#### Materialkonzepte zur Aktivierung von Ringspaltverfüllmaterialien im maschinellen Tunnelbau

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

#### DOKTOR-INGENIEURS

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

#### DISSERTATION

von

Christoph Schulte-Schrepping, M.Sc. aus Dorsten



Sonderforschungsbereich 837 Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau

Bochum, im August 2020

Tag der Einreichung:	14. April 2020
Tag der mündlichen Prüfung:	16. Juli 2020
1. Gutachter:	UnivProf. DrIng. Rolf Breitenbücher Lehrstuhl für Baustofftechnik Ruhr-Universität Bochum
2. Gutachter:	Prof. DrIng. Markus Thewes Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb Ruhr-Universität Bochum

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum entstanden.

Diese Arbeit basiert auf dem Teilprojekt B3 "Ringspaltmörtel – Entwicklungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Interaktionen mit dem Gebirge und Tübbingausbau" des Sonderforschungsbereiches 837 "Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau". An dieser Stelle sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung meiner Arbeit herzlich gedankt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und das mir entgegen gebrachte Vertrauen. Dadurch war es mir möglich, eigene Ideen und Ziele zu verfolgen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Koreferats.

Bei allen wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Baustofftechnik möchte ich mich für die freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Frau Dr.-Ing. Bou-Young Youn-Cale und Herrn M.Sc. Robin Przondziono. Die zahlreichen Gespräche miteinander haben wertvolle Anregungen und auch Motivation hervorgebracht. Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch sehr herzlich bei allen (auch ehemaligen) Kollegen des Baustofflabors. Hierbei insbesondere bei Herrn Cengiz Simsek, Herrn Mike Schmidtmann, Herrn Jörg Pörsch, Frau Kathrin Müller und Herrn Jens Wischum. Deren praktische Unterstützung und auch das Mitdenken in zumeist technischen Belangen haben wesentlich zu dieser Arbeit beigetragen. Diese Zusammenarbeit hat mir über die Jahre viel Freude bereitet. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei den studentischen Hilfskräften Herrn. B.Sc. Maximilian Weiß, Herrn M.Sc. Markus Mülleneisen und Herrn M.Sc. Markus Biskup für deren theoretische sowie praktische Unterstützung und die wertvolle Zusammenarbeit.

Meinem Bruder, Herrn M.Sc. Jonas Schulte-Schrepping, danke ich für die Durchsicht des Manuskripts.

Ein ganz besonderes Dankeschön gilt meinen Schwiegereltern, Hermann und Beate Stolzenberger. Durch deren stetige und fast schon selbstlose Unterstützung war es erst möglich, diese Arbeit zu verfassen. Ohne diese Hilfe wäre der Spagat zwischen Arbeit und Familie nicht gelungen.

Meiner Mutter, Mechthild Schulte-Schrepping, möchte ich an dieser Stelle dafür danken, dass Sie mir diesen Werdegang ermöglicht und mich zu jeder Zeit unterstützt hat.

Mein größter Dank gilt meiner Familie für Ihre Geduld und den stetigen Rückhalt. Die Entstehung dieser Arbeit wurde erst durch die Unterstützung meiner Frau Anne möglich. Meine Familie und meine Kinder Henri, Max und Lore waren die größte Motivation und auch die schönste Ablenkung.

Dorsten, im August 2020 Christoph Schulte-Schrepping

# Kurzfassung

Im maschinellen Tunnelvortrieb mit Tübbingausbau entsteht verfahrensbedingt ein Hohlraum zwischen der Tübbingaußenseite und der Ausbruchlaibung des umgebenden Bodens. Zur Verfüllung dieses Ringspaltes sind in Abhängigkeit der geologischen Randbedingungen unterschiedliche Verfüllmaterialien erforderlich. Bei gegebener Durchlässigkeit des Bodens kommen in der Regel Ein-Komponenten-Mörtel zum Einsatz. Deren Verfestigung wird durch eine Entwässerung des Mörtels in den angrenzenden Boden erzielt. In bindigen, wasserführenden oder schwach durchlässigen Böden können Zwei-Komponenten-Mörtel eingesetzt werden. Deren Festigkeitsentwicklung findet auf chemischer Ebene durch Aktivatoren systeminhärent statt. Unmittelbar nach dem Verpressvorgang müssen Ringspaltverfüllmaterialien eine rasche Verfestigung und Frühfestigkeitsentwicklung aufweisen, um die frühe Bettung der Tübbingröhre sicherzustellen. Die Zusammensetzung von Ringspaltverfüllmaterialien erfolgt bis dato auf rein empirischer Basis. Grundlegende materialtechnologische Parameter zur Festlegung geeigneter Zusammensetzungen sind aktuell nicht verfügbar. Ebenfalls sind systematische Abhängigkeiten der zum Teil in Wechselwirkung stehenden Frisch- und Festmörteleigenschaften nicht erfasst.

In der vorliegenden Arbeit, welche im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereiches 837 entstand, werden Materialkonzepte zur Aktivierung von Ringspaltverfüllmaterialien entwickelt. Der Fokus der in sich autarken Konzepte liegt zum einen auf einer alkalischen Aktivierung latent-hydraulischer und puzzolanischer Ausgangstoffe und zum anderen auf einer physikalischen Aktivierung durch superabsorbierende Polymere (SAP). Als systematische Grundlage für die Konzepte wurde auf Basis von Untersuchungen an einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel eine materialtechnologische und gleichsam baupraktische Zustandsdifferenzierung der Erhärtungsphase aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien in eine Gelund Festigkeitsphase vorgenommen. Diese Bereiche lassen sich materialtechnologisch entkoppeln und deren Zustände können durch den Einsatz unterschiedlicher Stoffe auf separate Weise erzielt werden.

Das Konzept der alkalischen Aktivierung fokussiert die gezielte Anregung von Zusatzstoffen im Rahmen der Festigkeitsphase. Dabei erwies sich der Einsatz von Hüttensand in Kombination mit einem Wasserglas als vorteilhaft. Für die Gelierung, welche als maßgebliches Kriterium für dessen Bindemittelanteil identifiziert wurde, war es jedoch notwendig, einen calciumbasierten Stoff (Portlandzement, Calciumhydroxid) zur Verfügung zu stellen. Dieser Ansatz ermöglicht die Verwendung von Zusatzstoffen als reaktiver Hauptbestandteil des Bindemittels bei Einhaltung verfahrenstechnischer Anforderungen und zum Teil günstigeren Materialeigenschaften.

Die physikalische Aktivierung durch SAP als aktivierende Komponente wirkt in der Gelphase und verursacht unmittelbar nach Zugabe zum Mörtel aufgrund des Wasseraufnahmevermögens der SAP eine innere Entwässerung und somit Verfestigung. Dabei konnten eindeutige und für den praktischen Einsatz wesentliche Korrelationen, wie beispielsweise die Wechselwirkung zwischen der Alkalität des Porenwassers, dem Wasseraufnahmevermögen der SAP und den erreichten Festigkeiten abgeleitet werden.

Zur verfahrenstechnischen Bewertung der Materialkonzepte wurde ein Versuchsstand zur Simulation der Ringspaltverpressung entwickelt. Im Vergleich zu klassischen Ringspaltverfüllmaterialien erwiesen sich die Konzepte für einen Verpressvorgang als grundsätzlich geeignet, wobei im Hinblick auf eine großtechnische Anwendung zum Teil verfahrenstechnische Anpassungen notwendig werden.

## Abstract

In mechanized tunneling with segmental lining, a gap is created between the outside of the segments and the excavation surface of the surrounding soil. Depending on the geological conditions, different backfill materials are required to fill this annular gap. In case of a certain permeability of the soil, usually single-component-grouts are commonly used. Their consolidation is achieved by dewatering the grout into the adjoining soil. Two-component-grouts can be used in cohesive, water-bearing or less permeable soils. Their strength development takes place on a chemical level through activators inherent to the system. Immediately after the grouting process, annular gap filling materials must exhibit rapid consolidation and early strength development, in order to ensure the early bedding of the tunnel lining. The mix designs of annular gap backfilling materials have so far been carried out on an empirical basis. Fundamental material technological parameters for the determination of suitable compositions are currently not available. Furthermore, systematic correlations of the partly interacting fresh and solid grout properties have not been determined.

In this thesis, which was compiled within the framework of the DFG Collaborative Research Centre 837, material concepts for the activation of annular gap filling materials are developed. On the one hand, the focus of the autonomous concepts was on an alkaline activation of latent hydraulic and pozzolanic precursors. On the other hand, a physical activation by superabsorbent polymers (SAP) was considered. As a systematic foundation for the concepts, a material-technological and practical differentiation of the hardening phase of activated annular gap filling materials into a gel and strength phase was carried out on the basis of investigations on a classical two-component grout. In terms of material technology, these areas can be decoupled and their states can be achieved in separate ways by using different materials.

The concept of alkaline activation focuses on the specific activation of additives in the course of the strength phase. The use of granulated blast furnace slag in combination with water glass proved to be advantageous. However, for gelation, which was identified as the decisive criterion for this binder content, it was necessary to provide a calcium-based material (Portland cement, calcium hydroxide). This approach allows the use of additives as the main reactive component of the binder, while complying with process engineering requirements and, in some cases, more favorable material properties.

The physical activation by SAP as the activating component acts in the gel phase and, due to its water absorption capacity, it causes an internal dewatering and thus a solidification immediately after its addition to the grout. In this process, it was possible to derive definite correlations which are essential for practical use, such as the interaction between the alkalinity of the pore water, the water absorption capacity of the SAP and the achieved strengths.

To evaluate the material concepts in terms of process engineering, a test setup was developed to simulate the annular gap grouting. In comparison to classical annular gap filling materials, the concepts have essentially proven to be suitable for the grouting process. In some cases, however, process engineering adaptations are required with regard to their large-scale technical application.

# Inhaltsverzeichnis

V	orwa	ort		I
K	urzf	assung.		II
A	bstra	act		.III
In	halt	sverzeio	chnis	IV
A	bbild	dungsve	erzeichnis	VIII
Т	abell	lenverze	eichnis	XV.
1		Einfühı	rung	1
	1.1	Moti	vation	1
	1.2	Ziels	setzung	2
	1.3	Wiss	senschaftliches Vorgehen und Aufbau der Arbeit	2
2		Ringspa	altverfüllung im maschinellen Tunnelbau	4
	2.1	Mase	chineller Tunnelbau im Schildvortrieb	4
	2.2	Ents	tehung und Ursachen des Ringspalts	6
	2.3	Notv	vendigkeit der Ringspaltverfüllung	6
3		Materia	alien für die Ringspaltverfüllung	7
	3.1	Grun	ndlegende Einteilung von Ringspaltverfüllmaterialien	7
	3.2	Ausv	wahl geeigneter Ringspaltverfüllmaterialien	8
	3.3	Ein-l	Komponenten-Mörtel	9
	3.4	Zwei	i-Komponenten-Mörtel	11
	3.5	Sons	tige Verpressmaterialien	13
4		Techno	logie der Ringspaltverpressung	13
	4.1	Verp	pressung durch Öffnungen in den Tübbings	13
	4.2	Verp	pressung durch Lisenen im Schildschwanz	14
	4.3	Hers	tellung, Vorhaltung und Transport	20
5		Anford	erungen an Ringspaltverfüllmaterialien	21
	5.1	Grun	ndlegende materialtechnologische Anforderungen	21
	5.2	Verf	ahrenstechnische Anforderungen	22
	5.3	Spez	ifische Anforderungen und Richtwerte an Zwei-Komponenten-Mörtel	24
		5.3.1	Verarbeitungsphase – Komponente A	24
		5.3.2	Erhärtungsphase – Komponente A+B	24

6	Prüfm	ethoden für Zwei-Komponenten-Mörtel	28
	6.1 Ver	arbeitungsphase – Komponente A	
	6.1.1	Fließfähigkeit	
	6.1.2	Sedimentationsstabilität	
	6.2 Erh	ärtungsphase – Komponente A+B	29
	6.2.1	Gelzeit	
	6.2.2	Frühfestigkeit	
	6.2.3	Druckfestigkeit	
	6.3 Präj	paration geeigneter Prüfmörtel	
7	Mater	ialkonzepte	
	7.1 Wir	kungsweisen der Konzepte	
	7.1.1	Bezugsebene – Klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel	
	7.1.2	Alkalische Aktivierung	
	7.1.3	Physikalische Aktivierung	
	7.2 Alk	alische Aktivierung	
	7.2.1	Grundlagen der alkalischen Aktivierung	
	7.2.2	Reaktionsprozesse der alkalischen Aktivierung	
	7.2.3	Ausgangsstoffe für die alkalische Aktivierung	
	7.2.4	Klassifizierung von alkalisch aktivierten Bindemitteln	
	7.2.5	Alkalische Aktivatoren	
	7.2.6	Alkalisch aktivierte Hüttensande	41
	7.3 Phy	sikalische Aktivierung	44
	7.3.1	Superabsorbierende Polymere "SAP"	44
	7.3.2	Chemische Grundlagen	44
	7.3.3	Quellverhalten von SAP	47
8	Unters	uchungen an einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel	
	8.1 Zus	ammensetzung des Basismörtels	49
	8.2 Her	stellung und Lagerung	
	8.3 Ver	arbeitungsphase – Materialkennwerte vor Aktivierung	
	8.4 Erh	ärtungsphase – Materialkennwerte nach Aktivierung	54
	8.4.1	Gelierung	54
	8.4.2	Erosionswiderstand	
	8.4.3	Frühfestigkeit	59
	8.4.4	Scherfestigkeit	61

	8.	4.5	Druckfestigkeit	
	8.	4.6	Steifigkeit	63
	8.	4.7	Gefügeentwicklung (REM-Aufnahmen)	64
	8.5	Fazit		64
9	U	ntersu	chungen zur alkalischen Aktivierung	67
	9.1	Zeme	ntfreier, alkalisch aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel	67
	9.2	Verw	endung von calciumbasierten Gelierhilfen	69
	9.	2.1	Hybride Bindemittel – Portlandzement als Gelierhilfe	69
		9.2.1	1 Ausgangsstoffe	69
		9.2.1	2 Auswahl geeigneter Bindemittelkonfigurationen	
		9.2.1	3 Druckfestigkeit	
		9.2.1	4 Steifigkeit	
		9.2.1	5 Gefügeentwicklung (REM-Aufnahmen)	79
		9.2.1	6 Gelierung	80
		9.2.1	7 Frühfestigkeit	81
		9.2.1	8 Scherfestigkeit	81
		9.2.1	9 Verarbeitbarkeit	83
	9.	2.2	Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid	
		9.2.2	1 Ausgangsstoffe	83
		9.2.2	2 Verarbeitbarkeit	84
		9.2.2	3 Gelierung	85
		9.2.2	4 Scherfestigkeit	86
		9.2.2	5 Druckfestigkeit und Steifigkeit	87
		9.2.2	6 Gefügeentwicklung (REM-Aufnahmen)	88
	9.3	Fazit		88
1(	) U	ntersu	chungen zur physikalischen Aktivierung	90
	10.1	U	itersuchungen am Polymer	
	10	).1.1	Wasseraufnahmevermögen	
	10	0.1.2	Viskositätsänderung	
	10.2	V	erwendung unbehandelter SAP als Aktivator	
	10	).2.1	Ausgangsstoffe und Herstellung	
	10	).2.2	Gelierung und anfängliche Verfestigung	
	10	).2.3	Scherfestigkeit	
	10	).2.4	Druckfestigkeit	
	10	).2.5	Einmischbarkeit von SAP in Mörtel	
	10	).2.6	Gefügeentwicklung (REM-Aufnahmen)	

	10.3	V	erwendung von SAP-Suspensionen als Aktivator	101
	10	0.3.1	Ausgangsstoffe	
	10	0.3.2	Methoden zur Suspendierung von SAP	
	10	0.3.3	Viskositätsänderung bei Verwendung einer SAP-Suspension	
	10	0.3.4	Scherfestigkeit	106
	10.4	Fa	azit	
11	Si	mula	tion der Ringspaltverpressung	108
	11.1	K	onzept des Versuchsstandes	108
	11.2	K	onstruktive Durchbildung	109
	11.3	Μ	lischtechnik	114
	11	.3.1	Klassische und alkalisch aktivierte Zwei-Komponenten-Mörtel	114
	11	.3.2	Physikalisch aktivierte Mörtel	115
	11.4	D	ruckerfassung im Ringraum	116
	11.5	L	aborböden (simulierter Baugrund)	117
	11.6	V	erpressvorgänge von Ringspaltverfüllmaterialien	119
	11	.6.1	Klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel	119
	11	.6.2	Alkalisch aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien	
		11.6	2.1 Alkalisch aktivierte Mörtel mit Zement als Gelierhilfe	
		11.6	2.2 Alkalisch aktivierte Mörtel mit Calciumhydroxid als Gelierhilfe	124
	11	.6.3	Physikalisch aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien	125
		11.6	3.1 Verpressvorgang des nicht-aktivierten Ein-Komponenten-Mörtels	
		11.6	3.2 Verpressvorgang eines durch SAP aktivierten Mörtels	
12	Zı	usami	nenfassung / Fazit	131
	12.1	K	lassische Zwei-Komponenten-Mörtel	131
	12.2	А	lkalische Aktivierung	
	12.3	P	nysikalische Aktivierung	133
	12.4	V	erfahrenstechnische Eignung	
13	A	usblic	k	134
14	Li	iterat	urverzeichnis	137
Aı	nhang	•••••		146
Le	ebensla	auf		

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Schematischer Aufbau der vorliegenden Arbeit	3
Abb. 2-1:	Unterteilung von Tunnelvortriebsmaschinen (modifiziert nach [2])	4
Abb. 2-2:	Erddruckschild (Earth-Pressure-Balance-Schild) (modifiziert nach [7])	5
Abb. 2-3:	Darstellung einer Tunnelauskleidung mit Tübbingen (Ringteilung: 6 Tübbinge, 1 Schlussstein)	5
Abb. 2-4:	Gesamthöhe a) (modifiziert nach [3]) und Ursachen b)-e) des Ringspalts (modifiziert nach [1])	6
Abb. 3-1:	Einteilung von Ringspaltverfüllmaterialien	7
Abb. 3-2:	Schematische Darstellung der Entwässerung von Ein-Komponenten-Mörteln [22]	9
Abb. 3-3:	Grundlegende Zusammensetzung eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels	11
Abb. 4-1:	Primär- und Sekundärverpressung bei der Ringspaltverfüllung [36]	14
Abb. 4-2:	Schematische Darstellung der Ringspaltverpressung durch Lisenen	14
Abb. 4-3:	Links: Mögliche Anordnung der Lisenen im Schildschwanzmantel (modifiziert nach [11]). Rechts: Anschluss der Mörtelzuleitung im Schildschwanz [11]	15
Abb. 4-4:	Links/Mitte: Im Schildschwanz integrierte Lisene [1]. Mitte: Lisenenöffnungen und Bürstendichtung im Schildschwanz (modifiziert nach [11]). Rechts: Außen angeordnete Lisene [1]	15
Abb. 4-5:	Funktionsprinzip des Verpresssystems "TAC" für Zwei-Komponenten-Mörtel (modifiziert nach [37])	16
Abb. 4-6:	Schematische Darstellung eines Verpresssystems für Zwei-Komponenten-Mörtel bei einer Verpressung durch den Schildschwanz [38]	16
Abb. 4-7:	Links: Einfluss der Ringspaltverfüllung auf die Bettung. Rechts: Setzungen bei vollständiger und unvollständiger Ringspaltverfüllung. [8]	17
Abb. 4-8:	Links: Druckverteilung im Ringspalt während der Schildschwanzverpressung [8]. Rechts: Infolge zu hohem Verpressdruck verschobener Schlussstein eines Tübbingrings [27]	18
Abb. 4-9:	Links: Vollständig verfüllter Ringspalt (modifiziert nach [43]). Mitte: Unzureichende Ringspaltverfüllung [44]. Rechts: Unzureichende Ringspaltverfüllung in der Firste [45]	18
Abb. 4-10:	Verpresstes Mörtelvolumen und Verpressdruck beim City-Tunnel Leipzig [11]	19
Abb. 4-11:	Verpressdruck (oben) und Mörtelmenge (unten) je Ring der Süd- und Nordrichtung der Chaloem-Ratchamongkhon-Linie der Bangkok-Metro [46]	19
Abb. 4-12:	Materialmischer (Links: Turbomischer; Rechts: Agitator) für die Komponente A eines Zwei-Komponenten-Mörtels [47]	20
Abb. 4-13:	Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit eines Zwei-Komponenten-Mörtels in Abhängigkeit des Mischertyps zur Herstellung der Komponente A [41]	20
Abb. 4-14:	Links: Doppelkolbenpumpe und Mörtelvorratsbehälter [11]. Rechts: Schneckenpumpe (modifiziert nach [48])	21
Abb. 5-1:	Übersicht allgemeiner, qualitativer Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien bei einer zeitlichen und räumlichen Differenzierung	22
Abb. 5-2:	Links: Erforderliche Scherfestigkeit gegen Auftrieb (Berechnung nach [10]). Rechts: Prinzip der wirkenden Kräfte (Auftriebskraft / Scherkraft) (modifiziert nach [50])	23
Abb. 5-3:	Materialtechnologische Differenzierung der Erhärtungsphase eines Zwei- Komponenten-Mörtels in eine Gel- und Festigkeitsphase	25

Abb. 5-4:	Schematische Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels nach Aktivierung und Zuordnung zeitabhängiger Eigenschaften	25
Abb. 5-5:	Verlauf der Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels [38]	26
Abb. 6-1:	Bestimmung der Marsh-Auslaufzeit eines Zwei-Komponenten-Mörtels nach DIN 4127 [53]	28
Abb. 6-2:	Links: Standzylinder mit eingefülltem Mörtel (Komponente A) zur Bestimmung der Sedimentationsstabilität [47]. Mitte/Rechts: Entmischter/stabiler Zwei-Komponenten- Mörtel [57]	29
Abb. 6-3:	Bestimmung der Gelzeit von Zwei-Komponenten-Mörteln nach [57]	29
Abb. 6-4:	Gelzeit eines Zwei-Komponenten-Mörtels in Abhängigkeit des Aktivatorgehaltes [58]	30
Abb. 6-5:	Übersicht eingesetzter Prüfverfahren zur Bestimmung der Frühfestigkeit von Zwei- Komponenten-Mörteln [57]. V.l.n.r.: Penetrationswiderstand, Modifiziertes Nadelgerät nach Vicat, Einaxiale Druckfestigkeit	30
Abb. 6-6:	Modifiziertes Nadelgerät nach Vicat [59] zur Bestimmung der Frühfestigkeiten eines Zwei-Komponenten-Mörtels [47]	31
Abb. 6-7:	Prüfkörper aus Zwei-Komponenten-Mörtel zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit (Würfel mit einer Kantenlänge von 50mm) [57]	32
Abb. 7-1:	Schematische Darstellung der Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten- Mörtels und Differenzierung in eine Gel- und Festigkeitsphase	33
Abb. 7-2:	Zeitlich aufgelöste Wirkungsbereiche der Materialkonzepte zur "Alkalischen Aktivierung" und "Physikalischen Aktivierung" von Ringspaltverfüllmaterialien	34
Abb. 7-3:	Schematische Darstellung der Festigkeitsentwicklung eines alkalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterials	35
Abb. 7-4:	Schematische Darstellung der Festigkeitsentwicklung eines physikalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterials	36
Abb. 7-5:	Schematische Darstellung des Reaktionsablaufes der alkalischen Aktivierung eines Alumosilikates bei Vorhandensein einer gewissen Calciumquelle (modifiziert nach [74])	38
Abb. 7-6:	Korrelation zwischen dem CaO-Gehalt des Bindemittels, der Aktivatorzusammensetzung und den Hydratationsprodukten bei der alkalischen Aktivierung (modifiziert nach [67, 75])	38
Abb. 7-7:	Resultierende Molverhältniszahl und chemische Zusammensetzung von Mischungen aus Kalium-Wasserglas und Kaliumlauge	40
Abb. 7-8:	V.l.n.r.: Schematische Reaktionsmodelle von Hüttensand mit Wasser / Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> , Alkalihydroxiden und Alkalisilikaten [77]	40
Abb. 7-9:	Vergleich der Mikrostrukturen bei der Bildung von Hydratphasen von Portlandzement (a) und alkalisch aktivierten Hüttensanden (b) [77]	41
Abb. 7-10:	Einfluss des Aktivatorgehaltes (links) und der Aktivatorzusammensetzung (rechts) auf die Festigkeitsentwicklung von Hüttensand.	42
Abb. 7-11:	Gefügestruktur (REM-Aufnahmen) alkalisch aktivierter Hüttensande mit unterschiedlichen Aktivatoren (Links: Natriumlauge; Rechts: Natrium-Wasserglas) nach 28 Tagen [84]	43
Abb. 7-12:	Schematische Darstellung eines kovalent vernetzten Polymernetzwerks [88]	44
Abb. 7-13:	Schematische Darstellung chemischer (a) und physikalischer (b) Netzwerke [88]	45
Abb. 7-14:	Initiationsreaktion mit Starter P zu einem Makroradikal (Z: Natriumcarboxylatgruppen und Carboxylgruppen) [90]	45
Abb. 7-15:	Kettenwachstumsreaktion [90]	46
Abb. 7-16:	Kettenabbruchsreaktion durch Addition zweier Startradikale zu Polyacrylat [90]	46

Abb. 7-17:	Entstehung des dreidimensionalen Netzwerkes durch Copolymerisation (modifiziert nach [90])	46
Abb. 7-18:	Schematische Darstellung des Quellvorgangs eines SAP in Wasser (modifiziert nach [95])	47
Abb. 7-19:	Links: Einfluss der NaCl-Konzentration auf die zeitabhängige Wasseraufnahme von SAP. (Einzelwerte in Kapitel A-6.4.3, Tab. A-41). Rechts: Wasseraufnahmevermögen von SAP in Abhängigkeit des Neutralisationsgrades bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen aus [96]	48
Abb. 8-1:	Herstellung der Bentonitsuspension. V.l.n.r.: Dispergiergerät; Suspendierung (2000 U/min); Dispergierung (3000 U/min)	50
Abb. 8-2:	Probenherstellung eines Zwei-Komponenten-Mörtels im Labor (V.l.n.r.: Vermischen der beiden Komponenten, Befüllen der Schalung, Abziehen der Oberfläche)	51
Abb. 8-3:	Lagerung von Prüfkörpern aus aktiviertem Zwei-Komponenten-Mörtel auf saturiertem Sand (Proben: Ø: 100 mm, Höhe: 200 mm)	51
Abb. 8-4:	Marsh-Auslaufzeiten des Basismörtels M0 über 72 Stunden	52
Abb. 8-5:	Sedimentationsstabilität bzw. Blutwassermenge des Basismörtels über 48 Stunden	53
Abb. 8-6:	Links: Dispergiergerät mit Drehmomenterfassung zur Bestimmung der Viskositätsänderung eines Zwei-Komponenten-Mörtels nach Aktivierung. Mitte, rechts: Proben mit unterschiedlichen Altern (Mitte: 24 h; Rechts: 48 h) der Komponente A nach Aktivierung und Messvorgang	54
Abb. 8-7:	Bestimmung der Gelzeit über eine Drehmomenterfassung an dem Basismörtel mit unterschiedlichen Mörtelaltern und variablen Aktivatorgehalten	55
Abb. 8-8:	Links: Gelzeit des Basismörtels M0 mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten unmittelbar nach Herstellung. Rechts: Einfluss des Alters der Komponente A auf die Gelzeit	55
Abb. 8-9:	Prüfmethode zur Bestimmung der Gelzeit von Zwei-Komponenten-Mörteln und Visualisierung des Mischprozesses von Mörtel (Komponente A: grün) und Aktivator (Komponente B: rot)	56
Abb. 8-10:	Gelzeiten des Basismörtels M0 bei unterschiedlichen Aktivatorgehalten und Vergleich zur Literatur (Gelzeit 1: [47], Gelzeit 2: Mix 1 und Mix 2 [58])	57
Abb. 8-11:	Prüfeinrichtung zur Bestimmung des Erosionswiderstandes (Maße in mm) [103]	58
Abb. 8-12:	Bestimmung des Erosionswiderstands eines Zwei-Komponenten-Mörtels mit dem Ausspülverfahren nach [103]	58
Abb. 8-13:	Links / Mitte: Modifikation des Nadelgerätes nach Vicat [59]. Rechts: Durch Zusatzgewichte resultierende vertikale Spannungen (Stempeldurchmesser: 10 mm; Masse der Stange und Anbauteile: 300 Gramm)	59
Abb. 8-14:	Frühfestigkeitsentwicklung des Basismörtels mit variablen Aktivatorgehalten	60
Abb. 8-15:	Prüfung der Scherfestigkeit aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel: V.l.n.r.: Modifizierter Scherflügel, Einbausituation der Scherflügel, Prüfaufbau mit eingefüllter Probe	61
Abb. 8-16:	Scherfestigkeitsentwicklung des Basismörtels M0 mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten	61
Abb. 8-17:	Druckfestigkeitsentwicklung des Basismörtels M0 mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten. Links: Frühfestigkeiten bis 24 Stunden nach Aktivierung. Rechts: Druckfestigkeitsentwicklung bis 90 Tage nach Aktivierung	62
Abb. 8-18:	Links: Statischer Elastizitätsmodul bis 56 Tage nach Aktivierung. Rechts: Versuchsaufbau zu Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls eines Zwei- Komponenten-Mörtels	63

Abb. 8-19:	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen des Basismörtels M0: Links: Alter der Probe 7 Tage (Maßstab: 10 µm). Rechts: Alter der Probe 16 Monate (Maßstab: 20 µm)	64
Abb. 8-20:	Schematische Darstellung der Abhängigkeit zwischen der Gelzeit und Frühfestigkeit bei variablem Aktivatorgehalt	65
Abb. 8-21:	Gegenüberstellung ausgewählter Festigkeitscharakteristika mit der Gelzeit des Basismörtels mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten bei Angabe von Zielbereichen	65
Abb. 9-1:	Links: Stabiler Mörtel "2KM_AAHS_red" nach 24 Stunden. Rechts: Unzureichende Gelierung und Erhärtung des Mörtels "2KM_AAHS" nach 24 Stunden	67
Abb. 9-2:	Links: Gelierverhalten des zementfreien Mörtels "2KM_AAHS_red" mit Hüttensand als Bindemittel nach 6 Stunden. Rechts: Gelierzustand des Basismörtels M0 nach 30 Sekunden.	68
Abb. 9-3:	Links: Gehalt an H <sub>2</sub> O, M <sub>2</sub> O und SiO <sub>2</sub> der verwendeten Aktivatorkonfigurationen. Rechts: Resultierende Molverhältniszahl (MVZ) der Aktivatoren für die alkalische Aktivierung	71
Abb. 9-4:	Einfluss unterschiedlicher Zusatzstoffe und Aktivatorkonfigurationen bei bindemittelmodifizierten Zwei-Komponenten-Mörteln auf die einaxiale Druckfestigkeit nach 24 Stunden	72
Abb. 9-5:	Einfluss der Aktivatorkonfiguration (Molverhältniszahl "MVZ", pH-Wert) auf die Druckfestigkeitsentwicklung eines rein-zementösen Zwei-Komponenten-Mörtels (Basismörtel M0)	74
Abb. 9-6:	Korrelation zwischen der chemischen Zusammensetzung (CaO-, SiO <sub>2</sub> - und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Gehalt) von unterschiedlichen Zusatzstoffen und der anforderungsgerechten einaxialen Druckfestigkeit nach 24 Stunden in Abhängigkeit unterschiedlicher Aktivatorkonfigurationen.	75
Abb. 9-7:	Einfluss der chemischen Zusammensetzung unterschiedlicher Zement/Zusatzstoff- Verhältnisse und Eingrenzung günstiger Bereiche der Bindemittelbestandteile CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> und SiO <sub>2</sub>	76
Abb. 9-8:	Einfluss der Aktivatorzusammensetzung und des Zement/Hüttensand-Verhältnisses auf die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit bis 28 Tage	77
Abb. 9-9:	Links: Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung von hüttensandhaltigen Zwei- Komponenten-Mörteln und dem Basismörtel M0 auf Basis der einaxialen Druckfestigkeit. Rechts: Vergleichsuntersuchungen zum Einfluss der Zementart auf die Langzeitfestigkeiten [27]	78
Abb. 9-10:	Links: Zeitlicher Verlauf des Elastizitätsmoduls des alkalisch-aktivierten, hüttensandhaltigen Zwei-Komponenten-Mörtels "80_3,4" im Vergleich zum Basismörtel M0. Rechts: Elastizitätsmoduln unterschiedlicher Bindemittel/Aktivator- Kombinationen (Probenalter: 28 Tage)	79
Abb. 9-11:	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Bruchstücken: Links: Basismörtel M0 (Druckfestigkeit nach 56d: 1,9 N/mm <sup>2</sup> ). Rechts: Alkalisch aktivierter Zwei- Komponenten-Mörtel 80_2,6 (25% Zement, 75% Hüttensand, Druckfestigkeit nach 56d: 8,5 N/mm <sup>2</sup> . Alter: 16 Monate). Maßstab: 100 µm.	79
Abb. 9-12:	Links: Gelzeiten alkalisch aktivierter, hüttensandhaltiger Zwei-Komponenten-Mörtel mit variablem Gehalt an Portlandzement (als Gelierhilfe). Rechts: Einfluss der Aktivatorzusammensetzung auf die Gelzeit	80
Abb. 9-13:	Frühfestigkeitsentwicklung von alkalisch aktivierten, hüttensandhaltigen Zwei- Komponenten-Mörteln in Abhängigkeit der Bindemittelzusammensetzung (Variation des Zement/Hüttensand-Verhältnisses)	81
Abb. 9-14:	Scherfestigkeitsentwicklung von alkalisch aktivierten, hüttensandhaltigen Zwei- Komponenten-Mörteln (Aktivator: 98 kg/m <sup>3</sup> ) in Abhängigkeit des Zement/Hüttensand-Verhältnisses und ergänzend der Aktivatorkonfiguration	82

