Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten und zur Scherfestigkeitsentwicklung von einkomponentigen Ringspaltmörteln im Tunnelbau

Zur Erlangung des akademischen Grades eines DOKTOR-INGENIEURS

der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Ruhr-Universität Bochum genehmigte DISSERTATION von

Diplom-Ingenieurin Bou-Young Youn aus Essen



SFB 837 Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau

Bochum 2016

Tag der Einreichung:	20. Oktober 2015
Tag der mündlichen Prüfung:	22. Februar 2016
1. Gutachter:	Prof. DrIng. R. Breitenbücher
	Lehrstuhl für Baustofftechnik
	Ruhr-Universität Bochum
2. Gutachter:	Prof. DrIng. M. Thewes
	Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb
	Ruhr-Universität Bochum

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2014 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Die Arbeit basiert auf dem Teilprojekt B3 "Ringspaltmörtel – Entwicklungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Interaktionen mit dem Gebirge und Tübbingausbau" des Sonderforschungsbereichs 837 "Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau". Dabei fokussierten meine baustofftechnischen Untersuchungen die wesentlichen Eigenschaften von einkomponentigen Ringspaltmörteln als Stützmaterial zwischen dem Tübbingausbau und dem Baugrund. An dieser Stelle sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung meiner Arbeit herzlich gedankt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher, der mir diese Arbeit ermöglicht hat sowie für das entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftliche Förderung und die menschliche Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes danke ich sehr herzlich für seine Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats und die damit verbundenen Mühen.

Bei allen wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Baustofftechnik möchte ich mich für die kollegiale Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken. Besonders danke ich meinen Kollegen M.Sc. Christoph Schulte-Schrepping, M.Sc. Robin Przondziono und Dipl.-Ing. Sebastian Kunz für zahlreiche Diskussionen und Anregungen. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen ehemaligen studentischen Hilfskräften Herrn Dipl.-Ing. Gordon Horn und Herrn M.Sc. Sven Plückelmann für die Unterstützung bei der Auswertung und Darstellung umfangreicher Ergebnisse. Ferner danke ich Herrn Dr.-Ing. Hussein Alawieh für seine wertvollen Anregungen zu meinem Disputationsvortrag. Bei Herrn Dipl.-Ing. Jörg Sahlmen, Geschäftsführer des Sonderforschungsbereichs 837, bedanke ich mich für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre innerhalb der 15 Teilprojekte.

Vielen Dank auch für die freundliche Unterstützung, die ich von anderen Lehrstühlen der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften erfahren habe, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Mario Galli, Frau Dipl.-Ing. Anna-Lena Hammer und Herrn Ing. Zdenek Zizka vom Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Frau Dipl.-Ing. Nina Müthing vom Lehrstuhl für Grundbau, Boden- und Felsmechanik.

Vielen Dank auch für die freundliche Unterstützung, die ich anderenorts erfahren habe, insbesondere meiner Freundin und Kollegin Frau Dr.-Ing. Ivanka Bevanda von der Fa. Grace Bauprodukte GmbH in Essen, Herrn Dr.-Ing. Joachim Keck vom Institut für Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen.

Meiner Freundin Dr. phil. Helen Sibum und meinem Schwippschwager B.Sc. Pascal Ludwig danke ich für die redaktionelle Durchsicht des Manuskripts.

Schließlich möchte ich meiner Familie, meinem Freund Mario und meinen Freunden für ihren vorbehaltlosen Rückhalt und für ihre verständnisvolle Geduld in der Zeit der Entstehung meiner Arbeit danken. Ein ganz besonderes Dankeschön sei meinen Eltern für ihre bedingungslose Liebe, ihre liebevolle Fürsorge und ihre unermüdliche Unterstützung in allen Bereichen meines Lebens gesagt:

감사합니다! 하늘만큼 땅만큼 사랑합니다!

Bochum, im Juni 2016

Bou-Young Youn

Verzeichnis wichtiger Begriffe, Abkürzungen und Symbole

205 mile Bar 2000 mile ang att	
Kornform/Partikelform	Erscheinungsform/äußere Gestalt eines Korns (kugelig, gedrungen, prismatisch, plattig, stäbchenförmig, plättchenförmig)
Oberflächenstruktur	Oberflächenrauigkeit eines Korns (scharfkantig, kantig, rundkantig, gerundet, gerundet, glatt)
Korngrößenverteilung/ Partikelgrößenverteilung	Sieblinie/Kornzusammensetzung eines Feststoffgemisches
Körnungsziffer k	k-Wert zur Abschätzung des Wasseranspruchs einer Kornzusammensetzung
Spezifische Oberfläche S _m	Oberfläche der Körner je Gewichtseinheit, nimmt mit abnehmender Korngröße zu, Maß für die Feinheit eines Stoffes

Begriffe zur Beschreibung der granulometrischen Eigenschaften der verwendeten Ausgangsstoffe

Abkürzungen der verwendeten Ausgangsstoffe und Varianten

- B Bindemittel
- BS0/2 Brechsand der Korngruppe 0-2 mm
- F Feinanteil (63-250 µm)
- FA Steinkohleflugasche
- GK Gesteinskörnung
- HSM Hüttensandmehl
- KSM Kalksteinfeinmehl
- K2/8 Quarzkies der Korngruppe 2-8 mm
- QM Quarzmehl
- QS0/2 Quarzsand der Korngruppe 0-2 mm
- S Sieblinie
- Sp2/8 Basaltsplitt der Korngruppe 2-8 mm
- Z Zement

Symbole für die wesentlichen Materialparameter

A_0	Scherfläche	[cm ²]
a	Ausbreitmaß mit Hägermanntisch	[cm]
d_{f}	Entwässerungsdauer	[min]
d _M	Schichtdicke des Mörtels	[cm]
d ₅₀	mittlere Korngröße bei 50 % Siebdurchgang	[µm]

D_{F}	Durchmesser des Scherflügels	[m]
D	Größtkorn	[mm]
f _{7,5}	Filtratwasserabgabe nach 7,5 min	[M%]
f_{30}	Filtratwasserabgabe nach 30 min	[M%]
$H_{\rm F}$	Höhe des Scherflügels	[m]
H _{GK}	Hohlraumvolumen des Korngemisches	[Vol%]
$h_{\rm F}$	Einbautiefe der Scherflügel	[cm]
k	Körnungsziffer	[-]
\mathbf{k}_{f}	Durchlässigkeit des Filtermediums	[m/s]
$M_{Bw} \\$	Blutwassermenge je m ³ Frischmörtel	[kg/m³]
n	Steigungsmaß: Steigung der Verteilungsausgleichsgeraden im RRSB-Körnungsnetz nach DIN 66145	[-]
Om	spezifische Oberfläche nach Blaine	$[cm^2/g]$
$p_{\rm f}$	Entwässerungsdruck	[bar]
prsv	Prüfdruck während des Abschervorgangs im Rahmenscherversuch	[bar]
ρ	Reindichte des Feinstoffes	[kg/dm ³]
$ ho_{\mathrm{M}}$	Frischmörtelrohdichte	[kg/dm ³]
$\rho_{\rm f}$	Rohdichte des entwässerten Mörtels: Feuchtrohdichte	[kg/dm³]
$ ho_{tr}$	Rohdichte des getrockneten Mörtels: Trockenrohdichte	[kg/dm ³]
SF	Setzfließmaß mit Hägermanntisch	[cm]
\mathbf{S}_{m}	berechnete spezifische Oberfläche	$[cm^2/g]$
S _{m,B}	berechnete spezifische Oberfläche des Bindemittels	$[cm^2/g]$
$S_{\rm v}$	volumenbezogene Oberfläche	[cm ² /cm ³]
$t_{\rm M}$	Mörtelalter/Zeit nach Herstellung	[min], [h]
t_{Tr}	Trichterauslaufzeit	[sec]
$\tau_{\rm M}$	Scherfestigkeit/Scherspannung des entwässerten Mörtels	[kN/m ²]
u	Scherweg	[mm]
V_{GK}	Volumen des Korngemisches	[Vol%]
$\Delta V_{\rm M}$	Volumenabnahme des Mörtels	[Vol%]
VF	Drehgeschwindigkeit mit der Flügelsonde	[°/s]

V _{RSV}	Schergeschwindigkeit während des Abschervorgangs im Rahmenscherversuch	[mm/min]
W	Wassergehalt	[kg/m³]
WA _{GK}	Wasseranspruch des Korngemisches	[Vol%]
WA _{NS}	Wasseranspruch bei Normsteife	[M%]
WA _{PU}	Wasseranspruch nach Puntke	[Vol%]
W/S _{m,B}	Wasser/Oberflächen-Verhältniswert	$[g/m^2]$
xʻ	Lageparameter: Korngröße bei einer Massenverteilungs- summe von 63,2 M%	[µm]

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG, PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
2	STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK	4
2.1	Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb	4
2.2	Ringspaltverpressung	7
2.2.1	Entstehung des Ringspalts	7
2.2.2	Notwendigkeit der Ringspaltverpressung	8
2.2.3	Verfahrens- und maschinentechnische Einrichtungen	9
2.2.3.1	Ringspaltverpressung durch Injektionsöffnungen im Tübbingausbau	10
2.2.3.2	Ringspaltverpressung durch Lisenen im Schildschwanz	12
2.2.3.3	Schildschwanzdichtung	14
2.2.3.4	Förderung des Verpressmaterials	14
2.2.4	Schäden an der Tunnelauskleidung infolge unzureichender	
	Ringspaltverpressung	17
2.3	Technologie der Ringspaltmörtel	19
2.3.1	Grundsätzliche Anforderungen an Ringspaltmörteln	19
2.3.2	Mörtelsysteme	21
2.3.2.1	Einkomponentenmörtel	21
2.3.2.2	Zweikomponentenmörtel	23
2.3.2.3	Spezielle Mörtel	25
3	EINKOMPONENTENMÖRTEL	29
3.1	Ausgangsstoffe	29
3.2	Fließverhalten vor und nach der Ringspaltverpressung	29
3.3	Entwässerungs- und Konsolidierungsverhalten	38
3.4	Kuchenbildende Filtration im Mörtel – innerer Filterkuchen	43
3.5	Scherfestigkeitsentwicklung	45
4	CHARAKTERISIERUNG DER UNTERSUCHTEN RINGSPALTMÖRTEL	49
4.1	Ausgangsstoffe	49
4.1.1	Feinheit der Feinstoffe	49
4.1.2	Wasseranspruch der Feinstoffe	53
4.1.3	Geometrische Eigenschaften der Gesteinskörnung	57

4.1.4	Wasseranspruch der Gesteinskörnung	59
4.2	Basisrezepturen (Ausgangsmischungen)	64
4.3	Mörteltechnische Variationen	65
5	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	68
5.1	Herstellung der Mörtelproben	68
5.2 5.2.1 5.2.2	Untersuchung des Entwässerungsverhaltens Filtratwasserabgabe Feinstteilumlagerung im Mörtel	68 68 72
5.3 5.3.1 5.3.2	Untersuchung der Scherfestigkeitsentwicklung Flügelscherversuch Direkter Scherversuch – Rahmenscherversuch	74 74 76
5.4 5.4.1 5.4.2	Weitere Untersuchungen Konsistenz und Verarbeitbarkeit Sedimentationsstabilität	77 77 78
5.5	Versuchstechnische Variationen	78
6	KONSISTENZ UND VERARBEITBARKEIT	80
6.1	Basisrezepturen	80
6.2	Varianten im Bindemittelbereich	83
6.3	Varianten in der Gesteinskörnung	86
7	ENTWÄSSERUNGSVERHALTEN	89
7.1	Filterpressversuch nach DIN 4127	89
7.1.1	Basisrezepturen	89
7.1.27.27.2.17.2.2	Varianten im Bindemittelbereich Modifizierter Filterpressversuch Basisrezepturen Varianten im Bindemittelbereich	90 91 91 93
7.2.3	Varianten in der Gesteinskörnung	95
7.2.4	Entwässerungsdruck	98
7.2.5	Schichtdicke des Ringspaltmörtels	100
7.2.6	Feinstteilumlagerung im Mörtel	104
8	SCHERFESTIGKEITSENTWICKLUNG	108
8.1	Basisrezepturen	108

8.2	Varianten im Bindemittelbereich10	19
8.3	Varianten in der Gesteinskörnung11	1
8.4	Entwässerungsdruck	4
8.5	Schichtdicke des Ringspaltmörtels	5
8.6	Scherfestigkeitsgradient11	7
8.7	Scherfestigkeiten im Rahmenscherversuch	8
9	ZUSAMMENFASSUNG12	:4
9.1	Grundsätzliche Anforderungen	4
9.2	Konsistenz und Verarbeitbarkeit	6
9.3	Entwässerungsverhalten	6
9.4	Scherfestigkeitsentwicklung12	7
9.5	Bewertung der Einflussparameter und Ausblick	8
10	LITERATURVERZEICHNIS	1
ANHA	NG A "CHARAKTERISTISCHE KENNGRÖßEN DER FEINSTOFFE"14	-0
ANHA	NG B "REM-AUFNAHMEN DER FEINSTOFFE"14	.3
ANHA	NG C "SIEBLINIEN DER KORNGEMISCHE"14	-5
ANHA	NG D "MÖRTELZUSAMMENSETZUNGEN"14	.7
ANHA	NG E "MODIFIZIERTER FILTERPRESSVERSUCH"15	1
ANHA	NG F "RAHMENSCHERVERSUCH"15	3
LEBEN	ISLAUF	7

1 EINLEITUNG, PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Das steigende Verkehrswachstum im Personen- und Güterverkehr speziell in sensiblen urbanen Bereichen mit dichter Bebauung und ausgelasteter Infrastruktur erfordert die kontinuierliche Ausweitung des Verkehrsnetzes auch im unterirdischen Raum. Nach aktuellem Stand erfolgt der Bau von unterirdischen Anlagen bergmännisch in der Spritzbetonbauweise oder maschinell mit einer Tunnelvortriebsmaschine.

Die maschinelle Tunnelbauweise im Schildvortrieb hat sich dabei in den letzten Jahren aufgrund der großen Vorteile besonders in ungünstigen geologischen Verhältnissen weltweit etabliert. Mit den Schildvortriebsverfahren können langgestreckte Tunnelbauten auch bei sehr geringen Überdeckungen sowohl im Festgestein als auch im Lockergestein sowie im Grundwasser realisiert werden, ohne die oberirdische Bebauung in größerem Ausmaß zu beeinträchtigen. Allerdings setzen die komplexen Interaktionen zwischen Schildmaschine, Boden und Tunnelausbau eine sorgfältige Planung des Tunnelbauprojektes voraus, um wirklichkeitsnahe Aussagen über den Tunnelvortrieb und dessen Auswirkungen auf den Baugrund und damit einhergehend auf die oberirdische Bebauung zu treffen. Hierfür werden die bisher in der Praxis angewendeten mathematischen Prognosemethoden ständig verbessert sowie die Maschinenbau- und Bauverfahrenstechnik kontinuierlich modernisiert.

Trotz des hohen Entwicklungsstandes dieses komplexen Bauverfahrens kommt es aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen doch noch vereinzelt zu Schäden, unter anderem infolge unzureichender Ringspaltverpressung, in Form von Versätzen in den Tübbingfugen oder Biegerissen an der Tunnelauskleidung. Insbesondere die heterogenen Gebirgsverhältnisse und die damit oft nur unscharf erfassbaren Baugrundeigenschaften stellen dabei hohe Anforderungen an einen setzungsarmen Vortrieb und an einen dauerhaften Tunnelausbau.

Verfahrensbedingt entsteht beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Tübbingausbau ein Hohlraum zwischen der äußeren Tübbingoberfläche und der Ausbruchlaibung mit einer Dicke von 10 bis 20 cm, der sogenannte Ringspalt. Dieser Ringspalt ist unmittelbar nach dem Einbau der Tübbinge mit einem geeigneten Material zu verpressen, um den Tübbingring in seiner Einbaulage zu stabilisieren und gleichzeitig Gebirgsauflockerungen entgegenzuwirken und damit verbundene mögliche Setzungen an der Geländeoberfläche zu minimieren. Stand der Technik ist eine druckbeaufschlagte Verpressung von Mörtel, dem sogenannten Ringspaltmörtel. Dies erfolgt entweder durch Lisenen im Schildschwanz oder alternativ durch Öffnungen in den Tübbingen.

An den Ringspaltmörtel werden im Wesentlichen zwei einander entgegenlaufende Anforderungen gestellt: Zum einen werden eine Verarbeitbarkeit und eine hohe Fließfähigkeit über mehrere Stunden bis zum Verpressen verlangt; zum anderen wird erwartet, dass der Mörtel unmittelbar nach dem Verpressen rasch eine hohe innere Scherfestigkeit und eine ausreichende Steifigkeit entwickelt.

Da der Mörtel aus logistischen Gründen nur in größeren Mengen in den Tunnel bis zur Vortriebsmaschine transportiert werden kann, allerdings abschnittsweise (bei jedem Vorschubtakt) nur in geringen Mengen verpresst wird, müssen die einzelnen Mörtelchargen während einer Vorhaltezeit von mehreren Stunden

verarbeitbar sein. Darüber hinaus sind auch nach einer mehrstündigen Liegezeit eine ausreichende Fließfähigkeit und gleichzeitig eine hohe Sedimentationsstabilität erforderlich. Damit soll sichergestellt werden, dass der Mörtel einerseits gut pumpbar ist und andererseits nach Austritt aus den Lisenen den Ringspalt vollständig ohne Entmischung verfüllen und die kraftschlüssige Bettung der Tübbingröhre gewährleisten kann. Die erforderlichen temporären Fließeigenschaften werden normalerweise durch einen sehr hohen Wasseranteil erreicht. Den notwendigen Frischmörteleigenschaften steht die bereits kurz nach dem Verpressen schnell erforderliche Entwicklung einer ausreichenden Scherfestigkeit und Steifigkeit gegenüber, um den zuvor eingebauten Tübbingring lagegerecht zu stabilisieren und gleichzeitig den Baugrund zu stützen. Die rasche Verfestigung wird bei durchlässigen Böden durch Auspressen von Wasser in den anstehenden Baugrund unter Druck erreicht. Infolge der Konsolidierung bildet sich dabei ein stützendes Korngerüst des Mörtels aus, welches einen signifikanten Teil des geforderten Scherwiderstandes liefert. Allerdings können sich die während der Konsolidierung umlagernden Feststoffpartikel im Grenzbereich von Mörtel und Boden ablagern und die weiteren Entwässerungsprozesse signifikant beeinflussen. Diese Art der Verfestigung findet ausschließlich bei einkomponentigen Ringspaltmörteln statt. Ist ein Auspressen von Wasser nicht möglich, muss die Verfestigung auf chemischer Basis erfolgen. Dies gilt vor allem in bindigen Böden mit (sehr) geringer Durchlässigkeit. Hierfür kommen sogenannte Zweikomponentenmörtel zur Anwendung.

Die maßgeblichen Einflussfaktoren auf das Entwässerungsverhalten stellen die Mörtelzusammensetzung, der Verpressdruck und die Durchlässigkeit des Bodens dar. Der notwendige Verpressdruck wird dabei auf die vorherrschenden geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse (Gebirgs- und Wasserdruck) abgestimmt. Hinsichtlich der Zusammensetzung werden geeignete Ringspaltmörtel fast ausnahmslos auf empirischer Basis in der Praxis festgelegt, wobei auch hier die jeweiligen Gebirgsverhältnisse berücksichtigt werden.

Bislang wurden verschiedene Mörteltypen in Abhängigkeit von den Ausgangskomponenten und der Zusammensetzung überwiegend auf empirischer Basis entwickelt. Dabei wurden die wesentlichen Eigenschaften anhand von praxisbewährten, zementhaltigen Mörteln definiert. Gezielte Studien, in denen der Mörtelaufbau hinsichtlich der für die Scherfestigkeit notwendigen Entwässerungsfähigkeit untersucht wurde, fehlen weitgehend. Ebenso existieren bislang keine standardisierten Versuche zur Beurteilung des Entwässerungsverhaltens von Ringspaltmörteln unter Druck.

Aufgrund der vielfältigen Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Ausgangskomponenten und der Zusammensetzung von Ringspaltmörteln können sich die Mörteleigenschaften – Fließvermögen, Sedimentationsstabilität, Entwässerungsfähigkeit und Scherfestigkeitsentwicklung – ganz entscheidend ändern. Hier sind die grundsätzlichen Fragen zu klären, inwieweit eine gezielte Modellierung der Porenstruktur über die Zugabe von Feinstoffen mit unterschiedlicher Granulometrie und in unterschiedlichem Mengenverhältnis zu einer Beeinflussung der genannten Mörteleigenschaften führen kann, und ob es Einschränkungen bei der Wahl der Ausgangskomponenten und der Zusammensetzung gibt. Ziel dieser Arbeit ist es, die wesentlichen Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der einzelnen Ausgangskomponenten sowie der Mörtelzusammensetzung und den damit in einkomponentigen Ringspaltmörteln erreichbaren Eigenschaften systematisch zu erfassen. Als Basis dienten praxiserprobte Mörtelrezepturen, welche durch Variationen in den Ausgangskomponenten und der Zusammensetzung systematisch modifiziert wurden.

Eine Beschreibung der daraus resultierenden Mörteleigenschaften in Abhängigkeit vom jeweiligen Material- und Einbauparameter ermöglicht es, die maßgeblichen Steuergrößen zur Erzielung eines hohen Entwässerungspotenzials und damit einhergehend einer hohen Scherfestigkeit aufzuzeigen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse können entgegen den bislang fast ausnahmslos empirischen Festlegungen in der Praxis einschlägige Mörtelrezepturen zielgerichteter für die Ringspaltverpressung konzipiert, d.h. sowohl auf die geologischen als auch bautechnischen Randbedingungen abgestimmt, werden.

2 STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK

2.1 Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb

Mit Einführung des maschinellen Tunnelvortriebs nach englischem Vorbild SIR MARC ISAMBARD BRUNEL hat sich dieses Bauverfahren im Hinblick auf die Anwendungsmöglichkeit sowohl im Fest- als auch im Lockergestein (insbesondere bei Gestein mit geringer Standfestigkeit) als vorteilhaft gegenüber der bergmännischen Bauweise erwiesen [13]. Auch in ökologischer Hinsicht – etwa bei der Wasserhaltung – wird diese Bauweise bevorzugt.

Allerdings stehen diesen Vorteilen nicht zu unterschätzende Nachteile gegenüber [1]:

Vorteile:

- Möglichkeit der Mechanisierung und Automatisierung mit hoher Vortriebsgeschwindigkeit bei langen Streckenabschnitten mit geringen Überdeckungen ohne nennenswerte Beeinflussung auf die vorhandene Bebauung,
- Profilgenauigkeit in einem Arbeitsgang,
- geringer Personaleinsatz und hohe Arbeitssicherheit,
- umweltfreundliche Bauweise durch Erhaltung des Grundwasserspiegels,
- Möglichkeit einer qualitativ hochwertigen und wirtschaftlichen Tunnelauskleidung.

Nachteile:

- hoher Planungsaufwand und lange Vorlauf- und Einarbeitungszeiten,
- großer Platzbedarf durch aufwändige Baustelleneinrichtung und damit verbunden hohe Investitionskosten,
- starke Abhängigkeit von der Geologie und dadurch hohes Leistungsrisiko bei wechselnden Bodeneigenschaften,
- in der Regel festgelegter Kreisquerschnitt mit geringen Variationsmöglichkeiten bezüglich der Querschnittsgeometrie.

Bei maschinell vorgetriebenen Tunnelbauwerken werden Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) abhängig von der vorliegenden Geologie in unterschiedliche Maschinentypen mit geeigneten Lösevorrichtungen unterteilt [1]. Zur Auswahl einer geeigneten Tunnelvortriebsmaschine für den jeweiligen Einsatz im Felsoder Lockergestein dienen anhand von verfahrenstechnischen und geotechnischen Kriterien Entscheidungsgrundlagen respektive Empfehlungen vom Deutschen Ausschuss für Unterirdisches Bauen (DAUB) [3] [4]. Die wesentliche Grundlage für die Auswahl einer geeigneten Tunnelvortriebsmaschine bilden die Analyse des geotechnischen Berichts, einschließlich des Baugrundprofils, sowie des Systemverhaltens, d.h. die wesentlichen Anforderungen an den Bodenabbau, die Ortsbruststützung und das Stützmedium. Damit können bereits prinzipiell geeignete Vortriebsverfahren im Zuge eines Ausschlussverfahrens ausgewählt werden. Weitere Kriterien zur Eingrenzung der TVM-Vorauswahl sind das Transportverhalten des Ausbruchmaterials, d.h. die wesentlichen Wechselwirkungsmechanismen zwischen Baugrund und TVM (Verschleiß, Verklebung und Verbreiung) sowie die Verwertbarkeit des Ausbruchmaterials. Abschließend sind die projektspezifisch technischen sowie wirtschaftlichen Aspekte für ein geeignetes Vor-

triebsverfahren zu berücksichtigen [4].

Die Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen ist in Abbildung 2.1 systematisch zusammengestellt. Tunnelvortriebsmaschinen werden im Allgemeinen hinsichtlich ihres Abbauvorgangs unterschieden. Für den gesamten Tunnelquerschnitt kann dieser entweder mit einem Bohrkopf oder mit einem Schneidrad im Vollschnitt oder teilflächig erfolgen. Tunnelbohrmaschinen (TBM) werden in standfesten Festgesteinen eingesetzt und bedürfen somit keiner aktiven Stützung der Ortsbrust. Schildmaschinen (SM) kommen hingegen in Lockergesteinen oberhalb und unterhalb des Grundwasserspiegels zum Einsatz, wobei die verfahrensbedingten Hohlräume an der Ortsbrust sowie zwischen Tübbingauskleidung und Boden – der sogenannte Ringspalt – schnellstmöglich gestützt werden müssen [1].

Nachfolgend werden Schildmaschinen mit Vollschnittabbau näher erläutert, da diese für die Ringspaltverpressung respektive für den im Fokus dieser Arbeit stehenden Ringspaltmörtel von Bedeutung sind.



Abbildung 2.1: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [1]

Derzeitiger Stand der Technik im Lockergestein ist der Einsatz von Erddruckschilden SM-V5 (engl. Earth Pressure Balance Shield, kurz: EPB), welche mit Hilfe eines Erdbreis aus abgebautem Bodenmaterial die Ortsbrust stützen [2]. Dabei werden Erddruckschilde insbesondere bei kohäsiven Böden mit einem hohen Ton- oder Schluffanteil mit geringer Wasserdurchlässigkeit eingesetzt. Durch Zugabe von geeigneten Konditionierungsmitteln, wie z.B. Bentonit, Polymeren oder Schaum, kann das Stützmedium auch für den Einsatz in grob- und gemischtkörnigen Böden (Sand/Kies) optimiert werden [1] [2] [5]. Abbildung 2.2 stellt schematisch den Aufbau einer Schildmaschine mit Erddruckschild dar.



Grundwasser BodenErdbreiAbbildung 2.2: Schematischer Aufbau einer Schildmaschine mit EPB-Schild [2]

Die wesentlichen Elemente und damit einhergehend die Funktionsweise des Erddruckschildes beschreiben THEWES UND BUDACH [2] wie folgt:

An der Ortsbrust (1) wird der anstehende Boden von einem rotierenden Schneidrad mit integrierten Abbauwerkzeugen (2) gelöst und dringt über Öffnungen in die Abbaukammer (3) ein. Mit Hilfe von Rührwerkzeugen an Schneidrad und Druckwand (4) wird das abgebaute Bodenmaterial mit dem bereits vorhandenen Erdbrei gemischt, bis es die erforderliche Konsistenz erreicht. Gleichzeitig wird ein Teil des Materials über Förderschnecken (6) von der Sohle der Abbaukammer (3) aus dem Tunnel transportiert. Die Druckwand (3) trennt zum einen die unter Druck stehende Abbaukammer vom Arbeitsraum der Schildmaschine unter atmosphärischen Druckbedingungen, zum anderen überträgt sie den Druck aus den Vortriebspressen (5) auf den Erdbrei. Die daraus resultierenden Spannungen im Erdbrei müssen dabei genauso groß sein wie die entgegenwirkenden Spannungen aus Boden und Grundwasser, sodass kontinuierlich ein Gleichgewichtszustand an der Ortsbrust herrscht (s. Abbildung 2.2). Mit Hilfe von Drucksensoren in der Abbaukammer (3) können der Stützdruck des Erdbreis über die Vortriebsgeschwindigkeit und die Förderrate der Schnecke gezielt gesteuert werden.

Für die Sicherung des Ausbaus werden im Nachläuferbereich (11) der Vortriebsmaschine Stahlbeton-Fertigelemente, sogenannte Tübbinge, als Tunnelauskleidung (8) eingebaut (Abbildung 2.3, links). Ein Tübbingring setzt sich in der Regel aus fünf bis sieben Segmenten und einem Schlussstein zusammen. Der Einbau der Tübbinge erfolgt mechanisch-hydraulisch mit einem Erektor (10) und Hebe-/Versetzgeräten (9). Mittels Montagehilfen werden die Tübbinge sowohl in Ring- als auch in Längsrichtung miteinander verschraubt, um die lagegerechte Positionierung zum Anpressen der Dichtprofile (Abbildung 2.3, rechts) sicherzustellen [6].



Abbildung 2.3: Tunnelauskleidung mit Tübbingen (links), Tübbing mit Dichtprofilen und Lastübertragungsflächen (rechts) [7]

Dabei stützen sich die Vortriebspressen an der Stirnseite des zuvor eingebauten Tübbingrings ab und schieben sich mit definierter Geschwindigkeit und Hublänge, in der Regel um eine Tübbingbreite, vor. Anschließend werden einzelne Pressenpaare eingefahren, sodass ein weiterer Tübbingring montiert werden kann.

2.2 Ringspaltverpressung

2.2.1 Entstehung des Ringspalts

Während des maschinellen Tunnelvortriebs mit Tübbingausbau entsteht verfahrensbedingt ein Hohlraum zwischen Tübbingauskleidung und Ausbruchlaibung, der sogenannte Ringspalt. Die Dicke des Ringspalts wird im Wesentlichen von den geometrischen Abmessungen der Vortriebsmaschine bzw. der Konstruktionshöhe der Schildschwanzdichtung bestimmt. Theoretisch beträgt die Spaltdicke zwischen 7 und 12 cm und kann zusätzlich durch

- den exzentrischen Überschnitt zur Erleichterung von Kurvenfahrten und damit einhergehend
- die Bodenverdrängung bei Kurvenfahrten und
- die Konizität des Schildmantels

zunehmen, soweit der nachdrängende Boden den Hohlraum nicht wieder verschließt [1]. Die einzelnen verfahrenstechnischen Ursachen sind in Abbildung 2.4 exemplarisch dargestellt. Nach dem Stand der Technik kann der Ringspalt daher eine Spaltdicke von 13 bis zu 18 cm aufweisen [8] [2] [21]. Darüber

hinaus kann die Spaltdicke am Schildumfang insbesondere bei geschichteten Böden, welche für sedimentäre Lockergesteine typisch sind, stark variieren.



Ringspalt aufgrund der Höhe des Schildschwanzbleches und der Konstruktionshöhe der Schildschwanzdichtung



Ringspalt aufgrund Konizität des Schildmantels







Ringspaltweitenänderung aufgrund der Exzentrizität der Sicherung



Ringspaltweitenänderung aufgrund der Verformung der Sicherung



Ringspalt aufgrund Bodenverdrängung bei Kurvenfahrt



2.2.2 Notwendigkeit der Ringspaltverpressung

Unmittelbar nach dem Einbau des Tübbingrings muss der Ringspalt mit einem geeigneten Mörtel vollständig verpresst werden. Die Verpressung des Ringspalts erfolgt simultan zum Vortrieb. Dabei muss eine dauerhafte und lagerechte Bettung der Tunnelauskleidung sichergestellt werden, indem ein Aufschwimmen der Tunnelröhre aufgrund des Auftriebs bzw. ein Absinken durch die Nachläuferlasten verhindert werden. Gleichzeitig ist durch die Ringspaltverpressung Gebirgsauflockerungen entgegenzuwirken. So werden Setzungen an der Geländeoberfläche minimiert [2] [7]. Mit einem entsprechenden Verpressdruck kann der natürliche (primäre) Spannungszustand des Bodens weitgehend erhalten werden, sodass die Spannungsumlagerungen und Verformungen im Baugrund gering bleiben [1] [18]. In der Regel liegt der Verpressdruck oberhalb des Drucks, mit dem die Belastung aus Boden und Grundwasser im Gleichgewicht gehalten wird. Dadurch wird der Boden vorgespannt, indem die Horizontallasten, die durch den primären Spannungszustand des Bodens auf die Tunnelauskleidung einwirken, den Vertikallasten angeglichen werden [18]. Wird der Ringspalt dagegen unzureichend und unvollständig verfüllt, kommt es zu Gebirgsauflockerungen, welche sich als Oberflächensetzungen über dem Tunnel zeigen, und aufgrund der unzureichenden Bettung der Tunnelauskleidung kann diese starke Verformungen durch ihr Eigengewicht und infolgedessen hohe Biegebeanspruchungen erfahren [1] [18] [7]. Abbildung 2.5 (links) veranschaulicht den Einfluss der Qualität der Ringspaltverpressung auf die Bettung der Tunnelauskleidung. Oberflächensetzungen, welche vor dem Bereich des Tunnelvortriebs auftreten, können durch Überhöhung des Verpressdrucks ausgeglichen werden (Abbildung 2.5, rechts).



Abbildung 2.5: Einfluss der Ringspaltverpressung auf die Bettung der Tunnelauskleidung (links), Reduzierung von Oberflächensetzungen durch vollständige Ringspaltverpressung unter konstantem Druck (rechts) [18]

Darüber hinaus kann die Ringspaltverpressung die Tübbingauskleidung gegebenenfalls vor Kontakt mit betonangreifenden Wässern und Böden in gewissem Maße schützen und dabei auch gegen Schicht- und Sickerwasser abdichten [1] [19]. Hierfür werden zusätzlich Anforderungen an die Auswahl und Zusammensetzung des Verpressmaterials gestellt. Im Einbauzustand ist ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Tunnelauskleidung und Boden sicherzustellen, um die auf den Tunnel einwirkenden Lasten aus Auftrieb, Vortriebspressen und Nachläufer in den Baugrund weiterzuleiten [2] [7].

Aufgrabungen von bereits fertiggestellten Tunneln offenbarten im Allgemeinen eine gleichmäßige Verteilung des Verpressmaterials. Lokale kleine Fehlstellen wirkten sich nicht nachteilig auf die Bettung der Tunnelröhre aus [1].

2.2.3 Verfahrens- und maschinentechnische Einrichtungen

Die Ringspaltverpressung kann im Allgemeinen mit zwei unterschiedlichen Verfahrensweisen durchgeführt werden. Der Verpressmörtel kann entweder durch Injektionsöffnungen im Tübbingausbau oder durch Verpressleitungen im Schildschwanz, sogenannte Lisenen, in den Ringspalt eingebracht werden. Die Auswahl des geeigneten Verpresssystems hängt maßgeblich vom zu verwendenden Maschinentyp und Tübbingsystem und dessen Einsatzbereich ab (Abbildung 2.6). Das Injektionskonzept ist bereits im Planungsstadium zu definieren und in das Konzept der Vortriebsanlage einzuarbeiten, damit die erforderlichen Einrichtungen für die Verpressung während der Konstruktion der Tunnelvortriebsmaschine berücksichtigt werden. Die Ringspaltverpressung durch die Lisenen im Schildschwanz stellt den derzeitigen Stand der Technik dar [1] [2] [13].



Abbildung 2.6: Auswahl eines geeigneten Verpresssystems in Abhängigkeit von Maschinentyp und Tübbingsystem und dessen Einsatzbereich [1]

2.2.3.1 Ringspaltverpressung durch Injektionsöffnungen im Tübbingausbau

Die Anzahl der konischen Injektionsöffnungen eines Tübbingrings mit einem Durchmesser von üblicherweise 60 bis 80 mm hängt vor allem von den Fließeigenschaften des Verpressmaterials ab; in der Regel ist eine Öffnung pro Tübbing ausreichend [1]. Die Aussparungen sind mit einem Rückhaltemechanismus, wie z.B. einem Rückschlagventil oder Stopfen, herzustellen, damit das Verpressmaterial nicht in den Innenraum zurückfließen kann. Die Verpressung durch die Öffnungen erfolgt nicht simultan zum Vortrieb, sondern abschnittsweise, in der Regel mindestens einer Tübbingbreite. Hierbei werden nach Einbau der Tübbinge Schlauchleitungen an die einzelnen Öffnungen angeschlossen. Durch diese wird das Verpressmaterial in den Ringspalt eingeleitet [1] [2] [22].

Bei Einsatz im Lockergestein besteht jedoch die Gefahr, dass bereits während des Vortriebs Gebirgsauflockerungen stattfinden und nachbrechender Boden in den Ringspalt eindringt. Die Folge wären Oberflächensetzungen und eine Verschlechterung der Bettung der Tunnelauskleidung, bedingt durch die stärkere Verformbarkeit des umgebenden Bodens. Darüber hinaus muss bei dieser Verpressmethode oft auf eine Nachverpressung (Sekundärverpressung) zurückgegriffen werden, um eventuelle Hohlräume in der Firste des Ringspalts, welche durch das Absetzen des primären Verpressmaterials entstehen, zu schließen (Abbildung 2.7). Das Absetzmaß beträgt etwa 1 bis 2 % des Materialvolumens. Die notwendige Sekundärverpressung wird jedoch aus Platzgründen meist am Ende des Nachläufers zwischen 40 und 100 m hinter der Ortsbrust durchgeführt [2] [20].



Abbildung 2.7: Ringspaltverpressung durch Öffnungen im Tübbingausbau [20]

Heute findet diese Verpressmethode in der Regel beim Schildvortrieb im Festgestein mit Perlkieshinterfüllung seine Anwendung (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). Da in standfestem Gebirge der Vortrieb im offenen Modus ohne Ortsbruststützung erfolgen kann, besteht die Gefahr, dass der Ringspaltmörtel durch den Steuerspalt zwischen Schildmaschine und Boden in die Abbaukammer eindringen und dort Schäden an der Maschine verursachen kann. Daher wird der Ringspalt in der Regel mit Perlkies verfüllt. Vorteil dieser Perlkieshinterfüllung ist, dass die Verfüllung hinter der Tunnelvortriebsmaschine beginnen kann, da im Festgestein vorwiegend Lasten aus dem Eigengewicht der Tunnelauskleidung vorherrschen. Dabei wird der Perlkies mittels Druckluft in den Ringspalt eingebracht. Eingebaute Federbleche am Schildschwanz verhindern das Eindringen von Perlkies in den Steuerspalt (Abbildung 2.8, links) [2] [3] [13]. In einem zusätzlichen Arbeitsschritt können jedoch Hohlräume im Perlkies mit einer niedrig viskosen Zementsuspension verfüllt werden, um die eingebauten Ringe bei Belastung durch den Nachläufer in ihrer Lage zu sichern. Dies erfolgt meist nur im Sohlbereich auf einen Winkel von 90 bis 120 ° [2] [103]. Zur endgültigen Sicherung des veränderlich festen Gebirges kann der Ringspalt im Regelfall nach 0,6 bis 0,8*D (D: Tunneldurchmesser) vollständig mit einer Zementsuspension verpresst werden [1] [103]. Vor allem im nachbrüchigen Festgestein mit hohem Wasserandrang kann eine vollflächige Injektion die Drainagewirkung verringern [2]. Abbildung 2.8 zeigt schematisch den Querschnitt eines Tübbingausbaus mit Injektionsöffnungen für die Perlkieshinterfüllung.

Bei einer einschaligen Tübbingauskleidung wird die Verpressung durch Öffnungen im Tübbingausbau auch zur Nachverpressung mit Zweikomponentenmörtel durchgeführt [1].



Abbildung 2.8: Verblasen von Perlkies in den Ringspalt (links) [2] und anschließende Ringspaltverpressung mit einer niedrig viskosen Zementsuspension (rechts) [22] durch Öffnungen im Tübbingausbau

2.2.3.2 Ringspaltverpressung durch Lisenen im Schildschwanz

In nicht standfesten Lockergesteinen ist eine kontinuierliche Ringspaltverpressung unmittelbar nach dem Einbau der Tübbinge notwendig, um Bodenauflockerungen schnellstmöglich entgegenzuwirken und die Tübbingröhre zu stabilisieren. Zu diesem Zweck wurde die Ringspaltverpressung durch Lisenen im Schildschwanz entwickelt, welche simultan zum Vortrieb stattfindet [2]. Um die Konstruktionshöhe des Schildschwanzes möglichst gering zu halten, sind die Lisenen im Querschnitt oval gestaltet. Lisenen können entweder in den Schildschwanz integriert oder an der Außenseite des Schildschwanzes angebracht werden, wie z.B. bei japanischen Schilden [1].

Die Anzahl und Anordnung der Lisenen richten sich nach dem planmäßigen Injektionskonzept unter Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen. Je nach Durchmesser werden zwischen vier und acht Lisenen in einem Abstand von etwa 3 bis 5 m um den Umfang des Schildschwanzes angebracht [1] [6]. Nach dem Stand der Technik sind für Tunnelvortriebsmaschinen mit einem Durchmesser zwischen 6 und 9 m sechs Austrittsöffnungen ausreichend, um den Ringspalt vollständig zu verfüllen [18]. Abbildung 2.9 zeigt beispielhaft eine Anordnung der Lisenen im Schildschwanzblech. Die Anordnung der Lisenen erfolgt in der Regel nicht gleichmäßig, da im Firstbereich mehr Verpressmaterial eingebracht werden kann als in der Sohle [2].



Abbildung 2.9: Beispielhafte Anordnung der Lisenen (links), Lisenenöffnungen und Stahlbürstendichtung im Schildschwanzblech, Herrenknecht AG (rechts) [13]

Bei längeren Standzeiten werden die Lisenen freigespült und mit einem nicht erhärtenden Material gefüllt, welches aus den Leitungen zurückgeführt wird, wenn der Vortrieb fortgesetzt werden kann. Anschließend werden die Lisenen wieder mit dem Verpressmörtel beaufschlagt [1] [6]. Insbesondere bei der Verwendung von Zweikomponentenmörteln sind solche Spülleitungen erforderlich, um unmittelbar nach Zugabe des Beschleunigers ein Aushärten des Mörtels in den Lisenen zu unterbinden [3]. Dabei verlaufen die Spülleitung und Verpressleitungen der beiden Komponenten parallel zueinander (Abbildung 2.10). Mit einem 3-Wege-Absperrventil wird verhindert, dass der Verpressmörtel während der Ringspaltverpressung in die Spülleitungen eindringt bzw. das Spülmaterial beim Rücklauf in die Verpressleitungen fließt. Die beiden Komponenten werden am Schildschwanzende mit einer Mischdüse vermischt.



Abbildung 2.10: Verpresseinrichtung, Kavasaki Heavy Industries Ltd. Tokyo [6]

Eine zum Vortrieb simultane Ringspaltverpressung wurde zum ersten Mal 1982 beim Bau der U-Bahnlinie 4 in Osaka, Japan, durchgeführt und konnte sich gegenüber der damals üblichen Verpressmethode im Hinblick auf einen setzungsarmen Vortrieb erfolgreich bewähren. In einschlägigen Felduntersuchungen [24] wurden in empfindlichen tonigen Böden Setzungen im Größenbereich zwischen 10 und 30 mm gemessen, während beim konventionellen Tunnelbau mit einer vergleichsweise diskontinuierlichen Ringspaltverpressung deutlich größere Setzungen von 50 bis 100 mm üblich waren.

2.2.3.3 Schildschwanzdichtung

Während der Ringspaltverpressung verhindert die Schildschwanzdichtung zwischen Schildmaschine und Tübbingauskleidung das Eindringen des Verpressmörtels sowie von Grundwasser und Bodenmaterial in den Arbeitsraum des Tunnels. Gleichzeitig werden Unebenheiten, bedingt durch Fugenversatz beim Einbau der Tübbinge, ausgeglichen. Nach dem Stand der Technik werden Kunststoffprofile oder Stahldrahtbürstendichtungen verwendet. Letztere Abdichtung setzt sich aus drei bis vier hintereinander angeordneten Bürstenringen zusammen, deren Kammern mit Fett gefüllt sind (Abbildung 2.11). Dieses umweltverträgliche Fett steht unter sehr hohem Druck, um dem Verpressdruck des Mörtels sowie den erheblichen Erd- und Wasserdrücken entgegenzuwirken. Dabei beträgt die Druckdifferenz mehr als 2 bar.

Die permanente Abgabe des Fetts an die Außenseite der Tübbingauskleidung kann jedoch den Verbund zwischen Tübbing und Ringspaltmörtel beeinträchtigen. In dem Zusammenhang ist der Verbrauch des Fetts erheblich und stellt einen kostenintensiven Faktor dar [6].



Abbildung 2.11:Schematischer Aufbau des Schildschwanzes [6]

2.2.3.4 Förderung des Verpressmaterials

Die Mörtelherstellung erfolgt üblicherweise über Tage mit einem Durchlaufmischer aus Trockenfertigmischungen, welche in Silos gelagert werden. Bei Verwendung von erdfeuchten Gesteinskörnungen kommt ein Tellermischer zum Einsatz. Aus logistischen Gründen wird der Verpressmörtel jeweils in grö-Beren Chargen in den Tunnel zur Vortriebsmaschine transportiert und abschnittsweise in verhältnismäßig geringen Mengen pro Ring verpresst. Bei kurzen Tunnelstrecken wird der Mörtel in den Tunnel gepumpt oder in Vorratsbehältern mit einem Versorgungszug zur Vortriebsmaschine befördert. Dort wird der Verpressmörtel mit einer Transferpumpe in einen Vorratsbehälter umgeladen, woraus der Mörtel üblicherweise mit Kolbenpumpen bedarfsweise in die jeweiligen Lisenen gefördert wird [1]. In Abbildung 2.12 ist der Ablauf der Förderung des Verpressmaterials schematisch dargestellt.



Abbildung 2.12: Schematischer Ablauf der Förderung des Verpressmaterials

Das Ansaugen des Mörtels aus dem Vorratsbehälter erfolgt mittels Doppelkolbenpumpen über eine gemeinsame Zuleitung (Abbildung 2.13). Die weitere Förderung in die Lisenen erfolgt über Einzylinder-Kolbenpumpen, welche jeweils einer Lisene zugeordnet sind. Dabei können die Einzylinder-Kolbenpumpen unabhängig voneinander gesteuert werden, sodass eine zielgerichtete Verpressung des Ringspalts an mehreren Stellen über den Umfang des Schildschwanzes ermöglicht werden kann [18]. Gleichzeitig können unerwünschte Druckdifferenzen im Ringspalt minimiert werden, indem jede einzelne Lisene mit einem individuellen Verpressdruck bedient wird [1] [13]. Ausgehend von einer maximalen Hubzahl je Betriebsstunde von etwa 390 Kolbenhüben und einer Förderdauer eines Zylinderinhalts von ca. 4,6 sec (beispielhaft an einer praxisüblichen Doppelkolbenpumpe mit einem Förderzylinderinhalt von 12,7 1 je Kolben) beträgt die Förderrate in etwa 10 m³/h [13]. In der Praxis werden jedoch die vom Pumpenhersteller angegebenen maximalen Fördermengen von den TVM-Herstellern gedrosselt, um die Pausen zwischen den einzelnen Kolbenhüben möglichst kurz zu halten [13].



