

Gemeinschaftliches Forschungsprojekt
der Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V.
und der Keller Grundbau GmbH

Entwicklung und Erprobung eines Online-Messsystems zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Zementsuspensionen beim Düsenstrahlverfahren

– Abschlussbericht –

Gefördert unter dem Az: 32564/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von:

Dr.-Ing. Christian Thienert, Dipl.-Ing. Christoph Klaproth,
Dipl.-Ing. Reiner Otterbein, Dipl.-Ing. Frank Ludwig

Köln, im Dezember 2017

Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt


 Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Az	32564/01	Referat	23	Fördersumme	169.457 €
Antragstitel	Entwicklung und Erprobung eines Online-Messsystems zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Zementsuspensionen beim Düsenstrahlverfahren				
Stichworte	Verfahren, System, Wiederverwertung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24 Monate	22.09.2015	21.09.2017	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V. Mathias-Brügggen-Str. 41 50827 Köln			Tel	0221 / 59795 – 24
				Fax	0221 / 59795 – 50
				Projektleitung Dr.-Ing. Chr. Thienert	
				Bearbeiter Dipl.-Ing. C. Klaproth	
Kooperationspartner	Keller Grundbau GmbH, NL Bochum Mausegatt 45-47 44846 Bochum Ansprechpartner: Dipl.-Ing. R. Otterbein, Tel.: 02327 / 804 – 51				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Unter dem Düsenstrahlverfahren (DSV) wird eine Bodenvermörtelung verstanden, die je nach Aufgabenstellung als Verfestigungs- oder Abdichtungsmaßnahme dient. Mithilfe eines Schneidstrahls mit Austrittsgeschwindigkeiten > 100 m/s aus Wasser oder Zementsuspension, der auch mit Luft ummantelt werden kann, wird der im Bereich des Bohrlochs anstehende Boden aufgeschnitten bzw. erodiert. Der erodierte Boden wird umgelagert und mit Zementsuspension vermischt, teilweise sogar gänzlich durch Zementsuspension ersetzt. Aktuell werden in Deutschland jährlich Düsenstrahlarbeiten mit einem Gesamtvolumen ca. 250 bis 350 Tausend m³ ausgeführt. Resultierend aus dem Rücklauf werden dabei etwa 220 bis 300 Tausend to Zement eingesetzt und es fallen nach überschlägigen Schätzungen etwa 80 bis 120 % (im Mittel 100 %) des Gesamtvolumens in flüssiger Form (Deponieklasse Abfall) an. Unter der Annahme, dass sich Boden und Zementsuspension also etwa im Verhältnis 1:1 vermischen und der Rücklauf im Mittel so viel Boden und Zementsuspension enthält wie der verfestigte DSV-Körper, werden 50 % der eingesetzten Zementsuspension praktisch ungenutzt entsorgt. Nach Abscheiden größerer Kornanteile mittels Siebung und Einsatz eines funktionierenden Online-Messsystems zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Zementsuspensionen beim Düsenstrahlverfahren könnten etwa 50 bis 70 % des Rücklaufs wiederverwendet werden. Dies entspricht also 25 bis 35 % der insgesamt eingesetzten Zementmenge, pro Jahr ca. 55 bis 105 Tausend to Zement in Deutschland – und damit einer Einsparung von ca. 60 Tausend to an spezifischer CO₂-Emission. Darüber hinaus würde ein Deponievolumen von bis zu ca. 125 bis 245 Tausend m³ für andere flüssige Abfälle nutzbar sein bzw. nicht benutzt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Der Lösungsweg sah eine Bewertung der Wiederverwendbarkeit der aus dem Bohrlochmund austretenden Suspension – des sogenannten Rücklaufs – anhand von rheologischen Kennwerten vor. Methodologisch fußte das Projekt vor allem auf Technikum-Versuchen nah am Realmaßstab, so dass sich folgende technische Arbeitsschritte ergaben:

Aufbau des Gesamtsystems

Zunächst galt es, die einzelnen technischen Komponenten und Details des Suspension-Fördersystems, durch das die zu prüfende Zementsuspension (Rücklauf) geleitet wird, zu planen und zu realisieren. Dazu zählten u. a. die Pumpeneinheiten, Messtrecken sowie ein geeignetes Bypass-System für die Baustelle. In dieses Suspension-Fördersystem wurden diverse Sensoren zur Bewältigung der anstehenden Messaufgaben zwecks Ableitung der rheologischen Eigenschaften der Suspension integriert.

Kalibrierung des Messsystems

Vor einer Kalibrierung waren zunächst qualitative Kenntnisse über die Abhängigkeiten zwischen den ermittelten Messgrößen und der Reaktivität der Zementsuspension bzw. des Rücklaufs erforderlich. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Tastversuche durchgeführt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde dann eine umfangreiche Versuchsreihe mit Variation verschiedener Parameter absolviert. Aus diesen Ergebnissen wurde anschließend eine Korrelationshypothese auf der Basis Künstlicher Neuronaler Netze formuliert und das Online-Messsystem kalibriert.

Erprobung

Den Abschluss des Projektes stellte eine Erprobung dar. In der Erprobungsphase kam das kalibrierte Online-Messsystem auf einer Baustelle unter praxisnahen Bedingungen zum Einsatz. Dies diente insbesondere dazu, die zuvor aufgestellte Korrelationshypothese hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit unter rauen Versuchsbedingungen zu verifizieren. Außerdem wurden im Rahmen der Baustellenversuche mögliche weitere Anforderungen im Hinblick auf die Baustellentauglichkeit des Gesamtsystems ermittelt.

Ergebnisse und Diskussion

Als Ergebnis der verschiedenen Arbeitsschritte lässt sich festhalten, dass ein grundsätzlich funktionsfähiges Online-Messsystem entwickelt werden konnte. Dies wurde sowohl anhand von Labor- als auch Baustellenversuchen nachgewiesen. Es ist somit mit Hilfe des Online-Messsystems möglich, auf Basis rheologischer Betrachtungen auf den Zementanteil und die Erhärtung zu schließen. Entsprechende Erkenntnisse können insbesondere dazu dienen, die Rücklaufsusension bei ausreichendem (Rest-)Bindemittelgehalt nach Abscheidung grober Bodenkornfraktionen in den Prozess-Kreislauf des Düsenstrahlverfahrens zurückzuführen und damit wiederzuverwenden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

In der letzten Projektphase wurde ein Seminar-Workshop abgehalten, um die neuen Erkenntnisse in der Fachwelt zu präsentieren und im Dialog mit den Teilnehmern weitere Erkenntnisse zum Thema Ressourceneffizienz im Grundbau im Allgemeinen und dem ökologischen Umgang mit suspensionsbasierten Bauverfahren im Speziellen zu erlangen.

Nach Abschluss des Projekts sollen nun konkrete wissenschaftlich-technische Ergebnisse in einschlägigen Fachzeitschriften sowie im Rahmen von Präsentationen auf Fachtagungen veröffentlicht werden.

Fazit

Zum Abschluss des Projektes lässt sich festhalten, dass das entwickelte und kalibrierte Online-Messsystem in der Lage ist, die rheologischen Eigenschaften einer DSV-Rücklaufsusension zu ermitteln und auf dieser Basis Bindemittelgehalte und Druckfestigkeitsentwicklung zu prognostizieren. Die Ergebnisse zeigten, dass die prognostizierten Werte des Online-Messsystems im Vergleich zu labor-technischen Untersuchungen nahezu identisch waren. Hinsichtlich eines zukünftigen Baustellenkonzeptes und einer Verbesserung der Robustheit im alltäglichen Baustellenbetrieb konnten zudem wertvolle Erkenntnisse erlangt werden.

Es wird empfohlen, in einem weiterführenden Projekt das Online-Messsystem aus dem Technikum-Maßstab in ein vollständig baustellentaugliches System zu überführen und dieses in ein entsprechendes Baustellkonzept zu integrieren. Zur Steigerung der Prognose-Qualität wird außerdem empfohlen, die Anzahl an Kalibrierversuchen zu steigern und das Verfahren auf verschiedene Bindemittel zu erweitern. Zudem wäre dann auch zu klären, inwieweit Mischungen aus Rücklauf-Suspension und Frischsuspension zielgerichtet anwendbar sind. Der wiederverwendbare Anteil ließe sich damit weiter steigern.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Begriffe und Abkürzungen	5
1 Einleitung	6
1.1 Stand der Technik	6
1.2 Angestrebte Innovationen und Umweltentlastung	7
1.3 Zielsetzung des Projekts	8
2 Aufbau Technikum-Anlage	10
2.1 Grundidee	10
2.2 Anforderungsprofil	10
2.3 Aufbau des Messsystems	11
3 Auswahl eines die Rheologie beeinflussenden Zusatzmittels	14
3.1 Vorgehensweise	14
3.1.1 Referenzmischungen	14
3.1.2 Anforderungen an die Zusatzmittel	15
3.1.3 Vorauswahl potentiell geeigneter Zusatzmittel.....	15
3.2 Eignungsuntersuchungen	17
3.2.1 Nachweis der generellen Eignung	17
3.2.2 Nachweis der verfahrensbedingten Eignung	19
3.3 Fazit der Eignungsuntersuchungen	20
4 Kalibrierung des Online-Messsystems	21
4.1 Festlegung eines standardisierten Ablaufs	21
4.2 Festlegung des Kalibrierprogramms	23
4.3 Qualitative Erkenntnisse aus den Kalibrierversuchen	26
4.4 Quantitative Kalibrierung	28
4.4.1 Grundlagen von Künstlichen Neuronalen Netzen	28
4.4.2 Ergebnisse der quantitativen Kalibrierung	31
5 Erprobung des Messsystems auf der Baustelle	32
5.1 Vergleich der Labor und in situ ermittelten Bindemittelanteile	32
5.2 Anforderungen an ein zukünftiges Baustellenkonzept	33
5.2.1 Vor- und Nachteile des gegenwärtig gewählten Aufbaus	34
5.2.2 Anforderungen zur Einbindung in den Prozesskreislauf	34

5.2.3	Detailverbesserungen zur Steigerung der Robustheit	34
5.2.4	Anwendung und Bedienung	35
5.2.5	Zukünftiges Baustellenkonzept	35
5.3	Ausblick auf die zukünftige Umweltentlastung	37
6	Seminar-Workshop.....	39
7	Fazit.....	40
7.1	Zusammenfassung	40
7.2	Ausblick.....	40
	Literaturverzeichnis.....	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Arbeitsschritte beim Düsenstrahlverfahren (DSV).....	6
Abbildung 1-2: Zementmassen und Volumenströme beim Düsenstrahlverfahren	7
Abbildung 2-1: Prozesstechnische Prinzipskizze des Online-Messsystems	10
Abbildung 2-2: Online-Messsystem	12
Abbildung 3-1: Vergleich des Ansteifens bei einer Zugabemenge von 5-Massen-% links: Natriumcarbonat; rechts: Betol 38.....	18
Abbildung 3-2: Exemplarischer Druckverlauf (w/b-Wert = 1,0 ; Dichte = 1,49 kg/m ³)	19
Abbildung 4-1: Standardisiertes Ablaufschema	22
Abbildung 4-2: Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Druckfestigkeit	25
Abbildung 4-3: Zeitlicher Druckverlauf in Abhängigkeit des Bindemittelanteils bei konstanter Suspension-Dichte von 1,60 t/m ³	26
Abbildung 4-4: Druckverläufe in Abhängigkeit der Dichte bei konstantem Bindemittelanteil von 75 %	27
Abbildung 4-5: Zusammenhang zwischen elektr. Leitfähigkeit und Bindemittelanteil	27
Abbildung 4-6: Schematische Darstellung eines KKN, [RW11].....	28
Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der Fehlerkurven, abgeleitet nach [RW11]	29
Abbildung 5-1: Erprobung auf der Baustelle links: DSV-Baustelle in Köln-Niehl; rechts: Messcontainer	32
Abbildung 5-3: Gegenüberstellung im Labor und in situ bestimmter Bindemittelanteile.....	33
Abbildung 5-4: Fließschema der Suspension, abgeändert nach VAUK [Vau11].....	36
Abbildung 5-5: Integration des Messsystems in den Produktionsablauf	36
Abbildung 5-6: Aufgestapelte Mulden im innerstädtischen Bereich.....	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Ergebnisse der ersten Versuchsreihe.....	18
Tabelle 4-1: Einzelversuche des Kalibrierprogramms	24
Tabelle 4-2: Merkmale des verwendeten Künstlichen Neuronalen Netzes	30
Tabelle 4-3: Gegenüberstellung der Soll-Ist-Werte	31

Begriffe und Abkürzungen

Begriff / Abkürzung	Erläuterung / Bezeichnung
AKM	Automatischer Keller Mischer
BE	Beschleuniger
BE-Fläche	Baustelleneinrichtungsfläche
DSV	Düsenstrahlverfahren
KNN	Künstliches Neuronales Netz
w/f-WertVerhältnis	Masse des Wassers zu Masse des Feststoffs
w/b-Wert	Verhältnis Masse des Wassers zu Masse des Bindemittels

Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
D_{Max}	Durchmesser des Größtkorns	mm
d_{50}	Mittlere Korngröße	mm
m	Masse	Kg
t	Zeit	s
V	Volumen	m^3
ρ	Dichte	kg/m^3

1 Einleitung

In Zeiten eines steigenden globalen Ressourcenbedarfs und vor dem Hintergrund des Klimawandels werden auch innerhalb der Bauindustrie Initiativen ergriffen, um vermehrt ressourcen- und energieschonende Verfahren anzuwenden. Eine Anforderung an jedes Bauverfahren im Allgemeinen und jedes Spezialtiefbauverfahren im Speziellen sollte somit der verantwortungsvolle Umgang mit den eingesetzten Materialien sein sowie das Bestreben, CO₂-Emission (sowohl bei der Herstellung der Materialien als auch beim Verfahren selbst) so gering wie technisch möglich zu halten. Nur so kann das Bauvorhaben aus ökologischer Sicht seine nachhaltige Wirkung voll entfalten.

1.1 Stand der Technik

Unter dem Düsenstrahlverfahren (DSV) wird eine Bodenvermörtelung verstanden, die je nach Aufgabenstellung als Verfestigungs- oder Abdichtungsmaßnahme dient. Mithilfe eines Schneidstrahls mit Austrittsgeschwindigkeiten $> 100 \text{ m/s}$ aus Wasser oder Zementsuspension, der auch mit Luft ummantelt werden kann, wird der im Bereich des Bohrlochs anstehende Boden aufgeschnitten bzw. erodiert (**Abbildung 1-1**). Der erodierte Boden wird umgelagert und mit Zementsuspension vermischt, teilweise sogar gänzlich ersetzt. Durch ein angepasstes Bohr- und Düsraster können Bauelemente mit verschiedener Geometrie (z. B. Lamellenwände, Dichtsohlen, Unterfangungen, Tiefgründungskörper) hergestellt werden. Die Erosionsweite des Düsenstrahls im Baugrund reicht je nach Boden, Verfahrensart und verwendeter Suspension bis zu 2,5 Meter. Nach dem Aushärten hat der Düsenstrahlkörper statisch nutzbare Eigenschaften. Im Gegensatz zu herkömmlichen Baugrundverfestigungsverfahren wird das Düsenstrahlverfahren in Bezug auf Festigkeit und Abdichtung in allen Lockergesteinen bis hin zum Torf erfolgreich angewendet. Dies gilt auch für Mischböden und Wechsellagerungen sowie organische Bereiche.

