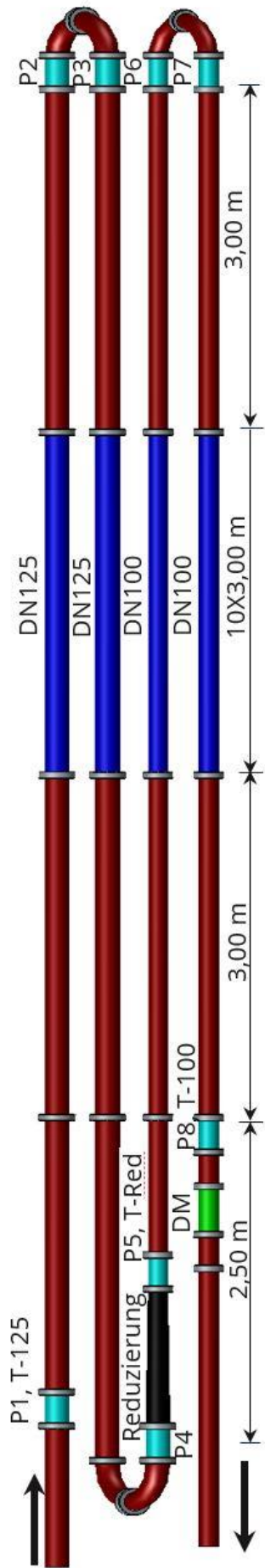
3.4 GROßMAßSTÄBLICHE PUMPVERSUCHE

Im September 2016 fanden die vorgesehenen großmaßstäblichen Pumpversuche an einer 154 m langen mit drei Krümmungen versehenen, ebenerdigen Pumpstrecke auf dem Gelände der Firma SCHWENK Beton Dresden GmbH & Co. KG unter Realbedingungen statt, vgl. **Bild 13**. Die Rohrdurchmesser betragen 125 mm und 100 mm. Der Übergang zwischen beiden Durchmesser wurde durch Einbau eines 1,5 m langen Reduzierstückes in ca. der Mitte der Förderleitung erreicht. Mit dem gewählten Versuchsaufbau konnten in Abstimmung mit den Praxispartnern typische Elemente von Pumprohrleitungen praxisnah nachgestellt werden.

Die Pumpversuche stellten den Höhepunkt der experimentellen Arbeiten dar, bei dem die im Labormaßstab erarbeiteten Grundlagen und Erkenntnisse auf einen praxisrelevanten Maßstab skaliert und dabei verifiziert bzw. validiert werden konnten. Die Verortung der Großversuche wurde durch Angebote der Praxispartner unter Regie der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB) bestimmt. Mit der Beschaffung und Bereitstellung von Ausgangsstoffen, Mischtechnik, Betonpumpen und Förderleitungen sowie die Versuche unterstützendem Personal wurde von den projektassoziierten Firmen ein entscheidender Beitrag zum Gelingen des Projektes geleistet.

Aufbau und Instrumentierung der Pumpstrecke mit Druck- und Temperatursensoren bzw. dem Durchflussmessgerät sind in **Bilder 13a** und **13b** ersichtlich. Dazu zählen:

- Ein Drucksensor für die Messung des Öldrucks in der Betonpumpe und acht Druckmessumformer für abrasive Medien (Modell BROSA Typ 0310, BROSA, Tettang, Deutschland) mit einem Messbereich von 5 bis 400 bar zur kontinuierlichen Erfassung des Frischbetondrucks in der Förderleitung, vgl. **Bilder 13c** und **13d**;
- Ein magnetisches Durchflussmessgerät (Modell Transmag 2 Sensor 911 / E, Siemens, München, Deutschland) zur Erfassung des Volumenstromes an Frischbeton. Der Durchflusssensor wurde am Ende der Rohrleitung in unmittelbarer Nähe des letzten Drucksensors P8 installiert, vgl. **Bild 13e**;



a) schematische Darstellung der Pumpstrecke b) Umsetzung der Pumpstrecke in die Praxis; eingebaute Sensoren: c) Drucksensor für die Pumpe, d) Drucksensor für die Rohrleitung, e) Durchflussmessgerät und f) Temperatursensor.

- Vier vibrationsfeste Temperatursensoren (RS PRO, Platin-Widerstand-Pt100), die an der Außenwand der Rohrleitung angebracht wurden, vgl. **Bild 13f**.

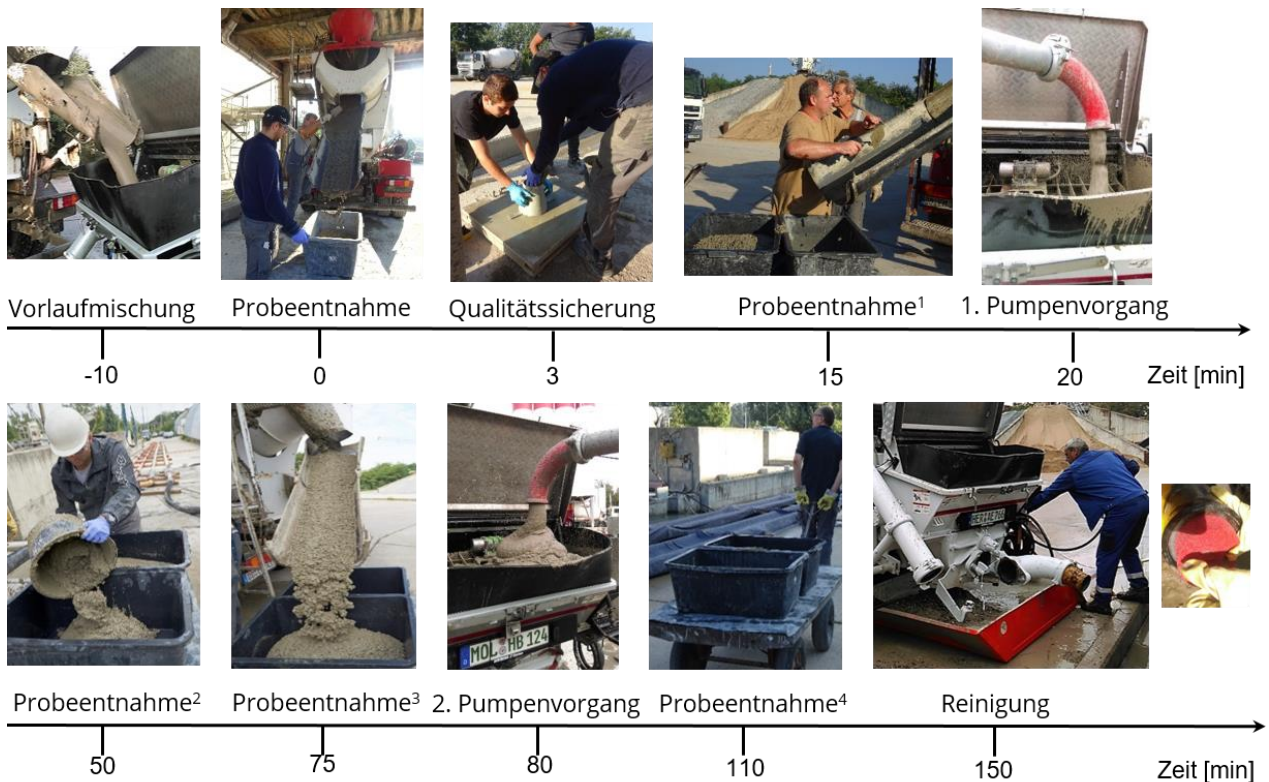
Als Pumpe wurde eine Doppelkolben-Pumpe mit einer maximalen Förderleistung von 164 m³/h eingesetzt, [66]. Ihre technischen Daten sind in **Tabelle 4** zusammengefasst.

Tabelle 4. Technische Daten der Autobetonpumpe [66].

Betonpumpenbatterie	P2023
Max. Fördermenge [m ³ /h]	164
Max. Betondruck [bar]	85
Max. Hubzahl/min	33
Durchmesser des Förderzylinders [mm]	230
Länge des Förderzylinders [mm]	2000

Die Förderstrecke wurde an den ausgewiesenen Stellen mit 8 Drucksensoren und vier Temperatursensoren ausgestattet. Der Förderstrom konnte mit dem am Ende der Förderleitung eingebauten Durchflussmessgerät exakt gemessen werden. Neben der Erfassung der globalen Pumpendruck-Fördermenge-Beziehungen und der lokal vorliegenden Drücke direkt in der Rohrleitung wurden die gepumpten Betone zu verschiedenen definierten Zeitenpunkten aus dem instrumentierten Pumpkreislauf entnommen und sofort einer umfassenden rheologischen Charakterisierung unterzogen.

Insgesamt wurden über 100 m³ Frischbeton hergestellt, durch den Pumpkreislauf gepumpt, rheologisch untersucht und abschließend fachgerecht entsorgt. Alle Pumpversuche inklusive der rheologischen Messungen am Frischbeton wurden nach einem strengen Zeitregime durchgeführt, vgl. **Bild 14**. Ein Pumpversuch startete stets mit notwendigen vorbereitenden Arbeiten. Dazu wurde die Rohrrinnenwand der Pumpleitung zunächst mit Zementleim benetzt. Danach erfolgte das übliche Anpumpen mit einer Vorlaufmischung mit Volumen von 0,50 bis 0,75 m³. Damit wurde die Ausbildung einer notwendigen Gleitschicht gewährleistet ohne eine Leimverarmung des zu pumpenden Betons zu riskieren. Die Vorlaufmischung wurde vor Beginn der Messungen zusammen mit dem ersten Teil der zu pumpenden Betonmischung aus dem Kreislauf entnommen und entsorgt. Erst danach wurden die Pumpversuche mit den vorgesehenen Betonen ausgeführt, wobei pro Betonzusammensetzung insgesamt 4,5 m³ Material gepumpt wurden. Innerhalb des Zeitrahmens von 120 Minuten wurde zweimal im Kreislauf gepumpt. Für die Experimentierphase „Pumpen 1“ wurde eine erste Betonteilmenge 20 Minuten nach der Betonherstellung gepumpt und untersucht. Für die Experimentierphase „Pumpen 2“ wurde eine zweite Betonteilmenge 80 Minuten nach der Betonherstellung in die Förderleitung eingespeist und gleichermaßen untersucht. Mit der Gliederung in die beiden Experimentierphasen lassen sich in der Praxis auftretende Liefer-/Abnahmezeiten des Frischbetons aus dem Fahrmißer nachstellen und das Betonalter kinetisch einbeziehen. Abschließend wurde die gesamte Rohrleitung durch Nutzung zunächst eines praxisüblichen „Molches“ und danach durch Spülen mit Wasser gereinigt.



- ¹ für rheologische Versuche am Frischbeton vor dem 1. Pumpenvorgang
- ² für rheologische Versuche am Frischbeton nach dem 1. Pumpenvorgang
- ³ für rheologische Versuche am Frischbeton vor dem 2. Pumpenvorgang
- ⁴ für rheologische Versuche am Frischbeton nach dem 2. Pumpenvorgang

Bild 14. Ablauf der Pumpversuche, begleitet von rheologischen Messungen am Frischbeton

Eine detaillierte Ablaufgestaltung des Pumpprozesses und Einzelheiten der Pumpregie sind in **Bild 14** und **Tabelle 5** zu ersehen.

Tabelle 5. Pumpregie während der großmaßstäblichen Versuche

Geschwindigkeitsstufe	Hubzahl [1/min]	Fördermenge ¹⁶ [m ³ /h]	Öldruck ¹⁶ [bar]	Pumpendruck ¹⁶ [bar]	Zeit [MM:SS]
1	10	$Q_1=10$	$P_{1p}=60$	$P_1=10$	00:00-03:00
2	19	$Q_2=15$	$P_{2p}=75$	$P_2=15$	03:00-06:00
3	32	$Q_3=22$	$P_{3p}=120$	$P_3=20$	06:00-09:00
4	49	$Q_4=30$	$P_{4p}=175$	$P_4=30$	09:00-12:00
3'	32	$Q_{3'}=22$	$P_{3'p}=120$	$P_{3'}=25$	12:00-15:00
2'	19	$Q_{2'}=15$	$P_{2'p}=75$	$P_{2'}=20$	15:00-18:00
1'	10	$Q_{1'}=10$	$P_{1'p}=60$	$P_{1'}=15$	18:00-21:00
0	0	0	0	0	21:00-24:00
3''	33	$Q_{3''}=15$	$P_{3''p}=120$	$P_{3''}=25$	24:00-27:00

Innerhalb des insgesamt 27-minütigen Pumpvorganges einer Phase wurden vier verschiedene Fördermengen gemäß der in **Tabelle 5** gezeigten Sequenz seitens des Pumpenbedieners eingestellt.

¹⁶ Orientierungswerte bedingt durch die Betonart und -alter.

Exemplarisch sind die direkt erhaltenen Ergebnisse aus den Pumpversuchen für die Referenzmischung M1 in **Bild 15** dargestellt. Während der Pumpversuche erfolgte zeitabhängige Messung und Aufzeichnung folgender Parameter: Öldruck in der Pumpe, Pumpendrucke in der Förderleitung, vgl. **Bilder 15a** und **15b** sowie die Durchfluss-/Fördermenge am Ende der Rohrleitung, **Bild 15c**. Aus diesen lässt sich die Pumpendruck-Fördermengen-Beziehung (P - Q -Kurve) darstellen, vgl. **Bild 15d**.

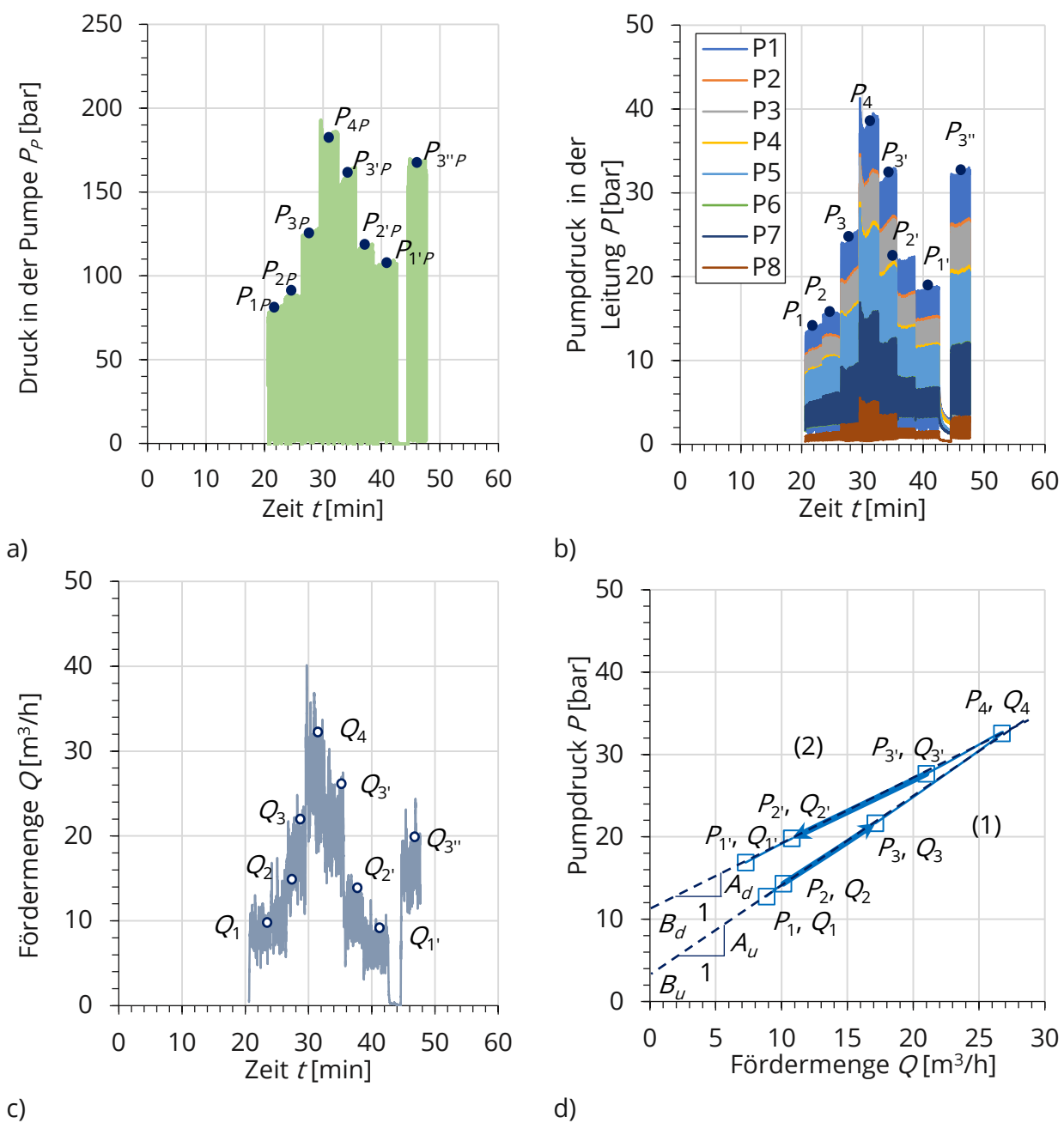


Bild 15. Auswertung Pumpversuch: Referenzmischung M1: a) schrittweise Erhöhung und Verringerung des Druckes in der Pumpe; b) resultierender Druck in der Rohrleitung entsprechend der acht Drucksensoren (P1-P8); c) Entwicklung der Fördermenge; d) resultierende Pumpendruck-Fördermenge-Kurve P - Q .

Im Ergebnis jeder vom Pumpenbediener voreingestellten Fördermenge wurden Durchschnitts-

werte sich ergebender Durchflussmenge am Ende der Rohrleitung und der an den acht Sensoren gemessenen Drücke in der Rohrleitung angegeben. Da während des Pumpprozesses größere Schwankungen des Drucks und der Durchflussmenge auftraten, wurden nur die Werte berücksichtigt, die einem stationären Zustand entsprechen. Das angewendete Auswerteverfahren beinhaltet einen Algorithmus, der darauf beruht, die von den Sensoren aufgezeichneten scharfen Spitzen zu detektieren und zu eliminieren. Die so bearbeiteten Ergebnisse wurden gruppiert, um die die "Pumpbarkeit" beschreibende P - Q -Kurve zu erzeugen. Diese wird als Basis zur Gegenüberstellung mit den Vorhersagen aus den analytischen und numerischen Ansätzen herangezogen, vgl. **Abschnitt 2.1**. Bei Ihrer Interpretation wird die nach oben gerichtete P - Q -Kurve (1) zum Vergleich mit den rheologischen Eigenschaften des Betons vor dem Pumpen verwendet, vgl. **Bild 15d**. Die nach unten gerichtete Kurve (2) dient zur Charakterisierung der Betonpumpbarkeit nach dem Pumpen. Beide Kurven werden unter Nutzung einer linearen Regression an eine Gerade angepasst, die durch die Steigung A und den Abschnitt B der y -Achse mit den Indizes "u" und "d" für die Aufwärts- bzw. Abwärtskurven gekennzeichnet ist. Weitere Diskussion über das angewandte lineare Modell befindet sich in **Abschnitt 2.1**.

Der Verlauf der Umgebungsbedingungen Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Versuchstage ist in **Bild 16** zusammengefasst. Um die Vergleichbarkeit aller Versuche zu gewährleisten, wurden die Pumpversuche, die an regnerischen und kühlen Tagen stattgefunden haben, bei trockenem und warmem Wetter wiederholt. Die Klimabedingungen variierten in dieser Periode zwischen $(20,5 \pm 3,5) \text{ }^\circ\text{C}$ und $(55,0 \pm 7,5) \%$ relativer Luftfeuchte.

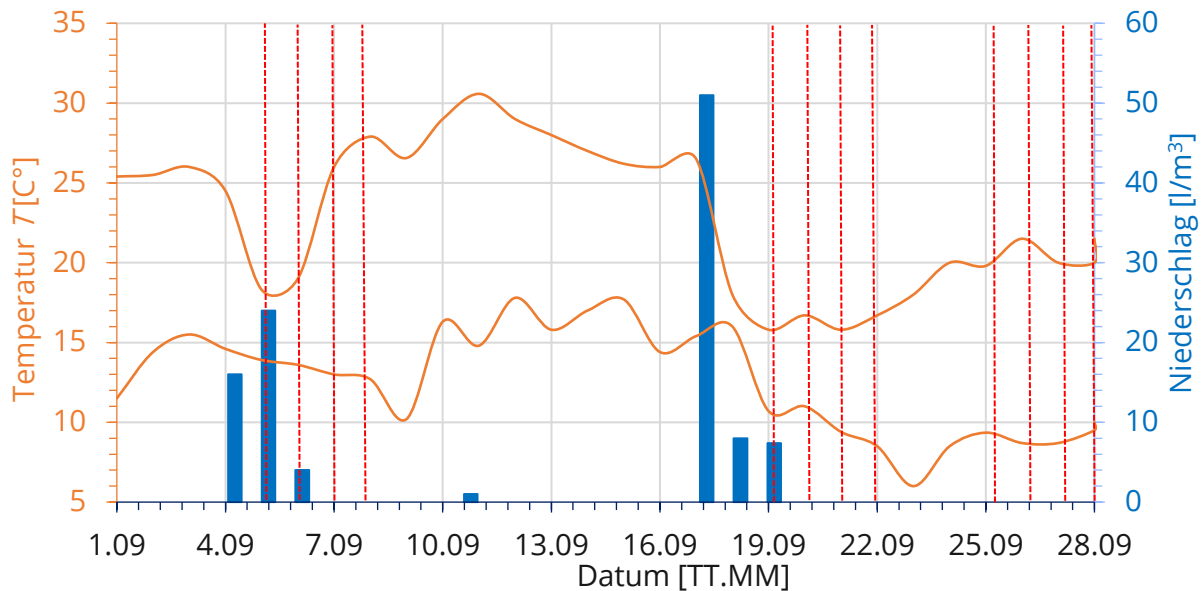


Bild 16. Wetterbedingungen während der Pumpversuche.

4 ERGEBNISSE

4.1 ALLGEMEINES

Die Ausführungen in diesem Abschnitt sind auf das Hauptziel der Untersuchungen fokussiert: Zurverfügungstellung einer robusten, praxistauglichen Methode zur Charakterisierung von Betonförderprozessen in Pumpleitungen.

Die nachfolgende Interpretation von Versuchsergebnisse bezieht sich aufgrund der Vielfalt der Messergebnisse lediglich für ausgewählte repräsentative Betonzusammensetzungen. Dazu wird ein Vergleich von zwei praxisüblichen Normalbetonen (NB, K und S) und Hochleistungsbetonen (SVB und SFB), auch Sonderbetone (SB) genannt durchgeführt. Mindestens für diese Betone erfolgt eine ausführliche Auswertung in den einzelnen Abschnitten.

Dennoch werden die Messwerte aller Versuche in Tabellenform der Anlage beigefügt, vgl. **Anhänge 2** und **3**. Die auswertenden Diagramme verschiedener und praxisrelevanter Abhängigkeiten werden mit den Hauptaussagen knapp und kurz gefasst im Text der einzelnen Abschnitte abgebildet. So wird es möglich, für alle untersuchten Betonarten Tendenzen abzuschätzen und übersichtlich darzustellen. Der Einfluss aller die Betonzusammensetzungen beschreibenden Parameter wird zusammenfassend bewertet und Informationen zur Optimierung der stofflichen Zusammensetzung von Betonen hinsichtlich der Pumpbarkeit gegeben.

Das Augenmerk der Auswertung liegt bei jedem Pumpversuch auf der Experimentierphase „Pumpen 1“. Die Experimentierphase „Pumpen 2“ innerhalb jedes Pumpversuches diente zur Ermittlung des Einflusses von Transportzeiten (Alter des Betons) und wird hier nicht detailliert ausgewertet und diskutiert.

Sollte es im Nachhinein erforderlich werden, die bestimmten Zusammenhänge detaillierter herauszuarbeiten, so ist die Datenbasis dafür vorhanden und vorbereitet, vgl. **Abschnitt 4.9**. Diese gewählte kompakte Vorgehensweise ergibt sich aus der Komplexität der Versuche und der zahlreichen Ergebnisse.

Während der Auswertung der Ergebnisse ergaben sich zusätzliche Erkenntnisse zur Praxisrelevanz, vgl. **Abschnitt 4.7**. Dieser Informationsgewinn geht über die beantragten Zielsetzungen hinaus. Dazu zählen die Diskussion zu Herausforderungen während des Pumpens und das Erteilen wichtiger Empfehlungen für Praktiker.

4.2 RHEOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG DER BETONMISCHUNGEN

Bild 17 stellt für alle untersuchten Betone jeweils die mit dem Viskosimeter und Tribometer ermittelten Entwicklungen der Parameter Viskosität μ bzw. μ_G und Fließgrenze τ_0 bzw. τ_{0G} in Abhängigkeit der Betonalter 20 und 80 Minuten dar. Diese bestimmen gemäß den **Gleichungen 1** und **2** das Fließverhalten des Betons während des Pumpens, vgl. **Abschnitt 3.3**. Die Viskositätskennwerte und deren Zeitabhängigkeit lassen sich durch eine Variation der Betonzusammensetzung gezielt beeinflussen. Die Kenntnis der erhaltenen Zusammenhänge ist eine unabdingbare Voraussetzung für die beabsichtigte Optimierung der rheologischen Eigenschaften des Pumpbetons.