Abbildung 2.13: Vorratsbehälter und Doppelkolbenpumpen auf einer TVM [13]

Beim Bau des Botlektunnels in Rotterdam, Niederlande wurden neben Kolbenpumpen auch sogenannte Rotorschlauchpumpen zur Ringspaltverpressung von Zweikomponentenmörteln eingesetzt [23]. Das Funktionsprinzip beruht auf einem Verdrängermechanismus durch eine im Kreis rotierende Rolle bzw. Rotor (Abbildung 2.14). Das Fördermaterial wird durch einen flexiblen Schlauch gepresst, mittels Unterdruck wird neues Material angesaugt. Vorteil dieser Injektionspumpe ist die nahezu kontinuierliche und pulsationsfreie Förderung des Verpressmaterials, unabhängig von der Fördermenge. Analog zu den Kolbenpumpen wird jede Lisene von je einer Rotorschlauchpumpe mit Verpressmaterial beschickt [18].



Abbildung 2.14: Funktionsschema einer Rotorschlauchpumpe [6]

Des Weiteren können auch Schneckenpumpen zur Verpressung des Ringspalts mit Zweikomponentenmörteln eingesetzt werden [2]. Dabei dreht sich eine Spirale (Schnecke) in einem angepassten Rohr um ihre Mittelachse. Durch die Reibung an den Blattabschnitten der Schnecke wird das Material entlang der Achsrichtung transportiert, wobei kontinuierlich Material gefördert werden kann.

2.2.4 Schäden an der Tunnelauskleidung infolge unzureichender Ringspaltverpressung

Schäden an der Tunnelauskleidung entstehen größtenteils beim Einbau der Tübbingsegmente und können infolge von unzureichender Ringspaltverpressung in Form von

- Biegerissen an der Tunnelauskleidung und
- Versatz und damit einhergehend Undichtigkeiten in den Fugen

auftreten.

Schäden am Tübbingausbau können hinsichtlich ihrer Ursache in innere und äußere Einflüsse unterteilt werden, welche in Tabelle 2.1 zusammengestellt sind [26] [28]. Schäden durch innere Einflüsse sind im Wesentlichen auf die Beton- und Fertigungstechnologie zurückzuführen, wenn unter anderem die nach den ZTV-ING [14] vorgegebenen Toleranzen in der Berechnung sowie bei der Fertigung nicht eingehalten werden. Toleranzüberschreitungen der Stahlschalungen und damit einhergehend der Tübbingmaße wirken sich negativ auf die Formschlüssigkeit der Tübbingsegmente bei der Montage aus. Gleichzeitig unterliegen Tübbinge als Betonfertigteile hohen Anforderungen im Hinblick auf ihre Zusammensetzung und Verarbeitung, insbesondere die Verdichtung, sowie die Qualität und richtige Positionierung der Bewehrungskörbe.

Innere Einflussfaktoren	Äußere Einflussfaktoren
Fertigungstoleranzen	Versatz in den Tübbingfugen
Betonqualität	Betonabplatzungen an Erektorführungen
Positionierung der Bewehrungskörbe	Kompression der Dichtung
Verdichten des Betons	Ringorientierung
	Ablösen von Dichtungsprofilen
	Lastverteilungsplatten
	Packing
	Verpressmedium
	Gebirgsverformungen

Tabelle 2.1: Innere und äußere Einflussfaktoren auf Tübbingschäden

In den meisten Fällen werden Schäden am Tübbingausbau durch äußere Einflüsse verursacht. Typisches Schadensmerkmal sind Betonabplatzungen im Bereich der Topf-Nocke-Konstruktion, hervorgerufen durch kritische Kontaktspannungen infolge hoher Vortriebsbelastungen, oftmals in Kombination mit einem unsachgemäßen Einbau der Tübbingsegmente. Allerdings treten die aufgeführten Schadensformen meist auch zusammenhängend auf, wie z.B. bei der Entstehung von Leckagen in den Tübbingfugen, bedingt durch ungünstige Versätze [1] [13]. Solche Versätze können sowohl in den Längsfugen innerhalb

eines Tübbingrings als auch in den Ringfugen zwischen benachbarten Tübbingringen auftreten (Abbildung 2.15). Als häufigste Ursache wird das ungenaue Versetzen der Tübbingsegmente durch den Erektor aufgeführt [26].



Abbildung 2.15: Versatz in einer Ringfuge [26]

Schäden am Tübbingausbau werden zwar im Wesentlichen durch Belastungen aus den Vortriebspressen verursacht, können aber auch infolge von radialen Lasten durch die Ringspaltverpressung und durch Gebirgsverformungen hervorgerufen werden.

Im Hinblick auf die Ringspaltverpressung muss daher sichergestellt sein, dass der aus den Lisenen austretende Mörtel sich unter einem nahezu konstanten Verpressdruck gleichmäßig um den Tübbingring verteilt und den gesamten Ringspalt vollständig ohne Entmischung verfüllt [26] [27]. Unerwünschte Druckschwankungen beim Einpressen des Mörtels können in unzulässigen, lokalen Druckspitzen resultieren, was eventuelle Schäden am Tübbingausbau zur Folge hat. Weiterhin kann ein ungenügendes Steifigkeitsverhalten des Verpressmaterials, beeinflusst durch eine retardierende Verfestigung, zu einer Ovalisierung des Tübbingrings unter Auftrieb führen. Es treten unzulässige Verformungen und damit einhergehend Schäden in Form von Abplatzungen auf.

Bei rotationssymmetrischen Spannungszuständen im Gebirge, wodurch das Verpressmaterial in radialer Richtung gestaucht, aber in der seitlichen Querdehnung behindert wird, kann dies ebenfalls zu einer Überbeanspruchung der Tübbingauskleidung führen [6] [29]. Dabei unterscheidet sich das Baugrundverhalten im Lockergestein grundlegend vom Gebirgsverhalten des ungestützten Hohlraums im Festgestein. Je nach Beschaffenheit (Hohlraumform und -größe) und Eigenschaften des Gebirges können die Belastungszustände auf den Tunnelausbau rasch und stark variieren. Während im Lockergestein der Tunnelausbau eine weitgehend gleichmäßige Gewölbebelastung erfährt, entsteht z.B. bei druckhaftem Gebirge mit geringer Festigkeit und hoher Verformbarkeit eine zeitabhängige Hohlraumverengung (Konvergenz) [30] [31]. Mit zunehmender Verformung nimmt der Gebirgsdruck ab, welcher die Druckspannungen zwischen Gebirge und Ausbau als Folge ihrer Wechselwirkung beschreibt. Umgekehrt nimmt mit zunehmender Verformung bzw. Belastung des Ausbaus der Ausbauwiderstand, bezogen auf das Gebirge. Kann sich dabei kein Gleichgewichtszustand einstellen und der Ausbau ist nicht ausreichend dimensioniert, können die Verformungen nicht abklingen. Es kommt zu einer Überbelastung des Ausbaus und es können Abplatzungen auftreten. Zur Vermeidung solcher Schäden werden bereits komprimierbare bzw. deformierbare Verpressmaterialien mit einem gewissen Stauchvermögen eingesetzt [6] [26] [29] [32].

Bei weitgehend wasserundurchlässigen Böden besteht die Gefahr, dass das Absetzen von Wasser auf Dauer zu einer ungleichmäßigen Bettung der Tunnelröhre führt. Die Folge sind lokale Überbeanspruchungen und daraus resultierend Schäden am Tübbingausbau. Hier ist der Einsatz von Zweikomponentenmörteln von Vorteil, welche sich durch Zugabe eines Beschleunigers innerhalb kürzester Reaktionszeit versteifen [2] [8] [26].

Die Instandsetzung von Schäden kann mit größeren Maßnahmen verbunden sein, wenn die Standsicherheit und Tragfähigkeit des Tunnels nicht mehr sichergestellt sind. Lokale Schäden an der Innenseite der Auskleidung werden üblicherweise mit Reparaturmörtel behoben, während größere Flächen mit Spritzbeton nachgebessert werden können. Bei Schäden in den Dichtungen müssen häufig kostspielige Sanierungsmaßnahmen ergriffen werden, weil die Auskleidung teilweise aufgebrochen werden muss [1].

2.3 Technologie der Ringspaltmörtel

2.3.1 Grundsätzliche Anforderungen an Ringspaltmörteln

An den Ringspaltmörtel werden im Wesentlichen zwei einander nahezu entgegenlaufende Anforderungen gestellt: Zum einen muss der Mörtel hohe Fließeigenschaften und eine hohe Sedimentationsstabilität innerhalb einer Verarbeitungszeit von mehreren Stunden (~ 8 h) bis zum Verpressen in den Ringspalt aufweisen, um den Ringspalt gleichmäßig unter einem konstanten Verpressdruck vollständig zu verfüllen. Zum anderen muss der Mörtel unmittelbar nach dem Verpressen rasch eine gewisse Steifigkeit und Scherfestigkeit erzielen, um einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Tübbingausbau und Baugrund herzustellen [9] [15] [27].

Da aus logistischen Gründen nur größere Mörtelchargen zur Tunnelvortriebsmaschine transportiert werden können, der Mörtel jedoch jeweils abschnittsweise durch Lisenen im Schildschwanz oder Öffnungen im Tübbing in den Ringspalt verpresst werden kann, müssen die einzelnen Chargen über mehrere Stunden verarbeitbar sein. Dabei muss der Mörtel neben einer hohen Fließfähigkeit gleichzeitig eine hohe Sedimentationsstabilität besitzen [34]. Letzteres ist insbesondere von Bedeutung, wenn der Mörtel bei kurzen Tunnelstrecken bis etwa 2 km Länge von der Mischanlage direkt bis zum Einbauort über Förderleitungen (p = ca. 100 bis 120 bar) gepumpt werden soll. Aufgrund der pulsierenden Förderung des Mörtels mittels Kolbenpumpen besteht bei instabilen Mischungen die Gefahr, dass es in den Förderleitungen zu Verstopfungen, sogenannten Stopfern, kommt [13]. In der Praxis werden oftmals Rohrleitungen mit einem Durchmesser von 50 bis 65 mm eingesetzt, wobei das Größtkorn des Mörtels bis zu 8 mm beträgt [2] . Der Fließwiderstand der Rohrwandung kann mit einer hohen Fließfähigkeit und der damit einhergehend geringen inneren Reibung des Ringspaltmörtels vermindert werden. Während der Ringspaltverpressung kann es zu unplanmäßigen Stillständen der Maschine kommen, weshalb der Ringspaltmörtel auch nach einer gegebenenfalls mehrstündigen Liegezeit noch eine fließfähige Konsistenz und ausreichende Verarbeitbarkeit aufweisen muss. Vor allem bei hydraulisch abbindenden Mörteln können aufgrund der einsetzenden Hydratation des Bindemittels Verstopfungen in den Lisenen entstehen [3]. Beim Wiederanfahren der Maschine sollte ein Wiederanpumpen des Mörtels ohne erheblich größeren Energieaufwand, d.h. mit geringem Druck, möglich sein [35].

Unmittelbar nach dem Verpressen muss der Ringspaltmörtel noch eine ausreichend hohe Fließfähigkeit und Sedimentationsstabilität aufweisen, um den Ringspalt vollständig ohne Entmischung zu verfüllen und den eingebauten Tübbingring schnellstmöglich zu stabilisieren [33]. Dabei muss der Ringspaltmörtel innerhalb von wenigen Minuten eine gewisse Scherfestigkeit und Steifigkeit erzielen, um die einwirkenden Lasten aus Auftrieb, Vortrieb und Nachläufer in den Baugrund ableiten zu können. Diese Kenngrößen sollen in etwa denen des umgebenden Bodens entsprechen [18] [27]. Weitergehende Anforderungen, z.B. hohe Druckfestigkeiten wie bei Mörteln und Betonen allgemein, sind nur selten gefordert [18] [27].

Die rasche Verfestigung des Ringspaltmörtels erfolgt normalerweise rein physikalisch – durch Auspressen von freiem Wasser aus dem Mörtel in den anstehenden Baugrund. Diese Art der Verfestigung findet ausschließlich bei einkomponentigen Ringspaltmörteln statt. Ist ein Auspressen von Wasser nicht möglich, muss die Verfestigung auf chemischer Basis erfolgen. Dies gilt vor allem in bindigen Böden mit (sehr) geringer Durchlässigkeit. Hierfür kommen sogenannte Zweikomponentenmörtel zur Anwendung.

Im Allgemeinen werden an Ringspaltmörteln hinsichtlich Konsistenz und Scherfestigkeit folgende Anforderungen gestellt: Ein Ausbreitmaß a von 15 ± 5 cm nach 8 Stunden nach Mörtelherstellung und eine Scherfestigkeit des entwässerten Mörtels $\tau_M > 2,0$ kN/m². Diese Werte wurden einzig aus Praxiserfahrungen definiert (Tabelle 2.2).

Anforderungen	Parameter	Mörtelalter	
Verarbeitbarkeit/ Konsistenz	Setzfließmaß SF Ausbreitmaß a Ausbreitmaß a	$t_{\rm M} = 0 h$ $t_{\rm M} = 0 h$ $t_{\rm M} = 8 h$	$15 \pm 5 \text{ cm}$ $20 \pm 5 \text{ cm}$ $15 \pm 5 \text{ cm}$
Festigkeitsentwicklung	Scherfestigkeit τ_M	$t_{\rm M} = 30 {\rm min}$	≥ 2,0 kN/m ² ; bei aktiver Ortsbruststüt- zung und vollständig verfülltem Ring- spalt zur Vermeidung von Verformun- gen aus Auftriebskräften
	Steifemodul E _s	t _M = 30 min	5 bis 10 MN/m ² ; ähnlich dem eines für Tübbingausbauten gut geeigneten Bau- grundes
	Druckfestigkeit f _c	$t_M = 24 h$	normalerweise 0,5 N/mm ²

Tabelle 2.2: Wesentliche Anforderungen an Ringspaltmörtel in Anlehnung an [2]

2.3.2 Mörtelsysteme

Bislang wurden Ringspaltmörtel fast ausnahmslos auf empirischem Wege festgelegt, wobei die jeweiligen geologischen, hydrogeologischen und auch die projektspezifischen Randbedingungen berücksichtigt wurden. Dabei haben sich im Wesentlichen zwei grundsätzliche Mörtelsysteme entwickelt, welche hinsichtlich ihres Anteils an stabilisierenden Komponenten differenziert werden:

- Einkomponentenmörtel
- Zweikomponentenmörtel

Im Fokus dieser Arbeit stehen Einkomponentenmörtel und ihre wesentlichen Eigenschaften – Fließfähigkeit, Entwässerungspotenzial und Scherfestigkeitsentwicklung – in Abhängigkeit von den Ausgangsstoffen und der Zusammensetzung des Mörtels unter definierten Versuchsbedingungen.

Einkomponentenmörtel werden vorab zu einem endgültigen Ringspaltmörtel gemischt und kommen sowohl im Lockergestein als auch im Festgestein zum Einsatz. Die Ringspaltverpressung erfolgt im Regelfall durch Lisenen im Schildschwanz (vgl. Abschnitte 2.2.3.1).

Zweikomponentenmörtel werden in Lockergesteinen entweder durch Öffnungen in den Tübbingen oder durch den Schildschwanz in den Ringspalt verpresst [27]. Bei der letztgenannten Methode werden beide Komponenten durch zwei parallele Förderleitungen bis zum Schildschwanzende geführt, wo diese zu einem endgültigen Ringspaltmörtel vermischt und in den Ringspalt verpresst werden (vgl. Abschnitt 2.2.3.2).

2.3.2.1 Einkomponentenmörtel

Einkomponentenmörtel sind im Weiteren noch entsprechend ihres Bindemittelanteils zu unterscheiden. Neben Zement und Zusatzstoffen als Bindemittel werden bei der Herstellung dieser Ringspaltmörtel Kiese und Sande als Gesteinskörnung zugegeben [21] [36]. Dabei haben sich folgende Ringspaltmörteltypen etabliert:

- Aktive Ringspaltmörtel: die Verfestigung des Mörtels erfolgt primär durch Hydratation des Zements, in der Regel Portlandzement, mit einem Gehalt > 200 kg/m³
- Bedingt aktive Ringspaltmörtel: schnelles Ansteifen und anschließend sehr langsame Festigkeitsentwicklung des Mörtels mit einem geringen Zementanteil zwischen 50 und 200 kg/m³
- Inaktive (inerte) Ringspaltmörtel: nahezu zementfreie Mörtel mit einem Anteil von höchstens 50 kg/m³, Zement wird meist durch hydraulischen Kalk oder Flugasche ersetzt

In Tabelle 2.3 sind exemplarisch praxiserprobte Rezepturen der genannten Ringspaltmörteltypen dargestellt, welche in unterschiedlichen geologischen Verhältnissen für die Ringspaltverpressung eingesetzt wurden. Nach dem Stand der Technik erfolgt die Ringspaltverpressung durch Lisenen im Schildschwanz (vgl. Abschnitt 2.2.3.2).

		[Vol	%]	
Ausgangsstoffe	Aktiver RSM	Bedingt ak	tiver RSM	Inaktiver RSM
Zement	6	5	-	-
Branntkalk	-	-	4	-
Kalksteinmehl	-	10	-	-
Flugasche	9	-	16	21
Kies	17	-		22
Sand	32	56	64	41
Bentonit	15	-		9
Wasser	21	29	16	7
Zusatzmittel	-	-	0.3	-

Tabelle 2.3: Praxiserprobte Mörtelrezepturen für die Ringspaltverpressung [2] [33] [104]

Für alle drei Ringspaltmörteltypen werden in etwa die gleichen Anforderungen an die Verarbeitbarkeit gestellt, wobei ein Ausbreitmaß von 20 ± 5 cm unmittelbar nach Herstellung und von 15 ± 5 cm nach 8 h angestrebt werden [21].

Obwohl die hydraulische Verfestigung von aktiven und bedingt aktiven Mörteln mit einer sehr hohen Fließfähigkeit erst nach mehreren Stunden einsetzt, konnte in ihnen durch Auspressen von Wasser unter Druck eine sofortige Scherfestigkeit und damit eine hinreichende Stützwirkung gegen einwirkende Lasten aus Tübbingeinbau und Nachläufer nachgewiesen werden [20]. So wurde für die im Zuge des Hofoldinger Stollenausbaus eingesetzte Mörtelrezeptur eine Scherfestigkeit von 32 kN/m² nach einer Entwässerungsdauer von 20 min und einem Entwässerungsdruck von 2,5 bar ermittelt. Hierfür wurde der Mörtel in einem Drucktopf gegen eine eingebaute Bodenprobe mit definierter Korngrößenverteilung und Einbaudichte gepresst [19]. Neben einer gewissen Scherfestigkeit soll der Ringspaltmörtel auch eine ausreichende Steifigkeit von 5 bis 10 MN/m² erreichen, entsprechend einem typischen Bereich von Böden, in denen Tunnel maschinell aufgefahren werden [21].

Darüber hinaus werden an diesen hydraulisch abbindenden Mörteln einaxiale Druckfestigkeiten von ca. 0,5 bis 1,0 N/mm² nach 24 h gefordert [21] [105]. Die Endfestigkeiten (28 d) dieser Mörtel liegen meist zwischen 3 und 7 N/mm² [20], können aber teilweise auch Höchstwerte von 15 bis 20 N/mm² erreichen [106]. Praxiserfahrungen haben jedoch gezeigt, dass die Anforderung an einer hohen Druckfestigkeit zur Sicherstellung einer frühzeitigen Bettung der eingebauten Ringe nicht hinreichend begründet ist, da Schäden in Form von Rissen oder Verformungen am Tübbingring meist bereits nach 5 bis 10 Ringen zu verzeichnen sind [13]. Dies entspricht in Abhängigkeit von der Vortriebsdauer und Einbauzeit der Tübbingringe einer Zeitspanne von etwa 8 h, in der zementhaltige Ringspaltmörtel noch keine nennenswerten Druckfestigkeit des Ringspaltmörtels von größerer Bedeutung.

Dabei hat sich herausgestellt, dass zementarme (bedingt aktive) Ringspaltmörtel den Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung sowie an die Verarbeitbarkeit nahezu gleichwertig mit zementreichen (aktiven) Ringspaltmörteln nachkommen [3]. Dagegen kann die Verfestigungsdauer eines zementfreien (inaktiven) Ringspaltmörtels mehrere Wochen betragen [2]. Vor diesem Hintergrund werden bei Vortrieben

mit zementhaltigen Ringspaltmörteln auch planmäßig inaktive Mörtel als sogenannte "Wochenendmischungen" verpresst. Dabei erfolgt die Ringspaltverpressung beim letzten Tübbingring vor der Wochenendpause, um anschließend ohne weitere Entleerung oder Reinigung der Lisenen den Vortrieb fortzusetzen [13].

2.3.2.2 Zweikomponentenmörtel

Alternativ zu Einkomponentenmörteln kommen auch in nicht standfesten Lockergesteinen Zweikomponentenmörtel zum Einsatz. Die notwendige Steifigkeitsentwicklung bei Zweikomponentenmörteln wird dabei nicht physikalisch durch Entwässerung und Konsolidierung des Mörtels forciert, sondern beruht auf einer chemischen Reaktion zwischen zwei Komponenten.

Während bei Einkomponentenmörteln alle Ausgangsstoffe (Bindemittel, Zusatzstoffe, Gesteinskörnung und Wasser) vorab vollständig zu einem endgültigen Ringspaltmörtel vermischt und ohne Zugabe von weiteren Komponenten in den Ringspalt verpresst werden, setzen sich Zweikomponentenmörtel aus einer stabilisierenden Hauptkomponente A und einer aktivierenden Komponente B zusammen (Tabelle 2.4). Die Komponente A besteht in der Regel aus 70 bis 80 % Wasser, einem hydraulischen Bindemittel, Bentonit und in der Regel einem Zusatzmittel (Stabilisierer, Verzögerer), um analog zu den Einkomponentenmörteln eine Lagerung und Verarbeitbarkeit über mehrere Stunden zu erzielen. Hierfür werden folgende Anforderungen an die Komponente A gestellt [106]:

- Verarbeitbarkeitszeit von bis zu 72 h
- Marsh-Zeit zwischen 30 und 45 sec
- Blutwassermenge sollte bei 500 ml nach 3 h nicht größer als 3 M.-% sein.

Die Komponente B besteht aus einem chemischen Beschleuniger (meist auf Basis von Natriumsilikat) mit Wasser, welche separat bis an das Ende des Schildschwanzes gepumpt und dort der Komponente A zugemischt wird, um die Festigkeitsentwicklung des Mörtels binnen weniger Sekunden anzuregen. Das Mengenverhältnis der Komponente A zu Komponente B hängt maßgeblich von den Anforderungen aus den geologischen Verhältnissen ab und beträgt üblicherweise 9:1 [27] [36]. Bereits wenige Stunden nach Mischung der beiden Komponenten können Druckfestigkeiten zwischen 100 und 200 kN/m² erreicht werden [13].

Komponente Ausgangsstoffe		[kg/m ³]
	Zement	315
	Bentonit	42
Komponente A	Wasser	816
	Verzögerer	3
Komponente B	Beschleuniger	60

Tabelle 2.4: Mischung eines Zweikomponentenmörtels [106]

größten Setzungen zwischen 25 und 37 mm einstellten.

In Felduntersuchungen an einem Testabschnitt des Botlektunnels (Rotterdam) mit dem in Japan entwickelten Zweikomponentenmörtel "ETAC" konnten Festigkeiten von 0,25 N/mm² bereits nach 1 Stunde nachgewiesen werden [25]. Diese rasche Festigkeitsentwicklung wirkte sich günstig auf das Verformungsverhalten des Bodens und damit auf die Setzungen an der Geländeoberfläche aus. Im Vergleich zum ebenfalls am Botlektunnel eingesetzten Referenzmörtel "BTC Botlek Mörtel" waren die totalen Spannungen des Bodens sowohl horizontal als auch vertikal bei Verwendung des Zweikomponentenmörtels signifikant geringer. In Abbildung 2.16 sind die Längs- und Quersetzungen im Abstand x von der Tunnelachse dargestellt. Beim Einsatz des ETAC-Zweikomponentenmörtels wurden geringere Oberflächensetzungen zwischen 10 und 20 mm gemessen, während sich beim BTC Botlek-Referenzmörtel die



Abbildung 2.16: Quer-und Längssetzungen zur Tunnelachse über die Entfernung zur TVM mit ETAC (links) und BTC Botlek, andere Skalierung (rechts) [25]

Im Hinblick auf die Fließeigenschaften weisen Zweikomponentenmörtel eine geringere Viskosität und somit eine leichtere Pumpbarkeit auf als Einkomponentenmörtel. Dies hat den Vorteil, dass in Bezug auf das Verpresssystem geringere Leitungsquerschnitte hergestellt werden können [27]. Während für Einkomponentenmörtel aufgrund ihres Größtkorns ovale Rohrquerschnitte mit einer Nennweite von 50 bis 65 mm gewählt werden, beträgt der Durchmesser der Verpressleitung für die Komponente A 30 mm. Die Komponente B wird mit einer zeitlichen Verzögerung von rd. 60 sec über eine parallele Rohrleitung (\emptyset 6 mm) verpresst und am Ende des Schildschwanzes mit der Komponente A vermischt. Die rasche Festigkeitsentwicklung kennzeichnet sich durch eine Gelbildung des Zweikomponentenmörtels, was auf die Beschleunigung der C₃S-Hydratation des Zements zurückzuführen ist [18] [108].

Allerdings haben Zweikomponentenmörtel den Nachteil, dass sie nach dem Verpressen bei hohen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers leicht zum Entmischen neigen. Darüber hinaus kann nicht sichergestellt werden, dass sich beide Komponenten bei der relativ kurzen Mischzeit und Mischstrecke stets homogen vermischen [24] [25] [39]. Des Weiteren kann der Zweikomponentenmörtel (nach Zugabe des Beschleunigers) bei unplanmäßigen und längeren Stillständen in den Lisenen aushärten, was in der Praxis mit einem erheblichen Reinigungsaufwand verbunden ist. In dem Zusammenhang werden normalerweise Spülleitungen in den Schildmantel eingebaut, um die Lisenen mit einem geeigneten Material, praxisüblich mit der Komponente A, freizuspülen (vgl. Abschnitt 2.2.3.2).

Da die Komponente A des Zweikomponentenmörtels einen sehr hohen w/z-Wert (~2,5) aufweist und infolge eines Austrocknens einen starken Volumen- und auch Festigkeitsverlust erleiden kann, wird der Einsatz von Zweikomponentenmörteln bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels empfohlen [3].

2.3.2.3 Spezielle Mörtel

Feinkörnige Ringspaltmörtel (0 bis 2 mm)

Feinkörnige Mörtel werden meist im Lockergestein eingesetzt. Aufgrund der dort in der Regel vorliegenden geringen Scherfestigkeit des Bodens kann auf ein hydraulisches Bindemittel, wie Zement, nahezu verzichtet werden. Folglich besteht der Ringspaltmörtel vorwiegend aus Wasser, Feinstoffen (z.B. Flugasche), Sand 0-2 mm und Bentonit. Mit seiner sehr fließfähigen Konsistenz ist dieser Mörtel lange verarbeitbar und leicht pumpbar. Aufgrund der nahezu zementfreien Mischung ist zudem die Gefahr von Verstopfungen in den Verpressleitungen bei unplanmäßigen Stillständen verringert. Die erforderliche Scherfestigkeit erzielt der Mörtel durch seine Entwässerung in den anstehenden Boden [18].

Grobkörnige Ringspaltmörtel (0 bis 16 mm)

Alternativ zum feinkörnigen Mörtel (0-2 mm) können auch Mörtel mit gröberem Zuschlag (0-16 mm) eingesetzt werden. Allerdings muss der Durchmesser der Verpressleitungen auf das Größtkorn des Mörtels angepasst werden ($\emptyset \approx 100$ mm). Die notwendige fließfähige Konsistenz des Mörtels wird durch Zugabe eines rheologischen Additivs eingestellt. Der grobkörnige Mörtel wird in der Regel als sogenannter "Extrudierbeton" verpresst. Grobkörnige Mörtel beinhalten meist Zement und erreichen ihre Festig-keiten fast ausnahmslos durch die Hydratation des Zements [18].

Ringspaltmörtel mit Sand und Feinkies

Ringspaltmörtel aus einem abgestuften Sand und Feinkies mit einem Größtkorn von bis zu 4 mm können durch Zugabe eines Polymer-Additivs die erforderlichen temporären Fließeigenschaften bis unmittelbar nach dem Verpressen erreichen. Bei der Konzeption dieser Mörtel kann auf die Verwendung von Zement nahezu gänzlich verzichtet werden. Obwohl der Mörtel erst nach etwa 6 Stunden eine innere Scherfestigkeit erreicht, ist diese ausreichend, um ein Aufschwimmen der Tübbingringe zu verhindern. Der Mörtel weist die Verformbarkeit eines festen, kohäsiven, sandigen Bodens auf und kann somit eine ausreichende Bettung der Tunnelauskleidung gewährleisten [18].

Verblasen von Perlkies

In standfestem Festgestein wird oftmals ein Trockengranulat durch Öffnungen in den Tübbingen in den Ringspalt verblasen, da das Material eine sofortige Bettung der eingebauten Tübbingringe erzielt (vgl. Abschnitt 2.2.3.1). Hierfür wird in der Regel Perlkies mit einer Korngröße von 4 bis 8 mm oder 8 bis 12 mm entweder mit gerundeter oder mit gebrochener Form verwendet [18] [13]. Der Perlkies sollte keine Feinanteile beinhalten, um Verklebungen des Granulats zu vermeiden [2]. In der Praxis hat sich herausgestellt, dass die während des Vortriebs entstehenden Vibrationen der Maschine eine Verdichtung und damit einhergehend eine Volumenabnahme des Perlkieses herbeiführen können, sodass ein Nachverblasen erforderlich ist. Etwa vier bis fünf Tübbingringe hinter der Maschine wird im Sohlbereich eine niedrig viskose Zementsuspension durch die Öffnungen der Tübbingringe verpresst, um diese bei Belastung durch den Nachläufer in ihrer Lage zu sichern. Etwa 13 Ringe hinter der Maschine erfolgt dann auch eine Verpressung mit Zementsuspension im Firstbereich [18]. Bei starkem Wasserandrang kann der Ringspalt mit Zementsuspension nachverpresst werden, um die Drainagewirkung zu verringern [2] [13].

Komprimierbare bzw. deformierbare Ringspaltmörtel

Stellen sich beispielsweise in druckhaftem Gebirge rotationssymmetrische Spannungszustände ein, wird der Ringspaltmörtel in radialer Richtung gestaucht. Dabei hängt die Beanspruchung des Tübbingrings durch den Gebirgsdruck maßgeblich von der Steifigkeit respektive dem Verformungsverhalten des Mörtels ab. Um den Ausbauwiderstand gegen die zunehmende Konvergenz des Gebirges gering zu halten und somit eine übermäßige Beanspruchung des Tunnelausbaus zu vermeiden, ist ein Stauchspannungsniveau zwischen 0,7 und 1,5 N/mm² anzustreben [29]. Die Verformungsmöglichkeit in radialer Richtung kann durch einen komprimierbaren Ringspaltmörtel bereitgestellt werden. Hierfür werden zur Erhöhung des Porenraums als "innerer Ausweichraum" normalerweise Leichtzuschläge zugegeben, um das gewünschte, elastisch-plastische Materialverhalten zu erreichen [109]. Im Hinblick auf die zunehmende Konvergenz können komprimierbare Ringspaltmörtel bis über 40 % ihrer Ausgangsdicke im erhärteten Zustand gestaucht werden (Abbildung 2.17, rechts). Als Leichtzuschläge werden beispielsweise expandierte Polystyrol-Kugeln (EPS-Kugeln) verwendet [32]. Ist eine weitere Erhöhung des Porenraums erforderlich, werden diese auch mit einem stabilen, feinporigen Schaum kombiniert [29].

Untersuchungen zum Spannungs-Dehnungsverhalten von komprimierbaren Ringspaltmörteln im erhärteten Zustand zeigten mit Belastungsbeginn zunächst eine elastische Verformung (Abbildung 2.17, links). Nach Erreichen der jeweiligen Stauchspannung zwischen 0,5 und etwa 1,5 N/mm² stellte sich eine plastische Verformung bis zum Versagen ein. Bei einer Stauchung von mehr als 50 % war eine deutliche Verfestigung des Materials mit Druckspannungen zwischen 1,5 und 3,5 N/mm² zu verzeichnen. Qualitativ entspricht das Spannungs-Dehnungsverhalten des komprimierbaren Ringspaltmörtels mit einem Stauchspannungsniveau von 1,5 N/mm² einem elastisch-plastischen Verformungsverhalten.


Abbildung 2.17: Spannungs-Dehnungsverhalten von komprimierbaren Ringspaltmörteln (links), Probekörper vor und nach einem Stauchtest (rechts) [29]

Für die Auswahl eines geeigneten Mörtelsystems können die verschiedenen Mörteltypen hinsichtlich des Einsatzbereiches, des Verpresssytems und der Förderungsart kategorisiert werden, wie in Tabelle 2.5 zusammengestellt.

Mörteltyp		Einsatzbereich			Verpresssystem		Pumpentechnik					
		F	L		А	В	КР	RP	SP	DL	Besonderheiten	
ė.	aktiv	(X)	nb x	n	x	x	x				klassischer Ringspaltmörtel, anfängliche Verfestigung durch Auspressen von Wasser, anschließend Festigkeits- entwicklung durch Hydratation von Zement	
Einkomponente mörtel	bedingt aktiv	(X)	x			x	x				Verfestigung durch Auspressen von Wasser, Erstarrungsbeginn abhängig vom Zementanteil	
	inaktiv		x			x	x				Verfestigung ausschließlich durch Auspressen von Wasser, lange Verarbeitungsdauer	
Zweikomponenten- mörtel			x	x	x	x		(X)	x		rasche Festigkeitsentwicklung nach Mischung der Komponenten A und B	
Perlkies		x			x					x	vorwiegend im Festgestein, Erhöhung der Bettung durch zusätzliche Verpressung einer Zementsuspension im Sohlbereich	
komprimierbare RSM		x			x	x			X		nur im Festgestein anwendbar, weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf	

Tabelle 2.5: Übersicht verschiedener Mörteltypen hinsichtlich Einsatzbereich, Verpresssystem und Pumpentechnik in Anlehnung an [2] [106]

x geeignet

(x) bedingt geeignet

nb nichtbindig

b bindig

A Injektionsöffnungen im Tübbingausbau

B Lisenen im Schildschwanz

- KP Kolbenpumpe
- RP Rotorpumpe
- SP Schneckenpumpe
- DL Druckluft

3 EINKOMPONENTENMÖRTEL

3.1 Ausgangsstoffe

Einkomponentige Ringspaltmörtel enthalten vom Grundsatz her die gleichen Ausgangsstoffe wie konventionelle Mörtel. Mit einer zweckmäßigen Wahl der Ausgangsstoffe und einer optimalen Zusammensetzung des Mörtels können die jeweils anzustrebenden Eigenschaften – Fließ- und Entwässerungsverhalten des Ringspaltmörtels gezielt beeinflusst werden. Eine wesentliche Rolle spielen dabei folgende Ausgangsstoffe:

- Zugabewasser
- Feinstoffe, insbesondere der Mehlkornanteil (0-0,125 mm)
- Gesteinskörnung
- Bentonit

Während bei Betonen und Mörteln allgemein der Wasserzementwert (w/z-Wert) eine wesentliche Entwurfsgröße darstellt, spielt der w/z-Wert bei Ringspaltmörteln eine untergeordnete Rolle. Entscheidend ist hier vorrangig die Verarbeitbarkeit des Ringspaltmörtels über mehrere Stunden, welche maßgeblich von der Konsistenz des Mörtels abhängt. Die geforderte hohe Fließfähigkeit des Mörtels wird dabei durch den Wassergehalt eingestellt. Ein hoher Wassergehalt geht allerdings mit einem erhöhten Sedimentationsrisiko einher, was zu starken Wasserabsonderungen führen kann. Dem kann entgegengewirkt werden, indem die anderen Ausgangsstoffe im Ringspaltmörtel systematisch durch

- Optimierung der Gesamtsieblinie mit Erhöhung des Mehlkornanteils und
- Zugabe von Feinstoffen mit hoher Feinheit

angepasst werden.

Der Mehlkornanteil setzt sich aus gegebenenfalls Zement und Zusatzstoffen sowie dem Feinanteil der Gesteinskörnung ($\leq 0,125$ mm) zusammen. Im Folgenden werden diese zusammenfassend als Feinstoffe bezeichnet, unabhängig davon, ob diese reaktiv oder inert sind. Als Feinstoffe kommen aufgrund ihrer Granulometrie meist künstliche Puzzolane (Flugasche) oder Gesteinsmehle (Kalksteinmehl, Quarzmehl) zur Anwendung. Die Granulometrie wird im Wesentlichen durch die Partikelform, die Oberflächenstruktur und die Partikelgrößenverteilung beschrieben.

Die Wirkungsweisen respektive Wirksamkeit der wesentlichen Ausgangsstoffe (Feinstoffe, Gesteinskörnung und Bentonit) im Mörtel werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert und deren Einfluss auf die jeweils anzustrebenden Eigenschaften – Fließ- und Entwässerungsverhalten sowie Scherfestigkeitsentwicklung – von einkomponentigen Ringspaltmörteln dargestellt.

3.2 Fließverhalten vor und nach der Ringspaltverpressung

Eine hohe Fließfähigkeit des Ringspaltmörtels ist zum einen für die mehrstündige Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit, zum anderen für die vollständige Verfüllung des Ringspalts unter den in-situ vorliegenden geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen unabdingbar. Maßgebliche physikalische Kenngrößen für die erforderliche fließfähige Konsistenz sind die Fließgrenze τ_0 und Viskosität η , welche sich ebenso direkt auf die Gefügestabilität des Mörtels auswirken. Mit einer niedrigen Fließgrenze τ_0 und Viskosität η wird der Ringspaltmörtel zwar fließfähiger, allerdings wird dabei unter Umständen die Sedimentationsneigung größer. Daher ist für eine ausreichende Gefügestabilität des Mörtels ein kritischer Grenzwert für die Fließgrenze τ_{krit} zu definieren [40]. Rheologisch soll der Mörtel ein möglichst Bingham'sches Fließverhalten aufweisen. Erst nach Erreichen der Fließgrenze zeigt sich ein Verhalten ähnlich Newton'scher Fluide, wie in Abbildung 3.1 illustriert.



Abbildung 3.1: Fließkurven von Fluiden nach den Modellen von Bingham und Newton

Dabei kann die Granulometrie der Feinstoffe die rheologischen Eigenschaften des Mörtels unterschiedlich beeinflussen.

Untersuchungen an Zementleimen zeigten, dass die Leimkonsistenz durch Zugabe von Flugasche bei konstantem Wassergehalt steifer wurde, was sich nachteilig auf die Verarbeitbarkeit auswirkte. Dies war darauf zurückzuführen, dass durch den erhöhten Feinstoffgehalt die Feinheit und damit einhergehend der Wasseranspruch des Feinstoffgemisches zunahm. Wurde allerdings ein Teil des Zements durch Flugasche bei konstantem Wassergehalt substituiert, wurde die Konsistenz erkennbar weicher [56]. Diese rheologische Wirksamkeit beruht einerseits auf den geringen Wasseranspruch der Flugasche, bedingt durch ihre kugelige Form und glatte Oberfläche, andererseits auf dem sogenannten "Kugellagereffekt" der Flugaschepartikel. Dieser Effekt ermöglicht dabei ein reibungsarmes Gleiten und Umlagern der Feststoffpartikel im Frischmörtel. Die Granulometrie der Flugasche wird daher bei der Konzeption des Ringspaltmörtels dahingehend genutzt, um die Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit sowie die Pumpbarkeit des Mörtels zu verbessern [48] [54] [55].

Weitere Untersuchungen an Feinstoffleimen zeigten, dass auch die Partikelgröße d_{50} und Partikelgrößenverteilung der eingesetzten Feinstoffe die Viskosität des Feinstoffleims entscheidend beeinflussen können [56]. Bei einer Partikelgröße d_{50} von 4 bis 100 µm blieb die Viskosität des Feinstoffleims mit einem Wasser/Feinstoff-Verhältniswert (w/F_v-Wert mit Feinstoffen < 0,125 mm) von 1,0 nahezu konstant (Abbildung 3.2). Dies konnte auch bei höheren w/F_v-Werten verzeichnet werden. Allerdings wiesen Feinstoffe mit gleichem d₅₀ unterschiedliche Leimviskositäten (w/F_v = 1,0) in einem Messbereich 0 bis 2 Pa*s auf, woraus ein Einfluss der Partikelgrößenverteilung auf die Fließfähigkeit von Leimen abzuleiten war.

Die Partikelgrößenverteilung von Feinstoffen wird in der Regel mit dem Lageparameter x' und dem Steigungsmaß n vereinfacht als Gerade in einer doppelt logarithmischen Darstellung beschrieben [80]. Kleine Werte für den Lageparameter x' stehen für eine hohe Feinheit des Feinstoffes, bedeuten aber gleichzeitig auch mehr Hohlräume im Vergleich zu gröberen Feinstoffen. Mit einem großen Steigungsmaß n stehen mehr feine Partikel zur Hohlraumfüllung zur Verfügung (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Feinstoffe mit $d_{50} < 4 \mu m$ bewirkten hingegen einen disproportional starken Anstieg der Leimviskosität bei gleichem w/F_v-Wert. Mit steigendem w/F_v-Wert verlief dieser Anstieg flacher. Daraus konnte abgeleitet werden, dass der Einfluss von interpartikulären Wechselwirkungen bei kleiner werdenden Partikeln stärker zunahm [56].

Interpartikuläre Wechselwirkungen bei x' $< ~4 \mu m$ spielen im Ringspaltmörtel eine untergeordnete Rolle, da diese aufgrund des hohen Wassergehalts des Mörtels (w/z-Wert ~2,7) kaum zum Tragen kommen. Wechselwirkungen, wie z.B. die VAN DER WAALS Anziehungskräfte, werden nur bei sehr dichter Lagerung der Partikel wirksam und nehmen bis unmittelbar vor dem Kontakt der Partikeloberflächen zu [44].



Abbildung 3.2: Einfluss der Partikelgröße d50 auf die Viskosität von Feinstoffleimen mit einem Wasser-Feinstoff-Verhältniswert w/Fv von 1,0 [56]

Um die Sedimentationsneigung des Ringspaltmörtels aufgrund seines hohen Wassergehalts zu reduzieren, ist ein hohes Wasserrückhaltevermögen des Mörtels unter atmosphärischen Verhältnissen erforderlich. Darunter versteht man primär die Fähigkeit, das bei der Herstellung des Mörtels zugegebene Wasser unter atmosphärischem Druck an der Oberfläche der Feststoffpartikel physikalisch festzuhalten [43]. Aufgrund der physikalischen Füllerwirkung sind hierfür vor allem aufeinander abgestimmte Feinstoffe von Vorteil,

da die Kornzusammensetzung im Mehlkornbereich verbessert wird. Dabei führen insbesondere Mischungen von Feinstoffen mit einer weitgestuften Partikelgrößenverteilung zu einer höheren Packungsdichte als solche mit enger Kornverteilung [51]. Vor allem ein im Korngrößenbereich < 10 μ m optimal angepasster, erhöhter Füllkorn-Anteil kann den Wasseranspruch des Frischmörtels verringern, gleichzeitig aber die rheologischen Eigenschaften und das Wasserrückhaltevermögen des Mörtels verbessern [56]. Durch den erhöhten Gehalt an Feinstoffen werden die mit Wasser zu benetzende Oberfläche respektive die spezifische Oberfläche des Korngemisches vergrößert und somit die physikalische Bindung von Wasser erhöht. Das Wasserbindevermögen hängt dabei maßgeblich von der Granulometrie der Feinstoffe ab. So binden Feinstoffe mit kantiger Form und rauer Oberfläche, wie Zement und Kalksteinmehl, mehr Wasser an ihrer Oberfläche als in Partikelgröße vergleichbare runde Partikel mit glatter Oberfläche, wie Flugasche [40]. (Bedingt durch die hydraulische Reaktivität von Zement wird ein Teil des Wassers im Laufe der Zeit auch chemisch gebunden.)

Zemente sowie in geringem Maße auch Flugasche und Hüttensandmehl gehören zu den reaktiven Stoffen und besitzen neben den physikalischen Wirkungsmechanismen auch eine chemisch-mineralogische Reaktivität. Diese liefern zusätzlich zur physikalischen Füllerwirkung gefüge- und festigkeitsbildende Reaktionsprodukte. Für die Konzeptionierung des Ringspaltmörtels spielt die chemisch-mineralogische Reaktivität der Feinstoffe, wie die Hydratation von Zement, aufgrund der geforderten hohen Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit über mehrere Stunden eine untergeordnete Rolle. In den meisten Fällen sind hohe Druckfestigkeiten, welche normalerweise durch hohe Zementgehalte erreicht werden, nicht erforderlich, sodass auf die Verwendung von Zement im Ringspaltmörtel weitgehend verzichtet werden kann (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Unabhängig davon, kann eine Festigkeitsentwicklung durch Hydratation von Zement und/oder durch reaktive Zusatzstoffe nur bedingt stattfinden, da der Ringspaltmörtel bis zum Verpressen in Vorratsbehältern gelagert und durch Rührwerkzeuge kontinuierlich in Bewegung gehalten wird [35]. Durch die mechanische Einwirkung kann sich kein stabiles Gefüge in Form einer Verfestigung des Mörtels ausbilden. Bei Zugabe von sehr feinen Feinstoffen, wie Kalksteinmehl, konnten zusätzliche Reaktionsprodukte an der Oberfläche beobachtet werden, welche eine Beschleunigung der Anfangshydratation von Zement bewirkten [51].

Neben der Kornbandoptimierung im Feinstteilbereich wird die erforderliche hohe Packungsdichte durch eine geeignete Sieblinie der Gesteinskörnung angestrebt. Bis heute gilt die gemäß der FULLER-Kurve zusammengesetzte stetige Korngrößenverteilung als Idealsieblinie [49]. Stetige Sieblinien werden allgemein anhand einer quadratischen Parabel (FULLER-Kurve) durch den Gesamtsiebdurchgang A, den Größtkorndurchmesser D der Sieblinie, die Siebweite d zwischen 0 und D sowie einen Exponenten n beschrieben (Gleichung 3.1). Für die FULLER-Kurve beträgt der Exponent n = 0,5 (für runde Körner).

$$\mathbf{A} = \mathbf{100} * \left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{D}}\right)^{\mathrm{n}} \ [\mathrm{Vol.} - \%]$$

Gleichung 3.1

- mit: A: prozentualer Siebdurchgang aller Feststoffe durch das Sieb mit der Siebweite d
 - d: Siebweite [mm]
 - D: Größtkorndurchmesser der Sieblinie [mm]
 - n: 0,5 (bei FULLER-Kurve)

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit des Ringspaltmörtels werden bevorzugt sandreiche Korngemische aus Natursand (0-2 mm) und Kies (2-8 mm) mit einer runden Kornform und einer glatten Oberfläche verwendet. Das Größtkorn hängt maßgeblich vom Durchmesser der Lisenen ab und beträgt üblicherweise 8 mm. Für eine hohe Packungsdichte wird die Regelsieblinie B nach DIN 1045-2 [53] empfohlen.

Untersuchungen zum Einfluss der Packungsdichte und des (Mindest-)Wassergehalts einer Kornzusammensetzung auf die Verarbeitbarkeit von selbstverdichtenden Betonen bestätigten, dass der Mindestwassergehalt maßgeblich von der Packungsdichte des Korngemisches abhängt [47]. In Abbildung 3.3 ist der Übergang von einem Kornhaufwerk (Feststoff + Hohlraum) in eine Suspension in Abhängigkeit vom Wassergehalt dargestellt.