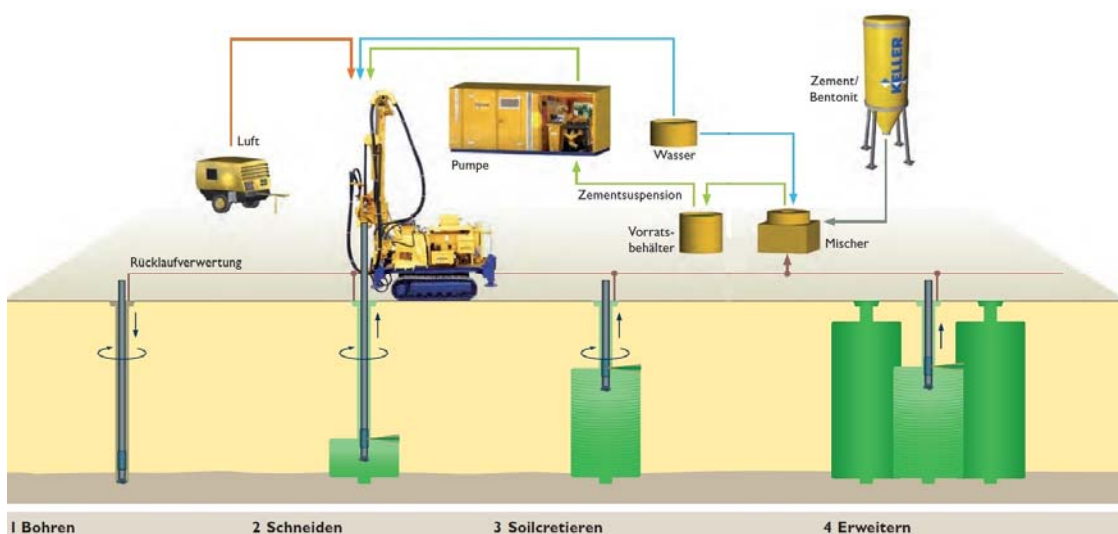


Abbildung 1-1: Arbeitsschritte beim Düsenstrahlverfahren (DSV)

Ein nicht unerheblicher Anteil der Mischung aus Zementsuspension und Bodenbestandteilen wird durch den Bohrlochringraum zum Bohrlochmund an die Geländeoberfläche gespült. Das Mischungsverhältnis (d. h. die Anteile an Zement, Boden und Wasser) dieser auch als Rücklauf bezeichneten Suspension ist nicht näher bekannt und variiert sowohl in Abhängigkeit der hydrogeologischen Randbedingungen als auch verfahrenstechnischer Parameter. Weil deshalb unklar ist, ob der Zementanteil des Rücklaufs im Vergleich zur Frischsuspension noch groß genug ist, um die erforderlichen Qualitätseigenschaften (v. a. Druckfestigkeit) nach dem Erhärten zu erreichen, muss der Rücklauf nach dem Stand der Technik auf einer Deponie entsorgt werden und kann nicht wiederverwendet werden.

1.2 Angestrebte Innovationen und Umweltentlastung

Aktuell werden in Deutschland jährlich Düsenstrahlarbeiten mit einem Gesamtvolumen (hergestellte Kubatur) von ca. 250 bis 350 Tausend m³ ausgeführt. Resultierend aus dem Rücklauf werden dabei (**Abbildung 1-2**) etwa 220 bis 300 Tausend t Zement eingesetzt und es fallen nach überschlägigen Schätzungen etwa 80 bis 120 % (im Mittel 100 %) des Gesamtvolumens in flüssiger Form (Deponiekategorie Abfall) an. Unter der Annahme, dass sich Boden und Zementsuspension also etwa im Verhältnis 1:1 vermischen und der Rücklauf im Mittel so viel Boden und Zementsuspension enthält wie der verfestigte DSV-Körper, werden 50 % der eingesetzten Zementsuspension praktisch ungenutzt entsorgt.

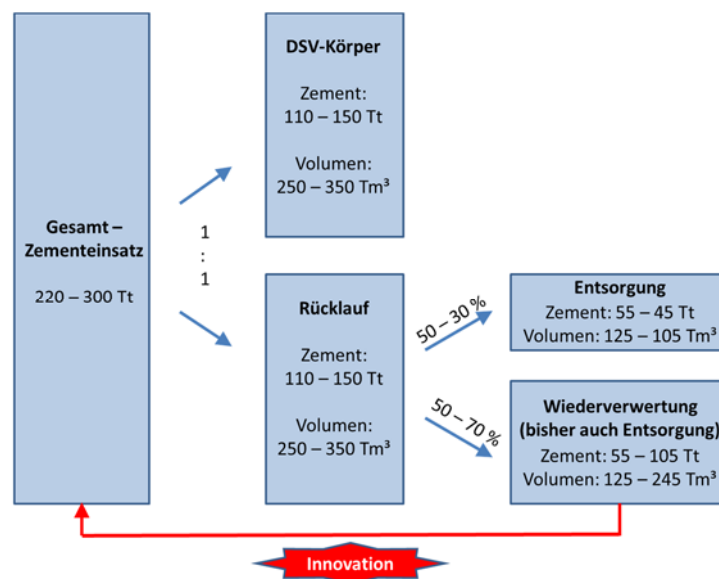


Abbildung 1-2: Zementmassen und Volumenströme beim Düsenstrahlverfahren

Nach Abscheiden größerer Kornanteile mittels Siebung und Einsatz eines funktionierenden Online-Messsystems zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Zementsuspensionen beim Düsenstrahlverfahren könnten etwa 50 bis 70 % des Rücklaufs wiederverwendet werden. Dies entspricht also 25 bis 35 % der insgesamt eingesetzten Zementmenge, pro Jahr ca. 55 bis 105 Tausend t Zement in Deutschland – und damit einer Einsparung von ca. 60 Tausend t an spezifischer CO₂-Emission [vdz13]. Darüber hinaus würde ein Deponievolumen von bis zu ca. 125 bis 245 Tausend m³ für andere flüssige Abfälle nutzbar sein bzw. nicht benutzt werden.

1.3 Zielsetzung des Projekts

Vor dem Hintergrund dieser großen Mengen an CO₂-Emissionen und Abfall ist die Zielsetzung des Projekts die Entwicklung und Erprobung eines modularen, auf Baustellen leicht integrierbaren Online-Messsystems, mit dessen Hilfe die Wiederverwendbarkeit von Zementsuspensionen beim Düsenstrahlverfahren bewertet werden kann.

Der Lösungsweg sieht im Gegensatz zu in der Vergangenheit verfolgten Ansätzen nicht etwa die mechanische Trennung von mit Bodenbestandteilen aufgeladener Zementsuspension vor, sondern eine Bewertung der Wiederverwendbarkeit der aus dem Bohrlochmund austretenden Suspension – des sogenannten Rücklaufs – anhand von rheologischen Kennwerten. Grundidee ist die Zugabe eines Erstarrungsbeschleunigers, nach dessen Zugabe sich die Fließfähigkeit der Suspension in Abhängigkeit des Bindemittelanteils ändert. Prinzipiell gilt, dass das damit verbundene Ansteifen (mit einhergehender Erhöhung der maßgeblichen rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität) umso ausgeprägter ist, desto größer die Reaktivität, d. h. der Zement- bzw. Bindemittelanteil ist.

Innovativ ist nicht nur der Lösungsansatz über rheologische Kennwerte, sondern auch die damit verbundene Reduzierung auf ein eher kostengünstiges Messsystem anstelle von umfangreicher Baustellenausstattung zur mechanischen Trennung. Dadurch wird zusätzlich zum Trennen erforderliche Energie eingespart sowie die Möglichkeit einer modularen Ergänzung zum ohnehin erforderlichen Equipment (Mischanlage, Verpresspumpen, Bohrgerät) auch bei kleineren Bauprojekten geschaffen.

Methodologisch fußt das Projekt vor allem auf Technikum-Versuchen nah am Realmaßstab, so dass sich folgende technische Arbeitsschritte ergeben, die untenstehend näher beschrieben werden:

- Aufbau des Gesamtsystems,
- Kalibrierung des Messsystems,
- Erprobung.

Aufbau des Gesamtsystems

Zunächst gilt es, die einzelnen technischen Komponenten und Details des Fördersystems, durch das die zu prüfende RücklaufSuspension geleitet wird, zu planen und zu realisieren. Dazu zählen u. a. die Pumpeneinheiten, Misch- und Messtrecken sowie ein geeignetes Bypass-System für die Baustelle. In dieses Suspension-Fördersystem sind diverse Sensoren (insbesondere zur Ermittlung von Dichte, Druck, Temperatur und chemischen Parametern) zur Bewältigung der anstehenden Messaufgaben zwecks Ableitung der rheologischen Eigenschaften der Suspension zu integrieren.

Kalibrierung des Messsystems

Vor einer Kalibrierung sind zunächst qualitative Kenntnisse über die Abhängigkeiten zwischen den ermittelten Messgrößen und der Reaktivität der Zementsuspension bzw. des Rücklaufs erforderlich. Dafür werden im Rahmen von Tastversuchen modellhafte Suspensionen mit Referenzmaterialien (Bindemittel sowie Feinsand) verwendet, denen verschiedene die Rheologie beeinflussende Zusatzmittel zugegeben werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse kann dann das am besten geeignete Zusatzmittel für die konkrete Aufgabe identifiziert werden. Auf der Basis einer Parametervariation (u. a. Bindemittel- und Gesteinskornanteil, Dichte) kann anschließend eine Korrelationshypothese zu formulieren. Dies geschieht im vorliegenden Fall auf der Basis Künstlicher Neuronaler Netze (KNN), so dass schlussendlich eine quantitative Kalibrierung des Messsystems möglich ist.

Erprobung

In einer anschließenden Erprobungsphase kommt das kalibrierte Online-Messsystem auf einer Baustelle unter praxisnahen Bedingungen zum Einsatz. Dies dient insbesondere dazu, die zuvor aufgestellte Korrelationshypothese hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit unter rauen Versuchsbedingungen zu verifizieren. Außerdem sollen im Rahmen der Baustellenversuche mögliche weitere Anforderungen im Hinblick auf die Baustellentauglichkeit des Gesamtsystems ermittelt werden.

Darüber hinaus wird in der letzten Projektphase ein Seminar-Workshop abgehalten, um Ergebnisse der Fachwelt zu präsentieren und im Dialog mit den Teilnehmern weitere Erkenntnisse zum Thema Ressourceneffizienz im Grundbau im Allgemeinen und dem ökologischen Umgang mit suspensionsbasierten Bauverfahren im Speziellen zu erlangen.

2 Aufbau Technikum-Anlage

2.1 Grundidee

Eine Festigkeitsprüfung oder eine Bestimmung des Bindemittelanteils von Zementsuspensionen ist nach dem Stand der Technik erst nach der hydraulischen Erhärtung im Alter von einigen Tagen möglich, wofür zumeist einaxiale Druckversuche absolviert bzw. komplexe Analyseverfahren wie Röntgendiffraktometrie angewendet werden. Wesentliche Idee des durchgeführten Projekts war es daher, Zementsuspensionen im noch fließfähigen Zustand anhand ihrer Reaktivität bei Zugabe eines Zusatzmittels auf der Grundlage rheologischer Parameter zu beurteilen und damit Rückschlüsse auf die zu erwartende Druckfestigkeit nach Bindemittelerhärtung bzw. den Bindemittelanteil zu ermöglichen.

Wie in **Abbildung 2-1** dargestellt, wurden dazu strömungsbedingte Druckverluste mittels Drucksensoren (P) in einer Messstrecke mit verengtem Querschnitt gemessen. Prinzipiell gilt, dass die Druckverluste infolge des Ansteifens (mit einhergehender Erhöhung der maßgeblichen rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität) umso ausgeprägter sind, desto größer die Reaktivität und damit der Bindemittelgehalt ist. Als weitere Parameter wurden Dichte (D) und Temperatur (T) sowie Leitfähigkeit (X) und pH-Wert (pH) ermittelt.

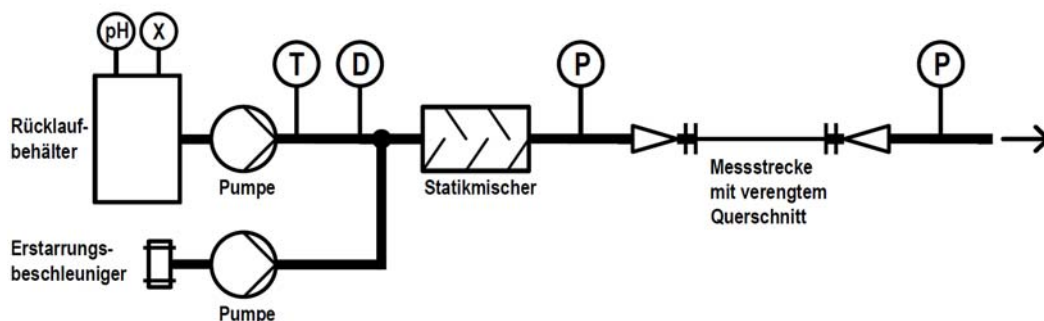


Abbildung 2-1: Prozesstechnische Prinzipskizze des Online-Messsystems

2.2 Anforderungsprofil

Beim Design des Messsystems war zu berücksichtigen, dass dieses als sogenanntes Online-Messsystem auszulegen war. Dies bedeutet, dass möglichst weitreichend folgende Kriterien (die untenstehend näher beschrieben sind) erfüllt werden sollten:

- Automatisierter Ablauf,
- Kontinuierliche Ergebnisausgabe,
- Baustellentauglichkeit.

Automatisierter Ablauf

Wie in praktisch allen anderen Wirtschaftsbereichen, stellen auch in der Bauwirtschaft Personalkosten einen großen Anteil der Gesamtkosten dar. Aus diesem Grund ist es anzustreben, dass große Teile der Messprozedur automatisiert ablaufen. Zudem soll das Messsystem von üblichem Baustellenpersonal bedienbar sein und keine speziellen Laborantefähigkeiten, wie bei einer detaillierten Laboranalytik, erfordern.

Kontinuierliche Ergebnisausgabe

Zudem soll das Messsystem so in den Suspensionskreislauf integrierbar sein, dass es praktisch kontinuierlich – also online – Messwerte liefern kann, und nicht etwa nur an einigen wenigen Einzelproben. Insoweit wird vorab definiert, dass möglichst alle Sensorwerte im Flüssigkeitsstrom der zu bewertenden Zementsuspension kontinuierlich und elektronisch registriert werden müssen. Dies ist auch im Sinne des Qualitätsmanagements anzustreben.