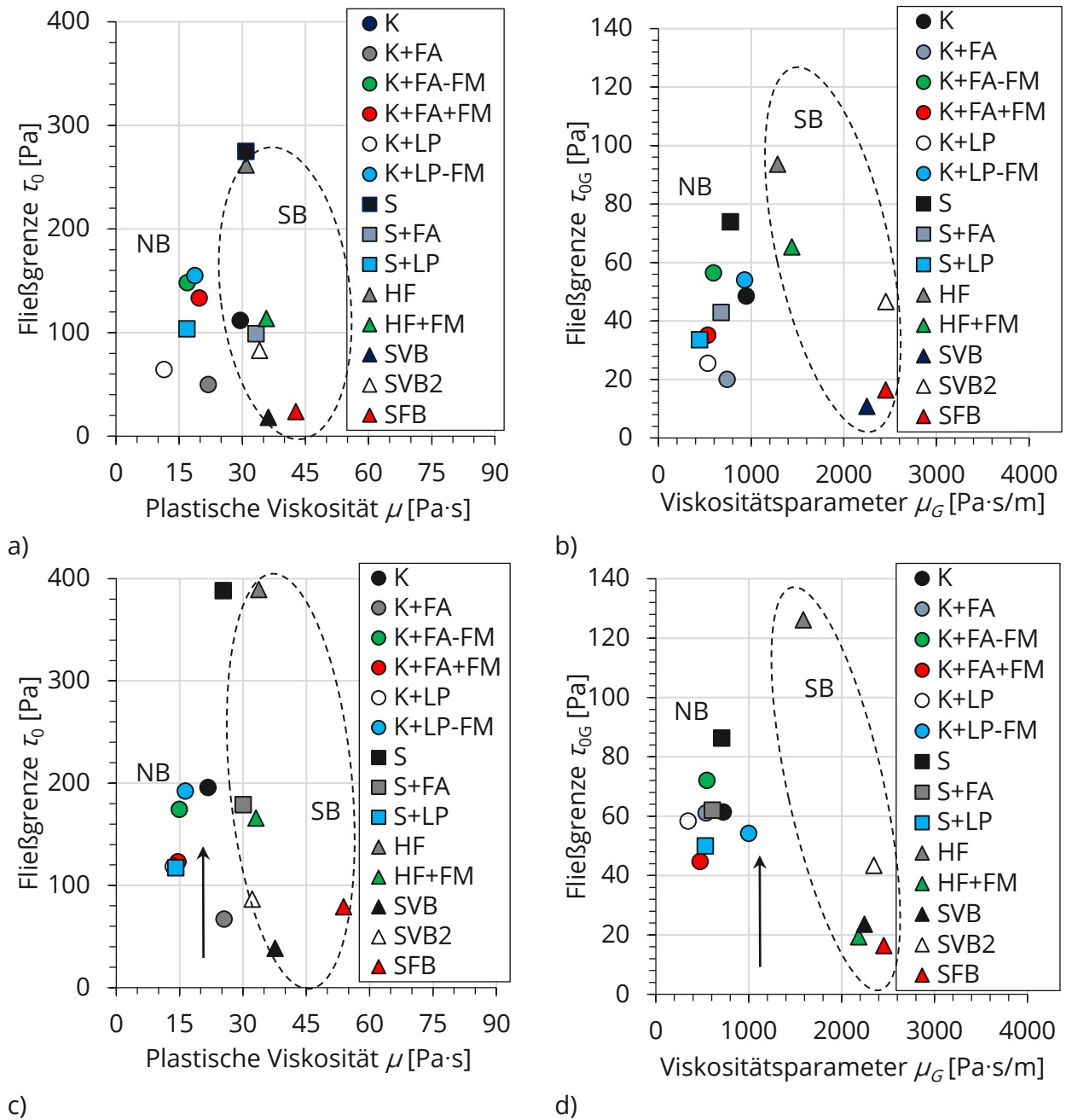


Bild 17. Rheologische Eigenschaften des Kernbetons (Teilbilder a, c) und der Gleitschicht (Teilbilder b, d) jeweils vor der 1. Pumpserie im Betonalter 20 min (links) und vor der 2. Pumpserie im Betonalter 80 min (rechts) für Normalbetone (NB) und Sonderbetone (SB).

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit fortschreitender Zeit die Fließgrenze sowohl des Kernbetons als auch der Gleitschicht steigt, was auf die Bildung erster, früher Hydratationsprodukte (C_3A -Anlösung) aber auch auf die mit zunehmender Zeit schwächere Wirkung des Fließmittels zurückzuführen ist. Die Betonkonsistenz ändert sich infolge dieser Ansteifprozesse in Richtung steifer werdend [29]. Bei der Zudosierung von PCE-basiertem Fließmittel verringert sich grundsätzlich die Fließgrenze von Kernbeton und Gleitschicht, vgl. K+FA mit K+FA-FM und HF mit HF+FM, wobei der Viskositätsparameter nahezu unbeeinflusst bleibt. Dieser Effekt ist überwiegend vom Wasser/Feststoff-Verhältnis abhängig, so dass alle Sonderbetone (HF, HF+FM, SVB,

SVB2 und SFB) mit einem hohem Wasser/Feststoff-Verhältnis einen größeren Wert für den Viskositätsparameter aufweisen [67–69]. Das gilt sowohl für den Kernbeton als auch für die Gleitschicht. Die Ursache dafür ist, dass unter der Voraussetzung eines konstanten Wassergehaltes die Erhöhung des Leimvolumens zu einem reduzierten Wasseranteil führen, der für die anfänglichen Hydratationsprozesse zur Verfügung steht.

Der Einsatz von Fließmittel zur „Wiedereinstellung“ der Konsistenz kann diese Veränderung der Viskosität nur bedingt kompensieren, da Fließmittel hauptsächlich auf die Fließgrenze wirken und weniger auf eine Reduktion der Viskosität. Demzufolge weisen die zwei Sonderbetone SVB und SFB mit einer hohen Fließmitteldosierung niedrigere Fließgrenze-Werte im Vergleich zu den anderen Betonen auf. Es ist zu beachten, dass die Sonderbetone gegenüber den Normalbetonen höhere Werte für die Viskositätsparameter zeigen. Hinsichtlich der Pumpbarkeit spielt die Viskosität des Frischbetons eine deutlichere größere Rolle als die Fließgrenze [24,37,54]. Dies ist insbesondere bei der Konzeption von Sonderbetonen und der Anpassung ihrer rheologischen Eigenschaften von Belang. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass für den gleichen Betonförderstrom Sonderbetone (S-Betone) einen höheren Pumpendruck benötigen als Normalbetone.

Die S-Betone enthalten gebrochene Gesteinskörnung (Splitt). Diese erfordert wegen der spezifischen Kornform mit größerer Oberfläche einen relativ hohen Leimgehalt [60]. Daraus erklären sich die erhöhten Werte der Fließgrenze und des Viskositätsparameters im Vergleich zu K-Betonen mit runder Gesteinskörnung (Kies), vgl. die Mischungen K mit S und K+FA mit S+FA. Bei Betonen mit Luftporenbildner, d. h. K+LP, K+LP+FM und S+LP, ist ein leichter Anstieg des Frischbeton-Luftgehaltes mit zunehmender Dosierung im Vergleich zu analogen Mischungen ohne Luftporenbildner festzustellen, vgl. **Tabelle 6**. Die rheologischen Parameter Viskosität und Fließgrenze nehmen bei Vergrößerung des Luftporengehaltes infolge der Zugabe von Luftporenbildner sowohl für die Mischungen mit Kies als auch für die Mischungen mit Splitt ab, vgl. K mit K+LP und K+LP-FM und S mit S+LP. Erwartungsgemäß verringert sich bei Erhöhung des Luftporengehaltes die Frischbetondichte aber auch das Ausbreit- und das Setzfließmaß.

Die Flugasche (FA) zählt zur den anorganisch stabilisierenden Zusätzen und wird u.a. zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons angewendet [70]. Obwohl die Wirkung der Flugasche sehr stark von ihrer Feinheit und der Form der Partikel abhängt und in manchen Fällen den Wasserbedarf des Frischbetons sogar erhöhen kann, wirkt in den untersuchten Betonen die Flugasche positiv auf die Fließeigenschaften der Betone K+FA und S+FA im Vergleich zu den entsprechenden Betonen K und S ohne FA. Diese positive Entwicklung gilt für die Reduzierung der rheologischen Parameter sowohl des Kernbetons als auch der Gleitschicht. Beide Auswirkungen laufen konform.

Tabelle 6. Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen im Alter von 20 min und 80 min.

Mischung	Ausbreitmaß / Setzfließmaß* [mm]		Dichte [kg/dm ³]		Luftporengehalt [%]	
	20 min	80 min	20 min	80 min	20 min	80 min
	K	530	500	2,37	2,35	1,40
K+FA	615	550	2,39	2,36	1,30	1,80
K+FA-FM	565	560	2,40	2,37	1,20	1,50
K+FA+FM	605	555	2,39	2,34	0,75	1,40
K+LP	640	620	2,30	2,30	3,70	3,10
K+LP-FM	490	558	2,30	2,30	4,90	4,40
S	460	450	2,43	2,37	0,90	2,20
S+FA	533	500	2,40	2,37	1,40	1,90
S+LP	630	535	2,32	2,29	3,10	3,80
HF	485	425	2,35	2,34	2,10	2,80
HF+FM	655	570	2,38	2,36	1,50	1,50
SVB	673*	530*	2,28	2,35	2,00	1,40
SVB2	543*	458*	2,33	2,35	1,20	1,00
SFB	585*	-	2,32	2,32	2,20	2,20

Die gewonnenen rheologischen Kennwerte aller untersuchten Betone lassen sich direkt über das in **Abschnitt 2.1** vorgestellte analytische Model zur Charakterisierung der Betonpumpbarkeit in die Praxis übertragen. Die resultierenden *P-Q*-Beziehungen werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

4.3 VORHERSAGE ZUR BETONPUMPBARKEIT

4.3.1 UNTERSUCHUNGEN MIT VISKOSIMETER, TRIBOMETER UND SLIPER

In **Bild 18** sind die mit Viskosimeter/Tribometer und dem Sliper ermittelten *P-Q*-Beziehungen für das Betonalter von 20 Minuten dargestellt. Die Pumpendruck-Vorhersage unter Verwendung der Daten aus den Tribometer-Versuchen basiert entsprechend ihres Fließverhaltens entweder auf **Gleichung 1** oder **2** unter Annahme der Sliper-Geometrie, d. h. einer Rohrlänge $l = 0,5$ m und einem Rohrdurchmesser $d = 0,125$ m. Dies erleichtert die Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Sliper-Messungen.

Für die Normalbetone wurde **Gleichung 1** angewendet, da diese Betone während der Tribometer-Messung nur teilweise Scherverformungen aufweisen. Hier finden Partikelbewegungen hauptsächlich in der Gleitschicht statt. Aufgrund der vollständigen Betonscherung im Tribometer-Versuch wurde für die Sonderbetone **Gleichung 2** herangezogen.

Aus **Bild 18** lässt sich schlussfolgern, dass die Pumpbarkeit der untersuchten Betone für die Normalbetone in der Reihenfolge K+LP, S+LP, K+FA+FM, K+FA, S+FA, K+FA-FM, K+LP-FM, K, S und für die Sonderbetone in der Abfolge H+FM, SVB2/SVB, HF, SFB übereinstimmend zu den Ergebnissen aus den Messungen mit Tribo-/Viskosimeter als auch mit dem Sliper abnimmt.

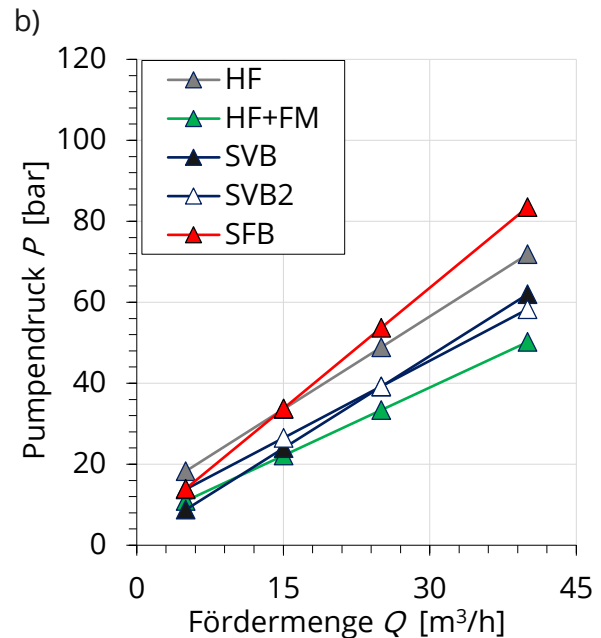
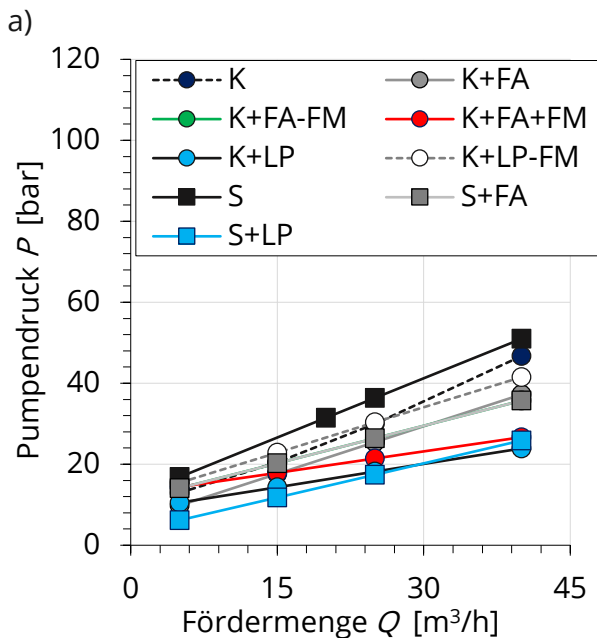
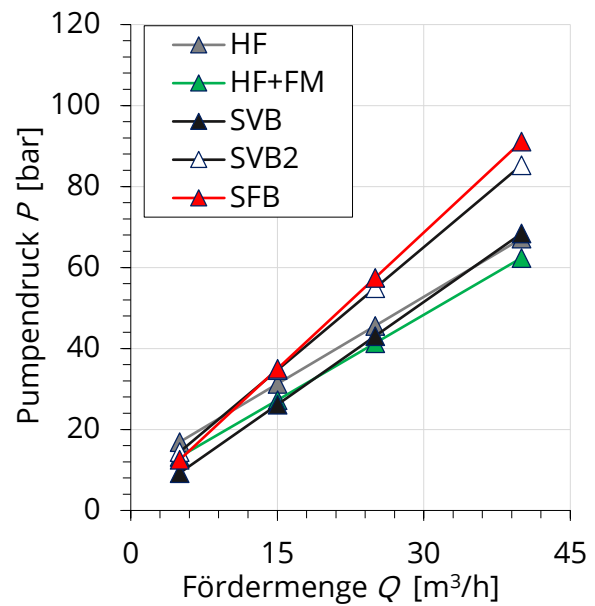
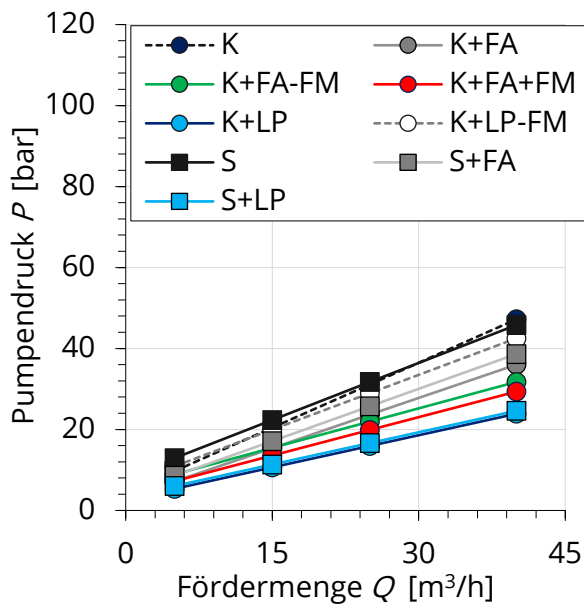


Bild 18. Vorhersage zu P - Q -Kurven vor der 1. Pumpserie für das Betonalter von 20 min a, b) aus den Messungen mit Tribo-/Viskosimeter und c, d) aus den Messungen mit Sliper für Normal- bzw. Sonderbetone.

Die Darstellungen zeigen zum einen, dass in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Betons deutliche Unterschiede für das Verhältnis von Pumpendruck und Fördermenge bestehen. Zum anderen ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Betonalter von 20 auf 80 Minuten bei gleichem Pumpendruck die Fördermenge tendenziell abnimmt, vor allem für die Sonderbetone, vgl. **Bilder 18** und **19**.

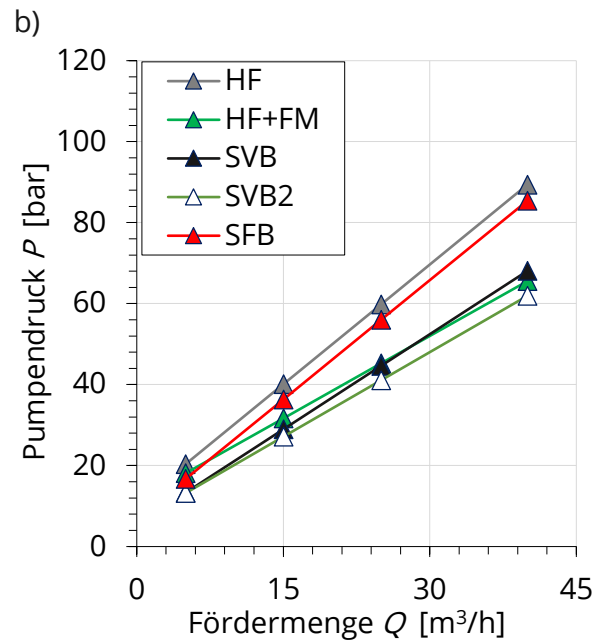
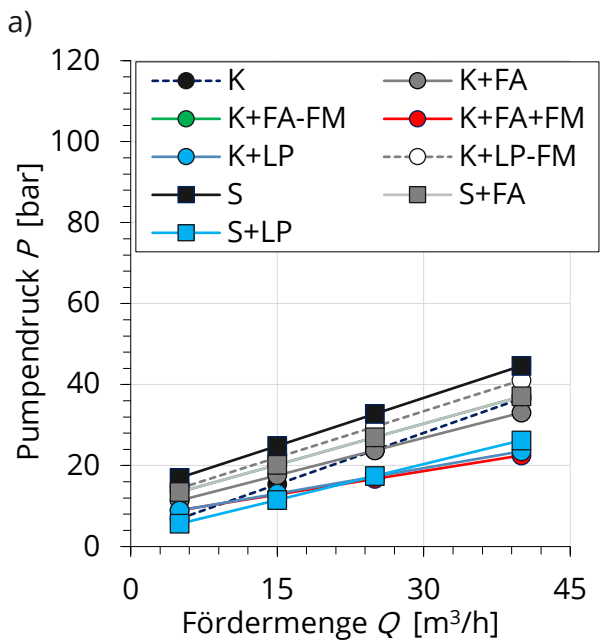
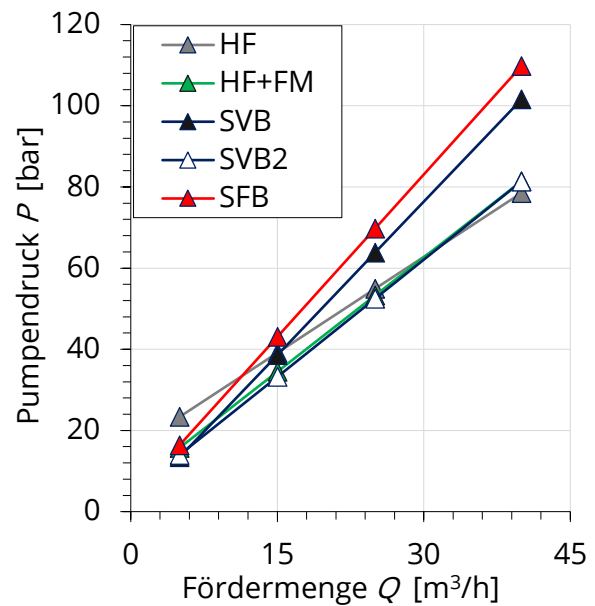
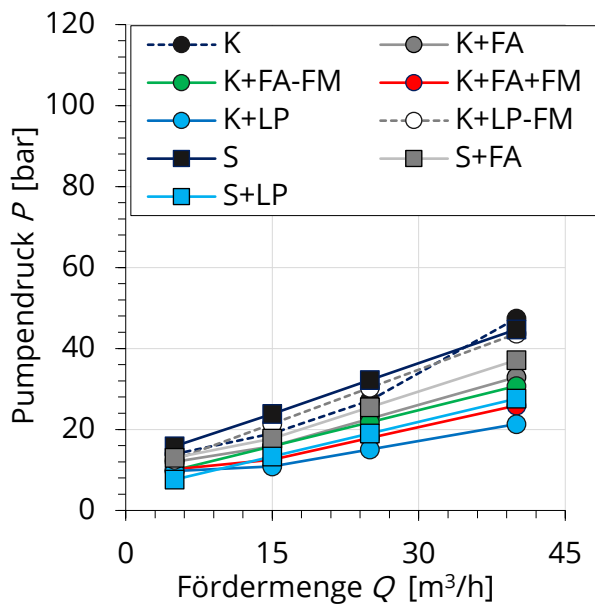


Bild 19. Vorhersage zu P - Q -Kurven vor der 2. Pumpserie für das Betonalter von 80 min a, b) aus den Messungen mit Tribo-/Viskosimeter und c, d) aus den Messungen mit Sliper für Normal- bzw. Sonderbetone.

Grund dafür sind die zeitabhängigen Fließeigenschaften des Frischbetons, die zu eine Veränderung in den rheologischen Eigenschaften sowohl der Gleitschicht als auch des Kernbetons führen, vgl. **Bild 17**. Es wird deutlich, dass sich im Zeitverlauf die Eigenschaften der sich an der Rohrwandung befindlichen Gleitschicht verschlechtern.

Als Maß für die Pumpbarkeit wird hier an erster Stelle die Neigung der P - Q -Kurven betrachtet (größere Neigung = schlechtere Pumpbarkeit). Dabei liefert das Tribometer, bis auf die Mischung SFB, höhere Pumpendruck-Werte. Das liegt vermutlich daran, dass für die Normalbetone die vereinfachte Beschreibung des Pumpverhaltens gemäß **Gleichung 1** verwendet wurde. Die Problemstellung für weiterführende Untersuchungen besteht darin, die genaue Lage des „Knickpunktes“ der P - Q -Beziehung zu bestimmen, d. h. die maximale Scherrate, ab der der

Kernbeton nicht länger nur als Pfropfen gefördert wird, sondern auch außerhalb der Gleitschicht eine Scherung erfährt. Während der Sliper- bzw. Tribometer-Versuche bildet sich eine an der Grenzfläche recht gut erkennbare Gleitschicht zwischen Beton und Wandung aus. Eine dickere Gleitschicht führt zu geringerem Reibungswiderstand zwischen pumpfähigem Frischbeton und Rohrwandung und damit zur besseren Pumpbarkeit des Betons.

Bei relativ hohen Förderraten haben die Viskosität des Frischbetons und der an der Rohrwandung entstehenden Gleitschicht eine deutlich höhere Wirkung auf das Pumpverhalten als die Fließgrenze [24,37,44,54]. Bei sehr geringen Pumpendruck, bei dem das Fließen des Frischbetons in der Rohrleitung gerade beginnt, kann die Fließgrenze zur Beschreibung der Pumpbarkeit herangezogen werden, vgl. **Bilder 17** und **18**. Dieser Mindest-Pumpendruck lässt sich in der Praxis nur annähernd ermitteln, da zum Ablesen des P -Wertes bei $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ die gemessene P - Q -Kurve linear zu extrapoliert ist, wodurch die real vorhandene Nichtlinearität der Beziehung bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten unberücksichtigt bleibt.

4.3.2 OPTIMIERTES NOMOGRAMM

Der Viskositätsparameter der Gleitschicht μ_G oder b ist je nach Messprinzip, d. h. Tribometer oder Sliper-Gerät, im Vergleich zu den bislang verwendeten Werten des Ausbreit- oder Setzfließmaßes [54,60] geeigneter, den Strömungswiderstand von Beton zu bestimmen. Die Abhängigkeit zwischen dem vorgeschlagenen Viskositätsparameter und der Fördermenge, der Rohrleitungsgeometrie und der Motorleistung der Betonpumpe veranschaulicht das in **Bild 20** dargestellte angepasste Betondruck-Leistungs-Nomogramm. Die Ergebnisse des Nomogramms entsprechen langjährigen Erfahrungen mit einer Vielzahl von Rezepturen für Normalbetone [3,4,71].