Abbildung 3.3: Scherwiderstand eines Kornhaufwerks in Abhängigkeit vom Wassergehalt [47]

Der Mindestwassergehalt beschreibt die erforderliche Menge an Wasser in einem Kornhaufwerk, um die Oberflächen der Feststoffpartikel zu benetzen und die Hohlräume des Mehlkornhaufwerks zu füllen. Dabei nimmt der Scherwiderstand des zunächst trockenen Kornhaufwerks mit steigendem Wassergehalt zu (3).

Mit dem schlagartigen Übergang in eine Suspension nimmt auch der Scherwiderstand rasch ab. Durch die Reduzierung der Kapillarkräfte wird die scheinbare Kohäsion aufgehoben und das Korngemisch beginnt bei Energieeinwirkung zu fließen [49] [52] [54]. Demzufolge ist die Packungsdichte des Feststoffgemisches eine primäre Einflussgröße für das Fließverhalten und somit für die Verarbeitbarkeit des Ringspaltmörtels.

Um die Mischungsstabilität des Mörtels zu verbessern wird normalerweise Bentonit als Stabilisierer in Form einer Suspension im Ringspaltmörtel eingesetzt. Bentonit besteht vorwiegend aus dem Tonmineral Montmorillonit (≥ 60 %) und gegebenenfalls begleitenden Mineralkomponenten, wie Quarz, Glimmer, Feldspat und Calcit. Montmorillonit ist ein kristallines, schichtförmiges Silikat und wird in die Gruppe der quellfähigen Dreischicht-Tonminerale (Smektite) eingeordnet. Das Smektitmineral setzt sich aus einzelnen Aluminiumhydrosilikat-Lamellen zusammen, welche jeweils aus einer oktaedrischen Alumini-umoxid-Schicht zwischen zwei tetraedischen Siliziumoxid-Schichten bestehen (s. Abbildung 3.4).



Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau eines Montmorillonitkristalls [64]

Bentonit wird als stabilisierende Komponente vielseitig eingesetzt, so z.B. im Bereich der Kosmetik und Hygiene (Gesichtscreme, Zahncreme) sowie der Pharmazie (Medikamente). Ein wesentlicher Anwendungsbereich von Bentonit liegt in der Dichtwandtechnik, um zum einen den Schlitz zu stabilisieren und zum anderen im erhärteten Zustand die Schlitzwand gegen Grundwasser abzudichten. Hinsichtlich umwelttechnischer Aspekte werden Bentonitmischungen aufgrund ihrer hohen Adsorptionskapazität von anorganischen Schadstoffen bzw. Schwermetallkationen bei kontaminiertem Bodenmaterial eingesetzt [73]. Im Bauwesen finden bevorzugt quellbare Bentonite, wie Natriumbentonit, mit einer Feststoffkonzentration von 3 bis 6 % Anwendung, um den Fließwiderstand der Suspension zu erhöhen, indem die Volumenkonzentration der wässrigen Phase reduziert wird [57] [68] [70]. Da in europäischen Bentonitlagerstätten jedoch vermehrt Calciumbentonite zur Verfügung stehen, können diese durch Zugabe von Soda respektive Natriumkarbonat (Na₂CO₃) aktiviert werden. Durch den Aktivierungsprozess werden Calcium-Kationen durch Natrium-Kationen ersetzt, wobei die Calcium-Zwischenschicht-Kationen mit dem Anion der Natriumverbindung das schwerlösliche Salz Calciumkarbonat (CaCO₃) bilden. Bereits bei einer Zugabemenge des Aktivbentonits von 40 kg/m³ kann eine ausreichende Suspensionsstabilität erreicht werden, wohingegen bei Verwendung von reinen Calciumbentoniten ein deutlich höherer Feststoffanteil von mindestens 200 kg/m³ erforderlich ist [71].

Bentonite müssen in ihren spezifischen Eigenschaften stets gleichmäßig sein und eine konstante Qualität aufweisen, welche mit einer ausreichenden Quellzeit der Bentonitsuspension sichergestellt werden kann. Dabei hängt die erforderliche Quellzeit im Wesentlichen von der chemischen Zusammensetzung des Bentonits sowie von der Intensität und Dauer des Dispergierens ab [71] [73]. Mit einer hohen Dispersität der Suspension verkürzt sich die Quellzeit. Bei Verwendung von Aktivbentoniten ist eine Quellzeit von 4 bis 6 Stunden ausreichend, um die gewünschten Suspensionseigenschaften zu erreichen. In der Baupraxis wurden jedoch teilweise deutlich längere Quellzeiten von bis zu 16 Stunden festgelegt, um die optimalen rheologischen Eigenschaften zu erhalten.

Bentonitsuspensionen zeichnen sich durch ihre thixotropierende Eigenschaft aus, was auf den elektrostatischen Wechselwirkungen der Kolloidpartikel beruht. Im Ruhezustand verfestigt sich die Suspension zu einem Hydrogel, da die VAN DER WAALS Anziehungskräfte die elektrostatischen Abstoßungskräfte durch die elektrische Doppelschicht an den Tonmineraloberflächen dominieren. Dieser Gelzustand wirkt sich positiv auf die Mischungsstabilität aus. Bei mechanischer Einwirkung (Scherbeanspruchung) nimmt die Strukturviskosität ab und die Suspension geht wieder in die flüssige Solphase zurück [52] [57].

Übertragen auf den Ringspaltmörtel bietet das thixotrope Verhalten einer Bentonitsuspension den Vorteil, einerseits bei längeren Stillständen eine gewisse Verfestigung, begleitet mit einer hohen Gefügestabilität, und andererseits beim Wiederanfahren der Schildmaschine die gewünschte Fließfähigkeit und damit einhergehend Verarbeitbarkeit des Mörtels zu erreichen. Letzteres hängt im Wesentlichen von der Fließgrenze der Suspension respektive des Ringspaltmörtels ab. Die Fließgrenze sollte dabei möglichst niedrig sein, sodass kein gesteigerter Energieaufwand zum Anpumpen des Mörtels aufgebracht werden muss. Durch einen geringen Feststoffanteil der Suspension kann eine niedrige Fließgrenze eingestellt werden [35] [62].

Bei Einsatz von Bentonitsuspensionen in zementhaltigen Mischungen wird von Bentoniten eine ausreichende Mischungsstabilität gegenüber dem Zement vorausgesetzt, um die gewünschten rheologischen Eigenschaften des Mörtels sowie seine hohe Sedimentationsstabilität und gute Pumpbarkeit sicherzustellen.

Hinsichtlich einer hohen Mischungsstabilität wird an Zement-Bentonit-Suspensionen eine Marshviskosität mit einer Auslaufzeit von 40 s bei Bentonitgehalten $\leq 35 \text{ kg/m}^3$ in einem Gemisch mit 200 kg/m³ Zement gefordert. In einem angepassten Mengenverhältnis muss die Bentonitsuspension auch bei einem Überschuss an Zement ausreichend stabil bleiben. Gleichzeitig muss die Bentonit-Zement-Mischung optimale Fließeigenschaften während einer mehrstündigen Verarbeitbarkeitszeit – wie von Ringspaltmörteln gefordert – aufweisen.

Durch die Schmierwirkung der Bentonitsuspension werden das Fließvermögen und damit verbunden die Pumpfähigkeit des Mörtels verbessert. Bei einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 0,35 kann mit einer Bentonitmenge von 3 bis 10 % der Fließwiderstand im Schlauchsystem vermindert und damit einhergehend die Pumpfähigkeit des Mörtels verbessert werden [72].

Unmittelbar nach dem Verpressen in den Ringspalt ändert der Mörtel seine Konsistenz binnen weniger Minuten durch seine Entwässerung, wobei seine Ausbreitung durch den inneren Scherwiderstand und durch den Reibungswiderstand gegenüber dem umgebenden Boden sowie der Tübbingaußenseite gehindert wird. Aufgrund seines begrenzten Fließweges sind die Austrittsöffnungen in ausreichender Anzahl und zweckmäßig im Schildschwanz anzuordnen (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Die Reichweite des Mörtels beträgt im Allgemeinen 2,0 bis 3,0 m [33].

Mit Kenntnis der Reichweite r_e sowie der Dicke des Ringspalts $2a_i$ und des Verpressdrucks p_i ' kann ein kritischer Grenzwert für die Fließgrenze τ_0 entsprechend der empirisch ermittelten Gleichung 3.2 ermittelt werden, um einerseits den Ringspalt vollständig ausfüllen und andererseits ein Eindringen in den Steuerspalt mit verhältnismäßig geringerer Spaltdicke verhindern zu können [41].

$$r_e = \frac{2a_i}{2\tau_0} \cdot p_i' \left[m\right] \iff \tau_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2a_i}{r_e} \cdot p_i' \left[kN/m^2\right] \qquad \qquad \text{Gleichung 3.2}$$

Unter den in der Praxis typischen Randbedingungen

- einer Ringspaltdicke $2a_i = 15$ cm,
- einer eingeschränkten Fließweite des Mörtels im Ringspalt r_e=1,50 m (entsprechend einer typischen Tübbingbreite in Längsrichtung) und
- eines wirksamen effektiven Verpressdrucks $p_i = p_1 p_2 = 100 \text{ kN/m}^2$

p2: Gegendruck (durch anstehendes Grundwasser)

lässt sich eine Fließgrenze τ_0 von ca. 5 kN/m² berechnen, um eine ausreichende Fließfähigkeit des Mörtels im Ringspalt zu erreichen (Abbildung 3.5). Bei geringer werdenden Spaltdicken nimmt der Fließwiderstand zu und folglich muss der Ringspaltmörtel eine niedrigere Fließgrenze aufweisen [18].

p1: Verpressdruck



Abbildung 3.5: Ermittlung eines kritischen Grenzwertes für die Fließgrenze τ_0 des Ringspaltmörtels [42]

Da der Ringspalt verfahrensbedingt in seiner Dicke variiert, ist das verpresste Mörtelvolumen kontinuierlich zu überwachen, um den Verpressdruck für eine gleichmäßige Druckverteilung im Ringspalt gezielt einstellen zu können. Mit Drucksensoren kann die Mörtelmenge je nach Über- oder Unterschreitung des Verpressdrucks nachträglich reguliert werden. Unmittelbar hinter dem Abschluss der Schildschwanzdichtung kommt es zu einer lokalen Druckminderung im Mörtel. Infolge örtlicher Druckdifferenzen im Ringspalt verteilt sich der Ringspaltmörtel nahezu ringweise hinter dem in Vortriebsrichtung bewegenden Schildschwanz, wie in Abbildung 3.6 (links) veranschaulicht [7] [18]. In experimentellen Untersuchungen der Hochtief AG [18] und der Herrenknecht AG in Kooperation mit der Philipp Holzmann AG [114] konnte der ringförmige Fließvorgang des Mörtels infolge eines Druckgradienten nachgewiesen werden (Abbildung 3.6, rechts). Für diesen Zweck wurde ein Versuchsstand entwickelt, der die Ringspaltverpressung simultan zum Vortrieb, d.h. bei gleichzeitigem Vorziehen des Schildschwanzbleches mit zwei synchronen Hydraulikpressen, praxisnah visualisiert. Für die Visualisierung des Fließverhaltens der untersuchten Mörtel wurden diese vor der Verpressung eingefärbt. Die Druckverteilung während des Vortriebs und beim Wiederanfahren wurde mit eingebauten Drucksensoren gemessen. Die zeitliche Entwicklung der notwendigen Scherfestigkeit wurde mit einer Flügelsonde untersucht [114].



Abbildung 3.6: Druckverteilung und Fließverhalten des Mörtels im Ringspalt während des Vortriebs [18] (links) und Fließversuch an einem eingefärbten Ringspaltmörtel [114] (rechts)

3.3 Entwässerungs- und Konsolidierungsverhalten

Die Entwässerung des Mörtels im Ringspalt beruht auf einer Verringerung des Porenraums unter einem definierten Verpressdruck. Dieser Vorgang wird im Weiteren als Konsolidierung bezeichnet. Im Zuge der Konsolidierung wird zunächst das freie Wasser und darauffolgend das Zwickelwasser ausgepresst. Dabei bildet sich an der Grenzfläche zum anstehenden Boden ein sogenannter Filterkuchen aus (vgl. Abschnitt 3.4). Dieser stellt den konsolidierten und entwässerten Bereich des Mörtels dar und besitzt entsprechend eine reduzierte Durchlässigkeit. Mit fortschreitender Entwässerung gewinnt der Filterkuchen stetig an Dicke [13].



Abbildung 3.7: Entwässerung des Mörtels in den angrenzenden Boden [38]

Die Vorgänge während der entwässerungsbedingten Konsolidierung des Ringspaltmörtels können anhand des Feder-Topf-Modells nach TERZAGHI verdeutlicht werden (Abbildung 3.8). Der Topf stellt den Mörtel mit Wasser und dem durch die Feder repräsentierten Korngerüst dar. Die Kolbenbohrung steht stellvertretend für die Porenkanäle respektive die Transportwege des Wassers im Gefüge. Da Wasser nahezu inkompressibel ist, übernimmt das Porenwasser zum Zeitpunkt $t_M = 0$ die Belastung σ_a vollständig. Die Belastung besteht im Anwendungsfall des Ringspaltmörtels aus dem Druck der Verpressung. Dabei stellt sich ein Porenwasserüberdruck Δu ein, welcher sich mit zunehmender Zeit abbaut, da das Wasser durch die Porenkanäle entweicht. Während der Entwässerung erfährt der Mörtel eine Volumenverminderung und es erfolgt eine Belastungsumlagerung vom Porenwasser auf das Korngerüst. Mit der Volumenverminderung geht ebenso eine Umlagerung der Feststoffe im Mörtel bis zu einer dichten Lagerung (Filter-kuchenbildung) einher, bei gleichbleibendem Volumen der Feststoffe in der Probe. Die Konsolidierung respektive die Zunahme der Filterkuchendicke bedingt eine Verringerung der Wasserdurchlässigkeit des entwässerten Mörtels. Demnach kann von einem degressiven Entwässerungsverhalten ausgegangen werden.

Eine Volumenabnahme des Ringspaltmörtels infolge der druckbedingten Entwässerung sollte allerdings nur in geringem Maße stattfinden, da bei zu starker Volumenverminderung der kraftschlüssige Verbund zwischen Baugrund und Tunnelröhre nicht mehr ausreichend sichergestellt werden kann. Hierfür wird ein Größenbereich zwischen 3 und 8 Vol.-% angegeben [74].



Abbildung 3.8: Konsolidierung des Ringspaltmörtels anhand des Feder-Topf-Modells nach TERZAGHI [96]

Die Entwässerungsfähigkeit des Ringspaltmörtels ist neben dem Verpressdruck auch stark von der spezifischen Oberfläche und somit von dem Wasserbindevermögen der Feinstoffe abhängig. Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit an konventionellen Frischmörteln, welche maßgeblich durch den wirksamen Korndurchmesser dw und den Anfangswassergehalt wo beeinflusst wird, zeigten, dass für das Entwässerungsverhalten des Frischmörtels die Kornzusammensetzung im Feinteilbereich (0-0.25 mm) von entscheidender Bedeutung war [112]. Zum einen lässt sich über den Wasseranspruch der Feinstoffe der Wassergehalt des Mörtels ableiten, zum anderen beeinflussen diese maßgeblich die Größe des wirksamen Korndurchmessers dw. Der wirksame Korndurchmesser dw ist definiert als der einheitliche Korndurchmesser eines fiktiven einkörnigen Korngemisches, das zu der gleichen spezifischen Oberfläche führt wie die des realen Korngemisches. Im Allgemeinen liegt der wirksame Korndurchmesser dw im Bereich $d_{10} < d_w < d_{25}$ [113]. Mit zunehmendem Mehlkorngehalt des Sandes sowie mit zunehmender Mahlfeinheit des Zements nahm die Durchlässigkeit des Frischmörtels ab, was in langandauernden Entwässerungszeiten resultierte. Ebenso führte der Einsatz von Zusatzstoffen zu einer Abnahme der Entwässerungsgeschwindigkeit des Mörtels. So reduzierten sich der Wasseranspruch und damit die Wasserabgabe bei Zugabe von Flugasche, bedingt durch ihre Granulometrie (kugelige Partikelform und glatte Oberfläche). Darüber hinaus konnte bei Mischungen aus mehlkornarmem Sand und feinem Zement eine verstärkte Feinstteilverschiebung beobachtet werden als mit einem grob gemahlenen Zement. Dieser Effekt trat bei Mischungen mit einer sehr niedrigen Viskosität deutlicher auf. Fehlendes Mehlkorn sollte daher nicht nur durch feine Zusatzstoffe kompensiert werden, sondern durch Feinstoffe, deren Korngrößenverteilung den entsprechenden Bereich auffüllen [112].

Weitere Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten von Frischmörteln unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung zeigten, dass bei Zugabe von Bentonit das Wasserrückhaltevermögen des Mörtels erheblich gesteigert wurde, was auf das Wasseraufnahmevermögen sowie Wasseradsorptionsvermögen von Bentonit zurückzuführen war [112]. Die Entwässerung des Mörtels kam nahezu vollständig zum Erliegen. Das hohe Wasseradsorptions- und Quellvermögen von Bentonit ist auf seine hohe innere Oberfläche zurückzuführen. Anhand seines schichtförmigen Aufbaus wird zwischen einer "inneren" und "äußeren" Oberfläche unterschieden [65]. Dabei stellt die "innere" Oberfläche die Fläche zwischen den Schichten des Kristalls dar, während die "äußere" Oberfläche die abschließenden Flächen des Kristalls beschreibt. Abhängig von der Partikelgröße und vom Smektitgehalt des Bentonits liegt die "innere" Oberfläche zwischen 300 und 800 m²/g um ein Vielfaches höher als die "äußere" Oberfläche mit etwa 30 bis 100 m²/g [65].

Neben der großen spezifischen Oberfläche und damit einhergehend dem hohen Quell- und Wasseradsorptionsvermögen besitzen Tonminerale mit hohen Schichtladungen eine hohe Ionenaustauschkapazität. Bedingt durch Oberflächenladungen innerhalb der Schichtpakete kommt es in einem elektrolytischen Milieu, z.B. Wasser, zu einer Adsorption von Kationen, Anionen und Wassermolekülen. Bei Dreischicht-Tonmineralen, wie dem Bentonit, werden die Ionen überwiegend zwischen den Schichten eingelagert, während bei anderen Tonmineralen (z.B. Zweischicht-Tonminerale) diese an den Außenflächen angelagert werden. Da beim Bentonit ein Teil der Aluminiumionen (Al³⁺) in der Oktaederschicht durch Magnesiumionen (Mg²⁺) ersetzt wird, kommt es auf den Oberflächen zu einer Anreicherung an negativ geladenen Ionen. Die negative Überschussladung wird durch austauschbare Kationen kompensiert. Diese werden auch Gegenionen genannt und sind meistens Na⁺, K⁺, Ca²⁺ und Mg²⁺ [57] [66]. Durch elektrostatische Anziehung halten die Kationen die Schichten zusammen. Bei Anwesenheit von Wasser haben die Kationen das Bestreben sich zu hydratisieren, was zur Folge hat, dass Wasser zwischen den einzelnen Schichten eindringt. Mit Einlagerung der Wassermoleküle werden die Schichtpakete aufgeweitet, was als innerkristalline Quellung bezeichnet wird.

Abhängig von der Wertigkeit der Kationen wird Bentonit zwischen Natriumbentonit (Na⁺) und Calciumbentonit (Ca²⁺) unterschieden. Die folgende Abbildung 3.9 veranschaulicht die innerkristalline Quellung mit ein- und zweiwertigen Kationen. Im Vergleich zu einwertigen Kationen (z.B. Na⁺) wird mit zweiwertigen Kationen (z.B. Ca²⁺) eine progressive Aufweitung der Zwischenschichten durch die elektrostatischen Anziehungskräfte verhindert. Durch die geringe Hydratationsenergie von zwei- und höherwertigen Kationen binden diese vergleichsweise wenige Wasserdipole und verharren in Mittelposition des Zwischenschichtraumes. Dagegen bauen einwertige und kleinere Kationen eine größere Elektronen- bzw. Hydrathülle bei gleicher Ladung auf. In demineralisiertem bzw. deionisiertem Wasser nimmt die Aufweitung des Zwischenschichtraumes bis zur vollständigen Isolierung der einzelnen Schichten zu. Dieser Übergang wird als osmotische Quellung bezeichnet und hängt maßgeblich vom pH-Wert der Elektrolytlösung ab [65] [69]. Der osmotische Quellvorgang beruht auf einem Konzentrationsunterschied zwischen dem Wasser im Zwischenschichtraum und der "äußeren" Elektrolytlösung.

Das Wasseraufnahmevermögen eines Natriumbentonits liegt um das rd. 3-fache über dem eines Calciumbentonits zwischen 200 und 300 % (Abbildung 3.10).



Abbildung 3.9: Innerkristalline Quellung mit einwertigen (a) und zweiwertigen (b) Kationen [65]



Abbildung 3.10: Wasseraufnahme nach Enslin-Neff eines Natrium- und Calciumbentonits [67]

In einem wassergesättigten Montmorillonit kann das Wasser in drei verschiedenen Formen vorliegen [68]:

- als Adsorptionswasser, welches an der negativ geladenen Silikatoberfläche eine Schicht von mehreren Molekülen bildet. Bei Oberflächenspannungen von bis zu 2.000 MN/m² sind die Wassermoleküle unbeweglich.
- als Hydratationswasser, welches mit einer Hydrathülle die Kationen umgibt und durch elektrostatische Anziehungskräfte gebunden wird
- als freies Porenwasser, dessen Wassermoleküle noch frei beweglich sind.



Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der Hydratation von Kationen mit Wasser-Dipolen [68]

Instabile Bentonitsuspensionen in Zementgemischen – unabhängig von der Zementart – neigen zu Flockungs- und Absetzerscheinungen, verbunden mit hohen Filtratwasserabgaben. Dies ist auf eine chemische Umwandlung des Natrium- oder Aktivbentonits durch die Hydratation von Zement zurückzuführen, wobei ein Teil der Natriumionen durch die freigesetzten, hydrolysierten Calciumionen der Klinkerpartikel ausgetauscht wird (Abbildung 3.12). Durch den Überschuss an Calciumionen (Ca²⁺) wird der Aktivierungsprozess zum Teil rückgängig gemacht und ein ursprünglicher Natriumbentonit oder ein mit Soda aktivierter Calciumbentonit wird nahezu vollständig in einen Calciumbentonit umgewandelt [57] [67].



Abbildung 3.12: Reaktionsmodell für Bentonit-Zement-Mischungen [67]

Infolgedessen wird der Aktivierungs- bzw. Hydratationsgrad des Bentonits herabgesetzt, wodurch dessen Quellvermögen sowie rheologischen Eigenschaften beeinträchtigt werden. Vor diesem Hintergrund werden hinsichtlich einer hohen Zementstabilität neben der Anforderung an die Marshviskosität auch Anforderungen an die Filtratwasserabgabe und das Absetzverhalten gestellt.

3.4 Kuchenbildende Filtration im Mörtel – innerer Filterkuchen

Während der entwässerungsbedingten Konsolidierung des Mörtels wird nicht nur freies Wasser ausgepresst, sondern es werden auch Feinstteile im Mörtel umgelagert und gegebenenfalls in den angrenzenden Boden transportiert. Diese können sich im Randbereich des Bodens mehr oder weniger rasch ablagern und einen sogenannten Filterkuchen ausbilden. Die Ausbildung eines Filterkuchens hängt im Wesentlichen vom Porenraum des Bodens und der Korngrößenverteilung der Mörtelbestandteile ab. Sind die Feststoffpartikel des Mörtels größer als die der Porenkanäle des angrenzenden Bodens, bildet sich der Filterkuchen im Mörtel aus. Im Nachfolgenden wird dieser als "innerer Filterkuchen" bezeichnet. Sind die Feststoffpartikel kleiner, dringen diese in den Porenraum des Bodens ein. Abweichend von den Angaben in der Literatur, u.a. [77] [78], wird die Feinstteilinfiltration nachfolgend als "äußerer Filterkuchen" beschrieben.

Mit einer ausreichenden Filterstabilität kann ein Materialaustausch, d.h. ein Auswaschen von Feinstteilen durch die größeren Poren des angrenzenden Bodens, vermindert werden. Die Filterstabilität wird üblicherweise durch die empirische Filterregel nach TERZAGHI ausgedrückt. Die Filterregel setzt die Kenntnis der Korngrößenverteilung der Mörtelbestandteile sowie des Bodens voraus und stellt drei wesentliche Anforderungen an das Filtermaterial (den angrenzenden Boden).

Die erste Anforderung beschreibt die mechanische Filterfestigkeit zur Vermeidung eines Materialaustausches:

$$D_{15} < 4 \cdot d_{85}$$
 Gleichung 3.3

Die zweite Anforderung beschreibt die hydraulische Wirksamkeit bzw. den Durchströmungswiderstand für eine effiziente Filtration:

$$D_{15} > 4 \cdot d_{15}$$
 Gleichung 3.4

Die dritte Anforderung bedingt eine ähnliche Korngrößenverteilung von Mörtel und angrenzenden Boden. Die ersten zwei Anforderungen können in der von TERZAGHI bekannten Filterregel zusammengeführt werden:

$$4 * d_{15} < D_{15} < 4 * d_{85}$$
 Gleichung 3.5

Dabei ist D₁₅ der Korndurchmesser des Filtermaterials respektive des Bodens bei 15 % Siebdurchgang. Die Korndurchmesser d₈₅ und d₁₅ beschreiben die Siebdurchgänge bei 85 % bzw. 15 % der angrenzenden Schicht respektive des entwässernden Mörtels [110].

Im Laufe der Filtration wächst der Filterkuchen an und beeinflusst die nachfolgenden Entwässerungsvorgänge signifikant. Die Struktur des Filterkuchens hängt im Wesentlichen von seiner Porosität und seinem Durchströmungswiderstand ab. Dabei zeichnet sich eine effiziente Filtration durch eine schnelle Ausbildung des Filterkuchens mit geringer Porosität aus. Allerdings können auf den Filterkuchen einwirkende Kräfte zu einer Kompression des Filterkuchens führen, wodurch die Filtration zunehmend erschwert wird. Die Geschwindigkeit der Filterkuchenbildung wird maßgeblich durch den Filtrationsdruck beeinflusst [78].

In [78] wurde der Einfluss von Druckdifferenzen auf die Filterkuchenbildung von Bentonitsuspensionen als Stützflüssigkeit für Schlitzwände unter einem Überdruck von 0,5 bis 1,0 bar eruiert. Dabei wurde neben der Filtratwasserabgabe, einschließlich der zeitlichen Änderung der Wasserabgabe, auch die Filterkuchendicke während einer Suspensionsstandzeit t von 45 Stunden ermittelt. Trotz unterschiedlichen Druckniveaus zeigten die Suspensionen über die gesamte Zeit ein annähernd gleiches Filtrationsverhalten (Abbildung 3.13, links). Folglich konnte bei diesen Suspensionen kein Einfluss des Druckniveaus auf die Filtrationsprozesse verzeichnet werden. Analog zum Verlauf der Filtratwasserabgabe war auch bei der zeitlichen Entwicklung der Filterkuchendicke kein Einfluss des Druckniveaus zu erkennen (Abbildung 3.13, rechts). Zwar konsolidierte der Filterkuchen bei einem höheren Druck (1,0 bar) stärker, was mit einer Abnahme der Durchlässigkeit einherging, allerdings wirkte diese geringe Durchlässigkeit einer schnelleren Durchströmung des Filterkuchens trotz größerem hydraulischen Gradienten entgegen. Die Filtrationsgeschwindigkeit bzw. die Filtratwasserabgabe war bei beiden Druckniveaus nahezu konstant.



Abbildung 3.13: Zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgabe (links) und der Filterkuchendicke (rechts) von Bentonitsuspensionen [78]

Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Kompressibilität des Filterkuchens neben der Druckbeanspruchung auch maßgeblich von der Granulometrie seiner Feststoffpartikel abhing [76]. So erzielten Haufwerke mit plättchenförmigen Partikeln unter Druckbeanspruchung eine sehr dichte Packung in Form einer dachziegelartig eng gepackten Struktur. Je höher dabei der lokale Feststoffgerüstdruck, umso niedriger die lokale Porosität und umso höher ist der lokale Durchströmungswiderstand.

Im Anwendungsfall der druckbedingten Konsolidierung bei Ringspaltmörteln werden die Feststoffpartikel zum Wasseraustritt hin umgelagert. Analog zu einer Kompaktierung des Filterkuchens unter entsprechendem Druck konsolidieren auch im Mörtel zunächst die tiefer liegenden Bereiche stärker. Durch die damit einhergehende Änderung der Porenstruktur werden die Transportwege für die weitere Entwässerung des Mörtels sukzessiv verengt. Die konsolidierten und entwässerten Bereiche zeichnen sich durch eine geringe Wasserdurchlässigkeit aus, welche über die Schichtdicke des Mörtels zunimmt.

3.5 Scherfestigkeitsentwicklung

Die erforderliche hohe Scherfestigkeit erreicht der zunächst – vor dem Verpressen – sehr fließfähige Mörtel durch seine druckbedingte Entwässerung und damit einhergehende Konsolidierung. Dabei werden zum einen Hohlräume durch Auspressen des überschüssigen, freien Wassers verringert, zum anderen wird durch die gleichzeitige Umlagerung der Feststoffpartikel eine dichte Packung erzielt (vgl. Abschnitt 3.3). Einwirkende Scherkräfte werden direkt über das kompaktierte Korngerüst – von Korn zu Korn – abgetragen.

In [37] wurde der Einfluss der Konsolidierung auf die Scherfestigkeitsentwicklung von Ringspaltmörteln eruiert. Dabei wurden die Scherfestigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Entwässerung ($t_M = 10$,

20 und 30 min) in unterschiedlichen Tiefen der Probe (h = 5, 10, 15 und 18 cm ab Mörteloberfläche) ermittelt. Die Mörtelprobe wurde mit einer Schichtdicke von 20 cm eingebaut. Der Entwässerungsversuch dauerte insgesamt 30 min und der Überdruck betrug 3 bar. Die Scherfestigkeiten wurden mit einer Flügelsonde bestimmt. Wie in Abbildung 3.14 zu erkennen, nahmen die Scherfestigkeiten mit zunehmender Entwässerungsdauer sowie mit zunehmender Tiefe kontinuierlich zu. Zum Zeitpunkt $t_M = 10$ min wurde in tiefer liegenden Schichten der entwässernden Mörtelprobe (h = 15 cm ab Mörteloberfläche) eine Scherfestigkeit von ca. 1,0 kN/m² gemessen, während nach einer 20-minütigen Druckbeaufschlagung bereits ein 600 % höherer Wert erreicht wurde. Diese beachtliche Festigkeitssteigerung resultierte allein aus der Konsolidierung des Mörtels. Bei fortschreitender Entwässerungszeit unter konstantem Druck konsolidierte der Mörtel stärker und die Scherfestigkeiten nahmen kontinuierlich zu. Aufgrund der zunehmenden Packungsdichte, bedingt durch die druckbedingte Umlagerung der Feststoffpartikel bis zum unmittelbaren Kontakt, konnten einwirkende Scherkräfte direkt von Korn zu Korn abgeleitet werden.



Abbildung 3.14: Scherfestigkeitsentwicklung eines Ringspaltmörtels zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Entwässerung in unterschiedlichen Tiefen der Probe [37]

Zum Erreichen einer hohen Scherfestigkeit sei auch die Möglichkeit erwähnt, gebrochene Gesteinskörnungen in einem optimal abgestimmten Mengenverhältnis zu verwenden. Durch die gegenseitige Verzahnung der bruchkantigen Körner nimmt der innere Reibungswiderstand zu, wodurch der Scherwiderstand des Mörtels erhöht werden kann. Bei Verwendung von gebrochenen Gesteinskörnungen bilden sich im Vergleich zu runden Gesteinskörnungen mehr Hohlräume aus. Um eine Packungsdichte und auch eine Verarbeitbarkeit, ähnlich der bei runden Gesteinskörnungen zu erreichen, muss demnach der Feinanteil entsprechend erhöht werden [50] [83]. Die notwendige Scherfestigkeit τ_M zur Vermeidung von Verformungen der Tunnelröhre durch Auftriebskräfte lässt sich für einen Tunnelvortrieb mit aktiver Ortsbruststützung wie folgt berechnen [2] [75]:

$$\mathbf{r}_{\mathrm{M}} = \frac{\pi}{4} \cdot \mathbf{s} \cdot \left(\rho_{\mathrm{g}} - \rho_{\mathrm{t}} \right) \cdot \mathbf{g} \left[\mathrm{kN} / \mathrm{m}^{2} \right] \qquad \qquad \text{Gleichung 3.6}$$

mit: τ_M : Scherfestigkeit [kN/m²]

s: Dicke des Ringspalts [m]

ρ_g: Dichte des Frischmörtels [kg/m³]

ρ_t: Mittlere Dichte des Tunnelquerschnitts je laufenden Meter [kg/m³]

g: Erdbeschleunigung [m/s²]

Unter der Annahme einer mittleren Dichte des Tunnelquerschnitts von 400 kg/m³ und einer Dichte des Ringspaltmörtels von 2.000 kg/m³ kann die erforderliche Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Dicke des Ringspalts berechnet werden [37], wie in Abbildung 3.15 dargestellt.



Abbildung 3.15: Erforderliche Scherfestigkeit τ_M des Ringspaltmörtels in Abhängigkeit von der Ringspaltdicke s

Bei anstehenden Böden mit geringer Durchlässigkeit ist eine hinreichende Verfestigung des Mörtels durch Auspressen von Wasser nicht möglich, sodass die Erhärtung fast ausnahmslos durch die Hydratation des Zements im Ringspaltmörtel erfolgt. Abbildung 3.16 zeigt die zeitliche Entwicklung der undrainierten Scherfestigkeit c_u von zwei bedingt aktiven Mörtelmischungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, unter anderem im Zementgehalt Z = 60 kg/m³ bzw. 120 kg/m³ (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Bei beiden Mischungen wurden erst nach ca. 8 Stunden nach Mörtelherstellung nennenswerte Scherfestigkeiten ermittelt. Dabei nahmen die Scherfestigkeiten des bedingt aktiven Mörtels mit höherem Zementgehalt von 120 kg/m³ mit zunehmendem Alter progressiv zu, während der Mörtel mit einem Zementgehalt von 60 kg/m³ eine deutlich mäßigere Festigkeitsentwicklung aufwies.

Daraus kann abgeleitet werden, dass die unmittelbar nach dem Verpressen notwendige rasche Scherfestigkeitsentwicklung primär durch die Entwässerung und Konsolidierung des Mörtels herbeigeführt werden muss. Bei Einsatz von reaktiven Feinstoffen, wie Zement sowie in geringem Maße auch Flugasche und Hüttensandmehl, können die Scherfestigkeiten mit zunehmendem Alter, bedingt durch die fortschreitende Hydratation dieser Feinstoffe, kontinuierlich anwachsen, wie auch bei nicht entwässerten, zementhaltigen Mörteln (Abbildung 3.16).



Abbildung 3.16: Zeitliche Entwicklung der undrainierten Scherfestigkeit cu von bedingt aktiven Ringspaltmörteln mit unterschiedlichem Zementgehalt (Z = 60 kg/m³ bzw. 120 kg/m³) [2]

4 CHARAKTERISIERUNG DER UNTERSUCHTEN **R**INGSPALTMÖRTEL

4.1 Ausgangsstoffe

In die eigenen Untersuchungen wurden ein handelsüblicher Portlandzement der Festigkeitsklasse 42,5 R und eine Steinkohleflugasche aus Schmelzkammerfeuerung einbezogen. Weitere Feinstoffe respektive Zusatzstoffe waren ein Kalksteinfeinmehl, ein Quarzmehl und ein Hüttensandmehl. Als Gesteinskörnung wurden ein gewaschener Quarzsand der Korngruppen 0,063-1 und 0,063-2 mm sowie ein Quarzkies der Korngruppe 2-8 mm eingesetzt. Darüber hinaus wurden ein Brechsand 0-2 mm und ein Basaltsplitt 2-8 mm einbezogen. Für die Bentonitsuspension wurde ein Natriumbentonit "HT-X" verwendet. Die Bentonitsuspension wurde für alle untersuchten Mörtel mit einer Feststoffkonzentration von 6 % hergestellt. Das Zugabewasser wurde aus dem Leitungsnetz der Stadt Bochum entnommen. Die materialspezifischen Kenndaten der verwendeten Feinstoffe sind im Anhang A, Tabelle A.1 zusammengestellt.

4.1.1 Feinheit der Feinstoffe

Im Hinblick auf die überwiegend physikalisch gesteuerten Eigenschaften des Ringspaltmörtels wurde an den verwendeten Feinstoffen neben der Dichte ρ mittels Pyknometer-Verfahren die spezifische Oberfläche O_m mittels Luftdurchlässigkeitsverfahren nach BLAINE [93] ermittelt. Die baupraktischen Eigenschaften des Ringspaltmörtels hängen allerdings in hohem Maße von der Granulometrie – Partikelform und Partikelgrößenverteilung – der verwendeten Feinstoffe ab. Die Partikelform sowie die Oberflächenstruktur wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM Leo 1530 VP, Fa. Jeol) und die Partikelgrößenverteilung mittels Lasergranulometrie (CILAS 1090 L, Fa. Quantachrome GmbH) beschrieben. Die Partikelgrößenverteilungen der untersuchten Feinstoffe sind in Abbildung 4.1 dargestellt.



Abbildung 4.1: Volumetrische Partikelgrößenverteilung der untersuchten Feinstoffe (Z, FA, QM, KSM, HSM)

Im Größenbereich kleiner 10,0 μ m sind die Partikelgrößenverteilungen von Zement (Z), Hüttensandmehl (HSM) sowie Quarzmehl (QM) nahezu identisch. Dabei liegt bei diesen Feinstoffen der mittlere Korndurchmesser d₅₀ der Verteilung bei 50 %-Durchgang in einem Größenbereich zwischen 7,5 μ m (QM) und 10,5 μ m (Z). Die Flugasche (FA) stellt mit d₅₀ von 12,3 μ m den gröbsten Feinstoff dar. Dagegen ist beim Kalksteinfeinmehl (KSM) mit d₅₀ von 4,6 μ m ein vergleichsweise hoher Anteil an feinen Partikeln zu verzeichnen.

Die Partikelgrößenverteilung, als Massensummenverteilung dargestellt, lässt sich mit mathematischer Approximation durch die RRSB-Verteilungsfunktion nach DIN 66145 [80] beschreiben. Mit Hilfe der Verteilungs-Ausgleichsgeraden im RRSB-Netz können die Feinheitsparameter der Feinstoffe – der Lageparameter x⁴ und das Steigungsmaß n – abgeleitet werden. Dabei entspricht der Lageparameter x⁴ der Partikelgröße bei einer Massenverteilungssumme $Q_3(x)$ von 63,2 %, und das Steigungsmaß n gibt die Verteilung respektive Streuung der Partikel an. Ein kleiner Lageparameter x⁴ bedeutet i.d.R. eine hohe Feinheit des Feststoffes, da die Partikel aufgrund der größeren Oberfläche mehr Wasser binden können. Im Vergleich zu gröberen Feststoffen enthalten feinere Stoffe allerdings mehr Hohlräume und weisen damit einhergehend eine geringe Packungsdichte auf. Mit einer engen Korngrößenverteilung, d.h. mit einem großen Steigungsmaß n der Partikelgrößenverteilung, können Hohlräume gefüllt werden, da mehr feine Partikel zur Verfügung stehen. Die Feinheitsparameter der untersuchten Feinstoffe sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Das Kalksteinfeinmehl (KSM) wies mit einem vergleichsweise kleinen Lageparameter x' von 7,1 μ m eine sehr hohe Feinheit auf. Mit dem Steigungsmaß n von 1,28 war der Verlauf der Partikelgrößenverteilung für KSM deutlich steiler als für die anderen Feinstoffe mit n zwischen 1,08 (Z) und 1,15 (HSM). Eine ebenfalls hohe Feinheit konnte beim Quarzmehl (QM) mit x' von 8,5 μ m und n von 1,22 verzeichnet werden. Die Feinstoffe Zement (Z), Flugasche (FA) und Hüttensandmehl (HSM) waren hingegen mit nahezu doppelt so großen Lageparametern x' zwischen 13,0 μ m (HSM) und 21,0 μ m (FA) gröber als KSM und QM. Der Unterschied in den Korngrößenverteilungen von Zement und Flugasche fiel mit n von 1,08 (Z) bzw. 1,1 (FA) gering aus. Zur Erhöhung der Packungsdichte stellte im Vergleich zu den anderen Feinstoffen allein das Kalksteinfeinmehl eine wirksame Füllerkomponente dar, da dieses eine deutlich zu kleineren Partikeln verschobene Korngrößenverteilung aufwies.

Mit den Feinheitsparametern kann die massenbezogene Oberfläche S_m unter Berücksichtigung der Granulometrie des Feinstoffes und somit zuverlässiger berechnet werden. Nach DIN 66145 [80] errechnet sich die massenbezogene Oberfläche S_m aus der volumenbezogenen Oberfläche S_v und der Dichte ρ des Feinstoffes:

$$S_{\rm m} = \frac{S_{\rm v}}{\rho} \left[\frac{{\rm cm}^2}{{\rm g}} \right]$$
 Gleichung 4.1

mit: S_m : rechnerisch ermittelte spezifische Oberfläche [cm²/g]

- S_v: volumenbezogene Oberfläche [cm²/cm³]
- ρ: Reindichte des Feinstoffes [g/cm³]

Die volumenbezogene Oberfläche S_v des Feinstoffes wurde unter der vereinfachten Annahme der idealen Kugelform mit nachfolgender Gleichung der DIN 66145 [80] berechnet [54]:

$$S_{v} = 6 * \phi * \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta Q_{i}}{x_{i}} \left[\frac{cm^{2}}{cm^{3}} \right]$$
 Gleichung 4.2

- mit: S_v: volumenbezogene Oberfläche [cm²/cm³]
 - φ : Formfaktor (für Kugel $\varphi = 1$)
 - Qi: Volumenanteil der Kornklasse i [-]
 - x_i: mittlerer arithmetischer Durchmesser der Kornklasse i [cm]

	Z	FA	KSM	QM	HSM
Reindichte ρ [g/cm ³]	3,0	2,3	2,7	2,5	2,9
Feinheit nach BLAINE Om	3.720	3.640	5.050	3.810	3.280
[cm ² /g]					
Lageparameter x' [µm]	16,0	21,0	7,1	8,5	13,0
Steigungsmaß n [-]	1,08	1,1	1,28	1,22	1,15
Spez. Oberfläche S _m	6.560	5.580	9.560	7.690	6.210
[cm ² /g]					
Kornform	kantig	kugelig	kantig	kantig	scharfkantig
Kornoberfläche	rau	glatt, porös	rau	rau	glatt
Kornformfaktor φ [-]	1,76	1,53	1,89	2,02	1,89

Tabelle 4.1: Wesentliche Eigenschaften der untersuchten Feinstoffe

Die ermittelten RRSB-Parameter spiegelten sich in den rechnerisch ermittelten spezifischen Oberflächen S_m wider. Dabei nahm die Oberfläche des Feinstoffes mit abnehmendem Wert für x⁴ und wachsendem Steigungsmaß n signifikant zu. Folglich konnte beim Kalksteinfeinmehl mit einer sehr hohen Feinheit (x⁴ = 7,1 µm und n = 1,28) eine große spezifische Oberfläche S_m von 9.560 cm²/g abgeleitet werden. Für die grobe Flugasche wurde eine um ca. 42 % geringere spezifische Oberfläche (S_m = 5.580 cm²/g) berechnet. Die gleiche Tendenz konnte bei den nach BLAINE gemessenen Oberflächen O_m beobachtet werden.

Dabei ergab die Regressionsrechnung einen linearen Zusammenhang zwischen der rechnerisch ermittelten spezifischen Oberfläche S_m und der nach BLAINE gemessenen Oberfläche O_m , wie in Abbildung 4.2 dargestellt. Die in x-Richtung extrem liegenden Datenpunkte, d.h. mit deutlicher Entfernung vom Zentrum der Punktwolke, konnten als Hebelpunkte ("leverage points") identifiziert werden. In der Regel richtet sich die Regressionsgrade nach dem Hebelpunkt aus. Die hier identifizierten Hebelpunkte der Versuchsreihe Z:FA:KSM konnten jedoch als Ausreißer ausgeschlossen werden, da diese sich mit den anderen Datenpunkten mehr oder weniger an einer Geraden orientieren. Vielmehr gaben die Hebelpunkte dem linearen Modell eine zusätzliche Stabilität und hatten somit keinen signifikanten Einfluss auf den Regressions- bzw. Korrelationskoeffizienten. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,995.



Abbildung 4.2: Zusammenhang zwischen der mit den RRSB-Parametern berechneten Oberfläche S_m und der nach BLAINE gemessenen Oberfläche O_m an verschiedenen Bindemittelkombinationen

Übertragen auf die einschlägigen Bindemittelkombinationen auf Basis von Zement und Flugasche (Z:FA) beeinflusste eine Substitution von Flugasche durch Kalksteinfeinmehl bei konstantem Zementgehalt die Feinheit des Bindemittelgemisches (Z:FA:KSM) signifikant. Mit steigender Substitutionsmenge an Kalksteinfeinmehl nahm die Bindemittelfeinheit $S_{m,B}$ nahezu linear zu, wie in Abbildung 4.2 für die Versuchsreihe Z:FA:KSM ersichtlich. Während für die Bindemittelkombination Z15:FA75:KSM10 eine spezifische Oberfläche $S_{m,B}$ von 5.990 cm²/g berechnet wurde, wies die Kombination mit der höchsten Substitutionsmenge an Kalksteinfeinmehl (Z15:FA10:KSM80) eine um rd. 47 % höhere Feinheit auf ($S_{m,B} = 8.820 \text{ cm}^2/\text{g}$). Die spezifischen Oberflächen $S_{m,B}$ der Bindemittelkombinationen mit partieller Substitution der Flugasche durch Quarzmehl (QM) bzw. Hüttensandmehl (HSM) lagen im nahezu gleichen Größenbereich zwischen 5.790 cm²/g (Z15:FA80:QM5 und Z15:FA75:HSM10) und 6.140 cm²/g (Z15:FA65:QM20).

Neben der Granulometrie spielt auch die Oberflächenstruktur der Partikel eine wesentliche Rolle hinsichtlich einer "wirksamen" Oberfläche (Wasseranspruch) dieser Feinstoffe. Die Partikelform und die Oberflächenstruktur der Feinstoffe wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop qualitativ beschrieben. Dabei erfolgte die Auswahl der untersuchten Partikel durch eine zufallsgesteuerte Positionierung der REM-Aufnahmen.