Baustellentauglichkeit

Wie bereits unter dem Punkt „Automatisierter Ablauf“ aufgeführt, ist auf eine einfache Bedienbarkeit besonderes Augenmerk zu richten. Dazu zählt neben der einfachen Bedienbarkeit durch baustellenübliches Personal im Wesentlichen eine robuste Ausführung aller Komponenten. Zu bevorzugen sind in diesem Zusammenhang jene Komponenten, mit denen das Personal aus anderweitigen Prozessschritten des Düsenstrahlverfahrens oder zumindest anderen Spezialtiefbauverfahren bereits vertraut ist.

2.3 Aufbau des Messsystems

Auf der Grundlage von zuvor beschriebener Grundidee und Anforderungsprofil erfolgt der Aufbau des Messsystems, wie in **Abbildung 2-2** dargestellt. Alle Komponenten sind auf vier Euro-Paletten vormontiert, sodass das Online-Messsystem in einem 10-Fuß-Baustellencontainer untergebracht werden kann. Nachfolgend wird die Auswahl einzelner wesentlicher Komponenten für das Fördern und Messen im Einzelnen näher begründet.

Pumpen

Da dem Online-Messsystem ein rheologisches Messprinzip zugrunde liegt, kommt einem kontinuierlichen Flüssigkeitsstrom eine besondere Bedeutung zu. Aus diesem Grund werden durchweg Exzentrerschneckenpumpen eingesetzt, die eine sehr pulsationsarme Förderung gestatten. Dies gilt sowohl für die zu prüfende Zementsuspension selbst als auch für die Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers, mit dem eine Änderung von Fließgrenze und Viskosität in Abhängigkeit des vorhandenen Bindemittelanteils initiiert wird.



Abbildung 2-2: Online-Messsystem

Sensoren zur Messung der Durchflussraten

Die Zugabe des Zusatzmittels muss volumendosiert in Abhängigkeit der Durchflussrate der Zementsuspension erfolgen. Zwar sind Exzentrerschneckenpumpen sehr pulsationsarm und haben darüber hinaus eine in weiten Bereichen lineare Pumpenkennlinie, jedoch sind Fördermengenschwankungen nicht immer vollständig auszuschließen. Aus diesem Grund ist eine kontinuierliche Messung der Volumenströme von Zementsuspension und Zusatzmittel erforderlich, um etwaigen Abweichungen steuerungstechnisch entgegenzuwirken. Vor dem Hintergrund, dass es sich bei Zementsuspension um Flüssigkeiten handelt, welche zum einen elektrisch leitfähig und zum anderen abrasiv sind, werden magnetisch-induktive Durchflusssensoren verwendet.

Sensor zur Messung der Suspensionsdichte

Ein wesentliches Merkmal von Rücklaufsuspensionen ist deren Dichte. Diese verändert sich gegenüber der eingedüsten Frischsuspension infolge der Aufnahme von Bodenbestandteilen und Aufnahme von Porenwasser/Abgabe von Filtratwasser im Baugrund. Vor dem Hintergrund beider erwähnten Effekte hat die Dichte erheblichen Einfluss auf die Festigkeit der erhärteten Suspension. Da Zementsuspensionen feststoffreich und abrasiv sind sowie Luftporen enthalten können, wird ein robustes Coriolis-Messsystem zur Dichtemessung verwendet.

Sensor zur Messung der Temperatur

Bekanntermaßen sind praktisch alle rheologischen Eigenschaften von Flüssigkeiten temperaturabhängig, vor allem die als wesentlich anzusehenden Parameter Fließgrenze und Viskosität. Um entsprechende Einflüsse berücksichtigen zu können, erfolgt eine kontinuierliche Messung der Temperatur der zu prüfenden Zementsuspension. Die ursprünglich gemäß Projektantrag zu untersuchende Temperaturdifferenz nach Zugabe eines Zusatzmittels ist

jedoch zu ungenau, sodass eine entsprechende Auswertung die Aussagekraft der Korrelationsfunktion nicht positiv unterstützt.

Sensoren zur Messung des Drucks

A priori wird angenommen, dass der Bindemittelanteil der Suspension dadurch ermittelt werden kann, dass bei Zugabe eines Zusatzmittels eine Änderung der rheologischen Eigenschaften (v. a. von Fließgrenze und Viskosität) erfolgt, welches sich bei konstantem Fördervolumen pro Zeiteinheit an einer Druckerhöhung in der Messstrecke mit verengtem Querschnitt bemerkbar macht. Die entsprechenden Drücke vor und hinter dieser Messstrecke werden daher mittels elektronischer Drucksensoren kontinuierlich registriert.

Messung chemischer Parameter

Aus anderen bautechnischen Anwendungen ist bekannt, dass die beiden chemischen Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert durch den Zementanteil beeinflusst werden, was im Wesentlichen auf die Ionen-Konzentration dissoziierter Hydroxide des Calciums zurückzuführen ist. Aufgrund kostengünstiger am Markt verfügbarer und auch unter Baustellenbedingungen einfach zu bedienender Handgeräte, welche eine Messung innerhalb weniger Sekunden durch einfaches Eintauchen gestatten, wird eine Online-Einbindung dieser Parameter als nicht zwingend erforderlich erachtet. Im Ergebnis erfolgt eine händische Messung im Rücklaufbehälter (siehe [Abbildung 2-1](#)).

3 Auswahl eines die Rheologie beeinflussenden Zusatzmittels

Wesentlich für die Funktionsfähigkeit bzw. das Messprinzip des in [Kapitel 2](#) beschriebenen Messsystems ist der Einsatz eines flüssigen Zusatzmittels, mit dem eine Änderung der rheologischen Eigenschaften der Rücklauf suspension infolge Interaktion mit dem Bindemittelanteil erfolgt. Entsprechendes wird mittels elektronischer Drucksensoren erfasst, und auf der Basis Künstlicher Neuronaler Netze (KNN) ausgewertet. Damit soll zum einen der Bindemittelgehalt der Suspension abgeleitet und zum anderen die erreichbare Festigkeit nach Erhärtung abgeschätzt werden.

3.1 Vorgehensweise

3.1.1 Referenzmischungen

Um Auswirkungen auf die Rheologie von Rücklauf suspensionen bei Zugabe von Zusatzmitteln bewerten zu können, sind zunächst geeignete Referenzmischungen festzulegen. Diese müssen einerseits weitgehend den in der Praxis zu erwartenden Eigenschaften entsprechen und andererseits eine vereinfachte Abbildung der Realität darstellen.

Verbreitet kommen für DSV-Arbeiten Hochofenzemente und Fertigbaustoffe zum Einsatz. Aus diesem Grund wurden zunächst zwei repräsentative Bindemittel für nachfolgende Eignungsversuche zur Prüfung der grundsätzlichen Verwendbarkeit ausgewählt:

- Hochofenzement CEM III/B 42,5 N (Hersteller: ENCI B. V.)
- Fertigbaustoff JetMix 397 (Hersteller: HeidelbergerCement AG)

Auf der Grundlage von Erfahrungswerten wird zunächst eine baustellentypische Frischsuspension mit folgendem Mischungsentwurf und Eigenschaften (für eine mittlere Korndichte von $\rho_s = 2,95 \text{ t/m}^3$) festgelegt:

- Wasser-Bindemittel-Wert: $w/b = 1,0$
- Suspensionsdichte: $\rho = 1,49 \text{ t/m}^3$

Zwecks Abbildung der in der Rücklauf suspension enthaltenen Feinkornanteile wird für die nachfolgenden Eignungsversuche ein Quarzmehl „Millisil W12“ mit einer mittlerer Korngröße $d_{50} = 0,16 \text{ mm}$ verwendet. Die Verwendung eines solch feinen Materials liegt im Vergleich zum zu erwartenden Bodenkorndurchmesser in der Rücklauf suspension auf der sicheren Seite, d. h. es ist aufgrund der größeren Kornoberfläche eine stärkere Interaktion als in situ mit dem Zusatzmittel zu erwarten.

3.1.2 Anforderungen an die Zusatzmittel

Aus technischer Sicht sind folgende wesentliche Anforderung an das Zusatzmittel zu stellen, das zu einer Änderung der rheologischen Eigenschaften (v. a. Fließgrenze und Viskosität) der Rücklaufsuspension in Abhängigkeit des Bindemittelanteils führt:

- Das Zusatzmittel interagiert oder reagiert lediglich mit dem Bindemittel, nicht aber mit anderen Feinkornanteilen des Bodens.
- Bei Zugabe des Zusatzmittels zeigt sich zeitnah eine Veränderung der rheologischen Eigenschaften, da die eigentliche Messstrecke (siehe [Abbildung 2-1](#)), durch welche die zu prüfende Suspension kontinuierlich strömt, nur eine begrenzte Länge aufweist.
- Die rheologischen Eigenschaften ändern sich signifikant, so dass eine zuverlässige Messung von Druckverlusten beim Durchströmen der Messstrecke unter Berücksichtigung üblicher Toleranzen möglich ist.
- Diese Änderungen dürfen nicht (auch nicht in Teilen) bei länger andauernder Scherung reversibel sein, da die Länge der zu durchströmenden Messstrecke vordefiniert ist.

Einen weiteren wichtigen technischen Aspekt bei der Wahl des Zusatzmittels stellt die Verträglichkeit mit allen Komponenten des in [Abschnitt 2.3](#) vorgestellten Gesamtsystems dar. Ausfallzeiten und aufwendige Reparaturen infolge von Materialunverträglichkeiten sind zu vermeiden, um einen sicheren Einsatz des Gesamtsystems im Dauerbetrieb unter rauen Baustellenbedingungen zu gewährleisten.

Über diese rein technischen Anforderungen hinaus muss das Betonzusatzmittel bezüglich Arbeitsschutz und Ökologie einschließlich Entsorgung unkritisch sein. Weiterhin ist anzustreben, dass dieses möglichst bei einer großen Anzahl von bauchemischen Anbietern verfügbar ist, um einseitige Produkt- und Lieferabhängigkeiten zu vermeiden. Nur unter Einhaltung aller aufgeführten Anforderungen ist eine spätere breite Einführung und Akzeptanz in der Praxis gewährleistet.

3.1.3 Vorauswahl potentiell geeigneter Zusatzmittel

Um die rheologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen (wie in vorigem [Abschnitt 3.1.1](#) aufgeführt) beeinflussen zu können, kommen grundsätzlich verschiedene Arten von Betonzusatzmitteln infrage, die in DIN EN 934-2 aufgeführt sind. Dazu zählen insbesondere:

- Fließmittel und Verflüssiger,
- Stabilisierer,
- Beschleuniger.

Fließmittel und Verflüssiger

Fließmittel und Verflüssiger werden in der Baustofftechnologie üblicherweise verwendet, um den Wasseranspruch bzw. den Wasser-Bindemittel-Wert zu reduzieren. Dadurch kann beispielsweise eine höhere Festigkeit bei identischer Betonkonsistenz erzielt werden. Diese Zusatzmittel interagieren jedoch nicht nur mit dem Zement, sondern können in Abhängigkeit der Mineralogie auch Gesteinsmehle bzw. feine Bodenkornanteile dispergieren. Außerdem liegen die meisten Frischsuspensionen beim DSV ohnehin bereits in einer gut fließfähigen Konsistenz vor. Aus beiden Gründen ist keine zielgerichtete Anwendung für die vorliegende Aufgabenstellung möglich.

Aus dieser Gruppe werden daher keine Produkte in nachfolgende Eignungsuntersuchungen einbezogen.

Stabilisierer

Chemische Stabilisierer sind zumeist Polymere, welche die Viskosität des Leimanteils im Beton bzw. der Zementsuspension beeinflussen. Aus diesem Grund werden sie in der englischen Sprache auch als Viskositätsmodifizierer bzw. Viscosity Modifying Agent (VMA) bezeichnet. Die Wirkungsweisen sind teilweise komplex, d. h. es kann entweder eine Interaktion mit der flüssigen Phase (Wasser) oder der festen Phase (Feinkorn) oder auch beidem erfolgen. Aus diesem Grund ist eine Anwendung solcher Zusatzmittel für die vorliegende Aufgabe grundsätzlich möglich, sofern sie vorrangig mit Zementkörnern interagieren.

Folgende Produkte aus dieser Gruppe wurden in nachfolgende Eignungsuntersuchungen einbezogen:

- Centrament Stabi VMA 2 (Polymere)
- Centrament Stabi VMA 3 (Polymere)

Beschleuniger

Beschleuniger sind zunächst nach Erstarrungs- und Erhärtungsbeschleuniger zu differenzieren. Erstarrungsbeschleuniger verringern die Zeit bis die Zementsuspension vom plastischen in den festen Zustand übergeht; hierzu zählen beispielsweise auch die sogenannten Spritzbetonbeschleuniger. Dem gegenüber stehen Erhärtungsbeschleuniger, welche die Anfangsfestigkeit von Betonen bzw. der Zementsuspension zu erhöhen vermögen, je nach Produkt entweder mit oder ohne Einfluss auf die Erstarrung. Für die konkrete Anwendung, bei der eine schnelle Reaktion der Suspension bei Zugabe eines Zusatzmittels benötigt wird, erscheinen Erstarrungsbeschleuniger besonders und Erhärtungsbeschleuniger weniger gut geeignet.

Folgende Produkte aus dieser Gruppe wurden in nachfolgende Eignungsuntersuchungen einbezogen:

- Natriumcarbonat (Soda),
- Centrament Rapid 640, (Aluminiumsulfat),
- Centrament Rapid 650, (Aluminiumhydroxysulfat),
- Betol 38 (Natronwasserglas).

3.2 Eignungsuntersuchungen

Die Eignungsuntersuchungen zur Prüfung der Anwendbarkeit der verschiedenen vorausgewählten Zusatzmittel erfolgen in zwei Stufen, wobei Zusatzmittel, welche die Anforderungen der ersten Versuchsreihe nicht erfüllen, als ungeeignet eingestuft und nicht weiter getestet werden:

1. Nachweis der generellen Eignung
2. Nachweis der verfahrensbedingten Eignung

3.2.1 Nachweis der generellen Eignung

In einer ersten Versuchsreihe wird die generelle Eignung der sechs vorausgewählten Zusatzmittel untersucht. Im Vordergrund steht dabei die Ermittlung der Zeitspanne von der Zugabe bis zum Eintreten der Erstarrungswirkung in Abhängigkeit der Dosierung. Ebenso sind die erreichbare Homogenität und die Stabilität bei weiterer Durchmischung zu beurteilen, beides erfolgt aufgrund visueller Beobachtung.