Der Viskositätsparameter wird zur Anpassung der Rohrleitungsgeometrie, zur treffsicheren Auswahl der Betonpumpe und zur Bestimmung des erforderlichen Pumpendruckes verwendet, **Gleichung 9**:

$$P = \frac{16 \cdot l \cdot Q}{\pi \cdot d^5} \cdot b \quad (9)$$

Gemäß **Gleichung 9** liegt eine deutlich stärkere Abhängigkeit des effektiven Pumpendruckes vom Rohrdurchmesser d [m] vor als von der Fördermenge. Zu beachten ist, dass der Einfluss des Parameters Fließgrenze a oder τ_G im Nomogramm nicht explizit berücksichtigt wurde, da vor allen für sehr fließfähige Betone die Fließgrenze stark zunimmt.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die Anwendung des modifizierten Nomogramms auch für Hochleistungsbetone bestätigt. Der Vollständigkeit halber sind in **Tabelle 7** die Werte zur Bestimmung des Pumpendruckes für die SVB-Mischung als Funktion der Fördermenge unter Berücksichtigung der Rohrleitungsgeometrie der Pumpversuche enthalten.

Tabelle 7. Input-Parameter in Nomogramm für die SVB Mischung.

Q [m ³ /h]	Viskositäts- parameter b [Pa·s/m]	Abschnitt DN125		Abschnitt DN100		$P_1 + P_2$ [bar]	Motor- leistung N [kW]
		Länge L_1 [m]	Pumpen- druck P_1 [bar]	Länge L_2 [m]	Pumpen- druck P_2 [bar]		
15			8		16	24	14
25	935	79	14	75	25	39	39
50			28		48	76	152

Das in **Bild 20** dargestellte Beispiel geht von einer effektiven Fördermenge von $Q > 15$ m³/h aus. Das analoge Nomogramm ohne Berechnungsbeispiel ist in **Anhang 3** verfügbar.

Der Förderwiderstand in Rohrbögen wird in der Praxis in eine äquivalente Rohrlänge umgerechnet: z. B. entspricht ein 90° Rohrbogen einer geraden Rohrlänge von 3 m [4,19]. Sowohl Kaplan [44] als auch Chapdelaine [38] gaben an, dass für Normalbetone der Rohrbogen keinen zusätzlichen Druckverlust verursacht. Feys et al. [24] haben die Gültigkeit dieser Annahme für SVB-Mischungen widerlegt, da diese ein scherverdickendes Fließverhalten, d. h. steigende Viskosität bei hoher Schergeschwindigkeit zeigen, vgl. **Abschnitt 4.7**.

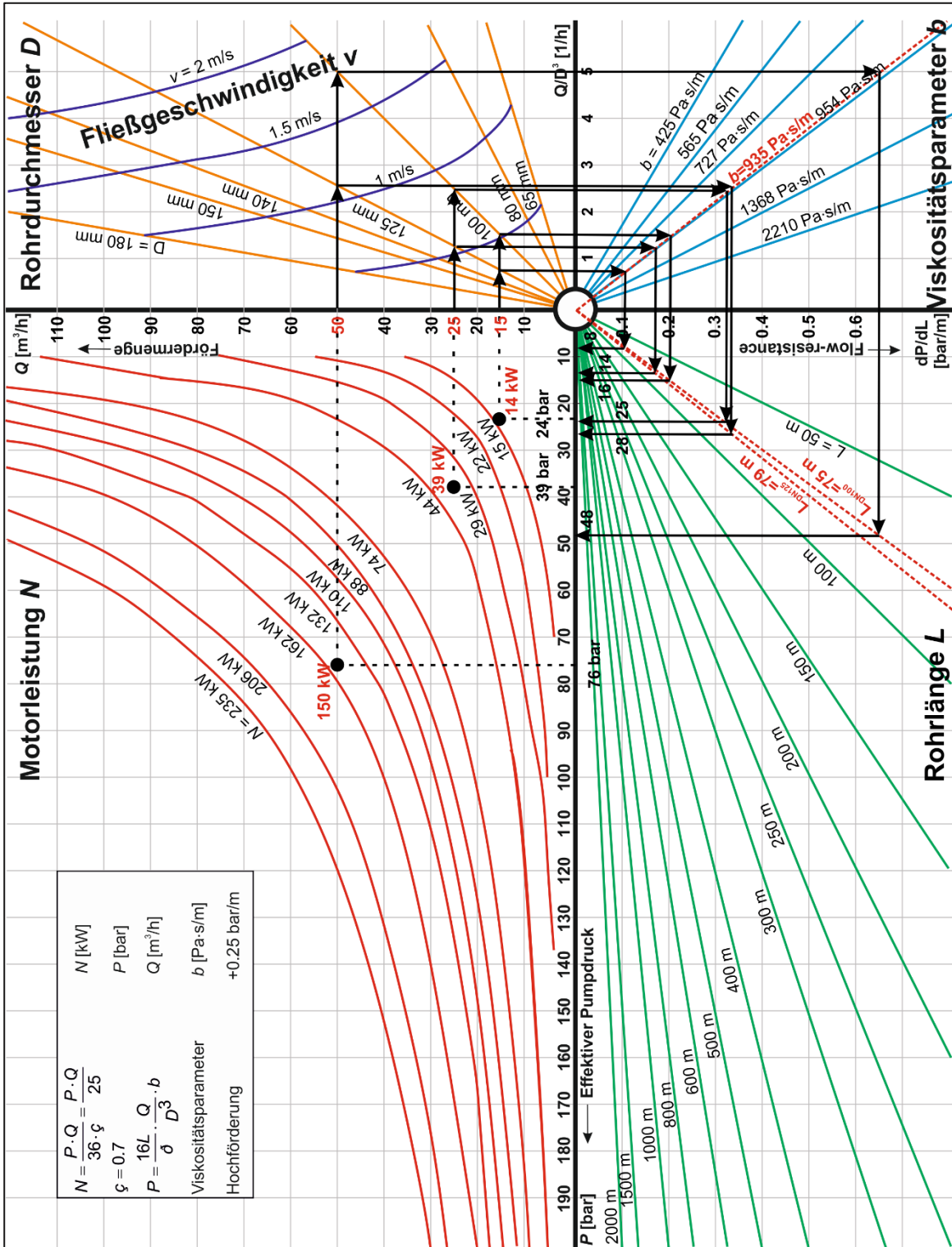


Bild 20. Betondruck-Leistungs-Nomogramm zur Einstellung von Parametern an der Betonpumpe, aus [71, 72]. Beispiel für die Berechnung des effektiven Pumpendruckes für die SVB-Mischung (M12A) ausgehend von Fördermenge $Q = 15, 25$ und $50 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.4 ERGEBNISSE AUS DEN GROßMAßSTÄBLICHEN PUMPVERSUCHEN

In **Bild 21** sind die aus den großmaßstäblichen Pumpversuchen direkt ermittelten Pumpendruck-Fördermenge-Beziehungen für das Betonalter von 20 bzw. 80 Minuten für alle untersuchten Betonmischungen dargestellt.

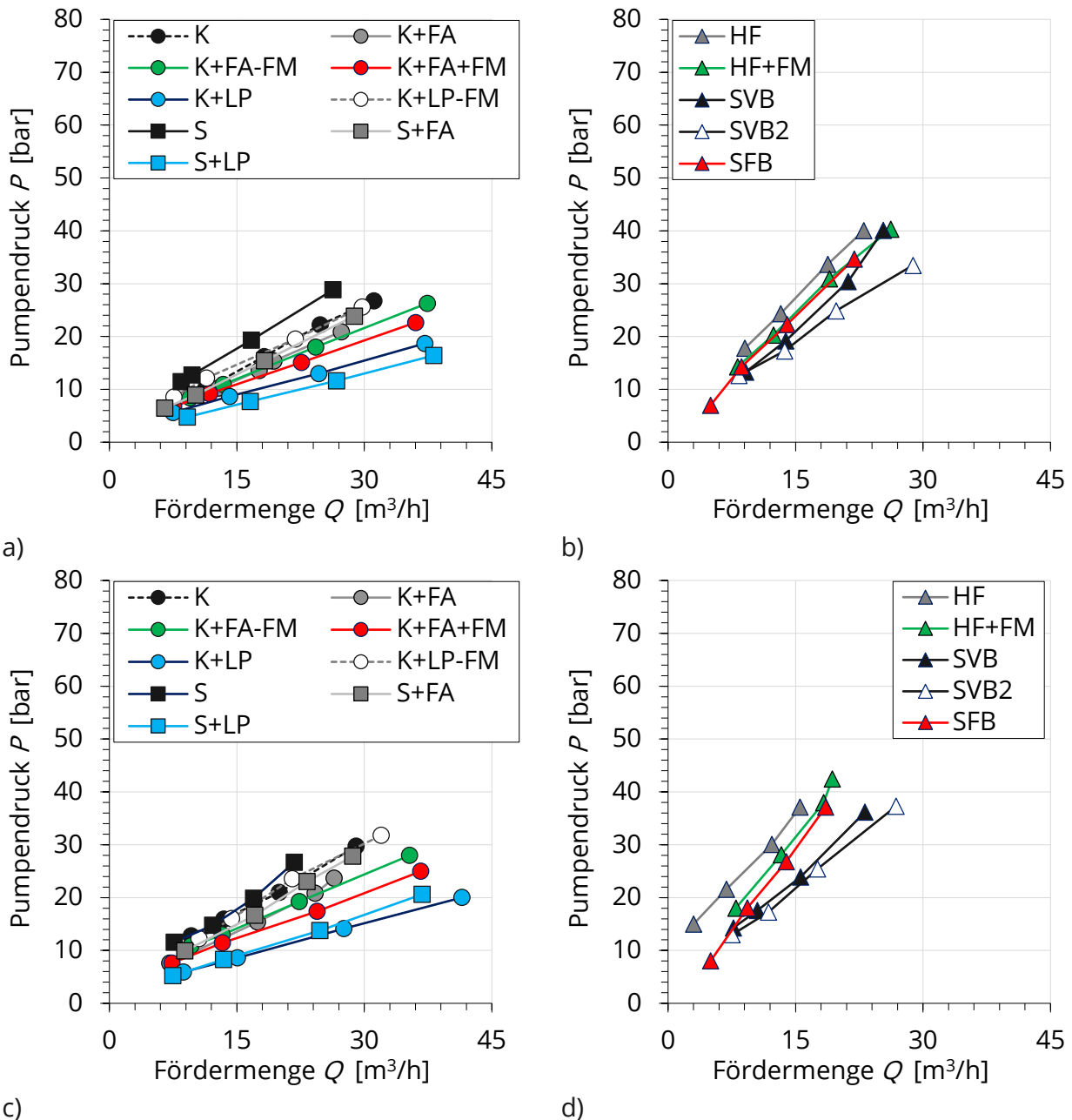


Bild 21. P - Q -Kurven aus den großmaßstäblichen Pumpversuchen während der 1. Experimentierphase (Betonalter 20 min; Teilbilder a, b) und während der 2. Experimentierphase (Betonalter 80 min; Teilbilder c, d).

Die Unterschiede beim Pumpendruck im Rohr für Normal- und Sonderbetonen sind in den o.g. Beispielen sehr gut ersichtlich: Sonderbetone benötigen hier eine um 40 % höhere Pumpleistung.

Der Vergleich von Vorhersagen zur Pumpbarkeit aus den rheologischen Messungen mit den Ergebnissen der Pumpversuche zeigt, dass der Frischbeton jeweils ein sehr ähnliches rheologisches Verhalten aufweist. Die P - Q -Beziehungen für die Normalbetone (Reihenfolge K+LP, S+LP, K+FA+FM, K+FA, S+FA, K+FA-FM, K+LP-FM, K, S) als auch die für die Sonderbetone (Reihenfolge H+FM, SVB2/SVB, HF, SFB) zeigt eine tendenzielle Übereinstimmung, vgl. **Bilder 19** und **21**. Der positive Einfluss der Zugabe von Luftporenbildern, Fließmitteln oder der partielle Ersatz des Zementes durch Flugasche auf die Verbesserung der Betonpumpbarkeit wird in den großmaßstäblichen Pumpversuchen ebenfalls bestätigt, siehe **Abschnitte 4.2** und **4.3**.

4.5 VERGLEICH ZWISCHEN DER VORHERSAGE UND DEN TATSÄCHLICHEN ERGEBNISSEN

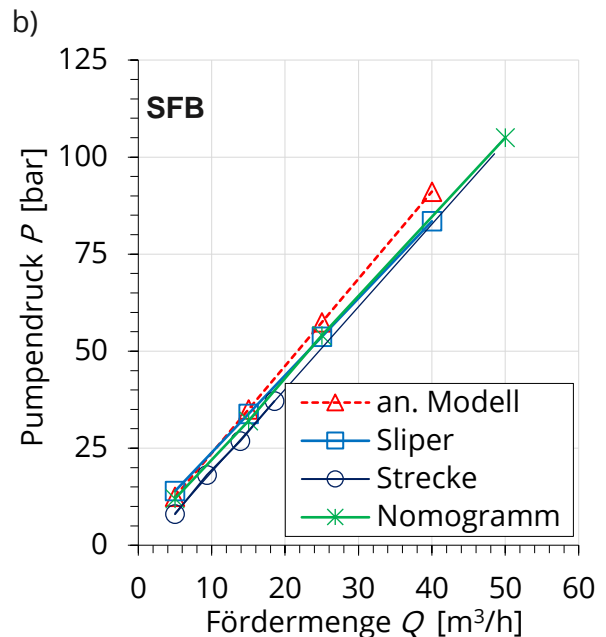
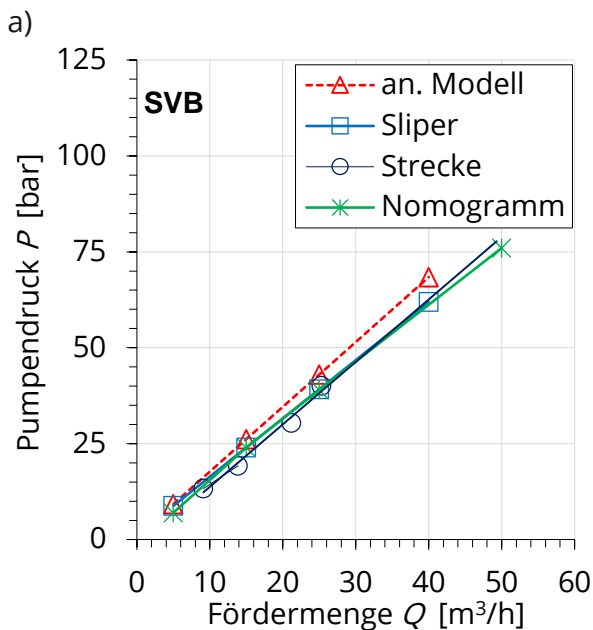
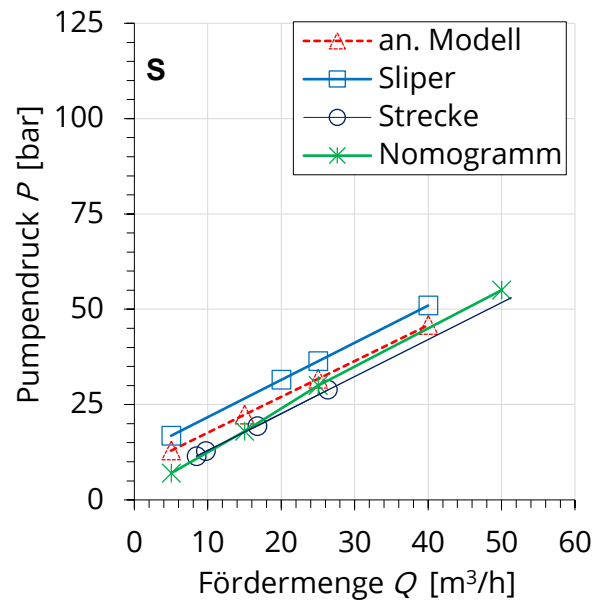
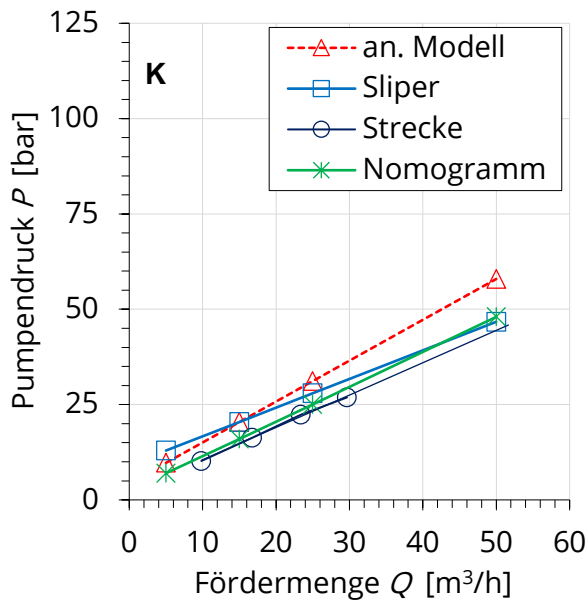
Im Rahmen dieses Vorhabens wurden verschiedene prüftechnische Ansätze zur Charakterisierung von Frischbeton bezüglich seiner Pumpbarkeit erarbeitet und bei der Förderung durch eine praxisnah gestaltete Rohrleitung überprüft. Die mit Hilfe von Viskosimeter und Tribometer (analytischer Ansatz) prognostizierten Pumpendruck- und Fördermengen-Werte für unterschiedliche Normal- und Hochleistungsbetone wurden den Ergebnissen aus Sliper-Messungen, der Vorhersage aus dem Nomogramm und letztlich den Ergebnissen aus den großmaßstäblichen Pumpversuchen gegenübergestellt, vgl. **Bild 22**.

Für die untersuchten Betone sind die Aussagen zur Pumpbarkeit, die mit Hilfe der analytischen Methode und mit Sliper-Messungen erarbeitet wurden, sehr gut zutreffend. Die Sliper-Vorhersage ist als unbedingt treffsicher zu bewerten. Dieses positive Ergebnis ist von sehr großer praktischer Bedeutung. Das analytische Modell steht diesem experimentellen Ansatz in seiner Aussagekraft nur geringfügig nach. Das gleiche gilt für das in diesem Projekt optimierte Nomogramm.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Tribo-/Viskosimeter-Messungen sind geeignet, um den Einfluss der Betonzusammensetzung auf die rheologischen bzw. tribologischen Eigenschaften des Frischbetons zu quantifizieren. Diese Einflüsse machen sich auch bei den Sliper-Messungen deutlich bemerkbar;
- Die Betonzusammensetzung hat einen ausgeprägten Einfluss auf die Ausbildung der Gleitschicht an der Rohrwandung und deren rheologische bzw. tribologische Eigenschaften. Die Dicke und Eigenschaften der Gleitschicht sind für den Pumpwiderstand von zentraler Bedeutung;
- Die gemessenen tribologischen Kennwerte Fließgrenze-Parameter τ_{0G} und Viskositätsparameter μ_G des Betons ermöglichen – zusammen mit den rheologischen Kenngrößen Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität μ des gescherten Kernbetons – eine treffsichere Vorhersage der Pumpbarkeit. Der Aussagewert einer auf diesen Parametern basierten Prognose wurde durch die Gegenüberstellung mit den Sliper-Messwerten und zudem mit den realen Werten aus den großmaßstäblichen Pumpversuchen überprüft und bestätigt;

- Die Bewegung von Beton in einer Rohrleitung findet als Kombination von Gleiten des Betonpfropfens an der Geleitschicht und Scheren des Kernbetons bei hohen Förderraten statt. Die aktuelle Herausforderung besteht darin, die Scherrate zu ermitteln, bei der sich Beton in der Leitung nicht länger als Pfropfen bewegt, sondern auch außerhalb der Geleitschicht geschert und verformt wird.



c) d)
Bild 22. Vergleich zwischen der Vorhersage aus dem analytischen Modell (Tribo-/Viskosimeter), Sliper, optimiertem Nomogramm und den Ergebnissen aus den Pumpversuchen (großmaßstäbliche Strecke) für Normalbetone a) K mit runder und b) S mit gebrochener Gesteinskörnung und für Hochleistungsbetone c) selbstverdichtender und d) Stahlfaserbeton.

4.6 EINFLUSS DES PUMPENS AUF DIE FRISCH- UND FESTBETONEIGENSCHAFTEN

Bild 23 stellt die Ergebnisse für die mit dem Tribometer und Viskosimeter ermittelten rheologischen Parameter für Gleitschicht und Kernbeton für die beiden Betonalter von 20 und 60 Minuten, d. h. vor und nach dem 1. Pumpvorgang dar.

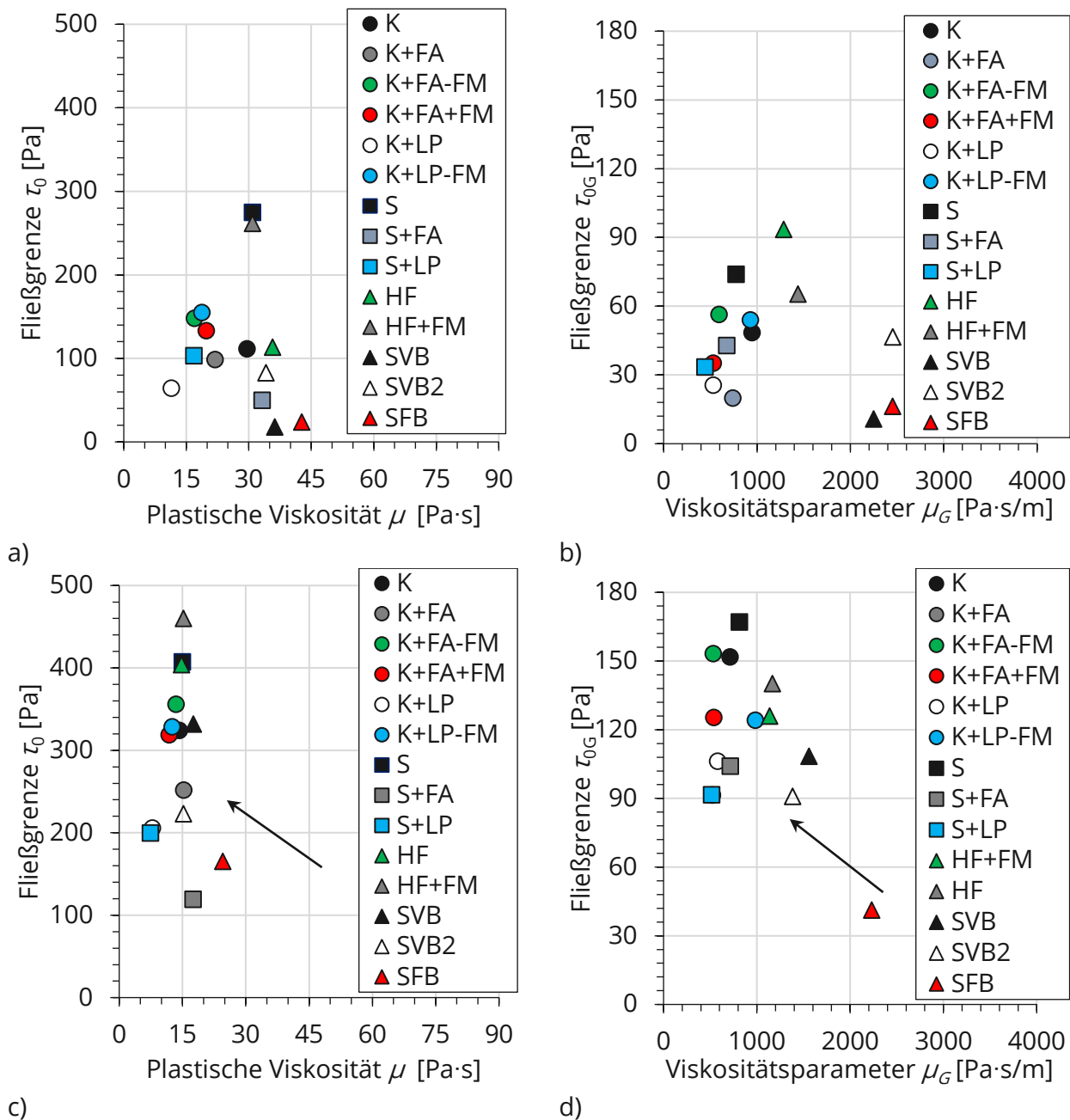


Bild 23. a, b) Rheologische Eigenschaften des Kernbetons und der Gleitschicht a,b) vor und c,d) nach dem 1. Pumpvorgang.

Der Pumpprozess erfolgt unter sehr hohen Scherraten und führt für alle Mischungen zu einer Reduzierung der Viskositätsparameter μ und μ_G . Aus der Erfahrung ist bekannt, dass eine Erhöhung des Luftgehaltes zu einer Reduzierung der Viskositätsparameter führt. Diese Erfahrungswerte konnten bei allen Frischbetonuntersuchungen bestätigt werden, vgl. **Tabelle 8**.

Tabelle 8. Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen für alle untersuchten Betone vor (links) und nach (rechts) dem 1. Pumpvorgang.