Während die Flugasche zum größten Teil aus kugeligen Partikeln besteht und deren Oberfläche relativ glatt mit wenigen Poren durchsetzt ist, sind die Partikel der anderen Feinstoffe (Z, KSM, QM und HSM) bruchkantig und weisen eine strukturierte Oberfläche auf (Anhang B, Abbildung B.1 bis Abbildung B.6). Die Bruchkanten der Hüttensandmehl- sowie Quarzmehlpartikel sind hingegen schärfer ausgebildet und die Oberfläche dieser Partikel ist flächenmäßig glatter (Abbildung B.4 und Abbildung B.5). Die Oberfläche der Kalksteinfeinmehlpartikel ist strukturierter und stufenartiger gestaltet (Abbildung B.3). Als Folge ist die mit Wasser zu benetzende Gesamtoberfläche beim Kalksteinfeinmehl gegenüber den anderen Feinstoffen verhältnismäßig größer. Die charakteristischen Merkmale der untersuchten Feinstoffe sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Neben der visuellen Beurteilung der Partikelform und der Oberflächenstruktur der untersuchten Feinstoffe mittels Rasterelektronenmikroskopie kann die Partikelform mit einem sogenannten Kornformfaktor φ beschrieben werden. Nach DIN 66145 [80] gibt der Kornformfaktor φ das Verhältnis der tatsächlichen Oberfläche eines irregulär geformten Partikels zur Oberfläche eines kugelförmigen Partikels ($\varphi = 1$) wieder. Der Kornformfaktor φ nimmt mit zunehmender Abweichung des Partikels von der Kugelform zu. Unter der Voraussetzung, dass die Reindichte ρ jedes einzelnen Partikels eines Gemischs über den gesamten Korngrößenbereich gleich ist, kann der Formfaktor φ aus dem Verhältnis zwischen der rechnerisch ermittelten Oberfläche S_m und der nach Blaine gemessenen Oberfläche O_m wiedergegeben werden [54]:

$$\varphi = \frac{s_{\rm m}}{o_{\rm m}} \ [-] \qquad \qquad \text{Gleichung 4.3}$$

mit: φ: Kornformfaktor [-]

 S_m : rechnerisch ermittelte spezifische Oberfläche [cm²/g]

O_m: spezifische Oberfläche nach BLAINE [cm²/g]

Die Partikelform der Flugasche entsprach mit einem ermittelten Formfaktor von 1,53 annähernd einer idealen Kugelform ($\varphi = 1$). Wie zu erwarten, wurden bei den anderen Feinstoffen aufgrund ihrer bruchkantigen Form und zum Teil strukturierten Oberfläche höhere Formfaktoren zwischen 1,76 (Z) und 2,02 (QM) abgeleitet. Die ermittelten Formfaktoren sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

4.1.2 Wasseranspruch der Feinstoffe

Der Wasseranspruch WA, der in der Regel empirisch ermittelt wird, kann mit den Feinheitsparametern (rechnerisch ermittelte spezifische Oberfläche S_m) annäherungsweise charakterisiert werden. Dabei wird der Wasseranspruch eines Feststoffes zum Erreichen einer definierten Fließfähigkeit im Allgemeinen wie folgt abgeschätzt [52]:

$$WA = \frac{v_W}{v_F} * 100 [Vol. -\%]$$

Gleichung 4.4

mit: WA: Wasseranspruch des Feststoffes [Vol.-%]

- V_W: Volumen des Wassers [cm³]
- V_F: Volumen des Feststoffes [cm³]

Neben der Feinheit hängt der Wasseranspruch auch maßgeblich vom Porenvolumen des Feststoffgemisches ab [54]. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf den Hohlraum bzw. auf die Packungsdichte ziehen. Für möglichst hohlraumarme Korngrößenverteilungen bzw. Kornhaufwerke mit größtmöglicher Packungsdichte werden die idealen Kornverteilungen nach FULLER angegeben.

Um den Wasseranspruch WA feinkörniger Haufwerke zu bestimmen, wurden zwei etablierte Prüfverfahren angewendet:

• Wasseranspruch WA_{NS} zum Erreichen der Normsteife nach EN 196-3 [81]

Bei diesem Verfahren, welches in erster Linie zur Prüfung von Normalzementen entwickelt wurde, wird der erforderliche Wassergehalt einer bestimmten Feststoffmenge anhand der Eindringtiefe mittels eines Tauchstabes ermittelt.

$$WA_{NS} = \frac{M_W}{M_F} * 100 [M. -\%]$$
 Gleichung 4.5

mit: WA_{NS}: Wasseranspruch bei Normsteife [M.-%]

M_w: Masse des Wassers [g]

M_F: Masse des Feststoffes [g]

• Wasseranspruch nach PUNTKE WA_{PU} [82]

Nach PUNTKE wird die Mindestwassermenge eines Feststoffes ermittelt, bei der der Übergang vom Kornhaufwerk in einer Suspension erreicht wird, und drückt das mit Wasser gefüllte Porenvolumen aus [54].

$$WA_{PU} = \frac{V_W}{V_F + V_W} * 100 [Vol. -\%]$$
Gleichung 4.6

mit: WA_{PU}: Wasseranspruch nach PUNTKE [Vol.-%]

V_W: Volumen des Wassers bis zur Sättigung des Feststoffes [cm³]

V_F: Volumen des Feststoffes [cm³]

Der Wasseranspruch bei Normsteife WA_{NS} und nach PUNTKE WA_{PU} der untersuchten Feinstoffe kann nachfolgender Tabelle 4.2 entnommen werden.

	Z	FA	KSM	QM	HSM
Wasseranspruch bei	26,5	19,5	25,0	32,5	29,0
Normsteife WA _{NS} [M%]					
Wasseranspruch nach	43,0	29,0	34,0	41,5	42,5
PUNTKE WAPU [Vol%]					

 Tabelle 4.2: Wasseranspruch der untersuchten Feinstoffe

An ausgewählten Bindemittelkombinationen auf Basis von Zement und Flugasche (Z:FA) wurde der Wasseranspruch nach beiden Prüfverfahren bestimmt (Abbildung 4.3). Die Regressionsrechnung ergab zwar einen linearen Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,966, allerdings waren die empirisch ermittelten Kennwerte für den Wasseranspruch nicht direkt miteinander zu vergleichen. Das Verfahren nach PUNTKE beruht auf der Bestimmung des Hohlraumgehaltes in Vol.-% des Feststoffgemisches bei definierter Verdichtung und hängt somit von der Kornform und der Korngrößenverteilung des untersuchten Feststoffes ab [52]. Der Wasseranspruch bei Normsteife gibt hingegen den erforderlichen Wasserzusatz in M.-%, bezogen auf eine bestimmte Feststoffmenge, zum Erreichen einer Zielkonsistenz wieder und wird somit von der Feinheit respektive von der spezifischen Oberfläche S_m des Feststoffes beeinflusst.

Aus den Versuchsergebnissen zum Wasseranspruch nach PUNTKE konnte der Zusammenhang zwischen der Kornform und der Packungsdichte eindeutig nachgewiesen werden (Abbildung 4.3). Bei gleicher Verdichtung und nahezu vergleichbarer Korngrößenverteilung der verwendeten Feinstoffe wies das hüttensandmehlhaltige Bindemittelgemisch Z15:FA40:HSM45 mit scharfkantiger Partikelform eine geringere Packungsdichte auf als das Bindemittel mit der kugeligen Flugasche Z50:FA50. Der Wasseranspruch nach PUNTKE W_{PU} des hüttensandmehlhaltigen Bindemittels betrug rd. 37,0 Vol.-% und des Zement/Flugasche-Gemisches rd. 35,0 Vol.-%.

Aufgrund der schnellen und groben Abschätzung des Wasseranspruchs nach PUNTKE wurde dieses Prüfverfahren zur Charakterisierung verschiedener Bindemittelkombinationen gewählt.



Abbildung 4.3: Zusammenhang zwischen dem Wasseranspruch bei Normsteife WA_{NS} und dem Wasseranspruch nach PUNTKE WA_{PU} an ausgewählten Bindemittelkombinationen

In Abbildung 4.4 ist der Wasseranspruch nach PUNTKE WAPU an verschiedenen Bindemittelkombinationen in Abhängigkeit von ihrer spezifischen Oberfläche Sm,B dargestellt. Auch hier konnte der Einfluss der Kornform der jeweiligen Feinstoffe auf den Wasseranspruch WA_{PU} festgestellt werden (vgl. Abbildung 4.3). Den höchsten Wasseranspruch wiesen die Bindemittelkombinationen auf, bei denen die Flugasche durch Kalksteinfeinmehl (KSM) bzw. Hüttensandmehl (HSM) bei gleichem Zementgehalt substituiert wurde. Dabei lag der Wasseranspruch WA_{PU} des hüttensandmehlhaltigen Bindemittelgemischs mit der höchsten Substitutionsmenge (Z15:FA40:HSM45) bei rd. 37,0 Vol.-%, während das kalksteinfeinmehlhaltige Bindemittelgemisch (Z15:FA5:KSM80) einen vergleichsweise geringen Wasseranspruch von rd. 35,0 Vol.-% aufwies. Der höhere Wasseranspruch des hüttensandmehlhaltigen Bindemittels war offensichtlich bedingt durch die große und scharfe Kantigkeit der Hüttensandmehlpartikel, die mit zunehmender Substitutionsmenge mehr Hohlräume im Bindemittelgemisch bewirkten. Der nahezu gleiche Wasseranspruch des kalksteinfeinmehlhaltigem Bindemittels konnte damit begründet werden, dass durch die im Vergleich zum groben Hüttensandmehl ($x' = 13.0 \,\mu m$) höhere Feinheit des Kalksteinfeinmehls $(x' = 7,1 \,\mu\text{m})$ mit einer hohen Substitutionsmenge von ca. 80 M.-% ebenfalls mehr Hohlräume im Bindemittelgemisch gebildet wurden. Entsprechend konnten diese Hohlräume mit vergleichsweise hoher Wassermenge gefüllt werden.

Bei einer 50 %-igen Substitution von Flugasche durch Zement wurde ein Wasseranspruch von rd. 36,0 Vol.-% ermittelt, was auf die Bruchkantigkeit der Zementpartikel zurückgeführt werden konnte.

Der Wasseranspruch der quarzmehlhaltigen Bindemittel lag bei einer Substitutionsmenge von ca. 20 M.-% auf gleichem Niveau (WA_{PU} = \sim 33 Vol.-%) wie bei einem kalksteinfeinmehlhaltigen Bindemittelmisch mit einer 100 % höheren Substitutionsmenge (Z15:FA45:KSM40). Analog zum Hüttensandmehl stellten sich scheinbar auch bei Verwendung von Quarzmehl mit einer vergleichbaren Partikelform und Oberfläche mehr Hohlräume im Bindemittelgemisch ein (vgl. 4.1.1).

Seite 57

Bindemittel mit ausschließlich Flugasche (FA100) wiesen den geringsten Wasseranspruch von rd. 29 Vol.-% auf, was aus dem kleineren Oberfläche/Volumen-Verhältnis der kugeligen Flugaschepartikel gegenüber gebrochenen Feinstoffen bei gleicher Partikelgröße resultierte.



Abbildung 4.4: Zusammenhang zwischen der berechneten Oberfläche S_m und dem Wasseranspruch nach PUNTKE W_{PU} von verschiedenen Bindemittelkombinationen

4.1.3 Geometrische Eigenschaften der Gesteinskörnung

Für die Basisrezepturen wurden Quarzsand der Korngruppen 0,063-1 mm und 0,063-2 mm, jeweils mit einer Dichte von 2,56 g/cm³, sowie ein Quarzkies der Korngruppe 2-8 mm mit einer Dichte von 2,61 g/cm³ verwendet. Die Sieblinien der Basisrezepturen entsprachen in etwa der Regelsieblinie B8 nach DIN 1045-2 [53]. Durch Substitution einzelner Korngruppen wurden die Basisrezepturen mit einem Brechsand der Korngruppe 0-2 mm mit einer Dichte von 2,97 g/cm³ bzw. einem Basaltsplitt der Korngruppe 2-8 mm mit einer Dichte von 3,06 g/cm³ sowie mit einer Kombination beider Gesteinskörnungen modifiziert. Die Sieblinien der untersuchten Korngemische sind im Anhang C, Abbildung C.1 bis Abbildung C.4 dargestellt.

Die Kornform der groben Gesteinskörnung wurde mit der Kornformkennzahl nach EN 933-4 [86] charakterisiert. Für die Kornbruchflächigkeit als Maß für die Kornoberfläche wurde der Anteil an gebrochenen Körnern nach EN 933-5 [87] ermittelt.

Beim verwendeten Kies wurde für die Korngruppe 4-8 mm eine Kornformkennzahl von 7 berechnet, was einer Einstufung in die niedrigste Kategorie SI₁₅ nach EN 12620 [90] entspricht. Der Anteil an gebrochenen Körnern nach EN 933-5 [87] betrug lediglich 2 %, vollständig gebrochene Körner wurden nicht identifiziert. Demzufolge lag der größte Anteil mit 98 % bei den (vollständig) gerundeten Körnern. Mit einem deutlich größeren Anteil an nicht-kubischen Körnern mit einem l/d-Verhältnis > 3 wurde beim untersuchten Basaltsplitt für die gleiche Kornklasse ein Kennwert von 25 (höchste Kategorie SI₄₀ [90]) ermittelt.

Im Hinblick auf den Wasseranspruch und die Verarbeitbarkeit der Ringspaltmörtel wurden die geometrischen Eigenschaften – die Kornform [85] und der Anteil an gebrochenen Körnern [86] – der groben Gesteinskörnung ≥ 4 mm [85] bestimmt. Für feine Gesteinskörnungen < 4 mm werden in der Regel keine Anforderungen an die Kornform gestellt [89].

Zur Beurteilung der Oberflächeneigenschaften von feinen sowie groben Gesteinskörnungen wird derzeit in der Asphalttechnologie der sogenannte Fließkoeffizient nach EN 933-6 [87] ermittelt. Dabei wird die Zeit E_c in Sekunden bestimmt, welche eine – abhängig von der Rohdichte – definierte Probemenge benötigt, um durch die Öffnung eines definierten Fülltrichters bei feiner Gesteinskörnung bzw. durch die Öffnung über einen definierten Fließkanal bei grober Gesteinskörnung zu fließen:

$$\mathbf{E}_{\mathbf{c}} = \mathbf{E}_{\mathbf{cm}} + (\mathbf{E}_{\mathbf{R}} - \mathbf{E}_{\mathbf{ce}}) [\mathbf{sec}]$$
Gleichung 4.7

mit: E_c: Fließkoeffizient von feiner bzw. grober Gesteinskörnung [sec]

E_{cm}: Fließzeit für das Referenzmaterial [sec] (für grob: als 100 sec angenommen),

(für fein: als 32 sec angenommen)

Ece: Fließzeit für die Referenzprobe [sec]

Im Wesentlichen sollen mit dem Fließkoeffizienten Gesteinskörnungen, unabhängig von ihrer Provenienz und Fazies, differenziert werden [84].

Abweichend von EN 933-6 [88] wurden die Fließkoeffizienten an den für die Basisrezepturen festgelegten Korngruppen (0,063-1 mm, 0-063-2 mm und 2-8 mm) ermittelt. Um auch den Kornbereich 2-4 mm abzudecken, wurden zum qualitativen Vergleich die Fließkoeffizienten auch an einer zusammengesetzten Korngruppe 0,063-4 mm bestimmt. In Abbildung 4.5 sind die Fließkoeffizienten der groben und feinen Gesteinskörnungen zusammenfassend dargestellt.



Abbildung 4.5: Fließkoeffizienten Ec der für Ringspaltmörtel gewählten Korngruppen

Die Fließkoeffizienten E_c der feinen Gesteinskörnung (0,063-1 mm, 0,063-2 mm und 0,063-4 mm) lagen in einem Größenbereich zwischen 28 und 50 sec. Dabei wies der Brechsand im Mittel einen um ca. 61 % größeren Fließkoeffizienten auf, im Vergleich zum Quarzsand ($E_c = 31$ sec) bei gleicher Prüfkörnung 0,063-2 mm. Für den Quarzsand lagen die Werte der drei Prüfkörnungen auf einem nahezu gleichen Niveau ($E_c = 28$ bis 31 sec).

Ein vergleichbares Fließverhalten konnte für die grobe Gesteinskörnung der Korngruppe 2-8 mm beobachtet werden. Für den Quarzkies lag der mittlere Fließkoeffizient bei 104 sec, während der Basaltsplitt deutlich höhere Werte zwischen 194 und 199 sec erreichte. Die höheren Fließkoeffizienten sowohl für den Brechsand 0,063-2 mm als auch für den Basaltsplitt 2-8 mm waren auf die bruchkantige Kornform zurückzuführen, welche aufgrund von Verzahnungen ein Fließen dieser Körner erschwerte. Zusätzlich wurde dieser Effekt durch die raue Kornoberfläche der gebrochenen Gesteinskörnungen und somit durch den im Vergleich zu einer glatten Kornoberfläche hohen Reibungswiderstand intensiviert.

Im Hinblick auf die erforderlichen Eigenschaften des Ringspaltmörtels kann daher angenommen werden, dass hohe Fließkoeffizienten die Fließfähigkeit des Mörtels vermindern, sich jedoch günstig auf die Scherfestigkeitsentwicklung des Mörtels auswirken können.

4.1.4 Wasseranspruch der Gesteinskörnung

Als Wasseranspruch der Gesteinskörnung wird das an den Kornoberflächen vorwiegend adhäsiv gebundene Wasser bezeichnet. Der Wasseranspruch hängt maßgeblich von der Kornverteilung, der Kornform und der Oberflächenrauheit der Gesteinskörnung ab. Zur quantitativen Beurteilung des Wasseranspruchs von Gesteinskörnungsgemischen bei maximalem Verdichtungsgrad wurde ein einfacher Versuchsaufbau konzipiert (Abbildung 4.6).



Abbildung 4.6: Versuchsaufbau zur Beurteilung des Wasseranspruchs eines verdichteten Kornhaufwerks

Hierfür wurde das zu untersuchende Korngemisch bei (105 ± 5) °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Nach Abkühlen auf Raumtemperatur im Labor bei etwa 22 °C wurde das Korngemisch mit einer Höhe von ca. 30 cm in einen Prüfzylinder (H = 50 cm, $Ø_i = 14$ cm) eingebaut. Der Einbau erfolgte in mehreren Schichten mit einer jeweiligen Dicke von ca. 8 cm, welche mit einem Proctorhammer nach DIN 18127 [91] verdichtet wurden, um den maximalen Verdichtungsgrad des Korngemisches zu erreichen. Das verdichtete Kornhaufwerk wurde von unten mit Wasser geflutet und überschüssiges, anstehendes Wasser auf der Oberfläche des Korngemisches wurde mit einem Überlauf abgelassen. Das Ventil für den Wasserzufluss wurde geöffnet, damit nun das freie Wasser aus bestehenden Hohlräumen des verdichteten Kornhaufwerks abfließen konnte. Das freie Wasser wurde in einer Wägeschale aufgefangen. Währenddessen waren der Prüfzylinder sowie die Wägeschale in Folie eingewickelt, um auch die bei Raumtemperatur verdunstende Wassermenge einzuschließen. Der Versuch war beendet, wenn keine weitere Zunahme der Wasserabgabe zu verzeichnen war. Die Versuchsdauer hing im Wesentlichen von der Sieblinie des Kornhaufwerks ab. Es konnte beobachtetet werden: Je feiner die Sieblinie, desto langsamer die Wasserabgabe.

Der Wasseranspruch WA_{GK} errechnete sich aus dem Quotienten von Masse – aus der Differenz der Masse des gesättigten Kornhaufwerks und der abgeflossenen freien Wassermenge – und dem Volumen des verdichteten Korngemisches:

$$WA_{GK} = \frac{\left(\frac{m_f - m_{tr}}{\rho_W}\right)}{V_{GK}} * 100 [Vol. -\%]$$
Gleichung 4.8

mit: WA_{GK}: Wasseranspruch des Korngemisches respektive der Sieblinie [Vol.-%]

- m_f: Masse des feuchten Korngemisches [g]
- mtr: Masse des trockenen Korngemisches [g]
- ρ_w: Dichte von Wasser [g/cm³]
- V_{GK}: Volumen des verdichteten Korngemisches [cm³]

Für eine einheitliche Betrachtung der in dieser Arbeit verwendeten Kornzusammensetzungen wurde die Körnungsziffer k [115] an diesen Gemischen bestimmt. Da die Körnungsziffer k einen maßgebenden Kennwert für den Wasseranspruch von überwiegend runden Gesteinskörnern darstellt, wurde auch der Einfluss der Kornform und der Oberflächenrauheit der Gesteinskörnungen auf den Wasseranspruch WA_{GK} untersucht. Korngemische mit vergleichbarer Sieblinie und somit mit nahezu gleicher Körnungsziffer k können aufgrund unterschiedlicher Kornform und Oberflächenrauheit Unterschiede im Wasseranspruch WA_{GK} aufweisen. Grundsätzlich konnte jedoch festgestellt werden, dass mit zunehmender Körnungsziffer k des Korngemisches dessen Wasseranspruch WA_{GK} abnahm (Abbildung 4.7). Mit einem negativen Korrelationskoeffizienten von -0,779 ergab die Regressionsrechnung einen gegenläufigen Zusammenhang zwischen Körnungsziffer k und Wasseranspruch WA_{GK}.



Abbildung 4.7: Wasseranspruch WA_{GK} von verdichteten Kornhaufwerken in Abhängigkeit von der Körnungsziffer k

Mit zunehmender Körnungsziffer respektive gröberer Sieblinie nahm der Wasseranspruch des verdichteten Kornhaufwerks aus Brechsand und Basaltsplitt (k = 3,17 und $WA_{GK} = 14,6$ Vol.-%) um rd. 60 % im Vergleich zu einer feinkörnigen Sieblinie (C8 mit k = 2,27) mit einem Wasseranspruch WA_{GK} von 24,1 Vol.-% ab.

Eine Erhöhung des Feinanteils der Gesamtgesteinskörnung von 8 % auf 16 % bzw. 22 % zeigte keine nennenswerten Unterschiede im Wasseranspruch dieser Korngemische mit nahezu gleicher Körnungsziffer (k = rd. 2,7).

Im Hinblick auf die Gesteinskörnung führte eine vollständige Substitution des Sand/Kies-Gemisches durch Brechsand 0-2 mm und Basaltsplitt 2-8 mm (k = 3,17) zu einem höheren Wasseranspruch ($WA_{GK} = 16,3$ Vol.-%) als eine partielle Substitution mit vergleichbarer Körnungsziffer. Dies konnte im Wesentlichen auf die fast ausnahmslos bruchkantige Kornform dieser Gesteinskörnungen zurückgeführt werden. Im Vergleich zum Sand/Kies-Gemisch mit größtenteils runden Körnern war die mit Wasser zu benetzende Oberfläche der gebrochenen Körner deutlich größer (vgl. Abschnitt 4.1.3).

Darüber hinaus konnten aus der Menge des freien Wassers Rückschlüsse auf den Hohlraum des Korngemisches gezogen werden (Abbildung 4.8). Das Hohlraumvolumen H_{GK} errechnete sich aus dem Quotienten von Masse – aus der Differenz der Masse des gesättigten Korngemisches und der Masse des feuchten Korngemisches – und Volumen des verdichteten Korngemisches:

$$H_{GK} = \frac{\left(\frac{m_{W} - m_{f}}{\rho_{W}}\right)}{V_{GK}} * 100 [Vol. -\%]$$
 Gleichung 4.9

mit: H_{GK:} Hohlraumvolumen des Korngemisches respektive der Sieblinie [Vol.-%]

m_w: Masse des gesättigten Korngemisches [g]

m_f: Masse des feuchten Korngemisches [g]

 ρ_W : Dichte von Wasser [g/cm³]

V_{GK}: Volumen des verdichteten Korngemisches [cm³]


Abbildung 4.8: Volumen des Hohlraums H_{GK} und des Wasseranspruchs WA_{GK} der Korngemische im verdichteten Zustand

Die Untersuchungen zeigten, dass mit zunehmendem Feinanteil (0,063-0,25 mm) oder Sandgehalt (0,063-4 mm), d.h. mit geringer Körnungsziffer (k =2,27 bzw. 2,76), das Hohlraumvolumen H_{GK} des verdichteten Kornhaufwerks abnahm. Mit einem gewissen Anteil an feinen Körnern konnten offenbar Zwischenräume der groben Gesteinskörnung im Korngerüst gefüllt werden, wodurch mit der Reduzierung des Gesamthohlraumgehaltes eine Erhöhung der Packungsdichte einherging. Gleichzeitig führte eine Erhöhung der Packungsdichte durch Zusatz von Feinsand von 8 auf 22 % (k = 2,67) zu einer Vergrößerung der mit Wasser zu benetzenden Oberfläche (WA_{GK} = 20,5 Vol.-%).

Eine Substitution des Quarzsandes durch Brechsand (k = 3,14) sowie eine vollständige Substitution durch Brechsand und Basaltsplitt (k = 3,17) resultierten in einer deutlichen Zunahme des Hohlraumgehaltes. Aufgrund der irregulär geformten Oberfläche dieser kantigen und splittigen Gesteinskörner bildeten sich im Korngerüst im Vergleich zu Korngemischen mit gerundeten und gedrungenen Körnern deutlich größere Zwischenräume. Der Hohlraumgehalt des verdichteten Kornhaufwerks mit Brechsand und Basaltsplitt betrug ca. 19,6 Vol.-%, wohingegen sich für die gleiche Sieblinie (~B8) eines Sand/Kies-Gemisches ein um rd. 69 % verringertes Hohlraumvolumen ergab ($H_{GK} = 6,1$ Vol.-%). Dies konnte auf die Kornform der gebrochenen Gesteinskörnungen zurückgeführt werden, welche die Verdichtungswilligkeit des Kornhaufwerks stark beeinflusste. In einer dichten Lagerung rollen gerundete, gedrungene Körner mit glatter Oberfläche mit geringerem Reibungswiderstand, wohingegen gebrochene Körner aufgrund ihrer größeren Flächenreibung und kantigen Kornform eine größere Verdichtungsenergie benötigen. Bei einem gleichen Einbauvolumen (V_{GK} = ~4.380 cm³) konnte mit einem Sand/Kies-Gemisch ein um rd. 18 % größeres Probenvolumen eingebracht werden als mit einem Korngemisch aus Brechsand und Basaltsplitt $(V_{GK} = \sim 2.813 \text{ cm}^3)$ unter Berücksichtigung der jeweiligen Kornrohdichte. Folglich lagen bei letzterem weniger Feststoffpartikel zur Oberflächenbenetzung vor, was sich sowohl in dem vergleichsweise geringen Wasseranspruch als auch in dem hohen Hohlraumgehalt dieser Korngemische widerspiegelte.

4.2 Basisrezepturen (Ausgangsmischungen)

Für die untersuchten Ringspaltmörtel wurden als Ausgangsmischung praxiserprobte Mörtelrezepturen aufgenommen, welche im Folgenden Basisrezepturen genannt werden. Die Bezeichnungen dieser Basisrezepturen geben Auskunft über Typ und Zementgehalt des Mörtels, d.h. der Mörtel B-60 ist ein bedingt aktiver Ringspaltmörtel mit einem Zementgehalt von 60 kg/m³ (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Im Wesentlichen unterschieden sich die Basisrezepturen im Mengenverhältnis ihrer Bindemittelkomponenten Zement und Flugasche, wie der Tabelle 4.3 zu entnehmen ist.

	Mörtelbezeichnung				
Ausgangskomponenten	Aktiv A-194	Bedingt aktiv B-120	Bedingt aktiv B-60	Inaktiv I-0	
Zement CEM I 42,5 R	194	120	60	0	
Flugasche	194	268	328	420	
Quarzsand 0,063-1 mm	169	169	169	169	
Quarzsand 0,063-2 mm	674	674	674	674	
Quarzkies 2-8 mm	454	454	454	454	
Sieblinie	B8	B8	B8	B8	
Bentonitsuspension (6 % Konzentration)	153	183	166	183	
Wasser	207	177	164	135	
W/B-Wert	0,93	0,93	0,85	0,76	

Tabelle 4.3: Basisrezepturen [kg/m³]

Der Bindemittelgehalt (Zement und Flugasche) war bei den aktiv und bedingt aktiven Ringspaltmörteln mit 388 kg/m³ stets gleich groß. Der inaktive (zementfreie) Mörtel enthielt 420 kg/m³ Flugasche. Der aktive Mörtel A-194 wies ein Mengenverhältnis von Zement zu Flugasche von 50:50 auf. Beim B-60 mit einem vergleichsweise geringen Zementgehalt betrug dieses Verhältnis 15:85. Neben den unterschiedlichen Zementgehalten differierten auch die Wassergehalte dieser Mörtelrezepturen signifikant. Kennzeichnend für diese Mörtel waren daher die hohen Wasser-Bindemittel-Verhältnisse von 0,76 bis 0,93 (Tabelle 4.3). Hierbei ist anzumerken, dass im Wasseranteil auch die Menge der Bentonitsuspension berücksichtigt wurde. Wie bereits in den vorherigen Abschnitten erläutert, nehmen der Wasseranspruch und das Wasserrückhaltevermögen mit der Feinheit und der Menge des jeweiligen Feinstoffes zu.

Die Feinheit respektive die spezifische Oberfläche der hier verwendeten Feinstoffe konnte mit klassischen Prüfmethoden, wie der Bestimmung der Luftdurchlässigkeit nach BLAINE [93], ermittelt werden. Für Bentonite mit einer spezifischen ("inneren") Oberfläche von 300 bis 800 m²/g, welche um ein Vielfaches größer ist als die spezifische Oberfläche von praxisüblichen Feinstoffen (z.B. Z: $O_m = ~3.800 \text{ cm}^2/\text{g}$), ist die BLAINE-Methode nicht geeignet. Da der Bentonit als fertige Suspension mit gleicher Viskosität nach einer ausreichenden Quellzeit (~16 h) den Mörtelmischungen zugegeben wurde, konnten weitere Quellvorgänge und damit verbundene Änderungen in der Viskosität des Mörtels ausgeschlossen werden. Für die Wahl eines geeigneten Bentonits wurden drei Natriumbentonite desselben Herstellers gewählt, welche laut Herstellerangaben Zusätze (Metalloxid, Methylcellulose) zur Erhöhung der Viskosität enthielten. An den einschlägigen Bentonitsuspensionen mit einer festgelegten Feststoffkonzentration von 6 % wurden die maßgeblichen Eigenschaften, u.a. das Filtratvolumen V_f nach 7,5 min bzw. 30 min [92], bestimmt. Die Ergebnisse sind im Anhang A, Tabelle A.2 bis

Tabelle A.4 und Abbildung A.1 zu entnehmen. Für die Untersuchungen an den Mörtelmischungen wurde der Bentonit HT-X gewählt, da er eine vergleichsweise hohe und konstante Suspensionsstabilität aufweist. Die Menge der Bentonitsuspensionen der Basisrezepturen lag in etwa in der gleichen Größenordnung. Mit der primären Funktion einer stabilisierenden Komponente im Mörtel konnten Einflüsse der Bentonitsuspension insbesondere auf das Fließverhalten und das Entwässerungsverhalten von Ringspaltmörteln weitestgehend vernachlässigt werden.

Als Gesteinskörnung wurden für alle vier Basisrezepturen Quarzsand 0,063-1 mm und 0,063-2 mm sowie Quarzkies 2-8 mm verwendet. Die Kornzusammensetzung entsprach dabei in etwa der Regelsieblinie B8 nach DIN 1045-2 [53]. Diese ist im Anhang C, Abbildung C.1 dargestellt.

Um die unterschiedlichen Basisrezepturen hinsichtlich der mörteltechnologischen Einflüsse in Abhängigkeit vom Wasseranspruch ihrer Feinstoffe qualitativ zu interpretieren, wurde das Verhältnis des Gesamtwassergehaltes W, einschließlich der gesamten Bentonitsuspension, zur spezifischen Oberfläche des Bindemittels $S_{m,B}$ unter Berücksichtigung der jeweiligen Anteile der Bindemittelkomponenten definiert [79]. Nachfolgend wird das Verhältnis als Wasser/Oberflächen-Verhältnis W/S_{m,B} bezeichnet (Tabelle 4.4).

	Einheit	Basisrezeptur			
		A-194	B-120	B-60	I-0
Wasser W	[kg/m ³]	207	177	164	135
Zement Z	[kg/m ³]	194	120	60	0
$(S_m = 6.560 \text{ cm}^2/\text{g})$	[Kg/m]	1)4	120	00	Ū
Flugasche FA	$[kg/m^3]$	194	268	328	420
$(S_m = 5.580 \text{ cm}^2/\text{g})$	[Kg/III]	174	200	520	420
Bindemittel B	[kg/m ³]	388	388	388	420
Spezifische Oberfläche des	[cm²/g]	6.070	5.890	5.730	5.580
Bindemittels S _{m,B}	[cm ² /m ³]	1.177.774	1.307.583	1.642.543	2.344.020
W/S _{m,B}	[g/m ²]	1,76	1,35	0,99	0,58

Tabelle 4.4: Wasser/Oberflächen-Verhältnis W/Sm,B der Basisrezepturen

4.3 Mörteltechnische Variationen

Die ersten Untersuchungen erfolgten an den Basisrezepturen. Um die maßgebenden Eigenschaften von Ringspaltmörteln zu erfassen, wurden gegenüber diesen Basisrezepturen nachfolgend beschriebene Varianten vorgenommen. Die Untersuchungen an den modifizierten Mörtelrezepturen erfolgten an den inaktiven (zementfreien) und bedingt aktiven ($Z = 60 \text{ kg/m}^3 \text{ bzw. } 120 \text{ kg/m}^3$) Basisrezepturen, da in der Regel keine hohen Anforderungen an die Druckfestigkeit gestellt werden, die normalerweise durch hohe Zementgehalte erreicht wird. Tabelle 4.5 gibt eine Übersicht der Versuchsreihen mit den zugehörigen materialspezifischen Varianten, denen zur vergleichenden Bewertung die einschlägigen Parameter der Basisrezepturen gegenübergestellt sind.

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen von verschiedenen Ausgangskomponenten und der Zusammensetzung auf die maßgeblichen Eigenschaften des Mörtels zu erfassen. Dazu kamen im Wesentlichen Ausgangskomponenten mit unterschiedlicher Granulometrie zum Einsatz. Im Fokus des Interesses standen zwei Variationsschienen:

- Varianten im Bindemittelbereich ($D < 63 \mu m$) und
- Varianten in der Gesteinskörnung.

Im Hinblick auf den Wasseranspruch der Gesteinskörnung entsprechend Abschnitt 4.1.3 wurden die Sieblinie, der Feinanteil und die Art (Kornform) der Gesteinskörnung variiert. Der Wasseranspruch des Bindemittels entsprechend Abschnitt 4.1.2 wurde durch die Art und die Granulometrie der Feinstoffe sowie das Mengenverhältnis der ausgewählten Bindemittelkomponenten variiert.

Im Rahmen der Versuchsreihe "Varianten in der Gesteinskörnung" lag der Fokus auf der entwässerungsbedingten Scherfestigkeitsentwicklung unter Berücksichtigung der erforderlichen temporären Fließeigenschaften des Ringspaltmörtels.

Zum Erreichen der erforderlichen Scherfestigkeit von $\tau_M \ge 2,0$ kN/m² (vgl. Tabelle 2.2) sind die Packungsdichte und damit verbunden die Sieblinie der Gesteinskörnung von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus beeinflusst die Packungsdichte maßgeblich den Wasseranspruch der Gesteinskörnung bzw. die Fließfähigkeit (Konsistenz) des Mörtels bei gleichem Wassergehalt. Abweichend von der in den Basisrezepturen verwendeten Sieblinie B8 wurden daher Mörtelrezepturen mit veränderten Körnungslinien hergestellt, um den Einfluss der Kornzusammensetzung auf die Mörteleigenschaften grundlegend zu untersuchen. Die Zusammensetzung der im Zuge der Mischungsvariation eingesetzten Sieblinien orientierte sich an den Regelsieblinien nach DIN 1045-2 [53]. Dabei wurden die Sieblinie A8 mit einem hohen Grobkorn-Anteil und die Sieblinie C8 mit einem hohen Feinkorn-Anteil einbezogen. Die untersuchten Sieblinien sind im Anhang C, Abbildung C.2 dargestellt. Da mit diesen Regelsieblinien nach FULLER die größtmögliche Packungsdichte des Kornhaufwerks erzielt werden kann, sollte durch weitere Erhöhung des Feinanteils (63-250 µm) auf 16 Vol.-% bzw. 22 Vol.-% der Gesamtgesteinskörnung für die Sieblinie B8 ein Einfluss der somit geänderten Packungsdichte auf die Scherfestigkeitsentwicklung des Mörtels eruiert werden. Der Feinanteil der Sieblinie B8 der Basisrezeptur betrug ca. 8 %.

Neben der Korngrößenverteilung ist insbesondere die Kornform der Gesteinskörnung zu berücksichtigen. Dabei spielen die aus Schereinwirkungen resultierenden Kontakt-Wechselwirkungen der Gesteinskörner eine bedeutende Rolle. Hierfür wurden zwei verschiedene Arten von Gesteinskörnungen mit vergleichbarer Korngrößenverteilung (Sieblinie B8) einbezogen, welche sich in ihrer Kornform und ihrer Oberflächenbeschaffenheit signifikant unterschieden (vgl. Abschnitte 4.1.3 und 4.1.4). Gegenüber den Basisrezepturen mit Sand/Kies-Gemischen wurden die modifizierten Mörtelrezepturen mit einem Brechsand oder Basaltsplitt und in Kombination beider hergestellt.

Die Versuchsreihe "Varianten im Bindemittelbereich" fokussierte die Konsistenz und insbesondere die Verarbeitbarkeit über mehrere Stunden (~8 h) sowie die Scherfestigkeitsentwicklung des Ringspaltmör-

tels. Die Steuerung erfolgte hier über die Zusammensetzung des jeweiligen Bindemittels, indem die Feinheit des Bindemittels durch Variation in den Anteilen der unterschiedlich feinen Bindemittelkomponenten (Z, FA, KSM, QM und HSM) variiert wurde. Durch Substitution der jeweiligen Bindemittelkomponenten können sowohl der Wasseranspruch und das Wasserrückhaltevermögen als auch die Packungsdichte im Hinblick auf die erforderliche Scherfestigkeit des Mörtels signifikant beeinflusst werden. Einflüsse aus der chemischen Reaktivität des Zementes wurden nicht näher betrachtet, da eine Festigkeitsentwicklung infolge von Hydratation von untergeordneter Bedeutung für den Ringspaltmörtel war.

			Basisrezeptur			
			A-194	B-120	B-60	I-0
Z:FA		0:100			Х	
	-	8:92		Х	Х	
	÷F/	15:85 (Basis)		Х	Х	
	Z	23:77		Х	Х	
		30:70			Х	
		100:0		Х	Х	Х
ich	M	90:10			Х	Х
rianten mittelbere	KS	50:50		Х	Х	Х
	FA:	10:90			Х	Х
		0:100		Х	Х	Х
Va inde	И	100:0			Х	Х
in Bi	N:Q	50:50			Х	Х
	\mathbf{F}_{I}	0:100			Х	Х
	М	100:0			Х	Х
	SH:	50:50			Х	Х
	FA	0:100			Х	Х
		A8		Х	Х	Х
gu	\mathbf{v}	B8 (Basis)	Х	Х	Х	Х
Inu		C8		Х	Х	Х
u kör		8 % (Basis)	X	Х	Х	Х
insl	ы	B8 + 16 %		Х	Х	
ari£ este		B8 + 22 %		Х	Х	
V: ler G(X	Quarzsand 0-2 mm/ Kies 2-8 mm (Basis)	X	X	X	Х
nd	61	Brechsand 0-2 mm			X	X
		Basaltsplitt 2-8 mm			Х	X

Tabelle 4.5: Materialspezifische Untersuchungsvarianten

Z: Zement FA: Flugasche KSM: Kalksteinfeinmehl QM: Quarzmehl HSM: Hüttensandmehl S: Sieblinie F: Feinanteil (63-250 μm) GK: Gesteinskörnungsart

Die modifizierten Mörtelzusammensetzungen sind im Anhang D, Tabelle D.1 bis Tabelle D.7 zusammengestellt.

5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

5.1 Herstellung der Mörtelproben

Alle Mörtel wurden jeweils als 60 l-Mischung in einem stationären Gleichlaufmischer (Typ Zyklos ZK 30 E der Fa. Pemeat Mischtechnik GmbH) hergestellt. Die Ausgangsstoffe wurden durchweg im Prüflabor mit einer Raumtemperatur von ca. 22 °C gelagert. Die trockene Gesteinskörnung und das Bindemittel (Zement und Zusatzstoffe) wurden in den Mischer gegeben und 30 bis 45 sec vorgemischt. Anschließend wurden das Zugabewasser und die Bentonitsuspension vollständig hinzugegeben und weitere 2 min gemischt. Abschließend wurde der Mörtel 2 min gemischt.

Die Bentonitsuspension wurde jeweils mindestens 16 Stunden vor der Mörtelherstellung hergestellt. Hierfür wurde ein hochtouriges Rührwerk mit einem speziellen Dispergieraggregat (Eurostar 20 der Fa. IKA-Werke GmbH) verwendet. Die Feststoffkonzentration der Suspension betrug 6 %. Das Bentonitpulver wurde bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 500 U/min dem Wasser zugegeben. Die Geschwindigkeit wurde nach vollständiger Feststoffzugabe schrittweise auf ca. 2000 U/min erhöht. Die Gesamtmischzeit der Bentonitsuspension betrug 10 min. Während der Mörtelherstellung wurde die Bentonitsuspension unmittelbar vor Zugabe nochmals mit der Kelle durchmischt.

Der Mörtel wurde in einem Mörtelkübel gelagert und durch eine Folie vor schneller Feuchtigkeitsabgabe geschützt.

Grundsätzlich wurden alle der im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen bei einer Umgebungstemperatur von 20 ± 2 °C in den Labors durchgeführt. Vor jedem Versuch wurde die Mörtelmischung durch erneutes Mischen homogenisiert.

5.2 Untersuchung des Entwässerungsverhaltens

5.2.1 Filtratwasserabgabe

Die ersten Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten von Ringspaltmörteln wurden mit der Filterpresse nach DIN 4127 [61] mit einem Prüfvolumen von 0,235 dm³ durchgeführt. Dieses Prüfverfahren findet primär Anwendung im Erd- und Grundbau und wird zur Untersuchung von Stützflüssigkeiten, vorzugsweise von Bentonitsuspensionen, im Schlitzwandbau herangezogen. Mit dem Filterpressversuch wird das Volumen des abgesonderten Wassers nach einer Entwässerungsdauer von 7,5 min mit Beginn der Druckbeaufschlagung von 7 ± 0,35 bar ermittelt. Zur Filtration wurde ein Filterpapier (Fa. Whatman International Ltd. Maidstone, England) mit einer Feinheit von 2,7 µm und einer Filtrationszeit nach Herzberg von 2685 s verwendet. In Abbildung 5.1 ist der schematische Aufbau einer Filterpresse dargestellt.



Abbildung 5.1: Filterpresse (Fa. Fann Instrument Company, U.S.A.) [62]

Im Fokus der Untersuchungen stand die Entwässerungsfähigkeit der Mörtel unter realitätsnahen Bedingungen in einem Ringspalt mit einer Dicke d_M von 10 bis zu 20 cm. Zu diesem Zweck wurde die Filterpresse nach DIN 4127 [61] modifiziert (Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2: Modifizierter Filterpressversuch

Der Grundaufbau des Entwässerungsversuchs bestand aus einem Stahlzvlinder mit einem Innendurchmesser Ø_i von 180 mm und einer Grundhöhe H von 200 mm, an dessen Ende eine Stahlplatte mit einer Dicke d_{Boden} von 5 mm angeschraubt wurde. Die Höhe wurde durch entsprechende Aufsatzringe vergrößert, wenn größere Schichtdicken des Mörtels untersucht wurden (vgl. Abschnitt 5.5). Die Bodenplatte war an der Innenraumfläche mit Rundlöchern mit einer Nennlochweite Ø_{Loch} von 5 mm versehen, um eine vollflächige Entwässerung des Mörtels zu gewährleisten. Eine hohe Filtrationsgeschwindigkeit erforderte eine grobe Feinheit des Filtermediums mit einer Porengröße von ca. 30 µm. Um ein Ausfiltern von Feinstoffen des Mörtels während seiner Entwässerung weitestgehend zu verhindern, wurde abweichend von der Filterpresse DIN 4127 [61] ein Filterpapier (Fa. Filtros Anoia, Spanien) mit einer Feinheit von 20-25 µm bei vergleichbarer Filtrationsgeschwindigkeit verwendet. Das verwendete Filterpapier sollte für die hier beschriebenen Versuche den angrenzenden Boden mit einem für ein Lockergestein typischen Durchlässigkeitsbeiwert k_f von 10⁻² bis 10⁻⁴ m/s im Ringspalt repräsentieren und eine schnelle Entwässerung des Mörtels bei quantitativ hoher Durchlässigkeit ermöglichen. Der Mörtel wurde mit einer definierten Höhe von 17 cm (entsprechend einem Volumen von ca. 3,1 dm³) eingefüllt. Abschließend wurde eine Plexiglasscheibe zur gleichmäßigen Verteilung der Druckbeaufschlagung auf die Mörteloberfläche gelegt. Der Stahlbehälter, nachfolgend als Drucktopf bezeichnet, wurde mit einer Stahlplatte ($d_{\text{Deckel}} =$ 15 mm) und einem Dichtungsring hermetisch verschraubt, um ein Austreten der Druckluft in der Fuge zwischen Behälter und Deckel während der Druckbeaufschlagung zu verhindern. Die Beaufschlagung mit Druckluft erfolgte über eine in der Stahlplatte ausgeführte zentrische Bohrung mit angeschweißter Stecktülle, welche über einen entsprechenden Druckluftschlauch mit einem Druckminderer verbunden wurde, um den Entwässerungsdruck gezielt zu steuern. Die Druckluft konnte bis zu max. 5 bar über die hauseigene Versorgung aufgebracht und darüber hinausgehende Drücke mussten über eine externe Druckluftflasche zugeführt werden. Als Entwässerungsdruck und Entwässerungsdauer wurden typische Steuerkenngrößen – Verpressdruck und Vortriebsgeschwindigkeit – für einen Tunnelvortrieb mit einer Tübbingbreite von 2,00 m herangezogen ($p_f = ca. 2,5$ bar und $d_f = 30$ min) [58].

Das Filtratwasser f wurde über einen Trichter, der unmittelbar unter der Bodenplatte an einem Unterbau befestigt wurde, in einem Messzylinder aufgefangen. Die zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgabe wurde mit einer Präzisionswaage (PLS 6200-2A, Fa. Kern) aufgezeichnet.

Da mit der Entwässerung eine Konsolidierung des Mörtels einhergeht, wurde zur Bestimmung der Volumenabnahme der Abstand von Mörteloberfläche zur Oberkante des Drucktopfes vor und nach der Entwässerung an jeweils fünf Stellen gemessen. Das Volumen des Mörtels wurde über dessen Höhe aus der Differenz zwischen dem Mittelwert der fünf Messwerte und der Innenhöhe des Drucktopfes vor und nach Entwässerung berechnet.

Abbildung 5.3 zeigt den schematischen Aufbau des modifizierten Filterpressversuchs. Die einschlägigen Nachweise der gewählten Plattendicke und Wanddicke des Stahlbehälters sowie der Schraubenverbindungen sind im Anhang E "Modifizierter Filterpressversuch" zu finden.

$$V_i = \pi * r^2 * (h - s_i) [cm^3]$$
 Gleichung 5.1

mit: V_i: Volumen des Mörtels vor bzw. nach Entwässerung [cm³]

- r: Innenradius des Drucktopfes [cm]
- h: Innenhöhe des Drucktopfes [cm]
- s_i: Mittelwert der fünf Messwerte für den Abstand zwischen der Mörteloberfläche und der Oberkante des Drucktopfes vor bzw. nach Entwässerung [cm]

Die Volumenabnahme ΔV_M des Mörtels wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta V_{\rm M} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} * 100 \, [\rm Vol. -\%]$$
 Gleichung 5.2

- mit: ΔV_{M} : Volumenabnahme des Mörtels [Vol.-%]
 - V₁: Volumen des Mörtels vor Entwässerung [cm³]
 - V₂: Volumen des Mörtels nach Entwässerung [cm³]



Querschnitt A-A:

Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau des modifizierten Filterpressversuchs

5.2.2 Feinstteilumlagerung im Mörtel

Um die Feinstteilumlagerung im Mörtel im Zuge der druckbedingten Entwässerung zu untersuchen, wurden die Wassergehalte, die Trockenrohdichten und die Korngrößenverteilungen an einzelnen Schichten über die Höhe des entwässerten Mörtels bestimmt. Zu diesem Zweck musste der modifizierte Filterpressversuch dahingehend optimiert werden, dass der Mörtel nach Beendigung des Entwässerungsversuchs in entsprechende Schichten unterteilt werden konnte, ohne dabei dessen Gefüge aufzulockern. Die horizontale Unterteilung des entwässerten Mörtels in Schichten erfolgte durch vier Plexiglaszylinder mit einem Innendurchmesser Ø_i von 109 mm, wovon drei mit einer Höhe von 40 mm und der vierte (an der druckbeaufschlagten Zone) mit einer Höhe von 57 mm hergestellt wurden. Die vier Zylinder wurden mit Gummimanschetten miteinander verbunden, um eine horizontale Verschiebung dieser Zylinder im Zuge des Mörteleinbaus zu verhindern. Die Gesamthöhe der zusammengesetzten Zylinder betrug 177 mm. Der Zylinder wurde mittig in den Drucktopf gestellt, der anschließend vollständig (einschließlich des Luftspalts zwischen Plexiglaszylinder und Drucktopf) mit Mörtel gefüllt wurde. Der Aufbau des Drucktopfes samt des Plexiglaszylinders ist in Abbildung 5.4 schematisch dargestellt.