Abb. 9-15:	Marsh-Auslaufzeiten hüttensandhaltiger Zwei-Komponenten-Mörtel im Vergleich zum Basismörtel M0 über einen Zeitraum von 72 Stunden	83
Abb. 9-16:	Kennwerte zur Verarbeitbarkeit eines Zwei-Komponenten-Mörtels mit einer Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid mit einem Kalkmilchgehalt von 60 (18 kg/m <sup>3</sup> Ca(OH) <sub>2</sub> ) und 90 kg/m <sup>3</sup> (27 kg/m <sup>3</sup> Ca(OH) <sub>2</sub> ) im Vergleich zum Basismörtel M0: Links: Marsh-Auslaufzeiten bis 72 Stunden nach Herstellung. Rechts: Blutwassermenge bis 72 Stunden nach Herstellung.	84
Abb. 9-17:	Gelzeiten von Zwei-Komponenten-Mörteln mit einer Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid in Abhängigkeit der Menge an Gelierhilfe und des Aktivatorgehaltes: Links: Angabe des Aktivatorgehaltes als Vielfaches des Gesamt- Calciumhydroxid-Gehaltes. Rechts: Angabe des Aktivatorgehaltes in Vol% bezogen auf das Volumen der Komponente A	85
Abb. 9-18:	Scherfestigkeiten der Zwei-Komponenten-Mörtel mit Calciumhydroxid (Ca(OH) <sub>2</sub> ) als Gelierhilfe mit unterschiedlichen Bentoniten im Vergleich zum Basismörtel M0	86
Abb. 9-19:	Druckfestigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels mit 90 kg Gelierhilfe (27 kg/m <sup>3</sup> Ca(OH) <sub>2</sub> , Aktivatorgehalt: 9,1 Vol%) und Hüttensand als Bindemittel im Vergleich zum rein-zementösen Basismörtel M0	87
Abb. 9-20:	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen: Links: Zementöser Basismörtel M0 nach 16 Monaten (Maßstab: 100 μm). Mitte/Rechts: Aktivierter Mörtel mit Calciumhydroxid (27 kg/m <sup>3</sup> Ca(OH) <sub>2</sub> , Aktivatorgehalt: 9,1 Vol%) nach rd. 90 Tagen. (Maßstab: Mitte: 100 μm, Rechts: 50 μm).	88
Abb. 10-1:	Aufnahmen mit einem Auflichtmikroskop (oben) und einem Rasterelektronenmikroskop (unten) der untersuchten SAP (v.l.n.r.: SAP 1, 2, 3) im trockenen Zustand. Maßstab: 500 µm	90
Abb. 10-2:	Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens von SAP mit der Versuchsanordnung für Langzeitversuche gemäß DIN 18132 [116]. Links: Glasaufsatzrohr mit eingefüllter SAP-Probe. Rechts: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus	91
Abb. 10-3:	Mikroskopaufnahmen eines SAP-Partikels vor und nach einem Quellvorgang in Wasser. Links: SAP im Ausgangszustand. Rechts: SAP nach vollständiger Wasseraufnahme	92
Abb. 10-4:	Zeitabhängiges Wasseraufnahmevermögen von drei unterschiedlichen SAP. Links: In Leitungswasser und in Blutwasser des Basismörtels M0 bis 3600 Sekunden. Rechts: In Blutwasser des Basismörtels M0 bis 60 Sekunden	92
Abb. 10-5:	Links: Messprofil des Rheometers zur Bestimmung der Viskositätsänderung durch den Einsatz von SAP. Mitte: Prüffähiges Medium: 200 g Lsg./ g SAP. Rechts: Unzureichend/kritisch prüffähiges Medium: 100 g Lsg./ g SAP	94
Abb. 10-6:	Einfluss der SAP-Konzentration, des SAP-Typs und des umgebenden Fluides auf die Viskosität (Drehmomenterfassung) des Gesamtsystems (SAP und Quellmittel)	94
Abb. 10-7:	Rechnerische Wasseraufnahme von SAP 3 im Blutwasser (pH-Wert: 12) und Gegenüberstellung des zeitabhängigen Wasseraufnahmevermögens und den Wassergehalten üblicher Ein-Komponenten-Mörtel (zu aktivierende Komponente)	96
Abb. 10-8:	Links: Ausbreitmaß gemäß [117] des zementfreien Mörtels I-0 ohne SAP. Rechts: Ausbreitmaß des Mörtels I-0 zwei Minuten nach Zugabe der SAP (6 kg/m <sup>3</sup> )	97
Abb. 10-9:	Scherfestigkeitsentwicklung bis 30 Minuten nach Aktivierung von Ein-Komponenten- Mörteln mit variierendem Zementgehalt bei unterschiedlichen SAP-Zugabemengen	98
Abb. 10-10:	Vergleich der Scherfestigkeitsentwicklung von physikalisch aktivierten Ein- Komponenten-Mörteln und den im Rahmenscherversuch ermittelten Scherfestigkeiten von nicht-aktivierten Ein-Komponenten-Mörteln aus [24]	99
Abb. 10-11:	Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit durch SAP aktivierter bedingt aktiver Ein- Komponenten-Mörtel im Vergleich zu einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel	99

Abb. 10-12:	Bildung von Agglomeraten aus SAP während des Einmischprozesses in einen bedingt aktiven Ein-Komponenten-Mörtel (Bruchfläche eines Festkörpers des Mörtel B-120 mit 8 kg/m <sup>3</sup> SAP)	100
Abb. 10-13:	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von SAP im Mörtel (B-60) nach 7 Tagen: Links: Ansicht eines SAP im Mörtelgefüge (Maßstab: 500 µm). Rechts: Gequollenes SAP (Hydrogel) mit Anhaftungen von Flugaschepartikeln (Maßstab: 20 µm)	101
Abb. 10-14:	Pumpverhalten des modifizierten Ein-Komponenten-Mörtels "mod. B-60". Links: Ohne Zugabe von Fließmittel. Rechts: Mit Zugabe von Fließmittel	102
Abb. 10-15:	Links: Vergleichende Gegenüberstellung der Viskositätsänderung nach Zugabe von unbehandelten und suspendierten SAP zu Blutwasser (pH: 12). Rechts: Durch suspendierte SAP (1g SAP auf 16,7 g Trägerfluid bestehend aus 95% Glycerin und 5 % Wasser) aktivierter Mörtel (mod. B-60) nach 15 Minuten (Kantenlänge: 100 mm)	105
Abb. 10-16:	Scherfestigkeiten von physikalisch aktivierten Ein-Komponenten-Mörteln. Gegenüberstellung von "mod. B-60" mit suspendierten SAP mit einem SAP-Gehalt von 9 kg/m <sup>3</sup> aber unterschiedlichen Gehalten an Trägerfluid und "B-60" mit 6 kg/m <sup>3</sup> SAP bei unbehandelter Zugabe	106
Abb. 10-17:	Schematische Darstellung der Abhängigkeit zwischen dem Zementgehalt des Mörtels und dem Wasseraufnahmevermögen der SAP (links) sowie der Früh- bzw. Scherfestigkeits- und Druckfestigkeitsentwicklung (rechts) eines durch SAP aktivierten Ringspaltverfüllmaterials	107
Abb. 11-1:	Querschnitt eines Tübbingausbaus mit verfülltem Ringspalt und angrenzendem Boden sowie Differenzierung der Systemgrenzen für den Versuchsstand zur Simulation einer Ringspaltverpressung	108
Abb. 11-2:	Gesamtansicht des Versuchsaufbaus zur Simulation einer Ringspaltverpressung	109
Abb. 11-3:	Gesamtansicht des Schlittens (simulierter Schildschwanz)	110
Abb. 11-4:	Vorderer Schlitten: Links: Mörtelöffnung und Sensoren. Rechts: Abdichtungsebene	110
Abb. 11-5:	Kabel- und Leitungsmanagement im Schlitten	111
Abb. 11-6:	Links: Kopplung von Schlitten und Hydraulikzylinder. Mitte: Steuereinheit und Prozessanzeige. Rechts: Geschwindigkeitssensor	112
Abb. 11-7:	Links: Tragende Rahmenkonstruktion des Versuchstandes. Rechts: Kontereinrichtung zur horizontalen Lagerung des Deckels	112
Abb. 11-8:	Darstellung des Versuchsstandes zur Simulation einer Ringspaltverpressung in der Endposition mit vollständig verpresstem Ringraum nach Freilegen der Probe	113
Abb. 11-9:	Links: Versuchsaufbau in der Gesamtansicht. Rechts oben: Blick in den Ringspalt auf die Mörteleinfüllöffnung mit angeordnetem Boden. Rechts unten: Aufsicht der zweilagigen Bürstendichtungen mit durch Fett verfülltem Zwischenraum	113
Abb. 11-10:	Links: Gesamtansicht der vollständig montierten Mischeinheit für klassische Zwei- Komponenten-Mörtel und das Konzept der alkalischen Aktivierung. Rechts: Aktivatorinjektion über ringförmig angeordnete Öffnungen	114
Abb. 11-11:	Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten des Basismörtels M0 bei einer händischen Vermischung der Komponenten und bei Verwendung der Mischeinheit	115
Abb. 11-12:	Mischeinheit für die physikalische Aktivierung und Konstruktionsdetail zur Injektion von suspendierten SAP (Komponente B) in den Volumenstrom eines Ein- Komponenten-Mörtels (Komponente A)	115
Abb. 11-13:	Druckmessung im Ringraum in der Ebene der Mörtelöffnung während eines Verpressvorgangs eines Ein-Komponenten-Mörtels (Verpressdruck: 0,5 bar, Geschwindigkeit: 60 mm/min)	116
Abb 11 14.	Kornverteilung der für die Vernressversuche ausgewählten Böden mit	110
1100. 11-14.	Durchlässigkeiten $k_f$ von: 10 <sup>-2</sup> , 10 <sup>-4</sup> , 10 <sup>-5</sup> m/s (Anhang, Kapitel A-6.4.4, Tab. A-48)	117

Abb. 11-15:	Fotodokumentation der Laborböden. Links: Laborboden 1 (k <sub>f</sub> : 10 <sup>-2</sup> m/s), Mitte: Laborboden 2 (k <sub>f</sub> : 10 <sup>-4</sup> m/s), Rechts: Laborboden 3 (k <sub>f</sub> : 10 <sup>-5</sup> m/s)	118
Abb. 11-16:	Füllvorgang des Ringraumes mit einem praxisüblichen Zwei-Komponenten-Mörtel (Basismörtel M0, Aktivatorgehalt: 90 kg/m³, Gelzeit: rd. 9 Sek.)	119
Abb. 11-17:	Füllvorgang des Ringraumes mit einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel (Basismörtel M0). Links: Kontakt von Mörtel und umlaufender Dichtebene in der Aufsicht. Rechts: Seitenansicht des vollständig verpressten Ringraumes	120
Abb. 11-18:	Freigelegte Probe des Basismörtels M0 (Aktivator: 90 kg/m³, Gelzeit: 9 Sek.) nach einem Verpressvorgang (Alter der Probe: 30 Minuten nach Verpressbeginn)	120
Abb. 11-19:	Links/Mitte: Vorgehen zur Bestimmung der Scherfestigkeiten am Basismörtel M0 nach einem Verpressvorgang. Rechts: Vergleich der Scherfestigkeiten des Basismörtels M0 (Aktivatorgehalt: 90 kg/m <sup>3</sup> ) nach einem Verpressvorgang mit den Ergebnissen an Laborprüfkörpern	120
Abb. 11-20:	Visualisierung des Fließverhaltens eines Zwei-Komponenten-Mörtels (Basismörtel M0) durch Injektion einer hochpigmentierten Lösung in die Mörtelleitung während eines laufenden Verpressversuches	121
Abb. 11-21:	Links: Verpresster alkalisch aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel "80_2,6" mit Portlandzement als Gelierhilfe und einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m <sup>3</sup> (Alter: 1 Stunde). Rechts: Erzeugte Bruchfläche im Randbereich des verpressten Mörtels	123
Abb. 11-22:	Links: Verpresster Zwei-Komponenten-Mörtel "160_3,4" mit Portlandzement als Gelierhilfe und einem Aktivatorgehalt von 60 kg/m <sup>3</sup> . Rechts: Scherfestigkeiten des Mörtels "160_3,4" mit einem Aktivatorgehalt von 60 (verpresster Mörtel) und 90 kg/m <sup>3</sup> (Laborproben)	123
Abb. 11-23:	Links: Entformter Zwei-Komponenten-Mörtel mit einer Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid (Ca(OH) <sub>2</sub> : 27 kg/m <sup>3</sup> , Aktivatorgehalt: 14,7 Vol%) nach einem Verpressversuch. Rechts: Detailaufnahme der Mörtel/Boden-Grenzschicht	124
Abb. 11-24:	Modifikationen des Versuchsstandes zur Ringspaltverpressung im Rahmen der physikalischen Aktivierung. Links: Rückansicht des Versuchsstandes mit Stahldeckel, Sicherheitsventilen u. Abflussleitungen. Rechts: Frontansicht mit vollständig eingefahrenem Schlitten.	125
Abb. 11-25:	Verpresster nicht-aktivierter Ein-Komponenten-Mörtel "mod. B-60" (Verpressdruck 1,0 bar, Verpressdauer: 25 Minuten, Probenalter: 4 Stunden)	126
Abb. 11-26:	Links: Visualisierung des Fließverhaltens des Mörtels "mod. B-60" durch Einfärbung nach einem Verpressversuch (Verpressdruck: 1,0 bar, Verfahrgeschwindigkeit: 60 mm/min). Rechts: Schematischer Übertrag der Mörtelausbreitung bei exzentrischer Mörtelöffnung auf eine mittige Anordnung	126
Abb. 11-27:	Links: Erzeugte Schnittfläche des verpressten, nicht-aktivierten Mörtels "mod. B60" (Probenalter: 4 h, Verpressdruck: 1,0 bar). Rechts: Detailansicht der Mörtel/Boden- Grenzschicht	127
Abb. 11-28:	Mittlere Scherfestigkeiten des verpressten, nicht-aktivierten Ein-Komponenten- Mörtels "mod. B-60" in Abhängigkeit des Verpressdruckes und des Probenalters	127
Abb. 11-29:	Links: Physikalisch aktivierter Mörtel "mod. B-60" nach Aktivierung durch suspendierte SAP nach einem Verpressvorgang. Rechts: Detailaufnahme des Mörtelgefüges und der Mörtel/Boden-Grenzschicht	129
Abb. 11-30:	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen eines physikalisch aktivierten Mörtels mit suspendierten SAP (Mörtel "mod. B-60", 9 kg/m <sup>3</sup> SAP und Trägerfluid (95% Glycerin, 5 % Wasser)): Links: Nach einem Verpressversuch (Alter: 50 Tage). Rechts: Laborprobe (Alter: 400 Tage). Maßstab: 500 µm	130

# Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Übersicht zur Auswahl eines Verpressmaterials für die Ringspaltverfüllung in Abhängigkeit bautechnischer und geologischer Randbedingungen (modifiziert nach [3])	8
Tab. 3-2:	Zusammensetzung typischer Ein-Komponenten-Mörtel (modifiziert nach [3])	9
Tab. 3-3:	Anforderungen an zementhaltige Ringspaltverfüllmaterialien vor und nach einem Verpressvorgang (modifiziert nach [21])	10
Tab. 3-4:	Anwendbarkeit von Ein-Komponenten-Mörteln in Abhängigkeit der Bodendurchlässigkeit und den dadurch bedingten Drainierungsdauern (reduzierte Darstellung nach [9])	10
Tab. 3-5:	Praxisübliche Zusammensetzungen von Zwei-Komponenten-Mörteln	12
Tab. 5-1:	Übersicht typischer Anforderungen und Richtwerte an das Bereitstellungsgemisch (Komponente A) eines Zwei-Komponenten-Mörtels	24
Tab. 5-2:	Übersicht typischer Anforderungen und Richtwerte an aktivierte Zwei-Komponenten- Mörtel (Komponente A+B) im Ringspalt	27
Tab. 7-1:	Allgemeine Klassifizierung alkalisch aktivierter Bindemittel [71]	39
Tab. 7-2:	Übersicht möglicher Aktivatoren für die alkalische Aktivierung [73]	39
Tab. 8-1:	Zusammensetzung des Basismörtels M0 (klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel) und praxisbezogene Minima und Maxima üblicherweise eingesetzter Ausgangsstoffe	49
Tab. 8-2:	Zur Bestimmung der Gelzeit herangezogener Zwei-Komponenten-Mörtel (Basismörtel M0) und Zusammensetzungen der Zwei-Komponenten-Mörtel bei bekannten Gelzeiten aus der Literatur	57
Tab. 9-1:	Zusammensetzungen zementfreier Zwei-Komponenten-Mörtel mit Hüttensand als Bindemittel	67
Tab. 9-2:	Chemische Zusammensetzung der verwendeten latent-hydraulischen und puzzolanischen Zusatzstoffe im Rahmen der alkalischen Aktivierung (*Herstellerangaben)	70
Tab. 9-3:	Physikalische Kennwerte der verwendeten latent-hydraulischen und puzzolanischen Zusatzstoffe im Rahmen der alkalischen Aktivierung (*Herstellerangaben; ° Literaturangabe)	70
Tab. 9-4:	Eingesetzte Aktivatoren für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen der alkalischen Aktivierung und Angabe der wesentlichen Kennwerte (pH-Wert, MVZ, SiO <sub>2</sub> - und M <sub>2</sub> O-Gehalt).	71
Tab. 10-1:	Materialkennwerte der superabsorbierenden Polymere (SAP) für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen der physikalischen Aktivierung (Herstellerangaben)	90
Tab. 10-2:	Zusammensetzungen bedingt-aktiver und inerter Ein-Komponenten-Mörtel nach [24] für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen der physikalischen Aktivierung	97
Tab. 10-3:	Modifizierter bedingt-aktiver Ein-Komponenten-Mörtel "mod. B-60" als Komponente A für die physikalische Aktivierung durch suspendierte SAP	102
Tab. 11-1:	Durchlässigkeitsbeiwerte unterschiedlicher Bodenarten gemäß DIN 18130-1 [122]	117
Tab. 11-2:	Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Laborböden nach Hazen und Beyer	118

## 1 Einführung

#### **1.1 Motivation**

Durch den stetig wachsenden Personen- und Güterverkehr gewinnt die Nutzung des unterirdischen Raumes und somit auch der Tunnelbau zunehmend an Bedeutung. Ein wesentlicher Schritt bei der Erstellung eines dauerhaften Tunnels im maschinellen Schildvortrieb ist die Ringspaltverfüllung. Die dabei eingesetzten Verfüllmaterialien haben zur Aufgabe, den Tunnel während der Bauphase und über den gesamten Nutzungszeitraum zu betten und dienen als form- und kraftschlüssige Verbindung zwischen Tunnelbauwerk und Boden. Die Erweiterung der unterirdischen Infrastruktur bei mitunter schwieriger Trassenfindung hat zur Folge, dass auch Böden mit stark variierenden Eigenschaften durchfahren werden müssen. Um auf solche wechselnden Bedingungen reagieren zu können, ist eine umfassende Charakterisierung und stetige Weiterentwicklung von Ringspaltverfüllmaterialien zentraler Fokus der Forschung im maschinellen Tunnelbau und Gegenstand dieser Arbeit.

Bei der Ringspaltverfüllung ist der Hohlraum zwischen der Tübbingauskleidung und dem angrenzenden Boden unmittelbar nach dem Einbau der Tübbinge mit einem geeigneten Material zu verfüllen, welches in der Lage ist, die Tunnelröhre dauerhaft zu betten und gleichzeitig Setzungen an der Geländeoberfläche zu minimieren. Allgemeine materialtechnologische Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien sind zum einen optimale Fließeigenschaften und Sedimentationsstabilität während der Verarbeitungs- und Einpressphase und zum anderen eine rasche Entwicklung der notwendigen Festigkeit bzw. Steifigkeit unmittelbar nach dem Verpressvorgang. Damit werden an Ringspaltverfüllmaterialien antagonistische Anforderungen gestellt. In Abhängigkeit der geologischen Randbedingungen werden unterschiedliche Verfüllmaterialien eingesetzt. Im nicht wasserführenden Lockergestein kommen i.d.R. Ein-Komponenten-Mörtel zum Einsatz. Die notwendige Verfestigung wird primär durch ein druckbedingtes Auspressen des Wassers aus dem Mörtel in den umliegenden Boden erzielt. In bindigen Böden, in wasserführenden Schichten oder in schwach durchlässigen Böden, in welchen eine Entwässerung des Mörtels nicht oder nur unzureichend möglich ist, kommen Zwei-Komponenten-Mörtel zum Einsatz. Deren Festigkeitsentwicklung findet durch den Einsatz von Aktivatoren auf chemischer Ebene systeminhärent statt. Interaktionsvorgänge von Mörtel und umgebenden Baugrund sind hierbei unerwünscht.

Die Zusammensetzung solcher Ringspaltverfüllmaterialien, unabhängig ob Ein- oder Zwei-Komponenten-Mörtel, findet bis dato auf rein empirischer Basis statt. Weder die Mengenanteile noch die Art der Ausgangsstoffe für die Zusammensetzung sind über Richtlinien, Merkblätter oder anderweitige Regelwerke festgelegt. Die Anforderungen an das Material vor und nach Verpressung resultieren gleichermaßen aus Erfahrungen vorhergegangener Projekte. Insbesondere für Zwei-Komponenten-Mörtel gibt es keine systematische Erfassung der wesentlichen Frisch- und Festmörteleigenschaften bzw. trotz vieler formulierter Anforderungen und Richtwerte keine umfassende Bewertung solcher oder Studien über geeignete Prüfmethoden und materialtechnologische Abhängigkeiten. Auf dieser Grundlage ist eine Erfassung der Kennwerte aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien sowie deren Weiterentwicklung anzustreben.

#### 1.2 Zielsetzung

Globales Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung neuartiger Materialkonzepte für aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien und die verfahrenstechnische Eignungsprüfung dieser für eine Ringspaltverpressung im maschinellen Tunnelbau. Zur Erfassung des Stands der Technik und zur Schaffung einer materialtechnologischen Bezugsebene ist es notwendig, die charakteristischen Eigenschaften aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien systematisch zu erfassen und zu beschreiben. Die Konzeption und experimentelle Entwicklung neuartiger Materialsysteme erfolgt aufbauend auf einer Differenzierung der Erhärtungsphase aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien in zwei separaten Entwicklungssträngen. Zum einen wird die alkalische Aktivierung von Zusatzstoffen im System der Zwei-Komponenten-Mörtel untersucht. Dabei liegt der Fokus unter anderem auf deren möglichen Anwendbarkeit unter Berücksichtigung typischer Anforderungen sowie auf der wirksamen Nutzung materialspezifischer Eigenschaften. Durch die üblicherweise bei Zwei-Komponenten-Mörteln eingesetzten alkalischen Aktivatoren kann die Festigkeitsentwicklung puzzolanischer und latent-hydraulischer Stoffe gezielt angeregt werden, was eine Integration dieser Zusatzstoffe in das Bindemittelsystem der Zwei-Komponenten-Mörtel ermöglicht. Zum anderen wird die physikalische Aktivierung von Ein-Komponenten-Mörteln durch superabsorbierende Polymere zur raschen Verfestigung infolge einer inneren Entwässerung fokussiert. Durch diesen Ansatz kann beispielsweise durch diskontinuierliche Aktivierung einer gleichbleibenden Mörtelkomponente auf wechselnde Baugründe mit variierenden Durchlässigkeiten reagiert und ein möglicher vollständiger Austausch des Verpressmaterials vermieden werden. Auf Basis der charakteristischen Kennwerte eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels können die Materialkonzepte bzw. die Modifikationen von aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien beurteilt werden und als Bestandteil der Grundlagenforschung Erkenntnisse für die Konzeptionierung geeigneter Ringspaltverfüllmaterialien liefern.

#### 1.3 Wissenschaftliches Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Nach Beschreibung der Grundlagen zur Ringspaltverfüllung im maschinellen Tunnelbau und dem Stand der Technik auf materialtechnologischer und verfahrenstechnischer Ebene, primär für Zwei-Komponenten-Mörtel, folgen die experimentellen Laboruntersuchungen. Dabei findet in einem ersten Schritt die Erfassung charakteristischer Kennwerte eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels verknüpft mit der Entwicklung neuer Prüfverfahren und der Adaption bekannter Prüfmethoden statt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden als materialtechnologische Bezugsebene innerhalb der darauf aufbauenden Konzepte zur Aktivierung von Ringspaltverfüllmaterialien herangezogen.

Auf Basis klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel wird die "alkalische Aktivierung" von latenthydraulischen und puzzolanischen Materialien und deren Nutzbarkeit im System der Zwei-Komponenten-Mörtel untersucht. In Kombination mit Wassergläsern als Aktivatoren, wie sie im Regelfall auch bei klassischen Mörteln angewendet werden, können diese Stoffe auf chemischer Ebene gezielt angeregt werden und bei der Festigkeitsentwicklung mitwirken. Hierbei werden unter Berücksichtigung typischer Richtwerte an aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien der Einfluss und die Auswirkung unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzungen und Aktivatorkonfigurationen untersucht. In einem zweiten, separaten Entwicklungsstrang werden das Prinzip der Ein-Komponenten-Mörtel und deren druckbedingte Entwässerung in den Baugrund invers angewendet. Dieses Prinzip wird innerhalb der vorliegenden Arbeit als "physikalische Aktivierung" bezeichnet und beschreibt eine gezielt herbeigeführte innere Entwässerung des Mörtels. Um dieses Verhalten zu erreichen und steuern zu können, kommen superabsorbierende Polymere (SAP) zur Anwendung. Durch deren Wasseraufnahmevermögen können diese unmittelbar nach Zugabe zum Mörtel das "freie" Porenwasser aufnehmen und so eine Verfestigung des Mörtels herbeiführen.

Die verfahrenstechnische Eignung der Ringspaltverfüllmaterialien wird mittels eines Großversuchs zur Simulation der Ringspaltverpressung untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf dem Fließverhalten des Mörtels bei Eintritt in den Ringraum und einer möglichen Mörtel-Boden-Interaktion sowie auf den wesentlichen Festigkeitskennwerten unmittelbar nach einem Verpressvorgang.

Zusammenfassend kann die Struktur der vorliegenden Arbeit in drei, teil-konsekutive Themenblöcke aufgeteilt werden und ist in Abb. 1-1 schematisch dargestellt. In einem ersten Schritt erfolgt mit der Bezugsebene die Erfassung des Stands der Technik für Ringspaltverfüllmaterialien auf theoretischer und für Zwei-Komponenten-Mörtel auch auf experimenteller Ebene. Darauf aufbauend finden im Themenblock "Materialkonzepte" die theoretischen Betrachtungen und labortechnischen Untersuchungen zu den Konzepten der alkalischen und physikalischen Aktivierung statt. Im dritten Themenblock "Verfahrenstechnik" wird die Entwicklung eines Versuchsstandes auf Basis der aktuellen konstruktiven Durchbildung von Tunnelvortriebsmaschinen und unter Betrachtung realistischer Prozessparameter vorgenommen. Mit diesem Versuchsstand werden die konzeptionierten Ringspaltverfüllmaterialien sowie vergleichend klassische Verfüllmaterialien hinsichtlich deren Fließfähigkeit, Verteilung im Ringspalt während eines Verpressvorgangs, einer möglicher Mörtel-Boden-Interaktion sowie deren Festigkeiten nach einem Verpressvorgang untersucht.



Abb. 1-1: Schematischer Aufbau der vorliegenden Arbeit

### 2 Ringspaltverfüllung im maschinellen Tunnelbau

#### 2.1 Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb

Der maschinelle Tunnelbau hat in den letzten Jahrzehnten bedeutende technische und baubetriebliche Fortschritte erfahren [1]. Dies betrifft neben den möglichen Tunneldurchmessern, auch die kürzer werdenden Projektdauern durch z.B. gesteigerte Vortriebsgeschwindigkeiten bis hin zu sicherheitstechnischen Aspekten im Betrieb und für die Umwelt. Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) für den maschinellen Tunnelbau werden in einer ersten Unterteilung in Tunnelbohrmaschinen (TBM), Doppelschildmaschinen (DSM), Schildmaschinen (SM) und Kombinationsmaschinen (KSM) differenziert (Abb. 2-1) [2]. Mit den im maschinellen Vortrieb eingesetzten Tunnelvortriebsmaschinen kann der Baugrund teilflächig oder vollflächig sowohl oberhalb als auch unterhalb des Grundwasserspiegels abgebaut werden und der Vortrieb kann kontinuierlich oder intermittierend durchgeführt werden. Für den Vortrieb werden dabei je nach Baugrund unterschiedliche Typen von Tunnelvortriebsmaschinen eingesetzt. Im Lockergestein mit einem einschaligen wasserdichten Tübbingausbau eignen sich nach [1] Schildmaschinen mit aktiver Ortsbruststützung. Für Böden (Lockergesteine) mit einem Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich von 10<sup>-4</sup> bis 10<sup>-6</sup> m/s (durchlässig) bis hin  $zu < 10^{-6}$  m/s (schwach durchlässig), welche auch den Einsatz von Zwei-Komponenten-Mörteln ermöglichen, eignen sich gemäß der Unterteilung in [2] Schildmaschinen mit Vollschnittabbau wie beispielsweise SM-V5 mit einer Erdrückstützung (Abb. 2-1).



Abb. 2-1: Unterteilung von Tunnelvortriebsmaschinen (modifiziert nach [2])

Mit dem Einsatz von Schildmaschinen (SM) werden unterirdische Hohlräume erzeugt, indem der Schild entlang der Tunnelachse vorgepresst und gleichzeitig der anstehende Baugrund abgebaut wird. Den derzeitigen Stand der Technik im Lockergestein bilden die Erddruckschilde "SM V5" (engl. Earth Pressure Balance Shield, kurz: EPB) (Abb. 2-2), welche bis dato den weltweit meist-

genutzten Typ von Schildmaschinen darstellen [3]. Dabei sind Schilddurchmesser von 3,2 m (Projekt Abwasserkanal Emscher [4, 5]) bis zum aktuell größten Durchmesser von 17,6 m (Projekt: Tuen Mun – Chek Lap Kok Link; Straßentunnel in Hongkong [6]) möglich.



Abb. 2-2: Erddruckschild (Earth-Pressure-Balance-Schild) (modifiziert nach [7])

Bei einer EPB-Schildmaschine (Abb. 2-2) wird die Ortsbrust durch einen plastischen Erdbrei aus dem abgebauten Material in der Abbaukammer gestützt. Die Abbaukammer ist durch eine Druckwand vom Rest der Schildmaschine getrennt. Der Vortrieb kann in eine Vortriebs- und eine Ringbauphase unterteilt werden. In der Vortriebsphase wird die EPB-Maschine kontinuierlich durch hydraulische Zylinder, welche sich an dem zuletzt eingebauten Tübbingring abstützen, vorgepresst. Dabei löst ein rotierendes Schneidrad Material von der Ortsbrust, das mithilfe von Förderschnecken und Förderbändern abtransportiert wird. Bis zum Einbau der endgültigen Sicherung des Innenraums wird der geschaffene Hohlraum durch den Schildschwanz gestützt. In der Ringbauphase wird der Vortrieb gestoppt und im Bereich des Schildmantels die Tübbingelemente durch den Erektor zu Tübbingringen zusammengebaut. Die Tübbingringe bestehen in der Regel aus 5 bis 8 Tübbingelementen und einem Schlussstein (Abb. 2-3) [1]. Nach dem Ringbau erfolgt dann i.d.R. simultan zum Vortrieb die Verfüllung des Ringspalts durch den Schildschwanz oder abschnittsweise durch separate Öffnungen in den Tübbingen (Kapitel 4.1 und 4.2).



Abb. 2-3: Darstellung einer Tunnelauskleidung mit Tübbingen (Ringteilung: 6 Tübbinge, 1 Schlussstein)

#### 2.2 Entstehung und Ursachen des Ringspalts

Im maschinellen Tunnelbau mit Schildvortrieb entsteht verfahrensbedingt ein Hohlraum zwischen der Außenseite der Tübbingringe und dem umgebenden Boden. Dieser Hohlraum, der sogenannte Ringspalt, hat im Allgemeinen eine Gesamtdicke zwischen rd. 8 und 20 cm, wobei diese unabhängig vom Durchmesser der Schildmaschine ist [3, 8, 9]. Die Ringspaltdicke wird unter anderem durch die Konstruktionshöhe des Schildschwanzes und der Schildschwanzdichtung bestimmt (Abb. 2-4, a). Des Weiteren kann die Dicke des Ringspalts durch Faktoren wie die Konizität des Schildmantels, der Bodenverdrängung bei Kurvenfahrten, einem Überschnitt sowie durch eine Exzentrizität und mögliche Verformungen der endgültigen Sicherung variieren (Abb. 2-4, b)-e)) [1, 3]. Der volumetrische Anteil des Ringspaltes beträgt bei typischen Tunnelabmessungen 3 bis 16 % des gesamten Volumens des Tunnels [10].