Mischung	Ausbreitmaß / Setzfließmaß* [mm]		Dichte [kg/dm ³]		Luftporengehalt [%]		Temperatur [°C]		Druckfestigkeit [MPa]	
K	500	380	2,37	2,27	1,40	4,20	22,5	26,2	59,0	55,6
K+FA	550	450	2,39	2,30	1,30	3,70	20,5	23,3	48,9	44,8
K+FA-FM	560	385	2,40	2,31	1,20	2,20	25,5	28,5	48,7	46,6
K+FA+FM	555	430	2,39	2,31	0,75	2,60	27,5	32,5	46,1	46,0
K+LP	620	510	2,30	2,25	3,70	5,10	23,8	25,7	45,7	40,4
K+LP-FM	558	385	2,30	2,26	4,90	5,10	20,0	24,9	49,4	46,5
S	450	375	2,43	2,34	0,90	3,10	23,5	29,0	64,7	57,9
S+FA	500	383	2,40	2,31	1,40	3,40	22,0	26,0	53,1	50,6
S+LP	535	415	2,32	2,32	3,10	6,20	26,0	33,0	45,1	38,8
HF	425	333	2,35	2,30	2,10	2,80	23,0	31,0	64,3	59,3
HF+FM	570	390	2,38	2,31	1,50	2,70	21,5	27,0	65,2	63,8
SVB	530*	438	2,28	2,28	2,00	2,90	23,0	28,1	64,6	64,1
SVB2	458*	473	2,33	2,29	1,20	2,00	25,8	32,0	65,9	64,9
SFB	590	489	2,32	2,28	2,20	3,00	25,0	28,7	74,7	70,8

Die Vermutung liegt nahe, dass aus diesem Grund die Steigung der P - Q -Kurve zum Ende des Pumpvorganges abnimmt, vgl. **Bild 24**. Eine weitere Erklärung für den nichtlinearen Kurvenverlauf liefert die Tatsache, dass während des Pumpens der Pumpenkolben nicht vollständig mit Beton ausgefüllt und dafür teilweise Luft mechanisch in den Pumpbeton eingebracht wird. Diese zusätzliche Luft wird während eines ablaufenden Pumpvorganges normalerweise zum großen Teil wieder mit dem Beton herausgedrückt. Ein Teil verbleibt aber im Beton. Der Prozess verläuft ausgesprochen deutlich und abrupt in steilen Rohrleitungen, wenn der Beton im „freien Fall“ stürzt [5]. Ein solcher Versuchsaufbau war jedoch kein Bestandteil der ausgeführten Experimente gemäß Rohrleitungsgeometrie, vgl. **Bild 13**. Ähnliche Zustände stellen sich aber beim praktizierten Kreislaufpumpen bei der Übergabe des Betons aus dem Endschlauch in den Einlasstrichter der Betonpumpe ein.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Parameter der Fließgrenze τ_0 und τ_{0i} zum Ende des Pumpprozesses signifikant ansteigen, d.h. der Vorgang des Pumpens zu einer Reduzierung der Konsistenz führt.

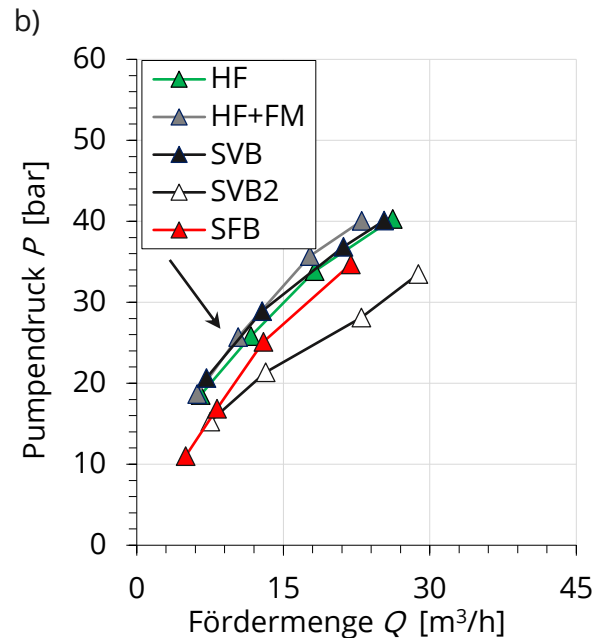
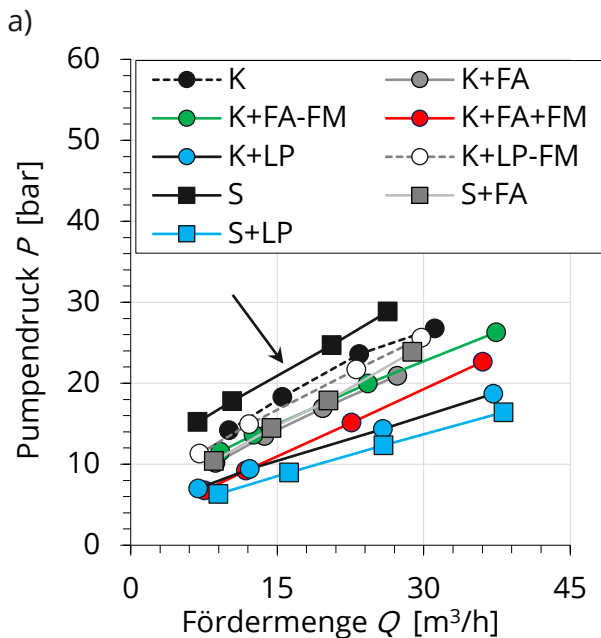
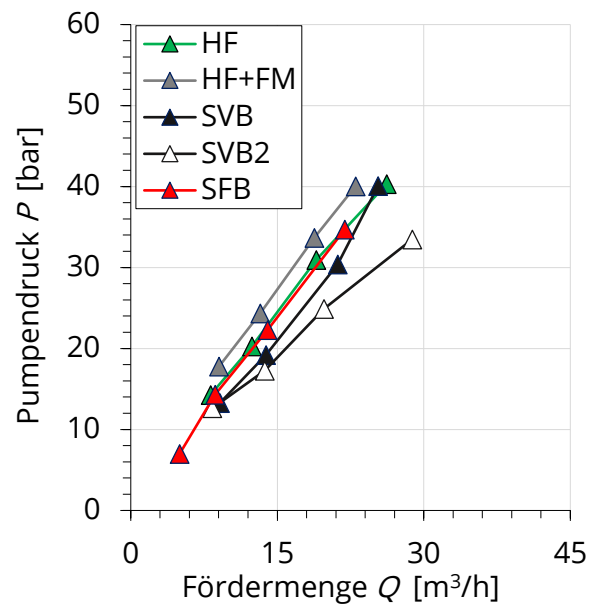
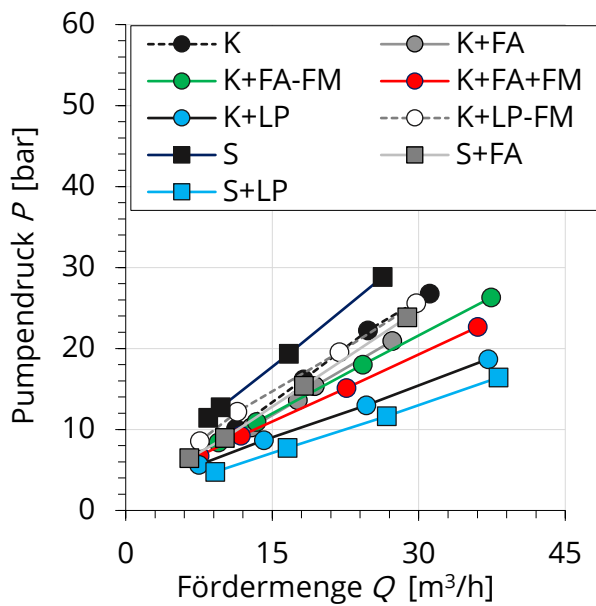


Bild 24. Ergebnisse aus den großmaßstäblichen Pumpversuchen a, b) für die aufwärts gerichteten und c, d) abwärts gerichteten P - Q -Kurve während des 1. Pumpvorgangs.

Ein starker Anstieg der Fließgrenze geht mit der Verminderung des Durchmessers des Betonkuchens konform, der in Ausbreit- oder Setzfließmaßversuchen vor und nach dem Pumpen ermittelt wurde, vgl. **Tabelle 8**. Eine Begründung liefert der Anstieg der Betontemperatur aufgrund Reibung des Pumpbetons an der Rohrwandung. Damit ändert sich zum einen die Wirksamkeit von Fließmitteln, zum anderen finden Festkörperbildungen aufgrund früher Hydrationsprozesse beschleunigt statt [14,26]. Während der Pumpversuche wurde eine Erhöhung der Betontemperatur um 3 K für normale Betone und bis zu 8 K für Sonderbetone während der 24-minütigen Verweildauer des Materials im Pumpkreislauf festgestellt.

Während jedes Pumpvorganges wurde die Betontemperatur kontinuierlich überwacht. Das **Bild**

25 zeigt deutlich das Ansteigen der Temperatur im Laufe des Pumpvorganges anhand der Normalbetone K sowie S und der Sonderbetonen SVB sowie SFB. Die entsprechende Temperaturentwicklung hängt stark von Pumpzeit und Pumpendruck ab.

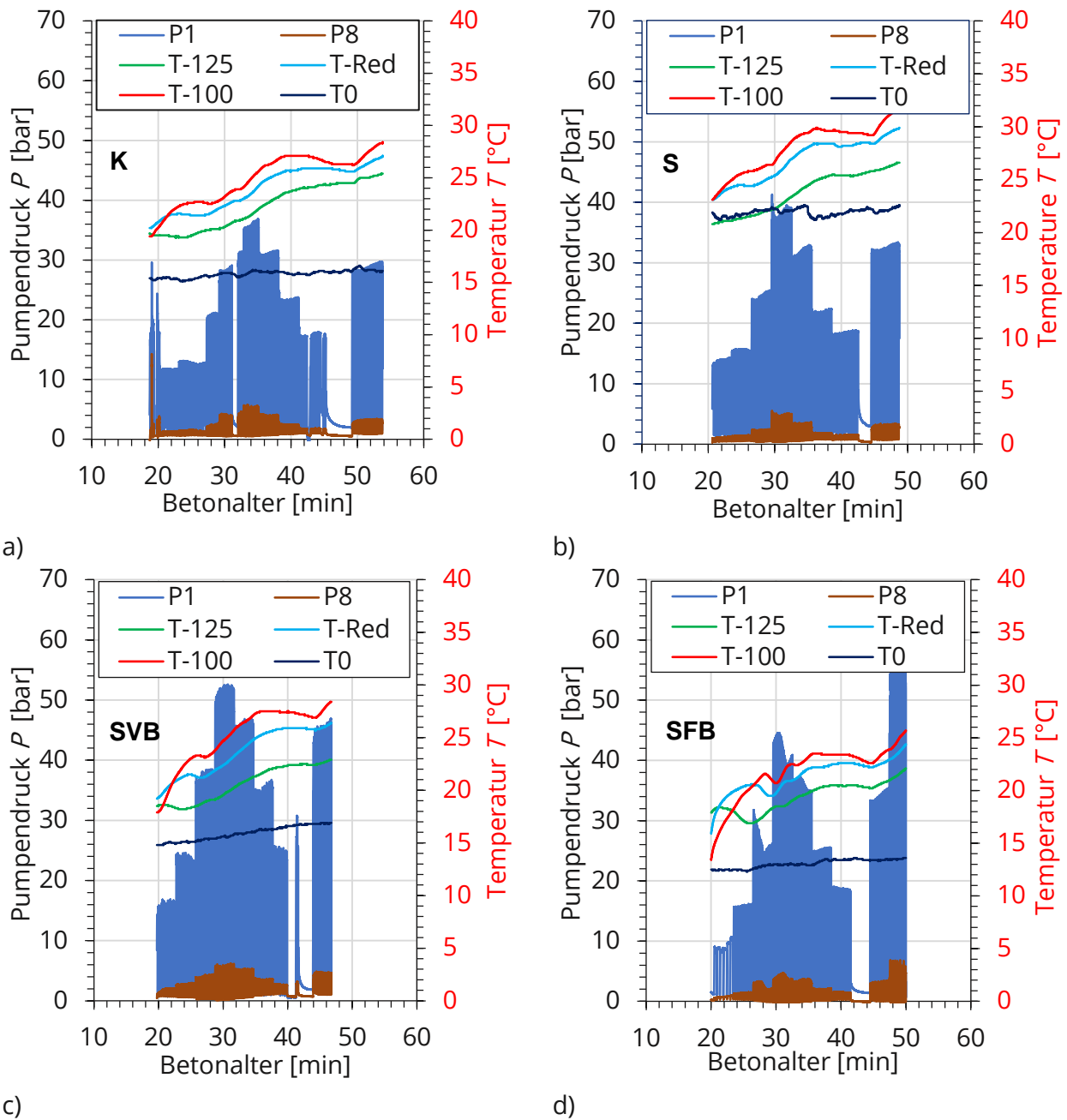


Bild 25. Zeitliche Entwicklung der Temperatur während des 1. Pumpvorganges für die Mischungen a) K, b) S, c) SVB und d) SFB.

Die Bezeichnung T-125, T-Red und T-100 korrelieren mit den an verschiedenen Stellen eingebauten Temperatursensoren am Rohrabschnitt DN 125, nach der Reduzierung und am Rohrabschnitt DN 100. Der Sensor T0 diente zur Messung der Außentemperatur.

Während des Pumpens wird ein Großteil der mechanischen Energie der Pumpe durch Reibung an der Rohrwand und im geförderten Beton in Wärme umgewandelt, die zur einer Erhöhung der Temperatur im Beton und an der Rohrwandung führt. Die Reibungsvorgänge beziehen sich

größtenteils auf die viskose Energiedissipation im Betonleim und auf die Reibung zwischen einzelnen Gesteinskörnungen während des Passierens des Betons durch die Rohrleitung. Die Ergebnisse in **Bild 25** bestätigen, dass die Temperaturanstiegsrate quasi linear mit dem Pumpendruck korreliert und bei hohen Druckverlusten ausgeprägter verläuft.

Es wird allgemein angenommen, dass die Rate des Temperaturanstiegs stark mit der Betonzusammensetzung zusammenhängt. Allerdings gab es hinsichtlich der Praxisversuche des Vorhabens keine Anzeichen für Korrelationen mit irgendeinem Parameter außer dem Pumpendruck. Vielmehr ist zu erkennen, dass die Temperatur stark abhängig von dem Rohrleitungsdurchmesser ist. Das erscheint logisch, denn je kleiner der Rohrdurchmesser, desto größer sind die Scherrate und die entstehende Reibung in der Gleitschichtzone zwischen dem Beton und der Rohrwandung. Der dadurch resultierende Temperaturunterschied kann zirka 4 K erreichen.

Bei den Normalbetonen in **Tabelle 8** mit $(W/Z)_{eq}$ von 0,50 bis 0,55 liegen die Druckfestigkeiten der gepumpten Festbetone im Bereich von 45 bis 65 N/mm² für den Untersuchungszeitpunkt vor dem Pumpen und zwischen 38 und 57 N/mm² nach dem Pumpen. Die Sonderbetone mit $(W/Z)_{eq}$ von 0,39 bis 0,44 erreichten eine Druckfestigkeit im Bereich von 64 bis 75 N/mm² vor dem Pumpen und zwischen 59 und 71 N/mm² nach dem Pumpen. Die geringe Verringerung der Druckfestigkeit zwischen den beiden Untersuchungszeiten ist im Wesentlichen auf den größeren Luftgehalt nach dem Pumpen zurückzuführen. Diese Tatsache sollte sowohl bei dem Entwerfen von Betonrezepturen als auch bei der Gestaltung des gesamten Pumpenvorganges Berücksichtigung finden.

4.7 ERKENNTNISSE UND EMPFEHLUNGEN ZUR PRAKTISCHEN GESTALTUNG DES PUMPVORGANGS

4.7.1 VORLAUFMISCHUNGEN

Der Einsatz einer Vorlaufmischung ergibt sich in erster Linie aus der Notwendigkeit der Vorschmierung der inneren Rohrflächen beim Anpumpen. Die Mischung wird meistens unter Verwendung eines feinen Mörtels mit einem Wasser-Zementwert größer 0,5 [73,74] hergestellt. Damit wird die Innenwandung benetzt und mit einer dünnen Gleitschicht ausgestattet, die die Reibung zwischen Rohrmaterial und Pumpbeton verringert. Das Risiko eines Stopfers wird in dieser Pumpphase erheblich reduziert, da diese Störung größtenteils beim Anpumpen auftritt [75]. Zusätzlich wirkt sich die Vorlaufmischung positiv auf einen geringeren Verschleiß sowohl des Pumpenaggregates als auch der gesamten Rohrleitung aus [76].

Das erforderliche Volumen an Vorlaufmischung kann für die Ausbildung der Gleitschicht mit einer üblichen Dicke e von einigen Millimetern im Voraus berechnet werden, vgl. **Tabelle 9**.

Tabelle 9. Erforderliches Volumen an Vorlaufmischung für eine gegebene Gleitschichtdicke e in Abhängigkeit der Rohrleitungsgeometrie bei den großmaßstäblichen Pumpversuchen.

e [mm]	Abschnitt DN125		Abschnitt DN100		Volumen Vorlaufmischung [m ³]	
	Radius R [mm]	Rohrlänge L [m]	Radius R [mm]	Rohrlänge L [m]	Theoretisch	Ist
5	62.5	79	125	75	0,26	0,50-0,75
10					0.50	

Zu beachten ist, dass das theoretische Volumen an Vorlaufmischung nicht zwangsläufig dem realen Ist-Volumen entspricht, da dieses in der Praxis von mehreren spezifischen Parametern inklusive der Betonzusammensetzung und der Betonfördermenge abhängt.

In der Literatur werden konkrete Beispiele zur Qualität der Vorlaufmischung und ihrer Wechselwirkung mit dem Pumpbeton erläutert [73,75]. Die Bedeutung der Schmierung der Rohrinne wandung mit einem verdünnten Mörtel wird hervorgehoben und explizit diskutiert. Nicht spezifiziert ist, wie derartige Mischungen unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften des Pumpetons entworfen werden sollen. Außerdem wird ihre Qualität meistens nicht überprüft bzw. definiert reproduzierbar abgesichert.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die Qualitätskontrolle der Vorlaufmischung nach Erfahrung visuell vorgenommen. Bei den großtechnischen Versuchen betrug das eingesetzte Materialvolumen jeweils ca. $0,50 \text{ m}^3$. Nach mehreren Stopfern pro Versuch wurde das Volumen auf $0,75 \text{ m}^3$ erhöht.

Die Rezeptur für die Vorlaufmischung des Projektes wurde seitens des Betonwerkes konzipiert. Die Mischung mit einem Wasser-Bindemittelwert von 0,5 enthielt ca. 40 Vol.-% Sand mit einer maximalen Korngröße von 2 mm. Nach ihrer Herstellung wurde die Vorlaufmischung vor dem Pumpenvorgang direkt in die Pumpe eingebracht, vgl. **Bild 26a**. Es wurden keine Frischmörtelkennwerte bestimmt. Die rheologischen Eigenschaften der Vorlaufmischung wurden nur in den Fällen empirisch angepasst, in denen mehrere Stopfer nacheinander auftraten. Das passierte hauptsächlich aufgrund einer ungeeigneten Zusammensetzung der Vorlaufmischung, vgl. **Bild 26b**.



a)



b)

Bild 26. . Unterschiedliche Qualitäten der Vorlaufmischung: a) steifere Konsistenz mit einem erhöhten Risiko des Auftretens von Stopfern; b) weichere Konsistenz mit reduziertem Stopfer-Risiko.

Da erweiterte Untersuchungen der Vorlaufmischung nicht Ziel dieses Projektes waren, wurden

lediglich Vorversuche hinsichtlich der Wechselwirkung und Kompatibilität zwischen Vorlaufmischung und Pumpbeton durchgeführt. In der Praxis werden zwei verschiedene Ansätze in Anlehnung an [73] verfolgt:

- Der Pumpbeton wird in den Aufgabetrichter bereits eingebracht, wenn dieser noch eine größere Menge an Vorlaufmischung enthält, um den Pumpbeton kurz vor dem Pumpenvorgang „einzuschmieren“.
- Der Pumpbeton wird in den Aufgabetrichter erst dann eingebracht, nachdem die Vorlaufmischung vollständig in die Rohrleitung gedrückt wurde, um die Qualität des Pumpbetons unverändert zu belassen.

Von beiden Ansätzen wurde der zweite als am besten funktionierend eingeschätzt und im Rahmen dieses Vorhabens verwendet.

Allgemein wird empfohlen, ein doppeltes Volumen bei Ermittlung an Vorlaufmischung nach **Tabelle 9** vorzupumpen. Es müssen Möglichkeiten eingerichtet werden, das Material zusammen mit einem Teil des von der Vorlaufmischung behafteten Pumpbetons vor Ort zu sammeln und zu entsorgen. Ein wichtiger Aspekt betrifft die Dichtungen der Rohrschellen, die sich zwischen zwei benachbarten Rohrleitungssegmenten befinden. In den oft vorhandenen kleinen Spalten wird ein Teil der Vorlaufmischung zur Ausfüllung dieser verbraucht.

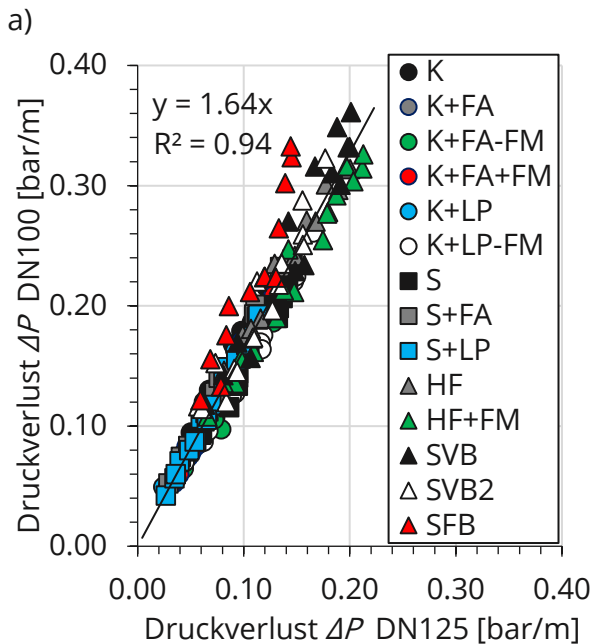
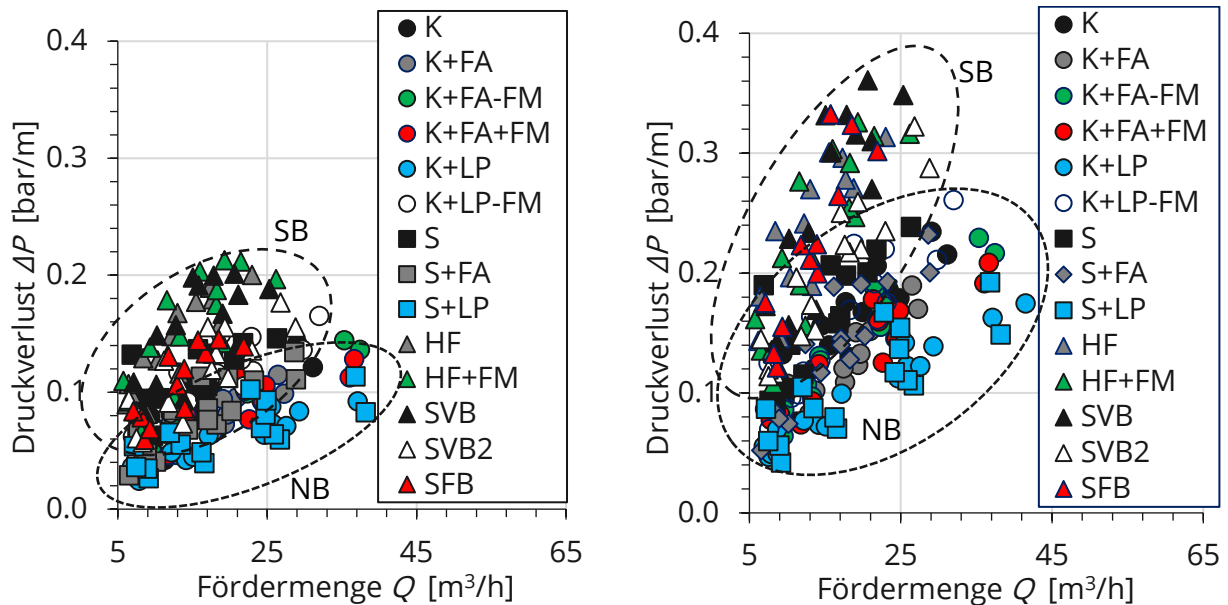
Es kommt oft vor, dass der Pumpenbediener die Qualität der Vorlaufmischung durch Wasserzugabe vor Ort direkt im Aufgabetrichter subjektiv gemäß seiner Erfahrung einstellt. Da das Rührwerk im Aufgabetrichter nicht zum Durchmischen des Betons geeignet ist, sondern eher lediglich den Beton in Bewegung halten soll, kann das nachträglich zugegebene Wasser nicht gleichmäßig in der Mischung verteilt werden. Daher wird vorgeschlagen, analog zum Pumpbeton eine spezifische Qualitätskontrolle der rheologischen Eigenschaften der Vorlaufmischung durchzuführen und deren Kompatibilität mit dem Pumpbeton zu überprüfen.