In jedem Einzelversuch wird eine Frischsuspension-Probe von 1 kg abgewogen und unter ständigem Rühren mittels Labormischer eine definierte Menge an Zusatzmittel beigemischt. Bei der Suspension handelt es sich um die Referenzmischung gemäß [Abchnitt 3.1.1](#) mit Hochofenzement. Die definierte Menge je Zusatzmittel beträgt für eine erste Probenserie 2,5 Massen-% und für eine zweite Serie 5,0 Massen-%, jeweils bezogen auf die Probenmasse von 1 kg. Ein Versuch endet entweder nach fünf Minuten oder nach einem deutlichen Ansteifen des Probematerials, abhängig davon, welches Ereignis zuerst eintritt.

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe sind in [Tabelle 3-1](#) zusammengefasst. Demnach zeigt sich, dass der Soda-Beschleuniger ([Abbildung 3-1](#)) keine der gestellten Anforderungen erfüllen kann. Die beiden Polymer-Stabilisierer liefern nur zum Teil zufriedenstellende Ergebnisse. So wird mit dem Produkt Centrament Stabi VMA 2 auch bei höherer Dosierung kein ausreichendes Ansteifen erzielt, wohingegen das Produkt Centrament Stabi VMA 3 Defizite in der Stabilität aufweist. Bei letztgenanntem ist nach einem anfänglichen Ansteifen der Suspension ein erneutes Verflüssigen bei weiterem Rühren zu beobachten. Mit den beiden Spritzbetonbeschleuniger Rapid 640 und Rapid 650 werden insgesamt gute Ergebnisse erzielt. Bei einer Zugabemenge von 5,0 Massen-% zeigen sowohl Centrament Rapid 640 als auch Centrament Rapid 650 ein deutliches Ansteifen der Referenzsuspension und weisen ein homogenes und stabiles Gefüge auf.

Allen gestellten Anforderungen entspricht das Natronwasserglas bereits bei vergleichsweise geringer Dosierung von lediglich 2,5 Massen-% vollständig, wobei die Wirkung im Vergleich

zu den anderen Beschleunigern als extrem anzusehen ist. Vor dem Hintergrund, dass Natronwasserglas wasserverdünnbar ist, kann dieses Verhalten insgesamt als unkritisch bewertet werden.

Tabelle 3-1: Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

Versuch 1	Anforderungen		
	Ansteifen innerhalb von 5 Minuten	Kein frühzeitiges Entmischen / keine Klumpenbildung	Stabilität bei weiterer Durchmischung
Natriumcarbonat	- / -	- / -	- / -
Centrament Rapid 640	o / +	+ / +	+ / +
Centrament Rapid 650	o / +	+ / +	+ / +
Centrament Stabi VMA 2	- / -	+ / +	+ / +
Centrament Stabi VMA 3	+ / o	+ / +	+ / -
Betol 38	+ / +	+ / +	+ / +

Bewertung bei einer Dosierung von 2,5 M-% / 5,0 M-%

Bewertung: „-“ Anforderung nicht erfüllt; „o“ Anforderung teilweise erfüllt; „+“ Anforderung voll erfüllt



**Abbildung 3-1: Vergleich des Ansteifens bei einer Zugabemenge von 5-Massen-%
links: Natriumcarbonat; rechts: Betol 38**

Basierend auf den Ergebnissen dieser ersten Versuchsreihe zeigt sich, dass eine generelle Eignung für die vorliegende Aufgabenstellung lediglich den beiden Spritzbetonbeschleuniger Centrament Rapid 640 und Centrament Rapid 650 sowie dem Natronwasserglas Betol 38 bescheinigt werden kann. Es werden daher lediglich diese drei Zusatzmittel im Rahmen der nachfolgenden Versuchsreihe berücksichtigt.

3.2.2 Nachweis der verfahrensbedingten Eignung

In einer zweiten Versuchsreihe wird die Änderung der rheologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen bei Zugabe eines Zusatzmittels bzw. Beschleunigers (BE) nicht wie zuvor an Proben im Becher unter Verwendung eines Labormischers betrachtet, sondern am in [Abschnitt 2.3](#) dargestellten Gesamtsystem durchgeführt. Hierdurch sollte insbesondere die Übereinstimmung mit den in [Abschnitt 3.1.2](#) formulierten technischen Anforderungen überprüft werden.

In [Abbildung 3-2](#) sind die Messdaten eines Versuchs bei einer Beschleuniger-Zugabe (Natronwasserglas Betol 38) von 4,5 Volumen-% bei einer Suspensionsförderrate von 2,0 l/min dargestellt; es wird die Referenzsuspension aus [Abschnitt 3.1.1](#) mit Hochofenzement verwendet. In diesem Diagramm sind die Messwerte „Durchflussrate Beschleuniger“ sowie Druck vor und nach der Messstrecke über die Zeit dargestellt. Es ist erkennbar, dass beim Ein- bzw. Ausschalten der BE-Zugabe eine unmittelbare Änderung des Druckniveaus stattfindet. Ähnliche Verläufe wurden auch bei Verwendung der Produkte Centrament Rapid 640 und Centrament Rapid 650 registriert.

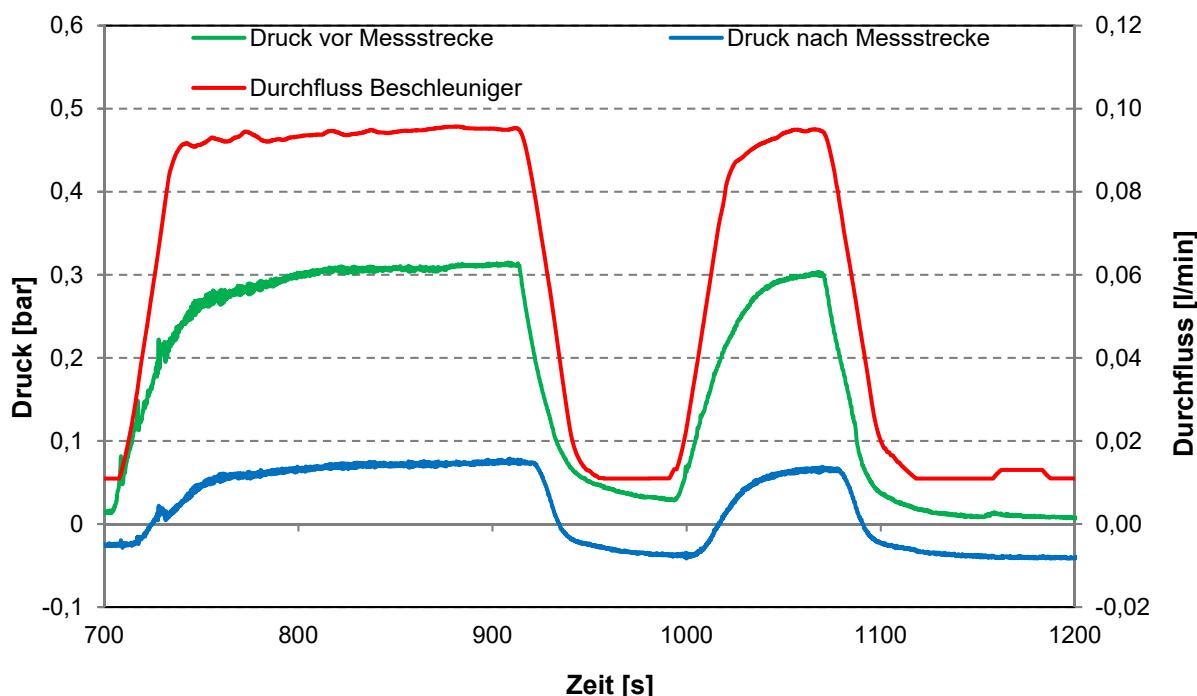


Abbildung 3-2: Exemplarischer Druckverlauf (w/b-Wert = 1,0 ; Dichte = 1,49 kg/m³)

Im Rahmen weiterer Probeläufe des Gesamtsystems wird die Zugabemenge an Wasserglas in größeren Bandbreiten als im Rahmen der ersten Versuchsreihe (siehe [Abschnitt 3.2.1](#)) variiert, um eine optimale Zugabemenge zu ermitteln. Vor allem gilt es, das Ausbilden von

Stopfern, das bei höheren Bindemittelgehalten der Suspension mitunter spontan wegen der bereits erwähnten starken Wirkung zu erfolgen vermag, zu vermeiden. Dazu wird das Natronwasserglas mit destilliertem Wasser im Verhältnis 1:1 (massebezogen) verdünnt. Auf Grundlage dieser Versuche kann der optimale Dosierbereich des verdünnten Natronwasserglases mit 4,5 bis 10,5 Volumen-% (bzw. Zugaberate 0,09 bis 0,21 l/min) beziffert werden.

Ergänzend zur Überprüfung der Übereinstimmung mit den technischen Anforderungen können im Rahmen dieser Versuchsreihe folgende weitere Erkenntnisse gesammelt werden:

- Centrament Rapid 650 führt aufgrund des niedrigen pH-Wertes von 3,6 zu einer starken Korrosion aller nicht aus Edelstahl gefertigten Teile.
- Centrament Rapid 650 bildet nach dem Spülen der Rohre Verstopfungen aus, die aufwendige Reinigungsarbeiten nach sich ziehen. Als mögliche Ursache wird eine Störung des Lösungsgleichgewichts durch das zusätzliche Wasser angesehen, durch das es zur Kristallisation kommt.

3.3 Fazit der Eignungsuntersuchungen

Auf Grundlage der Versuche zum Nachweis der verfahrensbedingten Eignung hat sich das Natronwasserglas Betol 38 mit einer Verdünnungsfaktor von 1:1 mit destilliertem Wasser als am besten geeignet erwiesen. Diese Mischung wird daher für die nachfolgend anstehende Kalibrierung verwendet. Der optimale Dosierbereich liegt im Bereich von 4,5 bis 10,5 Volumen-%.

4 Kalibrierung des Online-Messsystems

Nach Auswahl eines die Rheologie beeinflussenden Zusatzmittels in Form von Natronwasserglas sowie die Festlegung verfahrenstechnischer Randbedingungen (siehe [Kapitel 3](#)), kann das Online-Messsystem nun kalibriert werden. Konkret soll eine Prognose von einaxialen Druckfestigkeiten und Bindemittelanteilen auf der Grundlage von Frischsuspensionseigenschaften abgegeben werden können.

Im Vorfeld der eigentlichen Kalibrierung des Online-Messsystems besteht die Anforderung, qualitative Kenntnisse der Abhängigkeiten zwischen relevanten Messgrößen und der Suspension-Zusammensetzung zu erlangen, um die Struktur eines Künstlichen Neuronalen Netzes (das anschließend für die quantitative Auswertung herangezogen wird) zielgerichtet zu entwickeln. Ergänzend sind die Druckfestigkeiten (welche den späteren Prognosewert darstellen) verschiedener Zementsuspensionen zu ermitteln und zu berücksichtigen. Als maßgebliche Druckfestigkeit wird jene in einem Alter von sieben Tagen angesehen. Dies stellt eine Abwägung zwischen einer Mindestdruckfestigkeit dar, um einerseits entsprechende Versuche überhaupt durchführen zu können und andererseits möglichst zeitnah Ergebnisse zu erhalten.

Anschließend erfolgt die eigentliche quantitative Übertragung der relevanten Messgrößen auf Druckfestigkeiten bzw. Bindemittelanteile mittels der bereits erwähnten Künstlichen Neuronalen Netze, auf die in [Abschnitt 4.4.1](#) näher eingegangen wird. Künstliche Neuronale Netze sind in der Lage, anhand von gegebenen Daten Zusammenhänge zu erlernen und zukünftig Prognosen abzugeben. Diesem Ansatz wird gegenüber klassischen Näherungsrechnungen der Vorzug gegeben, da vergleichsweise komplexe Zusammenhänge zwischen chemischer Reaktivität des Zements und den rheologischen Messgrößen vorliegen.

4.1 Festlegung eines standardisierten Ablaufs

Die Qualität der Kalibrierung – und damit die Qualität der späteren Druckfestigkeits- und Bindemittelanteil-Prognose – ist bei Künstlichen Neuronalen Netzen im großen Maße davon abhängig, ob die Vergleich- und Wiederholbarkeit der Ergebnisse sowie eine einfache Datenaufbereitung der Messwerte gewährleistet ist. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, zunächst einen standardisierten Ablauf der Messungen zu definieren. Das schlussendlich angewandte und in [Abbildung 4-1](#) dargestellte Schema berücksichtigt dabei folgende Aspekte, die untenstehend näher erörtert werden:

- Einzusetzende Suspensionsmenge,
- Anzahl und Dauer der Dosierstufen,
- Entnahme von Proben,
- Gesamtdauer der Messung.

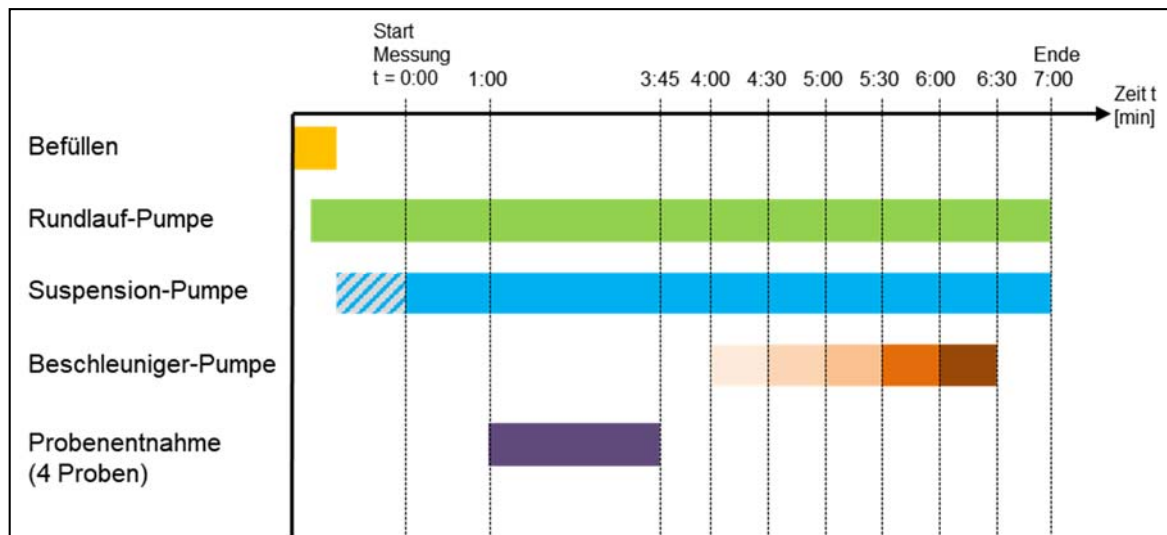


Abbildung 4-1: Standardisiertes Ablaufschema

Einzusetzende Suspensionsmenge

Die zu untersuchende Rücklauf-Suspension wird im Zuge der Durchströmung des Online-Messsystems mit Beschleuniger versetzt und muss daher nach Abschluss des Messvorgangs entsorgt werden. Aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten ist daher anzustreben, die Probenmenge und damit die Versuchsdauer so gering wie möglich zu halten. Dem gegenüber steht jedoch das verfahrenstechnische Erfordernis, einen ausreichend langen Zeitraum für die stufenweise Erhöhung der Beschleunigerdosierung mit anschließend zeitweilig konstanter Dosierung bereitzustellen. Zudem muss eine ausreichend homogene Durchmischung beider Komponenten möglich sein. Auf der Grundlage entsprechender Tastversuche wird eine Suspensions-Förderrate von 2,0 l/min als zweckmäßig erachtet.