Abb. 2-4: Gesamthöhe a) (modifiziert nach [3]) und Ursachen b)-e) des Ringspalts (modifiziert nach [1])

#### 2.3 Notwendigkeit der Ringspaltverfüllung

Unmittelbar nach Einbau der Tübbinge muss der Ringspalt mit einem geeigneten Ringspaltverfüllmaterial vollständig verpresst werden. Die Ringspaltverfüllung dient der Lagesicherung des Tunnelausbaus, sowohl unmittelbar nach dem Ringbau als auch während der gesamten Nutzungsdauer des Bauwerks. Eine form- und kraftschlüssige Bettung des Tunnelausbaus setzt eine vollständige und dauerhafte Verfüllung des Ringraums voraus. Hierdurch wird ein Aufschwimmen der Tunnelröhre bzw. ein Absinken bei Belastung durch die Nachläufer der Tunnelvortriebsmaschine verhindert. Zudem soll die simultan zum Vortrieb stattfindende Verfüllung des entstandenen Ringspalts einen setzungsarmen Vortrieb sicherstellen. Dazu muss der Primärspannungszustand des Bodens erhalten werden, was einen Mindest-Verpressdruck in Abhängigkeit des vertikalen Überlagerungsdruckes des Bodens zuzüglich Grundwasserdruck voraussetzt [11]. Eine Minimierung der Setzungen ist insbesondere bei urbanen Tunnelbauprojekte mit sensibler oberirdischer Bebauung von Bedeutung. Auch kann das Ringspaltverfüllmaterial eine abdichtende Funktion der Tunnelröhre übernehmen bzw. als Isolierung und somit Schutz der Tübbinge vor betonaggressiven Böden dienen und so die Gebrauchstauglichkeit und generell die Dauerhaftigkeit des Tunnelbauwerks begünstigen [12].Voraussetzung für diese Aufgaben ist eine vollständige, form- und kraftschlüssige Verfüllung des Ringspaltes sowie eine ausreichende Dauerhaftigkeit des gewählten Ringspaltverfüllmaterials selbst. Nach [1, 3, 13, 14] sind bei der Ringspaltverfüllung folgende elementare Anforderungen und Ziele zu erfüllen:

- Form- und kraftschlüssige Bettung des Tübbingrings
- Verminderung von Verformungen des Tübbings bzw. des gesamten Tübbingrings
- Vermeidung oder zumindest Reduktion möglicher Oberflächensetzungen und Auflockerungen des umgebenden Baugrundes
- Zusätzliche Abdichtung gegen Schicht- und Sickerwasser

# 3 Materialien für die Ringspaltverfüllung

#### 3.1 Grundlegende Einteilung von Ringspaltverfüllmaterialien

Für die Ringspaltverfüllung im maschinellen Tunnelbau können unterschiedliche Materialien eingesetzt werden, welche innerhalb dieser Arbeit übergeordnet als "Ringspaltverfüllmaterialien (RSVM)" zusammengefasst werden (Abb. 3-1). Da die bekannten Ringspaltverfüllmaterialien sich sowohl materialtechnologisch als auch hinsichtlich des Verfestigungsprozesses unterscheiden, ist eine Differenzierung notwendig. Folglich werden "Ein-Komponenten-Mörtel (1KM)", "Zwei-Komponenten-Mörtel (2KM)" und "Sonstige Verfüllmaterialien" unterschieden. Zu Letzterem werden auch "Zwei-Komponenten-Mischsysteme (2K-MS)" zugeordnet. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Zwei-Komponenten-Mörteln.



Abb. 3-1: Einteilung von Ringspaltverfüllmaterialien

Ein-Komponenten-Mörtel werden vorab zu einem endgültigen Ringspaltverfüllmaterial zusammengesetzt und benötigen zur Verfestigung keine weiteren Komponenten. Grundlegend bestehen Ein-Komponenten-Mörtel aus Zement, Bentonit, Wasser, Zusatzstoffen und Gesteinskörnung [3]. Der Einsatz zementfreier Ein-Komponenten-Mörtel ist ebenfalls möglich [11]. Die Verfestigung von zementhaltigen 1KM erfolgt primär durch eine druckbedingte Entwässerung während des Verpressvorgangs und sekundär durch die Hydratation des Zementes.

Zwei-Komponenten-Mörtel bestehen grundsätzlich aus zwei separaten Komponenten. Dabei besteht das Bereitstellungsgemisch (Komponente A) aus einem Zement-(Zusatzstoff)-Bentonit-Leim mit einem gewissen Anteil an Zusatzmitteln [15]. Die Komponente B ist ein Aktivator, welcher in der Regel während des Verpressvorgangs der Komponente A beigemischt wird und maßgeblich die Verfestigung des Materials im Ringspalt bedingt.

Zwei-Komponenten-Mischsysteme (2K-MS) basieren auf den zuvor beschriebenen Materialien. Dabei können bestimmte Parameter, wie beispielsweise die Verwendung einer Komponente A mit Gesteinskörnung (Basis: 1KM) mit einer aktivierenden Komponente B (Basis: 2KM) kombiniert werden. Beispiele für solche Mischsysteme sind in [16–18] gegeben. Eine weiterführende Beschreibung sonstiger Verpressmaterialien ist in Kapitel 3.5 gegeben.

#### 3.2 Auswahl geeigneter Ringspaltverfüllmaterialien

Die Wahl eines geeigneten Ringspaltverfüllmaterials richtet sich in erster Linie nach den geologischen- und hydrogeologischen Randbedingungen sowie nach den baubetrieblichen Restriktionen. In Abhängigkeit des Baugrunds, der Einbausituation und der Verarbeitungsdauer werden zur Ringspaltverfüllung in wasserdurchlässigen Lockerböden i.d.R. Ein-Komponenten-Mörtel und bei schwach-durchlässigen Böden oder wasserführenden Böden Zwei-Komponenten-Mörtel verwendet. Neuere Entwicklungen zeigen außerdem Vorteile für die Verwendung von zementfreien Ein-Komponenten-Mörteln [3, 9, 11]. Die Tab. 3-1 zeigt eine Übersicht zur Auswahl eines geeigneten Verpressmaterials in Abhängigkeit vom Einsatzbereich, dem Verfüllsystem und der eingesetzten Pumpentechnik [3].

		1-K-Sys	steme	Perlkies	2-K-Systeme		
Mort	Mortelbezeichnung		zementfrei		Zwei-Komponenten-Mörtel		
Einsatz-	Hartgestein	(X)		Х	(X)*		
bereiche	Lockergestein	Х	Х		Х		
Verfüll- systeme	Tübbingöffnungen			Х	Х		
	Schildschwanz	Х	Х		Х		
Pumpen- technik	Kolbenpumpe	Х	Х				
	Rotorpumpe				Х		
	Schneckenpumpe				Х		
	Druckluft			Х			
X = geeignet, (X) = bedingt geeig		gnet		* nach	[19]		

Tab. 3-1:Übersicht zur Auswahl eines Verpressmaterials für die Ringspaltverfüllung in Abhängigkeit<br/>bautechnischer und geologischer Randbedingungen (modifiziert nach [3])

In [20] ist eine allgemeine, qualitative Übersicht und Beschreibung zur Auswahl von Ein- oder Zwei-Komponenten-Mörteln sowohl unter Berücksichtigung von materialtechnologischen Kennwerten (Festigkeit, Abbindeverhalten) als auch von baubetrieblichen (Herstellung, Transport und Kosten) und geologischen (Grundwasser) Randbedingungen aufgeführt.

#### 3.3 Ein-Komponenten-Mörtel

Ein-Komponenten-Mörtel sind laut [21] das bis heute am meist verbreitete Verfüllmaterial bei Schildmaschinenvortrieben im Tunnelbau. Die Verfestigung solcher Mörtel wird durch eine druckbedingte Entwässerung des überschüssigen Wassers aus dem Mörtel in den umgebenden Boden erreicht (Abb. 3-2). Dadurch konsolidiert der Mörtel noch während des Verpressvorgangs, was infolge der erhöhten inneren Reibung zu einer Versteifung bzw. Zunahme der Scherfestigkeit und Steifigkeit führt und somit die unmittelbare Bettung des Tübbingrings gewährleistet.



Abb. 3-2: Schematische Darstellung der Entwässerung von Ein-Komponenten-Mörteln [22]

Ein-Komponenten-Mörtel können anhand ihres Zementgehaltes in aktive (Zement  $\ge 200 \text{ kg/m}^3$ ), bedingt-aktive (0 kg/m<sup>3</sup> < Zement < 200 kg/m<sup>3</sup>) und inerte Mörtel (ohne Zement) unterteilt werden [3]. Als Gesteinskörnung wird hauptsächlich Sand und Kies (Durchmesser:  $\le 8 \text{ mm}$  [21]) verwendet, da diese aufgrund der vergleichsweise geringen Körngröße, aber primär wegen der rundlichen Kornform eine gute Verarbeitbarkeit des Mörtels ermöglichen. Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit, der Pumpbarkeit und Sedimentationsstabilität werden dem Mörtel eine Bentonit-Suspension sowie als Füller Flugasche oder Gesteinsmehle zugegeben. Eine Auswahl üblicher Zusammensetzungen von Ein-Komponenten-Mörteln ist in Tab. 3-2 gegeben [11].

	7	Wasser	Sand	Sand	Kies	Bentonit-	Flugasche
	Zement		0-1 mm	0-2 mm	2-8 mm	(Konzentration 6 %)	
	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
Aktiv (A-194)	194	207	169	674	454	153	194
Bedingt-aktiv (B-120)	120	177	169	674	454	183	268
Bedingt-aktiv (B-60)	60	164	169	674	454	166	328
Inert (I-0)	0	135	169	674	454	183	420

Tab. 3-2: Zusammensetzung typischer Ein-Komponenten-Mörtel (modifiziert nach [3])

Die Zusammensetzung von Ein-Komponenten-Mörteln wird hinsichtlich des Feststoffgehaltes und der Sieblinie der Gesteinskörnung soweit abgestimmt, dass nach dem Verpressvorgang ein stützendes Korngerüst mit entsprechender Scherfestigkeit vorliegt und so auftretende Kräfte in den Baugrund abgeleitet werden können [3, 11]. In Tab. 3-3 ist eine Zusammenstellung wesentlicher Anforderungen an zementhaltige Ein-Komponenten-Mörtel hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und Festigkeit bzw. Steifigkeit dargestellt [3]. Weitere Anforderungen mit Angabe dazugehöriger Prüfmethoden von Ein-Komponenten-Mörteln sind in [23] angegeben.

	Fließmaß (DIN EN 1015-3)	$(t = 0 h): 15 cm \pm 5 cm$			
Verarbeitbarkeit	Auchroitmaß (DIN EN 1015 2)	$(t = 0 h): 20 cm \pm 5 cm$			
	Ausoleuniab (Din En 1015-5)	$(t = 8 h): 15 cm \pm 5 cm$			
<b>Druckfestigkeit</b> Druckfestigkeit (24 h) = normalerweise 0,5 N/mm <sup>2</sup> (für zementhaltigen N					
Scherfestigkeit	Bei aktiver Ortsbruststützung und vollständig verfülltem Ringspalt zur Vermeidung von Verformungen aus Auftriebskräften: z.B. $\tau_y$ . 2,0 kN/m <sup>2</sup>				
Steifemodul	Ähnlich dem eines für Tübbingausbauten geeigneten Baugrundes: z.B. 5-10 MN/m <sup>2</sup>				

 

 Tab. 3-3:
 Anforderungen an zementhaltige Ringspaltverfüllmaterialien vor und nach einem Verpressvorgang (modifiziert nach [21])

Experimentelle Untersuchungen zu den interagierenden Parametern Verarbeitbarkeit, Entwässerungsverhalten und den damit verknüpften Scherfestigkeiten von Ein-Komponenten-Mörteln sind in [24] dargelegt. Darin wurde der Einfluss unterschiedlicher Mörtelzusammensetzungen, insbesondere den Feinstteilbereich betreffend, bei variablen Verpressdrücken auf die Scherfestigkeitsentwicklung nach einem Entwässerungsvorgang eruiert.

Die Möglichkeit zum Einsatz von Ein-Komponenten-Mörteln, deren Verfestigung auf einer druckbedingten Entwässerung beruht, ist abhängig von der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens. In [9] ist für Tunnelvortriebe mit suspensionsgestützter Ortsbrust und einer Betrachtung zementfreier Ein-Komponenten-Mörtel eine Abhängigkeit zwischen der Durchlässigkeit des Bodens, der Benetzung der radialen Ausbruchslaibung mit einer Bentonitsuspension und der dadurch beeinflussten Möglichkeit zur Drainierung des eingebrachten Mörtels dargestellt. Die sich daraus ergebenden Restriktionen für den Einsatz eines zementfreien Ein-Komponenten-Mörtels bei Böden mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten sind in Tab. 3-4 gezeigt.

Tab. 3-4:Anwendbarkeit von Ein-Komponenten-Mörteln in Abhängigkeit der Bodendurchlässigkeit und<br/>den dadurch bedingten Drainierungsdauern (reduzierte Darstellung nach [9])

$k_{\rm f} < 1.10^{-5} {\rm m/s}$	$1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} \le k_{\rm f} \le 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$k_{\rm f} > 5.10^{-3} {\rm m/s}$		
Vorläufig nicht ratsamer	Möglicher	Optimaler		
Anwendungsbereich	Anwendungsbereich	Anwendungsbereich		
Große Drainierungszeit		Geringe Drainierungszeit		
(> 8 Vortriebs-Stunden)		(< 1,5 Vortriebs-Stunden)		

#### 3.4 Zwei-Komponenten-Mörtel

Die Zusammensetzung eines Zwei-Komponenten-Mörtels ist grundlegend von den vorliegenden bautechnischen und geologischen Randbedingungen und den daraus resultierenden Anforderungen abhängig. Bislang erfolgt die Zusammensetzung solcher Mörtel projektspezifisch und/oder auf empirischer Basis. Typische und in der Praxis bereits eingesetzte Zwei-Komponenten-Mörtel setzen sich für Komponente A (Bereitstellungsgemisch) aus den Ausgangsstoffen Zement, Wasser und Bentonit zusammen (Abb. 3-3). In allen Fällen kommen Verzögerer zum Einsatz, häufig auch in Kombination mit einem Stabilisierer. Den volumetrisch größten Anteil am Gesamtgemisch besitzt das Wasser mit rd. 70 bis über 80 Vol.-%. Der resultierende hohe Wasserbindemittelwert kann bei einer Austrocknung des Mörtels zu starken Schwindverformungen führen. In [21] wird daher ein Einsatz von Zwei-Komponenten-Mörteln unterhalb des Grundwasserspiegels empfohlen. Für Komponente A liegt der Fokus auf der Verarbeitbarkeit, Sedimentationsstabilität und Pumpbarkeit. Die Komponente B (aktivierende Komponente) besteht aus einem alkalischen Aktivator (i.d.R. Wasserglas). Die Zugabemenge des Aktivators ist abhängig von dem Gelierverhalten und der notwendigen Festigkeitsentwicklung und liegt im Mittel bei rd. 60 l/m<sup>3</sup> (Abb. 3-3 und Tab. 3-5).



Abb. 3-3: Grundlegende Zusammensetzung eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels

Grundsätzlich muss die Zusammensetzung des Mörtels den Anforderungen einer raschen Festigkeitsentwicklung folgen, weshalb das Zusammenspiel von Komponente A und dem Aktivator als Komponente B bereits mit Beginn der Materialentwicklung im Fokus steht. Die Mengenanteile von Zement und Bentonit in Komponente A sowie der sich einstellende Wasserbindemittelwert beeinflussen die Festigkeitsentwicklung gleichermaßen wie die Chemie des Aktivators und dessen Gehalt im Gesamtgemisch. Die Entwicklung eines geeigneten Zwei-Komponenten-Mörtels stellt demnach eine Optimierungsaufgabe dar.

Nachfolgend sind in Tab. 3-5 ausgewählte Zusammensetzungen von zum Teil in der Praxis eingesetzten Zwei-Komponenten-Mörteln aufgeführt. Bezüglich der Zusammensetzung von Zwei-Komponenten-Mörteln stehen bislang keine normativen Regelungen oder Richtlinien zur Verfügung, welche die Zugabemengen und die Art der eingesetzten Ausgangsstoffe reglementieren. Dies führt zu einer ausgeprägten Variation der Ausgangsstoffe und deren Zugabemengen im internationalen Vergleich.

	Komponente A							Komponente B	
Projekt	ur	Wasser	Bentonit	Zement	Flugasche	Verzögerer	Aktivator		
	Literat	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[l / kg]	[kg]	[1]	
Metro Line 1 Naples (Italy)	[25]	830	30	230	0	2,0	137	-	
Singapore Metro Tunnels (Repub- lic of Singapore)	_	810	30	230	0	4	-	80	
Metro Line 2 Warsaw (Poland)	[26]	809	40	300	0	5	-	50	
Abu Dhabi STEP tunnel (United Arab Emirates)		815- 825	40	280- 300	0	3-4	-	60-65	
Typical two com- ponent mix design	[27]	796	35	350	0	5	-	61	
Metro-Line in Sofia (Bulgaria)		795	25	290	0	2,5	-	74	
Oraki Main Sewer Hobson Diversion Auckland (New Zealand)	_	730	30	480	0	1 FM: 5 l/m³*	-	50	
Metro-Line C in Rome (Italy)	[15]	770- 820	30- 60	310- 350	0	3-7	-	50- 100	
Metro-Line 1 in Brescia (Italy)	-	816	42	315	0	3	-	60	
Testversion (ACTA GE- OTECHNICA SLOVENICA, 2011/1)	_	796	35	350	0	6,4	84,8	61	
North East Line (Republic of Sin- gapore)	[28]	829- 857	21-24	200- 240	0	1-1,2	-	70-85	
Mischung für durchlässigen Bo- den mit Fließwas- ser	[29]	742	46	482	0	4 kg	89	65 +7kg Wasser	
Condat Rezeptur FHK 0464 A (FHK 0464 B)		776	60	300 (150)	0 (150)	3 kg	nur Ang	gabe A/B	
West Side CSO Portland (USA)	_	801	46,8	241,8	0	2,6 kg	137		
Active Mortar #1	[30]	870	34,7	231	46,7	2,3 kg	51	37	
Active Mortar #2		842	35,8	238	101	2,4 kg	83	61	
Metro Shanghai (China)	[31]	803	78	376	0	3,2		120	

 Tab. 3-5:
 Praxisübliche Zusammensetzungen von Zwei-Komponenten-Mörteln

\*FM: Fließmittel

#### 3.5 Sonstige Verpressmaterialien

In standfestem Gebirge kann der Tunnelvortrieb im offenen Modus ohne Stützdruck an der Ortsbrust durchgeführt werden. Da bei dieser Bauweise während einer druckbeaufschlagten Ringspaltverpressung von Zwei-Komponenten-Mörteln diese durch den Steuerspalt zwischen Schildmaschine und Baugrund in die Abbaukammer eindringen würden, kann alternativ ein Trockengranulat wie Perlkies verwendet werden [21]. Dabei kommt gewaschener und gut gerundeter Perlkies mit einem Durchmesser von 8 bis 12 mm als Verfüllmaterial zum Einsatz [21]. Dieses System bietet den Vorteil einer sofortigen Bettung. In einem ersten Arbeitsschritt wird der Perlkies durch Öffnungen in den Tübbings mit Hilfe von Druckluft in den Ringspalt verblasen. Anschließend wird der Porenraum der Perlkiesverfüllung mit einer Zementsuspension verpresst, um eine dauerhafte und kraftschlüssige Bettung zu realisieren. Dabei ist zu beachten, dass zum einen im Perlkies keine Feinanteile vorhanden sein dürfen, um ein Verkleben des Materials zu vermeiden, und dass zum anderen die Zementsuspension nicht an Teile der Tunnelvortriebsmaschine gelangt [3, 11]. Die Perlkiesverblasung kommt dabei i.d.R bei offenen Schildmaschinen und Tübbingauskleidungen im Festgestein zum Einsatz. Eine Ringspaltverpressung mit Mörtel im Bereich der Sohle in Kombination mit einer Perlkiesverblasung im Bereich der Ulme und Firste ist möglich [1].

Weitere Sonderlösungen für Ringspaltverfüllmaterialien sind komprimierbare Ringspaltmörtel [32–34], wasserdurchlässige Ringspaltmörtel [35] sowie Schaumzemente [11]. Neuere Entwicklungen im Bereich der Zwei-Komponenten-Mischsysteme sind in [16–18] aufgeführt. Hierbei werden die spezifischen Merkmale von Ein- und Zwei-Komponenten-Mörteln miteinander verknüpft, indem beispielsweise die Festigkeitsentwicklung einer Komponente A mit Gesteinskörnung durch einen chemischen Aktivator angeregt wird.

# 4 Technologie der Ringspaltverpressung

In Abhängigkeit der geologischen Randbedingungen und der eingesetzten Vortriebsmaschine muss ein geeignetes Verpressverfahren gewählt werden. Grundlegend kann die Verfüllung des Ringspaltes auf zwei Arten erfolgen. Einerseits besteht die Möglichkeit, das Verfüllmaterial direkt durch Öffnungen in den Tübbings in den Ringspalt zu verpressen. Andererseits kann das Ringspaltverfüllmaterial über mehrere, über den Schildschwanz der Vortriebsmaschine verteilte Zuleitungen, den sogenannten Lisenen, simultan zum Vortrieb in den Ringspalt eingepresst werden. Bei Schilden mit aktiver Ortsbruststützung ist die Verpressung durch den Schildschwanz heutzutage Stand der Technik [1, 36].

## 4.1 Verpressung durch Öffnungen in den Tübbings

Für die Verpressung des Ringspaltes werden Öffnungen bereits bei der Fertigung in den Tübbingen vorgesehen (Abb. 4-1). Zusätzlich sind diese mit einem integrierten Rückschlagventil aus Kunststoff oder mit Stopfen bestückt. Durch die Bürstendichtungen am Ende des Schildschwanzes wird das zu verpressende Volumen des Ringraumes geometrisch begrenzt (Abb. 4-1, rechts). Die Anzahl der notwendigen Injektionsöffnungen wird durch das Fließverhalten des Ringspaltverfüllmaterials bestimmt, jedoch wird in der Regel eine Öffnung pro Tübbing vorgesehen [21]. Nachteile dieses Verpressverfahrens ergeben sich durch das Absetzverhalten des Verfüllmaterials (ca. 1-2 % des Materialvolumens) [1]. Generell kommt es demzufolge nach der Primärverpressung zu einer Hohl-raumbildung in der Firste des Ringspaltes, wodurch eine Sekundärverpressung notwendig wird. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Prinzip der Primär- und Sekundärverpressung durch Öffnungen in den Tübbingen.



Abb. 4-1: Primär- und Sekundärverpressung bei der Ringspaltverfüllung [36]

### 4.2 Verpressung durch Lisenen im Schildschwanz

Eine kontinuierliche und simultan zum Vortrieb der Tunnelvortriebsmaschine stattfindende Verpressung des Ringspaltes kann durch Lisenen im Schildschwanz realisiert werden (Abb. 4-2). Insbesondere für nicht standfeste Lockergesteinsböden hat sich dieses Verfahren etabliert [21]. Um Stopfern in den Lisenen durch erhärtendes Ringspaltverfüllmaterial vorzubeugen, entstehen bei dieser Art der Ringspaltverpressung hohe Ansprüche an das Fließvermögen und das Abbindeverhalten des einzusetzenden Ringspaltverfüllmaterials [36].



Abb. 4-2: Schematische Darstellung der Ringspaltverpressung durch Lisenen

Die im Schildschwanz integrierten Verpressleitungen besitzen in der Regel einen Durchmesser von DN 50 bis DN 65 [1, 21]. Es werden in der Regel 4 bis 8 Verpressleitungen über den Schildschwanz verteilt angeordnet [1]. Da im Firstbereich größere Verpressmengen als im Sohlbereich notwendig werden können, kann die Anordnung bzw. die Verteilung der Lisenen über den Schildschwanz, wie beispielsweise in Abb. 4-3, links gezeigt, angepasst werden. Ein Beispiel für einen Anschluss der Materialzufuhr an die Lisenen ist in Abb. 4-3, rechts gezeigt.



Abb. 4-3: Links: Mögliche Anordnung der Lisenen im Schildschwanzmantel (modifiziert nach [11]). Rechts: Anschluss der Mörtelzuleitung im Schildschwanz [11]

Bei Verwendung von Ein-Komponenten-Mörteln sind der Durchmesser der Lisenen und das Größtkorn aufeinander abzustimmen. Das Größtkorn sollte nicht größer als ein Drittel des gewählten Lisenendurchmessers sein [1]. Durch diese Vorgabe wird die Gefahr der Stopferbildung reduziert. Grundsätzlich können ovale oder runde Querschnittsformen zum Einsatz kommen. Ovale Querschnitte bieten den Vorteil, dass die Konstruktionshöhe des Schildschwanzes niedrig gehalten werden kann. Hierdurch kann bei Verwendung von Ein-Komponenten-Mörteln das Verhältnis von Größtkorn zu mittlerem Durchmesser der Lisene mit Blick auf einen robusten, störungsarmen Verpressvorgang abgestimmt werden. Grundsätzlich kommen sowohl außen angeordnete als auch im Schildschwanz integrierte Leitungen zum Einsatz (Abb. 4-4) [1, 11].



Abb. 4-4: Links/Mitte: Im Schildschwanz integrierte Lisene [1]. Mitte: Lisenenöffnungen und Bürstendichtung im Schildschwanz (modifiziert nach [11]). Rechts: Außen angeordnete Lisene [1]

Die Schildschwanzdichtung besteht aus ringförmigen Stahlbürsten (in der Regel 2 bis 4 Bürstenringe) mit dazwischenliegenden, fettgefüllten Kammern. Diese Dichtungsebene soll während des Verpressvorgangs verhindern, dass das Ringspaltverfüllmaterial zwischen Schildmantel und Tübbingring eindringt und dass selbst bei einem möglichen Fugenversatz der Tübbinge der Innenraum der Vortriebsmaschine zuverlässig gegen anstehendes Grundwasser, Boden und das Ringspaltverfüllmaterial abgedichtet wird (Abb. 4-2, Abb. 4-4). Die Ringspaltverpressung simultan zum Vortrieb mit Zwei-Komponenten-Mörteln kommt seit über 30 Jahren in Japan zum Einsatz und wird als TAC-System bezeichnet [37]. Es wurde dort entwickelt und erstmals 1982 beim Bau der Osaka Subway No. 4 erfolgreich eingesetzt [38]. Auch in Europa wurde die Ringspaltverpressung mit Zwei-Komponenten-Mörteln erfolgreich durchgeführt. Beispiele hierfür sind die Genova- und die Neapel U-Bahnlinien sowie der Castellanza Eisenbahntunnel in Italien [13] und der Botlek Eisenbahntunnel in den Niederlanden [39]. Das Funktionsprinzip einer Mischvorrichtung (TAC-System) für Zwei-Komponenten-Mörtel bei einer Ringspaltverpressung durch den Schildschwanz ist in Abb. 4-5 dargestellt und nachfolgend näher beschrieben.



Abb. 4-5: Funktionsprinzip des Verpresssystems "TAC" für Zwei-Komponenten-Mörtel (modifiziert nach [37])

Im Stand-by (Phase 1) vor Beginn des Verpressvorgangs wird durch ein Schubventil die Injektionsöffnung verschlossen. In das Injektionsrohr wird Wasser gepumpt und die Komponente B unter Druck vorgehalten. Die Injektionsöffnung wird im zweiten Schritt geöffnet und der Pumpvorgang der Komponente A beginnt simultan zum Vortrieb der Tunnelbohrmaschine nach ca. 20-30 mm gleichmäßigem Vortrieb. Mit einer kurzen zeitlichen Verzögerung wird Komponente B injiziert (Phase 3). Nach Beendigung des Verpressvorgangs (Phase 4) wird das in der Verpresseinrichtung verbleibende Material durch das Schubventil ausgepresst und gleichzeitig die Verpressöffnung verschlossen. Um ein Verstopfen des Injektionsrohres durch aktiviertes Material zu vermeiden, wird das gesamte System nach jedem einzelnen Verpressvorgang mit Wasser gespült [37]. In Abb. 4-6 ist eine schematische Darstellung des oben beschriebenen Verpressystems von Zwei-Komponenten-Mörteln für eine simultane Ringspaltverpressung durch den Schildschwanz dargestellt [38].



*Abb. 4-6:* Schematische Darstellung eines Verpresssystems für Zwei-Komponenten-Mörtel bei einer Verpressung durch den Schildschwanz [38]

Der für eine ausreichende Verfüllung des Ringspaltes notwendige Verpressdruck ist dabei abhängig von dem resultierenden vertikalen Überlagerungsdruck des Bodens, dem anstehenden Wasserdruck sowie dem Stützdruck [27]. Der gewählte Druck muss mindestens so groß sein, wie der aus Erdund ggf. Wasserdruck resultierende Gesamtdruck. Um eine Auflockerung des umgebenden Bodens zu verhindern und einen setzungsarmen Vortrieb zu realisieren, müssen mögliche Spannungsumlagerungen im Boden minimiert werden. Daher muss der Ringspalt unter konstantem, auf den Spannungszustand des Baugrundes und auf die Grundwasserverhältnisse abgestimmten Druck, zeitgleich mit dem Vortrieb verfüllt werden (Abb. 4-7) [8]. Durch die Erhaltung des Primärspannungszustandes des umgebenden Bodens können Setzungen und Verformungen an der Oberfläche auf ein Minimum reduziert werden. Um die Horizontal- und Vertikalspannungen dem Primärspannungszustand anzugleichen, muss der Verpressdruck größer sein als der vertikale Überlagerungsdruck des Baugrunds mit Hinzunahme des Grundwasserdrucks. Je geringer die Spannungsumlagerungen sind, desto weniger Setzungen an der Oberfläche sind zu erwarten [36]. Zudem besteht die Möglichkeit durch einen überhöhten Verpressdruck bereits vorhandene Setzungen auszugleichen (Abb. 4-7).



Abb. 4-7: Links: Einfluss der Ringspaltverfüllung auf die Bettung. Rechts: Setzungen bei vollständiger und unvollständiger Ringspaltverfüllung. [8]

In [40] ist angegeben, dass der Verpressdruck um rund 0,3 bis 0,5 bar höher gewählt werden sollte, als der Stützdruck der eingesetzten Tunnelvortriebsmaschine, in diesem Fall einer EPB-Schildmaschine. In [41] ist für den Verpressdruck angegeben, dass dieser 1 bar größer gewählt werden soll als der anstehende Wasserdruck, maximal aber nur 5,5 bar betragen darf. Bei Ein-Komponenten-Mörteln muss des Weiteren der Druck in einer Größenordnung gewählt werden, dass die für die Verfestigung des Mörtels im Ringspalt erforderliche Filtratwasserabgabe sichergestellt ist und die dafür benötigte Zeit so gering wie möglich gehalten wird bzw. an die Vortriebsgeschwindigkeit angepasst ist.

Bei einem Einsatz von Zwei-Komponenten-Mörteln sind die Verpressdrücke tendenziell geringer als bei Ein-Komponenten-Mörteln, da eine Infiltration des Ringspaltverfüllmaterials in den anstehenden Baugrund vermieden werden muss. Bei dem bevorzugten Einsatzgebiet von Zwei-Komponenten-Mörteln in schwach durchlässigen Böden ist eine Entwässerung, welche bei Ein-Komponenten-Mörteln Voraussetzung für die Verfestigung ist, unerwünscht. In [42] wird in Bezug zu dem Stützdruck ein um 0,2 bar erhöhter Verpressdruck als ausreichend angegeben. Grundsätzlich gilt, dass der Verpressdruck groß genug sein muss, um den Ringspalt vollständig auszufüllen. Zeitgleich muss der Verpressdruck auf ein verträgliches Maß begrenzt werden, um eine Überlastung der Tunnelauskleidung und ein Anheben des Bodens zu vermeiden [27]. In der Regel liegt der benötigte Verpressdruck unter Berücksichtigung des Erddrucks und ggf. eines hydrostatischen Drucks infolge Grundwasser zwischen 1 und 3 bar (Abb. 4-8, links; Abb. 4-10 und Abb. 4-11) [8]. In Abb. 4-8, rechts ist ein infolge eines zu hohen Verpressdruckes verschobener Schlussstein eines Tübbingrings gezeigt [27].



Abb. 4-8: Links: Druckverteilung im Ringspalt während der Schildschwanzverpressung [8]. Rechts: Infolge zu hohem Verpressdruck verschobener Schlussstein eines Tübbingrings [27]

Da die Ringspaltabmessungen variieren können bzw. das Volumen des Ringspaltes durch beispielsweise eine ungleiche Ausbruchslaibung nicht konstant ist, muss während des Verpressvorgangs sowohl der Druck als auch die Menge an zugeführtem Material kontrolliert und ggf. angepasst werden, um eine vollständige Verfüllung gewährleisten zu können. Abb. 4-9 zeigt links einen vollständig ausgefüllten Ringspalt [43], in der Mitte einen teilweise unzureichend verfüllten Ringspalt [44] und rechts einen Hohlraum im Bereich der Firste [45].



Abb. 4-9: Links: Vollständig verfüllter Ringspalt (modifiziert nach [43]). Mitte: Unzureichende Ringspaltverfüllung [44]. Rechts: Unzureichende Ringspaltverfüllung in der Firste [45]

In Abb. 4-10 sind der Verpressdruck als auch die eingebrachten Mörtelmengen beim City-Tunnel Leipzig angegeben [11]. Hierbei wurden Ein-Komponenten-Mörtel verpresst, welche sich jedoch je nach Tübbingröhre primär bezüglich deren Kies-, Füller- und Wassergehalt unterschieden [11]. Das Soll-Volumen an Verpressmaterial lag bei 7,5 m<sup>3</sup> pro Ring. Dieser Wert wurde tendenziell überschritten.