Abbildung 5.4: Schematischer Aufbau des Drucktopfes, einschließlich Plexiglaszylinder, zur Untersuchung der Feinstteilumlagerung im Mörtel

Nach Beendigung des Entwässerungsversuchs wurde die Mörtelprobe im Ganzen, samt dem Plexiglaszylinder, aus dem Drucktopf entnommen. Der entwässerte Mörtel außerhalb des Plexiglaszylinders konnte manuell entfernt werden, wie in Abbildung 5.5 demonstriert.



Abbildung 5.5: Entfernung des entwässerten Mörtels außerhalb des Plexiglaszylinders

Die Gummimanschetten wurden entfernt und die einzelnen Zylinder wurden mit einem dünnen Stahlblech in den Ringfugen getrennt. Die entwässerten Teilproben wurden hinsichtlich ihres Wassergehaltes, ihrer Trockenrohdichte sowie ihrer Korngrößenverteilung untersucht.

Der Wassergehalt der Proben wurde durch Ofentrocknung nach DIN 18121-1 [97] bestimmt. Hierfür wurden die entwässerten Teilproben in den Trocknungsofen gestellt und bei einer Temperatur von 105 bis 110 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Trocknungszeit betrug in etwa 24 Stunden. Der Wassergehalt der Teilproben berechnete sich wie folgt:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_B} * 100 = \frac{m_w}{m_{tr}} * 100 [M. -\%]$$
 Gleichung 5.3

- mit: W: Wassergehalt der Teilprobe [M.-%]
 - m₁: Masse des Behälters und der entwässerten Probe [g]
 - m₂: Masse des Behälters und der getrockneten Probe [g]
 - m_B: Masse des Behälters [g]
 - m_W: Masse des Wassers [g]
 - m_{tr}: Masse der getrockneten Probe [g]

Zur Bestimmung der Trockenrohdichten wurden die entwässerten Teilproben in den jeweiligen Plexiglasringen belassen und bei einer Temperatur von 105 bis 110 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Abmessungen sowie die Masse der Plexiglasringe wurden zuvor bestimmt. Das Volumen der Teilproben entsprach dem Hohlraumvolumen des jeweiligen Plexiglasrings.

Die Korngrößenverteilungen wurden an den entwässerten Teilproben sowie an einer repräsentativen, nicht entwässerten Probe der jeweiligen Mörtelrezeptur bestimmt. Vor der Siebanalyse wurden die Proben durch Auswaschen und Trocknung aufbereitet. Das Auswaschen der Teilproben erfolgte durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 0,25 mm. Eine unter dem Sieb angeordnete Auffangschale mit Ausguss leitete das Auswaschwasser in einen separaten Auffangbehälter. Die im Auswaschwasser enthaltenen Feinstoffe wurden mit einem Filterpapier (MN 615, mittleres Rückhaltevermögen 4-12 μ m) abfiltriert. Der Rückstand auf dem 0,25 mm-Sieb wurde bei einer Temperatur von 105 bis 110 °C bis zur Massekonstanz getrocknet und nach EN 1015-1 [99] trockengesiebt. Um die Partikelgrößenverteilung auch im Feinstteilbereich zu erfassen, wurden die abfiltrierten Feinstoffe (D < 0,25 mm) durch ein 0,063 mm-Sieb nassgesiebt und anschließend mit dem Lasergranulometer (CILAS 1090 LD, Fa. Quantachrome GmbH) im Nassbereich untersucht.

5.3 Untersuchung der Scherfestigkeitsentwicklung

5.3.1 Flügelscherversuch

An den entwässerten Mörtelproben wurden die Scherfestigkeiten mit einer Flügelsonde (Shear Vane, Geotechnics Laboratory, Neuseeland) in Anlehnung an DIN 4094-4 [94] bestimmt, welche primär der Ermittlung der Scherfestigkeit in undrainierten und wassergesättigten, feinkörnigen Böden dient. Die Flügelsonde setzt sich dabei aus einem Scherflügel, bestehend aus vier rechtwinklig zueinander angeordneten Stahlblechen, und der darauf angeschraubten Messvorrichtung zur Erfassung des Drehmoments zusammen. Die verwendeten Scherflügel wiesen einen Durchmesser von 19 mm und eine Höhe von 29 mm auf. Abweichend von der Norm wurden die Scherflügel vor Entwässerungsbeginn bis zur vorgesehenen Untersuchungstiefe in den Frischmörtel eingedrückt, um nach Beendigung des Entwässerungsversuchs die Scherfestigkeiten an einer ungestörten, entwässerten Mörtelprobe zu ermitteln. Insgesamt wurden drei um jeweils 120 ° versetzt angeordnete Scherflügel eingebaut. In Abbildung 5.6 sind die Abmessungen eines Scherflügels (rechts) und der Einbau der Scherflügel im Drucktopf (links) dargestellt.



Abbildung 5.6: Einbau der Scherflügel vor Entwässerungsbeginn (links) und Abmessungen eines Scherflügels (rechts)

Die Scherflügel wurden durch angepasste Aussparungen in der Plexiglasscheibe entsprechend Abschnitt 5.2.1 im Mörtel fixiert. Die Einbautiefe der Flügel orientierte sich an der Schichtdicke des Mörtels. Unter der Annahme, dass die tiefer liegenden Schichten des Mörtels (zum Wasseraustritt hin) im Zuge der druckbedingten Entwässerung im Vergleich zu der höher liegenden (druckbeaufschlagten) Seite stärker konsolidieren, waren in den entwässerten Zonen höhere Festigkeitswerte zu erwarten. Als Referenzwert wurden daher die Scherfestigkeiten im unteren Drittel der entwässerten Mörtelproben ermittelt. Bei einer Schichtdicke des Mörtels d_M von 17 cm betrug die Einbautiefe der Scherflügel h_F rd. 13 cm ab Mörteloberfläche. Nach Beendigung des Entwässerungsversuchs wurde die Messvorrichtung auf dem jeweiligen Scherflügel angeschraubt und mit einer konstant geringen Geschwindigkeit von ca. 0,1 °/s gedreht. Dabei wurde das zum Abscheren aufgebrachte maximale Drehmoment M_{max} abgelesen.

Aus dem Verhältnis der Spannungsverteilung aus dem Drehmoment und der Flügelgeometrie wird der Scherwiderstand ermittelt. Dabei entspricht die Mantelfläche des abgescherten, zylindrischen Probevolumens der Scherfläche. Für die Berechnung der Scherfestigkeit wird vereinfachend angenommen, dass an der Scherfläche eine rechteckförmige Spannungsverteilung und an den Stirnflächen eine rechteckige Spannungsverteilung herrschen (Abbildung 5.7). Daraus lässt sich ableiten, dass die Scherfestigkeit in allen Ebenen gleich groß ist [94].



Abbildung 5.7: Abschervorgang mit einer Flügelsonde (links) und daraus resultierende Spannungsverteilung (rechts) [94]

Der maximale Scherwiderstand $\tau_{M,FSV}$ [kN/m²] errechnet sich bei Annahme der Spannungsverteilung nach Abbildung 5.7 (rechts) wie folgt:

$$\tau_{M,FSV} = \frac{M_{max}}{\pi * D_F^2 * \left(\frac{H_F}{2} + \frac{D_F}{6}\right)} \left[kN/m^2 \right]$$
 Gleichung 5.4

- mit: $\tau_{M,FSV}$: maximaler Scherwiderstand des entwässerten Mörtels beim Abscheren im Flügelscherversuch [kN/m²]
 - M_{max}: maximales Drehmoment beim Abscheren [kNm]
 - D_F: Durchmesser des Scherflügels [m]
 - H_F: Höhe des Scherflügels [m]

Um auch die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit zu untersuchen, wurden die Scherfestigkeiten zu unterschiedlichen Entwässerungszeitpunkten $t_M = 5$ min (unmittelbar nach Herstellung) und $t_M = 30$, 60, 120, 240 und 360 min ermittelt.

5.3.2 Direkter Scherversuch – Rahmenscherversuch

An ausgewählten Mörtelmischungen wurden die mit der Flügelschersonde ermittelten Scherfestigkeiten mit einem Rahmenschergerät nach KREY (1926) in Anlehnung an DIN 18137-3 [95] vergleichend untersucht. Analog zum Flügelscherversuch findet auch dieses Prüfverfahren seinen primären Anwendungsbereich in der Bodenmechanik und dient dort zur Bestimmung der Scherfestigkeit von Böden durch den dränierten und konsolidierten direkten Scherversuch an quaderförmigen Probekörpern.

Der Versuchsablauf gliedert sich dabei in zwei Teilschritte:

- Konsolidierungsvorgang und
- Abschervorgang.

Dazu wurde die Mörtelprobe in zwei übereinander liegende starre Rahmen eingefüllt und mit seitlicher Querdehnungsbehinderung unter einer definierten Normalspannung (250 kN/m²) konsolidiert, was einer Entwässerung des Mörtels unter einem praxisüblichen Verpressdruck von 2,5 bar entsprach. Analog zu den Entwässerungsversuchen wurde eine Entwässerungs- bzw. Konsolidierungsdauer von 30 min festgelegt, entsprechend einer Vortriebsgeschwindigkeit und einer simultanen Verpressdauer des Ringspaltmörtels bei einer Tübbingbreite von etwa 2,00 m. Die Filtratwasserabgabe errechnete sich aus dem Massenverhältnis der Mörtelprobe vor und nach Konsolidierung. Im direkten Anschluss an die Konsolidierung fand der Abschervorgang statt. Dabei wurde die Scherkraft T durch den kontinuierlichen Vorschub des unteren Rahmens mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1,00 mm/min aufgebracht. Die Schergeschwindigkeit entsprach in etwa der Drehgeschwindigkeit der Messung mit der Flügelsonde von 0,1 °/s. Der obere Rahmen war während des gesamten Abschervorgangs unbeweglich. Neben der Scherkraft T wurden der Scherweg u und die Verformung f der Probe gemessen. Abbildung 5.8 zeigt eine schematische Prinzipskizze des Rahmenschergerätes.



Abbildung 5.8: Prinzipskizze des Rahmenschergerätes [96]

Die maximal erreichte Scherspannung $\tau_{M,RSV}$ [kN/m²] berechnet sich aus der größten gemessenen Scherkraft T_{max} [kN] und der Scherfläche A₀ [m²]:

$$\mathbf{t}_{\mathrm{M,RSV}} = \frac{\mathrm{T}_{\mathrm{max}}}{\mathrm{A}_{0}} \, \left[\mathrm{kN} / \mathrm{m}^{2} \right] \qquad \qquad \text{Gleichung 5.5}$$

mit: $\tau_{M,RSV}$: maximaler Scherwiderstand des entwässerten, konsolidierten Mörtels beim Abscheren im Rahmenschergerät [kN/m²]

T_{max}: maximale Scherkraft [kN]

A₀: Scherfläche [m²]

Der Einfluss des Porenwasserdrucks auf die Scherfestigkeitsentwicklung konnte vernachlässigt werden, da die Schergeschwindigkeit beim Abscheren des entwässerten und konsolidierten Mörtels sehr gering war, und folglich angenommen werden kann, dass während des Abschervorgangs kein Porenwasserdruck entstand [98].

Die Rahmenscherversuche an entwässerten Mörtelproben wurden jeweils unmittelbar nach Herstellung $(t_M = 5 \text{ min})$ und im Mörtelalter von 120, 240 und 360 min durchgeführt, um auch hier die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit zu erfassen.

5.4 Weitere Untersuchungen

5.4.1 Konsistenz und Verarbeitbarkeit

Die Konsistenz als Maß für die Fließfähigkeit des Ringspaltmörtels wurde mit dem Mörtelausbreitmaß nach EN 1015-3 [59] für alle Mörtelrezepturen bewertet. Um auch das Fließverhalten des Mörtels unter seinem Eigengewicht, d.h. ohne mechanische Einwirkung, zu eruieren, wurde vor der Bestimmung des Ausbreitmaßes das sogenannte Setzfließmaß ohne 15 Hubschläge ermittelt. Das Setzfließmaß galt hier als Maß der Verarbeitbarkeit des Mörtels. Die an Ringspaltmörtel geforderte Verarbeitbarkeitszeit von etwa 8 h wurde anhand der zeitlichen Änderung des Setzfließmaßes und auch des Ausbreitmaßes untersucht. Hierfür wurden die Untersuchungen unmittelbar nach Herstellung ($t_M = 5$ min) und zu den Zeit-

punkten $t_M = 30, 60, 90, 120, 240$ und 360 min durchgeführt. Begleitend wurden an ausgewählten Mörtelmischungen die Trichterauslaufzeiten nach EN 12350-9 [100] gemessen, um auch einen Verarbeitbarkeitsbereich zu ermitteln.

5.4.2 Sedimentationsstabilität

Neben einer hohen Fließfähigkeit und langen Verarbeitbarkeitszeit von mehreren Stunden (~8 h) ist gleichzeitig eine hohe Sedimentationsstabilität des Mörtels gefordert.

Die Prüfung der Sedimentationsstabilität wurde nach der DAfStb-Richtlinie "Selbstverdichtender Beton" (Ausgabe November 2003) [63] an unentwässerten, erhärteten Ringspaltmörteln durchgeführt. Dabei wurde die Sedimentationsstabilität am Schnittbild von erhärteten Mörtelproben beurteilt. Hierfür wurde ein Kunststoffzylinder ($\phi_i = 100 \text{ mm}$, H = 500 mm) mit einer repräsentativen Frischmörtelprobe gefüllt. Ein Neigungswinkel von 45 ° während des Einfüllens ermöglichte das Fließen an der Wandung und die gleichzeitige Entlüftung des Mörtels. Anschließend wurde der mit Mörtel gefüllte Zylinder erschütterungsfrei im Prüflabor mit einer Raumtemperatur von ca. 22 °C gelagert. Nach einer ausreichenden Erhärtungszeit (≥ 28 d) der jeweiligen Mörtelmischung wurde der Zylinder mittig in Achsrichtung gesägt. Die Schnittflächen wurden hinsichtlich einer homogenen Verteilung der groben Gesteinskörnung visuell beurteilt.

5.5 Versuchstechnische Variationen

Die versuchstechnischen Variationen konzentrierten sich im Wesentlichen auf den Einfluss der im Ringspalt vorliegenden Bedingungen auf das Entwässerungsverhalten und damit einhergehend auf die Scherfestigkeitsentwicklung von Ringspaltmörteln.

Als Ausgangsbasis wurden entsprechend Abschnitt 5.2.1 typische Kenngrößen, u.a. ein Entwässerungsdruck von 2,5 bar und eine Ringspaltdicke von 17 cm, für einen maschinellen Tunnelvortrieb mit Tübbingausbau im Lockergestein angewandt. Da der Verpress- und damit eingehergehend der Entwässerungsdruck abhängig vom Gegendruck aus Boden und Grundwasser gesteuert werden, wurde die Druckbeanspruchung variiert. Dabei wurden die Entwässerungsversuche für eine Dauer von 30 min unter einem konstanten Druck durchgeführt. Abweichend davon wurde in einer Versuchsreihe der Druck über den gleichen Entwässerungszeitraum stufenartig reguliert, um auch Einflüsse aus unerwünschten Druckschwankungen während der Ringspaltverpressung auf das Entwässerungsverhalten des Mörtels zu eruieren. Darüber hinaus beeinflusst die Dicke des Ringspalts, welche besonders während eines Vortriebs im sedimentären Lockergestein stark variieren kann, das Entwässerungsverhalten und damit einhergehend das Konsolidierungsverhalten des Mörtels signifikant. Im Rahmen der hier durchgeführten Entwässerungsversuche wurde für das Filtermedium einen für ein Lockergestein typischer Durchlässigkeitsbeiwert k_f von ~10⁻² m/s festgelegt, um eine quantitativ schnelle Entwässerung des Mörtels zu ermöglichen. Um auch ein Tiefenprofil für die Scherfestigkeit zu erhalten und eine Korrelation zwischen Entwässerungsgradient und Scherfestigkeit zu erfassen, wurden an ausgewählten Mörtelrezepturen die Scherflügel in unterschiedliche Tiefen der Proben entsprechend Abschnitt 5.3 eingebaut.

Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht der versuchstechnischen Variationen mit den einschlägigen Kenngrößen der Basisrezepturen als Referenz.

		Basisrezeptur				
		A-194	B-120	B-60	I-0	
Entwässerungsdruck p _r [bar]	7,0			Х		
	2,0-4,0-6,0 (Druckstufen)	х	x	Х	х	
	4,0			Х	х	
	3,5			Х	х	
	2,5 (Referenz)	х	X	Х	Х	
	2,0			Х		
6	6,3			Х	х	
Schichtdicke d _f [cm]	10			х	х	
	13	х	х	Х	Х	
	17 (Referenz)	х	х	Х	х	
	20			Х	х	
Einbautiefe Flügel h _F [mm]	60			Х	х	
	80			х	х	
	110			Х	х	
	130 (Referenz)			Х	x	

6 KONSISTENZ UND VERARBEITBARKEIT

6.1 Basisrezepturen

Bei den untersuchten Basisrezepturen konnte ein Einfluss des Wassergehaltes und der zu benetzenden Oberfläche der Feinstoffe – des Wasser/Oberflächen-Verhältnisses $W/S_{m,B}$ – auf die Konsistenz nachgewiesen werden (vgl. Abschnitt 4.2). Mit größer werdendem $W/S_{m,B}$ -Verhältnis und gleichzeitig zunehmender Bindemittelfeinheit wurde der Mörtel steifer (Abbildung 6.1).



Abbildung 6.1: Korrelation zwischen Ausbreitmaß a und W/S_{m,B}-Verhältnis (links) und zwischen Setzfließmaß SF und W/S_{m,B}-Verhältnis (rechts) jeweils zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h

Dabei wies die aktive Mörtelrezeptur A-194 mit dem höchsten $W/S_{m,B}$ -Verhältnis von 1,76 g/m² sowohl die geringsten Ausbreitmaße als auch die geringsten Setzfließmaße zu beiden Zeitpunkten t_M von 0 h und 6 h auf. Unmittelbar nach Herstellung war das Ausbreitmaß a des aktiven Mörtels A-194 um rd. 18 % geringer im Vergleich zum Ausbreitmaß der inaktiven (zementfreien) Basisrezeptur I-0 mit dem kleinsten $W/S_{m,B}$ -Verhältnis von 0,58 g/m² (a = 28 cm). Die Ausbreitmaße der bedingt aktiven Mörtel B-120 ($W/S_{m,B} = 1,35$ g/m²) und B-60 ($W/S_{m,B} = 0,99$ g/m²) lagen mit einer vergleichbaren Bindemittelfeinheit im gleichen Größenbereich. Dies konnte auf die höhere Feinheit des Zementes ($S_m = 6.560$ cm²/g) gegenüber der Flugasche mit einer spezifischen Oberfläche von 5.580 cm²/g zurückgeführt werden. Demzufolge war die zu benetzende Oberfläche des Zementes größer, was sich auch im Wasseranspruch dieses Feinstoffes widerspiegelte (vgl. Tabelle 4.2). Der im Vergleich zum B-60 ca. 8 % höhere Wassergehalt des B-120 konnte daher scheinbar durch eine 100 %-ige Erhöhung des Zementgehaltes bei gleichem Bindemittelgehalt (B = 388 kg/m³) und somit durch einen höheren Wasseranspruch des Bindemittels kompensiert werden. Die Kurven der Setzfließmaße verliefen nahezu identisch wie die der Ausbreitmaße. Auch hier zeigte sich, dass die Bindemittelfeinheit S_{m,B} von größerer Bedeutung für die Konsistenz war als der Wassergehalt W des Mörtels. Unmittelbar nach Herstellung betrug das Setzfließmaß SF des aktiven Mörtels rd. 15 cm, während der inaktive Mörtel noch einen vergleichsweise hohen Wert von 21,0 cm erreichte. Analog zu den Ausbreitmaßen der bedingt aktiven Mörtel lagen auch die betreffenden Setzfließmaße im gleichen Größenbereich (SF = 16 cm).

Mit zunehmendem Mörtelalter ($t_M = 6$ h) nahmen die Ausbreitmaße und die Setzfließmaße der Basisrezepturen kontinuierlich ab. Mit einem Ausbreitmaß a zwischen 18 und 23 cm wiesen die Basisrezepturen – unabhängig vom W/S_{m,B}-Verhältnis – eine ausreichende Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit mit dem angestrebten Ausbreitmaß von 15 ± 5 cm auf (vgl. Tabelle 2.2). Allerdings zeigten die dazugehörigen Setzfließmaße nennenswerte Unterschiede in der Konsistenz dieser Mörtel. Vor allem bei den zementhaltigen Mischungen konnte mit einem Setzfließmaß SF von rd. 10 cm, was dem unteren Innendurchmesser des Setztrichters entspricht, auf eine gewisse "Grünstandfestigkeit" dieser Mörtel hingedeutet werden. Diese konnte einerseits auf die bereits einsetzende Hydratation des Zementes, andererseits auch auf die Fließgrenze des Leims zurückgeführt werden. Durch die mechanische Einwirkung (15 Hubschläge) zur Bestimmung des Ausbreitmaßes konnte die Fließgrenze scheinbar überwunden werden, da diese Mörtel mit einem Ausbreitmaß a von ca. 19 cm wieder deutlich fließfähiger wurden.

Die ebenfalls abnehmende Konsistenz des zementfreien Mörtels resultierte höchstwahrscheinlich aus der starken Blutneigung dieser Mischung. Grundsätzlich konnte bei allen vier Basisrezepturen eine vergleichsweise hohe Blutneigung beobachtet werden, welche die Konsistenz zusätzlich beeinflusst haben könnte. Die mit dem Eimerverfahren [60] ermittelten Blutwassermengen je m³ Frischmörtel sind in Abbildung 6.2 dargestellt.



Abbildung 6.2: Blutneigung der Basisrezepturen (links), Detailausschnitt bis 10 h (rechts)

Bei allen vier Mischungen konnte ein deutlicher Anstieg der Blutwasserabgabe innerhalb der ersten 5 h festgestellt werden (Abbildung 6.2, rechts). Dabei wies die aktive Basisrezeptur A-194 im Vergleich zu der inaktiven (zementfreien) Mischung in den ersten vier Stunden eine geringfügig stärkere Zunahme der Blutwassermenge auf. Die Blutwasserabgaben der bedingt aktiven Mörtelrezepturen lagen in der gleichen

Größenordnung von 34,5 kg/m³. Mit zunehmendem Mörtelalter war hier ein Einfluss der fortschreitenden Hydratation des Zementes erkennbar. Während die abgesonderte Blutwassermenge bis zu 4 h nahezu linear anstieg, kam es im weiteren Verlauf zu einer Stagnation der Blutwasserabgabe. Demgegenüber nahmen die Blutwassermengen der inaktiven Basisrezeptur kontinuierlich zu, was sich auch in der über die geforderte Verarbeitbarkeitszeit von 8 h hinaus geringeren Konsistenzabnahme dieser Mischung widerspiegelte (vgl. Abbildung 6.1).

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der Basisrezepturen wurden die Trichterauslaufzeiten als Maß für die Viskosität den dazugehörigen Setzfließmaßen als Kriterium für die Fließgrenze gegenübergestellt (Abbildung 6.3). Entsprechend Tabelle 2.2 wird sowohl für zementhaltige als auch zementfreie Ringspaltmörtel unmittelbar nach Herstellung ($t_M = 0$ h) ein Setzfließmaß SF von 15 ± 5 cm gefordert, um eine adäquate Ringspaltverpressung zu gewährleisten. Trägt man diesen Fließbereich im Diagramm (links) ein, lässt sich qualitativ ein Verarbeitbarkeitsfenster definieren. Daraus kann abgeleitet werden, dass unabhängig vom W/S_{m,B}-Verhältnis sowie von der Bindemittelfeinheit S_{m,B} Trichterlauslaufzeiten t_{Tr} zwischen 1,0 und 1,5 sec erreicht werden können, was aus der sehr fließfähigen Konsistenz dieser Mörtel resultierte (vgl. Abbildung 6.1). Erst mit zunehmendem Mörtelalter ($t_M = 6$ h) wurden geringfügig höhere Werte von 1,5 bis 2,5 sec infolge erster Hydratationsreaktionen gemessen.



Abbildung 6.3: Korrelation zwischen Trichterauslaufzeit t_{Tr} und Setzfließmaß SF der Basisrezepturen zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h (links) und $t_M = 6$ h (rechts)

Begleitend zu der hohen Fließfähigkeit über einen Verarbeitungszeitraum von 6 bis 8 h konnte bei allen vier Basisrezepturen eine ausreichende Sedimentationsstabilität entsprechend Abschnitt 5.4.2 nachgewiesen werden, wie in Abbildung 6.4 exemplarisch für eine bedingt aktive Mörtelprobe B-60 dargestellt.



Abbildung 6.4: Schnittflächen einer bedingt aktiven Mörtelprobe B-60 mit ausreichender Sedimentationsstabilität (links), gleichmäßige Verteilung der groben Gesteinskörnung (rechts)

6.2 Varianten im Bindemittelbereich

Wie bereits in Abschnitt 4.3 erläutert, erfolgten die Variationen im Bereich der Feinstoffe $\leq 63 \,\mu$ m an den inaktiven und bedingt aktiven Basisrezepturen. Für eine ganzheitliche Analyse der Zusammenhänge zwischen den Ausgangskomponenten, der Mörtelzusammensetzung und den damit erreichbaren Mörteleigenschaften werden nachfolgend die Ergebnisse der Untersuchungen an den modifizierten Mischungen der bedingt aktiven Basisrezeptur B-60 dargestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen an den modifizierten Mischungen, jedoch mit weniger stark ausgeprägten Effekten. Einerseits konnte dies hier auf die fehlende Festigkeitsentwicklung (durch Hydratation des Zements), andererseits auf die Granulometrie der Flugasche im Hinblick auf die rheologische Wirksamkeit zurückgeführt werden. Die modifizierten Mischungen zeigten daher mehr oder weniger vergleichbare Werte.

Der Einfluss der Feinheit der jeweiligen Bindemittelkombinationen auf den Wasseranspruch spiegelte sich auch in der Konsistenz und Verarbeitbarkeit der einschlägigen Mörtelrezepturen wider (vgl. Abbildung 4.4). Analog zu der Basisrezeptur B-60 wiesen auch die modifizierten Mischungen ein hohes Fließvermögen sowie eine lange Verarbeitbarkeitszeit von bis zu 6 h auf, unabhängig von der Art und der Menge der verwendeten Feinstoffe. Mit zunehmender Feinheit des Bindemittels wurde die Konsistenz bei gleichem Wassergehalt signifikant steifer (Abbildung 6.6 und Abbildung 6.5). Im Vergleich zu der Basisrezeptur B-60 wurde bei den modifizierten Mischungen bereits mit einer 10 %-igen Substitution der Flugasche durch den jeweiligen Feinstoff (KSM, HSM bzw. QM) eine um ca. 26 % steifere Konsistenz

(SF = 14 cm) unmittelbar nach Herstellung bestimmt (Abbildung 6.5). Die deutliche Abnahme der Konsistenz konnte zum einen auf die Granulometrie, insbesondere auf die kantige Kornform, und damit einhergehend auf den höheren Wasseranspruch dieser Feinstoffe gegenüber Flugasche zurückgeführt werden (vgl. Abschnitt 4.1.1). Zwar wies die Mischung mit der hüttensandmehlhaltigen Bindemittelkombination Z15:FA75:HSM10 (S_{m,B} = 5.790 cm²/g) im Vergleich zu der mit dem kalksteinfeinmehlhaltigen Bindemittel Z15:FA75:KSM10 (S_{m,B} = 6.130 cm²/g) eine um rd. 6 % geringere Feinheit bei gleicher Konsistenz (SF = 14 cm) auf, allerdings waren die Bruchkanten der Hüttensandmehlpartikel deutlich schärfer ausgebildet (vgl. Abbildung B.3 und Abbildung B.5 im Anhang B), wodurch das hüttensandmehlhaltige Bindemittelgemisch einen vergleichbar hohen Wasseranspruch W_{NS} erzielte (vgl. Tabelle 4.2).

Die Ausbreitmaße a der modifizierten zementhaltigen Mischungen lagen unmittelbar nach Herstellung $(t_M = 0 h)$ alle in der gleichen Größenordnung von 23 bis 25 cm, unabhängig von ihrer Bindemittelfeinheit (Abbildung 6.6). Analog zu den Basisrezepturen konnte diese Fließfähigkeit primär auf die thixotropen Eigenschaften der Bentonitsuspension in diesen Mischungen zurückgeführt werden. Es wird vermutet, dass durch die mechanische Einwirkung der 15 Hubschläge die Fließgrenze überwunden werden konnte, was zum Fließen des Mörtels führte.

Darüber hinaus konnte ein Einfluss des Mörtelalters auf die Konsistenz verzeichnet werden. Im Mörtelalter von 6 h waren die Mörtelmischungen mit einem Setzfließmaß SF von rd. 10 cm steif und standfest, was dem unteren Innendurchmesser des Setztrichters entspricht (Abbildung 6.5).



Abbildung 6.5: Korrelation zwischen Setzfließmaß SF und spezifischer Oberfläche des Bindemittels $S_{m,B}$ der modifizierten Mörtelrezepturen zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h



Abbildung 6.6: Korrelation zwischen Ausbreitmaß a und spezifischer Oberfläche des Bindemittels $S_{m,B}$ der modifizierten Mörtelrezepturen zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h

Im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit konnte ein Einfluss der Bindemittelfeinheit auf die Trichterauslaufzeit nicht eindeutig festgestellt werden. Im Gegensatz zur Konsistenz, welche sich bereits nach der Herstellung durch die Granulometrie der Feinstoffe signifikant änderte, waren die Trichterauslaufzeiten t_{Tr} zum jeweiligen Einbauzeitpunkt nahezu gleich. Diese lagen für alle modifizierten Mischungen zwischen 1,0 und 1,5 sec unmittelbar nach Herstellung.

Erst mit zunehmendem Mörtelalter konnte eine Änderung der Verarbeitbarkeit festgestellt werden. Während die hüttensandmehlbasierten Mischungen (Z15:FA40:HSM45) auch nach 6 h eine geringe Auslaufzeit t_{Tr} von 2,0 sec und gleichbedeutend eine geringe Viskosität aufwiesen, erzielten die Mörtelrezepturen mit quarzmehlhaltigem (Z15:FA65:QM20) bzw. kalksteinfeinmehlhaltigem (Z15:FA5:KSM80) Bindemittel um rd. 100 % höhere Auslaufzeiten. Hydratationseffekte aus Zement und Hüttensandmehl, welche durch eine versteifende Wirkung auf die Konsistenz auch die Verarbeitbarkeit des Mörtels nachteilig beeinflussen können, kamen anscheinend nicht ausreichend stark zum Tragen. Auch bei der Mischung mit hälftiger Substitution von Flugasche durch Zement (Z50:FA50) konnte ein Einfluss aus ersten Hydratationsreaktionen des Zements auf die Trichterauslaufzeit nicht festgestellt werden. Analog zur hüttensandmehlbasierten Mischung betrug auch hier die Auslaufzeit t_{Tr} rd. 2,0 sec.

Auffällig war, dass die Trichterauslaufzeiten der kalksteinfeinmehlhaltigen sowie quarzmehlhaltigen Mischungen mit zunehmender Liegedauer des Mörtels zunahmen ($t_{Tr} = 3,5$ bis 4,0 sec). Dies konnte auf die Granulometrie dieser Feinstoffe zurückgeführt werden. Im Vergleich zum Hüttensandmehl ($S_m = 6.210 \text{ cm}^2/\text{g}$) wiesen das Kalksteinfeinmehl ($S_m = 9.560 \text{ cm}^2/\text{g}$) und das Quarzmehl ($S_m = 7.700 \text{ cm}^2/\text{g}$) deutlich höhere Feinheiten bei nahezu gleicher Kornform (kantig) auf. Somit liegt die Vermutung nahe, dass eine zusätzliche, aber geringe Oberflächenreaktivität dieser feinen Feinstoffe zu einer Beschleunigung der Anfangshydration des Zements und damit einhergehend zu einem schnellen Ansteifen des Mörtels führte (vgl. Abschnitt 3.2).





Abbildung 6.7: Korrelation zwischen Trichterauslaufzeit t_{Tr} und Setzfließmaß SF der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche des Bindemittels $S_{m,B}$ zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h

6.3 Varianten in der Gesteinskörnung

Analog zu den Untersuchungen entsprechend Abschnitt 6.2 konnte auch hier eine ähnliche versteifende Wirkung auf die Konsistenz durch die Granulometrie der groben Gesteinskörnung beobachtet werden.

In Abbildung 6.8 ist der Zusammenhang von Ausbreitmaß a und Setzfließmaß SF der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von deren Körnungsziffer k unmittelbar nach Herstellung und zum Zeitpunkt $t_M = 6$ h dargestellt.



Abbildung 6.8: Korrelation zwischen Ausbreitmaß a und Setzfließmaß SF der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der Körnungsziffer k zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h

Mörtelmischungen mit einer geringen Körnungsziffer (k = 2,27 bzw. 2,67) und somit einer feinen Sieblinie (C8 bzw. Feinanteil = 22 %) wiesen bei gleicher Gesteinskörnung (Quarzsand und Quarzkies) sowie bei gleichem Wassergehalt eine geringfügig steifere Konsistenz gegenüber der Basisrezeptur (k = 2,91) auf. Die Setzfließmaße SF dieser feinkörnigen Mischungen betrugen unmittelbar nach Herstellung rd. 17 cm und das der Basisrezeptur etwa 19 cm. Allerdings lagen die einschlägigen Ausbreitmaße a in der gleichen Größenordnung von 24 cm, was im Wesentlichen der Thixotropie der Bentonitsuspension zugeschrieben werden konnte.

Eine Substitution des Sand/Kies-Gemisches (k = 2,91) durch Brechsand und Basaltsplitt mit einer größeren Körnungsziffer k von rd. 3,1 bewirkte eine signifikante Abnahme der Konsistenz. Das Setzfließmaß dieser Mischungen betrug zu beiden Zeitpunkten $t_M = 0$ h und 6 h durchweg 10 cm, was dem unteren Innendurchmesser des Setztrichters entspricht. Diese gewisse Grünstandfestigkeit wurde scheinbar durch die starke Verzahnung der eckigen und rauen Oberflächen der gebrochenen Gesteinskörner herbeigeführt, wodurch der innere Reibungswiderstand des Mörtels zunahm und dessen Fließbewegung erschwert wurde. Die Mörtelmischungen waren jedoch nur standfest, solange keine mechanischen Kräfte (15 Hubschläge) auf diese einwirkten. Hier trat nach Überwinden der Fließgrenze die Thixotropie der Bentonitsuspension in Kraft und die Mörtel wurden zum Fließen gebracht. Die Mischungen erreichten unmittelbar nach Herstellung Ausbreitmaße a zwischen 17 und 22 cm. Das Ausbreitmaß a der Basisrezeptur mit einem Sand/Kies-Gemisch (k = 2,91) betrug 24 cm.

Mit zunehmendem Mörtelalter wurden die Mörtelmischungen steifer und wiesen zum Zeitpunkt $t_M = 6$ h alle ein Setzfließmaß SF von rd. 10 cm auf, unabhängig von der Körnungsziffer und von der Art der Gesteinskörnung. Dies konnte auf die fortschreitende Hydratation des Zements zurückgeführt werden. Allerdings wurden nennenswerte Unterschiede in den Ausbreitmaßen a festgestellt. Während die Mörtelmischungen mit ausschließlich Sand/Kies-Gemischen noch ein Ausbreitmaß a von rd. 19 cm erreichten, wiesen die Mörtel mit Brechsand (k = 3,14) bzw. Brechsand und Basaltsplitt (k = 3,17) ein kleines Ausbreitmaß a von ca. 12 cm auf. Es wird angenommen, dass bei letzteren eine höhere Fließgrenze überschritten bzw. eine größere Schubspannung aufgebracht werden muss, um diese Mörtel zum Fließen zu bringen.

Im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit wiesen die Mörtelmischungen unmittelbar nach Herstellung mehr oder weniger vergleichbare Trichterauslaufzeiten (t_{Tr} = 1,0 bis 1,5 sec) auf, unabhängig von der Körnungsziffer und von der Art der Gesteinskörnung (Abbildung 6.9). Aufgrund des hohen Wasseranteils (W = 164 kg/m³) in den Mischungen kamen offensichtlich weder physikalische noch chemische Effekte ausreichend stark zum Tragen (vgl. Tabelle D.5 bis Tabelle D.7 im Anhang D)

Erst mit zunehmendem Mörtelalter konnte ein Einfluss der Granulometrie der Gesteinskörnung auf die Verarbeitbarkeit respektive Trichterauslaufzeit beobachtet werden. Während die Mörtelrezepturen mit Sand/Kies-Gemischen weiterhin nahezu gleiche Trichterauslaufzeiten über den geforderten Zeitraum von 6 h erzielten, waren die Trichterauslaufzeiten bei den Mörteln mit gebrochenen Gesteinskörnungen bereits im Alter von 120 min nicht mehr messbar, was auch die steifer werdende Konsistenz (SF = 10 cm und a = 14 cm) dieser Mischungen zu diesem Zeitpunkt belegte. Dies konnte einerseits auf erste Hydratati-

onsreaktionen des Zements und andererseits auf den im Vergleich zu den runden und glatten Gesteinskörnern höheren Wasseranspruch sowie auf die starke Verzahnung der kantigen und rauen Kornoberflächen zurückgeführt werden (vgl. Abschnitt 4.1.4).

Die Mischungen mit einem erhöhten Feinanteil 63-250 μ m der Gesteinskörnung (k = rd. 2,7) zeigten im Vergleich zu der grobkörnigen Basisrezeptur (k = 2,91) über 25 % höhere Werte ab dem Zeitpunkt t_M = 120 min. Die Trichterauslaufzeiten t_{Tr} lagen in einem Größenbereich zwischen 2,0 und 2,5 sec. Analog zu den Trichterauslaufzeiten der Mörtel mit gebrochener Gesteinskörnung waren scheinbar auch hier die fortschreitende Hydratation des Zements und der ca. 15 höhere Wasseranspruch der feinkörnigen Gemische für hohe Trichterauslaufzeiten verantwortlich (vgl. Abschnitt 4.1.4).



Abbildung 6.9: Korrelation zwischen Trichterauslaufzeit t_{Tr} und Setzfließmaß SF der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der Körnungsziffer k zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h

7 ENTWÄSSERUNGSVERHALTEN

7.1 Filterpressversuch nach DIN 4127

7.1.1 Basisrezepturen

Die ersten Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten wurden in Anlehnung an DIN 4127 [61] an den Basisrezepturen durchgeführt. Abweichend von der Norm wurden die Gesamtfiltratwasserabgaben $f_{7,5}$ in [M.-%], bezogen auf die eingebaute Probenmasse, ermittelt.

Die Filterpressversuche zeigten, dass der aktive Mörtel A-194 mit einem hohen W/S_{m,B}-Verhältnis von 1,76 in einem Einbauzeitraum von 90 min nach einer Druckbeaufschlagung von 7,5 min Gesamtfiltratwasserabgaben $f_{7.5}$ von 6,4 M.-% erreichte (Abbildung 7.1). Unter den gleichen Randbedingungen konnten hingegen beim inaktiven Mörtel mit einem geringen W/S_{m,B}-Verhältnis von 0,58 geringfügig höhere Gesamtfiltratwasserabgaben $f_{7.5}$ von 7,1 M.-% ausgepresst werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass die spezifische Oberfläche des Bindemittels für das Entwässerungsverhalten des Ringspaltmörtels von größerer Bedeutung war als der Wassergehalt des Mörtels. Bedingt durch die im Vergleich zu Flugasche (S_m = 5.580 cm²/g) größere spezifische Oberfläche des Zements (S_m = 6.560 cm²/g) und durch den hohen Anteil im Bindemittel (Z = 194 kg/m³) wies der aktive Mörtel eine höhere Bindemittelfeinheit S_{m,B} von 6.070 cm²/g auf als der inaktive Mörtel mit ausschließlich Flugasche (S_{m,B} = 5.580 cm²/g), was auch zu einem rd. 18 % höheren Wasseranspruch W_{NS} des Bindemittels (A-194) führte (vgl. Abschnitt 4.1.2). Ferner kann davon ausgegangen werden, dass zum Einbauzeitpunkt t_M = 90 min die Hydratation des Zements fortgeschritten war, wodurch ein Teil des Wassers zusätzlich chemisch gebunden wurde.



Abbildung 7.1: Gesamtfiltratwasserabgabe f_{7,5} der Basisrezepturen nach DIN 4127 [61] in Abhängigkeit vom W/S_{m,B}-Verhältnis zum Zeitpunkt t_M = 90 min

Die Gesamtfiltratwasserabgaben der bedingt aktiven Mörtel B-60 (W/S_{m,B} = 0,99) und B-120 (W/S_{m,B} = 1,35) lagen im gleichen Größenbereich ($f_{7,5}$ = ca. 7,8 M.-%). Zwar war der Zementgehalt des bedingt aktiven Mörtels B-120 um 100 % höher als beim B-60, jedoch wiesen beide Mischungen vergleichbare Bindemittelfeinheiten (S_{m,B} = 5.890 cm²/g bzw. 5.730 cm²/g) und auch vergleichbare Wasseransprüche der Bindemittelzusammensetzungen (W_{NS} = 21,5 M.-% bzw. 20,0 M.-%) auf (vgl. Abschnitt 4.1.2). Der ca. 8 % höhere Wassergehalt des Mörtels B-120 (W = 177 kg/m³) hatte keinen nennenswerten Einfluss auf die Filtratwasserabgabe.

7.1.2 Varianten im Bindemittelbereich

Um den Einfluss unterschiedlicher Bindemittelfeinheiten $S_{m,B}$ bei gleichem Wassergehalt W auf das Entwässerungsverhalten zu untersuchen, wurde die bedingt aktive Basisrezeptur B-120 in ihrer Bindemittelzusammensetzung durch Substitution von Flugasche (FA) durch Kalksteinfeinmehl (KSM) variiert. Wie in Abbildung 7.2 deutlich zu erkennen, nahm die massenbezogene Gesamtfiltratwasserabgabe mit zunehmender Substitutionsmenge von Flugasche durch Kalksteinfeinmehl im Mörtelalter von 90 min nahezu linear ab. Bei einer vollständigen Substitution von Flugasche durch Kalksteinfeinmehl ($S_{m,B} = 8.630 \text{ cm}^2/\text{g}$) konnte die massenbezogene Gesamtfiltratwasserabgabe gegenüber der Basisrezeptur um rd. 0,5 M.-% reduziert werden ($f_{7,5} = 7,5 \text{ M}.-\%$). Dies konnte auf die sehr hohe Feinheit des Kalksteinfeinmehls ($S_m = 9.560 \text{ cm}^2/\text{g}$) und damit verbunden auf den hohen Wasseranspruch des Bindemittels ($W_{NS} = 25,5 \text{ M}.-\%$) zurückgeführt werden. Der Wasseranspruch W_{NS} der Basisrezeptur B-120 mit einer deutlich geringen Bindemittelfeinheit $S_{m,B}$ von 5.890 cm²/g betrug nur 21,5 M.-% (vgl. Abschnitt 4.1.2).



Abbildung 7.2: Gesamtfiltratwasserabgabe $f_{7,5}$ der Basisrezeptur B-120 nach DIN 4127 [61] in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche des Bindemittels $S_{m,B}$ zum Zeitpunkt $t_M = 90$ min

7.2 Modifizierter Filterpressversuch

7.2.1 Basisrezepturen

In Abbildung 7.3 sind die massenbezogenen Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} der Basisrezepturen in Abhängigkeit vom W/S_{m,B}-Verhältnis unmittelbar nach Herstellung und zum Zeitpunkt t_M = 6 h (links) sowie die zeitliche Entwicklung der Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} (rechts) dargestellt. Die Entwässerungsversuche wurden mit einer modifizierten Filterpresse entsprechend Abschnitt 5.2.1 durchgeführt.

Unmittelbar nach Herstellung wurden bei den zementreichen Basisrezepturen A-194 (W/S_{m,B} = 1,76) und B-120 (W/S_{m,B} = 1,35) die höchsten Gesamtfiltratwasserabgaben f₃₀ zwischen 8,1 und 8,4 M.-% ermittelt. Ein geringes W/S_{m,B}-Verhältnis von 0,58 (I-0) resultierte hingegen in einer geringen Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ von 7,2 M.-%. Daraus kann abgeleitet werden, dass in diesem Stadium (t_M = 0 h) der Wassergehalt W des Mörtels einen größeren Einfluss auf das Entwässerungsverhalten des Ringspaltmörtels hatte als die spezifische Oberfläche des Bindemittels S_{m,B}. So konnten die hohen Gesamtfiltratwasserabgaben des aktiven Mörtels A-194 und des bedingt aktiven Mörtels B-120 auf den hohen Wassergehalt dieser beiden Mörtel (W = 207 kg/m³ bzw. 177 kg/m³) zurückgeführt werden. Allerdings wies der bedingt aktive Mörtel B-60 mit einem W/S_{m,B}-Verhältnis von 0,99 die geringste Wasserabgabe f₃₀ von 6,0 M.-% auf.

Ab einem Mörtelalter von 120 min wurden die Gesamtfiltratwasserabgaben des bedingt aktiven Mörtels B-60 sukzessiv geringer, während die Wasserabgaben der zementreichen Mörtel A-194 und B-120 nach Herstellung nahezu linear abnahmen. Zum Zeitpunkt $t_M = 6$ h lagen die Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} der zementhaltigen Basisrezepturen in einem engen Größenbereich zwischen 5,2 und 5,8 M.-%, bedingt durch die fortschreitende Hydratation des Zements.

Demgegenüber wurden bei der inaktiven Mörtelrezeptur I-0 über den gesamten Prüfzeitraum von 6 h keine signifikanten Änderungen der Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} erfasst. Diese war nahezu konstant bei 7,0 M.-%. Dies war im Wesentlichen auf die im Vergleich zum Zement geringere spezifische Oberfläche (FA: $S_m = 5.580 \text{ cm}^2/\text{g}$) und damit einhergehend auf den geringeren Wasseranspruch (FA: $W_{NS} = 19,5 \text{ M}$.-%) der Flugasche zurückzuführen (vgl. Abschnitt 4.1.1 und Abschnitt 4.1.2).