Anzahl und Dauer der Dosierungsstufen

Der Zeitraum je Dosierungsstufe ist so zu wählen, dass innerhalb der Messstrecke eine Reaktion des Beschleunigers mit dem Bindemittel möglich ist und somit ein Ansteifen der Suspension durch die Drucksensoren registriert werden kann. Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Eignungsuntersuchungen (siehe [Abschnitt 3.2](#)) wird eine Zeitdauer von je 30 s gewählt. Die Anzahl der Dosierstufen ergibt sich aus einer schrittweisen Erhöhung der Dosierung um jeweils 0,03 l/min sowie aus der unteren und oberen Grenze des ermittelten Einsatzbereichs des Natronwasserglases zu insgesamt fünf Dosierstufen von 4,5, 6,0, 7,5, 9,0 und 10,5 Volumen-% (bzw. 0,09, 0,12, 0,15, 0,18, 0,21 l/min bei einer Suspensionsförderrate von 2,0 l/min). Aus der Dauer und Anzahl der Dosierungsstufen folgt, dass die Zeitdauer der Beschleunigerzugabe insgesamt 2:30 Minuten beträgt.

Entnahme von Proben

Wie bereits obenstehend erwähnt, wird aus ökologischen und verfahrenstechnischen Gesichtspunkten ein Suspension-Förderstrom von 2 l/min angestrebt. Die üblichen PVC-Probenbehälter zur Bestimmung einaxialer Druckfestigkeiten an zylindrischen Probekörpern weisen ein Fassungsvermögen von 1,25 l auf. Daraus folgt, dass die Befüllung der PVC-Probebehälter in etwa 30 s benötigt. Unter Einbeziehung einer Pufferzeit beträgt die benötigte Zeit zur Entnahme von vier Proben knapp 3:00 Minuten.

Gesamtdauer der Messung

Aus der Beschleunigerzugabe und der Probenentnahme ergibt sich eine Netto-Versuchsdauer von 5:30 Minuten. Zur Sicherstellung eines gleichmäßigen Förderstroms und einer vollständigen Entlüftung der Anlage ist die Suspension-Pumpe bereits etwa eine Minute vor Probenentnahme in Betrieb zu setzen. Als Nachlaufzeit werden zusätzliche 30 s veranschlagt, um ein etwaiges Ausbilden sogenannter Stopfer sicher zu unterbinden. Somit ergibt sich eine Gesamtversuchsdauer von 7:00 Minuten; dies entspricht einer Gesamtmenge an einzusetzender Suspension von lediglich ca. 14 Litern.

4.2 Festlegung des Kalibrierprogramms

Die Kalibrierung des Online-Messsystems, auf die in [Abschnitt 4.4](#) näher eingegangen wird, soll mittels Künstlicher Neuronaler Netze (KNN) erfolgen. Die Qualität entsprechender Ergebnisse hängt im starken Maße von der Datengrundlage ab und kann mit einer größer werdenden Anzahl an Messungen stetig verbessert werden. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass KNN nicht in der Lage sind, außerhalb der Datengrundlage liegende Prognosen abzugeben. Daher ist ein Kalibrierprogramm erforderlich, welches möglichst das volle Spektrum an in der Realität auftretender Rücklauf-Suspension-Zusammensetzungen abdeckt.

Für das Kalibrierprogramm gilt es daher zunächst, die maßgeblichen Kennwerte von Rücklauf-Suspensionen festzulegen. Mengenmäßig veränderlich sind insbesondere die Anteile an Wasser, Bindemittel und Bodenkorn, sodass folgende unabhängige Kennwerte, auf die untenstehend näher eingegangen wird, als maßgeblich erachtet werden:

- Suspensionsdichte,
- Bindemittelanteil am Feststoff.

Insgesamt werden zunächst sieben verschiedene Dichten und je vier Bindemittelanteile (B-Anteile) betrachtet, so dass insgesamt 28 Einzelversuche erforderlich sind. [Tabelle 4-1](#) zeigt eine Zusammenfassung der variierten Kennwerte. Die Wasser-Bindemittel-Werte w/b und die Wasser-Feststoff-Werte w/f (Feststoff = Masse Bindemittel + Masse Bodenkorn) sind von Dichte und B-Anteil abhängige Größen. Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und zur Validierung der Korrelationshypothese werden einzelne Versuche doppelt durchgeführt. Ein Datensatz wird dabei für das sogenannte Training des KNN verwendet, der andere Datensatz zwecks qualitativer und quantitativer Validierung.

Tabelle 4-1: Einzelversuche des Kalibrierprogramms

Versuch	Dichte [kg/l]	B-Anteil [%]	w/b-Wert	w/f-Wert
V01	1,20	100	2,97	2,97
V02	1,20	75	3,88	2,91
V03	1,20	50	5,70	2,85
V04	1,20	25	11,17	2,79
V05	1,30	100	1,86	1,86
V06	1,30	75	2,43	1,82
V07	1,30	50	3,56	1,78
V08	1,30	25	6,96	1,74
V09	1,40	100	1,31	1,31
V10	1,40	75	1,71	1,28
V11	1,40	50	2,49	1,25
V12	1,40	25	4,85	1,21
V13	1,50	100	0,98	0,98
V14	1,50	75	1,27	0,95
V15	1,50	50	1,85	0,93
V16	1,50	25	3,59	0,90
V17	1,60	100	0,76	0,76
V18	1,60	75	0,98	0,74
V19	1,60	50	1,42	0,71
V20	1,60	25	2,74	0,69
V21	1,70	100	0,61	0,61
V22	1,70	75	0,78	0,58
V23	1,70	50	1,12	0,56
V24	1,70	25	2,14	0,54
V25	1,80	100	0,49	0,49
V26	1,80	75	0,62	0,47
V27	1,80	50	0,89	0,44
V28	1,80	25	1,69	0,42

Variation der Suspensionsdichte

Die erste Variation betrifft den Kennwert der Suspensionsdichte. Auf DSV-Baustellen anzutreffende typische Dichten einer Rücklauf-Suspension liegen im Bereich von 1,20 bis 1,80 t/m³. Zur Vereinfachung wird an dieser Stelle angenommen, dass der Anteil der Luftporen am Gesamtvolumen als vernachlässigbar klein angesehen werden kann und somit nicht in der Rechnung berücksichtigt werden muss. Folgende Stufen werden im Rahmen des Kalibrierprogramms betrachtet:

- Dichte 1,20 t/m³
- Dichte 1,30 t/m³
- Dichte 1,40 t/m³
- Dichte 1,50 t/m³
- Dichte 1,60 t/m³

- Dichte 1,70 t/m³
- Dichte 1,80 t/m³

Variation des Bindemittelanteils

Darüber hinaus wird die Zusammensetzung des Feststoffgehaltes variiert, wobei eine stufenweise Änderung von Bindemittelanteil und Bodenkornanteil erfolgt. Die bei DSV-Arbeiten im nicht-bindigen Boden zu erwartenden Kornanteile wurden durch die Zugabe eines Feinsandes mit einem Größtkorn von 1,0 mm abgebildet. Folgende Stufen werden betrachtet:

- 100 M.-% Bindemittelanteil; 0 M.-% Bodenkornanteil am Feststoffgehalt,
- 75 M.-% Bindemittelanteil; 25 M.-% Bodenkornanteil am Feststoffgehalt,
- 50 M.-% Bindemittelanteil; 50 M.-% Bodenkornanteil am Feststoffgehalt,
- 25 M.-% Bindemittelanteil; 75 M.-% Bodenkornanteil am Feststoffgehalt.

Da die Korndichten vom Bindemittel ($\rho_s = 2,96 \text{ t/m}^3$) und Boden ($\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$) unterschiedlich sind, ergibt sich mit der Variation des Bindemittelanteils auch eine Änderung des Wasseranteils.

Bestimmung des Prognosewertes Druckfestigkeit

Übergeordnetes Ziel des Online-Messsystems ist es, die einaxiale Druckfestigkeit des erhärteten DSV-Körpers und den Bindemittelanteil auf Basis der Änderung der rheologischen Eigenschaften der Zementsuspension bei Zugabe eines Zusatzmittels abzuschätzen. Im Rahmen der Kalibrierung sind also diese späteren Prognosewerte ebenfalls zu ermitteln. Dazu werden die Druckfestigkeiten im Alter von sieben Tagen an allen Proben aus den erwähnten insgesamt 28 Einzelversuchen ermittelt (siehe [Abbildung 4-2](#)).



Abbildung 4-2: Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Druckfestigkeit

Beim Öffnen der Probenbehälter nach sieben Tagen zeigte sich, dass sich sogenanntes Blutwasser an der Oberfläche abgesetzt hatte. Dies ist auf eine Sedimentation der beteiligten Kornfraktionen zurückzuführen. Aus der Praxis ist bekannt, dass sich größere Kornanteile (Sand und Kies) im unteren Bereich der Probe anreichern, wohingegen die Probenoberseite einen erhöhten Wasseranteil aufweist. Dieser Effekt tritt umso stärker auf, je höher der w/b-Wert der Suspension ist. Diese Inhomogenität führt dazu, dass die gemessene Druckfestigkeit eines Prüfkörpers mitunter deutlich reduziert sein kann. Um die Vergleichbarkeit und damit Aussagekraft zu erhöhen, wurden die Probekörper vor der Durchführung der eigentlichen Druckfestigkeitsversuche auf eine einheitliche Länge von 10 cm mittels Steinsäge abgelängt; überschüssiges Probematerial wurde zu gleichen Anteilen an Ober- und Unterseite entfernt.

4.3 Qualitative Erkenntnisse aus den Kalibrierversuchen

Nach Durchführung der 28 Versuche am Online-Messsystem einschließlich der Ermittlung der Druckfestigkeiten lassen sich nach Abschluss der Kalibrierversuche bereits erste Aussagen über die generelle Eignung des gewählten Lösungsansatzes und die qualitative Übereinstimmung mit erwarteten Ergebnissen treffen.

Wie aus **Abbildung 4-3** für eine konstante Suspensionsdichte von $1,60 \text{ t/m}^3$ für alle vier Einzelversuche erkennbar ist, besteht ein klarer Zusammenhang zwischen der Messgröße „Druck“ bzw. „Druckverlust“ und dem Bindemittelanteil (B-Anteil) der Suspension. Demnach sind die gemessenen Drücke umso höher, desto größer der Bindemittelanteil ist. Insbesondere bestätigt sich hiermit die Richtigkeit des bereits im Vorfeld skizzierten Messprinzips.

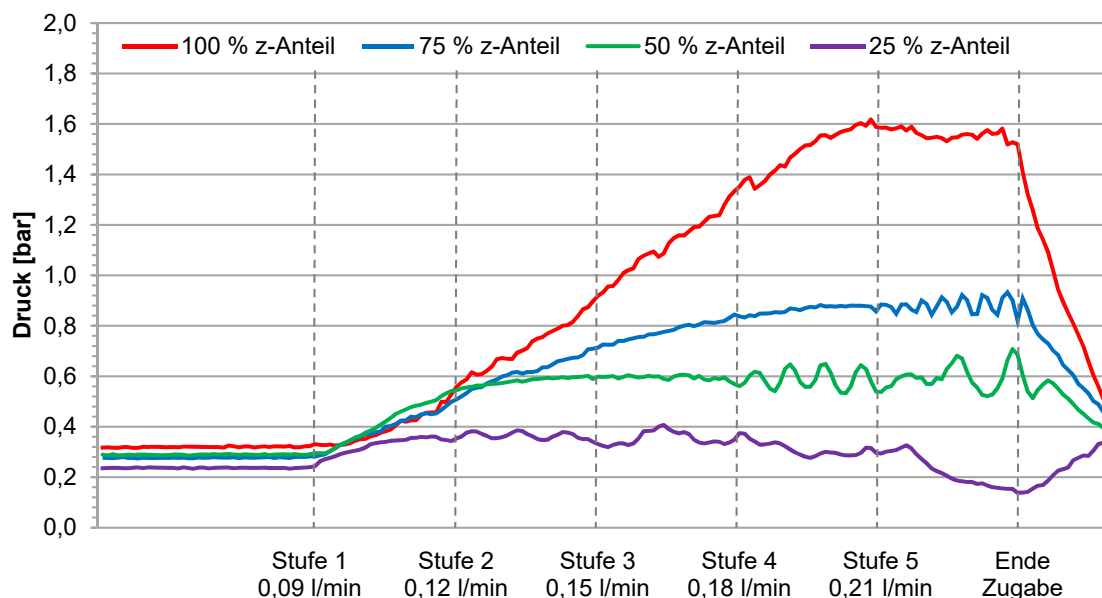


Abbildung 4-3: Zeitlicher Druckverlauf in Abhängigkeit des Bindemittelanteils bei konstanter Suspensions-Dichte von $1,60 \text{ t/m}^3$

Auffällig ist zum einen, dass das jeweilige Druck-Maximum bei niedrigem Bindemittelanteil schneller erreicht wird als bei einem hohen. Darüber hinaus sind Druckschwankungen um

einen asymptotischen Endwert (ohne weitere Erhöhung des Maximaldrucks) stärker ausgeprägt, wenn der Bindemittelanteil gering ist. Zum anderen ist beim geringsten betrachteten Bindemittelanteil von 25 % nach dem Ausschalten des Beschleunigers zunächst ein Abfall des Drucks unter den Startwert zu beobachten. Es ist zu vermuten, dass bei einem niedrigen Bindemittelanteil eine deutliche Überdosierung des Beschleunigers vorliegt, so dass nicht der gesamte Wirkstoff reagiert, sondern es zu einer weiteren „Verwässerung“ der Suspension kommt. Wie aus **Abbildung 4-4** erkennbar ist, sind zuvor beschriebene qualitative Verläufe umso ausgeprägter, je höher die Dichte der Suspension ist.