Abb. 4-10: Verpresstes Mörtelvolumen und Verpressdruck beim City-Tunnel Leipzig [11]

Weiterhin ist zu erkennen, dass das verpresste Mörtelvolumen und der Verpressdruck bei Tübbingröhre 1 (8,5 bis 9,1 m<sup>3</sup>/Ring) größer sind als bei Tübbingröhre 2 (7,9 bis 8,3 m<sup>3</sup>/Ring). Als möglicher Grund dafür wurden die unterschiedlichen Mörtelzusammensetzungen genannt [11]. Die Verpressdrücke, unabhängig ob Tübbingröhre 1 oder 2 unterliegen starken Schwankungen und es kann keine direkte Korrelation zwischen verpresstem Mörtelvolumen und dem Verpressdruck abgeleitet werden.

In [46] sind der Verpressdruck als auch das Mörtelvolumen je Ring für die Bangkok Metro und dessen erste Strecke "Chaloem-Ratchamongkhon-Linie" mit Baubeginn im Jahr 1999 dokumentiert (Abb. 4-11). Als Mörtel kam ein Zwei-Komponenten-Mörtel mit einem Wasserglas als Aktivator zum Einsatz. Die Ringspaltverpressung erfolgte über Öffnungen in den Tübbingen mit einem maximalen Verpressdruck von 3 bar. Anhand der gezeigten Verpressmengen in Abb. 4-11, unten wird deutlich, dass es auch bei Verwendung von aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien zu einem Mehrbedarf an Ringspaltverfüllmaterial je Ring im Vergleich zu dem rechnerisch notwendigen Mörtelvolumen (100%) kommt. Analog zur den Daten in Abb. 4-10, kann auch hier keine direkte Korrelation zwischen verpresstem Mörtelvolumen je Ring und dem Verpressdruck abgeleitet werden.



Abb. 4-11: Verpressdruck (oben) und Mörtelmenge (unten) je Ring der Süd- und Nordrichtung der Chaloem-Ratchamongkhon-Linie der Bangkok-Metro [46]

### 4.3 Herstellung, Vorhaltung und Transport

Die Herstellung von Ringspaltverfüllmaterialien, unabhängig ob einkomponentige oder zweikomponentige Mörtel zum Einsatz kommen, findet in der Regel über Tage in separaten Mischanlagen statt. Hierbei kommen beispielsweise Tellermischer für erdfeuchte Gesteinskörnung oder Durchlaufmischer für Fertigmischungen zum Einsatz [1]. Im Falle von Zwei-Komponenten-Mörteln kommen für die Komponente A zum Teil Turbomischer oder Agitatoren (Abb. 4-12) zum Einsatz [47].



Abb. 4-12: Materialmischer (Links: Turbomischer; Rechts: Agitator) für die Komponente A eines Zwei-Komponenten-Mörtels [47]

Die Mischtechnik und demzufolge die dabei eingebrachte Mischenergie wirkt sich grundlegend auf die Eigenschaften des Mörtels aus. In [41] ist im Rahmen von Untersuchungen an Zwei-Komponenten-Mörteln für das Projekt "Brisbane Airport Link" der Einfluss unterschiedlicher Mischertypen auf die frühe Druckfestigkeitsentwicklung nach Aktivierung dargestellt. Die Verwendung einer energiereichen Mischtechnik, in diesem Fall eines Kollodialmischers, führte im Vergleich zu einer klassischen Paddel-Mischmaschine zu jedem Zeitpunkt zu einer wesentlich höheren Druckfestigkeit (Abb. 4-13).



Abb. 4-13: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit eines Zwei-Komponenten-Mörtels in Abhängigkeit des Mischertyps zur Herstellung der Komponente A [41]

Ein-Komponenten-Mörtel werden nach Herstellung mit einem Versorgungszug mit Mörtelkübeln mit Zwangsmischer zur Tunnelvortriebsmaschine transportiert. Bei sehr kurzen Tunnellängen kann das Material bei geeigneter Fließfähigkeit auch gepumpt werden. Zwei-Komponenten-Mörtel werden in der Regel zum Vorratsbehälter bzw. Mischtank auf der Tunnelvortriebsmaschine gepumpt. Der Aktivator für Zwei-Komponenten-Mörtel wird ebenfalls über Tage vorgehalten und über Pumpen zur Tunnelvortriebsmaschine in separate Vorhaltetanks gefördert [47]. Bei dem Tunnelprojekt "Sparvo" in Italien kam ein Zwei-Komponenten-Mörtel zum Einsatz, welcher in einer oberirdischen Mischanlage hergestellt wurde und dessen Komponenten (Mörtel und Aktivator) durch separate Leitungen über eine Strecke von rd. 2.600 m zur Tunnelvortriebsmaschine gepumpt wurden [40]. Aus den Vorratsbehältern auf der TBM wird dann das Material über Ventileinheiten abgezogen und den Förderpumpen zugeführt. Dabei werden im Regelfall für Ringspaltverfüllmaterialien mit Gesteinskörnung wie Ein-Komponenten-Mörtel Doppelkolbenpumpen eingesetzt [11] (Abb. 4-14, links). Für gesteinskörnungsfreie Zwei-Komponenten-Mörtel können Schneckenpumpen eingesetzt werden (Abb. 4-14, rechts) [3].



*Abb. 4-14: Links: Doppelkolbenpumpe und Mörtelvorratsbehälter [11]. Rechts: Schneckenpumpe (modifiziert nach [48])* 

# 5 Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien

### 5.1 Grundlegende materialtechnologische Anforderungen

Die grundlegenden Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien können in Abhängigkeit der Zeit und somit auch auf baupraktischer Ebene räumlich differenziert werden. Dabei kann eine Einteilung in "vor", "während" und "nach" dem Verpressvorgang bzw. in eine Verarbeitungsphase, Verfestigungsphase und Erhärtungsphase erfolgen (Abb. 5-1). Die Verarbeitungsphase kann als der Zeitraum definiert werden, in welchem das Material pumpbar und grundlegend verarbeitbar ist. Dies beginnt unmittelbar nach der Herstellung des Ringspaltverfüllmaterials und endet mit Beginn der Verfestigungsphase bzw. kurz nach dem Eintritt in den Ringspalt. Die Verfestigungsphase bezeichnet im Falle von Zwei-Komponenten-Mörtel den Zeitraum ab Aktivatorzugabe bis zum Erreichen eines Zustandes, in welchem das Material bei den gegebenen prozesstechnischen Randbedingungen nicht mehr fließfähig und somit nicht weiter verarbeitbar ist. Bei Ein-Komponenten-Mörteln beginnt die Verfestigungsphase mit vollständigem Ausfüllen des Ringraumes und schließt mit dem Ende der Konsolidierung bzw. dem Ausklingen der Entwässerung ab. Die Verfestigungs- und Erhärtungsphase überschneiden sich zu Beginn. Bei Zwei-Komponenten-Mörteln beinhaltet die Erhärtungsphase die Aktivierung und somit Gelierung und die anschließende Frühfestigkeitsentwicklung sowie die (Langzeit-)Festigkeit. Bei Ein-Komponenten-Mörteln schließt die Erhärtungsphase an die vollständige Konsolidierung des Materials an und betrifft die dadurch generierten Frühfestigkeiten und bei zementhaltigen Mörteln die anschließend durch die Hydratation bedingte Festigkeitsentwicklung. Die Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien betreffen in der Verarbeitungsphase (vor dem Verpressvorgang) die Fließfähigkeit und Sedimentationsstabilität. Vor und während des Verpressvorgangs muss das Ringspaltverfüllmaterial eine gute Pump- und Fließfähigkeit aufweisen, um grundsätzlich für einen Verpressvorgang geeignet zu sein sowie anschließend eine gleichmäßige Verfüllung des Ringspalts zu ermöglichen. Unmittelbar nach dem Verpressvorgang bzw. der Verfestigungsphase, mit Beginn der Erhärtungsphase muss das Material rasch eine ausreichende Früh- bzw. Scherfestigkeit entwickeln, um ein Aufschwimmen und eine Ovalisierung der Tübbingringe zu verhindern bzw. grundlegend eine hinreichende (Früh-)Bettung sicherzustellen. Die Forderungen einer lang andauernden Verarbeitbarkeit und einer unmittelbaren Verfestigung stehen dabei im Gegensatz zueinander. Im Endzustand muss das Verfüllmaterial mindestens die Festigkeiten und Steifigkeiten erreichen, die denen des umgebenden Baugrundes entsprechen. Die wesentlichen Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien sind in Abb. 5-1, unterschieden in vor, während und nach einem Verpressvorgang, dargestellt.



Abb. 5-1: Übersicht allgemeiner, qualitativer Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien bei einer zeitlichen und räumlichen Differenzierung

### 5.2 Verfahrenstechnische Anforderungen

Eine kraftschlüssige Bettung der Tübbingröhre durch das Ringspaltverfüllmaterial ist sowohl während des Vortriebs als auch im Endzustand von wesentlicher Bedeutung. Tübbingringe bilden reine Gelenkringe, die kinematisch auf die Mitwirkung des umgebenden Bodens angewiesen sind, um einen gesicherten Lastabtrag zu ermöglichen und die Verformungen der Tübbingringe gering zu halten. Während des Vortriebs wirken Lasten aus Auftrieb, Vortriebspressenkräften der Schildmaschine und den Nachläufern der Tunnelvortriebsmaschine auf die Tübbingringe ein. Die zuletzt eingebauten Tübbingringe, welche mit noch "frischem" Ringspaltverfüllmaterial umgeben sind, dürfen aufgrund dieser wirkenden Lasten weder aufschwimmen noch absinken [3]. Um die Lagestabilität des Tübbingrings sicherzustellen, müssen die Lasten über das Ringspaltverfüllmaterial in den Baugrund abgeleitet werden. Im Endzustand muss der überlagernde Erddruck über die Tübbingringe und das Ringspaltverfüllmaterial an den Boden übertragen werden [1]. Die Ringspaltverfüllung muss demnach so ausgeführt sein, dass zum kritischen Zeitpunkt - direkt nach dem Verpressen und Einfahren der Vortriebspressen - die Auftriebskräfte, welche in den ersten Tübbingringen hinter der TBM auftreten, aufgenommen werden [10]. Diese Auftriebskräfte resultieren aus der geringeren Gesamtdichte der Tunnelröhre, bestehend aus den Tübbingringen und der darin eingeschlossenen Luft im Gegensatz zu der höheren Dichte des Ringspaltverfüllmaterials (Abb. 5-2, rechts) [10]. Dies kann zu einer Aufwärtsbewegung der Tunnelröhre führen, wenn die Vortriebspressen sich von den Tübbingen lösen. Für den Fall eines Aufschwimmens der Tunnelröhre spielen das Verfestigungs- und Erhärtungsverhalten sowie die rheologischen Eigenschaften (Fließgrenze und Viskosität) des Verfüllmaterials eine maßgebende Rolle. Wesentliches Kriterium zur Vermeidung des Aufschwimmens ist die Scherfestigkeit des Ringspaltverfüllmaterials unmittelbar nach dem Verpressvorgang. Diese sollte einen Wert größer 2 kN/m<sup>2</sup> aufweisen bzw. in der Regel 5 bis 10 kN/m<sup>2</sup> betragen [3, 49]. Wird ein Tunnel mit aktiver Ortsbruststützung aufgefahren, kann die erforderliche Scherfestigkeit zur Vermeidung von Schäden aus Auftriebskräften nach [10] berechnet werden. In Abb. 5-2, links ist die rechnerisch erforderliche Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Dichte des Ringspaltverfüllmaterials und der Ringspaltdicke aufgetragen und die dazugehörige Berechnung dargestellt. Die mittlere Dichte des Tunnelquerschnittes wurde zu 400 kg/m<sup>3</sup> gewählt. Im Rahmen der Berechnung wurden die Dichten der Ringspaltverfüllmaterialien für Zwei-Komponenten-Mörtel im Bereich von 1200 bis 1500 kg/m3 und für Ein-Komponenten-Mörtel im Bereich von 2000 bis 2300 kg/m<sup>3</sup> gewählt [10].



Abb. 5-2: Links: Erforderliche Scherfestigkeit gegen Auftrieb (Berechnung nach [10]). Rechts: Prinzip der wirkenden Kräfte (Auftriebskraft / Scherkraft) (modifiziert nach [50])

# 5.3 Spezifische Anforderungen und Richtwerte an Zwei-Komponenten-Mörtel

### 5.3.1 Verarbeitungsphase – Komponente A

Die an einen Zwei-Komponenten-Mörtel gestellten Anforderungen können wie in Abb. 5-1 differenziert betrachtet werden. Dabei wird "vor", "während" und "nach" dem Verpressvorgang bzw. der Aktivierung unterschieden. Innerhalb der Verarbeitungsphase werden ausschließlich an die stabilisierende Komponente A Anforderungen gestellt. Grundsätzliche Anforderungen in der Verarbeitungsphase betreffen die Viskosität (Fließfähigkeit), die Verarbeitbarkeitszeit, die Pumpbarkeit und die Sedimentationsstabilität. Tab. 5-1 zeigt eine Auswahl der aus der Literatur bekannten und aus Projekten abgeleiteten Anforderungen und Richtwerte.

 Tab. 5-1:
 Übersicht typischer Anforderungen und Richtwerte an das Bereitstellungsgemisch (Komponente A) eines Zwei-Komponenten-Mörtels

Kennwert	Literatur	Wert			
Viskosität (Fließfähigkeit)	[15, 43, 47, 51]	Marsh-Auslaufzeit: 35 Sek. $< t_{m,1000} < 45$ Sek.			
1) [47]         2) [15]         3) [23, 30]         4) [52]         5) [51]         6) [43]		<ol> <li>1) nach 1h &lt; 0,5 %; nach 2h &lt; 1 %; nach 24h &lt; 4 %</li> <li>2) nach 3h &lt; 3 %</li> <li>3) &lt; 1 %</li> <li>4) keine Blutwasserabgabe</li> <li>5) nach 1h &lt; 0,5 %; nach 2h &lt; 1 %; nach 24h &lt; 5 %</li> <li>6) nach 3h &lt; 3 %; nach 24h &lt; 8 %</li> </ol>			
Pumpbarkeit         1) [47]           2) [23]		1) Pumpbar über Distanzen bis 3,5 km 2) Pumpbar bis zu 48 Stunden			
Verarbeitbarkeit	1) [47] 2) [15]	1) Viskositätsverlust < 0,5 % nach 4 h 2) Verarbeitbar bis zu 72 h			

Klassische Aktivatoren für Zwei-Komponenten-Mörtel liegen in der Regel in flüssiger Form vor und besitzen eine entsprechende Pumpbarkeit und Fließfähigkeit. An diese werden keine separaten Anforderungen gestellt.

### 5.3.2 Erhärtungsphase – Komponente A+B

Die Erhärtungsphase und somit die Festigkeitsentwicklung eines aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels kann aufbauend auf den Betrachtungen in Abb. 5-1 auf materialtechnologischer Ebene weiterführend in eine "Unmittelbare Bettung (Gelphase)" und eine "Langzeitbettung (Festigkeitsphase)" differenziert werden. Die schematische Einteilung der Erhärtungsphase ist in Abb. 5-3 dargestellt. Innerhalb dieser Phasen sind jeweils unterschiedliche Festigkeiten bzw. Kennwerte des Materials charakteristisch.



Abb. 5-3: Materialtechnologische Differenzierung der Erhärtungsphase eines Zwei-Komponenten-Mörtels in eine Gel- und Festigkeitsphase

Angepasst auf den Vortrieb der Tunnelbohrmaschine muss die Festigkeitsentwicklung des Ringspaltverfüllmaterials unmittelbar nach Aktivierung derart rasch ablaufen, dass die sofortige Bettung des zuvor eingebauten Tübbingrings gewährleistet ist, auftretende Setzungen an der Oberfläche minimiert und resultierende Kräfte aus dem Vortrieb der Tunnelbohrmaschine aufgenommen werden können. Dieser Bereich kann annähernd auf einen Zeitraum von Sekunden bis hin zu einigen Stunden nach Aktivierung beschränkt werden. Daran schließt die Entwicklung der Langzeitfestigkeit an (ab mehreren Tagen nach Aktivierung). In Abb. 5-4 ist schematisch die Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels mit den darin wesentlichen Materialkennwerten als Funktion über die Zeit dargestellt.



*Abb. 5-4:* Schematische Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels nach Aktivierung und Zuordnung zeitabhängiger Eigenschaften

Im Zeitfenster der unmittelbaren Bettung muss bei einem Zusammentreffen der beiden Komponenten im Ringspalt ein verzögertes System rasch aktiviert werden, um den meist bautechnisch bedingten, aber auch durch die hydrogeologischen Gegebenheiten bestimmten Anforderungen, der raschen Gelierung und darauffolgend schnellen Festigkeitsentwicklung, gerecht zu werden. Gemäß der aktuell verwendeten Verpresstechnik findet eine Vermischung der beiden Komponenten noch innerhalb der Lisenen statt [37]. Auf Basis von Tab. 5-2 muss nach der Aktivierung des Mörtels eine unmittelbare Gelierung innerhalb von rd. 6 bis 12 Sekunden bei einem Vortrieb von 10 bis 15 mm der Tunnelbohrmaschine [15] stattfinden, um bei wasserdurchlässigem Boden mit Grundwasserströmung ein erosionsstabiles Material zu erhalten, welches dauerhaft eine formschlüssige Verfüllung des Ringspaltes sicherstellt. Eine zu rasche Gelierung ist aufgrund der Gefahr von Stopfern in den Lisenen oder am Ausgang der Lisenen und um eine gleichmäßige Verfüllung des Ringraumes zu gewährleisten, zu vermeiden [52]. Dies setzt eine Mindestgelzeit voraus. An die Gelierung schließt die Entwicklung der Scherfestigkeit sowie einer ersten (Früh-)Festigkeit an. Ab einem Zeitraum von ca. 30 Minuten bis eine Stunde nach Aktivierung soll der Mörtel eine erste Druckfestigkeit in der Größenordnung von 0,05 bis 0,1 N/mm<sup>2</sup> aufweisen [47]. Nach ca. einer Stunde soll die Festigkeitsentwicklung stark voranschreiten und zu diesem Zeitpunkt mindestens 0,1 N/mm<sup>2</sup> betragen (Abb. 5-5) [38]. Nach 24 Stunden werden i.d.R. einaxiale Druckfestigkeiten von rd. 0,5 N/mm<sup>2</sup> gefordert, wie z. B. in [47] und [15] genannt. Die Erfassung der einaxialen Druckfestigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten ist dabei als reiner Materialkennwert zur Charakterisierung der Festigkeitsentwicklung zu verstehen, da im Ringspalt keine idealen einaxialen Bedingungen vorherrschen. In Abb. 5-5 ist ein typischer Festigkeitsverlauf eines aktivierten, zwei-komponentigen Ringspaltverfüllmaterials dargestellt [38].



Abb. 5-5: Verlauf der Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels [38]

Neben der Entwicklung einer hinreichenden Druckfestigkeit im frühen Alter des aktivierten Mörtels ist eine ausreichend rapide Scherfestigkeitsentwicklung von hoher Bedeutung, um einem Aufschwimmen der Tübbingröhre entgegenzuwirken. Bei einer angenommenen Vortriebsgeschwindigkeit von 50 mm/min und einer Tübbingbreite von 1,5 m ist der Ringspalt bei einer simultanen Verpressung durch den Schildschwanz innerhalb von 30 Minuten verfüllt. Nach dem Verpressvorgang und der anschließenden Vortriebsphase werden die Vortriebspressen für den Ringbau vom zuletzt eingebauten Tübbingring gelöst. Zu diesem Zeitpunkt werden die Auftriebskräfte (vgl. Kapitel 2.3) maßgebend und das Verpressmaterial muss soweit verfestigt sein, dass die zuletzt eingebauten Tübbingringe in ihrer Lage stabilisiert sind. In dieser Phase ist die Scherfestigkeitsentwicklung von Bedeutung (Abb. 5-2). Als hinreichende Scherfestigkeit ist ein Wert von 2 kN/m<sup>2</sup> anzunehmen [3]. Die rechnerisch notwendige Scherfestigkeit steht dabei in Abhängigkeit der Dichte des Mörtels und der Geometrie des Tunnelausbaus (Kapitel 5.2, Abb. 5-2). Nach Erreichen der für die unmittelbare Bettung notwendigen Festigkeiten liegt der Fokus auf den Endfestigkeiten für die Langzeitbettung. Hierzu werden primär Druckfestigkeiten im Bereich von 1 bis 3 N/mm<sup>2</sup> gefordert [29], wobei diese i.d.R. 28 Tage nach Aktivierung des Mörtels bestimmt werden. Aufgrund der kritischen Anforderungen im Bereich der unmittelbaren Bettung ist die Höhe der Langzeitfestigkeit für die Konzeptionierung von Zwei-Komponenten-Mörteln von untergeordneter Relevanz [15]. Eine Übersicht der in der Literatur formulierten Richtwerte und Anforderungen an aktivierte Zwei-Komponenten-Mörtel ist in Tab. 5-2 dokumentiert.

	Literatur	Anforderung / Wert			
Gelierung	1) [47, 51] 2) [15]	1) > 6 Sek. < 12 Sek.			
		2) <13,5 Sek. (binnen weniger Sekunden)			
	3) [38]	3) > 5 Sek. < 10 Sek. Dauer der Gelzustands: 30 Min.			
	4) [43]	4) > 5 Sek. < 15 Sek.			
Druckfestigkeit	1) [47] 2) [29] 3) [15] 4) [3] 5) [38] 6) [14] 7) [51]	$\begin{array}{c} \mbox{nach} 1 \ h > 0,1 \ N/mm^2 \\ 1) \ \ nach \ 24 \ h > 0,5 \ N/mm^2 \\ \ nach \ 28 \ d > 2,5 \ N/mm^2 \end{array} \qquad \mbox{4)} \qquad \begin{array}{c} \ nach \ 24 \ h > \\ \ 0,5 \ N/mm^2 \end{array}$			
		2) nach 24 h > 1,0 N/mm <sup>2</sup> nach 28 d > 1,0 < 3 N/mm <sup>2</sup> 5) nach 1 h = $0,05-0,1 N/mm^2$			
		3) nach 1 h > 0,03 N/mm <sup>2</sup> nach 24 h = 0,5 N/mm <sup>2</sup> 6) nach 24 h > 0,12 N/mm <sup>2</sup>			
		7) $\begin{array}{l} nach \ 1 \ h > 0,1 \ N/mm^{2} \\ nach \ 2 \ h = 0,2 \ N/mm^{2} \\ nach \ 28 \ d \geq 3 \ N/mm^{2} \end{array}$			
<b>Frühfestigkeit</b> (siehe auch Richtwerte zur Druckfestigkeit)	1) [23] 2) [47]	1) Erstarrungsbeginn (3 h); Erstarrungsende (nicht spä- ter als 4 h nach Erstarrungsbeginn)			
		2) Kein Eindringen des Stempels bei einer Spannung von 0,1 N/mm <sup>2</sup> (mod. Nadelgerät nach Vicat)			
Sahaufastialasit	1) [3] 2) [49]	$1) > 2,0 \text{ kN/m}^2$			
Scherlesugkeit		2) ca. 5 bis 10 kN/m <sup>2</sup> nach 30 Minuten			
Steifemodul	[3]	Ähnlich dem eines für Tübbingausbauten geeigneten Baugrunds: 5-10 MN/m <sup>2</sup>			
Schwinden	[23, 30, 52]	geringer Volumenverlust			
Filtratwasserabgabe	[30]	geringe Filtratwasserabgabe zur Einhaltung der Volumen- konstanz			
Durchlässigkeit	1) [29] 2) [15]	1) $< 10^{-7} \text{ m/s}$			
		2) $< 10^{-8} \text{ m/s}$			
Erosionswiderstand	[23, 27, 30]	Widerstand gegen die Verwässerung durch Grundwasser / Widerstand gegen Auswaschen			

Tab. 5-2:Übersicht typischer Anforderungen und Richtwerte an aktivierte Zwei-Komponenten-Mörtel<br/>(Komponente A+B) im Ringspalt

# 6 Prüfmethoden für Zwei-Komponenten-Mörtel

Zur Beurteilung der Eignung von Zwei-Komponenten-Mörteln auf materialtechnologischer Ebene kommen unterschiedliche Prüfverfahren aus mehreren Ingenieursdisziplinen wie dem Tunnelbau selber, der Betontechnologie sowie der Bodenmechanik zur Anwendung. Hinsichtlich der Anforderungen an das Material vor und im Ringspalt sind die Prüfverfahren für Komponente A und solche für das aktivierte System (Komponenten A+B) zu differenzieren. Die Prüfverfahren für aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien konzentrieren sich dabei auf die Gelierung sowie die Frühfestigkeitsentwicklung (innerhalb der ersten Stunden nach Aktivierung) als auch auf die anschließende Festigkeitsentwicklung und untergeordnet auf die Ermittlung der Endfestigkeit.

### 6.1 Verarbeitungsphase – Komponente A

### 6.1.1 Fließfähigkeit

Zur Erfassung der zeitabhängigen Fließfähigkeit der Komponente A eines Zwei-Komponenten-Mörtels wird in der Regel die Marsh-Auslaufzeit  $t_{M,1000}$  mit dem Marsh-Trichter (Prüfung nach DIN EN 4127 [53] oder ASTM D6910 [54]) bestimmt (Abb. 6-1) [15]. Dabei werden ca. 1.500 ml der Komponente A in den Trichter eingefüllt und die Zeit erfasst bis 1.000 ml des Materials in den darunter angeordneten Auffangbehälter geflossen sind.



Abb. 6-1: Bestimmung der Marsh-Auslaufzeit eines Zwei-Komponenten-Mörtels nach DIN 4127 [53]

### 6.1.2 Sedimentationsstabilität

Die Sedimentationsstabilität der Komponente A eines Zwei-Komponenten-Mörtels kann gemäß [15] anhand der ermittelten Blutwassermenge (Prüfung ASTM C940-16 [55] oder in Anlehnung an DIN EN 480-4 [56]) quantifiziert werden (Abb. 6-2, links). Dabei wird eine definierte Menge des Prüfmörtels in einen Standzylinder gefüllt. Dieser Zylinder wird abgedeckt und an einem vibrationsfreien Ort bei konstanter Temperatur gelagert. Bei einem instabilen Mörtel kommt es mit der Zeit zu einem Absondern von Wasser an der Mörteloberfläche. Durch Ablesen der Menge des aufstehenden bzw. abgesonderten Wassers kann die Blutwassermenge erfasst und zeitlich-aufgelöst

angegeben werden. In [57] wird zusätzlich vorgeschlagen, dass Entmischen des Mörtels augenscheinlich an erhärteten Proben zu untersuchen, da eine geringe Blutwassermenge nicht immer gleichbedeutend mit einer ausreichenden Mischungsstabilität ist, wie in Abb. 6-2 gezeigt.



*Abb.* 6-2: Links: Standzylinder mit eingefülltem Mörtel (Komponente A) zur Bestimmung der Sedimentationsstabilität [47]. Mitte/Rechts: Entmischter/stabiler Zwei-Komponenten-Mörtel [57]

### 6.2 Erhärtungsphase – Komponente A+B

### 6.2.1 Gelzeit

Ein wesentlicher Aspekt bei der Zusammensetzung von Zwei-Komponenten-Mörteln ist das Gelierverhalten nach Aktivierung bzw. die resultierende Gelzeit. In [15, 43, 57, 58] ist das Vorgehen zur Bestimmung der Gelzeit dokumentiert. Dabei werden die beiden Komponenten miteinander vermischt und die Zeit nach Aktivierung dokumentiert, ab wann das Material nicht mehr in der Lage ist, selbstständig aus einem schräg gehaltenen Behälter zu fließen. In [57] ist das Vorgehen zur Bestimmung der Gelzeit im Detail dargestellt und um eine Fotodokumentation ergänzt (Abb. 6-3). Hierbei werden zur Bestimmung der Gelzeit die Komponenten A und B in separate Behälter eingefüllt. Durch Umschütten ineinander (Abb. 6-3, links) bis zu dem Zeitpunkt, ab welchem das Material nicht mehr selbstständig aus dem Behältnis fließt (Abb. 6-3, rechts), mit dem Bezugspunkt des ersten Zusammentreffens der beiden Komponenten, wird die Gelzeit ermittelt.



Abb. 6-3: Bestimmung der Gelzeit von Zwei-Komponenten-Mörteln nach [57]

Grundsätzlich ist dabei zu beachten, dass eine Erhöhung der Aktivatormenge entgegen den Erwartungen zu einer Verlängerung der Gelzeit führt und umgekehrt. Dieses Verhalten wurde in [47] und [58] untersucht. Der Einfluss des Aktivatorgehaltes auf die Gelzeit ist in Abb. 6-4 dargestellt.



Abb. 6-4: Gelzeit eines Zwei-Komponenten-Mörtels in Abhängigkeit des Aktivatorgehaltes [58]

### 6.2.2 Frühfestigkeit

Die Entwicklung einer ersten Frühfestigkeit schließt unmittelbar an den Gelzustand an und kann auf den Bereich der ersten Minuten bis Stunden eingegrenzt werden (vgl. Abb. 5-4). In [57] werden zur Bestimmung der Frühfestigkeiten von Zwei-Komponenten-Mörteln drei, zum Teil modifizierte Prüfmethoden (Penetrationswiderstand, modifiziertes Nadelgerät nach Vicat und einaxiale Druckfestigkeit) vorgestellt und miteinander verglichen (Abb. 6-5). Modifikationen bekannter Prüfverfahren werden bei der Charakterisierung aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien notwendig, da in der herkömmlichen Betontechnik oder im Bereich der Bindemittelprüfungen keine zeitlich-aufgelösten Prüfverfahren für eine derart schnelle Reaktion bzw. Festigkeitsentwicklung in Kombination mit den entsprechend geringen Festigkeiten zur Verfügung stehen.



Abb. 6-5: Übersicht eingesetzter Prüfverfahren zur Bestimmung der Frühfestigkeit von Zwei-Komponenten-Mörteln [57]. V.l.n.r.: Penetrationswiderstand, Modifiziertes Nadelgerät nach Vicat, Einaxiale Druckfestigkeit

Laut [57] resultieren aus der Bestimmung des Penetrationswiderstandes sowie bei Verwendung des modifizierten Nadelgerätes nach Vicat nur indirekte Werte. Um vergleichbare Werte, auch mit den Festigkeiten zu einem späteren Zeitpunkt zu erhalten, wird empfohlen, die Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit (Abb. 6-5, rechts) auch für die Frühfestigkeiten bis zu einem Mörtelalter von einer Stunde anzuwenden [57]. Bei einer üblichen Mehrfachbestimmung ist zu beachten, dass infolge der rapiden Festigkeitsentwicklung des aktivierten Systems die Prüfzeitpunkte der jeweiligen Einzelprüfungen gleichmäßig um das Prüfalter zu verteilen sind. Zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach beispielsweise einer Stunde sollte die erste Probe nach 55 Minuten und die letzte Probe nach 65 Minuten geprüft werden, um ein arithmetisches Mittel für die Druckfestigkeit nach 60 Minuten zu erhalten [57].

In [47] kommt zur Bestimmung der Frühfestigkeiten bis rd. 1 Stunde nach Aktivierung des Mörtels bzw. bis zu einem Spannungsniveau von 0,1 N/mm<sup>2</sup> ein durch Zusatzgewichte modifiziertes Nadelgerät nach Vicat [59] zum Einsatz (Abb. 6-6, links). Dabei wird angenommen, dass das Spannungsniveau erreicht ist, wenn keine Penetration des aktivierten Materials durch den Stempel mit entsprechendem Zusatzgewicht mehr stattfindet (Abb. 6-6, rechts).



Abb. 6-6: Modifiziertes Nadelgerät nach Vicat [59] zur Bestimmung der Frühfestigkeiten eines Zwei-Komponenten-Mörtels [47]

Zur Frühfestigkeit zählt neben der Druckfestigkeit im jungen Alter ebenfalls die Entwicklung der Scherfestigkeit des aktivierten Ringspaltverfüllmaterials (Kapitel 5.2, Abb. 5-2). Im Rahmen der Literaturrecherche waren hierzu keine Beschreibungen möglicher Prüfverfahren für Zwei-Komponenten-Mörtel dokumentiert. Für Ein-Komponenten-Mörtel kommt zur Bestimmung der Scherfestigkeiten an Mörtelproben nach einem Entwässerungsvorgang die Methode der Flügelscherversuche nach [60] zum Einsatz [10].

#### 6.2.3 Druckfestigkeit

Zur Bestimmung der Druckfestigkeiten von Zwei-Komponenten-Mörteln über eine Stunde hinaus, ab 2 Stunden über 28 Tage bis zum Erreichen der Endfestigkeiten werden geschalte Prüfkörper verwendet. Dazu wurden in [15] zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 54 mm und einem h/d-Verhältnis von 1, in [47] Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm und in [57] Würfel mit einer Kantenlänge von 50 mm verwendet (Abb. 6-7).



Abb. 6-7: Prüfkörper aus Zwei-Komponenten-Mörtel zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit (Würfel mit einer Kantenlänge von 50 mm) [57]

Bei der Bestimmung der Druckfestigkeit ist die Vorlagerung der Probekörper von signifikanter Bedeutung. Eine Lagerung an Luft ohne zusätzlichen Schutz gegen Wasserverlust ist zwingend zu vermeiden. Durch die hohen Wassergehalte solcher Mörtel kann es bei einer ungeschützten Lagerung zu einer Wasserabgabe und somit zu starken Schwindverformungen kommen [15]. In [26] wurden Untersuchungen an klassischen Zwei-Komponenten-Mörteln zum Einfluss der Umgebungsfeuchte (unterschiedlich saturierte Sande) auf die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit durchgeführt. Dabei wurden Feuchtegehalte des Sandes, in welchem die Proben eingebettet waren, im Bereich von 0,2 bis 15 % betrachtet. Innerhalb des Betrachtungszeitraumes von rund 700 Tagen konnte keine signifikante Abnahme der Druckfestigkeit infolge einer zu geringen Umgebungsfeuchte festgestellt werden. Im Anhang in Kapitel A-5 sind ergänzende, eigene Untersuchungen zum Schwindverhalten eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels bei einer ungeschützten Lagerung der Prüfkörper aufgeführt. Dabei lag der Fokus auf der Handhabung der Prüfkörper während der Bestimmung von mechanischen Kennwerten und dem Einfluss der Dauer einer ungeschützten Lagerung von Prüfkörpern auf das Ergebnis der einaxialen Druckfestigkeit.