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von speziellen, sehr praktikablen Vorlaufmischungen entwickelt und auf den Markt gebracht. Diese auch Primer genannten Produkte sind polymerbasiert, werden in Pulverform hergestellt und vor Ort direkt mit Wasser angemischt. Der Hersteller verspricht, dass die entstehende Vorlaufmischung die Reibung während des Pumpens verringert und damit die Pumpfähigkeit des Betons verbessert [77]. Vorteilhaft wirkt, dass sich die Polymermischung in der Rohrleitung gleichmäßig verteilt und deren separate Entsorgung entfällt. Es bleiben jedoch offene Fragestellungen, beispielsweise, ob Auswirkung der Vorlaufmischung auf Frisch- und Festbetoneigenschaften auftreten.

4.7.2 ROHRGEOMETRIE

Um die Rohrstrecke praxisnah zu gestalten und wichtige Erkenntnisse zu Druckverlusten in der Leitung und zum Strömungsverhalten des Pumpbetons in Krümmungen zu erhalten, wurden zum einen bei den geraden Rohrabschnitten zwei unterschiedliche Durchmesser gewählt und ein Reduzierstück verwendet sowie zum anderen in die Rohrgeometrie drei 180° Bögen mit zwei verschiedenen Durchmessern eingebaut. Wesentliche Details zur Rohrleitungsgeometrie und den Messstellen der Drucksensoren sind in **Abschnitt 3.4** zu finden. **Bild 27** stellt den Druck-

verlust in den geraden Rohrabschnitten bezüglich der beiden unterschiedlich gewählten Durchmesser von DN100 und DN125 bzw. in Abhängigkeit der Förderrate für die untersuchten Betonarten dar.

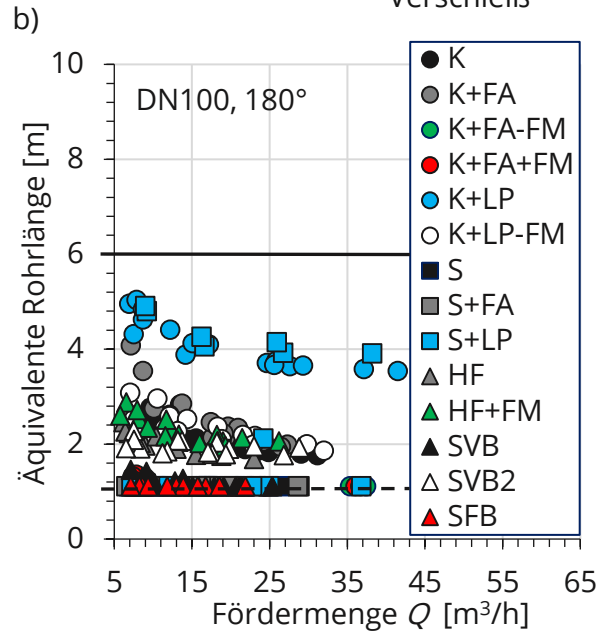
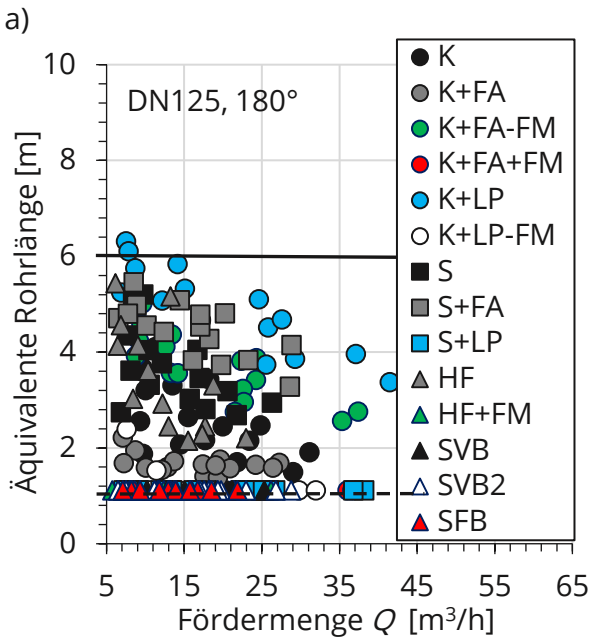
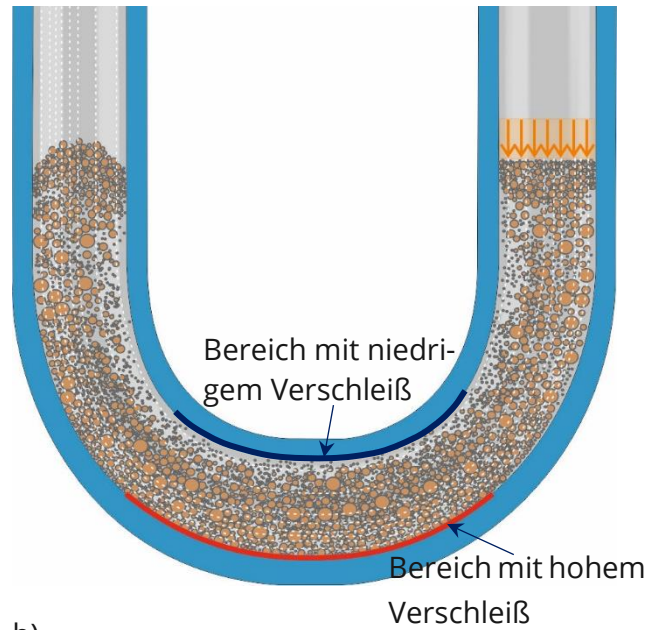


c) **Bild 27.** Druckverlust in geradem Rohr in Abhängigkeit unterschiedlicher Rohrdurchmesser a) DN125 und b) DN100; c) Druckverlust in Gegenüberstellung der unterschiedlichen Rohrdurchmesser (NB=Normalbetone, SB=Sonderbetone).

In allen Fällen erhöht sich zunächst der Druckverlust mit zunehmender Förderrate. Festgestellt wurde eine Abhängigkeit des Druckverlustes von der Betonart: Normalbetone (NB) weisen im Vergleich zu Hochleistungsbetonen (HL) generell einen geringeren Druckverlust auf. Der Unterschied im Druckverlust zwischen den beiden genannten Betonarten nimmt mit abnehmendem Durchmesser zu, vgl. **Bilder 27a** und **27b**. Dies kommt vor allem bei den hohen bzw. sehr hohen

Scherspannungen, die in den Rohrleitungen mit kleinerem Durchmesser auftreten, zum Tragen. Daraus resultiert ein unterschiedliches Rheologieverhalten der Betone: HL weist ein ausgeprägtes dilatantes Verhalten („scherverfestigend“) gegenüber NB auf [78]. Es herrscht dementsprechend ein deutlich höherer Fließwiderstand, der zu einem stärkeren Druckverlust bei steigender Schubspannung führt. Für alle Betonmischungen ist der Druckverlust im Rohrabschnitt mit dem Durchmesser DN100 vergleichsweise um 64 % größer als im Rohrabschnitt mit dem Durchmesser DN125, vgl. **Bild 27c**. Dieses Ergebnis findet tendenzielle Bestätigung in der Literatur. Für eine Fördermenge von mehr als 40 m³/h wird eine Differenz von bis zu 100 % zwischen den beiden betrachteten Durchmessern angegeben [20]. Der Druckverlust entlang der Rohrleitung kann nicht zwangsläufig als rein linear bezeichnet werden. Das ergibt sich daraus, dass die Reibung an der Rohrwandung nicht nur von den Geschwindigkeitsprofilen des gepumpten Betons abhängt [45], sondern auch von den Eigenschaften der ausgebildeten Gleitschicht.

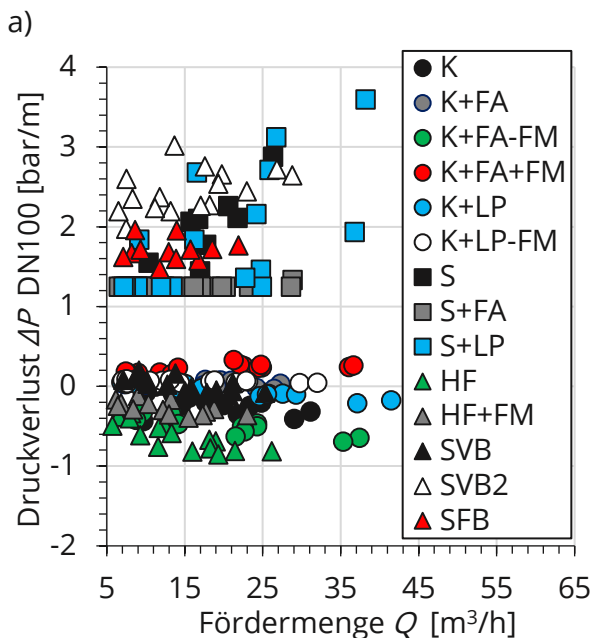
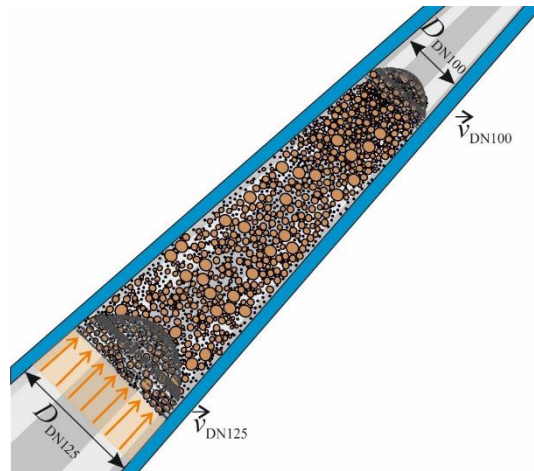
In diesem Vorhaben wurde auch der Einfluss von 180° Bögen in der Rohrleitung jeweils für die beiden Rohrdurchmesser DN125 und DN100 untersucht, vgl. **Bilder 28a**. **Bild 28b** zeigt schematisch den Strömungszustand des Betons in einem Rohrbogen, der stark von der strömungsinduzierten und fliehkraftbedingten Wanderung der größeren Gesteinskörnung des Pumpbetons dominiert wird. In den Bögen ist die „äußere“ Wandfläche größer als die „innere“. Dadurch wird die Gleitschicht an der größeren Rundungsfläche allmählich dünner. Dies führt gerade in diesem Bereich zu einem starken Verschleiß des Stahlrohrs, währenddessen die kleinere innere Krümmungsfläche mit feinen Partikeln angereichert wird [76]. Sie ist daher einem wesentlich geringeren Verschleiß ausgesetzt. Sobald der Beton die kritische Zone eines Bogens passiert hat und erneut in ein gerades Rohrstück einfließt, ist er bestrebt, seine vorherigen Eigenschaften einschließlich der gut ausgebildeten Gleitschicht wiederherzustellen. Diese Phase kann als Konsolidierungs- oder Beruhigungsphase betrachtet werden [71,72]. Der jeweilige Druckverlust im Pumpbeton infolge der Wirkung beider Rohrbögen wurde mit den vor und nach der Krümmung eingebauten Drucksensoren gemessen (P2-P3 bzw. P5-P6). Der Druckverlust infolge Bögen wird pro Längeneinheit Meter angegeben und mit dem in einem geraden Rohr wirkendem verglichen. Als Ergebnis erhält man den Druckverlust bezogen auf eine äquivalente Länge gerader Rohrleitung. Für nahezu alle untersuchten Betonmischungen übersteigen die aus den existierenden Richtlinien [4] entnommenen äquivalenten Rohrlängen diejenigen äquivalenten Längen, die in den Pumpversuchen ermittelt wurden, vgl. **Bilder 28c** und **28d**.



c) d)
Bild 28. a) 180° Bögen mit zwei unterschiedlichen Rohrdurchmessern b) schematische Darstellung des Betonströmungsverhaltens im Rohrbogen [51]; resultierende äquivalente Rohrlänge für die untersuchten Betonmischungen für c) DN125 und d) DN100; Foto Stephan Falk.

Die durchgezogenen schwarzen Linien bezeichnen die empfohlene anzunehmende äquivalente Rohrleitungslänge für Bögen laut existierenden praktischen Erfahrungen; die gestrichelte schwarze Linie repräsentiert die tatsächliche Länge des Rohrbogens. Demzufolge ist die Wirkung der Krümmung hinsichtlich Umlenkung der Betonströmung bzw. des zusätzlich auftretenden Druckverlustes nicht vernachlässigbar. Trotz der größeren Streuung der Werte jeder Betonmischung kann bestätigt werden, dass die äquivalente Länge mit zunehmender Fördermenge abnimmt. Diese vorgefundenen Tendenzen stimmen mit den in [24] veröffentlichten Ergebnissen überein.

Die beiden Rohrleitungsabschnitte mit unterschiedlichen Durchmessern wurden in den Experimenten der großmaßstäblichen Praxisversuche durch eine Verjüngung des Rohrdurchmessers verbunden, vgl. **Bild 29a**.



c)

Bild 29. a) Rohrreduzierung und b) schematische Darstellung des Strömungszustand von Beton in einer Reduzierung [51]; c) Druckverlust infolge der Reduzierung.

Um die Auswirkung dieser Reduzierung auf den Pumpendruck zu untersuchen, wurden kurz vor und unmittelbar nach der Reduzierung je ein Drucksensor installiert. **Bild 29b** zeigt schematisch den Strömungszustand des Betons durch den sich verjüngenden Abschnitt des Reduzierstücks. Dieser Abschnitt ist durch eine zunehmende Geschwindigkeit $v_{DN100} > v_{DN125}$ des Betons bei einer konstanten Fördermenge Q entlang der Länge der Reduzierung gekennzeichnet. Bei zirka der Hälfte der untersuchten Betonarten kann der Einfluss der Reduzierung auf den Druckverlust vernachlässigt werden, vgl. **Bild 29c**. Negative Werte des Druckverlustes deuten darauf hin, dass die Reduzierung am Ende des Abschnitts einen Druckanstieg verursacht. Der Zusammenhang zwischen Förderrate und Druckverlust über der Reduzierung kann aufgrund vorliegender signifikanter Datenstreuung nicht beurteilt werden.

Auf der Baustelle ist für die Betonförderung die Wiederverwendung stark gebrauchter Rohrabschnitte auch mit angerosteten Innenflächen üblich, vgl. **Bild 30a**. Eine rostige, raue Rohrwand erhöht den Reibungskoeffizient an der Grenzfläche zwischen Beton und Metallwandung und verringert damit die Fördermenge des Betons bei konstantem Pumpendruck [51,60] stark. Mit der Verwendung von Vorlaufmischungen können rostbeaufschlagte Rohrwandflächen teilweise "geglättet" und das Passieren des Betons durch die Rohrleitung verbessert werden. Zur Lebensdauer von Rohrleitungen existieren keine einschlägigen Regelungen. Ihr „natürlicher“ Verschleiß sollte unbedingt beim Entwerfen (ausreichende Wanddicke) und Zusammenbauen einer Förderleitung (rechtzeitiges Aussortieren nach Sichtprüfung) berücksichtigt werden.



a)



b)



Gehärtete Betonbestandteile

c)

Bild 30. a) Mangelhafte Qualität der Innenwandoberfläche; b) verschlissenes Kupplungselement an Rohrleitung (Rohrschellen) und c) stark gebrauchte Dichtungen in Rohrschellen mit angehärteten Betonbestandteilen.

Der Austausch von sehr stark betroffenen Rohrabschnitten sollte nach einer präzisen Messung ihrer Wandstärken mit dem mechanischen Wandstärkemessgerät [79] erfolgen. Die aufgeführten Maßnahmen sind unabdingbar nicht nur für die Sicherstellung des Transport- und Fließverhaltens des Pumpbetons, sondern zahlen sich auch wirtschaftlich durch geringeren Pumpdruck/-verschleiß bzw. kleineren Energieaufwand aus.

Eine gezielte Aufmerksamkeit sollte den Rohrschellen inklusive Dichtungen dienen. Die benachbarten Rohrsegmente mit Längen von ein, zwei oder drei Meter werden mittels Rohrschellen miteinander gekoppelt. In ihnen befinden sich Dichtungen, um ein eventuelles Danebenlaufen von Mörtel zu verhindern und die Rohrleitung während der Pumpbeanspruchung im abgedichteten Zustand zu halten, vgl. **Bilder 30a** und **30b**. Sollten diese Kupplungselemente verschlissen

oder beschädigt sein, kann die Dichtigkeit der Rohrleitungssysteme nicht ausreichend gewährleistet werden. Hinzu kommt, dass sich im Laufe der Zeit in den Spalten Betonbestandteile ansammeln, die aushärten, gut haften und die Basis für weitere Aufwachsungen bilden. Die anhaftende feste Kruste erzeugt einen erheblichen Reibungswiderstand beim Pumpen und kann entweder zur Bildung eines querschnittsverengenden Betonkranzes mit erhöhtem Förderwiderstand führen. Die beste und einfachste Empfehlung, dem zu begegnen, ist die gründliche und sofortige Reinigung dieser problematischen Stellen am Ende einer jeden Betonage mit sehr viel Wasser.

Üblicherweise werden Gummischläuche für die ortsgenaue Entladung des zu befördernden Betons auf der Baustelle eingesetzt. Diese Schläuche zeichnen sich materialeitig durch eine erhöhte Flexibilität aus und können den Beton in alle Richtungen führen, in denen er benötigt wird. Sie dienen einerseits zum Einsatz am Bau als Verlängerungsleitung oder auch als eine Zwischenbrücke zwischen der Pumpe und der Rohrleitung bzw. allgemein als bewährtes temporäres Überbrückungsglied. Mit ihrem Einsatz wird ein zusätzliches Maß an Freiheit für die Positionierung der Pumpe gewährleistet, da der Schlauchabschnitt schnell montiert und wieder zerlegt werden kann. Nachfolgend ein praktischer Ratschlag, der sich während der großmaßstäblichen Pumpversuche ergab: Es wurde der Gummischlauch am Einlass zur Pumpe absichtlich länger gewählt als der tatsächliche Abstand zwischen der Pumpe und der Rohrleitung, da der Druckanstieg während des Pumpens eine erhebliche Ausdehnung des Schlauchs in Pumprichtung verursacht, vgl. **Bild 31**. Eine unvorsichtige Handhabung von Schläuchen während des Pumpens, d. h. eine starke Biegung oder teilweise Beschädigung des Schlauches (Befahren) sollte unbedingt vermeiden werden. Sie kann zu Verstopfungen, Versagen des Schlauches mit Abplatzen und Umherspritzen des unter Druck stehenden Betons und damit sogar zu ernsthaften Personenverletzungen führen.

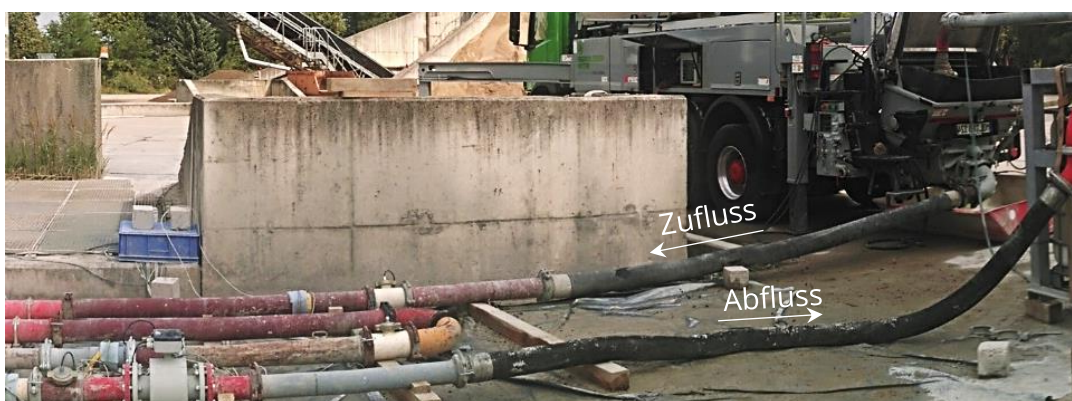


Bild 31. Gummischläuche, im Einsatz bei den Pumpversuchen (hier Kreislaufführung).

Förderschläuche sind oft und kontinuierlich einer hohen Belastung ausgesetzt. Durch den Gebrauch im Außenbereich (UV-Belastung), betonseitige Wärmeentwicklungen und herrschende Druckbeaufschlagungen können Ermüdungserscheinungen und Versprödungen auftreten. Im Blickpunkt müssen die Qualität und Langlebigkeit des Schlauchmaterials sein.

4.7.3 STOPFER

Die Verstopfung der Rohrleitung gehört zur häufigsten Störung in einem Pumpvorgang. Die Hauptursache für diesen Störfall resultiert aus unpassender bzw. mangelhafter Betonzusammensetzung und/oder Vorlaufmischung. Lediglich ein Zehntel der Beeinträchtigung kann auf Bedien- bzw. Prozessfehler zurückgeführt werden. Laut Kaplan [73] lassen sich die folgenden Störarten hinsichtlich zeitlichem Pumpablauf unterscheiden in:

- Stopfer bei Anpumpen;
- Stopfer während eines laufenden Pumpvorgangs infolge kurzer Unterbrechung;
- Stopfer während der Endreinigung der Rohrleitung.

Grundvoraussetzung für die Ausbildung einer Verstopfung ist die im Pumpbeton vorhandene groben Gesteinskörnung. Sie kann sich unter Umständen über den Rohrquerschnitt zusammenballen, wodurch sich örtlich ein immer dichter gepacktes Gefüge aus grober Gesteinskörnung ausgebildet. Eine Scherung dieses Gefüges wird zunehmend erschwert und die Gleitschicht in diesem Bereich verdrängt. Auf diese Weise wirkt die Materialverdichtung der Vorwärtsbewegung des Betons entgegen. Wenn der Betonstrom im Rohr zum Stehen kommt, steht der Förderdruck der Pumpe in voller Höhe im auf der von der Blockierung betroffenen Rohrlänge an. Druckminderungen durch Reibung können nicht stattfinden. Damit besteht die Gefahr, dass geschwächte Förderleitung platzt.

Im Rahmen dieses Vorhabens mit der Durchführung von insgesamt 26 großmaßstäblichen Pumpversuchen kam es sechs Mal zu einer Blockierung der Rohrleitung. Alle Stopfer fanden grundsätzlich während des Anpumpens des Frischbetons nach der Einbringung der Vorlaufmischung in die Rohrleitung statt. Beispiele für Blockierungen mit ihren möglichen Ursachen sind in **Bild 32** veranschaulicht. Sie traten hauptsächlich in den Rohrbögen, der Reduzierung und in der Umgebung des Durchflussmessers auf.



a)

b)

c)

Bild 32. Mögliche Ursachen für Rohrverstopfungen: a) mangelhafte Zusammensetzung der Vorlaufmischung; b) fehlerhafte Zusammensetzung der Betonmischung; c) unzureichende Mischungsstabilität des Betons [30].

Hauptursächlich für die in **Bild 32a** gezeigten Verstopfungen ist eine ungeeignete Zusammensetzung der Vorlaufmischung mit mangelhafter Konsistenz, die die Ausbildung einer funktionierenden Gleitschicht nicht zuließ. Im zweiten Fall (**Bild 32b**) erzeugte die Vorlaufmischung ebenfalls nicht genügend Gleitschicht. Das Fehlen einer Gleitschicht führt generell zu einer erhöhten Reibung zwischen der Rohrwandung und dem Beton, die den wirkenden Pumpendruck nicht zu überwinden vermag. Der im **Bild 32c** dargestellte Beton wies eine zu geringe Stabilität auf. Die Zuschlagstoffbestandteile waren über den Rohrquerschnitt nicht mit dem für einen gleichmäßigen Fließvorgang notwendigen Schmiermaterial umhüllt. Es folgte eine Verzahnung der gröberen Gesteinskörnungen, die letztlich die Blockierung der Rohrleitung verursachte.

Bei Auftreten einer Blockade versuchte der Pumpenbediener diese sofort und auf relativ einfache Art und Weise zu beseitigen, indem er die Richtung des Pumpenvorgangs abwechselnd umkehrte: Zurücksaugen, erneutes Anpumpen usw. In solchen Störfällen hängt viel vom Geschick und von der Erfahrung des Pumpenbedieners ab um die Pumpe nicht zu überstrapazieren und ein eventuelles Platzen der Rohrleitung zu vermeiden. Falls sich auf diese Weise der Stopfer nicht löste, musste die Förderleitung druckentlastet, der genaue Ort der Störung detektiert, der verstopfte Teilabschnitt manuell ausgebaut und gereinigt werden. Bei derartigen Ausbauaktionen muss aus Sicherheitsgründen unbedingt darauf geachtet werden, dass die Rohrleitung druckfrei ist, um Personen- oder Sachschäden zu vermeiden. Bei geöffnetem Rohr wird Am Ende der Verstopfung der in seiner Zusammensetzung gestörte Beton entnommen, damit das nachfolgende, ungestörte Material wieder eine wirksame Gleitschicht aufbauen kann, vgl. **Bild 33**.



a)

b)

Bild 33. a) Unterbrechung des Pumpvorgangs nach einem Rohrstopfer und b) Fortsetzen des Pumpvorgangs nach seiner Beseitigung [30].