Auffällig war, dass der bedingt aktive Mörtel B-60 im Vergleich zu den anderen Basisrezepturen zu beiden Zeitpunkten ($t_M = 0$ h und 6 h) geringe Gesamtfiltratwasserabgaben f₃₀ aufwies. Zwar war der Zementgehalt (Z = 60 kg/m³) um das 2- bis 3-fache geringer als der der Basisrezepturen B-120 und A-194, allerdings wurde auch der Anfangswassergehalt dieser Mischung um ca. 21 % geringer konzipiert (gegenüber A-194). Es wird daher angenommen, dass bei einem geringen W/S_{m,B}-Verhältnis von 0,99 (B-60) die spezifische Oberfläche des Bindemittels hinsichtlich des Entwässerungsverhaltens des Ringspaltmörtels stärker zum Tragen kommt als der Wassergehalt des Mörtels. Dabei dominierte offenbar in den ersten 2 h das physikalische Wasserbindevermögen des Bindemittels, was durch die konstante Gesamtfiltratwasserabgabe von 6,0 M.-% zu begründen war. Mit der fortschreitenden Hydratation des Zements wurde ein Teil des Wassers zusätzlich chemisch gebunden, wodurch die Gesamtfiltratwasserabgabe im weiteren Verlauf kontinuierlich abnahm (f₃₀ = 5,2 M.-% zum Zeitpunkt t_M = 6 h).



Abbildung 7.3: Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} der Basisrezepturen in Abhängigkeit vom W/S_{m,B}-Verhältnis zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h (links) und in Abhängigkeit vom Mörtelalter t_M (rechts)

Betrachtet man die Filtratwasserabgaben f innerhalb der Entwässerungsdauer df von 30 min (Abbildung 7.4), so zeigt sich, dass zu Beginn der Druckbeaufschlagung bei allen drei Basisrezepturen (A-194, B-60, I-0) ein deutlicher Anstieg der Filtratwasserabgabe f zu beobachten war. Während die Filtratwasserabgaben f des bedingt aktiven (B-60) und inaktiven (I-0) Mörtels im gesamten Verlauf der Prüfung sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch nach 6 h kontinuierlich anstiegen, erreichte die Filtratwasserabgabe f des aktiven Mörtels (A-194) bereits nach ca. 12 min einen Wert von rd. 75 % der Gesamtfiltratwasserabgabe ($f_{30} = 8,4$ M.-%) zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h. Wie bereits vermutet, hing die hohe anfängliche Wasserabgabe im Wesentlichen mit dem höheren Anfangswassergehalt dieser Mischung ($W = 207 \text{ kg/m}^3 \text{ ge-}$ genüber 135 kg/m³ bzw. 164 kg/m³) zusammen. Nach einer kontinuierlichen Filtratwasserabgabe f des aktiven Mörtels war unmittelbar vor Beendigung des Entwässerungsversuchs (20. Minute) eine Stagnation der Wasserabgabe zu beobachten. Diese rührte vermutlich daher, dass durch die entwässerungsbedingte Konsolidierung des Mörtels und die damit einhergehende Änderung seiner Porenstruktur die Transportwege für die weitere Entwässerung sukzessiv verengt wurden. Ferner wird vermutet, dass neben der Granulometrie der Feinstoffe insbesondere die Mengenanteile der Feinstoffe im Bindemittel das Konsolidierungs- und damit einhergehend das Entwässerungsverhalten des Mörtels stark beeinflussen. Dies würde auch die kontinuierliche Filtratwasserabgabe f des bedingt aktiven Mörtels B-60 mit einem kleinen Z/FA-Verhältnis von 15:85 erklären. Das Z/FA-Verhältnis der aktiven Basisrezeptur A-194 betrug 50:50.



Abbildung 7.4: Zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgabe f der Basisrezepturen

7.2.2 Varianten im Bindemittelbereich

Die massenbezogenen Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} der Mörtelrezepturen mit unterschiedlicher Bindemittelfeinheit wiesen nennenswerte Unterschiede in ihren Ergebnissen auf (Abbildung 7.5). Anhand der annähernd horizontalen Trendlinie zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h kann abgeleitet werden, dass in diesem Stadium die spezifische Oberfläche des Bindemittels für das Entwässerungsverhalten des Ringspaltmörtels von sekundärer Bedeutung sein musste. So wiesen die Mörtel mit einem kalksteinfeinmehlhaltigen Bindemittel nahezu gleiche Gesamtfiltratwasserabgaben ($f_{30} = 6,2$ M.-%) auf, unabhängig von der Substitutionsmenge der Flugasche und somit unabhängig von der spezifischen Oberfläche des Bindemittels ($S_{m,B} = 6.130$ bis 8.910 cm²/g).

Erst mit zunehmendem Mörtelalter konnte ein Abwärtstrend der Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} ($t_M = 6$ h) beobachtet werden. Analog zu den Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} der Basisrezepturen führten scheinbar auch hier erste Hydratationsreaktionen des Zements zu einer Abnahme der Wasserabgabe. Deutlich zu erkennen war dieser Effekt bei den Mörteln mit Zement/Flugasche-Gemischen. Mit hälftiger Substitution von Flugasche durch Zement ($S_{m,B} = 6.070 \text{ cm}^2/\text{g}$) wurde eine gegenüber der Basisrezeptur ($S_{m,B} = 5.730 \text{ cm}^2/\text{g}$) rd. 25 % geringere Wasserabgabe ermittelt ($f_{30} = 3,9$ M.-%). Die zementfreie Mischung ($S_{m,B} = 5.580 \text{ cm}^2/\text{g}$) wies hingegen eine rd. 48 % höhere Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} von 5,8 M.-% bei gleichem Wassergehalt ($W = 164 \text{ kg/m}^3$) auf, bedingt durch die im Vergleich zum Zement geringe spezifische Oberfläche (FA: $S_m = 5.580 \text{ cm}^2/\text{g}$) und damit einhergehend durch den geringen Wasseranspruch (FA: $W_{NS} = 19,5$ M.-%) der Flugasche (vgl. Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2).

Eine Substitution von Flugasche durch Kalksteinfeinmehl (KSM) und Quarzmehl (QM) zeigte, dass die Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} mit einem hohen Anteil des jeweiligen Feinstoffes von 80 % (KSM) bzw. 20 % (QM) deutlich abnahmen ($f_{30} = 4,2$ M.-% bzw. 4,7 M.-% gegenüber der Basisrezeptur mit $f_{30} = 5,2$ M.-%). Die höhere Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} der kalksteinfeinmehlhaltigen Mischung

 $(S_{m,B} = 8.910 \text{ cm}^2/\text{g})$ konnte sowohl auf die größere spezifische Oberfläche des Kalksteinfeinmehls $(S_m = 9.560 \text{ cm}^2/\text{g})$ als auch auf den hohen Anteil im Bindemittel (~80 %) zurückgeführt werden.

Bei einer Substitution von Flugasche durch Hüttensandmehl hingegen nahmen die Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} mit zunehmendem Anteil des Hüttensandmehls (~45 %) um ca. 22 % gegenüber der Basisrezeptur zu. Dies konnte vor allem bei frühen Einbauzeiten des Mörtels ($t_M = 0$ h) beobachtet werden, wo die Hydratation des Zements und die des Hüttensandmehls für das Entwässerungsverhalten des Mörtels noch von untergeordneter Rolle waren. Daraus kann abgeleitet werden, dass neben der spezifischen Oberfläche des Bindemittels S_{m,B} auch die Feinheit der Feinstoffe einen wesentlichen Beitrag zum Entwässerungspotenzial des Ringspaltmörtels leisten. Während das Kalksteinfeinmehl und das Quarzmehl vergleichbare Feinheitsparameter x^c und n aufwiesen, war das Hüttensandmehl mit einem größeren Lageparameter x^c von 13,0 µm vergleichsweise gröber und stellte mit einem geringeren Steigungsmaß n von 1,15 keine wirksame Füllerkomponente dar (vgl. Abschnitt 4.1.1). Daraus kann abgeleitet werden, dass sich mit einem hohen Anteil an Hüttensandmehl (~45 %) mehr Hohlräume im Bindemittel gebildet haben und somit mehr freies Wasser zum Auspressen zur Verfügung stand.

Allerdings nahmen die Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} der hüttensandmehlhaltigen Mörtel mit fortschreitender Hydratation des Zements sowie des Hüttensandmehls kontinuierlich ab und lagen zum Zeitpunkt $t_M = 6$ h in einem Bereich zwischen 4,8 und 5,5 M.-%.

Darüber hinaus wurde bei den kalksteinfeinmehlhaltigen Mischungen ebenfalls eine kontinuierliche Abnahme der Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} mit zunehmendem Mörtelalter beobachtet. Analog zur steifer werdenden Konsistenz dieser Mörtel (vgl. Abbildung 6.6) wird auch hier vermutet, dass eine zusätzliche Oberflächenreaktivität des sehr feinen Kalksteinfeinmehls (S_m = 9.560 cm²/g) eine Beschleunigung der Anfangshydration des Zements bewirkte (vgl. Abschnitt 3.2). Zum Einbauzeitpunkt t_M = 6 h war die Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} des Mörtels mit dem höchsten Anteil an Kalksteinfeinmehl (S_{m,B} = 8.910 cm²/g) um rd. 32 % geringer im Vergleich zur Wasserabgabe unmittelbar nach Herstellung ($f_{30} = 4,2$ M.-% gegenüber 6,3 M.-%).



Abbildung 7.5: Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche des Bindemittels $S_{m,B}$ zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h (grau markierter Bereich)

7.2.3 Varianten in der Gesteinskörnung

Die Entwässerungsversuche an den Mörtelmischungen mit unterschiedlicher Körnungsziffer k der Gesteinskörnung zeigten zum Einbauzeitpunkt $t_M = 0$ h, dass eine hohe Körnungsziffer k von 3,63 im Vergleich zur Basisrezeptur (k = 2,91) zu rd. 13 % geringeren Gesamtfiltratwasserabgaben bei gleichem Wassergehalt führte (Abbildung 7.6). Mit einer kleinen Körnungsziffer (k = 2,27) hingegen lag die Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ auf gleichem Niveau wie die der Basisrezeptur (f₃₀ = 6,0 M.-%). Abweichungen von der Regelsieblinie B8 nach DIN 1045-2 [53] durch eine Erhöhung des Feinanteils 63-250 µm (k = rd. 2,7) wirkten sich nur geringfügig auf die Gesamtfiltratwasserabgabe aus (f₃₀ = 6,5 M.-%).

Hinsichtlich der Kornform der Gesteinskörnung wiesen Mörtel mit gebrochenen Gesteinskörnungen (k = rd. 3,1), Brechsand 0-2 mm und Basaltsplitt 2-8 mm, analog zu der groben Sieblinie des quarzitischen Sand/Kies-Gemisches (k = 3,63) ebenfalls geringe Gesamtfiltratwasserabgaben f₃₀ von ca. 5,1 M.-% auf. Gegenüber einem quarzitischen Sand/Kies-Gemisch mit vergleichbarer Sieblinie war dies unter anderem mit dem höheren Wasserbindevermögen der bruchrauen Oberflächen der gebrochenen Gesteinskörnungen bei gleichem Wassergehalt erklärbar (vgl. Abschnitt 4.1.4).



Abbildung 7.6: Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der Körnungsziffer k zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h

Des Weiteren wird vermutet, dass sich mit der Entwässerung die Feststoffe des Mörtels zum Wasseraustritt respektive zum umgebenden Boden hin bewegen. Dabei nimmt mit zunehmender Wasserabgabe der Abstand zwischen den Körnern bis zum unmittelbaren Kontakt ab. Bei gebrochenen Gesteinskörnungen kann es jedoch aufgrund ihrer eckigen und rauen Oberfläche zu starken Verzahnungen kommen, wodurch die Transportwege für die weiteren Entwässerungsprozesse des Ringspaltmörtels blockiert werden können. Diese Hypothese wird durch die zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgabe f dieser Mörtel gestützt, wie in Abbildung 7.7 demonstriert. Während bei der Basisrezeptur (k = 2,91) sowie bei den Mörteln mit erhöhtem Feinanteil (k = rd. 2,7) ein kontinuierlicher Anstieg der Filtratwasserabgabe zu erkennen war, erreichte der Mörtel mit Brechsand und Basaltsplitt bereits nach 4 min ca. 47 % seiner Gesamtfiltratwasserabgabe nach 30 min (f₃₀ = 5,1 M.-%). In diesem Stadium hatte sich das Korngerüst des Mörtels so weit verdichtet, dass im weiteren Verlauf die Filtratwasserabgabe nur noch mit reduzierter Intensität zunahm. Demgegenüber stieg die Filtratwasserabgabe f der erstgenannten Mörtelmischungen über die gesamte Entwässerungsdauer nahezu linear an und erreichte nach 30-minütiger Druckbeaufschlagung einen Wert von etwa 6,0 (k = 2,91) bzw. 6,5 M.-% (k = rd. 2,7).



Abbildung 7.7: Zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgabe f der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der Körnungsziffer k

Ferner geht mit der Entwässerung des Mörtels eine Volumenverminderung des Porenraums einher, welche im Wesentlichen aus der Umlagerung der Feststoffe zu einer dichten Lagerung resultiert. Erwartungsgemäß wurden bei den Mörteln mit einer groben Sieblinie (k = 3,63) bzw. mit gebrochenen Gesteinskörnungen (k = rd. 3,1), die zu beiden Einbauzeitpunkten (t_M = 0 h und 6 h) geringe Gesamtfiltratwasserabgaben f₃₀ aufwiesen, auch geringe Volumenabnahmen ΔV_M nach Gleichung 5.2 ermittelt (Abbildung 7.8). Unmittelbar nach Herstellung waren die Volumenabnahmen dieser Mörtel um bis zu 45 % geringer als die der Basisrezeptur ($\Delta V_M = 11,9$ Vol.-%).



Abbildung 7.8: Volumenabnahme ΔV_M der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ zum Zeitpunkt t_M = 0 h und 6 h

7.2.4 Entwässerungsdruck

Erwartungsgemäß wurden unter einem hohen Entwässerungsdruck ($p_f > 3,5$ bar) hohe Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} bei der Basisrezeptur B-60 nach 30-minütiger Druckbeaufschlagung ermittelt (Abbildung 7.9, links). Unmittelbar nach Herstellung lagen die Wasserabgaben f_{30} in einem Größenbereich zwischen 7,2 und 7,7 M.-%.

Im vergleichsweise niedrigen Druckbereich von 2,0 bis 3,5 bar konnte hingegen ein linearer Anstieg der Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} beobachtet werden. Die Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} des Mörtels bei $p_f = 2,0$ bar fiel um rd. 24 % geringer aus ($f_{30} = 5,4$ bar) als bei einem Entwässerungsdruck $p_f = 3,5$ bar ($f_{30} = 7,1$ bar). Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Filtratwasserabgabe f unter gleichen Druckbedingungen war auch hier ein kontinuierlicher Anstieg während der 30-minütigen Druckbeaufschlagung zu erkennen (Abbildung 7.9, rechts). Anhand dieser nahezu linearen Kurvenverläufe kann davon ausgegangen werden, dass bei einem niedrigen Entwässerungsdruck p_f von bis zu 3,5 bar eine gleichmäßige Konsolidierung des Ringspaltmörtels stattfand, welche allerdings nach der 30-minütigen Druckbeaufschlagung schlagung noch nicht abgeschlossen war.

Bei einem um 100 % höheren Druck von 7 bar wird vermutet, dass sich das Korngerüst des Mörtels vor allem in den tiefer liegenden Bereichen (zum Wasseraustritt hin) weitgehend verdichtet hat, sodass eine weitere Entwässerung des oberflächennahen (druckbeaufschlagten) Bereichs behindert wurde. Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgabe f, so zeigt sich, dass nach etwa 20-minütiger Druckbeaufschlagung ein abrupter Sprung im Kurvenverlauf der Filtratwasserabgabe stattfand, begleitet von einem hörbaren Luftaustritt an der Entwässerungsseite des Mörtels. Hier liegt die Vermutung nahe, dass sich unter der weiteren hohen Druckbeaufschlagung bei $p_f = 7,0$ bar Risse im Mörtelgefüge einstellten. Unter der Annahme, dass die Risse über die gesamte Höhe der Proben verliefen, wurde das im oberen Bereich der Mörtelprobe enthaltene Porenwasser schlagartig ausgepresst. Im weiteren Verlauf der Prüfung stagnierte die Filtratwasserabgabe f und erreichte nach Beendigung des Entwässerungsversuchs ($d_f = 30 \text{ min}$) einen Höchstwert von 7,7 M.-%. Unabhängig von der schlagartigen Wasserzunahme nach 20 min befand sich die Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ innerhalb des Größenbereichs der anderen Serien mit einem Entwässerungsdruck p_f von 3,5 bar bzw. 4,0 bar. Darüber hinaus waren die Mörtelproben nach 30-minütiger Druckbeaufschlagung insbesondere bei einem hohen Entwässerungsdruck ($p_f = 7,0$ bar) nahezu vollständig entwässert (Abbildung 7.10).

Mit zunehmendem Mörtelalter konnte ein Einfluss der Hydratation des Zements auf die Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} verzeichnet werden (Abbildung 7.9, links). Die Kurvenverläufe zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h sind nahezu identisch, jedoch waren die Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} der Mörtel in hohem Mörtelalter $t_M = 6$ h um ca. 15 % geringer. Die Wasserabgaben bei einem hohen Entwässerungsdruck $p_f > 3,5$ bar lagen auf einem nahezu gleichen Größenniveau ($f_{30} = 6,5$ M.-%). Analog zu den Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} zum Einbauzeitpunkt $t_M = 0$ h war auch hier ein linearer Anstieg der Wasserabgabe im niedrigen Druckbereich ($p_f = 2,0$ bis 3,5 bar) erkennbar. Nach 30-minütiger Druckbeaufschlagung bei $p_f = 2,0$ bar wies der Mörtel eine Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} von nur 4,4 M.-% auf.


Abbildung 7.9: Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h (links) und zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgabe f im Mörtelalter $t_M = 0$ h (rechts) bei der Basisrezeptur B-60 in Abhängigkeit vom Entwässerungsdruck pf



Abbildung 7.10: Nahezu vollständig entwässerte Mörtelprobe nach Beendigung des Entwässerungsversuchs ($p_f = 7,0$ bar und $d_f = 30$ min) zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h

Eine stufenartige Druckerhöhung $p_f = 2,0-4,0-6,0$ bar (10 min je Druckstufe bei einer Gesamtentwässerungsdauer $d_f = 30$ min) resultierte in einer linearen Zunahme der Filtratwasserabgabe f des Mörtels (Abbildung 7.9, rechts). Unmittelbar nach Herstellung entsprachen die Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} denen unter konstanter Druckbeaufschlagung von nur 2,5 bar, jedoch nur innerhalb der ersten 10 min der Druckbeaufschlagung (vgl. Abbildung 7.3). Im weiteren Verlauf ($d_f = 10$ min) nahm die Filtratwasserabgabe f mit einer Druckerhöhung p_f von 2,0 auf 4,0 bar um rd. 66 % zu ($f_{30} = 5,3$ M.-%). Bei einem konstanten Druck $p_f = 4,0$ bar hingegen steigt die Kurve steil an und erreicht nach 20 min einen Wert von 6,5 M.-%. Analog zur Filtratwasserabgabe f bei einem Druck p_f von 7,0 bar war auch bei einer weiteren Druckerhöhung p_f von 4,0 auf 6,0 bar ($d_f = 10$ min) ein sprunghafter Anstieg der Wasserabgabe f_{30} beim konstanten Druck ($p_f = 7,0$ bar) sowie beim stufenweisen Druck ($p_f = 2,0-4,0-6,0$ bar) auf gleichem Niveau $(f_{30} = 7,5 \text{ M}.-\%)$. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Entwicklung der Filtratwasserabgabe f des Ringspaltmörtels bei einem stufenweisen Druck p_f von 2,0 bis 4,0 bar nahezu identisch verläuft wie bei einem konstanten Druck im niedrigen Bereich zwischen 2,0 und 3,5 bar. Bei einer weiteren Druckerhöhung von 4,0 auf 6,0 bar stellen sich offenbar Risse im Gefüge ein, wodurch noch im oberen Bereich der Mörtelprobe enthaltenes Porenwasser schlagartig ausgepresst wird. Folglich war hier eine nahezu gleiche Gesamtfiltratwasserabgabe f_{30} zu erwarten wie bei einem konstant hohen Druck p_f von 7,0 bar.

7.2.5 Schichtdicke des Ringspaltmörtels

Mit zunehmender Schichtdicke des Ringspaltmörtels d_M nahmen die massenbezogenen Gesamtfiltratwasserabgaben f₃₀ nahezu linear ab (Abbildung 7.11). So betrug die Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ bei einer großen Schichtdicke d_M = 20 cm ca. 4,8 M.-% zum Einbauzeitpunkt t_M = 0 h. Bei einer 50 %-igen Reduzierung der Schichtdicke (d_M = 10 cm) hingegen nahm die Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ um rd. 51 % zu (f₃₀ = 7,4 M.-%). Die höchste Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ wurde am Mörtel mit der geringsten Schichtdicke d_M von rd. 6 cm ermittelt (f₃₀ = 8,6 M.-%).

Die geringen massenbezogenen Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} bei großen Schichtdicken d_M waren offenbar auf die über die Probenhöhe langen Transportwege des Porenwassers aus dem oberen Bereich der Mörtelprobe bis zum Wasseraustritt hin zurückzuführen, sodass die Entwässerung des Mörtels nach 30minütiger Druckbeaufschlagung noch nicht abgeschlossen war. Unter sonst gleichen Druckbedingungen ($p_f = 2,5$ bar und $d_f = 30$ min) entwässerte der Mörtel bei geringen Schichtdicken $d_M \le 10,0$ cm hingegen rascher, wie in Abbildung 7.12 deutlich zu erkennen.

Zu Beginn der Druckbeaufschlagung war bei geringen Schichtdicken ($d_M \le 10,0$ cm) ein deutlicher Anstieg der Filtratwasserabgabe f sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch zum Einbauzeitpunkt $t_M = 6$ h festzustellen. Bei $d_M = 6$ cm erreichte der Mörtel nach ca. 10 min bereits über 80 % ($t_M = 0$ h) seiner Gesamtfiltratwasserabgabe nach 30 min ($f_{30} = 8,6$ M.-%). Im weiteren Verlauf war eine Stagnation der Filtratwasserabgabe f zu verzeichnen. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Konsolidierung des Mörtels bereits nach ca. 10 min abgeschlossen war. Demgegenüber nahm die Filtratwasserabgabe f bei $d_M = 20$ cm während der gesamten Entwässerungsdauer ($d_f = 30$ min) kontinuierlich, aber mit reduzierter Intensität zu ($f_{30} = 4,8$ M:-%). Eine gleichmäßige Entwässerung konnte auch bei der Referenz-Schichtdicke d_M von 17 cm beobachtet werden ($f_{30} = 6,0$ M.-%).



Abbildung 7.11: Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ der bedingt aktiven Basisrezeptur B-60 in Abhängigkeit von der Schichtdicke der Mörtelprobe d_M



Abbildung 7.12: Zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgabe f der bedingt aktiven Basisrezeptur B-60 in Abhängigkeit von der Schichtdicke der Mörtelprobe d_M zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h (links) und $t_M = 6$ h (rechts)

Aufgrund der geringen Gesamtfiltratwasserabgaben f_{30} bei $d_M = 20$ cm bzw. 17 cm konnte auf einen noch hohen Wassergehalt im Mörtel geschlossen werden, wodurch der zu überbrückende Abstand zwischen den einzelnen Partikeln zu groß war, um Einflüsse aus der Granulometrie der Feststoffe und aus der Hydratation des Zements zu erfassen. Nach Beendigung des Entwässerungsversuchs ($d_f = 30$ min) waren die tiefer liegenden Schichten der Mörtelprobe (ca. 13 cm) nahezu vollständig entwässert, während auf der Mörteloberfläche eine Wasseranreicherung zu erkennen war, wie in Abbildung 7.13 dargestellt.



Abbildung 7.13: Wasseranreicherung auf der Mörteloberfläche (links) und unterschiedlich entwässerte Schichten (rechts) einer bedingt aktiven Mörtelprobe B-60 mit einer Schichtdicke $d_M = 20$ cm nach 30-minütiger Druckbeaufschlagung zum Einbauzeitpunkt $t_M = 0$ h

Betrachtet man die Wassergehalte W der einzelnen Schichten der entwässerten Mörtelprobe mit $d_M = 20 \text{ cm}$ (Abbildung 7.14), so zeigt sich, dass sich die Wassergehalte W der tiefer liegenden Schichten (R5 bis R8) auf einem nahezu gleichen Niveau befanden (W = ca. 6,7 M.-%). Die Wassergehalte W der Schichten R1 bis R4 nahmen zum Wasseraustritt hin ab, woraus ein Entwässerungsgradient im Mörtel abgeleitet werden konnte. Die visuelle Beobachtung der Wasseranreicherung auf der Mörteloberfläche konnte durch den noch hohen Wassergehalt W in der druckbeaufschlagten Zone (R1) von 9,3 M.-% bestätigt werden. Bei geringen Schichtdicken ($d_M = 17 \text{ cm}$ bzw. 10 cm) war der Entwässerungsgradient nicht so stark ausgeprägt wie bei $d_M = 20 \text{ cm}$. Zwar wurden im Vergleich zu den tiefer liegenden Schichten ten auch noch hohe Wassergehalte (W = ca. 8,5 M.-%) auf der druckbeaufschlagten Seite (R1 bzw. R3) ermittelt, allerdings zeigten sich in den tiefer liegenden Schichten mehr oder weniger vergleichbare Wassergehalte.



Abbildung 7.14: Wassergehalt W von entwässerten Schichten bei unterschiedlicher Schichtdicke der Mörtelprobe d_M

Während bei großen Schichtdicken ($d_M = 20$ cm) eine Wasseranreicherung auf der Mörteloberfläche festzustellen war, war der Mörtel mit einer sehr geringen Schichtdicke d_M von 6 cm nahezu vollständig entwässert (Abbildung 7.15). Über die gesamte Probenhöhe war ein nahezu konstanter Wassergehalt W von ca. 6,0 M.-% erkennbar. Der geringfügig höhere Wassergehalt in der druckbeaufschlagten Zone (W = 6,8 M.-%) resultierte wahrscheinlich aus einer Umlagerung von Feststoffen im Mörtel im Zuge seiner Entwässerung, was mit den ermittelten Trockenrohdichten der Schichten erklärbar war (vgl. Abschnitt 7.2.6). Die Trockenrohdichte ρ_{tr} der druckbeaufschlagten Seite betrug 1,839 kg/dm³, während die Schichten im tieferen Bereich der Mörtelprobe (zum Wasseraustritt hin) Trockenrohdichten ρ_{tr} von ca. 2,056 kg/dm³ aufwiesen.

Darüber hinaus wurden in der Mörteloberfläche unregelmäßige Rissverläufe festgestellt, welche scheinbar auf die starke Volumenabnahme der Mörtelprobe mit geringer Schichtdicke ($d_M = 6 \text{ cm}$) zurückzuführen waren (Abbildung 7.16). Die Volumenabnahme ΔV_M betrug zum Einbauzeitpunkt $t_M = 0$ h ca. 16,7 Vol.-%. Mit zunehmender Schichtdicke der Mörtelprobe d_M wurden die Volumenabnahmen geringer. So wurde bei einer großen Schichtdicke $d_M = 20$ cm nur noch eine Volumenabnahme ΔV_M von 10,8 Vol.-% ermittelt.

Mit zunehmendem Mörtelalter ($t_M = 6$ h) wurden – bedingt durch die fortschreitende Hydratation des Zements – zwar geringere Volumenabnahmen ΔV_M festgestellt, allerdings kam der Hydratationseinfluss offenbar bei geringeren Schichtdicken d_M stärker zum Tragen. Während die Volumenabnahmen ΔV_M bei einer Schichtdicke d_M = 20 cm sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch zum Zeitpunkt t_M = 6 h im gleichen Größenbereich lagen (V_M = ca. 10,0 Vol.-%), war die Volumenabnahme ΔV_M bei einer Schichtdicke d_M = 6 cm rd. 64 % geringer (V_M = 6,0 Vol.-% gegenüber 16,7 Vol.-% zum Zeitpunkt t_M = 0 h).



Abbildung 7.15: Nahezu vollständig entwässerte Mörtelprobe B-60 nach 30-minütiger Druckbeaufschlagung mit Rissbildung an der Oberfläche bei einer Schichtdicke d_M von ca. 6 cm



Abbildung 7.16: Volumenabnahme ΔV_M der bedingt aktiven Basisrezeptur B-60 in Abhängigkeit von der Schichtdicke der Mörtelprobe d_M

7.2.6 Feinstteilumlagerung im Mörtel

Die während der Entwässerung vermutete Umlagerung von Fein- und Feinstteilen im Mörtel konnte anhand der an einzelnen Schichten des entwässerten Mörtels ermittelten Partikelgrößenverteilungen nicht klar nachgewiesen werden (Abbildung 7.17). Vielmehr war eine Verschiebung von gröberen Feststoffen (d > 4 mm) von der druckbeaufschlagten Innenseite (R1) bis zur äußeren Entwässerungsseite (R8) erkennbar. So wurde in der Teilprobe aus der druckbeaufschlagten Innenseite ein Grobkornanteil von rd. 11 Vol.-% festgestellt, während dieser an der äußeren Entwässerungsseite rd. 16 Vol.-% betrug. In der Ausgangsmischung (B-60) betrug der Grobkornanteil rd. 21 Vol.-%. Demnach müssten die groben Feststoffe (d > 4 mm) in den Zwischenschichten (R2 bis R7) von innen nach außen verlagert worden sein. Die tiefer liegende Schicht R6 (zum Wasseraustritt hin) wies einen Grobkornanteil von rd. 26 Vol.-% auf, während im oberen Bereich (R3) ein Anteil von rd. 21 Vol.-% ermittelt wurde.

Im Feinstteilbereich (0-0,063 mm) waren die Partikelgrößenverteilungen der einzelnen Schichten (R1 bis R8) nahezu konvergent (Abbildung 7.18). Dabei lag der mittlere Korndurchmesser d₅₀ der Verteilung bei 50 %-Durchgang in einem engen Größenbereich zwischen 8,81 µm (R3) und 11,56 µm (R5). Der mittlere Korndurchmesser d₅₀ in der druckbeaufschlagten Zone (R1) betrug 9,65 µm, wohingegen an der Entwässerungsseite (R8) ein d₅₀ von 11,01 µm ermittelt wurde. Demnach konnte nicht ausgeschlossen werden, dass möglicherweise Feinstteile \leq 10,0 µm, entsprechend dem mittleren Korndurchmesser d₅₀ der Zementpartikel (vgl. Abbildung 4.1), an der Entwässerungsseite mit dem Filtratwasser ausgetragen wurden.



Abbildung 7.17: Korngrößenverteilung einzelner Schichten einer entwässerten Mörtelprobe B-60 zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h



Abbildung 7.18: Partikelgrößenverteilung einzelner Schichten einer entwässerten Mörtelprobe B-60 zum Zeitpunkt t_M = 0 h (Detailausschnitt aus Abbildung 7.17)

Die Ergebnisse zu den Rohdichten ρ_M (feucht und trocken) und zum Wassergehalt W der entwässerten Schichten zeigten eine entsprechende Umlagerung von Feststoffen im Mörtel von innen nach außen bzw. eine Verdichtung des Korngerüsts von außen nach innen (Abbildung 7.19). In der Tendenz entsprachen die Feuchtrohdichten ρ_f in etwa den Trockenrohdichten ρ_{tr} .

Wie in Abschnitt 7.2.5 erwähnt, konnte nach Beendigung der Entwässerungsversuche ($p_f = 2,5$ bar und $d_f = 30$ min) teilweise eine Wasseranreicherung auf der Mörteloberfläche beobachtet werden, was auf einen hohen Wasseranteil der druckbeaufschlagten Zone schließen ließ (vgl. Abbildung 7.14). Dies konnte in den hier durchgeführten Untersuchungen klar nachgewiesen werden. Während der Wassergehalt W in der druckbeaufschlagten Zone 9,3 M.-% betrug, war dieser in der gegenüberliegenden Entwässerungsseite um rd. 25 % geringer (W = 7,0 M.-%). Anhand der nahezu linearen Abnahme des Wassergehaltes zum Wasseraustritt hin musste sich demnach ein Entwässerungsgradient im Mörtel gebildet haben.

Allerdings zeigten sich an der druckbeaufschlagten Innenseite (R1) und an der äußeren Entwässerungsseite (R8) mehr oder weniger vergleichbare Rohdichten ρ_M . Daraus kann abgeleitet werden, dass analog zu den Korngrößenverteilungen eine Umlagerung der Feststoffe primär in den Zwischenschichten (R2 bis R7) stattgefunden haben muss. So wurden in der tiefen liegenden Schicht (R7) mit einem Wassergehalt W = 6,6 M.-% um rd. 20 % höhere Trockenrohdichten ρ_{tr} ermittelt als an der Innenseite mit W = 8,4 M.-% und ρ_{tr} = 2,001 kg/dm³. In der unentwässerten Ausgangsmischung betrugen der Wassergehalt W ca. 13,4 M.-% und die Trockenrohdichte ρ_{tr} 1,924 kg/dm³. Letzteres lag mit den Trockenrohdichten ρ_{tr} im oberen Bereich der entwässerten Mörtelprobe (R2 bis R4) auf einem nahezu gleichen Größenniveau (ρ_{tr} = ca. 2,008 kg/dm³), wohingegen in den Schichten R5 bis R7 eine nahezu lineare Zunahme der Trockenrohdichte ρ_{tr} zu verzeichnen war. Demnach verlagerten sich die schweren Grob- und Feinkörner in diesen Schichten (R5 bis R7) scheinbar in einem größeren Ausmaß als im oberen Bereich. Darüber hinaus kann angenommen werden, dass die tiefer liegenden Schichten (R5 bis R8) aufgrund des konstanten Wassergehaltes W von 6,7 M.-% weitgehend entwässert waren.



Abbildung 7.19: Rohdichte ρ_M (feucht und trocken) und Wassergehalt W einzelner Schichten einer entwässerten Mörtelprobe B-60 zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h

8 SCHERFESTIGKEITSENTWICKLUNG

8.1 Basisrezepturen

Die zementhaltigen Mörtel wiesen unmittelbar nach Herstellung sowie im Alter von 6 h im Vergleich zum inaktiven Mörtel höhere Scherfestigkeiten auf (Abbildung 8.1). Unmittelbar nach Herstellung wurden beim aktiven Mörtel mit dem höchsten $W/S_{m,B}$ -Wert von 1,76 die höchsten Scherfestigkeiten von 103,9 kN/m² ermittelt. Dagegen waren die Scherfestigkeiten des inaktiven Mörtels mit einem W/S_{m,B}-Wert von nur 0,58 um rd. 80 % niedriger ($\tau_M = 21,0 \text{ kN/m}^2$) und lagen zu allen Prüfzeitpunkten auf gleichem Größenniveau, was im Wesentlichen der Granulometrie der Flugasche zuzuschreiben war. Zwar wies die inaktive Rezeptur im Vergleich zum aktiven Mörtel einen um rd. 35 % geringeren Wassergehalt auf, allerdings war auch die zu benetzende Oberfläche bedingt durch die kugelige Kornform der Flugasche geringer ($S_{m,B} = 5.581 \text{ cm}^2/\text{g}$). Die spezifische Oberfläche des Zement/Flugasche-Gemischs des aktiven Mörtels betrug 6.071 cm²/g, was auf die höhere Feinheit des Zements zurückzuführen war. Es wird vermutet, dass sich der Hohlraumgehalt durch die Zement/Flugasche-Mischung infolge der unterschiedlichen Korngrößenverteilungen dieser Feinstoffe verringerte, sodass eine dichtere Packung erzielt werden konnte. Das heißt, gröbere Flugaschepartikel wurden durch feinere Zementpartikel ersetzt (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Scherfestigkeitszunahme der zementhaltigen Mörtel im Alter von 6 h resultierte höchstwahrscheinlich aus der fortschreitenden Hydratation des Zements und der puzzolanischen Reaktion der Flugasche. Dabei erreichte der aktive Mörtel einen Höchstwert von 147,9 kN/m².



Abbildung 8.1: Scherfestigkeit τ_M der Basisrezepturen in Abhängigkeit vom Wasser/Oberflächen-Verhältnis W/S_{m,B} zum Zeitpunkt t_M = 0 h und 6 h

8.2 Varianten im Bindemittelbereich

Die Scherfestigkeitsuntersuchungen an den Mörteln mit Substitution von Flugasche durch Zement (Z:FA) bzw. mit Substitution von Flugasche durch Kalksteinfeinmehl bei konstantem Zementgehalt (Z:FA:KSM) zeigten mit zunehmender Feinheit kontinuierlich anwachsende Scherfestigkeiten sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch im Alter von 6 h (Abbildung 8.2 und Abbildung 8.3). Folglich wurden die größten Scherfestigkeiten am Mörtel mit dem höchsten Kalksteinfeinmehlgehalt und damit einhergehend mit der größten Bindemittelfeinheit ($S_{m,B} = 8.820 \text{ cm}^2/\text{g}$) ermittelt. Unmittelbar nach Herstellung betrug die Scherfestigkeit dieser Mörtelmischung rd. 94,0 kN/m², während die Basisrezeptur mit ausschließlich Zement und Flugasche ($S_{m,B} = 5.728 \text{ cm}^2/\text{g}$) rd. 66 % geringere Scherfestigkeiten erreichte $(\tau_{\rm M} = 31.6 \text{ kN/m}^2)$. Grundsätzlich erzielten die hier verwendeten inerten Feinstoffe aufgrund ihrer Granulometrie einen physikalischen Füllereffekt. Dabei war die Füllerwirkung des Kalksteinfeinmehls mit einer höheren Feinheit (x' = 7,1 μ m und n = 1,28) größer als bei der vergleichsweise gröberen Flugasche $(x' = 21,0 \ \mu m \text{ und } n = 1,1)$. Das heißt, bei Substitution von Flugasche durch Kalksteinfeinmehl wurden gröbere Flugaschepartikel durch feinere Kalksteinfeinmehlpartikel ersetzt, wodurch die Packungsdichte erhöht werden konnte. Mit einer vergleichbaren Korngrößenverteilung von Flugasche und Zement $(x' = 16,0 \ \mu m \text{ und } n = 1,08)$ konnte dagegen eine geringfügig dichtere Packung der Feinstoffschüttung erzielt werden (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Bei Substitution von Flugasche durch Hüttensandmehl (Z:FA:HSM) konnte ein Einfluss der Bindemittelfeinheit auf die Scherfestigkeit sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch 6 h nach Herstellung nicht verzeichnet werden (Abbildung 8.2 und Abbildung 8.3). Vielmehr lagen die Scherfestigkeiten mit zunehmender Feinheit (5.791 cm²/g \leq S_{m,B} \leq 6.012 cm²/g) auf gleichem Größenniveau. Unmittelbar nach Herstellung erreichten diese Mörtelmischungen Scherfestigkeiten zwischen 69,5 kN/m² und 75,4 kN/m². Mit einer geringfügig geringeren Feinheit von 5.762 cm²/g wurden dagegen die höchsten Scherfestigkeiten von rd. 185,0 kN/m² zum gleichen Prüfzeitpunkt ermittelt. Da das Hüttensandmehl und die Flugasche ein annähernd gleiches Steigungsmaß der Korngrößenverteilung von n = 1,1 (FA) bzw. 1,15 (HSM) bei unterschiedlichen massebezogenen Oberflächen besaßen, wird vermutet, dass im Wesentlichen die scharfkantige Kornform der Hüttensandmehlpartikel maßgebend für die hohen Scherfestigkeiten war. Bedingt durch Verzahnungen dieser Partikel erhöhte sich der innere Reibungswiderstand und damit einhergehend der Scherwiderstand des Mörtels. Allerdings kam der zielführende "Verzahnungseffekt" nur bei einer geringen Substitutionsmenge von Flugasche durch Hüttensandmehl (Z15:FA78:HSM7, $S_{m,B} = 5.762 \text{ cm}^2/\text{g}$ zum Tragen. Mit steigender Substitutionsmenge bei konstantem Zementgehalt (Z15:FA39:HSM46, $S_{m,B} = 6.012 \text{ cm}^2/\text{g}$) verringerte sich die Packungsdichte, was auf die im Vergleich zur Flugasche ($S_m = 5.581 \text{ cm}^2/\text{g}$) größere Oberfläche der kantigen Hüttensandmehlpartikel $S_m = 6.206 \text{ cm}^2/\text{g}$ und damit einhergehend mehr Hohlräume zurückgeführt werden konnte (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Die Substitution von Flugasche durch Quarzmehl (Z:FA:QM) führte mit steigender Feinheit zu keiner nennenswerten Scherfestigkeitszunahme unmittelbar nach Herstellung. Die Scherfestigkeiten lagen in einem Größenbereich zwischen 50,6 kN/m² und 59,0 kN/m². Erst mit zunehmender Liegezeit konnte ein

Einfluss der Feinheit auf die Scherfestigkeit festgestellt werden. Im Alter von 6 h wurden rd. 2,8-fach höhere Scherfestigkeiten am Mörtel mit einer Bindemittelfeinheit Sm,B von 6.143 cm²/g ermittelt $(\tau = 152,7 \text{ kN/m}^2),$ während die Mörtel mit einer geringeren Bindemittelfeinheit $(5.792 \text{ kN/m}^2 \le S_{m,B} \le 5.951 \text{ kN/m}^2)$ Scherfestigkeiten zwischen 96,6 kN/m² und 111,6 kN/m² aufwiesen. Eine Festigkeitszunahme mit zunehmendem Alter konnte auch bei den Mörteln mit kalksteinfeinmehlhaltigem Bindemittel (Z:FA:KSM) und mit steigender Bindemittelfeinheit verzeichnet werden. Zum Prüfzeitpunkt $t_M = 6$ h lagen die Scherfestigkeiten des Mörtels mit der höchsten Bindemittelfeinheit $S_{m,B}$ von 8.820 cm²/g um ca. 62 % höher als unmittelbar nach Herstellung ($\tau_{\rm M} = 94,0$ kN/m²). Wie aus einschlägiger Literatur [51] hervorging, wurden bei inerten Zusatzstoffen mit sehr hoher Feinheit Reaktionsprodukte beobachtet, welche eine Beschleunigung der Anfangshydratation des Zements bewirkten. Somit liegt die Vermutung nahe, dass die hier verwendeten, inerten Feinstoffe (KSM: $S_m = 9.557 \text{ cm}^2/\text{g}$ und QM: S_m = 7.692 cm²/g) zusätzlich zu ihrer physikalischen Füllerwirkung in geringem Maße gefügebildende Reaktionsprodukte lieferten.

Erwartungsgemäß wurden an den Mörteln mit hüttensandmehlhaltigem Bindemittel (Z:FA:HSM) und mit einer Bindemittelfeinheit S_{m,B} von 5.762 cm²/g die höchsten Scherfestigkeiten von 205,5 kN/m² zum Prüfzeitpunkt t_M = 6 h gemessen. Dies konnte zum einen auf die fortschreitende Hydratation des Zements und zum anderen auf die Hydratation des Hüttensandmehls zurückgeführt werden. Dabei wurden die nach der Konsolidierung verbliebenen Hohlräume durch die entstandenen Hydratationsprodukte (CSH-Phasen) überbrückt und das Gefüge konnte sich mit zunehmender Festigkeit stabilisieren. Der hüttensandmehlhaltige Mörtel mit einer vergleichsweise hohen Bindemittelfeinheit S_{m,B} von 6.012 cm²/g wies dagegen ca. 24 % geringere Scherfestigkeiten auf (τ_M = 155,6 kN/m²), was der Granulometrie des Hüttensandmehls zuzuschreiben war. Mit der hohen Substitutionsmenge von Flugasche durch Hüttensandmehl (Z15:FA39:HSM46) wurden zwar gröbere Flugaschepartikel (x' = 21,0 µm) durch feinere Hüttensandmehlpartikel (x' = 13,0 µm) bei vergleichbarer Korngrößenverteilung ersetzt, allerdings enthielt der Hüttensand mit seiner kantigen Kornform mehr Hohlräume. Nach der Konsolidierung und mit fortschreitender Hydratation von Zement und Hüttensand konnten die verbliebenen Hohlräume wahrscheinlich nicht hinreichend mit festigkeitsbildenden Reaktionsprodukten gefüllt werden, um die Gefügedichtigkeit der Feinstoffmatrix zu erhöhen.



Abbildung 8.2: Scherfestigkeit τ_M der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche des Bindemittels S_{m,B} zum Zeitpunkt t_M = 0 h





8.3 Varianten in der Gesteinskörnung

Analog zu den Scherfestigkeiten der Mörtel mit unterschiedlicher Bindemittelfeinheit wurde auch hier ein Einfluss der Granulometrie der Gesteinskörnung auf die Scherfestigkeitsentwicklung verzeichnet (Abbildung 8.4). Hinsichtlich der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung führte eine grobe Sieblinie (k = 3,63) sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch nach einer Liegezeit von 6 h zu keiner nennenswerten Scherfestigkeitszunahme im Vergleich zur Basisrezeptur mit der Sieblinie B8 (k = 2,91). Unmittelbar nach Herstellung betrugen die Scherfestigkeiten dieser Mörtel rd. 32,0 kN/m². Bei einer feinen Sieblinie (k = 2,27) hingegen nahmen die Scherfestigkeiten zum gleichen Prüfzeitpunkt um rd. 20 % ab $(\tau_M = 25,2 \text{ kN/m}^2)$. Dies konnte damit begründet werden, dass bei der Sieblinie A8 mit dem höchsten Grobkornanteil (d ≥ 4 mm) von 39 Vol.-% die groben Gesteinskörner aufgrund ihres verhältnismäßig geringen Abstands untereinander während der entwässerungsbedingten Konsolidierung des Mörtels bis zum unmittelbaren Kontakt umgelagert werden konnten. Als Folge konnten die auf den Mörtel einwirkenden Scherkräfte über das grobe Korngerüst, d.h. von Korn zu Korn, direkt abgeleitet werden. Die Feststoffumlagerung spiegelte sich auch in den Gesamtfiltratwasserabgaben und Volumenabnahmen der Mörtel wider. Während bei den grobkörnigen Mörteln die Filtratwasserabgabe durch die sukzessive Verengung der Transportwege bis zur Stagnation zunahm, konnte bei den feinkörnigen Mörteln ein kontinuierlicher Anstieg der Filtratwasserabgabe während der gesamten Entwässerungsdauer beobachtet werden (vgl. Abschnitt 7.2.3).



Abbildung 8.4: Scherfestigkeit τ_M der modifizierten Mörtelrezepturen in Abhängigkeit von der Körnungsziffer k zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h

Eine Erhöhung des Feinanteils (0,063-0,25 mm) von 8 auf 16 % (k = 2,76), bezogen auf die Gesamtmasse der Gesteinskörnung, ergab im Vergleich zur Basisrezeptur (k = 2,91) rd. 55 % höhere Scherfestigkeiten unmittelbar nach Herstellung (τ_M = 31,6 kN/m²). Eine weitere Erhöhung des Feinanteils auf 22 % bei konstantem Anteil der Korngruppe 2-8 mm resultierte in ca. 47 % höhere Scherfestigkeiten. Daraus kann abgeleitet werden, dass durch einen erhöhten Feinanteil der Gesteinskörnung eine höhere Packungsdichte erzielt werden konnte und damit einhergehend hohe Scherfestigkeiten τ_M zwischen rd. 46,0 kN/m² und 49,0 kN/m² erreicht werden konnten.

Nach einer Liegezeit von 6 h betrugen die Scherfestigkeiten τ_M der Mörtel mit k = rd. 2,7 ca. 78,0 kN/m² und lagen um rd. 8 % höher als der Basisrezeptur ($\tau_M = 71,9$ kN/m²), was im Wesentlichen auf erste Hydratationsreaktionen des Zements zurückzuführen war.