### 6.3 Präparation geeigneter Prüfmörtel

Bei Laborprüfungen ist grundsätzlich zu beachten, dass eine ähnliche Mischtechnik wie bei dem späteren Projekt zu verwenden ist, da unterschiedliche Mischertypen die Verarbeitbarkeit und auch die Festigkeitsentwicklung von aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien beeinflussen können. Insbesondere die Mischintensität bzw. die Dispergierung des Bentonits als Stabilisator und dessen Effekt auf die Frischmörteleigenschaften sind von hoher Bedeutung. Im Rahmen vergleichender Untersuchungen konnte in [61] gezeigt werden, dass durch die Verwendung eines Intensivmischers, in diesem Fall eines Kolloidalmischers im Vergleich zu einem herkömmlichen Hobart-Mischer, die Sedimentationsstabilität eines Zwei-Komponenten-Mörtels deutlich gesteigert werden konnte. Im ersten Fall war eine Blutwassermenge nach 24 Stunden von 2 % messbar, wohingegen bei weniger intensivem Mischen nach 24 Stunden eine Blutwassermenge von rd. 16,9 % gemessen wurde. Gemäß den in [57] beschriebenen Untersuchungen an Zwei-Komponenten-Mörteln konnte bei einer Mischzeit von einer Minute in einem Kolloidal-Mischer mit hoher Scherenergie ein Wert für die Fließfähigkeit bei der Prüfung mittels Mörtel-Fließkegel nach [62] von 10,5 Sekunden erreicht werden. Im Vergleich wurde bei der Verwendung eines herkömmlichen Hobart-Mischers mit einer Mischauer von drei Minuten nur ein Wert von 16,5 Sekunden erreicht.

# 7 Materialkonzepte

### 7.1 Wirkungsweisen der Konzepte

### 7.1.1 Bezugsebene – Klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel

Für die systemische Konzeptionierung neuer Ringspaltverfüllmaterialien wurde die in Kapitel 5.3.2 eingeführte Zustandsdifferenzierung der Festigkeitsentwicklung aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel herangezogen. Die Erhärtungsphase eines aktivierten Systems kann dabei materialtechnologisch in eine Gelphase (Gelierung: Sekunden bis Minuten, Frühfestigkeit: Minuten bis einige Stunden) und eine Festigkeitsphase (Zeitraum: Mehrere Stunden über Tage bis Jahre) unterteilt werden (vgl. Abb. 5-3). Auf baupraktischer Ebene entspricht diese Differenzierung für die Gelphase der "Unmittelbaren Bettung" und für die Festigkeitsphase der "Langzeitbettung" (Abb. 5-3, Abb. 5-4). Diese Bereiche können materialtechnologisch voneinander entkoppelt und deren Zustände durch den Einsatz unterschiedlicher Stoffe auf separate Weise erzielt werden. Diese Differenzierung unter Hinzunahme der zeitabhängigen Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels ist in Abb. 7-1 schematisch dargestellt.



Abb. 7-1: Schematische Darstellung der Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels und Differenzierung in eine Gel- und Festigkeitsphase

Die Differenzierung der Erhärtungsphase in eine Gel- und Festigkeitsphase stellt die Basis für die Materialkonzepte (Kapitel 7.1.2 und 7.1.3) dar. Grundlegend können die Konzepte in eine alkalische und eine physikalische Aktivierung unterteilt werden. Der Fokus der alkalischen Aktivierung liegt dabei auf der Anwendbarkeit und gezielten Nutzung latent-hydraulischer und puzzolanischer Ausgangsstoffe für die Festigkeitsentwicklung. Die alkalische Aktivierung wirkt somit im Bereich der Festigkeitsphase (Abb. 7-2, rechts) und betrifft primär die zu aktivierende Komponente bzw. das Bindemittel, wobei eine Abstimmung des Aktivators auf das Gesamtbindemittel von wesentlicher Bedeutung ist. Im Materialkonzept zur physikalischen Aktivierung werden die Zugabe von superabsorbierenden Polymeren (SAP) als aktivierende Komponente und die dadurch verursachte Verfestigung und unmittelbar anschließende Frühfestigkeitsentwicklung des aktivierten Mörtels betrachtet. Das Konzept wirkt somit gemäß der Zustandsdifferenzierung innerhalb der Gelphase (Abb. 7-2, links).



Abb. 7-2: Zeitlich aufgelöste Wirkungsbereiche der Materialkonzepte zur "Alkalischen Aktivierung" und "Physikalischen Aktivierung" von Ringspaltverfüllmaterialien

#### 7.1.2 Alkalische Aktivierung

Das Konzept der alkalischen Aktivierung basiert auf einer gezielten Aktivierung von latent-hydraulischen oder puzzolanischen Ausgangsstoffen bzw. deren Anwendbarkeit im System der Zwei-Komponenten-Mörtel für die Festigkeitsentwicklung. Dies hat den Hintergrund, dass lokal verfügbare Materialien anstelle des üblicherweise ausnahmslos eingesetzten Zementes gezielt verwendet werden können und so die wirtschaftliche und ökologische Bilanz von Ringspaltverfüllmaterialien optimiert werden kann. Durch die Zugabe von alkalischen Aktivatoren zu latent-hydraulischen oder puzzolanischen Stoffen wird durch Löse- und anschließende Reaktionsprozesse die Bildung einer festigkeitsliefernden Struktur angeregt. Durch die Zugabe von Wasserglas zu z.B. Hüttensand werden infolge des geschaffenen alkalischen Milieus im System die für die Phasenbildung wesentlichen Reaktionspartner aus dem Hüttensand gelöst, sodass festigkeitsbildende "innere" aber auch "äußere" (in der Porenlösung) Strukturen ausgebildet werden können [63]. Bei zementfreien bzw. calciumarmen Bindemittelsystemen entsteht durch die Aktivierung ein alumosilikatisches Netzwerk (vgl. Geopolymere [64]). Daneben sind in [65] alkalisch aktivierte Materialien und im speziellen auch hybride Bindemittel definiert, welche aus den Komponenten "Portlandzement, Alumosilikat und Alkalien" bestehen. Trotz deren gewissen Anteil an hydraulischem Zement im Gesamtsystem bilden sich dennoch in deren Gefügeentwicklung sowohl calcium- als auch alumosilikatische Strukturen aus. Eine ausschließliche Verwendung von latent-hydraulischen und/oder puzzolanischen Bindemitteln wie sie bei Geopolymeren Anwendung finden, ist im System der Ringspaltverfüllmaterialien auf Basis klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel nicht direkt anwendbar. Aufgrund der vergleichsweise trägen Reaktion bzw. des notwendigen Löseprozesses von aktivierten latent-hydraulischen oder puzzolanischen Zusatzstoffen sind die zeitlich kritischen Anforderungen an die Gelierung und Frühfestigkeitsentwicklung nur schwer realisierbar. Demzufolge ist zur Erzielung einer raschen Gelierung und Frühfestigkeitsentwicklung nach Aktivierung eine Bindemittelkonfiguration notwendig, welche durch einen gewissen Anteil an sofort verfügbaren Reaktionspartnern die unmittelbare Strukturbildung für die Gelphase sicherstellt. Der Gelierungsprozess kann dabei durch einen beschränkten Anteil an Portlandzement oder Calciumhydroxid eingeleitet werden. Das Grundprinzip dieses Konzeptes ist in Abb. 7-3 aufgezeigt und dem Festigkeitsverlauf eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels gegenübergestellt.



Abb. 7-3: Schematische Darstellung der Festigkeitsentwicklung eines alkalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterials

Die Festigkeitsentwicklung nach der Gelphase, ab wenigen Stunden nach Aktivierung bis zur Endfestigkeit, wird autark durch den Zusatzstoff generiert. Dies ermöglicht eine materialtechnische Entkopplung des Gelzustandes einschließlich der anfänglichen Frühfestigkeitsentwicklung (unmittelbare Bettung) und der eigentlichen Festigkeitsentwicklung (Langzeitbettung). Im Rahmen der Untersuchungen werden verschiedene Bindemittelkompositionen (primär Hüttensande, aber auch Flugaschen und Metakaoline) mit unterschiedlichen Aktivatoren angeregt. Dabei werden Kombinationen aus gezielt aktivierten Zusatzstoffen und Gelierhilfen (Portlandzement, Calciumhydroxid) betrachtet und die wesentlichen Materialkennwerte unter Betrachtung typischer Anforderungen und Richtwerte am Gesamtsystem untersucht.

#### 7.1.3 Physikalische Aktivierung

Das Konzept der "physikalischen Aktivierung" befasst sich mit der gezielt herbeigeführten inneren Entwässerung eines Ringspaltverfüllmaterials (Komponente A auf Basis von Ein-Komponenten-Mörteln) durch die Zugabe von superabsorbierenden Polymeren (SAP) als Komponente B, und die daraus resultierende Gelierung und anfängliche Verfestigung. Das für die Verarbeitbarkeit notwendige Überschusswasser des Ringspaltverfüllmaterials wird durch die vor Eintritt in den Ringspalt zugemischten SAP in kürzester Zeit aufgenommen. Durch deren Wasseraufnahmevermögen kommt es bereits unmittelbar nach dem Zusammentreffen von SAP und Mörtel zu einer Abnahme des freien Wassers im Mörtel. Dies hat eine rasche Viskositätszunahme und eine Verfestigung des aktivierten Systems innerhalb weniger Minuten zur Folge. Als Mörtelbasis kommen hierbei typische Ein-Komponenten-Mörtel (Kapitel 3.3, Tab. 3-2) zum Einsatz, da diese bei einer Reduktion des freien Wassers im System durch das Vorhandensein grober Gesteinskörnung (bis 8 mm) eine erhöhte innere Reibung im Vergleich zu gesteinskörnungs-freien Leimen aufweisen und so auftretende Kräfte über das Korngerüst abgetragen werden können. Die Entwicklung einer hinreichenden Frühfestigkeit, insbesondere der Scherfestigkeiten, steht somit in direkter Abhängigkeit zur zeitabhängigen Wasseraufnahme der SAP nach Zugabe zum Mörtel. Das Wasseraufnahmevermögen der SAP ist dabei von der chemischen Zusammensetzung (pH-Wert, gelösten Alkalien) des im Mörtel vorhandenen Porenwassers abhängig. Die Verfestigung findet somit systeminhärent, volumenkonstant und ohne eine Interaktion mit dem umgebenden Baugrund statt. Im Ringspalt liegt somit unmittelbar nach dem Verpressvorgang ein Material mit einer vom Wasseraufnahmepotential der SAP abhängigen Steifigkeit vor, welche mit fortlaufender Zeit bis zum Ende des Quellvorgangs der SAP weiter zunimmt. Die Festigkeitsentwicklung auf chemischer Ebene durch die Hydratation des Zementes bei bedingt-aktiven oder aktiven Mörteln spielt für die unmittelbare Bettung bestenfalls eine untergeordnete Rolle, wobei diese im Endzustand maßgebend die Festigkeit bestimmt und als verfestigende Struktur um die gequollenen SAP wirkt. Das grundlegende Schema dieses Konzeptes ist in Abb. 7-4 dargestellt und dem schematischen Festigkeitsverlauf eines aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels gegenübergestellt.



Abb. 7-4: Schematische Darstellung der Festigkeitsentwicklung eines physikalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterials

Im Rahmen der Untersuchungen werden neben der Charakterisierung der wesentlichen Eigenschaften unterschiedlicher SAP-Typen zwei verfahrenstechnische Ansätze betrachtet. Zum einen wird die Anwendbarkeit in Ein-Komponenten-Mörteln bei unbehandelter Zugabe der SAP untersucht. Zum anderen wird im Hinblick auf die verfahrenstechnische Eignung eine Suspendierung der SAP in geeigneten Trägerfluiden orientierend untersucht. Dies hat den Vorteil, dass die dabei entstehende fließfähige Lösung mit den teil-vorgequollenen SAP ähnlich wie ein klassischer Aktivator gehandhabt werden kann und keine Modifikationen des Verpressverfahrens notwendig werden. Hierbei ist neben der einzustellenden Viskosität des physikalischen Aktivators das Wasseraufnahmepotential der SAP zu erhalten bzw. der Quellvorgang in der Suspensionsphase auf ein kritisches Maß zu begrenzen und gegebenenfalls über Modifikationen der Komponente A und dessen Wassergehalt zu kompensieren.

### 7.2 Alkalische Aktivierung

### 7.2.1 Grundlagen der alkalischen Aktivierung

Die alkalische Aktivierung beschreibt verallgemeinert die Herstellung eines Bindemittels durch die gezielte Zugabe einer alkalischen Lösung zu einem reaktiven alumosilikatischen Ausgangsstoff. Der zugrunde liegende Prozess ist lösungsgesteuert und die eingesetzten Materialien bestimmen die Art des Endproduktes [66]. Als Ausgangsstoffe für das Bindemittel können feste Alumosilikate wie Hüttensande, Flugaschen und Metakaoline sowie grundlegend Kombinationen von latent-hydraulischen und puzzolanischen Stoffen verwendet werden [65–69]. Als Aktivatoren kommen beispielsweise Alkalihydroxide oder Alkalisilikate (Wassergläser) mit einem entsprechend hohen pH-Wert zum Einsatz [70]. Nach dem Vermischen des Aktivators mit dem Bindemittel finden in einem ersten Schritt ein Löseprozess und eine Monomerbildung statt. Darauffolgend kommt es zu einer Kondensation bzw. Polymerbildung. Das dabei entstehende Netzwerk und dessen Strukturen sind abhängig von dem Calciumgehalt des Bindemittels [66]. Bei einer entsprechend hohen Menge an Calcium entstehen bei der Kondensation vornehmlich Calciumsilikatisches Netzwerk gebildet [70]. Grundlegend werden die Bindemittel bei der alkalischen Aktivierung in calciumarme und -reiche Bindemittel unterschieden [66, 71].

Neben der Aktivierung von reinen Alumosilikaten können auch Mischungen aus Portlandzement und Alumosilikat zielgerichtet durch geeignete alkalische Aktivatoren angeregt und eine Erhärtung des Bindemittels verursacht werden. Solche Bindemittel sind in [65] als hybride Binder definiert. Dabei entstehen in Abhängigkeit der Mengenanteile der hydraulischen Komponente und der chemischen Zusammensetzung des Alumosilikates unterschiedliche Reaktionsprodukte. Das resultierende Netzwerk besteht hauptsächlich aus Calciumsilikathydraten mit Aluminiumeinbau sowie anteilig aus alumosilikatischen Netzwerkstrukturen [65, 72].

### 7.2.2 Reaktionsprozesse der alkalischen Aktivierung

Bei der alkalischen Aktivierung von Alumosilikaten kommt es nach Zugabe eines Aktivators in einem ersten Schritt infolge des alkalischen Milieus bzw. des hohen pH-Wertes zu einem Aufbrechen der kovalenten Bindungen durch die Hydroxid-Ionen OH<sup>-</sup> und folglich zu einem Löseprozess des Bindemittels. In der Porenlösung liegen dann silikatische und aluminatische Monomere vor [70]. Diese Lösungsprodukte konzentrieren sich in der Porenlösung auf und es kommt zu einer Koagulation. Anschließend beginnt die Polymerisation, wobei die freigesetzten Monomere kondensieren [70]. Diese Phasen des Reaktionsprozesses verlaufen nicht strikt nacheinander, sondern finden zum Teil gleichzeitig statt [73]. In Abb. 7-5 ist der Reaktionsprozesse eines Alumosilikates mit einem gewissen Anteil an Calcium nach Hinzugabe einer alkalischen Lösung schematisch dargestellt [74].



Abb. 7-5: Schematische Darstellung des Reaktionsablaufes der alkalischen Aktivierung eines Alumosilikates bei Vorhandensein einer gewissen Calciumquelle (modifiziert nach [74])

#### 7.2.3 Ausgangsstoffe für die alkalische Aktivierung

Für die alkalische Aktivierung ist ein weites Spektrum an mineralischen Ausgangsstoffen geeignet. Aufgrund der hohen Mengen an amorphem SiO2 und Al2O3 werden als zu aktivierende Ausgangsstoffe hauptsächlich Sekundärstoffe aus der Stahlherstellung (Hüttensande) oder der Kohleverstromung (Flugaschen) sowie calcinierte Kaoline (Metakaoline) und natürliche Puzzolane eingesetzt. Ebenso sind Kombinationen aus den oben genannten Stoffen für eine alkalische Aktivierung geeignet. Die Ausgangsstoffe können dabei mit einer Reihe geeigneter alkalischer Aktivatoren kombiniert werden, die sich im pH-Wert und der chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Dazu zählen Alkalihydroxide (MOH), Alkalisilikate bzw. Wassergläser (M<sub>2</sub>O\*rSiO<sub>2</sub>) sowie Alkalisalze wie beispielsweise Karbonate ( $M_2CO_3$ ) und Sulfate ( $M_2SO_4$ ). Üblicherweise werden wässrige Lösungen aus Wasserglas oder Mischungen aus einer Lauge und einem Wasserglas eingesetzt [70, 71]. Die Art des Aktivators und dessen Alkalität sind grundsätzlich auf das Bindemittel abzustimmen. Ausgehend von Portlandzementklinker über Hüttensand und Flugasche bis zu Metakaolin verringert sich der Calciumoxid(CaO)-Gehalt im Bindemittel stetig. Um einen entsprechend starken Löseprozess zu bewirken und um bei sinkendem CaO-Gehalt weiterhin ausreichende Festigkeiten erzielen zu können, muss die Konzentration des alkalischen Aktivators, gekennzeichnet durch den M<sub>2</sub>O-Gehalt, erhöht werden (Abb. 7-6) [67, 70].



Abb. 7-6: Korrelation zwischen dem CaO-Gehalt des Bindemittels, der Aktivatorzusammensetzung und den Hydratationsprodukten bei der alkalischen Aktivierung (modifiziert nach [67, 75])

#### 7.2.4 Klassifizierung von alkalisch aktivierten Bindemitteln

Grundlegend wird bei Bindemitteln für die alkalische Aktivierung zwischen calciumarmen alkalisch aktivierten Bindemitteln (AAB) mit einem CaO-Gehalt von maximal 10 M.-% und calciumreichen AAB mit einem CaO-Gehalt von mindestens 10 M.-% unterschieden (Tab. 7-1). Bei calciumarmen AAB bildet sich infolge einer alkalischen Aktivierung ein dreidimensionales alumosilikatisches Polymernetzwerk aus, das zum Erhärten des Bindemittels führt. Bei steigendem CaO-Gehalt (10 bis 40 M.-%) entstehen Mischphasen aus diesem alumosilikatischen Polymernetzwerk und Hydratphasen in Form von Calciumsilikathydrat-Phasen (CSH) mit Aluminiumeinbau. Ab einem Calciumoxid-Gehalt über 40 M.-% dominieren in Folge einer alkalischen Aktivierung die Calcium-(Aluminat)-Silikat-Hydrat-Phasen (C(A)SH) die Struktur. Daher erfolgt bei calciumreichen AAB aufgrund der unterschiedlichen dominierenden Reaktionsprodukte eine weitere Differenzierung in zwei Untergruppen mit CaO-Gehalten von 10 bis 40 M.-% und über 40 M.-% (Tab. 7-1) [70, 71].

	Calciumarme AAB	Calciumreiche AAB		
CaO-Gehalt [M%/Binder]	0 - 10	10 - 40	> 40	
Dominierendes	Alumosilikatisches Po-	Mischphasen aus alumosilikatischem	C(A)SH	
Reaktionsprodukt	lymernetzwerk	Polymernetzwerk und C(A)SH		
Typische	Calciumarme Flug-	Calciumreiche	Hüttensand	
Ausgangsstoffe	asche, Metakaolin	Flugasche		

 Tab. 7-1:
 Allgemeine Klassifizierung alkalisch aktivierter Bindemittel [71]

#### 7.2.5 Alkalische Aktivatoren

Für die alkalische Aktivierung können grundsätzlich ätzende Alkalien und Alkaliverbindungen eingesetzt werden. Gemäß [67] und [73] können diese in sechs Gruppen unterteilt werden (Tab. 7-2). Dabei steht "M" stellvertretend für die Alkalien wie Kalium, Natrium oder Lithium.

 Tab. 7-2:
 Übersicht möglicher Aktivatoren für die alkalische Aktivierung [73]
 [73]

1. Alkalihydroxide (MOH)	4. Aluminate (M <sub>2</sub> O • nAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
2. Salze schwacher Säuren (M <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , M <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> )	5. Alumosilikate ( $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$ )	
3. Alkali-Silikate (M <sub>2</sub> O • nSiO <sub>3</sub> )	6.Salze starker Säuren (M <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	

Die gebräuchlichsten Aktivatoren sind Natrium- oder Kaliumhydroxide und Natrium- oder Kalium-Wassergläser sowie eine Mischung solcher [69]. Rein chemisch betrachtet unterscheiden sich diese beiden Aktivatortypen in deren Siliziumdioxid(SiO<sub>2</sub>)-Gehalt und dem pH-Wert. Während Alkalihydroxide lediglich aus H<sub>2</sub>O und M<sub>2</sub>O bestehen, weisen Alkalisilikate neben H<sub>2</sub>O und M<sub>2</sub>O einen gewissen Anteil an amorphem SiO<sub>2</sub> auf. Dieses freie Silizium dient bei der alkalischen Aktivierung mitunter als Reaktionspartner für die in Lösung gegangenen Stoffe aus dem Bindemittel. Der Siliziumdioxid-Gehalt kann, neben dem pH-Wert des Aktivators, die Festigkeitsentwicklung positiv beeinflussen [76]. In Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung variiert ebenfalls der pH-Wert. Dieser liegt bei Alkalihydroxiden in der Regel zwischen 13 und 14 und bei Alkalisilikaten zwischen 11 und 13,5 [65]. Die Zusammensetzung von löslichen Alkalisilikaten kann allgemein durch die Formel "M<sub>2</sub>O \* n SiO<sub>2</sub>" beschrieben werden. Dabei entspricht n dem Molverhältnis, das die Anzahl der Siliziumdioxidmole je Alkalimetalloxidmol wiedergibt. Diese Molverhältniszahl (MVZ) ist mit Hilfe des Gewichtverhältnisses (GVZ), das dem Quotienten aus SiO<sub>2</sub> zu M<sub>2</sub>O (beide in %) entspricht, und einer anschließenden Multiplikation mit einem Faktor für die Molumrechnung (Natrium-Wasserglas: MVZ<sub>Na</sub>: 1,032 \* GVZ; Kalium-Wasserglas: MVZ<sub>K</sub>: 1,556 \* GVZ) zu ermitteln. Durch die Mischung einer Alkalilauge und eines Wasserglases lässt sich in Abhängigkeit der Mengenverhältnisse die MVZ des Aktivators anpassen (Abb. 7-7, links). Bei einer Abnahme der MVZ erhöht sich die Alkalität des Aktivators, da mehr Alkalien (M<sub>2</sub>O) vorhanden sind, gleichzeitig nimmt aber auch der Gehalt an SiO<sub>2</sub> im Aktivator ab (Abb. 7-7, rechts). Je mehr Lauge in dem Aktivatorgemisch enthalten ist, desto höher ist der pH-Wert und desto geringer ist die MVZ. Bei einem Aktivator, der nur aus Lauge besteht, beträgt die MVZ folglich 0, da kein amorphes Silizi-umdioxid in der Lösung vorhanden ist.



Abb. 7-7: Resultierende Molverhältniszahl und chemische Zusammensetzung von Mischungen aus Kalium-Wasserglas und Kaliumlauge

In [77] sind schematische Reaktionsmodelle für die alkalische Aktivierung von Hüttensanden bei Einsatz von Wasser / Dinatriumhydrogenphosphat (Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, pH-Wert: 9) und bei Verwendung von Alkalihydroxiden sowie Alkalisilikaten dargestellt (Abb. 7-8). Während sich im ersten Fall nur ein exothermer Peak zu Beginn innerhalb der ersten Minuten abzeichnet, hervorgerufen durch die Benetzung und das Anlösen des Hüttensandes, kommt es bei Verwendung von Alkalihydroxiden zu einem weiteren Ausschlag im Bereich von Stunden und Tagen. Dieser Ausschlag wird durch die anhaltende Reaktion des Hüttensandes verursacht.



*Abb.* 7-8: *V.l.n.r.: Schematische Reaktionsmodelle von Hüttensand mit Wasser / Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, Alkalihydroxiden und Alkalisilikaten [77]* 

Bei Verwendung von Alkalisilikaten kommt es nach dem ersten Peak zu einer weiteren, rasch ablaufenden exothermen Reaktion. Dieser zweite Peak wird auf die Reaktion zwischen den aus dem Alumosilikat, in diesem Fall Hüttensand, herausgelösten Ca<sup>2+</sup>-Ionen und den Silikat-Ionen im Aktivator zurückgeführt. Dabei kommt es zur Bildung primärer CSH-Phasen in den Hohlräumen. Gemäß [78] ist dieser zweite Peak maßgeblich verantwortlich für das Ansteifverhalten des Bindemittels. Im Verlauf der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit wird als Bindemittel für die alkalische Aktivierung primär der Ausgangsstoff Hüttensand betrachtet, da dieser infolge seiner chemischen Zusammensetzung im Vergleich zu Flugaschen oder Metakaolinen im System der aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtel das günstigste Reaktionsverhalten erwarten lässt [70]. Durch den höheren Calciumgehalt bei Hüttensanden findet eine Art Aufweitung des Glasnetzwerkes statt, was einen stärker ausgeprägten Lösevorgang ermöglicht und damit zu einer früheren und intensiveren Reaktion und Strukturbildung im Rahmen einer alkalischen Aktivierung führt [77].

### 7.2.6 Alkalisch aktivierte Hüttensande

Hüttensand weist eine amorphe Struktur auf, die bei Einwirken eines alkalischen Milieus in Lösung geht. Nach Zugabe einer alkalischen Lösung zum Hüttensand findet in einem ersten Schritt ein Herauslösen der schwach gebundenen Netzwerkwandler (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) des Glases und deren Austausch durch H<sup>+</sup>-Ionen des Wassers statt [77]. Netzwerkwandler bezeichnen dabei Ionen, die nicht für den Aufbau des Glasnetzwerkes maßgebend sind [79]. Durch die OH<sup>-</sup>-Ionen der umgebenden alkalischen Lösung werden die Si-O und Al-O Bindungen der Netzwerkstruktur des Hüttensandes aufgebrochen, wodurch es zu einer Bildung von Hydratphasen kommt. Durch diese primären Reaktionsprodukte auf dem Hüttensandpartikel wird ein weiterer Wasserzutritt verhindert und der Löseprozess gehemmt [77]. Zur signifikanten Lösung des Hüttensandglases und zur Kondensation von CSH-Phasen als Reaktionsprodukte sind nach [80] pH-Werte von mindestens 11,5 notwendig. Alkalische Aktivatoren ermöglichen durch deren höhere Hydroxidionenkonzentration die rasch gebildeten wasserundurchlässigen Reaktionsschichten auf der Oberfläche des Hüttensands durch ein Aufbrechen der Si-O und Al-O Bindungen aufzulösen, wodurch es folglich in der Porenlösung zu einer Aufkonzentration der SiO<sub>4</sub>- und AlO<sub>4</sub>-Tetraeder kommt und die Bildung verschiedener Reaktionsprodukte durch Kondensation ermöglicht wird [77].

Nach [77] lässt sich die Reaktion von alkalisch aktivierten Hüttensanden wie folgt beschreiben und gemäß Abb. 7-9 veranschaulichen. In einem ersten Schritt wird das Hüttensandglas gelöst. Darauf folgen eine Keimbildung und ein Wachstum der ersten festen Hydratphasen. Es kommt dann zu einer Wechselwirkung und mechanischen Bindung an den Grenzflächen der Reaktionsprodukte und folglich zu einem Voranschreiten der Reaktion.



Abb. 7-9: Vergleich der Mikrostrukturen bei der Bildung von Hydratphasen von Portlandzement (a) und alkalisch aktivierten Hüttensanden (b) [77]

Anders als bei zementösen Systemen führt der Löseprozess bei dem alkalisch aktivierten Hüttensand neben den Reaktionsproduktion auf der Partikeloberfläche zu einer Bildung von Reaktionsprodukten in der Porenlösung und damit zu einem nahezu vollständigen Ausfüllen der Hohlräume zwischen den einzelnen Bindemittelpartikeln (Abb. 7-9) [63]. Als Hauptreaktionsprodukt bei der alkalischen Aktivierung von Hüttensanden bilden sich kettenförmige aluminiumhaltige Calciumsilikathydrate (C(A)SH-Phasen) mit einem im Vergleich zum Portlandzement geringeren Ca/Si-Verhältnis, die in ihrer Zusammensetzung aber denen des Portlandzements ähneln [63, 67, 69, 71]. Durch die Inkorporation von Aluminium in die Silikatketten der CSH-Phasen können im Vergleich zu Portlandzementen längere Ketten gebildet werden [70]. Die Struktur und Zusammensetzung des gebildeten Netzwerkes ist dabei anhängig von der Art des Aktivators. Bei Einsatz von Alkalihydroxiden kommt es zu einem geringen Verlinkungsgrad, wohingegen bei Verwendung von Alkalisilikaten und der dadurch gegebenen Verfügbarkeit von freiem Silizium in der Porenlösung ein höherer Verlinkungsgrad und eine höhere Dichte der Phasen erreicht wird [77]. In der Industrie werden üblicherweise wässrige Lösung aus Alkalisilikaten oder eine Mischung aus Alkalisilikaten und Alkalihydroxiden eingesetzt [70]. In den meisten Fällen werden aus wirtschaftlichen Gründen Natrium- oder Kaliumalkalien als Ausgangsstoff für diese Aktivatoren eingesetzt [65]. Ergänzende Informationen zum Reaktionsmechanismus von calciumarmen alkalisch aktivierten Bindemitteln und der Bildung eines alumosilikatischen Polymernetzwerken können der Fachliteratur in [65, 70, 71] entnommen werden.

Der Einfluss einer Kombination aus Wasserglas (Kalium-Wasserglas: pH-Wert: 13,55; MVZ: 1,5) und Kalium-Lauge auf die Druckfestigkeit nach 24 Stunden nach Aktivierung wurde im Rahmen von eigenen Voruntersuchungen an einem Hüttensand (HS) als Bindemittel an Mörtelprismen in Anlehnung an DIN EN 196-1 [81] untersucht. Neben der Ermittlung eines abgestimmten Aktivator-gehaltes lag der Fokus auf dem Einfluss des pH-Wertes und der Molverhältniszahl und den damit korrelierenden Anteilen an SiO<sub>2</sub> und M<sub>2</sub>O im Aktivator (Abb. 7-10). Die Einzelergebnisse sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-24 und Tab. A-25 dokumentiert.



*Abb.* 7-10: *Einfluss des Aktivatorgehaltes (links) und der Aktivatorzusammensetzung (rechts) auf die Festigkeitsentwicklung von Hüttensand.* 

Zur Bestimmung der notwendigen Aktivatormenge wurde in einem ersten Schritt der Aktivatorgehalt bei konstantem Wassergehalt im Gesamtsystem variiert (Abb. 7-10, links). Grundlegend ging mit steigendem Aktivatorgehalt eine erhöhte Festigkeit einher. Die Molverhältniszahl und der pH-Wert des Aktivators waren im Rahmen dieser Untersuchungen konstant (MVZ: 1,5; pH: 13,55). Ein zunehmender Aktivatorgehalt korrelierte nicht linear mit einer Steigerung der Druckfestigkeit. Während bei einem geringen Wasserglas-Gehalt unter 15 M.-%/HS kaum Druckfestigkeiten messbar waren, kam es folgend mit steigendem Aktivatorgehalt zu einer zunehmenden Festigkeit. Der Bereich der stärksten Zunahme der Druckfestigkeit erstreckte sich von rund 20 bis 35 M.-%/HS. Im Bereich hoher Aktivatorgehalte (über 45 M.-%/HS) stieg die Druckfestigkeit nur geringfügig weiter an, stagnierte aber im Rahmen der hier gewählten Zugabemengen nicht. Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurde das Wasserglas durch Zugabe einer Kaliumlauge modifiziert, um den Einfluss der Molverhältniszahl bzw. der Alkalität und des SiO<sub>2</sub>-Gehaltes auf die Festigkeitsentwicklung zu eruieren (Abb. 7-10, rechts). Ausgangspunkt lieferte hierbei ein Aktivatorgehalt von rd. 30 M.-% bezogen auf das Bindemittel. Dies entspricht einem üblichen Aktivatorgehalt bei Zwei-Komponenten-Mörteln. Der Aktivatorgehalt von rd. 30 M.-%/Hüttensand wurde durchweg konstant gehalten. Der Einsatz von Kaliumlauge, als Substituent für das Wasserglas, führte bei einer Molverhältniszahl im Bereich von 1,1 bis 0,5 zu einer deutlichen Festigkeitssteigerung (Abb. 7-10, rechts, markierter Bereich). Bei einer MVZ unterhalb von 0,5 hingegen kam es zu einem signifikanten Festigkeitsabfall. Vergleichbare Abhängigkeiten der MVZ und der Festigkeitsentwicklung sind in [82] dokumentiert. In [83] konnte gezeigt werden, dass bei sinkender OH-Konzentration der Löseprozess von Reaktionspartnern, in diesem Fall von Aluminium und Silizium aus einem Metakaolin, abnimmt. Bei der MVZ von 0,5 besteht der Aktivator aus rd. 54 % Wasserglas und 46 % Lauge. Dadurch wird die Alkalität des Aktivators erhöht und der Löseprozess des Hüttensandes begünstigt. Gleichzeitig wird aber auch der Gehalt an SiO<sub>2</sub> im Aktivator reduziert. In [76] wurde festgestellt, dass es durch eine erhöhte Menge an SiO<sub>2</sub> durch anteilige Verwendung von Wasserglas im Aktivator (Basis: NaOH-Lauge) bei alkalisch aktivierten Flugaschen zu einem Festigkeitszuwachs kam. Gleiches wurde auch in [82] festgestellt.