Jede Blockade führte selbst bei sehr zügigen Reaktionen des Personals zu einer Zeitverzögerung zwischen 15 und 20 Minuten. Meistens war es möglich, die Verstopfung wie oben beschrieben zu beseitigen und das Pumpen gemäß dem Gesamtablaufplan der Versuche zu garantieren, vgl. **Bild 14**. Als allgemeine Anmerkung wird dringend empfohlen, die Pumpmannschaft ausreichend zu schulen und vorzubereiten, um in einer solchen Situation schnell handeln zu können.

Dadurch können sowohl exzessive Zeitverzögerungen des Bauprozesses als auch eine unerwünschte und vorzeitige Versteifung des Pumpbetons in Rohrleitungen mit größeren negativen Auswirkungen vermieden werden.

Was genau in der Rohrleitung während einer Blockade und bei aufeinanderfolgenden Stopfern hinsichtlich des Pumpendrucks passiert, ist in **Bild 34** für die Referenzmischung K ersichtlich.

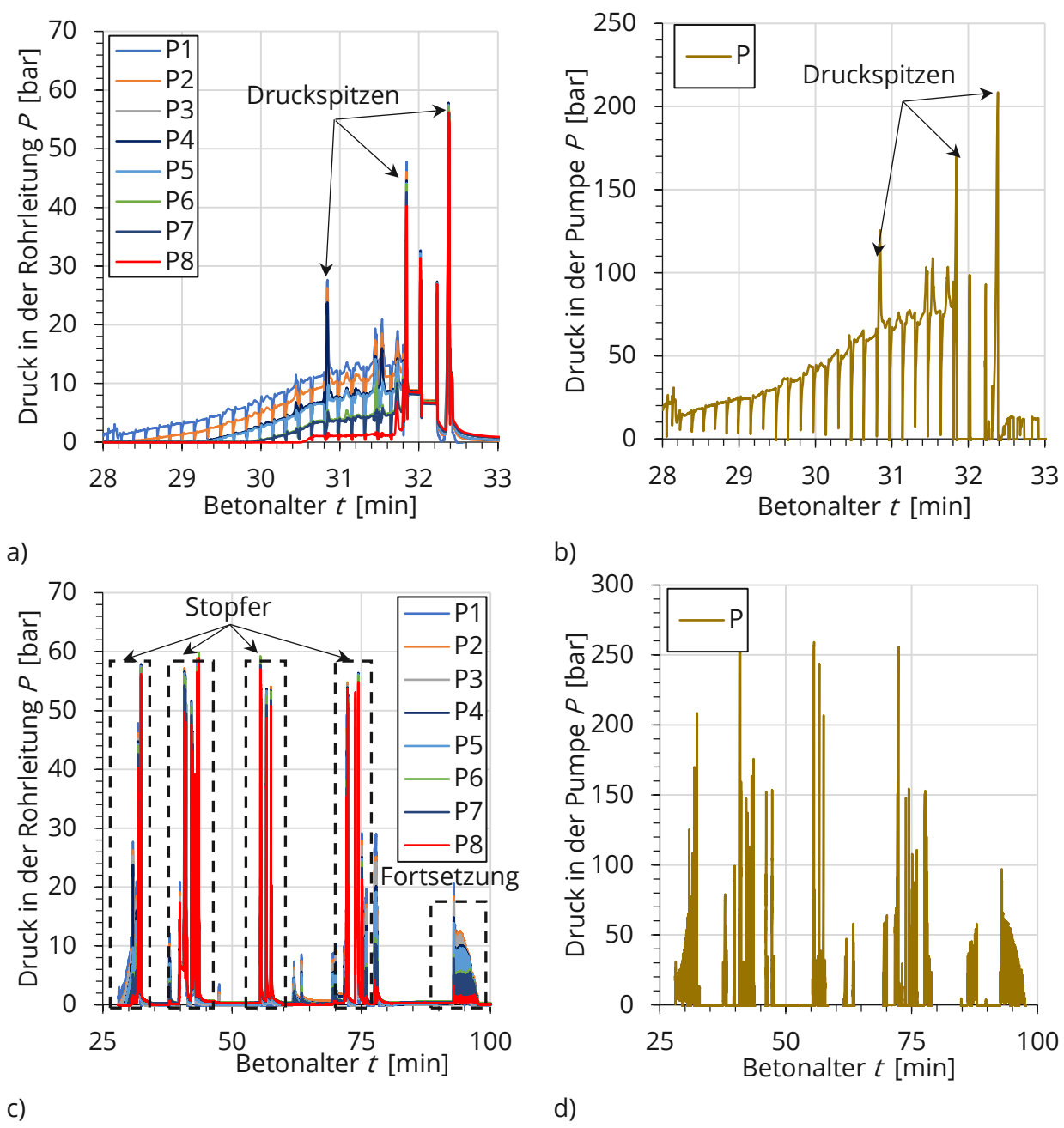


Bild 34. Druckentwicklung während einer Blockade beim Anpumpen in der a) Rohrleitung und b) Pumpe; typische Druckspitzen gemessen in der c) Rohrleitung und d) Pumpe für aufeinander folgende Stopfer bei vollständig gefüllter Pumpleitung; P1-P8 beziehen sich auf die Drucksensoren; Die Diagramme links und rechts haben unterschiedliche Maßstäbe.

Die erste Druckspitze in **Bild 34a** veranschaulicht die Bildung bzw. das Auftreten des Stopfers in der Nähe des Drucksensors P4 und kurz vor der Reduzierung, vgl. **Bild 13**. Der Beton konnte

beim Anpumpen durch die Rohrleitung gedrückt werden, bis er den Drucksensor P8 erreichte und schließlich ein Rohrsegment in diesem Bereich verstopfte. Die letzten Druckspitzen in der Rohrleitung deuten darauf hin, dass der Pumpenbediener mehrere Male vergeblich durch Zurrücksaugen und Anpumpen versucht hat, den Pumpvorgang fortzusetzen. Dabei stieg der Öldruck in der Pumpe auf über 200 bar an, vgl. **Bild 34b**.

Obwohl es zu keiner Überschreitung der Druckkapazität der Pumpe kam, wurde beschlossen, die Rohrleitung sorgfältig zu öffnen und die mit Beton verstopften Abschnitte zu reinigen, um danach das Pumpen wieder aufzunehmen, vgl. **Bild 34c**. Innerhalb von 50 Minuten traten bei diesem Pumpversuch weitere drei Stopfer stets in der Nähe des Drucksensors P8 auf, vgl. die rote Linie im Diagramm.

Bei der Endreinigung der Rohrleitung wurde festgestellt, dass bei dem ausgetretenen Beton nicht genügend Gleitschicht an der inneren Rohrwandung vorhanden war. Dies wird als Ursache für die Stopferausbildung angenommen. Der entsprechende Druck in der Pumpe überschritt 250 bar, vgl. **Bild 34d**. Das Pumpen konnte erst im Betonalter von 90 Minuten vollständig wiederaufgenommen werden.

Sobald der zu pumpende Frischbeton erfolgreich durch die gesamte Rohrleitung gefördert wurde und deren Ende erreicht hat, nimmt das Risiko für das Auftreten eines Stopfers stark ab. Ursache für die höhere Betriebssicherheit der Pumpstrecke ist das Vorliegen einer funktionierenden Gleitschicht.

Verschiedene Betonarten reagieren unterschiedlich auf eine Unterbrechung des Pumpvorgangs. Kurze Stopps sind besonders kritisch für leicht instabile Betone. Sie können zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Wiederaufnahme des Pumpprozesses führen oder sogar Stopfer provozieren. Ein weiteres beachtenswertes Beispiel stellen Betone mit einem ausgeprägten thixotropen Verhalten dar (z. B. selbstverdichtende Betone) [22,80], die während einer Unterbrechung des Pumpvorganges einen erheblichen Strukturaufbau aufweisen, die den Pumpendruck beim Wiederanpumpen stark erhöhen.

Während der Pumpexperimente wurde versucht, das Szenario einer kurzen Unterbrechung nachzustellen und zu analysieren: Nach 24 Minuten kontinuierlichem Pumpens bei verschiedenen Förderraten wurden alle untersuchten Betone für 3 Minuten in der Rohrleitung ruhen gelassen. Das Pumpen wurde dann für weitere 3 Minuten neu gestartet. Es konnte keine signifikante Erhöhung des Pumpendrucks beobachtet werden. Eine 3-minütige Ruhezeit ist höchstwahrscheinlich viel zu kurz dafür, dass der Beton einen ausgeprägten Strukturaufbau erfährt.

4.7.4 WETTERBEDINGUNGEN

Die umfangreichen großmaßstäblichen Experimente des Projektes wurden im September unter relativ milden Witterungsbedingungen durchgeführt, vgl. **Abschnitt 3.4**. Da die Temperatur an einigen Tagen stundenweise 30 °C erreichte, wurde beschlossen, die kritischsten Abschnitte der Rohrleitung vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen: Beide Endabschnitte der Rohrleitung einschließlich der Bögen und des Durchflussmessers wurden unter zwei Zelte gebracht, vgl. **Bild 35a**.



a)



b)

Bild 35. a) Zelt als Sonnenschutz der Rohrleitungsbögen; b) Temperaturreduktion entlang der Rohrleitung, abgedeckt mit nassen Vliestextilien.

Alle anderen Rohrleitungsstücke wurden mit nassen Textilstrukturen (Malervlies) abgedeckt. Die Abdeckungen wurde regelmäßig mit Wasser benetzt, um die Temperatur der Rohroberfläche bzw. des gepumpten Betons wirksam zu reduzieren, vgl. **Bild 35b**. Beide Maßnahmen erwiesen sich für die Temperaturkontrolle des Betons in der Rohrleitung als sehr einfach in der Ausfertigung und effektiv in der Wirkung.

4.7.5 VERTIKALFÖRDERUNG

Im Vergleich zur Horizontalförderung erhöht sich der Druck des Pumpendruckes bei der Vertikalförderung um einen Betrag, der proportional dem Gewicht der vertikalen Betonsäule ist. Deswegen soll der dementsprechend höhere erforderliche Pumpendruck bei der Auswahl einer leistungsfähigen Pumpe berücksichtigt werden.

In der Praxis wird der erforderliche Pumpendruck für jeder Meter einer vertikalen Strecke im Vergleich zum horizontalen Pumpen nach einer Faustregel mit einem Faktor drei oder vier multipliziert [4,19]. Diese Vereinfachung kann zu einer ungewöhnlich hohen Druckeinschätzung führen, da die dominierende Frischbetoneigenschaften einschließlich der Gleitschicht nicht berücksichtigt werden [24,40].

Soll die die Leistung der verfügbaren Pumpe nicht ausreichen, um den erforderlichen Pumpendruck für die angestrebte Höhe zu erreichen, ist es üblich, mehrere Pumpen zu kombinieren [52]. In diesem Fall können die zweite und die dritte Pumpe auf unterschiedlichen Höhenniveaus der Pumpstrecke installiert werden, z. B. auf dem Viertel der Höhe bzw. auf dem halben Weg zwischen den Etagen. Abgesehen von dem Erfordernis des zusätzlichen Drucks ist das vertikale Pumpen weitaus sicherer, wenn es um Stabilität und Stopferbildung geht [71]. Der Grund dafür ist, dass beim vertikalen Pumpen die Abtrennung der Gesteinskörnung von der Betonmatrix aufgrund von Trägheitskräften in geringerem Maße stattfindet als beim horizontalen Pumpen, da die Schwerkraft das Vordringen der groben Gesteinskörnung behindert bzw. diese

stets in den anstehenden Beton zurücksinken [73]. Darüber hinaus ist normalerweise die Gleitschicht gleichmäßig über den gesamten Rohrquerschnitt verteilt. In einer horizontalen Rohrleitung kann die Gleitschicht aufgrund der Lokalisierung der Betonsegregation und der Migration der größeren Gesteinskörnung an einigen Stellen beschädigt sein.

4.7.6 REINIGUNG

Die Reinigung ist die letzte und zudem die gefährdungsreichste Phase des Pumpvorgangs. Meist werden zwei Reinigungsmethoden angewendet: mit Wasser und mit Druckluft. Für die Druckluftherzeugung ist ein Kompressor notwendig. In beiden Fällen werden in Wasser eingetauchte Spezialschwämme unterschiedlicher Form (Molche) direkt hinter den „Schlussbeton“ in die Rohrleitung eingesetzt und durch die gesamte Rohrleitung geschoben, vgl. **Bild 36a**.



a)



b)



c)

Bild 36. a) Schwammvariationen für die Rohrreinigung; b) Auswaschen des Pumpenreservoirs, bevor er zur Wasserreinigung der Förderleitung dient; c) Fangkorb für Schwämme, aufgestellt am Ende der Rohrleitung.

Um den Reinigungsprozess zu beschleunigen, wird eine Kombination von zwei sphärischen Schwammformen mit einer zylindrischen dazwischen empfohlen. Die Wasserreinigung ist mit

relativ wenig Gefährdungspotential verbunden. Es kann jedoch zu Betonauswaschung (Spülung der Matrix) und Verzahnung der gröberen Gesteinskörnung kommen, insbesondere wenn die Schwämme nicht wasserdicht sind. Dann baut sich ein erhöhter Druck auf oder es kann zu einem Stopfer vor dem ersten Schwamm kommen. Die Reinigung mit Luftdruck ist effizienter und einfacher durchzuführen, birgt aber hohe Gefahren durch unkontrolliertes Beschleunigen von Schwamm und Betonresten die am Rohrleitungsende austreten und von dem unter Druck stehenden, expansionswilligen Luftvolumen angetrieben werden. Diese austretenden Partikel können wie Projektile wirken, da sie aus der Rohrleitung bei abnehmender Rohrreibung mit zunehmender Geschwindigkeit ausgetrieben werden. Dem kann teilweise durch schnelles Ver-ringern des Luftdrucks in der Rohrleitung vor dem Austreten der Schwämme entgegengewirkt werden [5,25].

Im vorliegenden Projekt wurde ein kombiniertes Reinigungsverfahren angewendet. Zunächst wurde das Pumpenreservoir gründlich von Betonresten gereinigt, **Bild 36b**. Es wurde danach mit sauberem Wasser befüllt, das anschließend hinter den Schwämmen in die Rohrleitung gefördert wurde bis diese weitgehend vom Beton gesäubert war. Im letzten Schritt wurde die Druckluft dazu verwendet, das in der Rohrleitung anstehende Wasser auszutreiben. Ein Fangkorb wurde aufgestellt, um die Schwämme gefahrlos aufzufangen, vgl. **Bild 36c**. Das Rohrende musste fixiert werden, um mögliche übermäßige Schwingungen der Leitung zu vermeiden. Um eine Beschädigung des Schwammes durch den "Schwammfänger" und weitere Gefahren auszuschließen, wurde der Luftdruck reduziert, sobald der Schwamm das Ende der Rohrleitung erreichte.

4.8 GEGENÜBERSTELLUNG VON ERGEBNISSEN UND ZIELSETZUNGEN

Der erreichte Erfüllungsstand der im Projekt beantragten Arbeitspakete A1 bis A8 ist der nachfolgenden **Tabelle 10** zusammenfassend zu entnehmen. Es erfolgt eine direkte Gegenüberstellung der entsprechenden Projektergebnisse zu den Zielsetzungen in Zuordnung der einzelnen Arbeitsschritte.

Tabelle 10. Ergebnisse und Zielsetzungen des Vorhabens

Arbeitspakete/Arbeitsschritte (A)		Projektergebnisse
1	Untersuchung von Normalbetonen (Laborvorversuche)	
1.1	Auswahl bzw. Zusammenstellung der Normalbetone	Die ausgewählten neun Normalbetone wiesen folgende Merkmale auf: Bindemittelhalt 360 kg/m ³ , W/Z-Wert 0,5, natürlich gerundete oder gebrochene normalschwere Gesteinskörnungen mit Größtkorn 16 mm. Größenabstufung der Gesteinskörnung: 0-2 mm: 43 M.-%, 2-8 mm: 28 M.-% und 8-16 mm: 29 M.-%. Variierter Einsatz von Zusatzmitteln: Fließmittel, Luftporenbildner. Verwendung von Zusatzstoffen: Flugasche, Kalksteinmehl.
1.2	Rheologische Charakterisierung	Verwendung der im Abschnitt 3.3 beschrieben Methoden.
1.3	Kritische Analyse der rheologischen Messverfahren	Auf Grundlage aller in den Vorversuchen erhaltenen

		Aussagen fand eine erste kritische Analyse der Ergebnisse hinsichtlich der rheologischen Betoncharakterisierung statt. Die rheologischen Messmethoden wurden nach der Qualität, des Informationsgehaltes und der Reproduzierbarkeit der Daten und Ergebnisse bewertet mit dem Ergebnis der Zusammenstellung eines passenden Messprofils.
1.4	Entwicklung/Verbesserung von Methoden zur Analyse der Partikelverteilung im Förderrohrquerschnitt	Entfällt mit Ausgleich in anderen Arbeitsschritten.
1.5	Zusammenfassung/Systematisierung der Ergebnisse	Die Teilergebnisse aus A1.1 bis A1.3 wurden zusammengefasst, bewertet und systematisiert. Es wurden Beziehungen zwischen der Materialzusammensetzung und den experimentellen Ergebnissen formuliert und als grundlegende Thesen für A2 zu Verfügung gestellt.
2	Untersuchung von Sonderbetonen (Laborvorversuche)	
2.1	Auswahl bzw. Zusammenstellung der Sonderbetone	Die Arbeiten im Wesentlichen analog denen am Normalbeton A1.1 durchgeführt. Es wurden zwei hochfeste, zwei selbstverdichtende und ein Stahlfaserbeton konzipiert. Da die Bearbeitung des Arbeitspaketes A2 erst nach Abschluss des Arbeitspaketes A1 erfolgte, wurden hier die methodischen Arbeiten in A1.3 und A1.4 rückkoppelnd überprüft und mit neuem Erkenntnisstand ergänzt.
2.2	Rheologische Charakterisierung	Verwendung der Messmethoden analog A1.2.
2.3	Zusammenfassung/Systematisierung der Ergebnisse	Die Teilergebnisse aus A2.1 und A2.2 wurden zusammengefasst, bewertet und systematisiert. Weiterhin fand eine vergleichend übergreifende Auswertung der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen A1 und A2 statt. Es wurden die wesentlichen, beim Pumpen von Frischbeton in Förderrohren auftretenden Phänomene erkannt und beschrieben. Dafür wurden erste einfache modellhafte Beschreibungen formuliert. Ihre Gültigkeit wurde an der gesamten Bandbreite der bis zu diesem Zeitpunkt erarbeiteten Daten überprüft. Zudem fand eine kritische Gegenüberstellung der Erkenntnisse mit publizierten Ergebnissen anderer Forscher statt.
3	Frischbetontemperatur und Pumpbarkeit (Laborvorversuche)	
3.1	Untersuchung von Normalbetonen	Im Laufe der Vorversuche im Labor wurde festgestellt, dass eine Temperierung der Betone beim Pumpvorgang nicht mit vertretbarem Aufwand zu gewährleisten ist. Stattdessen wurde die Messung der Temperaturentwicklung des geförderten Betons während aller großmaßstäblichen Pumpversuche mittels eingebauter Temperatursensoren diskutiert und favorisiert, vgl. Abschnitt 4.6.
3.2	Untersuchung von Sonderbetonen	
3.3	Zusammenfassung/Systematisierung der Ergebnisse	
3.4	Prognosemodell zu Frischbetontemperatur und Pumpbarkeit	
4	Frischbetonalter und Pumpbarkeit (Laborvorversuche)	
4.1	Untersuchung von Normalbetonen	Die systematischen Untersuchungen fanden an allen Normal- und Sonderbetonen statt und liegen als Datenbasis inkl. Bilddokumente vor. Das Untersuchungsziel bestand in der Ermittlung der Pumpbarkeit in einem
4.2	Untersuchung von Sonderbetonen	

4.3	Zusammenfassung/Systematisierung der Ergebnisse	mittlerem Betonalter von ca. 50 min in Korrelation mit für die Großversuche realen Pumpzeiten (20 und 80 min) nach Absprache mit Vertretern des Betonwerkes der Fa. SCHWENK Beton Dresden. Das Prognosemodell wurde sinnvollerweise auf die Praxisversuche verschoben.
4.4	Prognosemodell zu Frischbetonalter und Pumpbarkeit	
5	Großmaßstäbliche Pumpversuche	
5.1	Pumpversuche mit Normalbeton	Es wurde eine praxisingerechte Pumpstrecke aufgebaut. Bei den Pumpversuchen kamen alle in Tabelle 1 gelisteten Betonzusammensetzungen im Einsatz, die gemäß einem Prüfplan einer einheitlichen Beprüfung unterzogen wurden, vgl. Bild 14 .
5.2	Pumpversuche mit Sonderbetonen	
5.3	Begleitende Untersuchungen	Alle gepumpten Betone wurden mit den rheologischen Messmethoden aus A1.2 bzw. A2.2 charakterisiert, sowie Untersuchungen zu Frisch- und Festbetoneigenschaften durchgeführt, vgl. Abschnitt 4.2 .
5.4	Einfluss des Frischbetonalters	Für die Pumpexperimente wurde ein Prognosekonzept zur Pumpbarkeit von Frischbeton in Abhängigkeit vom Frischbetonalter aufgestellt. Dazu wurde der Beton für definierte Zeiträume in einem Fahrmischer vorgehalten und langsam bewegt. Gemäß A4 wurden die Zeitpunkte der Frischbetonübergabe aus dem Transportmischfahrzeug an die Betonpumpe mit 20 min und 80 min festgelegt. Die aus den Experimenten gewonnenen Ergebnisse wurden mit Hilfe von bevorzugten rheologischen Messmethoden ein modifiziertes Nomogramm zum prognostizierendem Betondruck-Fördermenge-Verhältnis aufgestellt, vgl. Abschnitte 4.3-4.5 .
6	Kritische Analyse der Laborexperimente und Großversuche	
	Während der Großversuche sowie nach deren Abschluss fand eine kritische Analyse aller im Projekt gesammelten und generierten Daten, Modellierungen und Prognosen statt. Dabei wurden Ergebnisse aus den Laborversuchen (A1-A2) sowie aus den großmaßstäblichen Pumpversuchen (A5) berücksichtigt. Als Referenz wurden von den Praxispartnern bereitgestellte Daten den im Projekt erzielten Ergebnissen zugeordnet und vergleichend gegenübergestellt. Durch ihre kritische Analyse wurden Zusammenhänge aufgedeckt und diese zur Präzisierung des Konzeptes zur Charakterisierung der Pumpbarkeit von frischen Betone genutzt.	
7	Konzept zur Charakterisierung des Pumpverhaltens von frischen Betonen	
	Auf Grundlage der im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse sowie unter Einbeziehung von Daten der Praxispartner wurde ein praxistaugliches, wissenschaftlich begründetes Konzept zur Charakterisierung von Betonförderprozessen in Pumpleitungen formuliert. Das Konzept wurde so aufbereitet, dass eine einfache Anwendung in der Baupraxis unter Einsatz vom Sliper-Messgerät und modifiziertem Nomogramm möglich ist, vgl. Abschnitt 5 .	
8	Zusammenfassung, Abschlussbericht, Publikationen	
	Alle im Projekt gesammelten Daten und erarbeiteten Ergebnisse wurden zusammengefasst, systematisiert und übersichtlich in Wort und Bild dargestellt. In Abstimmung mit der FTB wurde ein die wesentlichen Ergebnisse beinhaltender Abschlussbericht erstellt. Die Publikationen der Ergebnisse erfolgte in Abstimmung mit der FTB sowie den weiteren, jeweils thematisch involvierten projektassoziierten Praxispartnern, vgl. Abschnitt 9.2 .	

Während der Bearbeitung ergaben sich sehr wichtige Erkenntnisse und Empfehlungen zur

praktischen Gestaltung des Pumpvorganges (vgl. **Abschnitt 4.7**). Diese zusätzlichen Informationen wurden in erweiterter Thematik hinsichtlich der Beantragung gewonnen und ausgewertet. Das erfolgte in zustimmender Übereinkunft mit den Interessen der Industriepartner. Im Ausgleich dafür wurden in der aktuellen Bearbeitungsphase in wenigen Abschnitten bzw. Arbeitsschritten Einsparungen vorgenommen. Außer den Arbeitsschritten „A1.4 Entwicklung/Verbesserung von Methoden zur Analyse der Partikelverteilung im Förderrohrquerschnitt“ sowie dem „A3 Frischbetontemperatur und Pumpbarkeit“ wurden alle Arbeitspakete/-schritte des Forschungsantrages vollständig bearbeitet bzw. mit zusätzlichen Untersuchungen kompensiert. Insgesamt kamen bei den Pumpversuchen 14 Betonzusammensetzungen zum Einsatz, wobei ursprünglich nur drei Normal- und drei Hochleistungsbetone eingeplant wurden. Das entspricht einem Mehraufwand hinsichtlich Pumpen und damit verbundenen Untersuchungen für 8 weitere Betone. Dadurch konnten die rheologischen Messmethoden für eine deutlich breitere Palette an Betonzusammensetzungen verifiziert werden. Stattdessen wurde das Arbeitspaket A3 „Frischbetontemperatur und Pumpbarkeit“ gekürzt, da eine Temperierung der Betone während des Pumpens nicht mit vertretbarem Aufwand zu gewährleisten war und sich in diesem Projekt die Aussagefähigkeit der erwarteten Ergebnisse von untergeordneter Bedeutung erwies. Auch diese Entscheidung wurde gemeinsam mit den Industriepartnern getroffen. Nach einer intensiven Absprache mit der Betreuungsgruppe „Pumpen von Beton“ und der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. wurde das Arbeitspaket A5 „Großmaßstäbliche Pumpversuche“ zeitlich vorgezogen und bereits im September 2016 durchgeführt. Zum Projektabschluss ist festzustellen, dass nicht nur die angestrebten Forschungsergebnisse terminkonform erreicht wurden, sondern der Aussagegehalt bei weitem den beantragten übersteigt.