Bei Substitution des Sand/Kies-Gemisches (k = rd. 2,91) durch Brechsand und Basaltsplitt (k = rd. 3,1) wurden sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch nach einer Liegezeit von 6 h die höchsten Scherfestigkeiten ermittelt. Unmittelbar nach Herstellung wurden die höchsten Werte zwischen 66,5 kN/m² und 72,4 kN/m² an den Mörteln mit Basaltsplitt 2-8 mm (k = 3,11) bzw. mit Brechsand 0-2 mm (k = 3,14) gemessen. Demgegenüber wies der Mörtel mit vollständiger Substitution der Gesteinskörnung durch Brechsand und Basaltsplit (k = 3,17) bis zu 32 % geringere Scherfestigkeiten auf (τ_M = 49,4 kN/m²). Wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, fällt die Packungsdichte bei gebrochenen Gesteinskörnern geringer aus als bei runden Körnern mit gleichem Durchmesser und mit gleicher Verdichtungsenergie. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die geringen Scherfestigkeiten des Mörtels mit ausschließlich gebrochener Gesteinskörnung (Brechsand und Basaltsplitt) durch die geringe Packungsdichte des Mörtels hervorgerufen wurden. Ferner wurden bei den Mörteln mit Brechsand und/oder Basaltsplitt zum Teil Fehlstellen im Gefüge festgestellt, wie in Abbildung 8.5 exemplarisch an einer Probe zur Beurteilung der Sedimentationsstabilität demonstriert.



Abbildung 8.5: Schnittflächen einer bedingt aktiven Mörtelprobe B-60 (BS0/2 + K2/8) mit Fehlstellen im Gefüge (links), Detailausschnitt einer Fehlstelle im Mörtelgefüge (rechts)

Die Bildung solcher Fehlstellen hing höchstwahrscheinlich mit den schlechten Fließeigenschaften dieser Mörtel zusammen (vgl. Abschnitt 6.3). Zum einen weisen gebrochene Gesteinskörnungen bedingt durch ihre bruchraue Oberfläche einen höheren Wasseranspruch bei gleichem Wassergehalt auf als gedrungene und glatte Gesteinskörner, wodurch der Mörtel steifer wird. Zum anderen erschweren starke Verzahnungen der eckigen und rauen Kornoberflächen das Fließverhalten des Ringspaltmörtels, wodurch der innere Reibungswiderstand des Mörtels zunimmt (vgl. Abschnitt 4.1.3 und Abschnitt 4.1.4). Das Setzfließmaß SF der Mörtel mit gebrochenen Gesteinskörnungen betrug ca. 10 cm, sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch zum Einbauzeitpunkt $t_M = 6$ h (vgl. Abbildung 6.8).

Auch nach einer Liegezeit von 6 h wurden bei dem Mörtel mit Brechsand und Basaltsplitt (BS0/2 + Sp2/8) die geringsten Scherfestigkeiten von ca. 117,0 kN/m² ermittelt, während der Mörtel mit einer Substitution der groben Gesteinskörnung durch Basaltsplitt (QS0/2 + Sp2/8) rd. 31 % höhere Scherfestigkeiten aufwies (τ_M = 152,7 kN/m²). Eine Substitution der feinen Gesteinskörnung durch Brechsand (BS0/2 + K2/8) führte zu geringfügig höheren Scherfestigkeiten von ca. 127,2 kN/m². Die hohen Scherfestigkeiten der Mörtel mit partieller Substitution der Gesteinskörnung durch Brechsand und Basaltsplitt höheren Packungsdichten. Es wird vermutet, dass beim Mörtel mit Quarzsand und Basaltsplitt (QS0/2 + Sp2/8) größere Hohlräume zwischen den gebrochenen Gesteinskörnern durch den feinen, vergleichsweise gedrungenen Quarzsand 0-2 mm größtenteils gefüllt werden konnten.

8.4 Entwässerungsdruck

Analog zu den hohen Gesamtfiltratwasserabgaben entsprechend Abschnitt 7.2.4 waren auch hier unter einem Entwässerungsdruck $p_f > 3,5$ bar hohe Scherfestigkeiten zu erwarten (Abbildung 8.6). Diese lagen sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch nach einer Liegezeit von 6 h auf gleichem Größenniveau ($\tau_M = rd. 93,0 \text{ kN/m}^2$ bei $t_M = 0$ h und $\tau_M = rd. 118,0 \text{ kN/m}^2$ bei $t_M = 6$ h). Demgegenüber konnte in einem niedrigen Druckbereich von 2,0 bar bis 3,5 bar eine nahezu lineare Scherfestigkeitszunahme beobachtet werden, was auf das entwässerungsbedingte Konsolidierungsverhalten des Mörtels zurückgeführt werden konnte.

Bei einem niedrigen Entwässerungsdruck p_f von bis zu 3,5 bar war die Konsolidierung des Mörtels nach Beendigung des Entwässerungsversuchs noch nicht abgeschlossen, was sich in einer kontinuierlichen Zunahme der Filtratwasserabgabe während der gesamten Entwässerungsdauer widerspiegelte (vgl. Abbildung 7.9). Es kann davon ausgegangen werden, dass die während der Konsolidierung eintretende Feststoffumlagerung nur bis zu einem gewissen Grad stattfand und damit kein ausreichend stabiles Korngerüst zur Lastabtragung gebildet werden konnte. Die Scherfestigkeiten lagen unmittelbar nach Herstellung in einem Größenbereich zwischen 30,0 kN/m² (p_f = 2,0 bar) und 61,0 kN/m² (p_f = 3,5 bar).

In einem Druckbereich p_f von 4,0 bar bis 7,0 bar, unabhängig von der Art der Druckbeaufschlagung (konstant, stufenartig), konsolidierte der Mörtel hingegen stärker. Dabei nahm die Packungsdichte des Mörtels mit der Verringerung der wassergefüllten Hohlräume zu. Gleichzeitig wurden die Transportwege für die weiteren Entwässerungsprozesse sukzessiv verengt, was sich aus der stagnierenden Filtratwasserabgabe über die Entwässerungsdauer ableiten ließ (vgl. Abbildung 7.9). Unter einem Entwässerungsdruck p_f von 7,0 bar erreichte der Mörtel unmittelbar nach Herstellung den Höchstwert von 94,9 kN/m² ($\tau_M = 31,6$ kN/m²). Die Kurvenverläufe zum Zeitpunkt t_M von 0 h (unmittelbar nach Herstellung) und zum Zeitpunkt t_M von 6 h waren nahezu identisch, allerdings wiesen die Ergebnisse der Scherfestigkeiten signifikante Unterschiede auf. Analog zu den Scherfestigkeiten unter einem Entwässerungsdruck $p_f \ge 4,0$ bar unmittelbar nach Herstellung lagen die Scherfestigkeiten auch nach einer Liegezeit von 6 h auf gleichem Größenniveau ($\tau_M = rd. 118,0 \text{ kN/m}^2$). Eine Festigkeitszunahme konnte ebenfalls im niedrigen Druckbereich $p_f \le 2,5$ bar festgestellt werden. Die Scherfestigkeiten waren um rd. 83 % höher gegenüber denen unmittelbar nach Herstellung ($\tau_M = 30,0 \text{ kN/m}^2$). Die mit zunehmendem Mörtelalter anwachsenden Scherfestigkeiten konnten im Wesentlichen auf die fortschreitende Hydratation des Zements zurückgeführt werden.



Abbildung 8.6: Scherfestigkeit τ_M der bedingt aktiven Basisrezeptur B-60 in Abhängigkeit vom Entwässerungsdruck pf zum Zeitpunkt $t_M = 0$ h und 6 h

8.5 Schichtdicke des Ringspaltmörtels

Wie in Abbildung 8.7 ersichtlich, nahm die Scherfestigkeit τ_M mit zunehmender Schichtdicke des Mörtels d_M unmittelbar nach Herstellung sowie nach einer Liegezeit von 6 h nahezu linear ab. Diese Abnahme korrelierte mit der Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ des Mörtels (vgl. Abbildung 7.11). So wirkte sich zum Prüfzeitpunkt t_M = 0 h eine hohe Gesamtfiltratwasserabgabe des Mörtels (f₃₀ = 8,6 M.-%) mit einer geringen Schichtdicke d_M von 6,3 cm auch in Form einer großen Scherfestigkeit aus (τ_M = 77,3 kN/m²). Demgegenüber wurden am Mörtel mit einer rd. 3-fach höheren Schichtdicke (d_M = 20,0 cm) die geringste Gesamtfiltratwasserabgabe f₃₀ von 4,8 M.-% und damit auch die geringsten Scherfestigkeiten von 27,4 kN/m² ermittelt. Nach Beendigung des Entwässerungsversuchs wurde eine starke Wasseranreicherung an der druckbeaufschlagten Seite dieser Serie festgestellt, welche mit einem hohen Wassergehalt (R1: W = 8,7 M.-%) dieser Schicht nachgewiesen werden konnte (vgl. Abschnitt 7.2.5). Mit zunehmender Schichttiefe (zum Wasseraustritt hin) nahm der Wassergehalt sukzessiv ab (R8: W = 6,6 M.-%).

Der Mörtel mit der geringsten Schichtdicke d_M von 6,3 cm wies hingegen einen nahezu konstanten Wassergehalt W von 6,2 M.-% über die gesamte Probenhöhe auf. Daraus ließ sich ableiten, dass die Konsolidierung des Mörtels nach Beendigung des Entwässerungsversuchs abgeschlossen sein musste. Dies konnte auch anhand der zeitlichen Änderung der Filtratwasserabgabe dieser Serie dargelegt werden (vgl. Abbildung 7.12). Unmittelbar nach der Druckbeaufschlagung (d_f = ca. 10 min) erreichte der Mörtel bereits über 80 % der Gesamtfiltratwasserabgabe (f₃₀ = 8,6 M.-%) zum Zeitpunkt t_M = 0 h. Mit der hohen Filtratwasserabgabe ging zudem eine starke Volumenverringerung des Mörtels ($\Delta V_M = 16,7$ Vol.-%) einher. Die Volumenabnahme ΔV_M des Mörtels mit einer Schichtdicke d_M von 20 cm betrug 10,8 Vol.-% (vgl. Abbildung 7.16).

Mit zunehmender Liegezeit t_M des Mörtels wurden kontinuierlich anwachsende Scherfestigkeiten τ_M von bis zu 129,2 kN/m² (t_M = 6 h) bei einer Schichtdicke d_M von 6,3 cm bestimmt. Zwar wurden am Mörtel mit einer rd. 3-fach höheren Schichtdicke (d_M = 20 cm) ebenfalls hohe Scherfestigkeiten ermittelt, allerdings lagen diese mit rd. 54 % deutlich geringer ($\tau_M = 59,7$ kN/m²). Grundsätzlich konnte die Festigkeitszunahme auf die fortschreitende Hydratation des Zements zurückgeführt werden. Es wird angenommen, dass mit der zusätzlich chemischen Wasserbindung von Zement zum Zeitpunkt t_M von 6 h (Hydratationsgrad) im Vergleich zum Zeitpunkt t_M von 0 h (überwiegend physikalisch gebundene Wassermenge von Zement) weniger freies Wasser zum Auspressen zur Verfügung stand. Dies zeigten auch die geringen Gesamtfiltratwasserabgaben der Mörtel mit unterschiedlicher Schichtdicke d_M zum Zeitpunkt t_M von 6 h (vgl. Abbildung 7.11).



Abbildung 8.7: Scherfestigkeit τ_M der bedingt aktiven Basisrezeptur B-60 in Abhängigkeit von der Schichtdicke der Mörtelprobe d_M zum Zeitpunkt t_M = 0 h und 6 h

8.6 Scherfestigkeitsgradient

Die graduelle Entwässerung f der Mörtel spiegelte sich auch in den Scherfestigkeiten τ_M in unterschiedlichen Tiefen der entwässerten Proben wider, wie in Abbildung 8.8 an einer bedingt aktiven Probe B-60 (links) und an einer inaktiven Probe I-0 (rechts) dargestellt.

Beim bedingt aktiven Mörtel nahmen die Scherfestigkeiten τ_M mit zunehmender Probentiefe, d.h. Einbautiefe der Scherflügel h_F ab Mörteloberfläche, sowie mit zunehmender Liegezeit t_M nahezu linear zu.

Unmittelbar nach Herstellung ($t_M = 0$ h) betrugen die Scherfestigkeiten kurz unterhalb der druckbeaufschlagten Oberfläche ($h_F = 40$ mm) ca. 46,7 kN/m² und an der gegenüberliegenden, entwässerten Seite ($h_F = 130$ mm) ca. 85,7 kN/m². Dabei lagen die Scherfestigkeiten in der druckbeaufschlagten Zone h_F von 40 mm bis 60 mm in einem relativ engen Größenbereich mit einer maximalen Differenz von rd. 8,0 kN/m². Erst mit zunehmender Tiefe $h_F \ge 80$ mm wurde ein deutlicher Alterseinfluss t_M auf die Scherfestigkeitsentwicklung festgestellt. Erwartungsgemäß wurden die höchsten Scherfestigkeiten nach einer Liegezeit t_M von 6 h in einem Tiefenbereich von 80 mm ($\tau_M = 93,0$ kN/m²) bis 130 mm ($\tau_M = 120,0$ kN/m²) ermittelt.

Die mit zunehmendem Mörtelalter t_M kontinuierlich anwachsenden Scherfestigkeiten τ_M konnten auf die fortschreitende Hydratation des Zements zurückgeführt werden. Da im Laufe der Hydratation ein Teil des Wassers chemisch in den Hydratphasen eingebunden wird, konnte angenommen werden, dass weniger (wassergefüllte) Hohlräume im Gefüge vorlagen. Dies erklärte die geringer werdenden Gesamtfiltratwasserabgaben des bedingt aktiven Mörtels mit zunehmender Liegezeit (vgl. Abbildung 7.3, rechts).

Beim inaktiven Mörtel hingegen war die Gradientenbildung (von innen nach außen) weniger stark ausgeprägt. Wie aus Abbildung 8.8 (rechts) zu ersehen ist, waren auch hier die Scherfestigkeiten jeweils kurz unterhalb der druckbeaufschlagten Oberfläche ($h_F = 40 \text{ mm}$) niedriger als an der entwässerten Seite ($h_F = 130 \text{ mm}$). Dabei lagen die Scherfestigkeiten in den jeweiligen Tiefen auf einem nahezu gleichen Größenniveau, unabhängig vom Mörtelalter t_M. In der druckbeaufschlagten Oberfläche ($h_F = 40 \text{ mm}$) wurden Scherfestigkeiten τ_M von ca. 19,2 kN/m² ($t_M = 1 \text{ h}$ bis 6 h) ermittelt. Mit zunehmender Tiefe h_F von 80 mm stiegen die Scherfestigkeiten bis zu einem Wert von ca. 32,2 kN/m² nahezu linear an. An der entwässerten Seite ($h_F = 100 \text{ mm}$ bis 130 mm) stagnierte die Scherfestigkeitsentwicklung und der inaktive Mörtel erreichte einen Höchstwert von 38,6 kN/m² zum Prüfzeitpunkt t_M von 4 h.

Die geringfügige Festigkeitszunahme resultierte höchstwahrscheinlich aus dem Konsolidierungsverhalten des Mörtels. Mit der druckbedingten Entwässerung konsolidierten zunächst die tiefer liegenden Schichten (zum Wasseraustritt hin), wodurch die Packungsdichte dieser Schichten im Vergleich zur druckbeaufschlagten Zone zunahm. Beim bedingt aktiven Mörtel wirkten sich hingegen die Umlagerungen der Bindemittelfeinstteile stärker auf die Packungsdichte und damit auf die Gradientenbildung aus. Durch die unterschiedliche Kornform von Zement (gebrochen) und Flugasche (kugelig) bei vergleichbarer Korngrößenverteilung konnten sich offenbar physikalische Füllereffekte einstellen (vgl. Abschnitt 4.1.1).





Abbildung 8.8: Scherfestigkeiten τ_M in unterschiedlichen Tiefen einer bedingt aktiven Mörtelprobe B-60 (links) und einer inaktiven Mörtelprobe I-0 (rechts) nach Entwässerung zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_M

8.7 Scherfestigkeiten im Rahmenscherversuch

Grundsätzlich zeigten die Kurven unabhängig vom Prüfzeitpunkt t_M ein ähnliches Verhalten während des Abschervorgangs, wie in Abbildung 8.9 exemplarisch an einer bedingt aktiven Mörtelprobe B-60 dargestellt. Dabei konnte der Abschervorgang in drei wesentliche Phasen unterteilt werden:

- 1. Gefügewiderstand
- 2. Strukturänderung durch Umlagerung von Feststoffen
- 3. Erreichen der kritischen Scherfestigkeit

Der stärkste Anstieg der Scherspannung fand bis zu einem Scherweg von ca. 1 mm statt ($\tau_M = 7,0$ kN/m²). Dies konnte auf den Gefügewiderstand (1.) des verdichteten Korngerüsts infolge der Konsolidierung des Mörtels zu Beginn der Prüfung zurückgeführt werden. Dieser Widerstand musste bei wirkender Scherbeanspruchung überwunden werden, bevor eine Strukturänderung durch Umlagerung von Feststoffen stattfinden konnte.

Im weiteren Verlauf der Prüfung nahm die Scherspannung kontinuierlich, aber mit reduzierter Intensität zu, was nun auf eine Umlagerung von Feststoffen (2.) zurückzuführen war. Des Weiteren wurde ein Alterseinfluss festgestellt. Während sich die Scherspannungen am Mörtel bis zu einem Alter t_M von 4 h auf gleichem Größenniveau befanden, war zum Prüfzeitpunkt t_M von 6 h eine stärkere Spannungszunahme zu erkennen. Den Grund für die größere Scherspannung lieferten offenbar erste Hydratationsprodukte, was in einer Gefügeverdichtung und damit einhergehend in einem höheren Scherwiderstand des Mörtels resultierte. Die mit zunehmender Scherverformung ansteigende Scherspannung erreichte dabei asymptotisch die kritische Scherfestigkeit (3.).

Zum Ende des Abschervorgangs (u = 15 mm) konnte anhand der abflachenden Spannungskurven von einer Stagnation ausgegangen werden. Zu diesem Zeitpunkt war die Feststoffumlagerung offenbar größtenteils abgeschlossen und die Gleitreibung allein lieferte den vorhandenen Scherwiderstand.

Zum Prüfzeitpunkt t_M von 6 h erreichte der Mörtel eine maximale Scherspannung von ca. 20,2 kN/m². Die Scherspannungen der Mörtel unmittelbar nach Herstellung bis zu einem Alter t_M von 4 h lagen bei ca. 18,2 kN/m².



Abbildung 8.9: Scherspannungs-Scherweg-Diagramm einer bedingt aktiven Mörtelprobe B-60 zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_M

Da für den gewünschten hohen Scherwiderstand des Mörtels die Gesteinskörnung von entscheidender Bedeutung ist, wurde ferner der Einfluss der Kornzusammensetzung (Sieblinie) auf die Scherspannungsentwicklung untersucht (Abbildung 8.10). Neben der Sieblinie B8 der Basisrezepturen wurden die Regelsieblinien nach DIN 1045-2 [53] herangezogen. Der Konsolidierungs- und Abschervorgang wurden analog zu den Rahmenscherversuchen an den untersuchten Ringspaltmörteln durchgeführt. Dabei war die Gesteinskörnung zu jedem Zeitpunkt trocken.

Zu Beginn des Abschervorgangs (u = 1 m) konnte bei allen vier Sieblinien ein nahezu linearer Anstieg der Scherspannung verzeichnet werden. Dabei erreichte die grobe Sieblinie A8 (k = 3,63) die größte Scherfestigkeit τ_M von 12,6 kN/m², während die feine Sieblinie C8 (k = 2,27) die geringste Scherfestigkeit von τ_M von 11,2 kN/m² aufwies. Die Scherfestigkeit der Basiskornzusammensetzung ~B8 (k = 2,91) entsprach in etwa der der Regelsieblinie B8 mit einer identischen Körnungsziffer k von 2,90 (τ_M = 11,4 kN/m²). Daraus kann abgeleitet werden, dass mit höherer Feinheit der Gesteinskörnung eine geringere Scherspannung zu erwarten war. Bis zu einem Scherweg u von ca. 6 mm nahmen die Scherspannungen kontinuierlich, aber mit reduzierter Intensität zu. Auffällig waren dabei die Schwankungen in den Kurven, welche vermutlich auf ein Versagen der Körner in der Scherfuge oder auf eine schlagartige Umlagerung der Körner zurückzuführen war. Nach Erreichen der kritischen Scherfestigkeit verlief die Scherspannung über die weitere Einwirkungsdauer nahezu konstant, was im Wesentlichen der Gleitreibung entsprach.



Abbildung 8.10: Scherspannungs-Scherweg-Diagramm von verschiedenen Sieblinien

Die Untersuchungen an den Sieblinien bestätigten, dass ein wesentlicher Anteil der erreichten Scherfestigkeiten aus der inneren Reibung sowie aus den Verhakungen und Verzahnungen (Gefügewiderstand) der Gesteinskörnung resultierte. Der Anteil betrug ca. 69 %, bezogen auf die erreichte Scherfestigkeit des bedingt aktiven Mörtels B-60 von 17,9 kN/m² unmittelbar nach Herstellung t_M = 0 h (vgl. Abbildung 8.9). Voraussetzung dafür war allerdings, dass alle Gesteinskörner in Kontakt zueinander standen. Somit liegt die Vermutung nahe, dass der Einsatz von Feinstoffen ($\leq 63 \mu$ m) den Festigkeitszuwachs lieferte. Aufgrund der physikalischen Füllerwirkung der Feinstoffe konnte offenbar ein hohlraumarmes Gefüge errichtet werden, sodass mehr Feststoffpartikel in Kontakt traten. Durch die erhöhte Anzahl an Kontaktpunkten stieg die Reibung und bei wirkender Normalspannung konnte demnach eine größere Summe an Kräften übertragen werden. Dabei konnte angenommen werden, dass der maßgebliche Anteil des Reibungswiderstandes während der Verschiebung und Umlagerung der groben Gesteinskörner durch die Feinstoffe übernommen wurde. Dies führte schließlich zu einer höheren Scherfestigkeit.

Zur Beurteilung der mit der Flügelsondierung und mit dem Rahmenschergerät ermittelten Scherfestigkeiten wurde zunächst deren Standardabweichung berechnet (Abbildung 8.11, exemplarisch für die Basisrezepturen).

In den Flügelscherversuchen wurden mit bis zu 17 % die größten Prüfstreuungen beim bedingt aktiven Mörtel B-60 zum Prüfzeitpunkt t_M von 240 min ermittelt. Einen wesentlichen Grund für die große Prüfstreuung der Flügelsondierung stellte offenbar die geringe Scherfläche A₀ von 1.791 mm² (entsprechend der Mantelfläche M_F des Scherflügels) dar. Da die Flügelsonden vor der Entwässerung des Mörtels in den jeweiligen Tiefen eingebaut wurden, konnten lokale Störungen im Gefüge nicht ausgeschlossen werden. Eine weitere mögliche Ursache für die großen Prüfstreuungen könnte das geringe Verhältnis der Scherfläche A₀ bzw. des Flügeldurchmessers d_F zum Größtkorn (D = 8 mm) der Basisrezeptur sein (d_F/D-Verhältnis ~2,4). Eine Anreicherung von groben Gesteinskörnern vor der Sonde könnte das Ergebnis der Prüfung stark beeinflussen.

Im Vergleich dazu betrug die Scherfläche A_0 des Rahmenschergerätes rd. 10.000 mm². Die Variationskoeffizienten der Scherfestigkeiten im Rahmenschergerät lagen dabei meist zwischen 1 % und 4 %, unabhängig von der Basisrezeptur. Demnach konnte festgehalten werden, dass aufgrund der Vielzahl an Wiederholungsversuchen (mindestens 5) die Scherfestigkeitsergebnisse im Rahmenschergerät eine deutlich höhere Präzision besaßen.



Abbildung 8.11: Standardabweichung σ der Basisrezepturen im Flügelscherversuch (links) und im Rahmenscherversuch, andere Skalierung (rechts)

Für eine vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse wurden die mit der Flügelsondierung ermittelten Scherfestigkeiten auf die entsprechende Scherfläche im Rahmenschergerät umgerechnet (vgl. Anhang F "Rahmenscherversuch"). Wie in Abbildung 8.12 deutlich zu erkennen, nahmen die Scherfestigkeiten in den Flügelscherversuchen mit steigendem W/S_{m,B}-Verhältnis und mit zunehmender Bindemittelfeinheit S_{m,B} nahezu linear zu. Des Weiteren konnte ein deutlicher Alterseinfluss t_M festgestellt werden (vgl. Abschnitt 8.1).

Die Scherfestigkeiten in den Rahmenscherversuchen nahmen zwar ebenfalls mit steigendem W/S_{m,B}-Verhältnis zu, allerdings mit deutlich reduzierter Intensität. Analog zu den Scherfestigkeiten in den Flügelscherversuchen am inaktiven Mörtel (W/S_{m,B} = 0,58) lagen auch hier die Scherfestigkeiten, unabhängig von der Liegezeit t_M des Mörtels, auf nahezu gleichem Größenniveau. Die Ergebnisse der zwei Prüfverfahren zeigten jedoch signifikante Unterschiede. Während die Scherfestigkeiten in den Flügelscherversuchen verhältnismäßig gering ausfielen ($\tau_M = ca. 2,6 \text{ kN/m}^2$), lagen die Werte in den Rahmenscherversuchen sowohl unmittelbar nach Herstellung als auch nach einer Liegezeit t_M von 6 h rd. 6,1-fach höher ($\tau_M = ca. 16,0 \text{ kN/m}^2$).

Bei den zementhaltigen Mischungen mit einem deutlich höheren W/S_{m,B}-Verhältnis (0,99 bis 1,76) zeigten sich hingegen mehr oder weniger vergleichbare Scherfestigkeiten zwischen 16,7 kN/m² (W/S_{m,B} = 1,35) und 18,2 kN/m² (W/S_{m,B} = 1,76) unmittelbar nach Herstellung. Analog zu den Flügelscherversuchen konnte auch bei den Rahmenscherversuchen ein Alterseinfluss auf die Scherfestigkeitsentwicklung festgestellt werden, was auf die fortschreitende Hydratation des Zements zurückgeführt werden konnte. Die Kurven zum Prüfzeitpunkt t_M von 0 h und 6 h verliefen nahezu parallel, wobei die Scherfestigkeiten der zementhaltigen Mörtel mit ca. 10 % geringfügig höher lagen.



Abbildung 8.12: Scherfestigkeit τ_M der Basisrezepturen im Flügelscherversuch (links) und im Rahmenscherversuch (rechts) in Abhängigkeit vom W/S_{m,B}-Verhältnis zum Zeitpunkt t_M = 0 h und 6 h

Die gleichmäßigen Kurvenverläufe resultierten höchstwahrscheinlich aus dem Konsolidierungsverhalten der Mörtel im Rahmenscherversuch. Versuchsbedingt (Schichtdicke d_M von 4 cm) bei sonst konstanten Druckbedingungen ($p_f = 2,5$ bar) wurden die Mörtel vor dem Abschervorgang vollständig konsolidiert und die Scherfestigkeiten wurden direkt durch die Granulometrie der Feststoffe beeinflusst. Ein Einfluss der Schichtdicke d_M des Mörtels auf die Packungsdichte und damit einhergehend auf die Scherfestigkeitsentwicklung konnte klar nachgewiesen werden (vgl. Abschnitt 8.5). Durch die vollständige Konsolidierung des Mörtels wurde die Scherbeanspruchung ausschließlich durch "Korn zu Korn"-Spannungen aufgenommen. Dementsprechend resultierte der Scherwiderstand aus der inneren Reibung der Feststoffpartikel und wurde nicht von der Filtratwasserabgabe beeinflusst. Die Größenordnung der Scherfestigkeiten hing dabei maßgeblich von der Granulometrie der verwendeten Feinstoffe ab. Der inaktive Mörtel I-0 wies aufgrund des "Kugellagereffekts" von Flugasche einen geringeren inneren Reibungswiderstand auf, was in geringeren Scherfestigkeiten resultierte (vgl. Abbildung 8.12). Mit zunehmendem W/S_{m,B}-Verhältnis und mit zunehmender Substitution der kugeligen Flugaschepartikel ($x' = 21,0 \mu m$) durch Zement einer kantigen Kornform ($x' = 16,0 \mu m$) bei vergleichbarer Korngrößenverteilung führten offenbar physikalische Füllereffekte zu einer höheren Reibung und somit zu größeren Scherfestigkeiten (vgl. Abbildung 8.12, links).

Die Scherfestigkeitsentwicklung der partiell konsolidierten Basismörtel im Entwässerungsversuch entsprechend Abschnitt 5.2.1 hingegen korrelierte mit den entsprechenden massenbezogenen Filtratwasserabgaben. So bedingte unmittelbar nach Herstellung eine hohe Filtratwasserabgabe auch hohe Scherfestigkeiten (vgl. Abbildung 7.3 und Abbildung 8.1). Aufgrund der druckbedingten Konsolidierung wiesen diese Mörtel ein degressives Entwässerungsverhalten auf, bedingt durch die sukzessive Verengung der Transportwege für die weiteren Entwässerungsprozesse. Entsprechend war noch freies Wasser im Mörtel vorhanden, was infolge des größeren Gleit- bzw. Wasserfilms um die Feststoffpartikel zu geringeren Scherfestigkeiten führte. Mit zunehmendem Alter des Mörtels nahmen die massenbezogenen Filtratwasserabgaben ab und die Scherfestigkeiten infolge erster Hydratationsreaktionen zu.

9 ZUSAMMENFASSUNG

9.1 Grundsätzliche Anforderungen

Der maschinelle Tunnelbau gewinnt seit einigen Jahren immer mehr an Bedeutung. So betrug der Anteil maschineller Schildvortriebe am gesamten Tunnelbauvolumen in den 1990er Jahren mehr als 40 % und mit Beginn des 21. Jahrhunderts sogar mehr als 75 % [102]. Mit Schildvortriebsverfahren können Tunnelbauten in unterschiedlichsten Bodenverhältnissen errichtet werden.

Im maschinellen Tunnelbau verbleibt verfahrensbedingt zwischen der Tübbingauskleidung und der Ausbruchlaibung ein Hohlraum mit einer Dicke von meist 12 bis 18 cm. Dieser sogenannte Ringspalt ist unmittelbar nach dem Einbau der Tübbinge mit einem geeigneten Ringspaltmörtel (RSM) vollständig zu verpressen, um die Tübbingringe lagesicher zu betten und gleichzeitig Setzungen an der Geländeoberfläche zu minimieren. Unter Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse wird der Ringspaltmörtel über Lisenen im Schildschwanz oder über Öffnungen in den Tübbingen in den Ringspalt verpresst.

An den Ringspaltmörtel werden im Allgemeinen zwei einander nahezu entgegenstehende Anforderungen gestellt: Zum einen eine hohe Fließfähigkeit und gleichzeitig hohe Sedimentationsstabilität während einer Verarbeitungsphase von mehreren Stunden bis zur Ringspaltverpressung, zum anderen eine rasche Entwicklung der notwendigen Scherfestigkeit im Ringspalt unmittelbar nach dem Verpressen. Bei einkomponentigen Ringspaltmörteln erfolgt die rasche Verfestigung durch Auspressen von Wasser aus dem Mörtel in den umliegenden Boden. Der erforderliche Verpressdruck wird dabei auf den anstehenden Gebirgsund Wasserdruck abgestimmt. Die kurz nach dem Verpressen geforderte hohe innere Scherfestigkeit sowie eine ausreichende Steifigkeit des Mörtels müssen dabei in etwa den Kenngrößen des anstehenden Bodens entsprechen.

Im Allgemeinen werden an einkomponentigen Ringspaltmörteln hinsichtlich Konsistenz und Festigkeit folgende Anforderungen gestellt: ein Ausbreitmaß a von 15 ± 5 cm 8 Stunden nach Mörtelherstellung und eine Scherfestigkeit des entwässerten Mörtels $\tau_M > 2,0$ kN/m². Diese Werte wurden einzig aus Praxiserfahrungen definiert.

Bislang wird auch die Zusammensetzung von Ringspaltmörteln fast ausnahmslos auf empirischer Basis in der Praxis festgelegt. Hierfür werden die jeweiligen Gebirgsverhältnisse selbstverständlich berücksichtigt. Folgende Stellgrößen stehen dabei zur Disposition:

- Bindemittelanteil (aktive, bedingt aktive und inaktive Ringspaltmörtel),
- Anteil stabilisierender Komponenten (ein- oder mehrkomponentig),
- Größtkorn der Gesteinskörnung

Gezielte Studien, in denen einkomponentige Ringspaltmörtel einerseits hinsichtlich ihres Fließverhaltens, andererseits im Hinblick auf ihre Entwässerungsfähigkeit und den damit einhergehenden Aufbau der

Scherfestigkeit untersucht wurden, fehlen noch weitgehend. Ebenso existieren noch keine standardisierten Versuche zur Beurteilung des Entwässerungsverhaltens von Ringspaltmörteln unter Druck.

Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen war es, die wesentlichen Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der einzelnen Ausgangskomponenten sowie der Mörtelzusammensetzung und den damit erreichbaren Eigenschaften aufzuzeigen und die maßgeblichen Steuergrößen für eine gezielte Einstellung der Mörteleigenschaften unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen (Verpressdruck, Schichtdicke) zu definieren.

Im Rahmen einer Literaturstudie wurden zunächst die wesentlichen maschinenbau- und bauverfahrenstechnischen Aspekte für eine effektive Ringspaltverpressung dargelegt. Für die Konzeptionierung der Mörtelrezepturen wurden für Ringspaltmörtel geeignete Ausgangsstoffe und ihre Wirkungsweisen erörtert. Aus einschlägigen Forschungsarbeiten geht hervor, dass die rheologischen Eigenschaften im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit von Feinstoffleimen sowie auf die Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton maßgeblich von der Granulometrie der verwendeten Feinstoffe beeinflusst werden. Die granulometrischen Eigenschaften von Partikeln werden im Allgemeinen anhand der Kornform und der Kornverteilung beschrieben. Diese geometrischen Parameter sind für die Packungsdichte und für die Beweglichkeit der Partikel in einem Korngemisch verantwortlich. Dabei erzielten insbesondere Mischungen von Feinstoffen mit einer weitgestuften Kornverteilung eine höhere Packungsdichte als solche mit enger Kornverteilung. Eine hohe Packungsdichte ist für die Scherfestigkeitsentwicklung des Ringspaltmörtels von entscheidender Bedeutung.

Im Fokus der experimentellen Untersuchungen standen einkomponentige Ringspaltmörtel, welche durch gezielte Variationen in den Ausgangskomponenten und der Zusammensetzung systematisch modifiziert wurden (Abbildung 9.1). Zur Beurteilung des Entwässerungsverhaltens wurde eine Filterpresse modifiziert, mit der die Randbedingungen im Ringspalt mit einer Dicke von 10 bis 20 cm praxisnah simuliert werden können (vgl. Abbildung 5.3). Neben materialspezifischen Variationen wurden auch ringspaltspezifische Varianten mit einbezogen, welche die Entwässerungsfähigkeit und die Scherfestigkeitsentwicklung des Mörtels signifikant beeinflussen können (Abbildung 9.1).

Einkomponentenmörtel					
Materialspezifische Parameter	Maßgebliche Eigenschaften	Einbauspezifische Parameter			
Feinstoffe (Zement, Flugasche, Kalksteinfeinmehl, Quarzmehl, Hüttensandmehl) Gesteinskörnung (Quarzsand, Brechsand, Quarzkies, Basaltsplitt)	Konsistenz und Verarbeitbarkeit				
	Entwässerungsverhalten	Entwässerungsdruck p _f (konstant, stufenartig)			
	Scherfestigkeit	Schichtdicke d _M			

Abbildung 9.1: Materialspezifische (rot) und einbauspezifische (blau) Parameter im Hinblick auf die maßgeblichen Eigenschaften von Ringspaltmörteln

9.2 Konsistenz und Verarbeitbarkeit

Unabhängig von der Art und der Zugabemenge des Feinstoffes wiesen alle modifizierten Mörtelrezepturen auch nach mehreren Stunden (6 bis 8 Stunden nach Herstellung) eine ausreichende Verarbeitbarkeit und eine Fließfähigkeit mit dem angestrebten Ausbreitmaß von 15 ± 5 cm auf. Dabei konnte ein deutlicher Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Konsistenz verzeichnet werden. Inaktive Mischungen waren mit einem Ausbreitmaß > 25 cm deutlich fließfähiger als die bedingt aktiven und aktiven Mischungen. Dennoch zeigten diese weichen Mörtel zu allen Prüfzeitpunkten eine ausreichend hohe Sedimentationsstabilität.

Bei den Mörteln stellte sich das Verhältnis von Wassergehalt zur spezifischen Oberfläche der Feinstoffe $(W/S_{m,B})$ als wesentliche Einflussgröße heraus. Bei einem an der oberen Grenze liegenden $W/S_{m,B}$ -Wert von 1,76 g/m² war die Konsistenz um rd. 22 % steifer im Vergleich zu einem an der unteren Grenze liegenden $W/S_{m,B}$ von 0,58 g/m². Daraus lässt sich ableiten, dass die spezifische Oberfläche der Feinstoffe sich deutlich stärker auf die Konsistenz auswirkt als der Wassergehalt des Ringspaltmörtels. Während die kantige Kornform und die raue Oberfläche der Zementpartikel ein Gleiten der Feststoffe im Mörtel erschwerten, waren Mörtel mit mehr kugelförmigen Partikeln fließfähiger. Die inaktiven Mörtel wiesen über die gesamte Verarbeitbarkeitszeit von bis zu 8 h nahezu die gleiche Konsistenz auf. Bei zementhaltigen Mischungen waren hingegen mit zunehmendem Mörtelalter erste Hydratationsreaktionen anzunehmen, welche ein verstärktes Ansteifen dieser Mörtel zur Folge hatten. Bei konstantem Wasser- und Zementgehalt wurde bei Substitution der Flugasche durch die Feinstoffe Kalksteinfeinmehl, Quarzmehl und Hüttensandmehl eine ca. 26 % steifere Konsistenz verzeichnet.

Eine ähnliche versteifende Wirkung auf die Konsistenz konnte auch durch die Granulometrie der groben Gesteinskörnung beobachtet werden. Gebrochene Korngemische (Brechsande, Splitte) mit einer hohen Körnungsziffer von rd. 3,1 führten zu etwa 29 % geringeren Ausbreitmaßen als Korngemische aus Quarzsand und Quarzkies mit einer Körnungsziffer von rd. 2,9.

9.3 Entwässerungsverhalten

Die Entwässerungsversuche mit der modifizierten Filterpresse zeigten, dass Mörtel mit einem hohen $W/S_{m,B}$ -Wert von 1,76 g/m² in einem Einbauzeitraum von bis zu 120 min nach 30-minütiger Druckbeaufschlagung (p_f = 2,5 bar) Gesamtfiltratwasserabgaben von 8,4 M.-% erreichten. Hingegen konnten bei einem $W/S_{m,B}$ -Wert von 0,58 unter den gleichen Randbedingungen nur noch 7,0 M.-% ausgepresst werden. Daraus lässt sich ableiten, dass die spezifische Oberfläche der Feinstoffe für das Entwässerungsverhalten des Ringspaltmörtels von größerer Bedeutung ist als der Wassergehalt des Mörtels. Inaktive Mischungen wiesen auch nach 120 min eine nahezu gleiche Filtratwasserabgabe auf, während bei den bedingt aktiven Mörteln aufgrund der fortschreitenden Hydratation des Zements ein deutlicher Rückgang der Entwässerung zu verzeichnen war.

Bei gebrochenen Gesteinskörnungen (Brechsand, Basaltsplitt) fiel die Gesamtfiltratwasserabgabe bei vergleichbarer Sieblinie gegenüber einem quarzitischen Sand/Kies-Gemisch um ca. 15 % geringer aus. Dies ist unter anderem mit der höheren Wasserbindung an den bruchrauen Oberflächen der gebrochenen Gesteinskörnungen erklärbar.

Die Filtratwasserabgabe nahm erwartungsgemäß mit zunehmendem Entwässerungsdruck bei 2,0 bis 3,5 bar während der 30-minütigen Druckbeaufschlagung kontinuierlich zu. Hingegen wurde bei Drücken über 4,0 bar (bis 7 ,0 bar) in der Anfangsphase der Mörtel überproportional stark entwässert, anschließend nahm die Entwässerung degressiv ab.

Ringspaltmörtel mit geringen Schichtdicken von 6 bis 13 cm konnten bei niedrigem Entwässerungsdruck bei 2,5 bar innerhalb von 30 min nahezu vollständig und über die gesamte Dicke annähernd gleichmäßig entwässert werden, d.h. unter diesen Randbedingungen war keine weitere Wasserabgabe mehr möglich. Bei einer größeren Schichtdicke (17 cm bzw. 20 cm) konnte hingegen unter gleichen Prüfbedingungen eine Wasseranreicherung an der druckbeaufschlagten Seite festgestellt werden, d.h. es stellte sich ein entsprechender Entwässerungsgradient über die Schichtdicke ein.

Mit der Entwässerung des Mörtels konnte auch eine Konsolidierung, d.h. eine entsprechende Volumenabnahme des Mörtels beobachtet werden. Bei Mörteln mit Sand/Kies-Gemischen betrug diese rd. 12 Vol.-%. Dabei betrug die Wasserabgabe nur rd. 6,0 M.-%, entsprechend ca. 3,0 Vol.-% bei einer Frischmörtelrohdichte von 2,015 kg/dm³. Daraus lässt sich ableiten, dass die Konsolidierung nur zu einem geringen Anteil auf den Wasserverlust und deutlich mehr auf eine innere Verdichtung des Kornsystems zurückzuführen ist. Bei Mörteln mit gebrochener Gesteinskörnung (Brechsand, Basaltsplitt) konnte eine Konsolidierung von nur rd. 7 Vol.-% festgestellt werden. Die zugehörige Menge an ausgepresstem Wasser betrug etwa 5 M.-% ($\triangleq \sim$ 2,5 Vol.-%). Das deutet an, dass bei solchen Mörteln die innere Verdichtung weniger intensiv stattfindet als bei Sand/Kies-Gemischen, was mit den bruchkantigeren Partikeln erklärbar ist. Somit spielt bei Mörteln mit gebrochener Gesteinskörnung die Entwässerung für die Konsolidierung eine größere Rolle als bei Sand/Kies-Gemischen.

9.4 Scherfestigkeitsentwicklung

Hohe Scherfestigkeiten > 100,0 kN/m² konnten vor allem durch einen hohen W/S_{m,B}-Wert erzielt werden. So waren die Scherfestigkeiten bei einem W/S_{m,B}-Wert von 1,76 um rd. 500 % höher als bei einem W/S_{m,B}-Wert von nur 0,58. Bei Substitution von Flugasche durch Kalksteinfeinmehl konnten mit zunehmender Feinheit S_{m,B} kontinuierlich anwachsende Scherfestigkeiten ermittelt werden. Bei Substitution von Flugasche durch Hüttensandmehl konnte ein festigkeitssteigernder "Verzahnungseffekt" nur bei einer geringen Substitutionsmenge bis zu 10 M.-% festgestellt werden. Mit hoher Substitutionsmenge bildeten sich aufgrund der scharfkantigen Partikelform der Hüttensandmehlpartikel mehr Hohlräume aus, was in verminderten Scherfestigkeiten resultierte.

Mit zunehmendem Mörtelalter nahmen die Scherfestigkeiten bei bedingt aktiven und aktiven Mörteln deutlich zu, was einerseits auf die fortschreitende Hydratation des Zements, andererseits auf die puzzolanische Reaktion der Flugasche und/oder die Hydratation des Hüttensandmehls zurückgeführt werden konnte. Hinsichtlich der Gesteinskörnung kann die Scherfestigkeit des Mörtels um etwa 2,5% erhöht werden, wenn nur eine Teilmenge des Sand/Kies-Gemisches gegen Brechsand (~65 %) bzw. Basaltsplitt (~35 %) ausgetauscht wird. Bei höheren Austauschmengen stellt sich aufgrund der Kornbruchflächigkeit eine geringere Packungsdichte ein, was wiederum mit einer Einbuße an Scherfestigkeit einhergeht.

Unter einem hohen Entwässerungsdruck bei 4,0 bis 7,0 bar wurden grundsätzlich sehr hohe Scherfestigkeiten von rd. 95 kN/m² erzielt. Im niedrigeren Druckbereich von 2,0 bis 3,5 bar wurde zwar mit Scherfestigkeiten von 30,0 bis 60,0 kN/m² die Mindestanforderung $\tau_M \ge 2,0$ kN/m² durchweg erreicht, jedoch hat sich der Mörtel dabei noch nicht vollständig konsolidiert.

Die graduelle Entwässerung bei dickeren Mörtelschichten spiegelte sich auch in den Scherfestigkeiten in unterschiedlichen Tiefen der entwässerten Mörtel wider. Bei einer Schichtdicke von 17 cm nahmen die Scherfestigkeiten mit zunehmender Tiefe (zum Wasseraustritt hin) nahezu linear zu. Die Gradientenbildung wirkte sich bei bedingt aktiven Mörteln stärker aus als bei inaktiven Mörteln.

Die Scherfestigkeitsentwicklung der partiell konsolidierten Mörtel im modifizierten Filterpressenversuch korrelierte mit den Filtratwasserabgaben dieser Mörtel. Entsprechend wurden bei hohen Gesamtfiltratwasserabgaben auch hohe Scherfestigkeiten ermittelt.

9.5 Bewertung der Einflussparameter und Ausblick

Die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf das Fließ- und Entwässerungsverhalten sowie auf die Scherfestigkeitsentwicklung des Ringspaltmörtels sind in Abbildung 9.2 kurz zusammengefasst.

Hohe Entwässerungsdrücke > 4,0 bar bzw. kleine Schichtdicken von bis zu 13 cm führen stets zu hohen Filtratwasserabgaben und hohen Scherfestigkeiten. In diesen Bereichen werden die materialspezifischen Parameter untergeordnet.

Aufgrund der Ergebnisse ist zu empfehlen, sich bei der Konzeption von einkomponentigen Ringspaltmörteln insbesondere auf folgende Parameter zu fokussieren:

- eine hohe spezifische Oberfläche der Feinstoffe
- Feinstoffe mit unterschiedlicher Granulometrie, d.h. Mischungen mit einer weitgestuften Kornverteilung sowie mit unterschiedlicher Partikelform
- eine niedrige Körnungsziffer der Gesteinskörnung
- Kornform und Oberflächenstruktur der Gesteinskörnung, idealerweise gedrungen und glatt.