In [84] wurden Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses des Gehaltes an Magnesiumoxid bei der alkalischen Aktivierung von Hüttensanden durchgeführt. Dabei kamen als Aktivatoren eine Natriumlauge und ein Natrium-Wasserglas zum Einsatz. Innerhalb der Gefügeuntersuchungen konnte anhand von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen festgestellt werden, dass es bei Verwendung von Wasserglas zu einer wesentlich dichteren Gefügestruktur kommt als es bei einer reinen Natriumlauge der Fall ist (Abb. 7-11). Somit kann auch im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen davon ausgegangen werden, dass das SiO<sub>2</sub> im Wasserglas wesentlich an der Festig-keitsentwicklung beteiligt ist und neben der Alkalität ein gleichsam ausschlaggebender Parameter für die Entwicklung festigkeitsliefernder Strukturen ist.



Abb. 7-11: Gefügestruktur (REM-Aufnahmen) alkalisch aktivierter Hüttensande mit unterschiedlichen Aktivatoren (Links: Natriumlauge; Rechts: Natrium-Wasserglas) nach 28 Tagen [84]

### 7.3 Physikalische Aktivierung

#### 7.3.1 Superabsorbierende Polymere "SAP"

Superabsorbierende Polymere (SAP) bestehen aus hydrophilen, quervernetzten Copolymeren, die in der Lage sind ein Vielfaches der eigenen Masse an Wasser in deren Struktur aufzunehmen, ohne dabei selber in Lösung zu gehen. Wasseraufnahmen bis zu 100.000 % (1.000 g/g) sind möglich [85]. Primär verantwortlich für die Fluidaufnahme bzw. das sogenannte Quellen der SAP ist der osmotische Druck [86, 87].

Die meist verwendete Methode zur Herstellung von SAP erfolgt über die radikalische Polymerisation. Dazu werden Acrylsäuremonomere in einer wässrigen Lösung mit einem Konzentrationsbereich von 20 bis 40 M.-% mit Natriumhydroxid teilneutralisiert [88]. Alternativ kann die Teilneutralisierung auch mit Kaliumhydroxid erfolgen [89]. Der resultierende Neutralisationsgrad entspricht dem Verhältnis zwischen Natriumcarboxylat-Gruppen und Carboxyl-Gruppen im Polymer. Für die Herstellung von superabsorbierenden Polymeren steht somit ein Gemisch aus Acrylsäure und Natriumacrylat zur Verfügung, welche in einer wässrigen Lösung copolymerisiert werden [90]. Im nächsten Schritt folgt die Zugabe von Vernetzungssubstanzen zur Monomerlösung. Durch diese Kernvernetzer werden die langkettigen Polymermoleküle untereinander durch chemische Brücken verbunden (Abb. 7-12). Dies bedingt, dass das entstehende dreidimensionale Netzwerk aus Polymerketten bei Wasserzutritt nicht ungehemmt aufquellen kann und somit bei voller Wasseraufnahme wasserunlöslich verbleibt [89]. Die Einleitung der Polymerisation kann dann sowohl über thermische Radikalstarter als auch durch Redoxradikalstarter erfolgen. Das Verfahren der Reaktion verläuft entweder diskontinuierlich im Rührkessel oder kontinuierlich auf Förderbandsystemen in einem Temperaturbereich von 50 bis 80 °C [88]. Aus der Reaktion folgt ein Hydrogel, welches zerkleinert und getrocknet wird. Das so erhaltene trockene Polymer wird anschließend auf die gewünschte Partikelgröße zerkleinert und luftdicht verpackt [88].



Abb. 7-12: Schematische Darstellung eines kovalent vernetzten Polymernetzwerks [88]

#### 7.3.2 Chemische Grundlagen

Allgemein können Gele als elastische Mischphasen eines Fluides und einer dreidimensionalen vernetzten Komponente definiert werden [91]. Polymere Gele enthalten natürliche oder synthetische Polymere, welche als sogenannte Gelbildner dienen [88]. Als Polymere werden im Allgemeinen chemische Verbindungen, bestehend aus verketteten oder verzweigten Molekülen gleichartiger Einheiten (Monomere) bezeichnet. Die Eigenschaften von Polymeren werden maßgeblich durch die Anzahl und Länge der Monomere bestimmt [92]. Der strukturelle Zustand eines Gels im Vergleich zu einer Lösung aus Makromolekülen besteht darin, dass sich im Gelzustand die verknäulten Polymerketten nicht mehr als Gesamtes bewegen können. Ihr Platz im dreidimensionalen Netzwerk ist fest und kann nicht mehr getauscht werden. Die Vernetzung der Polymerketten kann auf chemischer oder physikalischer Basis erfolgen (Abb. 7-13). Bei den in Abb. 7-13 dargestellten kovalenten Vernetzungspunkten handelt es sich im Vergleich zu den physikalischen Vernetzungspunkten, welche eine Art "Verschlaufung" der Polymerketten beschreiben, um feste, chemische Bindungen.



Abb. 7-13: Schematische Darstellung chemischer (a) und physikalischer (b) Netzwerke [88]

Sowohl bei den Polymernetzwerken mit chemischen als auch mit physikalischen Vernetzungspunkten entsteht ein endlos dreidimensionales System, welches wechselnde Größen und unregelmäßige Formen annehmen kann. Aus diesem vereinfachten Aufbau folgt die Eigenschaft, dass Gele nicht mehr wie Fluide fließen, sondern bei Einwirkung einer äußeren Kraft formändernd mit einer elastischen Rückstellkraft reagieren [88]. Druckbelastungen führen bei Gelen im Verhältnis zu Scherbeanspruchungen nur zu geringen Deformationen.

Ein großer Teil der hergestellten und auf dem Markt etablierten SAP werden auf Basis von Polyacrylsäure großtechnisch produziert [91]. Acrylsäure gehört zu der Gruppe der ungesättigten Carbonsäuren, welche in der Kohlenstoffkette eine oder mehrere Doppelbindungen enthalten. Diese Doppelbindungen sind Grundvoraussetzung für die Herstellung von SAP auf Basis der radikalen Polymerisation [90]. Für die Herstellung von Polymeren ist die Syntheseart der Polymerisation eine der wichtigsten Reaktionsarten, worin sich die Monomere in einer gleichschrittigen Reaktionsfolge (Kettenreaktion) über eben die reaktiven Doppelbindungen miteinander verbinden. Bei der Herstellung von SAP wird Acrylsäure zu Polyacrylsäure und Polyacrylat polymerisiert. Zur Initiation muss zunächst ein sogenannter Starter hinzugegeben werden, dessen Moleküle schnell zerfallen und Elektronen freigeben. Die ungepaarten Elektronen sind nun gewillt sich wieder zu Elektronenpaaren zu vereinen. Dabei werden die Doppelbindungen in der Acrylsäure genutzt, welche gute Elektronenlieferanten darstellen (Abb. 7-14).



Abb. 7-14: Initiationsreaktion mit Starter P zu einem Makroradikal (Z: Natriumcarboxylatgruppen und Carboxylgruppen) [90]

Da jedoch immer noch weitere ungepaarte Einzelelektronen vorhanden sind, reagiert das bei der Startreaktion gebildete Radikal weiter, was zu einer Kettenwachstumsreaktion führt (Abb. 7-15).

$$P-CH_{2}-\stackrel{H}{\overset{L}{\overset{}}}_{Z} + n H_{2}C=\stackrel{H}{\overset{}}_{Z} \longrightarrow P-CH_{2}-\stackrel{H}{\overset{}}_{Z} - CH_{2}-\stackrel{H}{\overset{}}_{Z} - CH_{2}-\stackrel{H}{\overset{}_{Z} - CH_{2}-\stackrel{H}{\overset{}}_{Z} - CH_{2}-\stackrel{H}{\overset{}_{Z} - CH_{2}-\stackrel$$

#### Abb. 7-15: Kettenwachstumsreaktion [90]

Die am häufigsten verwendete Möglichkeit, die Kettenwachstumsreaktion abzubrechen und die Reaktivität zu unterbinden, ist die Addition von zwei Makroradikalen (Abb. 7-16) oder alternativ die Addition von einem Starterradikal an ein Makroradikal [90].

Abb. 7-16: Kettenabbruchsreaktion durch Addition zweier Startradikale zu Polyacrylat [90]

Der Aufbau von dreidimensionalen Polyacrylat-Netzwerken kann während der Polymerisation oder nachträglich erfolgen [90]. Der Vernetzungsgrad ist dabei als ein wesentliches Charakteristikum eines dreidimensionalen Polymernetzwerk zu verstehen und bezeichnet den Stoffmengenanteil der vernetzten Monomereinheiten der insgesamt vorhandenen Monomereinheiten [90]. Die Vernetzung von Acrylsäure während der Polymerisation erfolgt in der Regel durch Copolymerisation. Darunter ist eine Polymerreaktion zu verstehen, bei der anstatt eines Monomers mehrere verschiedene Monomere verwendet werden. Als Vernetzer für Polyacrylate werden i.d.R. Ethylenglykoldimethacrylat oder Methylenbisacrylamid (MBA) in einem Konzentrationsbereich von 0,1 bis 2,0 Gew.-% verwendet [90, 93]. Da MBA selbst zwei acrylische Doppelbindungen enthält, wird dieses bei der Polymerisation von Acrylsäure von dessen Zwischenprodukt, dem Makroradikal angegriffen, was zur Entstehung eines Copolymeres in Form eines dreidimensionalen Netzwerks führt (Abb. 7-17) [90, 93]. Die resultierende Netzwerkstruktur ermöglicht den SAP das Vielfache ihres eigenen Volumens an Wasser aufzunehmen, ohne dabei in Lösung zu gehen.



Abb. 7-17: Entstehung des dreidimensionalen Netzwerkes durch Copolymerisation (modifiziert nach [90])

#### 7.3.3 Quellverhalten von SAP

Unter dem Begriff der Quellung ist ein Prozess zu verstehen, bei dem die Aufnahme eines Quellungsmittels durch ein Polymer unter Bildung eines Gels erfolgt. Der gequollene Körper behält dabei seine äußerliche Gestalt unter Zunahme der geometrischen Größe bei, kann aber sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften aufweisen [90, 94]. Der Aggregatzustand des Quellungsmittels kann dabei beliebig sein [94]. Da jedoch der Einsatz von SAP als aktivierende Komponente für Ringspaltverfüllmaterialien vorgesehen ist, wird im Nachfolgenden nur der flüssige Aggregatzustand des Quellmittels betrachtet. Das vom SAP absorbierte Wasser liegt in den zwischenmolekularen Hohlräumen des Gels ebenfalls im flüssigen Aggregatzustand vor, sodass diese Gele auch als flüssige visko-elastische Mischphasen bzw. Hydrogele bezeichnet werden [90]. Der Zusammenhalt und die Elastizität des gequollenen Gels werden durch die dreidimensional vernetzte Struktur der Molekülketten erzielt. Die Vernetzung verhindert das Auflösen des Polymers in einem Überschuss an Quellmittel, wodurch gleichzeitig die Dehnbarkeit des Netzwerkes begrenzt wird. Die Vernetzung in einem SAP liegt ungeordnet vor, was ein isotropes Quellen bedingt und zudem bewirkt, dass das gequollene Gel die gleiche Form beibehält wie im trockenen Zustand (Abb. 7-18). Diese Eigenschaft beruht auf dem Verhalten, dass sich die Polymerketten bei der Quellung ausdehnen und sich die Vernetzungsstellen gleichermaßen voneinander in alle Richtungen entfernen. Es stellt sich eine affine Deformation bezüglich der Vernetzungsstellen ein [90, 94].



Abb. 7-18: Schematische Darstellung des Quellvorgangs eines SAP in Wasser (modifiziert nach [95])

Bei der Neutralisierung mit beispielsweise einer Natriumhydroxid-Lösung werden die negativen Ladungen an der Carboxylgruppe durch positiv geladene Natrium-Ionen neutralisiert. Bei Kontakt von Wasser und SAP dringen aufgrund der hydrophilen Eigenschaften des Polymerrückgrads (Carboxylsäuregruppen (-COOH)) Wassermoleküle in das Polymer ein [89]. Die Natrium-Ionen werden hydratisiert, was deren Anziehungskraft auf die Carboxylat-Ionen reduziert. Die Natrium-Ionen verbleiben, aufgrund der bestehenden schwachen Anziehung durch die Carboxylgruppen im Netzwerk, was zu dem osmotischen Druck beiträgt [89]. Durch den osmotischen Druck werden weitere Wassermoleküle eingesogen, was zu einem Aufquellen des Polymers und schließlich zu einem definierten Wasseraufnahmevermögen der SAP führt (Abb. 7-18). Grundlegend sind das Wasseraufnahmevermögen der SAP und die Wasseraufnahmegeschwindigkeit von dem osmotischen Druck

im Gesamtsystem "SAP und Quellmittel" abhängig. Bei Verwendung von salzhaltigen Quellmitteln, wie z.B. Natriumchlorid(NaCl)-Lösungen kann es, aufgrund des geminderten osmotischen Druckes, zu einer Reduktion des Wasseraufnahmevermögens bzw. des Quellungsgrades des SAP kommen. Zudem kann infolge eines Eindringens von Kationen aus dem Quellungsmittel in das Gel eine Abschirmung der Anionen des Polyacrylates erfolgen, was eine Reduktion der elektrostatischen Abstoßung und somit auch des Wasseraufnahmevermögens bedingen kann [90]. Je höher der Neutralisierungsgrad bzw. die Konzentration an Gegenionen im SAP ist, umso höher ist der Widerstand gegen ein Eindringen der Kationen aus dem Umgebungsfluid in das Polymer und umso größer ist das Aufnahmevermögen an Quellmittel (Abb. 7-19, rechts) [96]. Zudem wird ersichtlich, dass mit einer steigenden NaCl-Konzentration im Quellmittel eine Reduktion des Wasseraufnahmevermögens einhergeht. In Abb. 7-19 sind neben den Untersuchungen aus [96] auch vorgreifend eigene Untersuchungen an dem SAP 1 (vgl. Kapitel 10.1.1, Tab. 10-1) zum Einfluss einer zunehmenden NaCl-Konzentration des Quellmittels auf das Wasseraufnahmevermögen dargestellt. Mit steigender NaCl-Konzentration im Quellmittel kam es zu einer Abnahme des Wasseraufnahmevermögens (Abb. 7-19, links).



Abb. 7-19: Links: Einfluss der NaCl-Konzentration auf die zeitabhängige Wasseraufnahme von SAP. (Einzelwerte in Kapitel A-6.4.3, Tab. A-41). Rechts: Wasseraufnahmevermögen von SAP in Abhängigkeit des Neutralisationsgrades bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen aus [96]

Bei Verwendung von superabsorbierenden Polymeren in zementösen Systemen, wie zum Beispiel zur Verringerung des autogenen Schwindens in Hochleistungsbetonen [97], kann es durch die in der Porenlösung des Betons oder Mörtels vorliegenden Ionen zu einer Beeinflussung des Wasseraufnahmevermögens kommen. Hauptsächlich liegen in der Porenlösung zementöser Systeme Kalium- (K<sup>+</sup>), Natrium- (Na<sup>+</sup>), Sulfat- (SO4<sup>2-</sup>), Hydroxid- (OH<sup>-</sup>) und Calcium-Ionen (Ca<sup>2+</sup>) vor, wobei letztere nach [98] als primärer Faktor für eine Beeinflussung des Wasseraufnahmevermögens der SAP bestimmt wurden. Es kam hierbei im Rahmen von Untersuchungen an sieben SAP-Typen in einer alkalischen Ca<sup>2+</sup>-Lösung im Vergleich zu destilliertem Wasser zu geringeren Absorptionsfähigkeiten. Zum Teil konnte auch bei bestimmten SAP-Typen eine Abgabe des anfangs aufgenommenen Quellungsmittels beobachtet werden. Weiterhin wurde aufgezeigt, dass das Wasseraufnahmevermögen bei Verwendung einer alkalischen Lösung, in dem Fall einer Kaliumhydroxid-Lösung mit einem pH-Wert von 12,2 grundsätzlich signifikant reduziert wird [98].

# 8 Untersuchungen an einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel

Innerhalb dieser Arbeit wurde eine praxisorientierte Zusammensetzung eines Zwei-Komponenten-Mörtels festgelegt und hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften und dazugehöriger Anforderungen eines aktivierten Ringspaltverfüllmaterials untersucht. Dabei wurden typische Richtwerte an die Frisch- und Festmörteleigenschaften berücksichtigt (vgl. Tab. 5-1 und Tab. 5-2). In diesem Zuge sind Prüfverfahren entwickelt oder bestehende Prüfmethoden adaptiert worden. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als materialtechnologische Bezugsgrößen für die Konzepte und liefern einen ersten Ansatz einer Prüfmethodik zur Erfassung wesentlicher Eigenschaften aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien (vgl. Anhang, Kapitel A-2). Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und insbesondere im Rahmen der Festigkeitsentwicklung (Gelzeit-Frühfestigkeit/Scherfestigkeit-Druckfestigkeit/Steifigkeit) zu bautechnisch relevanten Zeitpunkten kann hierauf aufbauend eine Beurteilung der Materialkonzepte auf materialtechnologischer Ebene erfolgen. Hinzukommend kann im Rahmen der Verpressversuche ein Vergleich auf verfahrenstechnischer Ebene vollzogen werden. Innerhalb der Untersuchungen am Basismörtel werden zudem die verwendeten Prüfmethoden erläutert sowie die eingesetzten Prüfgeräte beschrieben. Diese Prüfmethoden kommen folglich auch innerhalb der experimentellen Untersuchungen bei den Materialkonzepten zum Einsatz. Teile der in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse sind auch in [99-101] veröffentlicht.

### 8.1 Zusammensetzung des Basismörtels

Der Basismörtel (Kurzbezeichnung "M0") entspricht praxisüblichen Zwei-Komponenten-Mörteln und bildet somit den Stand der Technik ab. Die Zusammensetzung des Basismörtels ist in Tab. 8-1 dokumentiert. Ebenfalls sind dort minimale und maximale Zugabemengen der üblicherweise eingesetzten Ausgangsstoffe auf Basis der in Tab. 3-5 betrachteten Zwei-Komponenten-Mörtel angegeben. Die Zusammensetzung des Basismörtels ist im Anhang in Kapitel A-6.1, Tab. A-2 dokumentiert.

	Komponente A				Komponente B
	Wasser	Bentonit	Zement	Verzögerer	Aktivator
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[l/m³]
Min.	730	25	200	1,0	37
Basismörtel M0	836	30	250	6,3	66
Max.	870	78	482	7,0	120

Tab. 8-1:Zusammensetzung des Basismörtels M0 (klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel) und praxis-<br/>bezogene Minima und Maxima üblicherweise eingesetzter Ausgangsstoffe

Als Bindemittel wurde ein Portlandzement (CEM I) der Festigkeitsklasse 42,5 R eingesetzt. Der Wasserzementwert beträgt 3,3. Zur Stabilisierung der Komponente A wurde ein Aktiv-Natriumbentonit verwendet. Die Verarbeitbarkeitszeit wurde durch einen Langzeitverzögerer auf Phosphonsäurebasis sichergestellt. Als Aktivator (Komponente B) wurde ein Natrium-Wasserglas mit

einem pH-Wert von 11,4 und einer Molverhältniszahl (MVZ) von 3,4 eingesetzt. Der Gehalt des Aktivators wurde zu 90 kg/m<sup>3</sup> bzw. 66 l/m<sup>3</sup> (rd. 7 Vol.-% bezogen auf die Komponente A) gewählt.

### 8.2 Herstellung und Lagerung

Für die Herstellung des Bereitstellungsgemisches (Komponente A) wurde in einem ersten Schritt die Bentonitsuspension, bestehend aus der jeweiligen Menge Bentonit und dem gesamten Zugabewasser hergestellt (Abb. 8-1). Dabei wurde zunächst mit einem hochtourigen Labor-Rührwerk mit Dispergieraufsatz das Bentonit zwei Minuten bei 2000 U/min im Wasser suspendiert. Anschließend erfolgte ein dreiminütiges Dispergieren bei 3000 U/min. Die Bentonit-Suspension wurde grundsätzlich mindestens 24 Stunden bis zur Herstellung der endgültigen Komponente A luftdicht in Eimern bei 20°C gelagert, um einen vollständigen Quellvorgang des Bentonits zu ermöglichen [102]. Bei der Bestimmung der Fließeigenschaften über mehrere Tage kann somit der Einfluss einer zeitabhängigen Viskositätsänderung durch einen voranschreitenden Quellprozess des Bentonites ausgeschlossen werden.



Abb. 8-1: Herstellung der Bentonitsuspension. V.l.n.r.: Dispergiergerät; Suspendierung (2000 U/min); Dispergierung (3000 U/min)

Für die Herstellung der Komponente A wurde die zuvor angesetzte Bentonit-Suspension nach 24 Stunden erneut eine Minute bei 2000 U/min mit dem Dispergiergerät aufgeschlossen. In die Bentonitsuspension wurde nachfolgend der Verzögerer zugegeben und mit einem Handrührgerät (Doppelquirl) 30 Sekunden gemischt. Anschließend erfolgte die Zugabe des Zementes mit einer Einmischzeit von mindestens 60 Sekunden, wobei darauf zu achten war, dass keine Agglomerate mehr vorhanden waren und eine homogene Komponente A vorlag. Dieses Mischregime kam bei allen in dieser Arbeit hergestellten Zwei-Komponenten-Mörteln zum Einsatz.

Im Zuge der Ringspaltverpressung wird die Komponente B unter Druck in den Volumenstrom der Komponente A injiziert. Dies ermöglicht eine vollständige Durchmischung beider Komponenten und somit homogene Materialeigenschaften des aktivierten Mörtels im Ringspalt. Dieser Vorgang muss bei den Laborprüfungen nachgestellt und die homogene Durchmischung beider Komponenten bei der Herstellung von Laborproben sichergestellt sein. Im Rahmen von Voruntersuchungen hat sich hierbei ein händisches Vermischen der beiden Komponenten als geeignet herausgestellt (Abb. 8-2). Dabei wird je ein Messbecher mit der entsprechenden Menge der jeweiligen Komponenten plus einer Mehrmenge von rd. 15 % befüllt und diese dann durch mehrmaliges Umschütten

miteinander vermischt. Bei dieser Herstellmethode ist eine entsprechende Mehrmenge zur vollständigen Füllung der Schalung notwendig, da Anhaftungen des aktivierten Materials im Messbecher nicht auszuschließen sind.



Abb. 8-2: Probenherstellung eines Zwei-Komponenten-Mörtels im Labor (V.l.n.r.: Vermischen der beiden Komponenten, Befüllen der Schalung, Abziehen der Oberfläche)

Die Anzahl der einzelnen Mischvorgänge von Komponente A und B ist dabei abhängig von der Zusammensetzung des Zwei-Komponenten-Mörtels und dessen Gelierverhalten. Zur Validierung einer hinreichenden Durchmischung wurden dem Aktivator exemplarisch inerte Pigmente beigegeben. Anhand der homogenen Farbgebung des aktivierten Materials, aber auch an Teilstücken der Probe nach Prüfung der Druckfestigkeit konnte gezeigt werden, dass eine homogene Durchmischung beider Komponenten mithilfe des händischen Verfahrens erzielt werden kann [99]. Die Verwendung eines hochtourigen Dispergierers zur Vermischung der beiden Komponenten hat sich als nicht zielführend erwiesen, da durch die hohe Mischenergie die ersten gelbildenden Strukturen noch während der Zugabe des Aktivators zur Komponente A zerstört werden. Dies hat schlussendlich zu einer Festigkeitsminderung geführt. Zudem konnten keine geometrisch einheitlichen Prüfkörper hergestellt werden, da sich der aktivierte Zwei-Komponenten-Mörtel während des Herausnehmens des Rührwerks nicht mehr eigenständig nivelliert hat.

Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte grundsätzlich in Folie auf wassergesättigtem Sand in einem luftdicht verschließbaren Behälter bei 20±2 °C (Abb. 8-3). Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass es während der Lagerung auf Sand nicht zu Verformungen kommen kann, wie es bei einer Lagerung auf trapezförmigen Abstandshaltern bei frühen Ausschalzeitpunkten und entsprechender Verformbarkeit des Materials der Fall sein kann.



Abb. 8-3: Lagerung von Prüfkörpern aus aktiviertem Zwei-Komponenten-Mörtel auf saturiertem Sand (Proben: Ø: 100 mm, Höhe: 200 mm)

### 8.3 Verarbeitungsphase – Materialkennwerte vor Aktivierung

Zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit der Komponente A wurde die Marsh-Auslaufzeit  $t_{M,1000}$  mit dem Marsh-Trichter mit einem unteren Durchmesser von 4,76 mm nach DIN 4127 [53] bestimmt. Bei der Bestimmung der Fließeigenschaften der Komponente A des Zwei-Komponenten-Mörtels für das Sao Paulo Metro Line 4 Projekt sowie für das Saint-Martin-La-Porte TBM job-site at Lyon-Turin-Projekt wurden ebenfalls Marsh-Trichter mit einem unteren Durchmesser der Öffnung von 4,76 mm verwendet [43, 47]. Die Ergebnisse der Marsh-Auslaufzeiten des Basismörtels M0 über einen Zeitraum von 72 Stunden sind in Abb. 8-4 dargestellt. Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-14 dokumentiert.



Abb. 8-4: Marsh-Auslaufzeiten des Basismörtels M0 über 72 Stunden

Die Verarbeitbarkeit des Mörtels lag bis ca. 60 Stunden nach Herstellung im günstigen Bereich der Marsh-Auslaufzeit von 30 bis 45 Sekunden (Abb. 8-4). Danach fand ein steiler Anstieg der Marsh-Auslaufzeit statt, wobei nach 72 Stunden eine Überschreitung des Zielbereiches von rd. 10 % stattgefunden hat.

Zur Überprüfung der Sedimentationsstabilität der Komponente A wurde die Menge des abgesonderten Wassers, im Folgenden als Blutwasser bezeichnet, in Anlehnung an [55] bestimmt (vgl. Kapitel 6.1.2). Dabei wurde die abgesonderte Wassermenge der ruhenden Komponente A nach 4, 6, 24 und 48 Stunden erfasst. Hierzu wurde eine definierte Menge der Suspension (rd. 500 ml) in einen luftdicht verschließbaren Standzylinder eingefüllt. Das Prüfgefäß wurde vibrationsfrei bei konstanter Temperatur von 20±2°C gelagert. Zu den vorgegebenen Prüfzeitpunkten wurde das aufstehende Wasser mit einer Pipette aufgenommen und gewogen. Das abgenommene Blutwasser wurde anschließend wieder zurück in den Prüfbehälter gegeben. Die an der Komponente A ermittelte Blutwassermenge über einen Zeitraum von 48 Stunden ist in Abb. 8-5 dargestellt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-15 dokumentiert.



Abb. 8-5: Sedimentationsstabilität bzw. Blutwassermenge des Basismörtels über 48 Stunden

Die Blutwassermenge der Komponente A (Abb. 8-5) stieg innerhalb der ersten 6 Stunden rasch an, lag aber auch noch nach 4 Stunden unter dem Grenzwert von 3% nach 3 Stunden [15] gemäß Tab. 5-1. Der Richtwert von 4 % nach 24 Stunden gemäß [47] wurde hingegen um rd. 1,5 M.-% überschritten. Mit zunehmender Zeit bis 48 Stunden nach Herstellung nahm die Blutwassermenge nicht nennenswert zu.

Bei den Untersuchungen zu der Verarbeitbarkeit im Labor ist zu beachten, dass das Material keinem Pumpvorgang unterzogen wurde und nicht, wie auf der Tunnelvortriebsmaschine üblich, in einem Mischtank vorgehalten wurde, sondern kurz vor jeder Probennahme und grundsätzlich einmal am Tag für zwei Minuten aufgemischt wurde, ansonsten aber in Ruhe verblieb. Es ist davon auszugehen, dass bei einer ruhenden Vorhaltung im Labor, Strukturen entstehen, primär bedingt durch die thixotropen Eigenschaften des Bentonits und geringfügig durch die anfängliche Hydratation des Zementes, welche sich nachteilig auf die Marsh-Auslaufzeit auswirken können. Zudem ist die Gesamtmischintensität des Materials im Vergleich zur baupraktischen Handhabung und den dort stattfindenden Pumpvorgängen geringer, was sich negativ auf die Sedimentationsstabilität auswirken kann.

# 8.4 Erhärtungsphase – Materialkennwerte nach Aktivierung

### 8.4.1 Gelierung

Zur Bestimmung der Gelzeit von Zwei-Komponenten-Mörteln wurden innerhalb dieser Arbeit zwei separate Ansätze betrachtet. Zum einen wurde erprobt, den Gelierungsprozess durch eine Drehmomentmessung in dem aktivierten Material zu erfassen. Alternativ dazu wurde ein Versuchsstand entwickelt, der den Mischvorgang von Zwei-Komponenten-Mörteln nachbildet. Durch ein Ausfließen des aktivierten Materials in einen Trichter mit definierter Austrittsöffnung und dem durch die einsetzende Gelierung abreißenden Volumenstrom kann die Gelzeit quantifiziert werden.

### Drehmomenterfassung zur Bestimmung der Gelzeit

Im Rahmen des ersten Ansatzes zur Erfassung der Gelzeit durch eine Drehmomentmessung wurde ein Laborrührwerk mit elektrischer Drehmomentaufzeichnung und Dissolverscheibe verwendet (Abb. 8-6, links). Durch diese Messmethode mit einer entsprechend feinen Messwerterfassung können kleinste Veränderungen des Drehmomentes aufgezeichnet und somit ein Gelierverhalten bestimmt werden. Das Dispergiergerät wurde dabei mittig in die Komponente A eingetaucht und eine konstante Drehzahl von 150 U/min eingestellt. Bei konstantem Drehmoment wurde nach rd. 50 Sekunden der Aktivator in einem Zeitfenster von 10 Sekunden hinzugegeben und das Drehmoment aufgezeichnet. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde ebenfalls der Einfluss des Alters von Komponente A auf die Gelzeit betrachtet. In Abb. 8-6, Mitte und rechts sind Proben des Basismörtels M0 nach Versuchsende mit einem Alter von 24 und 48 Stunden bei einem Aktivatorgehalt von 120 kg/m<sup>3</sup> dargestellt.



Abb. 8-6: Links: Dispergiergerät mit Drehmomenterfassung zur Bestimmung der Viskositätsänderung eines Zwei-Komponenten-Mörtels nach Aktivierung. Mitte, rechts: Proben mit unterschiedlichen Altern (Mitte: 24 h; Rechts: 48 h) der Komponente A nach Aktivierung und Messvorgang

Die Drehmomententwicklung des Basismörtels mit unterschiedlichen Altern (0, 24 und 48 Stunden) mit jeweils Aktivatorgehalten von 70, 90 und 120 kg/m<sup>3</sup> sind in Abb. 8-7 dargestellt. Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-16 dokumentiert. An den Ergebnissen wird grundsätzlich deutlich, dass es nach Aktivatorzugabe zu einem rapiden Anstieg des Drehmomentes kam. Der Zeitraum von Zugabe des Aktivators bis zum Erreichen des maximalen Drehmomentes wurde hierbei als Gelzeit definiert.


Abb. 8-7: Bestimmung der Gelzeit über eine Drehmomenterfassung an dem Basismörtel mit unterschiedlichen Mörtelaltern und variablen Aktivatorgehalten

Entgegen den Erwartungen führte eine erhöhte Aktivatormenge unmittelbar nach Herstellung zu höheren Drehmomenten (Abb. 8-7). Die maximalen Drehmomente wurden bei allen Kombinationen in einem Zeitraum von 8 bis 12 Sekunden erreicht. Mit zunehmendem Alter der Komponente A nahmen die maximalen Drehmomente bei den jeweiligen Aktivatorgehalten tendenziell ab. Besonderheit ist, dass es nach dem Erreichen des Maximalwertes zu einer starken Abnahme des Drehmomentes kam. Es kann vermutet werden, dass durch die fortwährend eingebrachte Scherenergie des Rührwerks die entstandenen Strukturen zunehmend zerstört wurden. Die zunehmenden Drehmomente ab ca. 900 Sekunden nach Aktivierung lassen auf eine erneute Strukturentwicklung schließen (Abb. 8-7). Ein gesteigerter Aktivatorgehalt führte hierbei zu höheren Drehmomenten. Bei genauer Betrachtung der Drehmomententwicklung innerhalb der ersten 15 Sekunden nach Zugabe des Aktivators (Abb. 8-8), lassen sich die Gelzeiten abschätzen. Dabei konnte jedoch keine zwingende Korrelation zwischen den unterschiedlichen Aktivatorgehalten und den erreichten Gelzeiten identifiziert werden.