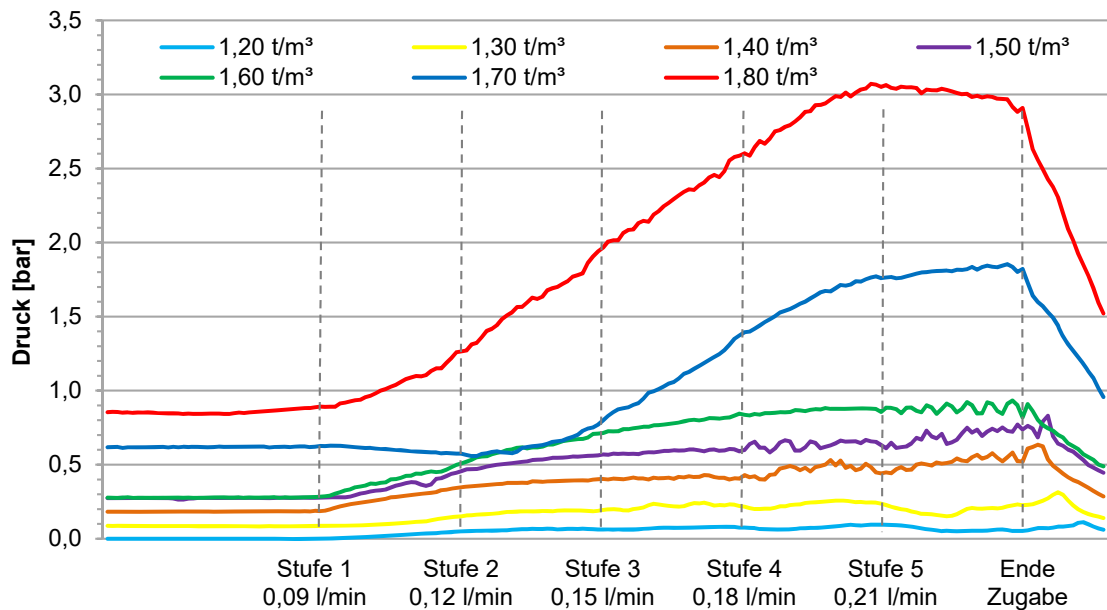


Abbildung 4-4: Druckverläufe in Abhängigkeit der Dichte (B-Anteil = 75%)

Aus **Abbildung 4-5** ist ersichtlich, dass zudem ein Zusammenhang besteht zwischen dem Bindemittelanteil und der Messgröße „elektrische Leitfähigkeit“, d. h. mit zunehmendem Bindemittelanteil erhöht sich auch die elektrische Leitfähigkeit.

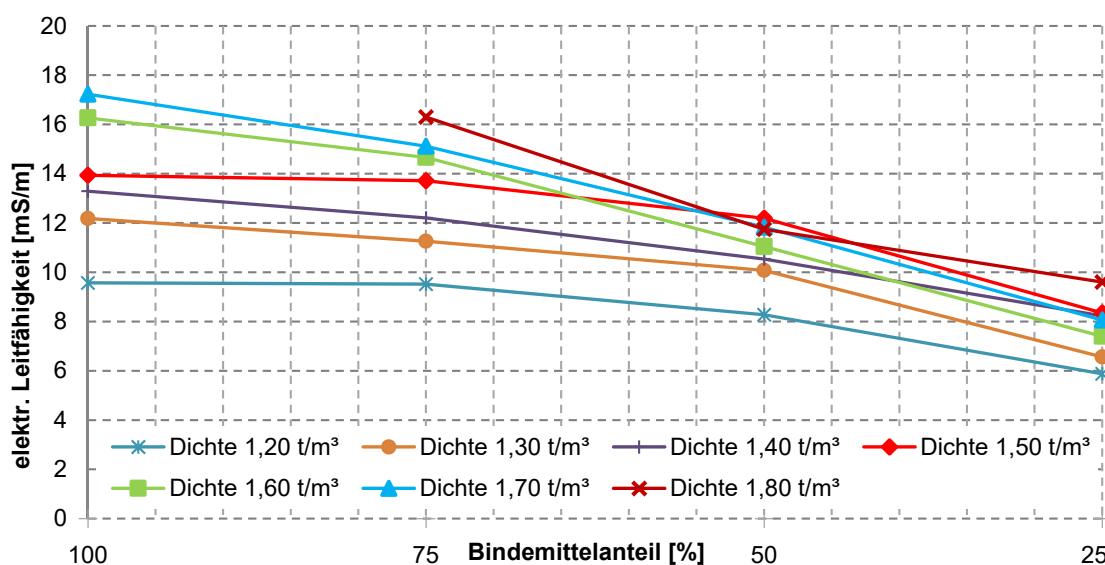


Abbildung 4-5: Zusammenhang zwischen elektr. Leitfähigkeit und Bindemittelanteil

Die Reproduzierbarkeit dieser qualitativen Ergebnisse konnte durch Wiederholung mehrerer Versuche bei identischer Zusammensetzung der Suspension nachgewiesen werden. In diesem Zusammenhang zeigte sich auch, dass der Einfluss externer Faktoren, wie z. B. der Außentemperatur, eher gering ist und somit vernachlässigt werden kann.

4.4 Quantitative Kalibrierung

Wie zuvor dargestellt, haben die Kalibrierversuche gezeigt, dass der Anteil des Bindemittels mit verschiedenen Messgrößen qualitativ korreliert. Um eine tatsächliche Prognose der zu erwartenden Eigenschaften erhärteter Suspensionen abgeben zu können, sind jedoch quantitative Auswertungen der Messgrößen unabdingbar. Für die Ermittlung einer entsprechenden Korrelationsfunktion bzw. Näherungsrechnung werden sogenannte Künstliche Neuronale Netze (KNN) verwendet. Diese bieten sich für die vorliegende Aufgabe an, da aufgrund der vorliegenden Komplexität, eine einfache mathematische Regressionsrechnung als nicht zielführend erachtet wird. Zunächst werden die Grundlagen vermittelt und anschließend detailliert auf die Ergebnisse eingegangen.

4.4.1 Grundlagen von Künstlichen Neuronalen Netzen

Ein KNN besteht grundsätzlich aus Neuronen (Units), Verbindungen (Links) und Schichten (Layers), siehe [Abbildung 4-6](#). Die erste Schicht enthält dabei die Input-Neuronen, welche die Eingangsdaten (Messwerte) enthalten. In der letzten Schicht befinden sich die Output-Neuronen (Prognose-Werte). Zwischen der Input- und Output-Schicht können beliebig viele Schichten, die Hidden-Schichten, mit beliebig vielen sogenannten Hidden-Neuronen liegen. Die Anzahl der Hidden-Schichten und -Neuronen lässt sich im Vorhinein nicht pauschal bestimmen, sondern ist immer im Kontext der jeweiligen Aufgabenstellung zu ermitteln. Je nach gewähltem Aufbau sind die Neuronen untereinander durch die Verbindungen verknüpft. Das Gewicht der Verbindungen repräsentiert die jeweilige Stärke der Verbindung zwischen den einzelnen Neuronen, wobei die Stärke das „Wissen“ des Netzes darstellt, welches durch den Lernprozess erlangt wird. [RW11]

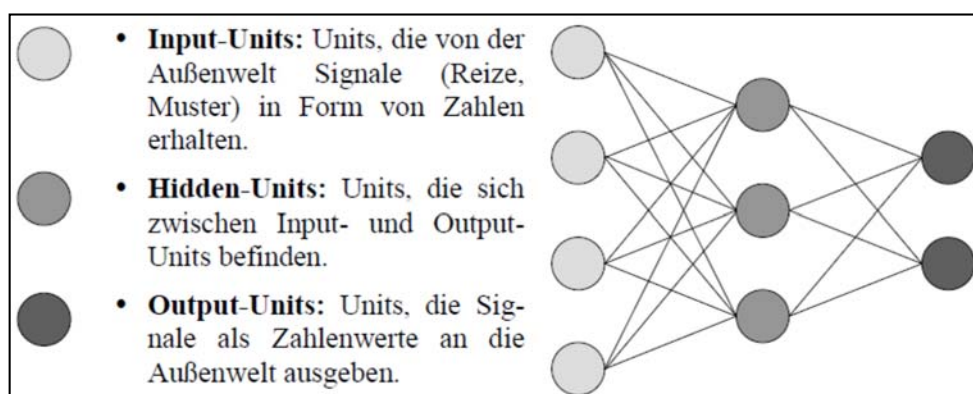


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung eines KNN, [RW11]

Das Lernen mit Künstlichen Neuronalen Netzen

Der Lernprozess von Künstlichen Neuronalen Netzen findet in einer Trainingsphase statt, wobei zwei verschiedene Datensätze, nämlich Trainings- und Validierungsdatsatz, verwendet werden, welche im Verhältnis 75:25 (Training zu Validierung) aufgeteilt werden. Diese Datensätze bestehen aus der Grundgesamtheit aller verwendeten Daten. Im vorliegenden Fall also aus den erfassten Messwerten der Kalibrierversuche (dem Input) sowie den Prognosewerten Druckfestigkeit und Bindemittelanteil und ferner den vom Bindemittel und Dichte abhängigen Größen „w/b-Wert“, „w/f-Wert“ (dem Output). Generell findet das Lernen mithilfe des Trainingsdatensatzes unter Verwendung eines Lernalgorithmus, z. B. dem Backpropagation-Algorithmus, statt. Die Art des Lernens ist abhängig von diesem Lernalgorithmus, wohingegen die Dauer des Lernens auch abhängig vom Aufbau des KNN und dem Umfang der zu erlernenden Daten ist.

Die Qualität bzw. der Fortschritt des Lernens lässt sich über den sogenannten Net-Error bestimmen. Das Ziel ist es grundsätzlich, diesen Net-Error zu minimieren, was gleichbedeutend mit einer guten Approximation der vorliegenden Daten ist. Gleichzeitig muss während der Trainingsphase allerdings darauf geachtet werden, dass kein „Auswendiglernen“ der Daten stattfindet (sogenanntes „Overfitting“), sondern, dass das KNN weiterhin in der Lage ist, generalisierte Aussagen treffen zu können. Es findet also eine ständige Abwägung zwischen minimalem Net-Error und der Fähigkeit des KNN zur Generalisierung statt. Um diese Abwägung besser treffen zu können, wird der oben erwähnte Validierungsdatsatz verwendet. Die in diesem Datensatz enthaltenen Daten werden dem KNN während der Trainingsphase, zusätzlich zu dem Trainingsdatensatz, präsentiert. Steigt im Laufe des Trainings der Net-Error für den Validierungsdatsatz an, während gleichzeitig der Net-Error für den Trainingsdatensatz weiter sinkt, so kann auf ein Auswendiglernen des KNNs geschlossen werden

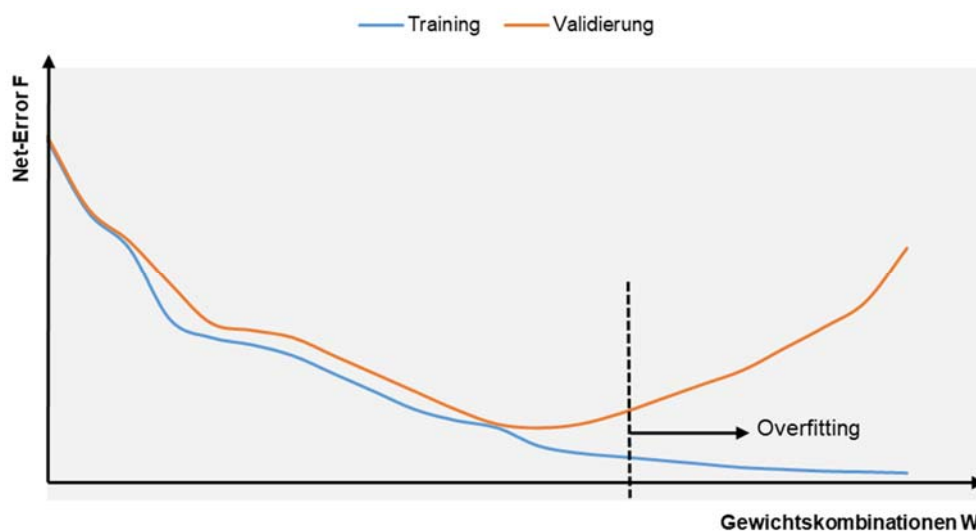


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der Fehlerkurven, abgeleitet nach [RW11]

Nach Abschluss des Trainings folgt eine Testphase mithilfe eines Testdatensatzes, welcher nicht Teil der zum Training verwendeten Datensätze sein darf. Durch die Testphase soll überprüft werden, inwieweit das Netz auf unbekannte Daten reagiert. Dem trainierten KNN werden dann nur noch die Input-Werte des Testdatensatzes präsentiert. Die Output-Werte generiert das KNN, basierend auf dem gespeicherten Wissen, im Anschluss selbstständig. Anhand eines Vergleichs der vom KNN generierten Output-Werte mit den tatsächlichen bekannten Output-Werten des Testdatensatzes, kann im Anschluss die Qualität des Netzes bestimmt werden. Die Beurteilung der Qualität ist dabei dem jeweiligen Anwender überlassen und hängt im starken Maße von der Menge der Trainingsdaten ab. [RW11]

Auswahl relevanter Merkmale des verwendeten KNN

Zusammengefasst bleibt festzuhalten, dass bei der Verwendung von Künstlichen Neuronalen Netzen verschiedene Entscheidungen getroffen bzw. durch iteratives Testen ermittelt werden müssen. Dies betrifft u. a. die Auswahl des Lern-Algorithmus, die Wahl der grundsätzlichen Netz-Topologie, den Aufbau des Netzes, die Anzahl der Hidden-Neuronen und -Schichten und die Festlegung der zugehörigen Aktivierungsfunktionen. Darüber hinaus müssen für den Lernprozess die Inputwerte, im vorliegenden Fall also die Daten aus dem Messsystem, auf den Lern-Algorithmus, die Aktivierungsfunktionen und weiteren Parametern vorbereitet werden. Aufgrund der gegebenen Komplexität von Künstlichen Neuronalen Netzen wird an dieser Stelle auf eine tiefgehende Erläuterung der verschiedenen Aspekte verzichtet und stattdessen auf die zahlreich vorhandene Fachliteratur verwiesen. Der Vollständigkeit halber werden an dieser Stelle nur die Ergebnisse aufgeführt ([Tabelle 4-2](#)).

Tabelle 4-2: Merkmale des verwendeten Künstlichen Neuronalen Netzes

Netz-Topologie	Mehrschichtiges Perzeptron
Input-Parameter	Messwerte aller Sensoren und Geräte
Output-Parameter	w/b-Wert, w/f-Wert, Druckfestigkeit, Zementanteil
Aktivierungsfunktion	Sigmoide Aktivitätsfunktion
Lernverfahren	Überwachtes Lernen
Lern-Algorithmus	Resilient Backpropagation

Die Output-Parameter, d. h. die Zielgrößen der Korrelationsfunktion, bestehen aus dem w/b-Wert, dem w/f-Wert, der Druckfestigkeit und dem Bindemittelanteil. Da die ersten beiden Parameter abhängig von den Größen Bindemittelanteil und Dichte sind, handelt es sich bei den beiden Parametern lediglich um indirekte Zielgrößen, welche den Trainingsprozess positiv beeinflussen, jedoch im vorliegenden Fall nicht zur Beurteilung der Prognose-Qualität verwendet werden. Diese Beurteilung findet nur über die beiden Parameter Druckfestigkeit und Bindemittelanteil statt (siehe [Abschnitt 4.4.2](#)).