ſ

Konsistenz und Verarbeitbarkeit		
W/S _{m,B} -Verhältnis	+++ ^{W)}	
S _{m,B}	+++	
Granulometrie		
Partikelform	++	
Partikelgrößenverteilung	0	
Körnungsziffer	0	
Kornform	+++	
Oberflächenstruktur	++	

٦

Entwässerungsverhalten

W/S _{m,B} -Verhältnis	+++ ^{W)}		
S _{m,B} Granulometrie	0	Entwässerungsdruck p _f	+++ ³⁾
Partikelform	++	Schichtdicke d _M	+++ ³⁾
Partikelgrößenverteilung	+		
Körnungsziffer	++		
Kornform	+++		
Oberflächenstruktur	0		

Scherfestigkeit

W/S _{m,B} -Verhältnis S _{m,B} Granulometrie Partikelform Partikelgrößenverteilung Körnungsziffer Kornform Oberflächenstruktur	+++ ^{Sm,B)} ++ ++ ¹⁾ ++ + ²⁾ +++ +++	Entwässerungsdruck p_f +++ ³ Schichtdicke d_M +++ ³))
+++ große Beeinflussung	W)	mit hohem Wasseranteil	

+++	große Beeinflussung	w)	mit hohem Wasseranteil
++	mäßige Beeinflussung	Sm,B)	mit hoher Bindemittelfeinheit
+	geringe Beeinflussung	1)	bei geringer Substitutionsmenge von Flugasche
0	keine Beeinflussung		durch einen Feinstoff $\varphi = 1,89$ im Verhältnis ~10:1 (Vol%)
		2)	Erhöhung des Feinanteils (0,063-0,25 mm)
			≥16 % der Gesamtgesteinskörnung
		3)	dominiert materialspezifische Einflussparameter

Abbildung 9.2: Bewertung der Einflussparameter auf das Fließverhalten und Entwässerungsverhalten sowie auf die Scherfestigkeitsentwicklung von Ringspaltmörteln

Basierend auf diesen Studien ist es möglich, die Ausgangsstoffe für einkomponentige Ringspaltmörtel gezielter auszuwählen und zielgerichtete Mörtelzusammensetzungen zu konzipieren. Dennoch wären weitere Untersuchungen zweckmäßig, bei denen insbesondere folgenden Fragen tiefer nachgegangen wird:

• Wie wirkt sich der Einsatz eines rheologischen Additivs, wie z.B. Fließmittel, auf die Mörteleigenschaften aus? Der Einsatz von Fließmitteln kann einerseits die Fließfähigkeit während der Verarbeitungs- und Verpressphase positiv beeinflussen, andererseits durch eine mögliche Reduzierung des Wassergehalts im Mörtel eine raschere Scherfestigkeitsentwicklung unmittelbar nach dem Verpressen begünstigen.

• Inwieweit bildet sich ein "äußerer Filterkuchen" im Boden mit unterschiedlicher Durchlässigkeit und unterschiedlichem Sättigungsgrad aus?

Infolge der druckbedingten Entwässerung können Feinstteile des Mörtels in den angrenzenden Boden infiltriert werden. Abhängig von der Sättigung und Durchlässigkeit des Bodens können die nachfolgenden Entwässerungsprozesse und damit einhergehend die Scherfestigkeitsentwicklung des Mörtels nachteilig beeinflusst werden.

• Welche Auswirkungen hat eine Momentanentwässerung des Ringspaltmörtels während des Vortriebs auf den zuvor verpressten und bereits teilweise entwässerten Mörtel?

10 LITERATURVERZEICHNIS

- Maidl, B.; Herrenknecht, M.; Maidl, U.; Wehrmeyer, G. (2011). Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb. Ernst & Sohn, Berlin, 2. Auflage, ISBN 978-3-433-60075-7
- [2] Thewes, M.; Budach, C. (2009). Mörtel im Tunnelbau Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen zur Verfüllung des Ringspaltes bei Tunnelvortriebsmaschinen. BauPortal, Heft 12, 121. Jg., Dez. 2009, S. 706-711
- [3] Thewes, M. (2014). Tunnelbau im Schildvortrieb Verfahrenstechniken und Planungsgrundlagen. In: Beton-Kalender 2014: Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7. Hrsg.: Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D. Ernst & Sohn, Berlin, Bd. 1, ISBN 978-3-433-03051-6, S. 121-170
- [4] DAUB (2010). Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. Deutscher Ausschuss f
 ür unterirdisches Bauen e.V., K
 öln
- [5] EPB-Schild Schnelle Vortriebstechnik mit breitem Anwendungsspektrum, Fa. Herrenknecht
- [6] Girmscheid, G. (2008). Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Ernst & Sohn, Berlin, ISBN 978-3-433-01852-1
- [7] Winselmann, D.; Babendererde, L.; Holzhäuser, J. (2000). Aktuelle Berechnungsmethoden für Tunnelauskleidungen mit Tübbingen und deren verfahrenstechnische Voraussetzungen. DGGT, 26. Baugrundtagung, Hannover, 18.-20.09.2000
- [8] Breitenbücher, R. (2014). Tunnelbau im Schildvortrieb Spezielle Anforderungen an Beton im Tunnelbau. In: Beton-Kalender 2014: Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7. Hrsg.: Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D. Ernst & Sohn, Berlin, Bd. 1, ISBN 978-3-433-03051-6, S. 393-422
- Balthaus, H.; Dorgarten, H.-W.; Billig, B. (2005). Tunnelsicherung und -ausbau. In: Beton-Kalender 2005: Schwerpunkt: Fertigteile, Tunnelbauwerke. Hrsg.: Bergmeister, K., Wörner, J.-D. Bd. 1, Ernst & Sohn, Berlin, 94. Jg., ISBN 978-3-433-01670-1, S. 257-381
- [10] DAUB (2014). Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen. Tunnelbau 2014, Ernst & Sohn, Berlin, 38. Jg., ISBN 978-3-433-60357-4 S. 17-121
- [11] ITA Working Group No. 2 (2000). Guidelines for the design of shield tunnel lining. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 15, Issue 3, July-September 2000, S. 303-331
- [12] Breitenbücher, R.; Song, F. (2014). Experimentelle Untersuchungen zum Auszugsverhalten von Stahlfasern in höherfesten Betonen. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 1, S. 43-52
- [13] Thienert, C. (2011). Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal

- [14] ZTV-ING (2012). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien f
 ür Ingenieurbauten. Hrsg.: Bundesanstalt f
 ür Stra
 ßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach, 03/2012
- [15] DAUB (2002). Betonauskleidungen f
 ür Tunnel in geschlossener Bauweise (DAUB-Empfehlung). Tunnelbau 2002, Verlag Gl
 ückauf GmbH, Essen, 26. Jg., ISBN 3-7739-1276-5, S. 301-351
- [16] Hansel, D.; Guirguis, P. (2011). Stahlfaserbeton-Tübbinge: Stand der Technik und realisierte Projekte. Tunnel (2011), Heft 1, S. 14-24
- [17] Breitenbücher, R.; Meschke, G.; Song, F.; Hofmann, M.; Zhan, Y. (2014). Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads. Proc. of FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop: Fiber Reinforced Concrete: from Design to Structural Application, 24-25 July 2014, Montreal, Canada, pp. 431-443
- [18] Babendererde, L.; Holzhäuser, J.; Babendererde, S. (2002). Verpressen der Schildschwanzfuge hinter einer Tunnelvortriebsmaschine mit Tübbingausbau. Tunnelbau 2002, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 26. Jg., ISBN 3-7739-1276-5, S. 228-254
- [19] Astner, M. (2005). Spezialbaustoffe im Bauvorhaben "Hofoldinger Stollen". Zement Beton 1 (2005), Nr. 4, S. 12-15
- [20] Philipp, G. (1987). Schildvortrieb im Tunnel- und Stollenbau, Teil B: Tunnelauskleidung hinter Vortriebsschildern. Tunnelbau 1987, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 11. Jg., ISBN 3-7739-0472-X, S. 211-274
- [21] Thewes, M.; Budach, C. (2009). Grouting of the annular gap in shield tunnelling an important factor for minimisation of settlements and production performance. In: Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2009. Ed.: Kocsonya, P., Safe tunnelling for the city and for the environment, 23-28 May 2009, Budapest, Hungary
- [22] Barnett, P. (2011). Construction of bored tunnels in urban areas Essential techniques for success.
- [23] Jonker, J. (2001). Einsatzverfahren bei Schildvortrieben an der Betuwelinie in den Niederlanden. Tunnelbau, Berichte des 6. Internationalen Tunnelbau-Symposiums München, 4.-5. April 2001, Verlag Glückauf GmbH, Essen, ISBN 3-7739-5964-8, S. 109-120
- [24] Hashimoto, T.; Konda, T.; Brinkman, J.; Feddema, A.; Kano, Y. (2006). Simultaneous backfill grouting, pressure development in construction phase and in the long-term. Tunnelling. A Decade of Progress – GeoDelft 1995-2005. Eds.: Bezuijen, A.; van Lottum, H., Taylor & Francis Group plc, London, UK, ISBN 0-415-39133-4, S. 101-108
- [25] Feddema, A.; Möller, M.; van der Zon, W.H.; Hashimoto, T. (2006). ETAC two-component grout field test at Botlek rail tunnel. Tunnelling. A Decade of Progress – GeoDelft 1995-2005.

Eds.: Bezuijen, A.; van Lottum, H., Taylor & Francis Group plc, London, UK, ISBN 0-415-39133-4, S. 19-25

- [26] Babendererde, T.; Hahn, C. (2012). Einflüsse auf Tübbingschäden. Tunnel 3/2012, S. 33-39
- [27] Bäppler, K. (2006). Development of a two-component dynamic grouting system for tailskin injected backfilling of the annular gap for segmental concrete lining in shielded tunnel boring machines. Dissertation, Colorado School of Mines: Mining and Earth System Engineering
- [28] Fischer, O.; Nevrly, T.; Behnen, G. (2014). Fertigteile im Tunnelbau. In: Beton-Kalender 2014: Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7. Hrsg.: Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D. Ernst & Sohn, Berlin, Bd. 1, ISBN 978-3-433-03051-6, S. 235-302
- [29] Billig, B.; Gipperich, C.; Wulff, M.; Schaab, A. (2008). Ausbausysteme f
 ür den maschinellen Tunnelbau in druckhaftem Gebirge. Tunnelbau 2008, Verlag Gl
 ückauf GmbH, Essen, 32. Jg., ISBN 978-3-86797-001-3, S. 223-262
- [30] Kovári, K. (1998). Tunnelbau in druckhaftem Gebirge Tunnelling in squeezing rock. Tunnel 5/98, 17. Jg., Nr. 5, 1998, S. 12-31
- [31] Schneider, E. (2008). Convergency compatible support systems. Tunnels & Tunnelling International, June 2008, pp. 40-43
- [32] Schneider, E.; Rotter, K.; Saxer, A.; Röck, R. (2005). Compex Support System. Komprimierbarer Ringspaltmörtel zur Bewältigung druckhafter Gebirgsbereiche bei TBM-Vortrieben mit starrem Tübbingausbau. Felsbau, Rock and Soil Engineering 23 (2005), Nr. 5, S. 95-101
- [33] Wittke, W.; Druffel, R.; Erichsen, C.; Gattermann, J.; Kiehl, J.; Schmitt, D.; Tegelkamp, M.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke-Schmitt, B. (2006). Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortrieb. Hrsg.: Wittke, W. Verlag Glückauf GmbH, Essen, ISBN 978-3-7739-1306-7
- [34] Asakura, T.; Kobno, S.; Kiuchi, T. (2001). Development of new grouting material for tunnel rehabilitation. Proc. of the International Symposium on Modern Tunneling Science and Technology. Eds.: Adachi, T.; Tateyama, K.; Kimura, M., Swets & Zeitlinger, ISBN 978-9-0265-1860-7, pp. 343-346
- [35] Patent EP0931909 A1: Verfahren zum Verpressen des Ringraums zwischen Tübbingen und Gebirge mit Mörtel. Eingetragen am 5. Januar 1999, veröffentlicht am 28. Juli 1999, Anmelder: Philipp Holzmann AG, Erfinder: Breitenbücher, R.; Langhagen K.; Thewes, M.
- [36] EFNARC Experts for Specialised Construction and Concrete Systems (2005). Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock. <u>www.efnarc.org</u>, April 2005

- [37] Bezuijen, A.; Talmon A.M. (2009). Processes around a TBM. In: Proc. of the 6th International Symposium (IS-Shanghai 2008), Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Eds.: Ng, C.W.W.; Huang, H.W., Liu, G.B., Shanghai, China, 10-12 April 2008
- [38] Bezuijen, A.; van der Zon, W.H.; Talmon, A.M. (2006), Laboratory testing of grout properties and their influence on backfill grouting. In: Tunnelling. A Decade of Progress – GeoDelft 1995-2005. Eds.: Bezuijen, A.; van Lottum, H., Taylor & Francis Group plc, London, UK, ISBN 0-415-39133-4, S. 115-121
- [39] Maidl, U.; Jonker, J.H. (2001). Bauausführung Betuweroute: Erfahrungen beim Schildvortrieb. Tunnel 8 (2001), Jg. 20, Nr. 8, 2001, S. 18-27
- [40] Grübl, P.; Weigler, H.; Sieghart, K. 2001. Beton Arten, Herstellung und Eigenschaften. Ernst
 & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin
- [41] Wittke, W. (1969). Neues Verfahren zum Verpressen von klüftigem Fels mit Pasten auf der Basis von Zement. VDI-Z. 111, Nr. 22, S. 1568-1575
- [42] Wittke, W.; Wittke-Gattermann, P. (2006). Risiken bei TVM-Vortrieben in klüftigem Fels. Tiefbau 12/2006, S. 685-692
- [43] Carter, M.A.; Green, K.M.; Wilson, M.A.; Hoff, W.D. (2003). Measurement of the water retentivity of cement mortars. Advances in Cement Research 15 (2003), Nr. 4, S. 155-159
- [44] Lowke, D. (2013). Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen. Dissertation, Technische Universität München
- [45] Borho, K.; Polke, R.; Wintermantel, K.; Schubert, H.; Sommer, K. (1991). Produkteigenschaften und Verfahrenstechnik. Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991), Nr. 8, S. 792-808
- [46] Browne, R.D.; Bamforth, P.B. (1977). Tests to Establish Concrete Pumpability. ACI Journal, Vol. 74, No. 5, pp. 193-203
- [47] Kordts, S. (2005). Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone. Dissertation, Technische Universität Berlin
- [48] Berg vom, W. (2001). Flugasche als Betonzusatzstoff. VDB Information Nr. 87, 2001, S. 1-3
- [49] Hu
 ß, A. (2010). Mischungsentwurf und Flie
 ßeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Ber
 ücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung. Dissertation, Universit
 ät Stuttgart
- [50] Bornemann, R. (2005). Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone. Dissertation, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 4, Universität Kassel, ISBN 3-89958-132-6
- [51] Reschke, T. (2001). Der Einfluss der Granulometrie der µe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Dissertation, Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 62
- [52] Höveling, H. (2006). Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB). Dissertation, Universität Hannover
- [53] DIN 1045-2:2008-08. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 2: Beton Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [54] Teichmann, T. (2008). Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein. Dissertation, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft. 12, Universität Kassel, ISBN 978-3-89958-441-7
- [55] Schießl, P. (1990). Wirkung von Steinkohleflugaschen in Beton. beton 40 (1990), Heft 12, S. 519-523
- [56] Geisenhanslüke, C. (2009). Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. Dissertation, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 13, Universität Kassel
- [57] Schulz, T. (2002). Einfluss von in situ-Randbedingungen auf die Feststoffeigenschaften von Dichtwandmassen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- [58] Herrenknecht, M.; Thewes, M.; Budach, C. (2011). The development of earth pressure shields from the beginning to the present. Geomechanics and Tunnelling 4 (1), S. 11-35
- [59] DIN EN 1015-3:2007-05. Pr
 üfverfahren f
 ür M
 örtel f
 ür Mauerwerk Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischm
 örtel (mit Ausbreittisch)
- [60] DBV-Merkblatt (2007). Besondere Verfahren zur Pr
 üfung von Frischbeton. Deutscher Betonund Bautechnik-Verein E.V., Fassung Januar 2014
- [61] DIN 4127:2014-02. Erd- und Grundbau Pr
 üfverfahren f
 ür St
 ützfl
 üssigkeiten im Schlitzwandbau und f
 ür deren Ausgangsstoffe
- [62] Triantafyllidis, T. (2004). Schlitzwand- und Dichtwandtechnik. Ernst & Sohn Verlag, 2004, ISBN 3-4330-2859-1
- [63] DAfStb-Richtlinie (2003). Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Ausgabe November 2003
- [64] Henning, O. (1988). Naturwissenschaftliches Grundwissen f
 ür Ingenieure des Bauwesens Band 1: Chemie im Bauwesen. 5. Auflage, VEB Verlag f
 ür Bauwesen, ISBN 978-3-34500-132-1
- [65] Hasenpatt, R. (1988). Bodenmechanische Veränderungen reiner Tone durch Adsorption chemischer Verbindungen (Batch- und Diffusionsversuche). Dissertation, Eidgenössische Technische

Hochschule Zürich, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der ETH Zürich, Nr. 134

- [66] Grim, R. E. (1968). Clay Mineralogy. 2. Ausgabe, McGraw-Hill, New York
- [67] IBECO (1999). Bentonit für Tunnelbau und unterirdische Bauverfahren Ein Handbuch für die Baupraxis. IBECO Bentonit-Technologie GmbH, Mannheim
- [68] IBECO (2000). Bentonit im Tiefbau Ein Handbuch f
 ür die Baupraxis. IBECO Bentonit-Technologie GmbH, Mannheim
- [69] Koch, D. (2005). Use of Milos bentonites for sealing purposes in geoenvironmental and geotechnical applications. Proc. of the International Workshop in "Geoenvironment and Geotechnics" (GEOENV 2005), 12-14 September 2015, Milos Island, Greece, ISBN 960-88153-7-1, pp. 15-20
- [70] Schad, H.; Bräutigam, T.; Bramm, S. (2008). Rohrvortrieb Durchpressungen begehbarer Leitungen. 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, ISBN-13 978-3-433-02912-1
- [71] Osebold, R. (2008). Entwicklung und Erprobung mineralischer Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen. Abschlussbericht, Auftraggeber: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), RWTH Aachen, ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb
- [72] Borden, R.; Groome, D.M. (1984). Influence of bentonite cement on the pumpability of compaction grouts. Innovative Cement Grouting, American Concrete Institute (ACI), Publication SP-83, Detroit, Michigan, U.S.A., pp. 115-128
- [73] Schößer, B.; Thewes, M.; Budach, C.; Zenner, B. (2012). Rheologische Eigenschaften von Bentonitsuspensionen – Der Einfluss von Misch- und Quellzeiten. bi-UmweltBau 2/12, S. 38-42
- [74] Bezuijen, A.; van der Zon, W.H. (2007). Volume changes in grout used to fill up the tail void.
 In: Underground Space the 4th Dimension of Metropolises , eds.: Barták, Hrdina, Romancov & Zlámal, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-40807-3, pp. 389-394
- [75] Bezuijen, A.; Talmon, A.M.; Kaalberg, F.J.; Plugge, R. (2004). Field measurements of grout pressures during tunnelling of the Sophia Rail Tunnel. Soils and Foundations, Vol. 44, No. 1, Feb. 2004, pp. 39-48
- [76] Alles, C.M.; Anlauf, H. (2003). Filtration mit kompressiblen Kuchen: Effiziente Konzepte f
 ür eine anspruchsvolle Trennaufgabe. Chemie Ingenieur Technik 75 (2003), S. 1221-1230
- [77] Walz, B.; Steinhoff, J. (1994). Stützung von Erdwänden mit viskosen Flüssigkeiten. Festschrift des Arbeitskreises "Baugruben" zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anton Weißenbach.
- [78] Arwanitaki, A. (2009). Über das Kontaktverhalten zwischen einer Zweiphasenschlitzwand und nichtbindigen Böden. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum

- [79] Youn, B.-Y.; Breitenbücher, R. (2014). Influencing parameters of the grout mix on the properties of annular gap grouts in mechanized tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology 43 (2014), 290-299
- [80] DIN 66145:1976-04. Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen; RRSB-Netz
- [81] DIN EN 196-3:2009-02. Pr
 üfverfahren f
 ür Zement Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbest
 ändigkeit; Deutsche Fassung EN 196-3:2005+A1:2008
- [82] Puntke, W. (2002). Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. beton 5/2002, 242-248
- [83] Wesche, K. (1993). Baustoffe f
 ür tragende Bauteile, Band 2: Beton, Mauerwerk. 3. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin
- [84] Wörner, Th.; Neidinger, S.; Westiner, E. (2013). Granulometrische Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1100, Wirtschaftsverlag NW – Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bonn
- [85] DIN EN 933-1:2012-03. Pr
 üfverfahren f
 ür geometrische Eigenschaften von Gesteinsk
 örnungen
 Teil 1: Bestimmung der Korngr
 ö
 ßenverteilung Siebverfahren.
- [86] DIN EN 933-4:2008-06. Pr
 üfverfahren f
 ür geometrische Eigenschaften von Gesteinsk
 örnungen
 Teil 4: Bestimmung der Kornform Kornformkennzahl.
- [87] DIN EN 933-5:2005-02. Pr
 üfverfahren f
 ür geometrische Eigenschaften von Gesteinsk
 örnungen
 Teil 5: Bestimmung des Anteils an gebrochenen K
 örnern in groben Gesteinsk
 örnungen; Deutsche Fassung EN 933-5:1998 A1:2004
- [88] DIN EN 933-6:2014-07. Pr
 üfverfahren f
 ür geometrische Eigenschaften von Gesteinsk
 örnungen
 Teil 6: Beurteilung der Oberfl
 ächeneigenschaften Flie
 ßkoeffizient von Gesteinsk
 örnungen.
- [89] DIN EN 13139:2002-08. Gesteinskörnungen für Mörtel.
- [90] DIN EN 12620:2008-07. Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008.
- [91] DIN 18127:2012-09. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben Proctorversuch.
- [92] DIN EN ISO 10414-2:2011-09. Erdöl- und Erdgasindustrie Feldprüfung von Bohrflüssigkeiten – Teil 2: Flüssigkeiten auf Ölbasis
- [93] DIN EN 196-6:2010-05. Prüfverfahren für Zement Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit.
- [94] DIN 4094-4:2002-01. Felduntersuchungen Teil 4: Flügelscherversuche.
- [95] DIN 18137-3:2002-09. Bestimmung der Scherfestigkeit Teil 3: Direkter Scherversuch.
- [96] Möller, G. (2013). Geotechnik Bodenmechanik. Ernst & Sohn, Berlin, 2. Auflage, ISBN 978-3-433-02996-1, S. 185 ff.
- [97] DIN 18121-1:1998-04. Wassergehalt Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung.

- [98] Adam, D. u.a. (2012). Handbuch Geotechnik. Grundlagen Anwendungen Praxiserfahrungen.
 Hrsg.: Boley, C. Vieweg + Teubner Verlag, 1. Auflage, ISBN 978-3-8348-0372-6, S. 120 ff.
- [99] DIN EN 1015-1:2007-05. Pr
 üfverfahren f
 ür M
 örtel f
 ür Mauerwerk Teil 1: Bestimmung der Korngr
 ö
 ßenverteilung (durch Siebanalyse).
- [100] DIN EN 12350-9:2010-12. Pr
 üfung von Frischbeton Teil 9: Selbstverdichtender Beton Auslauftrichterversuch.
- [101] Eden, W. (2011). Einfluss der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen auf die Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen. Dissertation, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 15, Universität Kassel
- [102] Haack, A.; Schäfer, M. (2014). Tunnelbau in Deutschland: Statistik (2013/2014), Analyse und Ausblick. Tunnel 8/2014, S. 16-27
- [103] Prinz, H.; Strauß, R. (2011). Ingenieurgeologie. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 5. Auflage, ISBN 978-8274-2472-3
- [104] Shirlaw, J.N., Richards, D.P.; Ramond, P.; Longchamp, P. (2004). Recent Experience in Automatic Tail Void Grouting with Soft Ground Tunnel Boring Machines. In Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, 22-27 May 2004, Singapore, F03
- [105] Thienert, C.; Pulsfort, M. (2015). Zementfreier Ringspaltmörtel Eigenschaften, Anforderungen und Anwendungsgrenzen. Tunnelbau 2015, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 39. Jg., ISBN 978-3-433-03099-8, S. 288-317
- [106] Peila, D.; Borio, L.; Pelizza, S. (2011). The Behaviour of a two-component backfilling grout used in a tunnel-boring machine. Acta Geotechnica Slovenica, 2011/1, p. 5-15
- [107] Bäppler, K. (2008). Entwicklung eines Zweikomponenten-Verpresssystems für Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb. Tunnelbau 2008, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 32. Jahrgang, ISBN 978-3-86797-001-3, S. 263-304
- [108] Xu, Q. (2005). Chemische Wirkung von Erstarrungsbeschleunigern auf die frühe Hydratation des Portlandzements. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar
- [109] Kovári, K.; Amberg, F.; Ehrbar, H. (1999). Tunnelbau in druckhaftem Gebirge Eine Herausforderung für die neuen Alpentransversalen. In: X. Kolloquium für Bauverfahrenstechnik: Tunneltechnologien für die Zukunftsaufgaben in Europa. Lehrstuhl für Baustofftechnik, Tunnelbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum (Hrsg.), A.A. Balkema, Rotterdam, S. 1-10
- [110] Terzaghi, K.; Peck, R.B. (1961). Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Springer-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-642-92829-1
- [111] Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons Inc., New York, London

- [112] Hornung, F.; Setzer, M.J. (1988). Anmachwasserverlust von Frischbeton Entwässerung des Frischbetons unter hohem Druck. Beton 6 (1988), S. 233-236
- [113] Soos von P.; Engel, J. (2008). Eigenschaften von Boden und Fels ihre Ermittlung im Labor. In: Grundbau-Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Hrsg.: Witt, K.J. Ernst & Sohn, Berlin, S. 152
- [114] Philipp Holzmann AG/Herrenknecht AG (1997). Fließverhalten und Druckverhältnisse ausgewählter Mörtelrezepturen im simulierten Ringraum. Bericht zum Forschungsprojekt zur Ringraumverpressung der Philipp Holzmann AG/Herrenknecht AG
- [115] Zement-Merkblatt (2012). Gesteinskörnungen für Normalbeton. Betontechnik B2, 1.2012

ANHANG A "CHARAKTERISTISCHE KENNGRÖßEN DER FEINSTOFFE"

Tain staffs	Zement	Flugasche	Kalksteinfeinmehl	Quarzmehl	Hüttensand
reinstone	CEM I 42,5 R	EFA-Füller KM/C	ip300	M300	CEMEX
Physikalische Eigensc	haften:				
Dichte [g/cm³]	3,1	2,2	2,7	2,5	2,8
Blaine-Wert [cm²/g]	3720	3640	5050	3810	3280
Wasseranspruch (NST) [M%]	43,0	29,0	34,0	41,0	42,0
Chemisch-mineralogis	che Zusammensetzu	ng [M%]:			_
SiO ₂	19,8	50,3	0,6	99,6	35,8
CaO	59,5	3,4	61,0	0,0	42,1
CaCO ₃	-	-	-	-	-
MgO	1,2	1,8	0,3	0,0	5,0
SO3	3,1	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	5,3	25,6	0,2	0,1	11,3
Fe ₂ O ₃	2,0	6,4	0,2	0,0	0,4
Na ₂ O	0,2	0,9	-	0,0	0,2
K ₂ O	0,9	3,7	-	0,0	0,5
MnO	0,1	0,1	-	-	0,3
TiO ₂	0,3	1,0	-	0,0	1,2
P ₂ O ₅	0,1	0,4	-	-	0,0

Tabelle A.1: Physikalische Eigenschaften und chemisch-mineralogische Zusammensetzungen der Feinstoffe

Tabelle A.2: Chemisch-mineralogische	Zusammensetzungen der Bentonite im	Vergleich zu einem reinen
Bentonit "Wyoming"		

	Bentonit						
Feinstoffe	Wyoming	B1	СТ	HT-X			
	(rein)			(Basis)			
Chemisch-mineralog	gische Zusammensetz	ung [M%]					
SiO ₂	51,64	51,19	51,71	53,05			
CaO	3,59	3,57	4,96	5,04			
MgO	1,90	4,07	3,34	4,83			
Al_2O_3	15,64	17,13	17,55	17,38			
Fe ₂ O ₃	5,63	5,80	4,68	4,72			
Na ₂ O	2,52	3,04	2,76	3,00			
K ₂ O	1,32	1,51	0,99	0,64			
MnO	0,13	0,07	0,06	0,06			
TiO ₂	0,70	0,42	0,74	0,71			
P_2O_3	0,25	0,07	0,15	0,14			

		Bentonit	
	B1	HT-X	СТ
		(Basis)	
Suspensionseigenschaften			
Konzentration [kg/m ³]	60	60	60
Suspensionsdichte [g/cm ³]	1,033	1,032	1,034
Filtratvolumen V _{7,5min} (API) [ml]	11,3	12,3	13,9
Filtratvolumen V _{30min} (API) [ml]	20,7	21,5	26,3
Filterkuchendicke [mm]	1,3	3,5	1,6
Marsh-Zeit t _{m-1000} (EN 1538) [s/l]	38	76	38
Marsh-Zeit tm 1500 (EN 1538) [s/l]	110	207	108





Zeit [Vmin]

Abbildung A.1: Zeitliche Entwicklung der Filtratwasserabgaben V_{30min} der Bentonitsuspensionen (B1, HT-X, CT) mit jeweils einer Feststoffkonzentration von 6 % nach EN ISO 10414-2 [92]

Bentonit	B1		HT-X (Basis)		СТ	
Zoit	Filtratvolumen	Filtratvolumen	Filtratvolumen	Filtratvolumen	Filtratvolumen	Filtratuo humon AV
[min]	V	ΔV	v	$\Delta \mathbf{V}$	V	
լաայ	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	լասյ
1	5,2	0	6,0	0	5,6	0
2	6,6	1,4	7,6	1,7	7,7	2,1
3	7,9	1,2	8,7	1,0	9,1	1,4
4	8,7	0,8	9,7	1,0	10,3	1,2
5	9,5	0,8	10,5	0,8	11,6	1,2
6	10,3	0,8	11,1	0,6	12,6	1,0
7	10,9	0,6	12,0	0,8	13,4	0,8
8	11,6	0,6	12,6	0,6	14,3	0,8
9	12,2	0,6	13,2	0,6	15,1	0,8
10	12,8	0,6	13,8	0,6	15,9	0,8
11	13,2	0,4	14,2	0,4	16,5	0,6
12	13,8	0,6	14,9	0,6	17,2	0,6
13	14,3	0,4	15,3	0,4	17,8	0,6
14	14,9	0,6	15,7	0,4	18,4	0,6
15	15,3	0,4	16,1	0,4	19,0	0,6
16	15,5	0,2	16,5	0,4	19,6	0,6
17	16,1	0,6	16,9	0,4	20,1	0,4
18	16,3	0,2	17,3	0,4	20,7	0,6
19	16,7	0,4	17,8	0,4	21,1	0,4
20	17,4	0,6	18,2	0,4	21,5	0,4
21	17,6	0,2	18,6	0,4	22,1	0,6
22	18,0	0,4	19,0	0,4	22,7	0,6
23	18,4	0,4	19,2	0,2	23,2	0,4
24	18,8	0,4	19,4	0,2	23,8	0,6
25	19,2	0,4	19,8	0,4	24,2	0,4
26	19,4	0,2	20,2	0,4	24,6	0,4
27	19,8	0,4	20,4	0,2	25,0	0,4
28	20,0	0,2	20,8	0,4	25,4	0,4
29	20,2	0,2	21,3	0,4	25,9	0,4
30	20,7	0,4	21,5	0,2	26,3	0,4
31	20,9	0,2	21,9	0,4	26,7	0,4
gesamt		15,7		15,9		21,1

Tabelle A.4: Ergebnisse der Filtratwasserabgaben V nach DIN EN ISO 10414-2 [92]

ANHANG B "REM-AUFNAHMEN DER FEINSTOFFE"



Abbildung B.1: REM-Aufnahme des unhydratisierten Zements CEM I 42,5 R (Fa. Dyckerhoff GmbH, Werk Lengerich)



Abbildung B.2: REM-Aufnahme der Steinkohleflugasche "EFA-Füller KM/C" (Fa. Baumineral, Kraftwerk Knepper/Dortmund)



Abbildung B.3: REM-Aufnahme des Kalksteinfeinmehls ip300 (Fa. HeidelbergCement AG, Kalkwerk Istein)



Abbildung B.4: REM-Aufnahme des Quarzmehls "Microsil M300" (Fa. Euroquarz GmbH, Dorsten)



Abbildung B.5: REM-Aufnahme des Hüttensandmehls (Fa. Cemex Deutschland AG, Dortmund)



Abbildung B.6: REM-Aufnahmen des Bentonits "HT-X" (Fa. Ibeco)



ANHANG C "SIEBLINIEN DER KORNGEMISCHE"

Abbildung C.1: Sieblinie B8 der Basisrezeptur im Vergleich zu den Regelsieblinien nach DIN 1045-2 [53]



Abbildung C.2: Modifikation der Sieblinie B8 der Basisrezeptur nach DIN 1045-2 [53]





Abbildung C.3: Modifikation der Sieblinie B8 (F8 %) der Basisrezeptur B-60 durch Erhöhung des Feinanteils (0,063-0,25 mm)



Abbildung C.4: Modifikation der Sieblinie B8 (Quarzsand QS, Kies K) der Basisrezeptur B-60 durch Substitution der Gesteinskörnung (Brechsand BS, Basaltsplitt Sp)

ANHANG D "MÖRTELZUSAMMENSETZUNGEN"

Ausgangskomponenten	Einheit	Inaktiv]	Bedingt aktiv		
Z:FA	[M%]	0:100	10:90	25:75	30:70	50:50
Zement CEM I 42,5 R	[kg/m³]	0	39	97	116	194
Flugasche	[kg/m ³]	388	349	291	272	194
Quarzsand 0,063-1 mm	[kg/m ³]	169	169	169	169	169
Quarzsand 0,063-2 mm	[kg/m ³]	674	674	674	674	674
Quarzkies 2-8 mm	[kg/m ³]	454	454	454	454	454
Sieblinie	[-]	B8	B8	B8	B8	B8
Bentonitsuspension	[kg/m ³]	166	166	166	166	166
(6 % Konzentration)						
Wasser	[kg/m³]	164	164	164	164	164
W/B-Wert	[-]	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85

Tabelle D.1: Mörtelrezepturen mit Variation des Zement/Flugasche-Verhältnisses

Tabelle D.2: Bedingt	aktive Mörtelrezepture	en mit Substitution von	n Flugasche durch	Kalksteinfeinmehl
----------------------	------------------------	-------------------------	-------------------	-------------------

Ausgangskomponenten	Einheit	Bedingt aktiv		
Z:FA:KSM	[M%]	15:75:10	15:45:40	15:5:80
Zement CEM I 42,5 R	[kg/m³]	60	60	60
Flugasche	[kg/m³]	246	148	66
Kalksteinfeinmehl	[kg/m³]	82	180	262
Quarzsand 0,063-1 mm	[kg/m³]	169	169	169
Quarzsand 0,063-2 mm	[kg/m³]	674	674	674
Quarzkies 2-8 mm	[kg/m³]	454	454	454
Sieblinie	[-]	B8	B8	B8
Bentonitsuspension	[kg/m³]	166	166	166
(6 % Konzentration)				
Wasser	[kg/m³]	164	164	164
W/B-Wert	[-]	0,85	0,85	0,85

Ausgangskomponenten	Einheit	Bedingt aktiv			
Z:FA:HSM	[M%]	15:80:5	15:75:10	15:40:45	
Zement CEM I 42,5 R	[kg/m³]	60	60	60	
Flugasche	[kg/m³]	262	246	131	
Hüttensandmehl	[kg/m³]	66	82	197	
Quarzsand 0,063-1 mm	[kg/m³]	169	169	169	
Quarzsand 0,063-2 mm	[kg/m³]	674	674	674	
Quarzkies 2-8 mm	[kg/m³]	454	454	454	
Sieblinie	[-]	B8	B8	B8	
Bentonitsuspension	[kg/m ³]	166	166	166	
(6 % Konzentration)					
Wasser	[kg/m³]	164	164	164	
W/B-Wert	[-]	0,85	0,85	0,85	

Tabelle D.3: Bedingt aktive Mörtelrezepturen mit Substitution von Flugasche durch Hüttensandmehl

Ausgangskomponenten	Einheit	Bedingt aktiv		
Z:FA:QM	[M%]	15:80:5	15:75:10	15:65:20
Zement CEM I 42,5 R	[kg/m³]	60	60	60
Flugasche	[kg/m³]	262	246	213
Kalksteinfeinmehl	[kg/m³]	66	10	115
Quarzsand 0,063-1 mm	[kg/m³]	169	169	169
Quarzsand 0,063-2 mm	[kg/m³]	674	674	674
Quarzkies 2-8 mm	[kg/m ³]	454	454	454
Sieblinie	[-]	B8	B8	B8
Bentonitsuspension	[kg/m³]	166	166	166
(6 % Konzentration)				
Wasser	[kg/m³]	164	164	164
W/B-Wert	[-]	0,85	0,85	0,85

Ausgangskomponenten	Einheit	Bedingt aktiv			
Feinanteil	[M%]	8	16	22	
Zement CEM I 42,5 R	[kg/m³]	60	60	60	
Flugasche	[kg/m³]	328	328	328	
Feinstsand 0,063-0,25 mm	[kg/m³]	104	208	286	
Quarzsand 0,063-1 mm	[kg/m³]	148	127	111	
Quarzsand 0,063-2 mm	[kg/m³]	591	508	446	
Quarzkies 2-8 mm	[kg/m³]	454	454	454	
Sieblinie	[-]	B8	B8	B8	
Bentonitsuspension	[kg/m³]	166	166	166	
(6 % Konzentration)					
Wasser	[kg/m³]	164	164	164	
W/B-Wert	[-]	0,85	0,85	0,85	

Tabelle D.5: Bedingt aktive Mörtelrezepturen mit erhöhtem Feinanteil der Gesteinskörnung (0,063-0,25 mm)

Tabelle D.6: Bedingt al	ktive Mörtelrezepturen	mit Substitution von	Quarzsand durch Brechsand
	1		C C C C C C C C C C C C C C C C C C C

Ausgangskomponenten	Einheit	Bedingt aktiv	
Zement CEM I 42,5 R	[M%]	60 60	
Flugasche	[kg/m³]	328	328
Quarzsand 0,063-1 mm	[kg/m ³]	169	-
Quarzsand 0,063-2 mm	[kg/m ³]	-	522
Brechsand 0-2 mm	[kg/m ³]	782	489
Quarzkies 2-8 mm	[kg/m ³]	454	454
Sieblinie	[-]	B8	B8
Bentonitsuspension	[kg/m ³]	166	166
(6 % Konzentration)			
Wasser	[kg/m³]	164	164
W/B-Wert	[-]	0,85	0,85

Seite	150
~ ~ ~ ~ ~ ~	

Ausgangskomponenten	Einheit		Bedingt aktiv	7
Zement CEM I 42,5 R	[kg/m³]	60	60	60
Flugasche	[kg/m³]	328	328	328
Quarzsand 0,063-1 mm	[kg/m³]	-	169	
Quarzsand 0,063-2 mm	[kg/m³]	-	674	
Brechsand 0-2 mm	[kg/m³]	994	-	994
Quarzkies 2-8 mm	[kg/m³]	454	-	_
Basaltsplitt 2-8 mm	[kg/m³]		535	535
Sieblinie	[-]	B8	B8	B8
Bentonitsuspension	[kg/m³]	166	166	166
(6 % Konzentration)				
Wasser	[kg/m³]	164	164	164
W/B-Wert	[-]	0,85	0,85	0,85

 Tabelle D.7: Bedingt aktive Mörtelrezepturen mit Substitution von Sand/Kies-Gemisch durch Brechsand und Basaltsplitt

ANHANG E "MODIFIZIERTER FILTERPRESSVERSUCH"

rtuenwens der Fluttendi	ene des	Stamoonartors	emgesp		<u>reispiace.</u>	
Radius R:	95,40 [mm]					
Plattendicke d:	5,00 [mm]					
E-Modul E:	210.000 [N/mm ²]					
Streckgrenze f _{y,d} :	235 [N	[/mm²]				
Belastung p:	7,00 [b	par]				
Eigengewicht G:	0,10 [N	J/mm²]	mit Wi	chte des	Inhalts W:	2,045 kg/m ³
Durchbiegung f _{max} :	1,00 [n	nm]				
Spannung in Plattenmit	tte:	$\sigma(r) = \sigma(t) = 142,5 \text{ [N/mm2]}$		$< f_{y,d} \rightarrow$ Nachweis erfüllt!		
Spannung am Rand:		$\sigma(r) = 219 \ [N/mm^2]$		$< f_{y,d} \rightarrow$ Nachweis erfüllt!		
		$\sigma(t) = 65,7 [N/m]$	nm²]		$< f_{y,d} \rightarrow Nachv$	veis erfüllt!
Durchbiegung in Platte	enmitte:	f = 0,43[mm]				
Mindestplattendicke	d _{min} :					
aus Streckgrenze:		$f_{y,d} = 235 [N/n]$	nm²]	\rightarrow	<u>d_{min} = 4,84 [m</u>	<u>1m]</u>
aus Durchbieg	gung:	f _{max} = 1,00 [m	m]			
		f/R = 0,01 [-]		\rightarrow	<u>d_{min} = 3,78 [n</u>	<u>1m]</u>
Nachweis der Wanddic	ke des S	Stahlzylinders:				
Durchmesser dinnen:	180 [mm]					
Durchmesser d _{außen} :		190,8 [mm]				
Höhe h:		200 [mm]				
Innendruck p:		7,0 [bar]				

Nachweis der Plattendicke des Stahlbehälters – eingespannte Kreisplatte:

Mindestwanddicke s_{min}: 0,28 [mm]

235 [N/mm²]

Streckgrenze f_{y,d}:

	ę	Q			
Belastung p:	7,00 [bar]				
Eigengewicht G:	0,10 [N/mm ²]	mit Wichte des Inhalts	W: 2,0	45 kg/m ³	
nach EN 1993-1-8					
Nach EN 1993-1-8:					
Schraubenfest	igkeitsklasse:	4.6/4.8 [-]			
Nennweite M:		M6 [-]			
Zugtragfähigk	eit F _{t,RD} :	5,79 [kN]			
Anzahl Schrauben <u>n =</u>	12 [-]	Grenzzugkraft F _{Ed} = 1,7 [kN]	$< F_{t,RD} \rightarrow N$	Nachweis erfüllt!	

Nachweis der Schraubenverbindungen unter Zugbeanspruchung:

ANHANG F "RAHMENSCHERVERSUCH"

Der Aufbau zum Rahmenscherversuch bestand im Wesentlichen aus einer Scherzelle, einer Belastungsvorrichtung und der einschlägigen Messtechnik. Abbildung F.1 zeigt das Rahmenschergerät während eines laufenden Versuchs mit angeschlossener Messtechnik.



Abbildung F.1: Aufbau zum Rahmenscherversuch

Die Scherzelle bestand aus zwei übereinander liegenden starren Rahmen mit quadratischem Grundriss, in die die zu untersuchende Mörtelprobe eingebaut wurde. Der Aufbau der Rahmen (Scherzelle) ist in Abbildung F.2 schematisch dargestellt. Die Probenhöhe von 4 cm entsprach der normgemäßen Mindestanforderung, dem 5-fachen des Größtkorns (~8 mm). Die Rahmen wiesen eine Seitenlänge a_{Rahmen} von jeweils 10 cm und eine Höhe H_{Rahmen} von 2,5 cm (oben) bzw. 1,5 cm (unten) auf. Abweichend von der Norm betrug das H/a-Verhältnis der Probenhöhe zur Seitenlänge 0,4.



Abbildung F.2: Schematischer Aufbau der Scherzelle

Im unteren Rahmen ist eine Teflonschicht eingearbeitet, um einen nahezu reibungsfreien Vorschub zu ermöglichen. Analog zu den Entwässerungsversuchen entsprechend Abschnitt 5.2.1 wurden auch beim Rahmenscherversuch einschlägige Bohrungen mit einem Lochdurchmesser $Ø_{Loch}$ von ca. 5 mm in der Bodenplatte des unteren Rahmens ausgeführt, um eine vollflächige Entwässerung des Mörtels zu gewährleisten. Beim Einbau und während des Konsolidierungsvorgangs des Mörtels unter einer definierten Normalspannung waren die beiden Rahmen durch zwei Metallstifte starr miteinander verbunden, um ein vorzeitiges Verschieben dieser Rahmen vor dem eigentlichen Abschervorgang zu verhindern. Die Normalkraft N wurde über Luftdruck mit einem Barometer aufgebracht. Mit einer Normalkraft von 2,5 kN ergab sich eine Normalspannung von 250 kN/m² bezogen auf die Scherfläche des Mörtels von 10x10 cm². Die durch die Konsolidierung bedingten vertikalen Setzungen bzw. die Volumenminderung des Mörtels wurden mit induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet.

Während des Abschervorgangs des konsolidierten Mörtels wurde die für den Konsolidierungsvorgang definierte Normalspannung senkrecht zur Scherfläche konstant gehalten. Die Normalspannung wurde mit einem Pneumatik-Zylinder über einen Stempel direkt auf die Mörtelprobe aufgebracht. Als Verbindung zwischen Pneumatik-Zylinder und Stempel wurde eine Pendelstütze eingebaut, um einen ausschließlich einachsigen Spannungszustand ("reiner Druck") zu erzeugen. Der Druck wurde während des Abschervorgangs mit einer zwischen dem Pneumatik-Zylinder und der Pendelstütze angeordneten Wägezelle geregelt. Der Rahmenscherversuch wurde weggesteuert durchgeführt. Dabei wurde der untere Rahmen mit konstanter Geschwindigkeit kontinuierlich vorgeschoben, wobei der obere Rahmen starr in seiner Position verblieb. Die Schergeschwindigkeit wurde entsprechend der Drehgeschwindigkeit der Messung mit der Flügelsonde von 0,1 °/s wie folgt rechnerisch hergeleitet:

$$=> 0, 1^{\circ}/s = 6^{\circ}/\min$$
$$=> 1^{\circ}/s = \frac{2\pi}{360} \text{rad} = \frac{\pi}{180} \text{rad} \approx 0,017453293 \text{ rad/s}$$
$$=> 6^{\circ}/\min \approx 0,104719758 \text{ rad} \approx 1,00 \text{ mm/min}$$

Gemäß Norm ergab sich bei einer Seitenlänge der Mörtelprobe von 10 cm ein Gesamtscherweg von 15 mm. Während der gesamten Versuchsdauer wurden die Scherkraft τ [N] mit einer Kraftmessdose und der Scherweg u [mm] mit einem Seilzug-Wegsensor gemessen. In Abbildung F.3 ist der Ablauf des Rahmenscherversuchs schematisch dargestellt.



Abbildung F.3: Schematischer Ablauf des Rahmenscherversuchs (oben) und Aufbau der Pendelstütze zwischen dem Pneumatik-Zylinder und der Belastungsplatte (unten)

LEBENSLAUF

PERSÖNLICHES

■ Name	Bou-Young Youn
 Geburtsdatum 	24.09.1981
 Geburtsort 	Essen
 Familienstand 	Ledig
 Nationalität 	Deutsch
AUSBILDUNG	
 10/2001 - 03/2008 	Bauingenieurwesen, Universität Duisburg-Essen
	Abschluss: DiplIng. (DII)
 1992 – 2001 	Maria-Wächtler-Gymnasium mit Bilingualzweig
	Englisch, Essen
 1988 – 1992 	Käthe-Kollwitz-Grundschule, Essen
BERUFSERFAHRUNGEN	
 Seit 06/2008 	Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Ruhr-Universität
	Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik,
	Prof. DrIng. Rolf Breitenbücher
■ 01/2007 – 03/2008	Studentische Hilfskraft, Universität Duisburg-
	Essen, Institut für Bauphysik und Materialwissen-
	schaft, Prof. Dr. rer. nat. DrIng. habil. Max Setzer
■ 10/2007 – 01/2008	Tutorin, Universität Duisburg-Essen, Institut für
	Stadtplanung und Städtebau,
	Prof. DrIng. J. Alexander Schmidt
■ 01/2006 – 12/2006	Werkstudentin in der Bauleitung, HOCHTIEF
	Construction AG, Bauen im Bestand
Auslandsaufenthalt	
■ 09/1998 – 08/1999	Graduation an der Maine-South-High School, Park

Ridge, Chicago, Illinois, U.S.A.