Abb. 8-8: Links: Gelzeit des Basismörtels M0 mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten unmittelbar nach Herstellung. Rechts: Einfluss des Alters der Komponente A auf die Gelzeit

Die Zeiten bis zu dem maximalen Drehmoment, was in dieser Betrachtung dem Erreichen des Gelzustandes entspricht, lagen bei den betrachteten Aktivatorgehalten zwischen rd. 8 und 10 Sekunden (Abb. 8-8, links). Dies entspricht grundsätzlich dem Bereich der zu erwartenden Gelzeiten. Eine Abhängigkeit der Aktivatormenge und der resultierenden Gelzeit konnte auf Basis der Drehmomententwicklung nicht eindeutig identifiziert werden. Die Mörtel mit 90 und 120 kg/m<sup>3</sup> lagen mit deren Gelzeiten bei einer Prüfung unmittelbar nach Herstellung (Mörtelalter: 0 h) gleich auf. Mit zunehmendem Aktivatorgehalt stieg das Drehmoment (Höhe des ersten Peaks) in gleichem Zeitfenster stärker an, was auf eine ausgeprägtere Strukturbildung zurückzuführen ist. Anhand der Verläufe der Drehmomente des Basismörtels mit einem konstanten Aktivatorgehalt von 70 kg/m<sup>3</sup> aber unterschiedlichen Altern der Komponente A (Abb. 8-8, rechts) wird deutlich, dass mit zunehmendem Mörtelalter eine verzögerte Gelierung einherging. Hier ist anzunehmen, dass durch die Bildung von Hydratphasen während der Lagerung des Bereitstellungsgemisches mit steigendem Alter die Aktivierung des Bindemittels zunehmend gehemmt wurde.

#### Neuentwickelte Prüfmethode zur Bestimmung der Gelzeit

Alternativ zur Drehmomenterfassung wurde zur einfacheren und gegebenenfalls baustellentauglichen Bestimmung der Gelzeit ein Prüfverfahren entwickelt (Abb. 8-9). Hierbei findet die Aktivierung des Zwei-Komponenten-Materials in einer vertikal angeordneten Mischvorrichtung statt. Die Komponenten A und B werden in zwei voneinander getrennten und durch Kugelhähne verschlossenen Kammern vorgehalten. Durch Öffnen der Kugelhähne erfolgt das Zusammentreffen der Komponenten und anschließend deren Homogenisierung in dem darunter angeordneten Statikmischer. Die Kugelhähne sind durch eine Koppelstange verbunden und öffnen durch Betätigung des Hebels zeitversetzt, was durch ein Langloch am oberen Hebel und somit verzögertem Kraftschluss realisiert wurde (Abb. 8-9, rechts). Dies führt dazu, dass die Komponente A zuerst auf den Aktivator trifft und so die beiden Materialien zeitgleich die Mischstrecke passieren. Der somit vollständig vermischte Zwei-Komponenten-Mörtel trifft anschließend in einen Trichter mit definierter Geometrie und Auslauföffnung (Durchmesser: 6 mm). Die Zeitmessung zur Bestimmung der Gelzeit beginnt mit dem Öffnen der Kugelhähne (vertikale Stellung des oberen Hebels) und endet mit dem Abreißen des Volumenstroms aus dem unten angeordneten Trichter. Eine detaillierte Beschreibung und Konstruktionszeichnungen des Prüfverfahrens sind im Anhang in Kapitel A-3 dokumentiert.



Abb. 8-9: Prüfmethode zur Bestimmung der Gelzeit von Zwei-Komponenten-Mörteln und Visualisierung des Mischprozesses von Mörtel (Komponente A: grün) und Aktivator (Komponente B: rot)

Wasser [kg]

836

819

853

**M0-Basismörtel** 

Gelzeit 2 - Mix 1 [58]

Gelzeit 2 - Mix 2 [58]

Die für den Basismörtel mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten ermittelten Gelzeiten bei Verwendung des zuvor beschriebenen Versuchsaufbaus sind in Abb. 8-10 dargestellt. Zu Vergleichszwecken sind zusätzlich aus der Literatur verfügbare Gelzeiten aufgeführt. Die dazugehörigen Zusammensetzungen sind in Tab. 8-2 angegeben. Die Zusammensetzung des Mörtels der Kurve "Gelzeit 1" war in der Literatur nicht dokumentiert [47].

 Tab. 8-2:
 Zur Bestimmung der Gelzeit herangezogener Zwei-Komponenten-Mörtel (Basismörtel M0) und Zusammensetzungen der Zwei-Komponenten-Mörtel bei bekannten Gelzeiten aus der Literatur

 Ausgangsstoffe je m³

Zement [kg]

250

230

230

Verzögerer [1]

6,25

5

3

Bentonit [kg]

30

28

30

Neben den experimentellen Ergebnissen und denen aus der Literatur sind in Abb. 8-10 zusätzlich
die in der Literatur benannten Richtwerte für die Gelzeit aufgeführt (Tab. 5-2). Die Ergebnisse
zeigen im Vergleich zu den Literaturwerten, dass mit diesem Versuchsaufbau bei ähnlicher Mör-
telzusammensetzung vergleichbare Gelzeiten bestimmt werden können. Die Einzelergebnisse des
Basismörtels M0 sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-17 dokumentiert.

Die Gelzeiten des Basismörtels lagen bei Aktivatorgehalten von 70 bis 120 kg/m<sup>3</sup> im Bereich zwischen 6 und 12 Sekunden. Zudem stimmt der Verlauf der ermittelten Gelzeiten mit der aus der Literatur bekannten Abhängigkeit zwischen Aktivatorgehalt und Gelzeit überein (vgl. Kapitel 6.2.1). So zeigt sich bei dem Basismörtel M0, dass es mit abnehmendem Aktivatorgehalt zu einer Verkürzung der Gelzeit kam. Mit einem Aktivatorgehalt von 70 kg/m<sup>3</sup> (rd. 5,5 Vol.-% bezogen auf Komponente A) wurde eine Gelzeit von rd. 7,5 Sekunden bestimmt. Bei einem typischen Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> (rd. 7 Vol.-%/Komp. A) wurde eine Gelzeit von rd. 9,5 Sekunden ermittelt. Mit steigendem Aktivatorgehalt kam es zu einer stetig zunehmenden Gelzeit. Bei einem Aktivatorgehalt von 120 kg/m<sup>3</sup> (9,4 Vol.-%/Komp. A) lag die Gelzeit bei rd. 12 Sekunden.



Abb. 8-10: Gelzeiten des Basismörtels M0 bei unterschiedlichen Aktivatorgehalten und Vergleich zur Literatur (Gelzeit 1: [47], Gelzeit 2: Mix 1 und Mix 2 [58])

Aktivator [1]

66

90

60

# 8.4.2 Erosionswiderstand

Bei fließendem Grundwasser bzw. bei Wasserzutritt in den Ringspalt, müssen die Aktivierung des Mörtels und die dadurch bedingte Gelierung innerhalb kürzester Zeit zu einem erosionsstabilen, nicht auswaschbaren Ringspaltverfüllmaterial führen. Zur Ermittlung des Erosionswiderstands eines aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels wurde daher das Ausspülverfahren (Abb. 8-11) gemäß [103] verwendet. Bei diesem Verfahren werden rd. 2.000 g des zu prüfenden Materials in einen Siebkorb mit definierten Abmessungen eingefüllt. Der Korb wurde an der Versuchsapparatur befestigt und im freien Fall durch eine geometrisch definierte Wassersäule geführt. Anschließend wurde ein Ausgleichsgewicht mit einer Masse von 2,7 kg befestigt, um den Siebkorb unter definierter Geschwindigkeit in der Wassersäule wieder nach oben zu ziehen. Dieser Vorgang wurde dreimal wiederholt. Nach Beendigung der Prüfung wurde die Masse der verbleibenden Probe im Korb gewogen und so der Masseverlust durch Auswaschen (Erosion) bestimmt.



Abb. 8-11: Prüfeinrichtung zur Bestimmung des Erosionswiderstandes (Maße in mm) [103]

An dem Basismörtel mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> (rd. 7 Vol.-% bezogen auf die Komponente A) wurde der Erosionswiderstand mit dem Ausspülverfahren bestimmt. Die Prüfung erfolgte 2 Minuten nach Vermischen von Komponente A und B. Eine fotografische Dokumentation der Probe vor der Versuchsdurchführung, der Prüfung selber und der Probe nach Versuchsende ist in Abb. 8-12 gezeigt.



Abb. 8-12: Bestimmung des Erosionswiderstands eines Zwei-Komponenten-Mörtels mit dem Ausspülverfahren nach [103]

Die Wägung der Probe wurde 10 Minuten nach Versuchsende vorgenommen. Die Ermittlung des Masseverlustes erfolgte gemäß [103] durch Differenzbildung der Probenmassen vor und nach Versuchsdurchführung. Insgesamt wurden drei separate Prüfungen durchgeführt. Der Masseverlust als arithmetisches Mittel ergibt sich zu 0,18 M.-%. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-18 dokumentiert. Der Erosionswiderstand des Basismörtels bestätigt sich auch indirekt an dem nicht getrübten Wasser in der Säule des Ausspülversuches (Abb. 8-12, Mitte).

# 8.4.3 Frühfestigkeit

Um die anfängliche Strukturentwicklung und somit die ersten (Früh-)Festigkeiten des ungestörten Zwei-Komponenten-Mörtels bis zu einer Stunde nach Aktivierung ermitteln zu können, wurde der in [47] beschriebene Ansatz weitergeführt und das Nadelgerät nach Vicat gemäß DIN EN 196-3 [59] verwendet. Diese Messmethode wurde durch die Anordnung von Zusatzgewichten entsprechend der zu erwartenden Festigkeiten modifiziert. Auf Basis der formulierten Richtwerte hinsichtlich der Frühfestigkeitsentwicklung von 0,05 bis 0,1 N/mm<sup>2</sup> nach einer Stunde (Tab. 5-2 und Abb. 5-5) können durch den Einsatz von in Lastrichtung orientierten Zusatzgewichten, bei bekanntem Durchmesser (10 mm) und Gewicht (300 g) des Tauchstabes, auf den aktivierten Mörtel definierte Spannungen aufgebracht werden (Abb. 8-13). Hierbei wurde, wie auch in [23] zur Bestimmung des Abbindeverhaltens aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien, die Annahme getroffen, dass die jeweilige Spannung vom Mörtel aufnehmbar ist, wenn die sofortige Eindringtiefe des Stempels  $\leq$  1 mm beträgt. Als Prüfgefäß wurde eine runde Form mit einem Volumen von rd. 314 cm<sup>3</sup> verwendet. Die Aktivierung des Zwei-Komponenten-Mörtels erfolgte gemäß Kapitel 8.2. Nach einem händischen Mischvorgang (vgl. Abb. 8-2) der beiden Komponenten wurde das aktivierte Material direkt in das Prüfgefäß eingefüllt, was den Vorteil bot, dass die Probe nicht mehr bewegt werden musste. Somit konnten etwaige Schädigungen im jungen Alter durch Ausschalen oder Umlagerung bei dieser Prüfmethode ausgeschlossen werden. Je nach Material konnten in einem Prüfgefäß bis zu fünf separate Messstellen angeordnet werden. Das Prüfgefäß und die Messstellenanordnung sind im Anhang in Kapitel A-4, Abb. A-3 dargestellt.



Abb. 8-13: Links / Mitte: Modifikation des Nadelgerätes nach Vicat [59]. Rechts: Durch Zusatzgewichte resultierende vertikale Spannungen (Stempeldurchmesser: 10 mm; Masse der Stange und Anbauteile: 300 Gramm)

Die Prüfung begann unmittelbar nach Aktivierung mit einem Spannungsniveau von 0,04 N/mm<sup>2</sup> (ohne Zusatzgewicht, vgl. Abb. 8-13). Der Belastungsvorgang je Zusatzgewicht bzw. des dazugehörigen Spannungslevels wurde in zuvor definierten Zeitintervallen, welche sich an der zu erwartenden Festigkeitsentwicklung des aktivierten Materials orientieren, bis zum Unterschreiten der maximalen Eindringtiefe von 1,0 mm (Ablesegenauigkeit: 0,5mm) durchgeführt. Für jeden Belastungsvorgang wurde eine neue Messstelle gewählt. Nach Erreichen einer Eindringtiefe kleiner 1,0 mm wurde das Zusatzgewicht durch das nächst größere Zusatzgewicht ersetzt und die Prüfung wie zuvor beschrieben analog durchgeführt.

An dem Basismörtel wurde mit diesem Prüfverfahren der Einfluss variabler Aktivatorgehalte auf die Frühfestigkeitsentwicklung untersucht. Die Ergebnisse für unterschiedliche Aktivatorgehalte von 70 bis 110 kg/m<sup>3</sup> sind in Abb. 8-14 dargestellt. Die gewählten Aktivatormengen entsprechen üblichen, in der Praxis eingesetzten Gehalten (vgl. Tab. 3-5). Die Einzelwerte sind im Anhang, Kapitel A-6.4.1, Tab. A-19 dokumentiert.



Abb. 8-14: Frühfestigkeitsentwicklung des Basismörtels mit variablen Aktivatorgehalten

Bei dem Basismörtel M0 mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> fand innerhalb der ersten 45 Minuten ein nahezu linearer Festigkeitszuwachs bis auf rd. 0,07 N/mm<sup>2</sup> statt. Der untere Richtwert von 0,05 N/mm<sup>2</sup> (Tab. 5-2) wurde bereits nach 30 Minuten erfüllt. Darauf folgend nahm die Festigkeit deutlich zu und bis 50 Minuten nach Herstellung war bereits eine Spannung in Höhe von 0,14 N/mm<sup>2</sup> vom Mörtel aufnehmbar. Eine Erhöhung des Aktivatorgehaltes von 90 auf 110 kg/m<sup>3</sup> führte zu einer nur geringfügig rascher ablaufenden Frühfestigkeitsentwicklung. Eine Reduktion der Aktivatormenge von 90 auf 70 kg/m<sup>3</sup> besaß hingegen einen ausgeprägten Einfluss und führte zu einer verzögert ablaufenden Festigkeitsentwicklung. Die Mörtel mit 110 und 90 kg/m<sup>3</sup> erfüllten die Anforderungen an die Frühfestigkeit bereits nach rd. 30 Minuten, wohingegen der Mörtel mit 70 kg/m<sup>3</sup> erst nach rd. 50 Minuten den unteren Richtwert von 0,05 N/mm<sup>2</sup> erreichte. Der Richtwert von 0,1 N/mm<sup>2</sup> nach einer Stunde nach Aktivierung wurde bei einem Aktivatorgehalt von 70 kg/m<sup>3</sup> erst nach 85 Minuten erreicht. Zusammenfassend erweist sich diese Prüfmethode mit dem modifizierten Nadelgerät nach Vicat als vergleichsweise einfach und erlaubt eine reproduzierbare Quantifizierung der Frühfestigkeiten und somit auch einen qualitativen Vergleich sowohl variabler Aktivatorgehalte als auch unterschiedlicher Mörtelzusammensetzungen.

# 8.4.4 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeitsentwicklung des Basismörtels wurde im Rahmen der Laboruntersuchungen mit einem Flügelschergerät in Anlehnung an DIN 4094-4 [60] in einem Zeitraum von 25 bis 80 Minuten nach Aktivierung bestimmt. Die Scherflügel wurden dabei vorab in einer Schalung mit einer Kantenlänge von 100 mm positioniert und nicht nachträglich in das bereits aktivierte Material eingestochen. Dies hatte den Hintergrund, dass die Flügel nach dem Befüllen der Schalung vollständig im aktivierten Mörtel eingebettet waren, was eine Prüfung an einem ungestörten Material ermöglichte (Abb. 8-15). Bei einer anschließenden Betrachtung der Bruchflächen des geprüften Materials waren keine Lufteinschlüsse an oder unter den Flügeln infolge des von oben stattfindenden Befüllens der Schalung erkennbar.



Abb. 8-15: Prüfung der Scherfestigkeit aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel: V.l.n.r.: Modifizierter Scherflügel, Einbausituation der Scherflügel, Prüfaufbau mit eingefüllter Probe

Die Ergebnisse zur Scherfestigkeitsentwicklung des Basismörtels M0 nach Aktivierung mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten von 70, 90 und 110 kg/m<sup>3</sup> sind in Abb. 8-16 dargestellt. Je angegebenem Mittelwert wurden drei Einzelbestimmungen durchgeführt. Die Fehlerindikatoren geben dabei die maximale und minimale Abweichung vom Mittelwert an. Die Einzelergebnisse sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-20 dokumentiert. Die Anforderungen an die Scherfestigkeit von 2 kN/m<sup>2</sup> nach 30 Minuten wurden ab einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> (rd. 7 Vol.-%/Komp. A) erreicht. Darauffolgend war insbesondere bei einem Aktivatorgehalt von 110 kg/m<sup>3</sup> ein starker Anstieg der Scherfestigkeit zu verzeichnen. Mit einem Beschleunigergehalt von 70 kg/m<sup>3</sup> wurde der Richtwert der Scherfestigkeit von 2 kN/m<sup>2</sup> nach 35 Minuten erreicht.



Abb. 8-16: Scherfestigkeitsentwicklung des Basismörtels M0 mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten

### 8.4.5 Druckfestigkeit

Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [104]. Als Probekörper kamen Zylinder mit einer Höhe von 200 mm und einem Durchmesser von 100 mm zum Einsatz. Zur Erfassung der Druckfestigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Aktivatorgehalten im jungen Alter wurden als Prüfzeitpunkte innerhalb der ersten 24 Stunden nach Aktivierung 2, 4 und 6 Stunden gewählt. Danach erfolgte die Bestimmung der Druckfestigkeit nach 1, 2, 7, 14, 28, 56 und 90 Tagen. Die Druckfestigkeiten des Basismörtels M0 (Tab. 8-1) mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten sind für eine Zeitraum bis 24 Stunden in Abb. 8-17, links und für den Zeitraum bis 90 Tage in Abb. 8-17, rechts dargestellt. Die Fehlerindikatoren geben dabei die absolute maximale und minimale Abweichung vom Mittelwert an. Die Einzelergebnisse sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-21 dokumentiert. Die Zusammensetzungen des Basismörtels bei unterschiedlichen Ichen Aktivatorgehalten ist im Anhang in Kapitel A-6.1, Tab. A-3 aufgeführt.



Abb. 8-17: Druckfestigkeitsentwicklung des Basismörtels M0 mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten. Links: Frühfestigkeiten bis 24 Stunden nach Aktivierung. Rechts: Druckfestigkeitsentwicklung bis 90 Tage nach Aktivierung

Mit zunehmenden Aktivatorgehalt kam es ab einem Alter von rd. 6 Stunden grundsätzlich zu höheren Druckfestigkeiten. Bei der Prüfung nach 2 und 4 Stunden lagen die Druckfestigkeiten der Mörtel mit 90 und 110 kg/m<sup>3</sup> auf gleichem Niveau. Die Druckfestigkeit bei einem Aktivatorgehalt von 70 kg/m<sup>3</sup> war im Vergleich deutlich reduziert. Darauf folgend kam es bis 24 Stunden bei allen Aktivatorgehalten zu einer signifikanten Zunahme der Druckfestigkeit. Bei Betrachtung des Basismörtels mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> und dessen Festigkeiten bis 24 Stunden wird ersichtlich, dass bereits innerhalb dieses kurzen Zeitraumes ca. 50 % der Druckfestigkeit bezogen auf die 28-Tages-Druckfestigkeit erreicht wurde. In Summe kam es bis 7 Tage nach Aktivierung bei allen betrachteten Aktivatorgehalten zu der stärksten Festigkeitszunahme. Darauffolgend flachte die Druckfestigkeitszunahme ab und nahm nach 56 Tagen ein asymptotisches Verhalten an bzw. erreichte nahezu die Endfestigkeit. Die Anforderung einer Druckfestigkeit von 0,5 N/mm<sup>2</sup> nach 24 Stunden (vgl. Tab. 5-2) wurde bei allen hier betrachteten Aktivatorgehalten zwei-Komponenten-Mörteln, kann es mit zunehmender Zeit zu einem Festigkeitsverlust kommen [105]. Langzeituntersuchungen bzgl. der Druckfestigkeitsentwicklung bis rd. drei Jahre nach Aktivierung

sind in [27] aufgezeigt (vgl. Kapitel 9.2.1, Abb. 9-9). Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss von Aktivatoren mit unterschiedlichen Alkalitäten auf die Festigkeitsentwicklung des Basismörtels sind in Kapitel 9.2.1, Abb. 9-5 dargestellt. Ergänzende grundlegende Betrachtungen zum Schwindverhalten eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels und im Speziellen der Einfluss einer ungeschützten Lagerung auf das Prüfergebnis bei der Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit sind im Anhang in Kapitel A-3 dargelegt.

# 8.4.6 Steifigkeit

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Bettung der Tunnelröhre ist die Steifigkeitsentwicklung des Ringspaltverfüllmaterials sowohl im jungen Alter aber auch im Endzustand für die Dimensionierung und statisch-konstruktive Durchbildung des Tübbingausbaus von erheblicher Bedeutung. An dem Basismörtel mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten wurde in Anlehnung an DIN EN 12390-13 [106] der stabilisierte Elastizitätsmodul (E-Modul) nach Verfahren B an jeweils drei Zylindern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm bis 56 Tage nach Herstellung bestimmt (Abb. 8-18). Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-23 dokumentiert. Aufgrund der im Vergleich zu Normalbeton geringeren Festigkeiten von Zwei-Komponenten-Mörteln ist die untere Grenze der Vorbelastungsspannung von 0,5 N/mm<sup>2</sup> gemäß [106] insbesondere bei Prüfungen im jungen Alter nicht einzuhalten. Diese Spannung entspricht in etwa einem Drittel der Druckfestigkeit des Basismörtels M0 mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> nach 7 Tagen. Demnach wurde die untere Prüfspannung zu einem Zehntel der mittleren Druckfestigkeit zum jeweiligen Prüfzeitpunkt gewählt. Die obere Prüfspannung beträgt ein Drittel der Druckfestigkeit.



Abb. 8-18: Links: Statischer Elastizitätsmodul bis 56 Tage nach Aktivierung. Rechts: Versuchsaufbau zu Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls eines Zwei-Komponenten-Mörtels

Analog zur einaxialen Druckfestigkeit fand der stärkste Steifigkeitszuwachs in den ersten Tagen statt. Nach zwei Tagen betrug die Steifigkeit des Mörtels mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> bereits rd. 65 % bezogen auf die Steifigkeit nach 28 Tagen. Nach 56 Tagen betrug der Elastizitätsmodul rd. 800 N/mm<sup>2</sup>. Erhöhte oder reduzierte Aktivatorgehalte führten erwartungsgemäß zu einer Zunahme oder Abnahme der Steifigkeit im betrachteten Zeitraum von 7 bis 56 Tagen. Alternativ zu dem hier dargestellten Prüfverfahren kann die Steifigkeit des aktivierten Ringspaltverfüllmaterials in Form des Steifemoduls angegeben werden. In [58] wurde der Steifemodul eines Zwei-Komponenten-Mörtels bis 28 Tage nach Aktivierung bestimmt. Die Prüfung erfolgte dabei nach [107].

# 8.4.7 Gefügeentwicklung (REM-Aufnahmen)

In Abb. 8-19 sind Gefügeaufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) an Bruchstücken des Basismörtels M0 derselben Probe mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> nach 7 Tagen (links) und 16 Monaten (rechts) dargestellt. Anhand einer vergleichenden Gegenüberstellung der Aufnahmen wird ersichtlich, wie auch die Ergebnisse zur Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung vermuten lassen, dass bereits ab einem Alter von 7 Tagen die Strukturbildung festigkeitsrelevanter Hydratphasen zum Großteil abgeschlossen war. Anhand der REM-Aufnahmen des aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels nach einer Lagerungsdauer von 16 Monaten war keine signifikante Gefügeverdichtung durch neugebildete oder stärker vernetzte Hydratphasen erkennbar. Aufgrund des hohen Wasserzementwertes von rd. 3,3 verbleiben im System viele Poren.



Abb. 8-19: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen des Basismörtels M0: Links: Alter der Probe 7 Tage (Maβstab: 10 μm). Rechts: Alter der Probe 16 Monate (Maβstab: 20 μm).

# 8.5 Fazit

Basierend auf den Zusammensetzungen von Zwei-Komponenten-Mörteln, welche bei internationalen Tunnelprojekten zum Einsatz kamen (vgl. Tab. 3-5), wurde ein Basismörtel festgelegt und gemäß den aus der Literatur bekannten Anforderungen unter Berücksichtigung der dazugehörigen Richtwerte geprüft. Die gewonnenen Ergebnisse und materialtechnologischen Abhängigkeiten wurden im Rahmen der Entwicklung der Materialkonzepte in dieser Arbeit berücksichtigt. Neben dem Einsatz bestehender Prüfverfahren war es zur ganzheitlichen Erfassung der charakteristischen Eigenschaften des Zwei-Komponenten-Mörtels zudem notwendig solche zu modifizieren und auch Neuentwicklungen vorzunehmen. Daraus ergaben sich neue Prüfverfahren, wie beispielsweise zur Bestimmung der Gelzeit oder der Frühfestigkeit, welche einen Beitrag zur zeitlich-kontinuierlichen Erfassung der Festigkeitsentwicklung liefern können. Als ein wesentliches Kriterium bei der Konzeptionierung eines aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels konnte die Harmonisierung der Gelierung und Frühfestigkeitsentwicklung identifiziert werden. Diese Parameter stehen in direkter Wechselwirkung zueinander und können bei konstantem Bindemittelgehalt über den Aktivatorgehalt gesteuert werden. Eine rasch ablaufende Frühfestigkeitsentwicklung verlangt einen hohen Aktivatorgehalt. Gleichzeitig führt ein gesteigerter Aktivatorgehalt aber zu einer verlängerten Gelzeit. Diese reziproke Abhängigkeit ist in Abb. 8-20 dargestellt.



Abb. 8-20: Schematische Darstellung der Abhängigkeit zwischen der Gelzeit und Frühfestigkeit bei variablem Aktivatorgehalt

In Abb. 8-21 ist eine Gegenüberstellung der wesentlichen Materialcharakteristika des aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels in Abhängigkeit üblicher Aktivatorgehalte dargestellt. Dabei sind gemäß den charakteristischen Eigenschaften und den dazugehörigen Richtwerten entsprechende Zielbereiche angegeben. Als Bezugsgröße wurde die Gelzeit verwendet.



Abb. 8-21: Gegenüberstellung ausgewählter Festigkeitscharakteristika mit der Gelzeit des Basismörtels mit unterschiedlichen Aktivatorgehalten bei Angabe von Zielbereichen

Die Ergebnisse in Abb. 8-21 verdeutlichen, dass ein Aktivatorgehalt von rd. 90 kg/m<sup>3</sup> (66 l/m<sup>3</sup>) bei dem verwendeten Zwei-Komponenten-Mörtel zu einem günstigen Kompromiss zwischen der Gelzeit und der Frühfestigkeit und Scherfestigkeit sowie der Druckfestigkeit nach 24 Stunden führte. Ferner wird bei Betrachtung der Druckfestigkeiten nach 28 Tagen (Abb. 8-21, unten rechts) deutlich, dass diese trotz variabler Aktivatorgehalte und wesentlicher Unterschiede in deren Frühfestigkeitsentwicklung vergleichsweise eng beieinander und ausnahmslos im Zielbereich lagen. Dies lässt die Annahme zu, dass die Betrachtung der "Endfestigkeit" im Rahmen der Entwicklung eines aktivierten Ringspaltverfüllmaterials und dessen Zusammensetzung tendenziell von untergeordneter Bedeutung ist.

Auf Grundlage der an dem Basismörtel durchgeführten Untersuchungen und aus verfahrenstechnischer Sicht sind für eine erfolgreiche Ringspaltverfüllung mit Zwei-Komponenten-Mörteln die Verarbeitbarkeit (Fließfähigkeit, Sedimentationsstabilität) und das Gelierverhalten sowie die Frühfestigkeitsentwicklung (Scherfestigkeit und frühe Druckfestigkeit / Steifigkeit) nach Aktivierung wesentliche Kenngrößen. Die Erfassung der Frühfestigkeitsentwicklung (mod. Nadelgerät nach Vicat, Druckfestigkeiten bis 6 bzw. 24 Stunden) nach Aktivierung kann zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung als indirekter Kennwert herangezogen werden.

Die erweiterte Bestimmung der Materialeigenschaften wie beispielsweise der Druck- und Steifigkeitsentwicklung über die bautechnisch relevanten Zeitfenster hinaus, können ergänzende Erkenntnisse über das Strukturverhalten eines aktivierten Ringspaltverfüllmaterials liefern und sind aus dauerhaftigkeitstechnischer Sicht relevante Kennwerte. Spezifische Parameter im Rahmen der Dauerhaftigkeit sind hingegen separat und vor allem projektspezifisch zu erörtern. Unabhängig weiterer möglicher Variationen der Ausgangsstoffe und auf Basis des Einsatzgebietes der in dieser Arbeit betrachteten Materialkonzepte eignet sich dieser Basismörtel mit dessen Kennwerten als geeignete materialtechnologische Bezugsebene.

# 9 Untersuchungen zur alkalischen Aktivierung

# 9.1 Zementfreier, alkalisch aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel

Aufbauend auf den Betrachtungen und den Voruntersuchungen in Kapitel 7.2 und auf Grundlage der Zusammensetzung des Basismörtels M0 (Kapitel 8.1) wurden in einem ersten orientierenden Schritt zwei zementfreie Ringspaltverfüllmaterialien konzipiert. Die Zusammensetzung der Mörtel ist in Tab. 9-1 und detailliert im Anhang in Kapitel A-6.2.1, Tab. A-4 aufgeführt.

Komponente A						Komp. B.	w/b-
	Wasser	Bentonit	Zement	Hi	ittensand	Aktivator	Wert
	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	spez. Oberfläche cm²/g	l/m³	-
M0-Basismörtel	836	30	250	0	-	66	3,3
2KM_AAHS	853	30	0	250	4200	51	3,4
2KM_AAHS_red	815	30	0	319	6500	65	2,6

Tab. 9-1: Zusammensetzungen zementfreier Zwei-Komponenten-Mörtel mit Hüttensand als Bindemittel

Als Bindemittel kam hierbei Hüttensand zum Einsatz. Als Aktivator kam auf Basis der Untersuchungen in Kapitel 7.2.6, Abb. 7-10 eine Mischung aus Kalium-Wasserglas und einer Kaliumlauge mit einem prozentualen Verhältnis von 54:46 zum Einsatz. Folgend besitzt der Aktivator eine Molverhältniszahl von 0,5, welche im Rahmen der Untersuchungen an Normprismen die maximale Festigkeit lieferte.

Der Mörtel "2KM\_AAHS\_red" weist durch zeitgleiche Erhöhung des Bindemittelgehaltes bei Reduktion des Wassergehaltes einen reduzierten Wasserbindemittelwert (w/b-Wert) auf. Zudem kam hierbei ein Hüttensand mit erhöhter spezifischer Oberfläche nach Blaine wie auch eine geringfügig erhöhte Aktivatormenge zum Einsatz. Als Bentonit wurde ein Aktiv-Natriumbentonit verwendet und es kam kein Verzögerer zum Einsatz.

An den in Tab. 9-1 aufgezeigten Mörteln wurden die Druckfestigkeiten nach einem und sieben Tagen an je drei Einzelproben in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [104] bestimmt. Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-26 dokumentiert. Die Erhärtungsverläufe der gegenständlichen Mörtel zeigten signifikante Unterschiede. Der Mörtel 2KM\_AAHS\_red konnte nach 24 Stunden ausgeschalt und geprüft werden (Abb. 9-1, links). Der Mörtel 2KM\_AAHS mit einem höheren w/b-Wert von 3,4 und geringerem Aktivatorgehalt wies hingegen noch eine gelartige Konsistenz auf (Abb. 9-1, rechts).



Abb. 9-1: Links: Stabiler Mörtel "2KM\_AAHS\_red" nach 24 Stunden. Rechts: Unzureichende Gelierung und Erhärtung des Mörtels "2KM AAHS" nach 24 Stunden

Nach vier und sechs Stunden waren beide Mörtel noch fließfähig, eine rasche Gelierung und Frühfestigkeitsentwicklung hatte nicht stattgefunden. Bei dem Mörtel "2KM\_AAHS\_red" wurde nach 24 Stunden eine Druckfestigkeit von 0,7 N/mm<sup>2</sup> bestimmt. Diese liegt über den üblichen Anforderungen (Tab. 5-2) und im gleichen Größenbereich wie die Druckfestigkeit des Basismörtels M0 mit rd. 0,8 N/mm<sup>2</sup> (vgl. Abb. 8-17). Bei dem Mörtel "AAHS\_2KM" konnte nach 24 Stunden keine Druckfestigkeit bestimmt werden. Nach 7 Tagen besaß der hüttensandhaltige Mörtel "2KM\_AAHS\_red" mit 3,4 N/mm<sup>2</sup> eine rd. doppelt so hohe Druckfestigkeit im Vergleich zum Basismörtel M0. Der Hüttensand als alleiniges Bindemittel war folglich in der Lage ausreichend hohe Festigkeiten zu generieren. Nachteilig hingegen war die nicht oder nur geringfügig stattfindende Gelierung unmittelbar nach Aktivierung. Abb. 9-2 zeigt den Mörtel "2KM\_AAHS\_red" nach sechs Stunden und zum Vergleich den Basismörtel M0 nach ca. 30 Sekunden.