In Vorbereitung eines Anschlussantrages wurden die aufgeführten wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen im Rahmen dieses AiF-IGF-Vorhabens „Zielsicheres Pumpen von Beton“ während der abschließenden Sitzung der Beratergruppe „Pumpen von Beton“ am 04.10.2017 in Hannover ausführlich erörtert und in darauffolgenden Sitzungen zunehmend präzisiert. Hierbei wurde insbesondere die Dringlichkeit und praktische Relevanz der diesem Forschungsvorhaben zugrunde gelegten Forschungsfragen sowohl seitens der Industrie als auch seitens der Forschungseinrichtungen hervorgehoben. Die Ergebnisse des vorliegenden Vorhabens wurden als vielversprechend gewertet. Sie bieten eine gute Grundlage für die Bearbeitung der vorgesehenen Ansatzpunkte zur weiteren wissenschaftlich fundierten und praxisorientierten Erforschung auf dem Gebiet des Pumpens von Beton. Die Fortsetzung der Kooperation der Forschungseinrichtungen in einem Anschlussprojekt wurde ausdrücklich befürwortet. Das bereits bewährte Netzwerk zwischen der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V., dem Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV), der Industriepartner und der Forschungseinrichtungen Institut für Baustoffe der TU Dresden und Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover kann sofort und ohne organisatorischen Mehraufwand fortgesetzt und um das Netzwerk der bauausführenden Unternehmen und Planer der Leibniz Universität Hannover erweitert werden.

4.9 GENERIERTE DATENBASIS

Als Ergebnis der großmaßstäblichen Pumpversuche wurde eine umfangreiche Datenbank erstellt. In der vorliegenden Arbeit wurde ein wesentlicher Teil vorgestellt und diskutiert.

Die Datenbank kann bei der weiteren Untersuchung von Phänomenen, die in Pumprohrleitungen stattfinden, z. B. während der Vorbereitungs- und Reinigungsarbeiten, helfen und eine fundierte Grundlage auch für zukünftige numerische Simulationen bilden.

Die Vielzahl von einzelnen Daten aus den Experimenten im Labor und den großmaßstäblichen Pumpversuchen befinden sich in Papierform und im Wesentlichen digital aufbereitet an der Forschungseinrichtung Institut für Baustoffe der Technischen Universität Dresden. In Absprache mit den Projektpartnern kann sie bzw. der große erhaltene Erfahrungsschatz bei spezifischen Fragestellungen seitens der KMU zur Verfügung gestellt werden.

Selbstverständlich kann diese wertvolle Datenbasis für eventuell weiterführende Forschungsarbeiten im Bereich Betonrheologie und Pumpen von Beton genutzt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Charakterisierung der Pumpvorgänge für unterschiedliche Betonqualitäten nicht allumfassend in diesem Abschlussbericht erfolgen kann. Dennoch lassen sich bei spezifischen Fragestellungen die Erkenntnisse im Nachgang auf die konkreten Baustellensituationen übertragen.

5 KONZEPT ZUR SICHEREN BESCHREIBUNG UND VORHERSAGE DER BETONPUMPBARKEIT

Die optimierten analytischen und numerischen Modelle wurden erfolgreich für alle untersuchten Betone verifiziert, vgl. **Bild 37**. Es ist außerdem gelungen, die rheologischen Eigenschaften sowohl von Kernbeton als auch der an der Rohrwandung entstehenden Gleitschicht zu bestimmen. Die in der gesamten Pumpstrecke ausreichend ausgebildete Gleitschicht an der Rohrwandung beeinflusst maßgeblich den Pumpvorgang und stellt eine Garantie gegen Stopferbildung dar. Sie sichert auch die Langlebigkeit von Rohrstrecke und Pumpe sowie einen geringen Kraftstoffverbrauch.

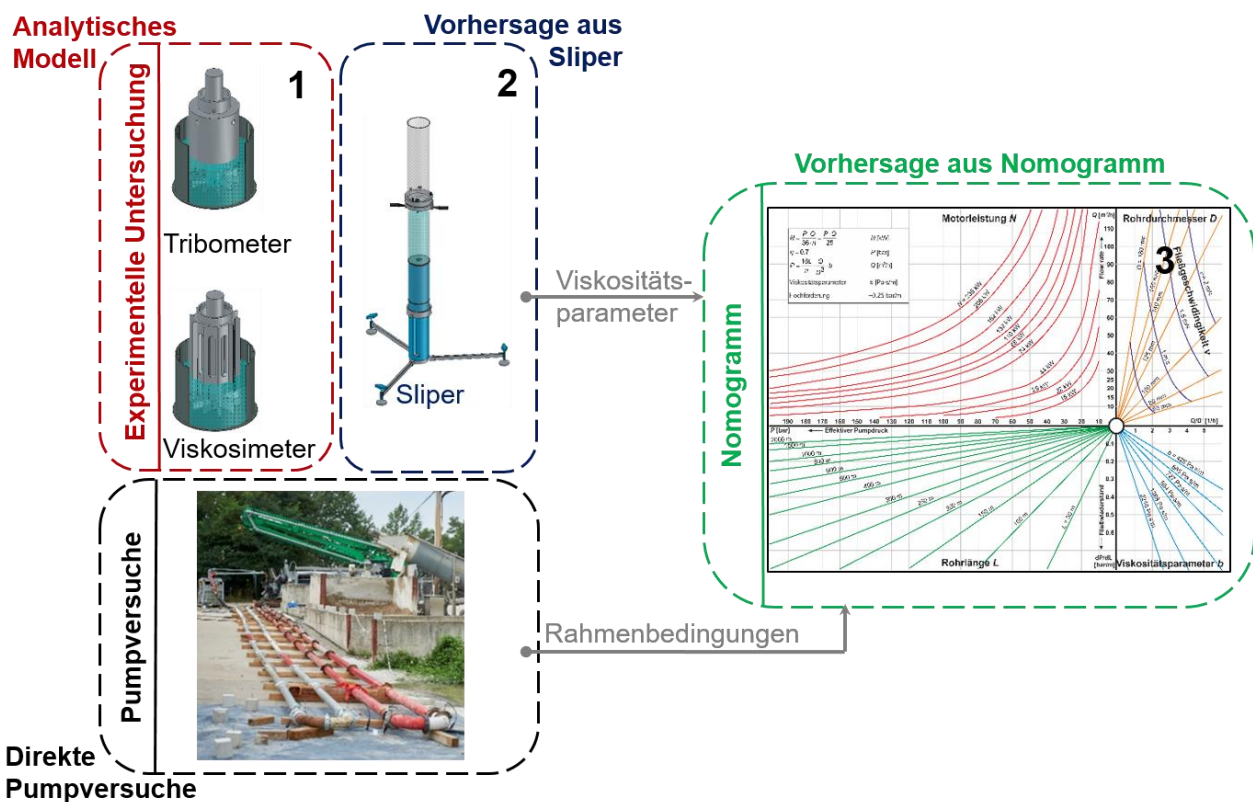


Bild 37. Überprüfung der wissenschaftlich basierten Methodik zur Vorhersage der Frischbetonpumpbarkeit.

Sowohl die kombinierte Messmethode mit Tribometer und Viskosimeter als auch der Einsatz vom Gleitrohr-Rheometer sind für die unerlässlichen rheologischen Untersuchungen des Pumpverhaltens unterschiedlicher Betonqualitäten im Baustellenbetrieb grundsätzlich geeignet und unbedingt empfehlenswert, wobei der Gleitrohr-Rheometer unter üblichen Baustellenbedingungen am geeignetsten ist. Mit den erhaltenen Ergebnissen kann in-situ das Pumpverhalten von Betonen charakterisiert und zeitnah auf die Einstellung der Betoneigenschaften mit Blick auf den Pumpprozess Einfluss genommen werden. Damit kann eine Optimierung der stofflichen Zusammensetzung von Betonen hinsichtlich der Pumpbarkeit gezielt und sicher erreicht werden, z.B. sofortiges Reagieren hinsichtlich Variation der Fließmittelzugabe für das Er-

zielen einer verbesserten Fließfähigkeit des Betons, um eine Stopfergefahr effektiv auszuschließen. Die Ergebnisse der großmaßstäblichen Pumpversuche wurden dem bisher vorhandenen Betondruck-Leistungs-Nomogramm [3,4,72] zur Bestimmung von Pumpenparametern gegenübergestellt, woraufhin das Nomogramm durch die Einführung des Viskositätsparameters deutlich verbessert wurde. Infolge dieses Erkenntnisgewinnes wird die genaue Vorhersage des effektiven Pumpendruckes für alle herkömmlichen und modernen Betone, auch Sonderbetone, ermöglicht.

Die Herausforderungen im Gesamtprozess des Betonpumpens, wie die Vorbereitung der Rohrleitung vor dem Pumpen, das Auftreten von Stopfern und die Endreinigung, wurden exemplarisch dargestellt sowie einschlägige Empfehlungen für die Praktiker erarbeitet.

Schließlich wurde die Anwendung der im Rahmen des IGF-Vorhabens entwickelten, wissenschaftlich basierten und anwendungsbereiten Methodik als Teil des zukünftigen Konzeptes für die aktive in-situ Rheologie-Überwachung im Hinblick auf eine angestrebte vollständige Automatisierung von Fertigungs- und Einbringprozessen von Beton vorgeschlagen, vgl. **Bild 38**. Danach muss der Pumpvorgang ganzheitlich betrachtet werden, angefangen mit der maschinentechnischen Gestaltung, über die Betonoptimierung und die Berücksichtigung der Witterungsbedingungen bis letztlich zur permanenten Überwachung vor Ort samt einem automatisierten Monitoring. Darüber hinaus besteht die dringliche Absicht darin, die neuen im IGF-Projekt erzielten Erkenntnisse in den nächsten Schritten in das Bauen 4.0-Konzept mit völlig digitalisierten Prozessabläufen einzubringen, was einen immensen technischen Fortschritt bedeuten würde.

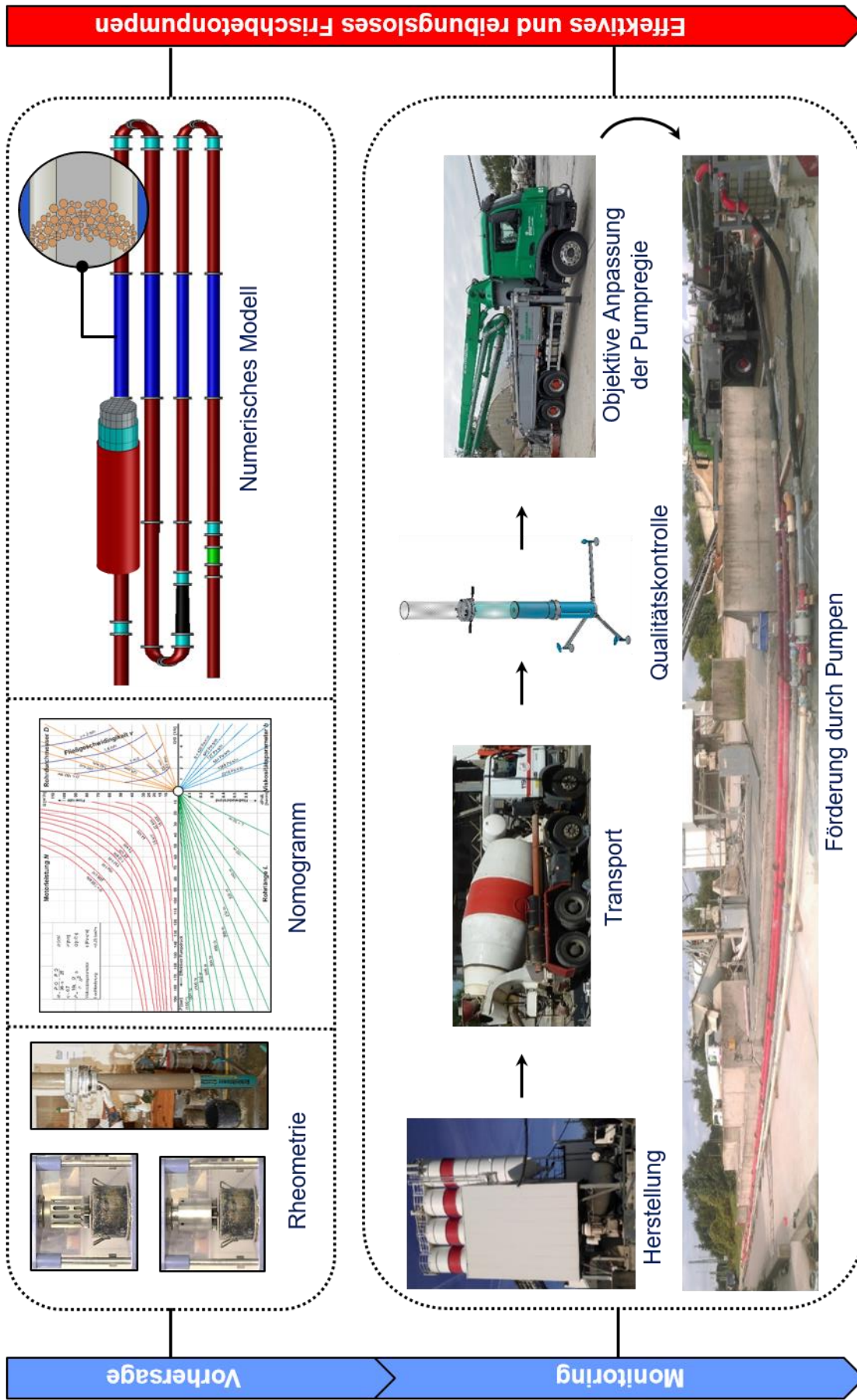


Bild 38. In-situ Betonrheologie-Überwachung im Hinblick auf Einbringprozesse von Beton.

6 ERKENNTNISGEWINN UND TECHNISCHER FORTSCHRITT

Mit Hilfe umfangreicher Laborversuche wurden für 14 Betonzusammensetzungen (verschiedene Normal- und Hochleistungsbetone) die Zusammenhänge zwischen Frischbetoneigenschaften und Pumpbarkeit erfasst und eine baustellengerechte Prüfmethodik entwickelt. Diese Methodik sieht die Verwendung von einem speziell zur Charakterisierung der Pumpbarkeit entwickelten Gerät Sliper (SLiding Pipe Rheometer) vor. Die Eignung dieser Methodik wurde im Rahmen der Großversuche nachgewiesen und kann **mit Nachdruck zum praktischen Einsatz empfohlen** werden. Außerdem gestatten die erzielten Ergebnisse, Betonzusammensetzungen insbesondere für Hochleistungsbetone auf die geforderte Pumpaufgabe gezielt abzustimmen bzw. schnell und zeitgleich zu optimieren, so dass Stopfer und andere **Probleme weitgehend ausgeschlossen** werden können.

Auf Grundlage der im IGF-Projekt erarbeiteten Datenbasis wurde weiterhin ein **praxisgerechtes Konzept zur sicheren Beschreibung der Pumpbarkeit** der Betone formuliert, vgl. **Bilder 37 und 38**. Mit diesem Konzept können neben dem Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Pumpbarkeit auch die Zusammenhänge zwischen Pumpbarkeit und Frischbetontemperatur sowie Frischbetonalter dargestellt werden. Die Gültigkeit des Konzeptes wurde in Großversuchen an den 14 unterschiedlichen Betonen verifiziert. Zusätzlich wurden Simulationen des Betonfließvorganges in der Rohrleitung mittels numerischer Simulation (CFD, Computational Fluid Dynamics) [30] durchgeführt, um das Strömungsverhalten der opaken Betonmasse zu analysieren und so kritische Bereiche aufzuspüren.

7 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten entsprechen dem im Projektantrag skizzierten Lösungsweg. Der damit verbundene Einsatz von wissenschaftlichem Personal war zur Durchführung der für den Berichtszeitraum bewilligten Arbeitspakete notwendig und angemessen. Die Finanzierungsmittel für Personalausgaben wurden in der abgerufenen Höhe verbraucht. Der folgende Vergleich von bewilligten und abgerufenen Personalmitteln korreliert mit dem erreichten Arbeitsstand.

Die im Berichtszeitraum absolvierten Arbeiten weisen gegenüber der bewilligten Projektablaufplanung keinen inhaltlichen und zeitlichen Verzug auf.

8 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG

8.1 PERSONALKOSTEN

Die Zuwendung für die beteiligte Forschungsstelle wurde zur Deckung der Personalkosten verwendet. Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten entsprechen dem im Projektantrag skizzierten Lösungsweg. Die Gegenüberstellung der bewilligten und abgerechneten Mannmonate zur den jeweiligen Personalkategorien ist in **Tabelle 11** zusammengefasst.

Tabelle 11. Übersicht zur Verwendung der Zuwendung

Personalkategorie	Bewilligte Mannmonate pro Jahr			Abgerechnete Mannmonate pro Jahr		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
	Wiss. Mitarbeiter	1,00	12,00	11,00	1,00	12,00
Techn. Mitarbeiter	-	9,00	11,00	-	9,00	11,00

8.2 GERÄTEBESCHAFFUNG

Im Rahmen des IGF-Vorhabens wurde das Gleitrohr-Rheometer (Sliper) mit Sensoren für Druck und Verschiebung sowie zugehörigem Analog-Digitalwandler und Datenaufzeichnungseinheit erworben.

Im Projekt wurde das Gerät für die zutreffende rheologische Charakterisierung der Betonpumpprozesse im Labor sowie als Datengenerator für die zu etablierenden Prognosemodelle sowie das zu formulierende Konzept zur Charakterisierung des Pumpverhaltens von frischen Betonen eingesetzt. Dieses Prüfverfahren ermöglichte eine einfache, weitgehend zutreffende Nachstellung der Materialbewegung im Förderrohr bei gleichzeitiger Erfassung der Belastungs- und Bewegungsparameter zwischen Rohr und Beton. Durch eine Skalierung der experimentellen Ergebnisse konnten Aussagen zur maximalen Förderlänge bzw. Förderhöhe des gepumpten Betons in Abhängigkeit vom Pumpendruck gemacht werden. Das Gleitrohr-Rheometer hat sich als eine robuste, baustellentaugliche rheologische Messtechnik erwiesen.

9 UMSETZBARKEIT UND TRANSFER DER ERGEBNISSE

9.1 GRAD DER UMSETZUNG IN DIE BETRIEBLICHE PRAXIS

Das Potenzial für den Ergebnistransfer wird sowohl bei Betonherstellern, Betonpumpendienst-KMU als auch bei den Betonpumpenherstellern als ausgezeichnet bewertet. Auf Grund des Kosteneinsparpotentials bei der Anwendung der Methodik ist einzuschätzen, dass die **Umsetzung in die industrielle Praxis innerhalb von einem bis zwei Jahren** erfolgreich sein kann. Um den Umsetzungsprozess zu beschleunigen, wurde bereits eine Reihe vergleichender Versuchsserien zur praktischen Austestung der entwickelten Methodik eingeplant. Die Versuche werden unter Baustellenbedingungen durchgeführt und sollen zur statistischen Absicherung des neuen Nomogramms zur Ermittlung des Verhältnisses zwischen Betondruck und Motorleistung der Pumpe dienen. Anschließend plant der **Bundesverband Transportbeton**, die entwickelte Methodik in die **Betonnorm** einzubringen.

Anhand dieser **durch die Industrie finanzierten Zusatzuntersuchungen** wird insbesondere die Dringlichkeit und praktische Relevanz dieses Forschungsvorhabens und der erzielten Ergebnisse hervorgehoben, die durch die am Bau Beteiligten als sehr viel versprechend gewertet werden.

9.2 WIRKSAME MAßNAHMEN ZUM ERGEBNISTRANSFER

Die erfolgreiche Bearbeitung des Forschungsvorhabens erforderte eine intensive Zusammenarbeit zwischen der beteiligten Forschungsvereinigung, der Forschungsstelle und der im projektbegleitenden Betreuungsausschuss mitwirkenden KMU. Die **umfangreiche, breit angelegte Kooperation mit den Industriepartnern** bildete die Grundlage für einen **direkten Ergebnistransfer in die Wirtschaft**. Durch die weiteren dargestellten Transfermaßnahmen wurden und werden Voraussetzungen für eine unternehmensübergreifende, branchenweite Nutzung der Ergebnisse durch Interessenten geschaffen.

Kontinuierliche Vortragstätigkeit:

SECRIERU, E.: Vorstellung des Vorhabens AiF IGF „Zielsichere betontechnische Gestaltung des Pumpens von Frischbeton“. *Fachtagung der Regionalgruppe Sachsen/Sachsen-Anhalt*, Leipzig, 2016

SECRIERU, E.: Vorstellung des Vorhabens AiF IGF „Zielsichere betontechnische Gestaltung des Pumpens von Frischbeton“. *Sitzung des Konventes Betonpumpen des Unternehmerverbandes Mineralische Baustoffe (UVMB) e.V.*, Plauen, 2016

MECHTCHERINE, V.: Prüftechnische Vorhersage der Pumpbarkeit von Beton. *Seminar „Am Puls der Betontechnologie – neue Erkenntnisse“ des Fachverbandes der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie*, Dagmersellen, 2017

MECHTCHERINE, V.: Pumpfähigkeit von Beton – Stand des Forschungsthemas. *16. Baustoffkolloquium BauZERT und UVMB*, Weimar, 2017

SECRIERU, E.: Vorstellung des Vorhabens AiF IGF „Zielsichere betontechnische Gestaltung des Pumpens von Frischbeton“. *Expertenforum Bau im BASF*, Ludwigshafen, 2017

- SECRIERU, E.: Pumpen von Frischbeton – Praxisversuche und Entwicklung eines Vorhersagemodells. *Transportbeton-Tage*, Augsburg, 2017
- MECHTCHERINE, V.: Rheologie des Frischbetons - Lösung baupraktischer Probleme und Weiterentwicklung der Betonbauweise. *8. Betonfachtagung Nord des InformationsZentrums Beton*, Hannover, 2017
- MECHTCHERINE, V.: Steuerung und Prüfung der Pumpbarkeit. *Betontag 2018 – Bau und Wissen TFB AG*, Wildegg, 2018

Veröffentlichungen im Inland und international für einen erweiterten Fachkreis:

- SECRIERU, E., MECHTCHERINE, V.: Zur Prüfung der Pumpbarkeit von Beton. *beton* 1 (2016) 18–23
- SECRIERU, E.: Pumpbarkeit von Frischbeton. Alles fließt? In: *TB info* 65 (2016) 31–35
- SECRIERU, E., MECHTCHERINE, V.: Estimation of concrete pumpability using rheological tools and verification by means of full-scale pumping. In: SCHMIDT, W., MSINJILI, N. S. (Hrsg.): *3rd African Symposium on Knowledge Exchange of Young Scientists*, Johannesburg, 2017
- SECRIERU, E.: Zielsicheres Pumpen von Frischbeton, Zwischenbericht der Forschungsarbeiten. In: *TB info* 68 (2017), September, 32–36
- SECRIERU, E., FATAEI, S., SCHRÖFL, C., MECHTCHERINE, V.: Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology. *Construction and Building Materials* 144 (2017) 451–461
- MECHTCHERINE, V., SECRIERU, E., NERELLA, V.N.: Rheologie des Frischbetons – Lösung baupraktischer Probleme und Weiterentwicklung der Betonbauweise. *Tagungsband 8. Betonfachtagung Nord*, Hannover, 2017
- SECRIERU, E.: *Pumpverhalten moderner Betone – Charakterisierung und Vorhersage*. Doktorarbeit, TU Dresden, 2018
- SECRIERU, E., MECHTCHERINE, V.: Pumping behaviour of modern concretes. *27. Konferenz Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen*, Regensburg, 2018
- SECRIERU, E., MECHTCHERINE, V., ABBROCK, O.: Pumping behaviour of modern concretes. *XVIII Congress of European Ready Mixed Concrete Organization (ERMCO)*, Oslo, 2018
- SECRIERU, E., COTARDO, D., MECHTCHERINE, V., LOHAUS, L., SCHRÖFL, C., BEGEMANN, C.: Changes in concrete properties during pumping and lubricating material formation under pressure. *Cement and Concrete Research* 108 (2018) 129-139
- SECRIERU, E., KHODOR, J., SCHRÖFL, C., MECHTCHERINE, V.: Formation of lubricating layer and concrete flow type during pumping. *Construction and Building Materials* 178 (2018) 507-517.

Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre

Um den Ergebnistransfer an den wissenschaftlich-technischen Nachwuchs sicherzustellen, erfolgte und erfolgt weiterhin eine gezielte Übernahme relevanten Forschungsergebnisse in die akademische Lehre. Dies betrifft die Vorlesungen zu den Themenkomplexen wie „Betontechnologie“ und „Bauen im Bestand“.

Erfolgte und geplante Transfermaßnahmen sind in **Tabelle 12** aufgelistet.

Tabelle 12. Transfermaßnahmen während und nach der Projektlaufzeit.

Maßnahme	Umsetzung	Zeitraum
Information, Austausch der Praxispartner, Diskussion der Forschungsergebnisse	Treffen des projektbegleitenden Ausschusses an der Forschungsstelle	02.16, 04.16, 06.16, 08.16; 01.17, 10.17; 02.18
Schulung von Mitarbeitern der projektassoziierten Firmen	Vorstellung der Projektergebnisse	09.18
Projektarbeiten, Masterarbeiten	1. „Analyse der Frischbetonströmung in der Rohrleitung mittels analytischen und numerischen Lösungsverfahren“	12.16
	2. „Bestimmung der Betonpumpbarkeit anhand von rheologischen Geräten und großmaßstäblichen Pumpversuchen“	02.17
	3. „Herausforderungen während des Pumpens von modernen Betonen“	03.18
	4. „Entwicklung eines Konzeptes zur Qualitätskontrolle der Betonpumpbarkeit auf der Baustelle in Echtzeit“	04.18
Veröffentlichung/Fachzeitschriften	TB-info, beton, Bautechnik, Beton- und Stahlbetonbau	09.18 bis 02.19

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Jahresbericht 2016/2017 des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., Berlin, 2017.
- [2] ERMCO, Ready-Mixed Concrete Industry Statistics 2010, 2011.
- [3] R. Weber, Rohrförderung von Beton, Beton-Verlag GmbH, 1963.
- [4] K.E. Eckardstein, Pumping concrete and concrete pumps: A concrete placing manual, Schwing, 1983.
- [5] D. Feys, Interactions between rheological properties and pumping of self-compacting concrete, Dissertation, Gent University, 2009.
- [6] S. Jacobsen, J.H. Mork, S.F. Lee, L. Haugan, Pumping of concrete and mortar – State of the art. COIN Project report 5, Oslo, 2008.
- [7] T. Neumann, Einflüsse auf die Pumpbarkeit von Beton, Beton. 5 (2012) 166–171.
- [8] P.F.G. Banfill, Rheology of fresh cement and concrete, Rheol. Rev. 2006 (2006) 61–130.
- [9] Y. Shi, I. Matsui, N. Feng, Effect of compound mineral powders on workability and rheological property of HPC, Cem. Concr. Res. 32 (2002) 71–78.
- [10] N. Roussel, Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results, Mater. Struct. 39 (2006) 501–509.
- [11] D. Feys, J.E. Wallevik, A. Yahia, K.H. Khayat, Ó.H. Wallevik, Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers, Mater. Struct. 46 (2012) 289–311.
- [12] J.E. Wallevik, Relationship between the Bingham parameters and slump, Cem. Concr. Res. 36 (2006) 1214–1221.
- [13] D. Lowke, P. Schiessl, Effect of mixing energy on fresh properties of SCC, in: Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr., Hanley Wood Publication, Chicago, 2005.
- [14] W. Schmidt, H.J.H. Brouwers, H.-C. Kühne, B. Meng, Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures, Cem. Concr. Compos. 49 (2014) 111–126.
- [15] W. Brameshuber, S. Uebachs, The influence of the temperature on the rheological properties of self-compacting concrete, in: O. Wallevik, I. Nielsson (Eds.), 3rd Int. Symp. Self Compact. Concr. Icel., RILEM Publications SARL, 2003: pp. 173–183.
- [16] J.-Y. Petit, K.H. Khayat, E. Wirquin, Coupled effect of time and temperature on variations of yield value of highly flowable mortar, Cem. Concr. Res. 36 (2006) 832–841.
- [17] J.-Y. Petit, K.H. Khayat, E. Wirquin, Coupled effect of time and temperature on variations of plastic viscosity of highly flowable mortar, Cem. Concr. Res. 39 (2009) 165–170.
- [18] R. Browne, P. Bamforth, Tests to establish concrete pumpability, ACI J. 74 (1977) 193–203.
- [19] Placing concrete by pumping methods, ACI 304.2R-96 (reapproved 2008), 1996.
- [20] D. Feys, K.H. Khayat, R. Khatib, How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure?, Cem. Concr. Compos. 66 (2015) 38–46.
- [21] E. Secrieru, V. Mechtcherine, Zur Prüfung der Pumpbarkeit von Beton, Beton. 1+2 (2016) 18–23.
- [22] G. De Schutter, D. Feys, Pumping of fresh concrete: Insights and challenges, RILEM Tech. Lett. (2016) 76–80.
- [23] VDZ e. V., Bereiten und Verarbeiten von Beton, Zement-Merkblatt Betontechnik B 7, 2011.
- [24] D. Feys, G. De Schutter, R. Verhoeven, Parameters influencing pressure during pumping of self-compacting concrete, Mater. Struct. 46 (2013) 533–555.
- [25] R. Khatib, Analysis and prediction of pumping characteristics of high-strength self-consolidating concrete, Dissertation, Université de Sherbrooke, 2013.
- [26] E. Secrieru, V. Mechtcherine, C. Schröfl, D. Borin, Rheological characterisation and prediction of pumpability of Strain-Hardening Cement-Based-Composites (SHCC) at various temperatures, Constr. Build. Mater. 112 (2016) 581–594.
- [27] M. Rössig, Fördern von Frischbeton, insbesondere von Leichtbeton, durch Rohrleitungen, Dissertation, TH Aachen, 1974.

- [28] M. Haist, H.S. Müller, Optimization of the pumpability of self-compacting lightweight concrete, in: 4th Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr., Chicago, 2005: pp. 195–202.
- [29] Frischbeton und Verarbeitung, in: II Bet., 2006: pp. 289–308.
- [30] E. Secrieru, Pumping behaviour of modern concretes - Characterisation and prediction, Dissertation, TU Dresden, 2018.
- [31] G. Barluenga, M. Giménez, A. Rodríguez, O. Rio, Quality control parameters for on-site evaluation of pumped self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 154 (2017) 1112–1120.
- [32] O. Río, Á. Rodríguez, S. Nabulsi, M. Álvarez, Pumping quality control method based on online concrete pumpability assessment, *ACI Mater. J.* 108 (2011) 423–431.
- [33] DIN EN 12350-5:2009-08, Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß, 2009.
- [34] DIN EN 12350-4:2009-08, Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß, 2009.
- [35] Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließmaß-Prüfung, 2009.
- [36] D. Feys, Understanding the pumping of conventional vibrated and self-compacting concrete, in: N. Roussel (Ed.), *Underst. Rheol. Concr.*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2011: pp. 331–353.
- [37] E. Secrieru, M. Butler, V. Mechtcherine, Prüfen der Pumpbarkeit von Beton – Vom Labor in die Praxis, *Bautechnik*. 11 (2014) 797–811.
- [38] F. Chapdelaine, Fundamental and practical study on the pumping of concrete, Dissertation, Laval University, 2007.
- [39] G.H. Tattersall, P.F.G. Banfill, *The rheology of fresh concrete*, Pitman Books Ltd., London, 1983.
- [40] M. Choi, N. Roussel, Y. Kim, J. Kim, Lubrication layer properties during concrete pumping, *Cem. Concr. Res.* 45 (2013) 69–78.
- [41] Ó.H. Wallevik, J.E. Wallevik, Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 1279–1288.
- [42] G. Heirman, R. Hendrickx, L. Vandewalle, D. Van Gemert, D. Feys, G. De Schutter, B. Desmet, J. Vantomme, Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 171–181.
- [43] J.E. Wallevik, Minimizing end-effects in the coaxial cylinders viscometer: Viscoplastic flow inside the ConTec BML Viscometer 3, *J. Nonnewton. Fluid Mech.* 155 (2008) 116–123.
- [44] D. Kaplan, *Pompage des bétons*, Dissertation, École des Ponts ParisTech, 2000.
- [45] D. Kaplan, F. de Larrard, T. Sedran, Design of concrete pumping circuit, *ACI Mater. J.* 102 (2005) 110–117.
- [46] J.E. Wallevik, Rheology of particle suspensions. Fresh concrete, mortar and cement paste with various types of lignosulfonates, The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2003.
- [47] S. Kordts, *Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone*, TU Berlin, 2005.
- [48] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 920–929.
- [49] S.N. Alekseev, On the calculation of resistance in the pipes of concrete pumps, *Mech. Stroit.* 9 (1952) 8–13.
- [50] T.T. Ngo, E.H. Kadri, R. Bennacer, F. Cussigh, Use of tribometer to estimate interface friction and concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1253–1261.
- [51] S. Jacobsen, L. Haugan, T.A. Hammer, E. Kalogiannidis, Flow conditions of fresh mortar and concrete in different pipes, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 997–1006.
- [52] S.H. Kwon, C.K. Park, J.H. Jeong, S.D. Jo, S.H. Lee, Prediction of concrete pumping: Part II - analytical prediction and experimental verification, *ACI Mater. J.* 110 (2013) 657–667.
- [53] D. Feys, K.H. Khayat, A. Perezschell, R. Khatib, Development of a tribometer to characterize lubrication layer properties of self-consolidating concrete, *Cem. Concr. Compos.* 54 (2014) 40–52.
- [54] D. Feys, K.H. Khayat, A. Perez-Schell, R. Khatib, Prediction of pumping pressure by means of new tribometer for highly-workable concrete, *Cem. Concr. Compos.* 57 (2015) 102–115.

- [55] S.H. Kwon, K.P. Jang, J.H. Kim, S.P. Shah, State of the art on prediction of concrete pumping, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* (2016) 75–85.
- [56] J. Spangenberg, N. Roussel, J.H. Hattel, H. Stang, J. Skocek, M.R. Geiker, Flow induced particle migration in fresh concrete: Theoretical frame, numerical simulations and experimental results on model fluids, *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) 633–641.
- [57] M. Choi, Y.J. Kim, S.H. Kwon, Prediction on pipe flow of pumped concrete based on shear-induced particle migration, *Cem. Concr. Res.* 52 (2013) 216–224.
- [58] K. Kasten, Gleitrohr – Rheometer, Ein Verfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Dickstoffen in Rohrleitungen, Dissertation, TU Dresden, 2010.
- [59] V. Mechtcherine, V.N. Nerella, K. Kasten, Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer, *Constr. Build. Mater.* 53 (2014) 312–323.
- [60] E. Secrieru, S. Fataei, C. Schröfl, V. Mechtcherine, Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology, *Constr. Build. Mater.* 144 (2017) 451–461.
- [61] Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009-08, Beuth, Berlin, 2009.
- [62] DIN EN 12350-8:2010-12, Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch, 2010.
- [63] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Pumping of self-compacting concrete: An insight into a daily application, in: *Proc. Int. FIB Symp.* 19-21 May, Taylor & Francis Group, London, Amsterdam, 2008: pp. 385–390.
- [64] M. Jolin, D. Burns, B. Bissonnette, F. Gagnon, L.S. Bolduc, Understanding the pumpability of concrete, in: *Shotcrete Undergr. Support XI. Enginerring Conf. Int.*, 2009.
- [65] DIN EN 206:2017-01, Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, 2017.
- [66] Schwing, Truck-mounted concrete pump model S 36 X Schwing, (2015). <http://www.schwing.de/en/?product=s-36-x> (accessed September 26, 2017).
- [67] T. Wüstholtz, Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005.
- [68] H. Lombois-Burger, P. Colombet, J.L. Halar, H. Van Damme, On the frictional contribution to the viscosity of cement and silica pastes in the presence of adsorbing and non adsorbing polymers, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 1306–1314.
- [69] F. de Larrard, *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*, E & F Spon, London, 1999.
- [70] *Betonzusätze Zusatzmittel und Zusatzstoffe*. Zementmerkleblatt B3, *Betontechnik, Beton.* (2005).
- [71] D. Bergemann, *Einführung in die Betontechnologie für Pumpenfahrer*, Technical report, Aichtal, 1995.
- [72] K. Kasten, H.-J. Wirschung, C. Klafszky, *Betontechnologie für Betonpumpen*, Technical report, Putzmeister Concrete Pumps GmbH, Aichtal, 2011.
- [73] D. Kaplan, F. De Larrard, T. Sedran, Avoidance of blockages in concrete pumping process, *ACI Mater. J.* 102 (2005) 183–191.
- [74] H. Imaizumi, H. Jitousono, T. Kemi, K. Fujii, Study on the blockage in concrete pumping with preceding mortars, *Cem. Sci. Concr. Technol.* 53 (1999) 732–737.
- [75] C. Hazaree, V. Mahadevan, Single stage concrete pumping through 2.432km (1.51 miles): Weather and execution challenges, *Case Stud. Constr. Mater.* 3 (2015) 56–69.
- [76] Y. Tan, H. Zhang, D. Yang, S. Jiang, J. Song, Y. Sheng, Numerical simulation of concrete pumping process and investigation of wear mechanism of the piping wall, *Tribol. Int.* 46 (2012) 137–144.
- [77] G. Liu, L. Chen, W. Cheng, Y. Huang, Research on pump primers for friction reduction of wet-mix shotcrete based on precreating lubricating Layer, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017 (2017) 1–12.
- [78] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 510–523.
- [79] Putzmeister, Wandstärkenmessgerät Mechanisch, (2010). http://www.pmw.de/cps/rde/xchg/pm_online/hs.xsl/8098_8548_DEU_HTML.htm.
- [80] N. Roussel, A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 1797–1806.

ANHANG 1

Tabelle 13. Schadenkosten aufgrund in der Pumpleitung eingetretener Verstopfungen

ID	Firma		Stopfer 1		Stopfer 2		Stopfer 3	
	Anzahl		Anzahl	Ø Schaden	Anzahl	Ø Schaden	Anzahl	Ø Schaden
1	1						10	
2	10		1	50.000 €	5		150	
3	1				1	500 €	4	200 €
4	1						5	
5	1						10	100 €
6	1						5	
7	1		5	5.000 €	5	1.000 €	50	250 €
8	1		5	5.000 €	5	1.000 €	50	250 €
S/Ø	17		11	9.091 €	16	833 €	284	200 €
Summen				100.000 €		13.333 €		56.800 €
Gesamtsumme								170.133 €

Hochrechnung (Zahlenbasis: 2013)

Unternehmen (Evaluation gemeldet)	17
Unternehmen (organisiert)	60
Meldequote Evaluation	28,3 %
Schaden hochgerechnet auf alle organisierten Unternehmen	600.471 €
Betonpumpen (organisiert)	426
Schaden je organisierte Betonpumpe	1.410 €
Betonpumpen (alle in Dt. existierenden)	1.601
Schaden hochgerechnet auf alle Betonpumpen in Deutschland	2.256.698 €

ANHANG 2

Tabelle 14. Rheologische Parameter während der 1. Pumpserie. Die Ergebnisse entsprechen dem untersuchten Frischbeton vor dem Pumpen (linke Spalte) und nach dem Pumpen (rechte Spalte).

Mischung	Viskosimeter			Tribometer			Sliper		
	Kernbeton			Gleitschicht			Kernbeton/Gleitschicht		
	Fließgrenze τ_0 [Pa]	Viskosität μ [Pa·s]	Fließgrenze τ_{0G} [Pa]	Viskosität μ_G [Pa·s/m]	Fließgrenze α [Pa]	Viskosität b [Pa·s/m]			
K	196	22	61	725	48	522			
K+FA	179	26	61	541	150	381			
K+FA+FM	174	15	72	548	183	415			
K+FA+FM	123	15	45	474	128	238			
K+LP	119	14	58	345	124	257			
K+LP+FM	192	16	54	997	192	470			
S	388	25	86	706	237	486			
S+FA	67	30	62	607	183	415			
S+LP	117	14	50	530	49	362			
HF	389	34	126	1585	191	1213			
HF+FM	166	33	19	2181	206	834			
SVB	38	38	24	2244	100	962			
SVB2	86	32	43	2350	113	856			
SFB	79	54	19	2793	125	1207			

Tabelle 15. Rheologische Parameter während der 2. Pumpserie. Die Ergebnisse entsprechen dem untersuchten Frischbeton vor dem Pumpen (linke Spalte) und nach dem Pumpen (rechte Spalte).

Mischung	Viskosimeter			Tribometer			Sliper					
	Kernbeton			Gleitschicht			Kernbeton/Gleitschicht					
	Fließgrenze τ_0 [Pa]	Viskosität μ [Pa·s]	Fließgrenze τ_{0G} [Pa]	Viskosität μ_G [Pa·s/m]	Fließgrenze a [Pa]	Viskosität b [Pa·s/m]						
K	196	22	61	725	48	522	529	7	215	709	310	403
K+FA	179	26	61	541	150	381	362	16	148	659	272	323
K+FA-FM	174	15	72	548	183	415	465	11	156	842	303	399
K+FA+FM	123	15	45	474	128	238	352	12	127	619	363	158
K+LP	119	14	58	345	124	257	268	7	135	667	191	235
K+LP-FM	192	16	54	997	192	470	434	9	160	1275	322	442
S	388	25	86	706	237	486	383	8	240	626	403	310
S+FA	67	30	62	607	183	415	189	12	166	768	304	399
S+LP	117	14	50	530	49	362	340	6	96	1035	302	253
HF	389	34	126	1585	191	1213	460	15	79	1817	311	913
HF+FM	166	33	19	2181	206	834	480	7	136	1463	309	754
SVB	38	38	24	2244	100	962	383	21	120	1605	273	817
SVB2	86	32	43	2350	113	856	295	14	105	1789	274	539
SFB	79	54	19	2793	125	1207	271	27	84	1500	291	905

Tabelle 16. (gleich **Tabelle 8**) Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen für alle untersuchten Betone vor (links) und nach (rechts) dem 1. Pumpvorgang.

Mischung	Ausbreitmaß, Setzfließmaß* [mm]		Dichte [kg/dm ³]		Luftporengehalt [%]		Temperatur [°C]		Druckfestigkeit [MPa]	
K	530	430	2,37	2,27	1,40	4,20	22,5	26,2	59,0	55,6
K+FA	615	495	2,39	2,30	1,30	3,70	20,5	23,3	48,9	44,8
K+FA-FM	565	470	2,40	2,31	1,20	2,20	25,5	28,5	48,7	46,6
K+FA+FM	605	480	2,39	2,31	0,75	2,60	27,5	32,5	46,1	46,0
K+LP	640	530	2,30	2,25	3,70	5,10	23,8	25,7	45,7	40,4
K+LP-FM	490	510	2,30	2,26	4,90	5,10	20,0	24,9	49,4	46,5
S	460	385	2,43	2,34	0,90	3,10	23,5	29,0	64,7	57,9
S+FA	533	478	2,40	2,31	1,40	3,40	22,0	26,0	53,1	50,6
S+LP	630	535	2,32	2,32	3,10	6,20	26,0	33,0	45,1	38,8
HF	485	430	2,35	2,30	2,10	2,80	23,0	31,0	64,3	59,3
HF+FM	655	435	2,38	2,31	1,50	2,70	21,5	27,0	65,2	63,8
SVB	673*	318*	2,28	2,28	2,00	2,90	23,0	28,1	64,6	64,1
SVB2	543*	400*	2,33	2,29	1,20	2,00	25,8	32,0	65,9	64,9
SFB	585*	540*	2,32	2,28	2,20	3,00	25,0	28,7	74,7	70,8

Tabelle 17. Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen für alle untersuchten Betone vor (links) und nach (rechts) dem 2. Pumpvorgang.

Mischung	Ausbreitmaß, Setzfließmaß* [mm]		Dichte [kg/dm ³]		Luftporengehalt [%]		Temperatur [°C]		Druckfestigkeit [MPa]	
K	500	380	2,35	2,29	2,70	3,70	23,0	29,0	56,0	55,2
K+FA	550	450	2,36	2,33	1,80	2,80	21,7	26,5	46,4	45,7
K+FA-FM	560	385	2,37	2,32	1,50	1,90	26,0	33,0	47,9	48,8
K+FA+FM	555	430	2,34	2,34	1,40	2,20	29,5	34,5	45,6	47,0
K+LP	620	510	2,30	2,22	3,10	5,70	23,8	30,0	41,1	37,2
K+LP-FM	558	385	2,30	2,28	4,40	5,00	21,8	29,0	47,0	48,7
S	450	375	2,37	2,33	2,20	3,60	24,0	31,0	59,9	61,6
S+FA	500	383	2,37	2,32	1,90	3,40	23,0	30,0	50,0	50,8
S+LP	535	415	2,29	2,21	3,80	5,90	28,5	37,5	46,3	42,7
HF	425	333	2,34	2,31	2,80	3,10	26,0	32,0	64,7	63,1
HF+FM	570	390	2,36	2,30	1,50	2,90	22,2	32,0	64,5	65,1
SVB	530*	438	2,35	2,28	1,40	2,60	23,2	31,1	63,6	66,7
SVB2	458*	473	2,35	2,31	1,00	1,90	25,5	33,5	64,7	66,0
SFB	590	489	2,32	2,27	2,20	3,30	25,2	28,8	75,6	69,5

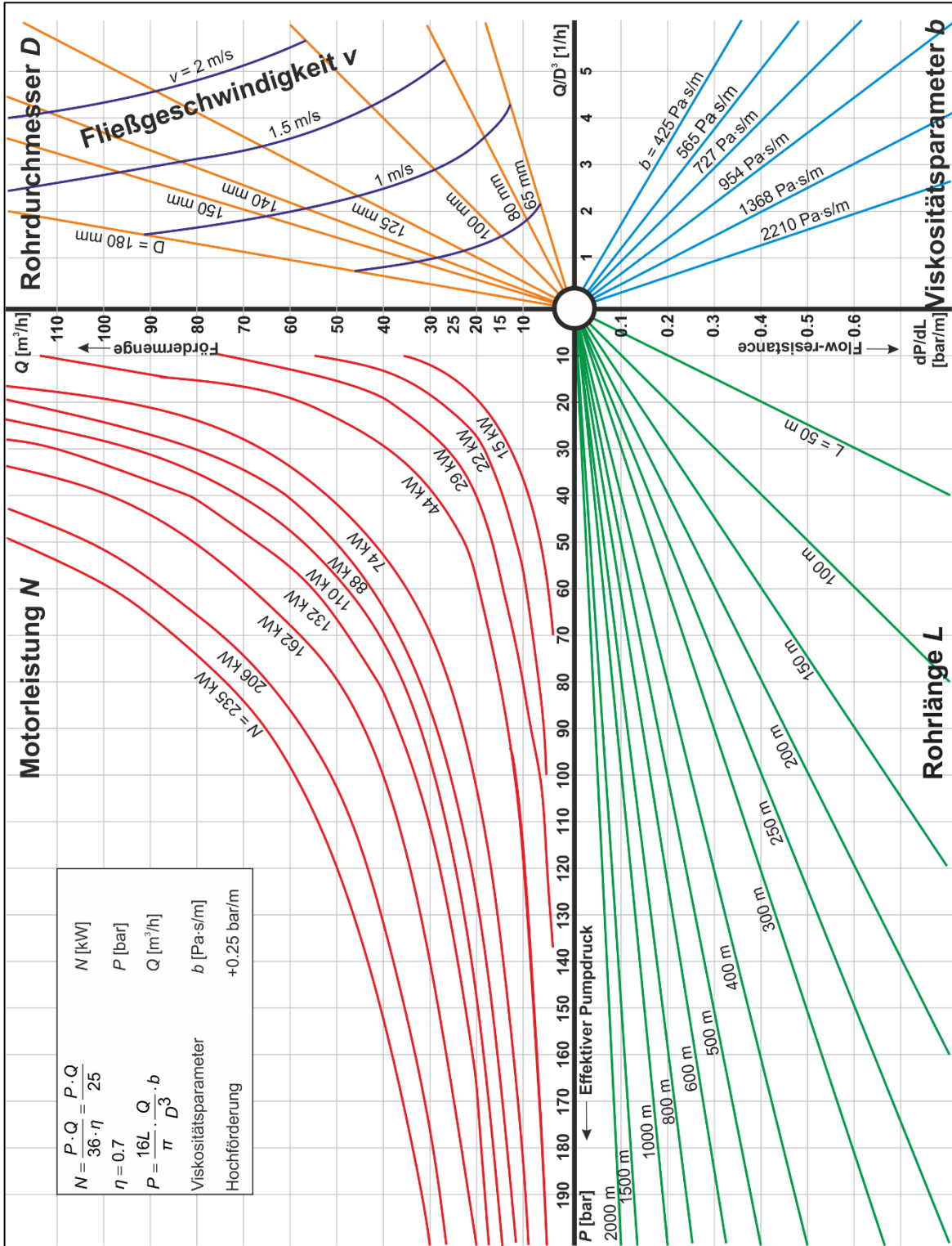


Bild 39. Betondruck-Leistungs-Nomogramm zur Einstellung von Parametern an der Betonpumpe, aus [71,72].