4.4.2 Ergebnisse der quantitativen Kalibrierung

Aus den beschriebenen Kalibrierversuchen standen nach Datenaufbereitung ca. 1.000 Messwerte je Einzelversuch zur Verfügung. Davon wurden 75 % für das Training des Künstlichen Neuronalen Netzes verwendet und 25 % für die Validierung. Im Anschluss an das Training findet die Qualitätskontrolle durch zusätzliche Testdatensätze statt (siehe [Abschnitt 4.4.1](#)). Dabei werden dem trainierten KNN nur noch die Input-Werte (also die Messwerte der Sensoren) zur Verfügung gestellt, die Output-Werte in Form von Bindemittelanteil am Feststoff sowie die einaxialen Druckfestigkeiten werden generiert. Zur Bewertung der Qualität der Kalibrierung konnten also generierte Output-Werte an sich bekannten Soll-Werten (d. h. Bindemittelanteil und einaxiale Druckfestigkeiten sowie w/b- und w/f-Wert als eigentlich von Bindemittel und Dichte abhängige Größen) gegenübergestellt werden.

Die Ergebnisse dieses Soll-Ist-Vergleichs sind in [Tabelle 4-3](#) und für fünf exemplarische Datensätze dargestellt. Demnach beträgt die in den Laborversuchen ermittelte Abweichungen zwischen den tatsächlichen und den errechneten Bindemittelanteilen im Mittel weniger als 7 %

Tabelle 4-3: Gegenüberstellung der Soll-Ist-Werte

Satz	Ausgabe Neuronales Netz (x_i)				Soll-Werte (x_s)			
	w/b-Wert [-]	w/f-Wert [-]	B-Anteil [%]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	w/b-Wert [-]	w/f-Wert [-]	B-Anteil [%]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
1	0,84	0,69	93,23	4,09	0,76	0,76	100,00	3,18
2	0,88	0,73	98,57	3,69	0,98	0,98	100,00	2,99
3	0,72	0,70	76,94	3,51	1,27	0,95	75,00	1,86
4	1,66	0,75	47,34	1,70	1,85	0,93	50,00	0,78
5	2,92	0,71	23,74	0,31	3,59	0,90	25,00	0,15

Beim Soll-Ist-Vergleich der Druckfestigkeiten zeigt sich, dass die Druckfestigkeiten teilweise mit dem Faktor 2 überschätzt werden. Als Ursache hierfür sind die Auswirkungen der in [Abschnitt 4.3](#) beschriebenen Inhomogenitäten zu vermuten. Der nächste Schritt stellt nun die Überprüfung der Funktionsfähigkeit unter realen Baustellenbedingungen dar.

5 Erprobung des Messsystems auf der Baustelle

Nach Aufbau und Kalibrierung des Online-Messsystems kann dieses nun unter realen Baustellenbedingungen getestet werden. Hierbei gilt es einerseits, die Richtigkeit und Exaktheit der Kalibrierung im Technikum unter definierten und damit quasi-optimalen Randbedingungen zu bestätigen. Andererseits ist der gewählte Aufbau des Online-Messsystems im Hinblick auf die erforderliche Robustheit aller Komponenten (u. a. bezüglich Materialgüte und Verschleiß) sowie die Handhabbarkeit durch das Baustellenpersonal zu überprüfen. Schlussendlich sind Anforderungen für ein baustellentaugliches System zu definieren und in ein zukünftig mögliches Baustellenkonzept zu überführen.

5.1 Vergleich der Labor und in situ ermittelten Bindemittelanteile

Im Technikum erfolgte die Kalibrierung unter Verwendung idealer-typischer Bodenkornanteile mit einem Durchmesser von bis zu 1,0 mm. Dabei handelt es sich um einen Quarzsand als Sackware mit qualitätsgesicherten Eigenschaften bezüglich Korngrößenverteilung und chemischer Reinheit. Auf der Baustelle sind beim DSV jedoch stets Abweichungen sowohl bzgl. der Korngrößenverteilung als auch der Mineralogie des Bodens bzw. Zusammensetzung des Grundwassers vorhanden. Zur Überprüfung der Kalibrierung unter Praxisbedingungen werden daher auf einer Baustelle Vergleichsmessungen durchgeführt (siehe [Abbildung 5-1](#)).



Abbildung 5-1: Erprobung auf der Baustelle
links: DSV-Baustelle in Köln-Niehl; rechts: Messcontainer

Zur Bestimmung der erreichten Messgenauigkeit des Online-Messsystems sind in diesem Fall zusätzliche chemische Baustoffprüfungen anzustellen, um den jeweiligen Boden- und Bindemittelanteil zu ermitteln. Anders als im Rahmen der Kalibrierungsversuche (siehe [Kapitel 4.2](#)), in denen eine entsprechende Ermittlung nach gezielter und damit an sich mengenmäßig bekannte Zugabe von Bodenkornanteilen erfolgt, sind der Bindemittel- und Bodenkornanteil unter Praxisbedingungen tatsächlich unbekannt. Für eine entsprechende Analyse sind durch ein Speziallabor chemische, röntgenfluoreszenzanalytische und rönt-

gendiffraktometrische Untersuchungen durchgeführt. Zusätzlich wurden mit Hilfe von Penetrometer-Versuchen Druckfestigkeiten abgeschätzt.

Zur Ermittlung der Bindemittelanteile werden dem Labor je Versuch zwei auf der Baustelle entnommene Proben der Rücklauf-Suspension zur Verfügung gestellt. Die oben näher bezeichneten, detaillierten labortechnischen Analysen benötigen eine Zeitdauer von etwa zwei Wochen. In **Abbildung 5-2** ist exemplarisch für neun verschiedene Baustellenversuche der Vergleich zwischen den im Labor bzw. in situ ermittelten Bindemittelanteilen dargestellt. Die mittlere Abweichung ergibt sich daraus zu rund 8 %, die maximale bei ca. 13 % (Versuch 6). Die Abweichung liegt damit in der Größenordnung der gemäß Kalibrierung (siehe **Abschnitt 4.4.2**) mindestens zu erwartenden Abweichung in der Größenordnung von 7 %.

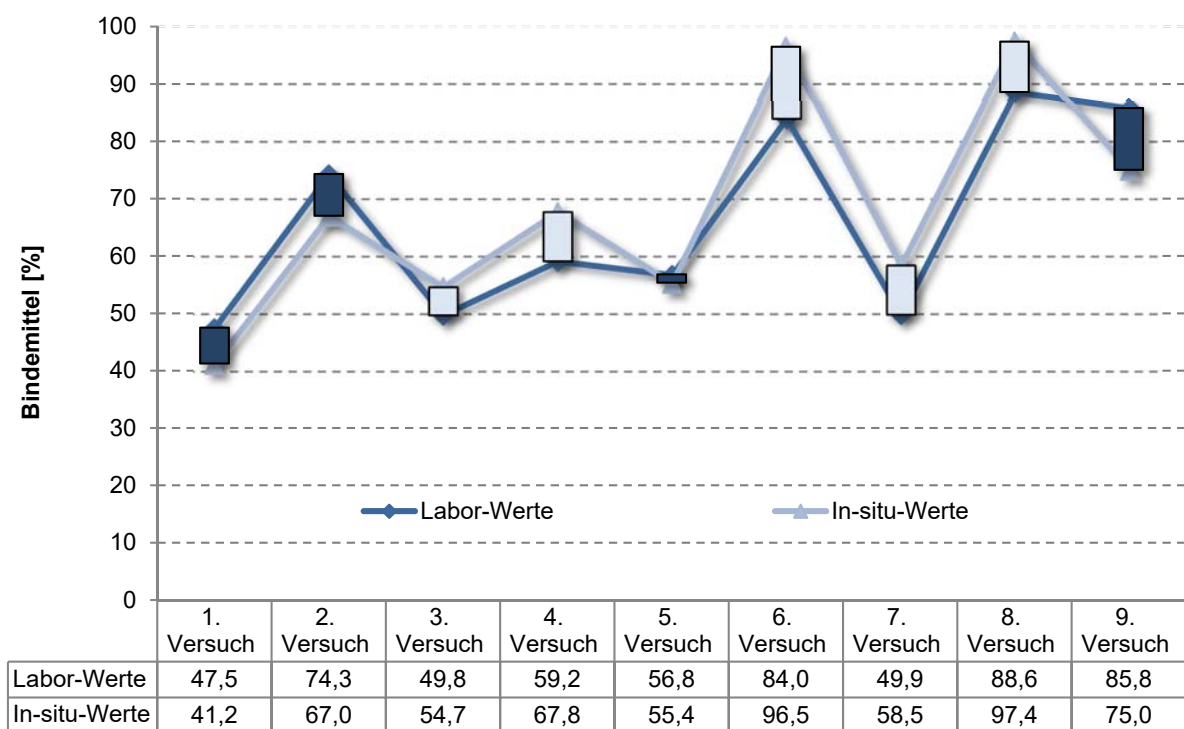


Abbildung 5-2: Gegenüberstellung im Labor und in situ bestimmter Bindemittelanteile

Die Baustellenversuche (in situ) bestätigen damit, dass das Online-Messsystem auch unter Baustellenbedingungen in der Lage ist, relevante Messgrößen zu erfassen und mittels Künstlicher Neuronaler Netze zielsichere quantitative Prognose in Punkto Bindemittelanteil abgeben zu können.

5.2 Anforderungen an ein zukünftiges Baustellenkonzept

Bei der Formulierung der Anforderungen an ein zukünftiges Baustellenkonzept ist vor allem ein Augenmerk auf eine unkomplizierte und sichere Bedienung sowie eine schnelle und einfache Reinigung des Messsystems durch den Anwender zu legen. Ebenfalls muss das System robust und widerstandsfähig gegen äußere Einflüsse (z. B. Witterung, Stöße und

Schläge) sein. In **Abbildung 5-1 rechts** ist der derzeitige Aufbau des Online-Messsystems dargestellt. Anhand dieses Ausgangspunkts werden nachfolgend Vor- und Nachteile erörtert, die in einem weiterführenden Projekt im Detail zu verbessern wären. Außerdem werden an entsprechender Stelle weitere sinnvolle Erweiterungen angemerkt sowie Anforderungen definiert. Abschließend wird auf ein zukünftiges Baustellenkonzept eingegangen.

5.2.1 Vor- und Nachteile des gegenwärtig gewählten Aufbaus

Die Integration des Messsystems in einen 10-Fuß-Container bringt Vor- und Nachteile mit sich. Die Vorteile sind hier vor allem die sichere Unterbringung während des Transports sowie ein geschützter Arbeitsstand des Anwenders bei anfallenden Wartungs- und Kontrollarbeiten. Nachteilig wirkt sich diese Art der Unterbringung jedoch auf die Transportlogistik sowie auf die zur Verfügung zu stehende Baustelleneinrichtungsfläche (BE-Fläche) aus. Anzustreben ist generell eine Verringerung der Größe des Messsystems auf die Größe einer Europalette. Idealerweise könnte die Europalette mit Anschlagpunkten versehen werden, um ein Transport der Messeinheit per Kettengehänge zu ermöglichen. So könnte die Messeinheit durch einen Minibagger oder ein anderes Hebegerät flexibel in das zur Verfügung stehenden Platzangebot der BE-Fläche integriert werden.

5.2.2 Anforderungen zur Einbindung in den Prozesskreislauf

Idealerweise befindet sich der Aufstellort des Messsystems in unmittelbarer räumlicher Nähe zur Misch- und Pumpstation. Dies ist vor allem im Hinblick auf den benötigten Strom- und Wasseranschluss sinnvoll. Die Anschlüsse sollten im besten Fall mit denen der Mischstation übereinstimmen. Als Wasseranschluss eignen sich hierfür Größen von einem und zwei Zoll. Der Stromanschluss sollte mit 230/400 Volt sowie 16 bzw. 32 Ampere ausgeführt sein. Durch die kurze Anbindung zur Misch- und Pumpstation können die benötigten Schlauchlängen auf ein Minimum reduziert werden, was gleichzeitig eine Reduktion des Reinigungsaufwands mit sich bringt.

5.2.3 Detailverbesserungen zur Steigerung der Robustheit

Im Hinblick auf die erforderliche Robustheit der Anlage sollte über den Einsatz von Leitungsröhren mit vergrößertem Querschnitt nachgedacht werden. Hier bieten sich vor allem die Größen von einem und zwei Zoll an. Diese Größen sind standardmäßig als Anschlüsse an Pumpen und Geräten vorzufinden. Dies ist vor allem mit Blick auf die arbeitstägliche Reinigung sowie anfallende Wartungsarbeiten sinnvoll. Dem Mitarbeiter muss die Möglichkeit gegeben werden, dass System an vorab bestimmten Punkten zu öffnen, um Reinigungsarbeiten vornehmen zu können. Dieses könnte beispielsweise über zentral angeordnete Spülhähne bewerkstelligt werden. Die Spülhähne sollten möglichst schnell und ohne größeren Aufwand zu öffnen und ggf. auch zu wechseln sein. Die Systemöffnungen sind so zu wählen, dass eine rückstandsfreie und gründliche Reinigung des Gerätes ermöglicht wird. Da aus Erfahrung davon auszugehen ist, dass sich sogenannte Zementschalen im Leitungs-

system ablagern, müssen die Rohrleitungen und deren Verbindungen so dimensioniert werden, dass auch kräftige Hammerschläge (welche die Zementschalen lösen sollen) die Rohrleitungen nicht beschädigen. Vor allem tiefliegende, verwinkelte bzw. verengte Stellen bergen die Gefahr der Bildung von Suspensionsrückständen. Die Optimierung der strömungsmechanischen Eigenschaften und das Anbringen von weiteren Reinigungsöffnungen sollte in einem weiterführenden Projekt untersucht werden.

5.2.4 Anwendung und Bedienung

Die Handhabbarkeit des Messsystems sollte für den Anwender so einfach wie möglich gehalten werden. Hier könnte mit einem Laptop oder Industrie-PC gearbeitet werden, welcher direkt an das M5-Messgerät der Pump- und Mischstation angeschlossen wird. Die M5-Messeinheit ist ein eigens von Keller Grundbau entwickeltes Softwareprogramm zur Überwachung und Steuerung von Prozessabläufen. So könnte eine Art Zwangssteuerung der Mischeinheit durch die Vorgaben des Online-Messsystems eingeführt werden. Die Mischeinheit wäre somit selbstständig in der Lage, Bindemittel und Wasser im Verhältnis zu dem im Rücklauf enthaltenen (Rest-)Bindemittelanteil zuzugeben und eine neue Mischung anzumachen.

Zur weiteren Verbesserung der Bedienerfreundlichkeit sind ein großes Display vorzusehen sowie eine selbsterklärende Anwendung des Systems anzustreben. Suspensionsein- und -ausgänge sollten entsprechend gekennzeichnet werden und über standardmäßige Anschlussgrößen verfügen. Ebenso muss eine Funktionskontrolle sowie Plausibilitätsprüfung des Messergebnisses für den Anwender möglich sein. An dieser Stelle sollte über die Aufgabe einer Art „Messsuspension“ vor jeder Arbeitsschicht in das Messgerät in Erwägung gezogen werden. Der ausgegebene Messwert muss demnach mit dem der Rezeptur übereinstimmen. Ebenfalls kann eine bebilderte Bedienungsanleitung dem Anwender helfen, bei möglichen Störungen im Messzyklus die richtigen Schritte zur dessen Behebung einzuleiten. Letztendlich sind hier weitere Untersuchungen notwendig.

5.2.5 Zukünftiges Baustellenkonzept

Im folgenden Teil wird auf die Möglichkeiten der zukünftigen Einbindung des Online-Messsystems in baubetriebliche und logistische Abläufe eingegangen. Das Messsystem ist gemäß [Abbildung 5-3](#) und [Abbildung 5-4](#) zwischen der Regenerierungsanlage und der Mischstation in den Prozess-Kreislauf einzubinden. Die Steuerung des Online-Messsystems ist nach Möglichkeit in den bestehenden Programmkreislauf des Automatischen Keller Mischer (AKM) einzubinden. Der AKM ist eine Eigenentwicklung der Keller Grundbau GmbH. Der Mischer verfügt über mehrere integrierte Waagen und ist somit nach vorheriger Rezepteingabe in der Lage, selbstständig eine definierte Menge an Wasser, Bindemittel und Zuschlagstoffen zu mischen.

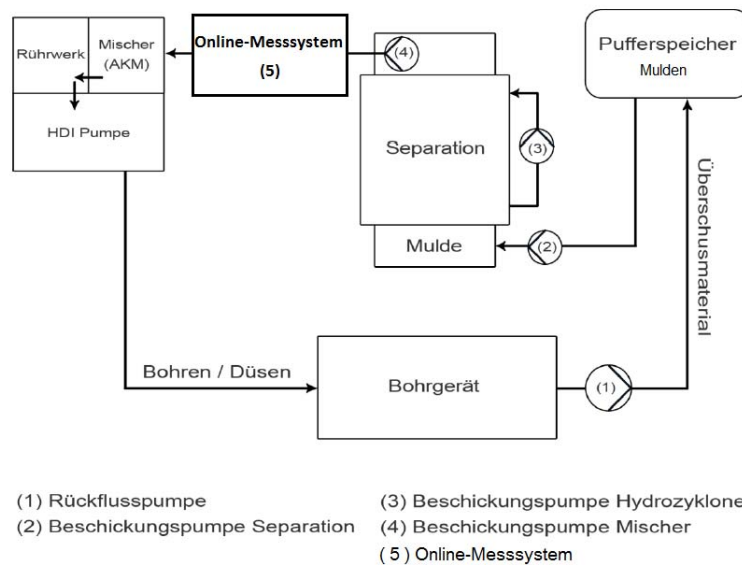


Abbildung 5-3: Fließschema der Suspension, abgeändert nach VAUK [Vau11]

So ist es möglich, den Produktionsprozess mit einer Suspension von gleichbleibender Güte zu beschicken. Hierzu gibt es bereits vergleichbare Systeme am Markt. Durch eine direkte Steuerung des Online-Messsystems vom Pumpensteuerstand aus, würde dies die Bedienbarkeit deutlich verbessern und gleichzeitig eine separate Aufstellung des Gerätes überflüssig machen. Genauso kann allerdings über die Unterbringung des Online-Messsystems an der Regenerationsanlage nachgedacht werden. Im Ergebnis sollte das Gerät nach Möglichkeit auf einer der beiden Gerätschaften implementiert werden, um die benötigte Zeit bei der Einrichtung sowie den benötigten Platzbedarf zu reduzieren. Zur Realisierung der erwähnten Integration ist es zweckmäßig, das Online-Messsystem über die zur Verfügung stehenden Anschlüsse der Separationsanlage bzw. Mischeinheit anzuschließen.

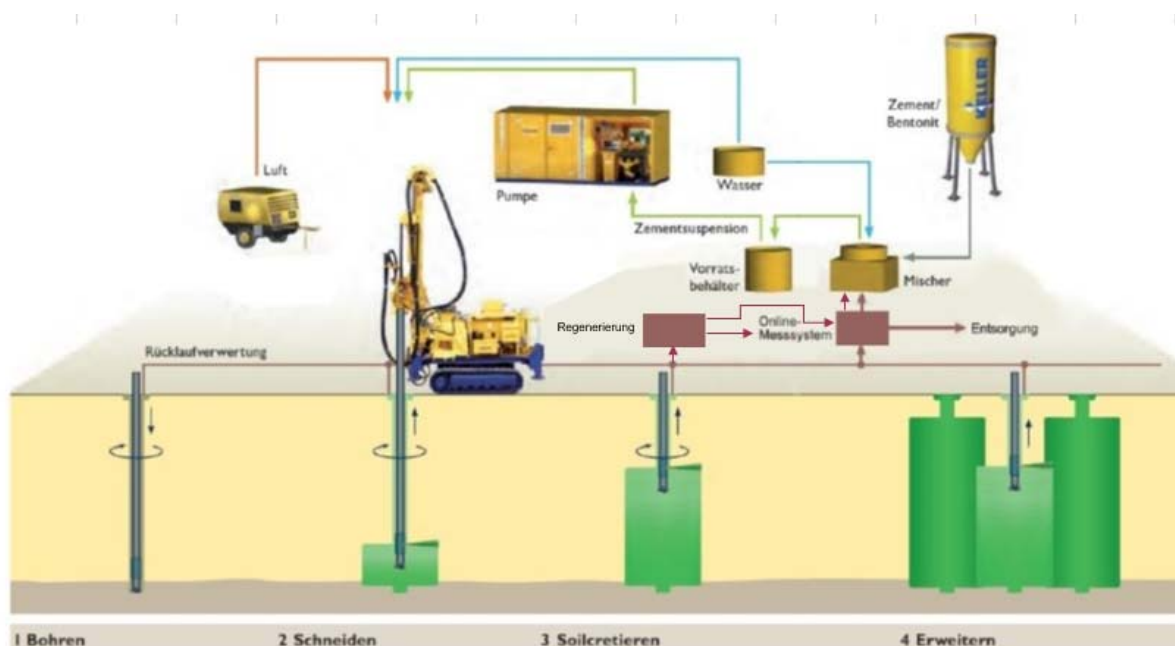


Abbildung 5-4: Integration des Messsystems in den Produktionsablauf

Abschließend sollte über eine Automatisierung zwischen Online-Messsystem und AKM Mischer nachgedacht werden. Der AKM Mischer, welcher zur Herstellung der Düsenstrahl-suspension dient, verfügt über eine prozessorgesteuerte Dosiersteuerung, welche die Eingabe von bis zu zehn Suspensionsrezepten erlaubt. Somit könnte über eine Art interne Rezeptdatenbank, welche in Abhängigkeit vom gemessenen Bindemittelgehalt der Rücklauf-Suspension und den spezifischen Anforderungen an die Suspension automatisch das passende Rezept zur Herstellung frischer Suspension gewählt werden. An dieser Stelle besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf.

Die Übertragung des Messergebnisses sollte über eine ausreichend leistungsfähige Funk-einheit geschehen. Je nach Abstand der Messeinheit zu der Mischstation kann eventuell auf eine kabelgebundene Übermittlung zurückgegriffen werden. Im Zuge der mitunter langen Leitungswege zwischen Separationsanlage und Messeinrichtung kann über die Zwischen-schaltung einer geeigneten Pumpeinheit nachgedacht werden, was aber wiederum Zusatzkosten nach sich ziehen würde.

5.3 Ausblick auf die zukünftige Umweltentlastung

Durch Anwendung des funktionierenden Online-Messsystems, können deutlich flexiblere Entsorgungskonzepte in Betracht gezogen werden. Ausgangspunkt der Betrachtung sei hier eine innerstädtische Baustelle. Ein großes Problem stellen vor allem die beengten Platzverhältnisse im innerstädtischen Bereich dar. Mitunter kann die Mindestanzahl der benötigten Mulden erst gar nicht aufgestellt werden. Ist nun ein Stapeln der Mulden vorgesehen, kommt es unweigerlich zu logistischen Problemen bei der Rücklaufentsorgung.



Abbildung 5-5: Aufgestapelte Mulden im innerstädtischen Bereich

Gefüllte und leere Mulden müssen meist auf umständlichem Wege von „hinten nach vorne“ gerückt und ausgetauscht werden. Könnte der Rücklauf an dieser Stelle länger im Produktionskreislauf gehalten werden, so könnten entsorgungsbedingte Stillstände vermieden bzw.

minimiert werden. Auf der anderen Seite würde dies eine Entschleunigung in der Disposition der Entsorgung bewirken. Verkehrsbedingte Verspätungen der Muldenfahrzeuge könnten so z. B. kompensiert werden. Zudem könnten dadurch Umweltbelastungen durch Abgase und Lärm zusätzlich reduziert werden.

Wie bereits einfürend in Abschnitt 1.2 dargestellt, sind bei breiter Einführung des neu entwickelten Online-Messsystems allein in Deutschland weitreichende Umweltentlastungen möglich [vdz13]:

- Zementeinsparungen von etwa 55 bis 105 Tausend Tonnen Zement pro Jahr,
- Spezifische CO₂-Einsparung von ca. 60 Tausend Tonnen pro Jahr,
- Reduziertes benötigtes Deponievolumen um ca. 125 bis 245 Tausend m³ pro Jahr.

Nicht nur vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit, sondern auch vor dem Hintergrund der sich ändernden Deponieverordnung ist rechtzeitig mit der Entwicklung innovativer Aufbereitungs- bzw. Wiederverwertungsverfahren zu beginnen. Das Online-Messsystem ist ein weiterer Schritt dazu.

6 Seminar-Workshop

Im Zuge des Projekts fand am 20. September 2017 in Düsseldorf ein Seminar-Workshop zum Thema „Ressourceneffizienz im Grundbau“ statt. Diese Veranstaltung hatte einerseits das Ziel, die erarbeiteten Ergebnisse der Fachwelt zu präsentieren und andererseits im Dialog mit weiteren Stakeholdern der Branche zu forcieren. In diesem Zusammenhang wurden sowohl Grundlagen vermittelt als auch interessante neue Ansätze und Technologien vorgestellt. Referenten waren renommierte Experten aus Praxis, Technik und Wissenschaft, die über folgende Punkte berichteten:

- Aktuelle Herausforderungen von Bauherrn,
- Bodenschutz auf der Baustelle,
- Schnittstellen beim Bodenmanagement,
- Verwertung des Rücklaufs beim Düsenstrahlverfahren,
- Recycling von gebrauchten Bentonit-Suspensionen,
- Deponiekapazitäten der Zukunft.

Ein besonderes Augenmerk war darauf gerichtet, die verschiedenen Sichtweisen von Bauherrn, Planern und bauausführenden Unternehmen herauszustellen. So schlossen sich allen sechs Beiträgen ausgedehnte Gesprächsrunden an, in denen alle Teilnehmer aktiv in die fachlichen Diskussionen eingeschlossen wurden.

Erwartungsgemäß wurde mit der adressierten Thematik bei vielen Teilnehmern der Veranstaltung Neuland betreten. Insbesondere die Komplexität der Prozesse im Zusammenhang mit dem Management von Bodenaushub – der schließlich verwertet und nicht etwa deponiert, d. h. entsorgt werden soll – wird vielfach noch unterschätzt. Abhilfe ist nur durch ein besseres Verständnis der Sichtweisen von allen Beteiligten möglich. So lassen sich beispielsweise nicht alle umweltrelevanten Bodeneigenschaften wie üblich dem Baugrundrisiko zuordnen, das allein der Bauherr trägt. Schließlich hat das bauausführende Unternehmen weitreichenden Einfluss darauf, wie es mit dem Aushub bzw. der kostbaren Ressource Boden umgeht. Dies gilt bereits für die Behandlung auf der Baustelle, wo es unnötige Verunreinigung und Verdichtung zu verhindern gilt. Bisläng fehlt es jedoch an wirtschaftlichen Anreizen, um auch in diesem Bereich nachhaltiges Wirtschaften von der Planung an zu forcieren.

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde ein innovatives Online-Messsystem entwickelt, welches in der Lage ist, auf Grundlage rheologischer Eigenschaften den Bindemittelteil und die Festigkeitsentwicklung von sogenannten Rücklauf-Suspension beim Düsenstrahlverfahren zu prognostizieren. Grundidee ist die Messung der Änderung der Fließeigenschaften nach definierter Zugabe eines Erstarrungsbeschleunigers mittels Drucksensoren. Im Rahmen der Kalibrierung des Messsystems wurde auf Künstliche Neuronale Netze zurückgegriffen, die bei großen Datenmenge ihre besonderen Vorzüge aufweisen und mit deren Hilfe eine nicht-analytische Lösung für die komplexen Zusammenhänge zwischen Input-Werten (Messgrößen) und Output-Werten (Prognosewerten) ermittelt werden konnte. Es wurde nachgewiesen, dass eine für Praxisbedingungen ausreichend hohe Messgenauigkeit des Bindemittelanteils von ca. +/- 7 % – sowohl unter eher idealen Randbedingungen im Technikum als auch unter realen Baustellenbedingungen – erreichbar ist. Für diesen späteren Baustelleneinsatz wurde bereits ein erstes Konzept erarbeitet.

7.2 Ausblick

Das entwickelte und erprobte Online-Messsystem ist auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse als grundsätzlich geeignet für die vorliegende Aufgabe zu bewerten. Trotz der positiven Ergebnisse ist eine zielgerichtete Praxiseinführung nach dem derzeitigen Stand noch nicht möglich. Insbesondere sind der Einfluss der Art des Bindemittels und der Einfluss natürlicher Bodenbestandteile (die praktisch stets anthropogenen Einflüssen unterliegen) auf die Kalibrierung noch nicht ausreichend genau bekannt.

Es wird daher empfohlen, entsprechende Punkte in einem zukünftigen Forschungsprojekt detailliert und zielgerichtet anzugehen. In diesem wäre dann auch zu klären, inwieweit Mischungen aus Rücklauf-Suspension und Frischsuspension zielgerichtet anwendbar sind. Bislang stand lediglich die Frage im Raum, ob eine vollständige Wiederverwertung möglich ist. Entsprechendes wäre dann auch im Rahmen eines zu überarbeitenden Baustellenkonzeptes zu berücksichtigen, da entsprechende Prozesse dann vollautomatisiert ablaufen müssten.

Literaturverzeichnis

- [RW11] REY, Günter Daniel; WENDER, Karl F.: *Neuronale Netze: Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung*. 2. Aufl. Bern; Huber, 2011
- [Vau11] VAUK, Björn: *Nachhaltige Verwendung von Überschussmaterial aus dem Düsenstrahlverfahren in grobkörnigen Böden*. Leuphana Universität Lüneburg, 2011
- [vdz13] *Verminderung der CO₂-Emissionen: Beitrag der deutschen Zementindustrie*. Monitoring Abschlussbericht 1990 – 2012. Düsseldorf, Juni 2013