Abb. 9-2: Links: Gelierverhalten des zementfreien Mörtels "2KM\_AAHS\_red" mit Hüttensand als Bindemittel nach 6 Stunden. Rechts: Gelierzustand des Basismörtels M0 nach 30 Sekunden

Auf Basis der hier dargelegten, orientierenden Untersuchungen ergab sich die folgende Schlussfolgerung für aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien, deren Festigkeit innerhalb der Erhärtungsphase auf Grundlage der alkalischen Aktivierung von latent-hydraulischen oder puzzolanischen Stoffen erreicht werden soll:

Die alkalische Aktivierung eines Bindemittels auf ausschließlicher Basis latent-hydraulischer und/oder puzzolanischer Stoffe ist bei Ringspaltverfüllmaterialien auf Grundlage der Zusammensetzungen von Zwei-Komponenten-Mörteln und den zeitlich-kritischen Anforderungen an die Gelierung und Frühfestigkeit eingeschränkt. Die Gelierung muss folglich durch einen hoch-reaktiven Reaktionspartner (Gelierhilfe) im Bindemittel für den Aktivator sichergestellt werden, dessen Zugabemenge variabel gestaltet werden kann, ohne die Endfestigkeit signifikant zu beeinflussen. Die so von der Festigkeitsphase entkoppelte Gelphase kann dann einerseits über die Menge der Gelierhilfe, andererseits über die Art und den Gehalt des Aktivators beeinflusst und gesteuert werden. Eine weitere Reduktion des Wasserbindemittelwertes zur Begünstigung einer raschen Gelierung ist im Rahmen der Nutzung der logistischen Vorteile von Zwei-Komponenten-Mörteln wie beispielsweise die Mörtelversorgung der Tunnelvortriebsmaschine über Förderleitungen und den Anforderungen an die Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit nicht zielführend.

# 9.2 Verwendung von calciumbasierten Gelierhilfen

Zur Harmonisierung des Gelierverhaltens und der Frühfestigkeitsentwicklung respektive der unmittelbaren Bettung der Tunnelröhre, ist es notwendig, im System der Zwei-Komponenten-Mörtel einen Reaktionspartner bereitzustellen, welcher unmittelbar nach Aktivierung zu einer Strukturentwicklung führt und somit den Gelzustand einleitet. Der Phasenübergang vom flüssigen Zustand in den Gelzustand ist bei den zementösen bzw. calciumhaltigen Systemen, die durch Wassergläser aktiviert werden, vornehmlich auf die rasche Strukturentwicklung, infolge der Bildung von Calciumsilikaten zurückzuführen [108]. Bei einem zementfreien System fehlt in diesem Fall der freie Reaktionspartner Calcium, weshalb es zu einer nur unzureichenden bis keinen Gelierung kommt. Demzufolge ist eine entsprechende Calciumquelle bei Einsatz von Wasserglas als Aktivator zielführend. Dazu wurden zwei separate Ansätze betrachtet, mit dem gleichsamen Ziel, die anfängliche Gelierung des Mörtels über die Zugabe einer calciumbasierten Gelierhilfe sicherzustellen, die eigentliche Festigkeitsentwicklung aber über latent-hydraulische oder puzzolanische Stoffe zu gewährleisten. Teile der in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse sind auch in [100, 101, 109] veröffentlicht.

Zum einen wurde die Verwendung sogenannter hybrider Bindemittel, definiert als "Portlandzement + Alumosilikat + Alkalien" gemäß [65, 68, 72] fokussiert, bei welchen eine Kombination aus Portlandzement und latent-hydraulischen und/oder puzzolanischen Stoffen eingesetzt wird und diese durch Alkalisilikate (Wassergläser) angeregt werden (vgl. Kapitel 7.2). In diesem Fall wirkt der Portlandzement als Gelierhilfe für die anfängliche Reaktion mit dem Wasserglas und leitet den Gelzustand ein. Zum anderen wurde orientierend die Verwendung einer Calciumhydroxid-Suspension (Kalkmilch) als Gelierhilfe untersucht. In Kombination mit Wasserglas reagiert dabei das Calciumoxid des Calciumhydroxids mit dem Siliziumdioxid des Wasserglases zu Calciumsilikaten [108]. Diese rasch entstehenden Strukturen führen unmittelbar nach Aktivierung zu einer Gelierung des Materials. Die nachfolgenden experimentellen Untersuchungen zu dem Konzept der alkalischen Aktivierung beginnen mit der Wahl geeigneter Ausgangsstoffe für die Festigkeitsphase. Dies hat den Hintergrund, dass mit der Bestimmung geeigneter Zusatzstoffe auf Basis einer hinreichenden Druckfestigkeit nach 24 Stunden der Ansatz der entkoppelten Gelphase verfolgt werden kann und die Stoffmengen zur Erzielung der charakteristischen Eigenschaften ausgelotet werden können.

# 9.2.1 Hybride Bindemittel – Portlandzement als Gelierhilfe

#### 9.2.1.1 Ausgangsstoffe

Im Rahmen dieses Ansatzes wurde Portlandzement zu unterschiedlichen Anteilen mit latent-hydraulischen oder puzzolanischen Stoffen kombiniert, mit dem Ziel eine rasche Gelierung und Frühfestigkeit zu erhalten. Dabei stellen der Zement und dessen rasch ablaufende Reaktion mit einem Wasserglas den Gelzustand bzw. die unmittelbare Bettung der Tunnelröhre sicher, wohingegen die Festigkeiten für die dauerhafte Langzeitbettung durch die Zusatzstoffe, wie z.B. Hüttensand, gewährleistet werden. Aufbauend auf den Untersuchungen in Kapitel 7.2.6, Abb. 7-10 konnten neben der Verwendung einer Kali-Lauge zur Erhöhung der Alkalität des Aktivators im Rahmen orientierender Vorversuche auch bei Verwendung von reinem Natrium-Wasserglas bei einem gewissen Anteil an Zement im Bindemittel ausreichende Festigkeiten nach 24 Stunden generiert werden. Der durch die Kalilauge erzielte Festigkeitszuwachs (Abb. 7-10) war nur in einem eng begrenzten Bereich festigkeitssteigernd und bei den Anforderungen an die Endfestigkeiten im Bereich von 1 bis 3 N/mm<sup>2</sup> (siehe Tab. 5-2) nicht ausschlaggebend. Primär lag der Fokus auf der Harmonisierung des Gelierverhaltens und der Festigkeitsentwicklung. Auf Grundlage des Basismörtels M0 fanden aufbauend auf den Ergebnissen der zementfreien Mörtel weitere Modifikationen der Bindemittelzusammensetzung statt, mit dem Ziel eines größtmöglichen Anteils an Zusatzstoffen im Bindemittel und Begrenzung der hydraulischen Komponente auf die für die Gelphase notwendige Menge. Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Fokus zum einen auf die chemische Zusammensetzung der Zusatzstoffe gelegt, zum anderen aber auch deren physikalische Eigenschaften (spez. Oberfläche) mit in die Untersuchungen einbezogen. Neben den Hüttensanden (HS1, HS2) wurde ein hydraulisch aufbereiteter Betonzusatzstoff (hrB), ein Metakaolin (Meta) sowie eine Steinkohlenflugasche (FA) verwendet. Die für Strukturbildung primär relevanten chemischen und physikalischen Kennwerte der Ausgangsstoffe sind in Tab. 9-2 und Tab. 9-3 dargestellt. Eine ausführliche Übersicht der chemischen Zusammensetzung der Zusatzstoffe ist im Anhang in Kapitel A-1, Tab. A-1 dokumentiert. Die Partikelgrößenverteilung des Zementes und der Zusatzstoffe ist im Anhang in Kapitel A-1, Abb. A-1 dargestellt.

 Tab. 9-2:
 Chemische Zusammensetzung der verwendeten latent-hydraulischen und puzzolanischen Zusatzstoffe im Rahmen der alkalischen Aktivierung (\*Herstellerangaben)

		CEM I	Hütten-	Hütten-	hydraulisch aufberei-	Flug-	Meta-
		42,5 R	sand 1	sand 2	teter Betonzusatzstoff	asche	kaolin
		CEM	HS1	HS2	hrB	FA	Meta
CaO	M%	59,5	39,7	42,3	30-45*	4,4	2,9*
SiO <sub>2</sub>	M%	19,8	38,1	36,1	25-40*	51	53,6*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	M%	5,3	10,3	11,2	15-20*	24,9	29,2*

 

 Tab. 9-3:
 Physikalische Kennwerte der verwendeten latent-hydraulischen und puzzolanischen Zusatzstoffe im Rahmen der alkalischen Aktivierung (\*Herstellerangaben; ° Literaturangabe)

		CEM I 42,5 R	Hütten- sand 1	Hütten- sand 2	hydraulisch aufberei- teter Betonzusatzstoff	Flug- asche	Meta- kaolin
		CEM	HS1	HS2	hrB	FA	Meta
Spezifische Oberfläche	cm²/g	5052	5934	4731	4870	3894	3,5-9,5 m²/g*
Reindichte	kg/dm³	3,09	2,89	2,94	2,65	2,26	2,60°
	10%	0,47	1,38	2,15	1,03	2,33	~1,5*
Partikel-Ø	50%	8,62	5,53	10,3	8,13	9,14	~9*
լաույ	90%	35,21	20,76	31,23	26,82.	54,46	~27*

Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Aktivator systematisch variiert, um den Einfluss von unterschiedlichen Alkalitäten bzw. pH-Werten auf die Festigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels mit unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen zu eruieren. Als Basis diente dabei ein klassisches Natrium-Wasserglas, welches auch bei den Untersuchungen des Basismörtels (Kapitel 8) zum Einsatz kam. Hierbei wurde die chemische Zusammensetzung des Aktivators und dabei primär der Gehalt an Alkalien und somit der pH-Wert, durch Zugabe von Kalium-Wasserglas in zwei Schritten gemäß Tab. 9-4 variiert.

Molverhältniszahl (MVZ)	Natrium-/Kalium- Wasserglas	pH-Wert [-]	Dichte [kg/dm³]	SiO2 [M%]	M2O [M%]
2,2	50/50	13,3	1,44	24,7	15,6
2,6	70/30	13,4	1,41	25,8	12,7
3,4	100/0	11,4	1,37	27,5	8,3

 

 Tab. 9-4:
 Eingesetzte Aktivatoren für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen der alkalischen Aktivierung und Angabe der wesentlichen Kennwerte (pH-Wert, MVZ, SiO<sub>2</sub>- und M<sub>2</sub>O-Gehalt)

Im Rahmen der Aktivatorzusammensetzung wurden bewusst keine Laugen eingesetzt, da der Siliziumgehalt im Aktivator entsprechend hoch (> 20 %, vgl. Abb. 7-10) verbleiben sollte, um dem Bindemittel als Reaktionspartner für die Strukturbildung innerhalb der Gelphase zur Verfügung zu stehen. Durch die anteilige Verwendung von Kalium-Wasserglas und dessen erhöhte Menge an Alkalien im Vergleich zum Natrium-Wasserglas wird die Alkalität bzw. der pH-Wert bei verbleibend hohem Siliziumgehalt gesteigert (Abb. 9-3).



Abb. 9-3: Links: Gehalt an H<sub>2</sub>O, M<sub>2</sub>O und SiO<sub>2</sub> der verwendeten Aktivatorkonfigurationen. Rechts: Resultierende Molverhältniszahl (MVZ) der Aktivatoren für die alkalische Aktivierung

Diese Aktivatorkonfigurationen wurden gewählt, um praxisnahe und stabile Aktivatoren zu erhalten, welche keiner ausgeprägten Gefahr einer Kristallisation unterliegen und somit für den Bauablauf und eine lange Vorhaltung geeignet sind. Hochmodulige Natrium-Wassergläser (MVZ >2,0) sind generell als stabil gegenüber einer Kristallisation einzuordnen. Natriumsilikate mit einer  $MVZ \le 1,5$  neigen zu einer Kristallisation von Natriummetasilikat-Hydraten, wohingegen Natriumsilikatlösungen mit Molverhältniszahlen von 0,5 bis 1,0 sehr anfällig für eine solche Kristallisation sind [77].

### 9.2.1.2 Auswahl geeigneter Bindemittelkonfigurationen

Als Ausgangsbasis für die bindemitteltechnischen Untersuchungen wurde der zementfreie Mörtel "2KM\_AAHS\_red" (vgl. Tab. 9-1) herangezogen. Dieser Mörtel zeigte bei ausschließlicher Verwendung von Hüttensand eine zwar unzureichende Gelierung, zeitgleich aber eine anforderungsgerechte Druckfestigkeit nach 24 Stunden in Höhe von rd. 0,7 N/mm<sup>2</sup> (Basismörtel: 0,8 N/mm<sup>2</sup>). Der Gesamtbindemittelgehalt in Höhe von 319 kg/m<sup>3</sup> und der Wasser/Bindemittel-Wert von 2,6 wurden innerhalb der weiteren Untersuchungen auf konstantem Niveau gehalten. Der Aktivatorgehalt wurde gemäß den Untersuchungen in Abb. 7-10 zu 30,6 M.-% des Gesamtbindemittels (rd. 98 kg/m<sup>3</sup>) gewählt, auch um eine Vergleichbarkeit zu den üblichen Aktivatormengen praxiserprobter Zwei-Komponenten-Mörtel zu ermöglichen (Tab. 3-5). In Abhängigkeit der Aktivatorkonfigurationen beträgt deren volumetrischer Anteil zwischen 7,1 und 7,5 Vol.-% bezogen auf die Komponente A und liegt somit in der gleichen Größenordnung wie der Basismörtel M0 mit einem Aktivatorgehalt von rd. 7 Vol.-% bez. auf die Komponente A (vgl. Tab. 8-1). Die in diesem Kapitel verwendeten Mörtelzusammensetzungen sind im Anhang in Kapitel A-6.2.2 aufgeführt.

In Abb. 9-4 sind die Ergebnisse zu den Druckfestigkeiten nach 24 Stunden von bindemittelmodifizierten Zwei-Komponenten-Mörteln bei variablen Aktivatorkonfigurationen dargestellt. Die Prüfung erfolgte an zylindrischen Prüfkörpern (Ø: 100 mm, Höhe: 200 mm) nach [104]. Der Anteil an Portlandzement im Gesamtbindemittel wurde dabei orientierend zu 50 % (160 kg/m<sup>3</sup>), 35 % (112 kg/m<sup>3</sup>) und 25 % (80 kg/m<sup>3</sup>) gewählt. Der verbleibende Anteil besteht aus den in Tab. 9-2 aufgeführten Zusatzstoffen. Zusätzlich ist in der Abb. 9-4 der CaO-Gehalt der Zusatzstoffe angegeben. Die Einzelergebnisse sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-27 dokumentiert.



Abb. 9-4: Einfluss unterschiedlicher Zusatzstoffe und Aktivatorkonfigurationen bei bindemittelmodifizierten Zwei-Komponenten-Mörteln auf die einaxiale Druckfestigkeit nach 24 Stunden

Anhand der Ergebnisse in Abb. 9-4 wird ersichtlich, dass mit steigendem CaO-Gehalt des Zusatzstoffes bei konstanter Austauschrate des Zementes eine Zunahme der Druckfestigkeit nach 24 Stunden einherging. Bei einem Zement/Zusatzstoff-Verhältnis von 35/65 erfüllten bis auf die Steinkohlenflugasche und das Metakaolin alle Zusatzstoffe bei ausschließlicher Verwendung von Natrium-Wasserglas die Anforderungen an die 24-Stunden-Druckfestigkeit. Die hüttensandhaltigen Mörtel erfüllten unabhängig von der Aktivatorkonfiguration die Anforderungen an die Druckfestigkeit von 0,5 N/mm<sup>2</sup> nach 24 Stunden. Im Vergleich zum Basismörtel M0 führte der Einsatz der Hüttensande in Kombination mit den Wassergläsern mit einer MVZ von 2,6 und 3,4 zu höheren Druckfestigkeiten nach 24 Stunden. Aufgrund des geringeren Zementgehaltes kann gefolgert werden, dass der Hüttensand somit bereits zum Zeitpunkt von 24 Stunden nach Aktivierung aktiv zur Festigkeit beitrug. Weiterhin wird ersichtlich, dass ein zunehmender Zementgehalt (Abb. 9-4, unten links) bei den hüttensandhaltigen Mörteln nicht zwingend mit einem Festigkeitszuwachs nach 24 Stunden korrelierte. So führte ein Zement/Hüttensand-Verhältnis von 50/50 im Vergleich zu einem Verhältnis von 35/65 zu einer geringeren Festigkeit nach 24 Stunden. Bei Einsatz der puzzolanischen Flugasche und des hydraulisch aufbereiteten Betonzusatzstoffes führte eine erhöhte Menge an Zement jedoch zu einer signifikanten Festigkeitszunahme.

Weiterhin wird in Abb. 9-4 der Einfluss der spezifischen Oberfläche der Zusatzstoffe deutlich. Mit dem Hüttensand 1 (HS1, spez. Oberfläche nach Blaine [110]: rd. 6500 cm<sup>2</sup>/g) ließen sich bereits nach 24 Stunden bei Verwendung von reinem Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4) Festigkeiten in Höhe von rd. 1,3 N/mm<sup>2</sup> erzielen. Dies entspricht im Vergleich zum Basismörtel M0 einer Steigerung von rd. 60 %. Weiterführende Untersuchungen (Abb. 9-4, unten rechts) zeigten, dass eine Reduktion des Zementgehaltes in Kombination mit Hüttensand 2 (spez. Oberfläche nach Blaine: rd. 4700 cm<sup>2</sup>/g) bis auf 25 M.-% des Gesamtbindemittelgehaltes bzw. 80 kg/m<sup>3</sup> (Zement/Zusatzstoff-Verhältnis: 25/75) bei Einhaltung der Anforderungen an die 24 Stunden-Druckfestigkeit möglich waren. Bei Verwendung des hydraulisch aufbereiteten Betonzusatzstoffes, der Flugasche und des Metakaolins war ein solch geringer Zementgehalt unter Berücksichtigung des Richtwertes an die Druckfestigkeit von 0,5 N/mm<sup>2</sup> nach 24 Stunden nicht realisierbar.

Daneben beeinflusste die chemische Zusammensetzung des Aktivators die Festigkeitsentwicklung. Ein Aktivator mit einer MVZ von 3,4 (Natrium-Wasserglas) führte in Kombination mit einem zementhaltigen Bindemittel, aber unabhängig vom Zement/Zusatzstoff-Verhältnis, grundsätzlich zu einer höheren Festigkeit im Vergleich zu den Aktivatoren mit einer geringeren MVZ von 2,6 und 2,2. Hier kann zum einen vermutet werden, dass durch den höheren Siliziumgehalt bei dem Natrium-Wasserglas, wie auch in [111] beschrieben, mehr Keimstellen für die aus dem Zusatzstoff und Zement gelösten Reaktionspartnern zur Verfügung standen, was die Entwicklung eines vernetzten und somit festigkeitsliefernden Gefüges unterstützte. Zudem kann hier ein Einfluss der eingesetzten Alkalien (K<sub>2</sub>O und Na<sub>2</sub>O) vermutet werden. Grundsätzlich zeigt sich auf Grundlage der Ergebnisse in Abb. 9-4, dass bei (teil-)zementösen Systemen ein Natrium-Wasserglas für eine rapide Festigkeitsentwicklung innerhalb der ersten 24 Stunden vorteilhaft war. Weiterhin ist feststellbar, dass grundsätzlich und unabhängig von dem verwendeten Zusatzstoff die zunehmende Verwendung von Kalium-Wasserglas im Aktivator bei den bindemittelmodifizierten Zwei-Komponenten-Mörteln zu geringeren Festigkeiten nach 24 Stunden führte. Demzufolge wurden ergänzende Festigkeitsuntersuchungen an dem Basismörtel M0 mit ausschließlicher Verwendung von Zement als Bindemittel mit den in Tab. 9-4 beschriebenen Aktivatoren durchgeführt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.1, Tab. A-22 dokumentiert. Wie in Abb. 9-5 gezeigt, führte die Verwendung von Natrium-Wasserglas in Kombination mit Zement durchweg, aber insbesondere innerhalb der ersten Stunden, zu gesteigerten Festigkeiten im Vergleich zu den Aktivatoren mit einem gewissen Anteil an Kalium-Wasserglas und somit höheren pH-Werten. Die Zusammensetzungen des Basismörtels bei unterschiedlichen Aktivatorkonfigurationen sind im Anhang in Kapitel A-6.1, Tab. A-2 aufgeführt.



Abb. 9-5: Einfluss der Aktivatorkonfiguration (Molverhältniszahl "MVZ", pH-Wert) auf die Druckfestigkeitsentwicklung eines rein-zementösen Zwei-Komponenten-Mörtels (Basismörtel M0)

Basierend auf den Resultaten in Abb. 9-5 und den sich nur geringfügig unterscheidenden SiO<sub>2</sub>-Gehalten der Aktivatoren (Tab. 9-4) kann angenommen werden, dass die Reaktion und somit Festigkeitsentwicklung des Portlandzementes primär durch die Art der Alkalien im Aktivator beeinflusst wurde. Mit zunehmendem Gehalt an Kaliumwasserglas nahm der Gehalt an K<sub>2</sub>O zu und gleichzeitig der Gehalt an Na<sub>2</sub>O im Aktivator ab (siehe Abb. 9-3). Der pH-Wert der Aktivatoren blieb hingegen auf konstantem Niveau. Der Siliziumgehalt war bei der hier betrachteten maximalen Substitution des Natrium-Wasserglases von 50 M.-% um rd. 3 M.-% reduziert. Dies lässt den Schluss zu, dass die Strukturentwicklung bzw. frühe Phasenbildung durch Na<sub>2</sub>O begünstigt und durch einen zunehmenden K<sub>2</sub>O-Gehalt gemindert wurde. In Untersuchungen gemäß [112] konnte ein vergleichbarer Einfluss des Aktivators festgestellt werden. Bei einer alkalischen Aktivierung von Hüttensanden führten ein hoher Natrium-Gehalt sowie eine hohe Molverhältniszahl des Aktivators zu einer gesteigerten Hydratation des Bindemittels.

Abschließend kann festgehalten werden, dass zur Erzielung einer hinreichenden Festigkeit nach 24 Stunden und mit dem Bestreben, die hydraulische Komponente im Bindemittel möglichst gering zu halten, Zusatzstoffe mit einem entsprechend hohen Calciumgehalt vorteilhaft sind. Ergänzende Untersuchungen zum Einsatz von Steinkohlenflugasche als Substituent in Zwei-Komponenten-Mörteln sind in [113] aufgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Flugasche/Zement-Verhältnisse im Bindemittel eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels untersucht und die wesentlichen Frisch- und Festmörteleigenschaften bestimmt. Eine zunehmende Austauschrate des Zementes durch Flugasche bei gleichbleibendem Aktivator bewirkte dabei eine Abnahme der Druckfestigkeit

und eine Zunahme der Gelzeit. In Bezug zu den zeitlich-kritischen Anforderungen an die Gelzeit und Frühfestigkeit eines aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels wirkt sich somit eine zunehmende Zementsubstitution durch Flugasche nachteilig aus. Allerdings konnten die Frischmörteleigenschaften – Fließfähigkeit und Sedimentationsstabilität – durch den anteiligen Einsatz von Flugasche optimiert werden.

Auf Grundlage der chemischen Zusammensetzung der Zusatzstoffe können auf Basis der zuvor gezeigten Festigkeitsuntersuchungen (Abb. 9-4) bei Betrachtung der für die Hydratphasenbildung primären Bestandteile – CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – des Gesamtbindemittels Grenzwerte für deren günstige Bereiche abgeleitet werden. Dabei ist als kritischer Wert die Erzielung einer Mindestdruckfestigkeit von 0,5 N/mm<sup>2</sup> nach 24 Stunden gewählt worden. Das Verhältnis von Zement und Substituent variierte im Bereich von 25/75, 35/65 und 50/50. Hierzu wurden die Ergebnisse aus Abb. 9-4 herangezogen und der Gehalt an CaO, SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> als Summe von Zement und Zusatzstoff in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses berechnet und für die jeweilige Aktivatorkonfiguration der Druckfestigkeit gegenübergestellt (Abb. 9-6).



Abb. 9-6: Korrelation zwischen der chemischen Zusammensetzung (CaO-, SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt) von unterschiedlichen Zusatzstoffen und der anforderungsgerechten einaxialen Druckfestigkeit nach 24 Stunden in Abhängigkeit unterschiedlicher Aktivatorkonfigurationen

Aus der Betrachtung der Parameter CaO, SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Abb. 9-6 ergaben sich untereinander abhängige und grobe Grenzbereiche für die jeweiligen Mengen dieser chemischen Bestandteile. Es konnten die folgenden günstigen Bereiche festgestellt werden: CaO-Gehalt: 42,5-52,5 %, SiO<sub>2</sub>-Gehalt: 25-37,5 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt: 7,5-15 %. Anhand dieser Grenzbereiche kann das Verhältnis aus Zement und variablem Zusatzstoff bei bekannter chemischer Zusammensetzung derer auf Basis einer hinreichenden Festigkeit nach 24 Stunden ausgelotet werden. In Abb. 9-7 sind die Kombinationen der Ausgangsstoffe aus Tab. 9-2 mit Zement/Zusatzstoff-Verhältnissen von 10/90 bis 50/50, aufgeteilt nach CaO, SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, unter Angabe der aus Abb. 9-6 abgeleiteten günstigen Bereiche aufgeführt.



Abb. 9-7: Einfluss der chemischen Zusammensetzung unterschiedlicher Zement/Zusatzstoff-Verhältnisse und Eingrenzung günstiger Bereiche der Bindemittelbestandteile CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und SiO<sub>2</sub>

Hieraus wird ersichtlich, dass bei einem geringen Zementgehalt (Zement/Zusatzstoff-Verhältnis 10/90 und 30/70) die Einhaltung der Druckfestigkeit nach 24 Stunden von 0,5 N/mm<sup>2</sup> bei einer Aktivierung mit Wassergläsern nur durch calciumreiche Stoffe wie Hüttensand oder den hydraulisch reaktiven Betonzusatzstoff möglich ist. Die puzzolanischen Stoffe liegen, insbesondere bei Betrachtung des Calciumoxid-Gehaltes, welcher maßgeblich für die erste Reaktion verantwortlich ist, weit außerhalb des Zielbereiches. Diese Einordnung dient einer ersten groben Auswahl eines geeigneten Stoffes für die Festigkeitsphase und schließt nicht automatisch die Einhaltung aller Anforderungen an einen Zwei-Komponenten-Mörtel ein. Für die weiteren Untersuchungen wurde exemplarisch als Zusatzstoff der Hüttensand "HS2" ausgewählt, da hiermit auf Basis von Abb. 9-7 hohe Substitutionsraten möglich sind und dessen physikalische und chemische Eigenschaften denen typischer verfügbarer Hüttensand (HS2) ebenfalls in den günstigen Bereichen liegen. Allerdings ist dann eine hinreichende Gelierung, wie in Kapitel 9.1 gezeigt, nicht gewährleistet.

#### 9.2.1.3 Druckfestigkeit

Auf Basis der theoretischen Überlegungen in Kapitel 9.2.1.2 wurden für die weiteren Untersuchungen zur Druckfestigkeitsentwicklung für das Bindemittel die Verhältnisse von Zement zu Hüttensand von 25/75 und 50/50 ausgewählt und der Einfluss unterschiedlicher Aktivatorzusammensetzungen auf die Festigkeitsentwicklung bis 28 Tage nach Aktivierung untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 9-8 dargestellt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-28 dokumentiert. Hierbei zeigte sich, dass bei anteiliger Verwendung von Hüttensand im Bindemittel in Kombination mit reinem Natrium-Wasserglas im Vergleich zum Basismörtel M0 ab einem Zeitpunkt von bereits einem Tag nach Aktivierung bei einem Zementgehalt von 160 kg/m<sup>3</sup> und 159 kg/m<sup>3</sup> Hüttensand gleich-hohe Festigkeiten erzielt werden konnten. Mit zunehmendem Anteil an Kalium-Wasserglas nahm die 24-Stunden-Druckfestigkeit bei einem Zement/Hüttensand-Verhältnis von 50/50 ab bzw. stagnierte bei einem Verhältnis von 25/75. Unter Berücksichtigung der Untersuchungen zum Einfluss der Aktivatorkonfiguration bei einem rein zementösen System (Abb. 9-5) konnte auch bei den hier betrachteten hüttensandhaltigen Systemen festgestellt werden, dass eine rasche Festigkeitsentwicklung durch den Einsatz von Natrium-Wasserglas begünstigt wurde.



Abb. 9-8: Einfluss der Aktivatorzusammensetzung und des Zement/Hüttensand-Verhältnisses auf die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit bis 28 Tage

Die anteilige Verwendung von Hüttensand (50/50) im Bindemittel führte bei Verwendung des Natrium-Wasserglases (MVZ: 3,4) im Vergleich zum Basismörtel M0 bereits nach 3 Tagen zu einer signifikanten Erhöhung der Druckfestigkeit. Analog zum Basismörtel wurde die Festigkeit durch einen gesteigerten Einsatz von Kalium-Wasserglas reduziert. Bei einem Hüttensandgehalt von 239 kg/m<sup>3</sup> (75% des Gesamtbindemittels) kam es nach 7 Tagen im Vergleich zum zementreicheren Mörtel mit 160 kg/m<sup>3</sup> Hüttensand (50% des Gesamtbindemittels) zu deutlich höheren Festigkeiten, wobei die Größenordnung der Druckfestigkeit innerhalb dieser Versuchsreihe tendenziell unabhängig von der Aktivatorkonfiguration war. Allerdings lagen die Druckfestigkeiten nach einem Tag bei einem Zement/Hüttensand-Verhältnis von 25/75 unter den Festigkeiten des Basismörtels M0. In dem Bereich zwischen 3 und 7 Tagen kann unter der Annahme einer nahezu abgeschlossenen Reaktion des Zementes, vermutet werden, dass die Reaktion des Hüttensandes maßgebend für den Festigkeitszuwachs war. Dies wird auch daran deutlich, dass im direkten Vergleich bei einer Erhöhung des Hüttensandgehaltes von 160 kg auf 239 kg/m<sup>3</sup> ein Festigkeitszuwachs von rd. 70 % nach 7 Tagen zu verzeichnen war. Nach 28 Tagen war bei beiden Bindemittelkonfigurationen eine direkte Abhängigkeit zwischen der Aktivatorzusammensetzung und den Druckfestigkeiten erkennbar. Mit sinkender Molverhältniszahl nahm auch nach 28 Tagen die Druckfestigkeit ab. Auf Basis der zuvor gezeigten Ergebnisse erwies sich der Einsatz von Natrium-Wasserglas bei einem hüttensandhaltigen Bindemittel als vorteilhaft für eine rasche Festigkeitsentwicklung innerhalb der ersten 24 Stunden nach Aktivierung und für die Höhe der Endfestigkeit.

Eine Gegenüberstellung der relativen Druckfestigkeiten der hüttensandhaltigen Mörtel im Vergleich zum Basismörtel M0 ist in Abb. 9-9 dargestellt. Als Bezugsgröße wurde die Druckfestigkeit des Basismörtels nach 28 Tagen verwendet. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-28 dokumentiert. Die Prüfserien sind dabei wie folgt bezeichnet: (*Zementgehalt [kg/m³]*)\_(*MVZ des Aktivator [-]*); Beispiel: Mörtel mit 80 kg Zement, 239 kg Hüttensand und Natrium-Wasserglas: "80\_3,4". Die Ergebnisse verdeutlichen das enorme Festigkeitspotential von alkalisch aktivierten Hüttensanden im System der Zwei-Komponenten-Mörtel.



Abb. 9-9: Links: Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung von hüttensandhaltigen Zwei-Komponenten-Mörteln und dem Basismörtel M0 auf Basis der einaxialen Druckfestigkeit. Rechts: Vergleichsuntersuchungen zum Einfluss der Zementart auf die Langzeitfestigkeiten [27]

Bei Betrachtung der mittleren Druckfestigkeit der hüttensandhaltigen Mörtel, unabhängig von der Aktivatorzusammensetzung, wurde die 28-Tage-Druckfestigkeit des Basismörtels M0 im Mittel bereits nach drei Tagen erreicht und zum Teil überschritten. Nach 28 Tagen besaßen die hüttensandhaltigen Mörtel rd. +370 % der Druckfestigkeit des Basismörtels und ein weiterer, ähnlich steiler Anstieg bis auf im Mittel rd. +450 % nach 56 Tagen war zu identifizieren. Orientierend wurden ebenfalls die Druckfestigkeiten der Mörtel "160 3,4" und "80 2,6" nach 230 Tagen bestimmt. Der Festigkeitszuwachs in Bezug auf den Basismörtel und dessen 28-Tage-Druckfestigkeit betrug rd. 550 %. Die Verwendung von Hüttensand als Bindemittelbestandteil wirkte sich zudem vorteilhaft auf die Gefügestabilität bzw. chemische Stabilität aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel aus. Anhand der Ergebnisse in Abb. 9-9, links wird deutlich, dass es zu keinem Festigkeitsabfall der hüttensandhaltigen Mörtel (80 2,6 und 160 3,4) kam. Der zementöse Basismörtel M0 zeigte nach 230 Tagen in Bezug auf die maximale Druckfestigkeit nach 90 Tagen einen Festigkeitsverlust von rd. 16 % und bezogen auf die 28-Tage-Festigkeit einen Festigkeitsverlust von 3%. Ergänzend sind in Abb. 9-9, rechts Langzeituntersuchungen von Zwei-Komponenten-Mörteln mit Portland- und Hochofenzement (230 kg/m<sup>3</sup> Bindemittel; 90 l/m<sup>3</sup> Natrium-Wasserglas) aus [27] aufgeführt. Bei dem Mörtel mit Portlandzement kam es nach 28 Tagen zu einem Festigkeitsverlust, welcher nach rd. 1000 Tagen zu einer Halbierung der einaxialen Druckfestigkeit führte. Bei Verwendung von Hochofenzement war kein Festigkeitsverlust feststellbar. Bei einer alkalischen Aktivierung eines hüttensandhaltigen Bindemittels kann auf dieser Basis im Vergleich zu reinem Portlandzement von konstanten Materialeigenschaften respektive Festigkeiten ausgegangen werden.

### 9.2.1.4 Steifigkeit

Ergänzend zu den Druckfestigkeiten wurde für den Mörtel 80\_3,4 der zeitliche Verlauf des statischen Elastizitätsmoduls (E-Modul) (Abb. 9-10, links) sowie die Elastizitätsmoduln verschiedener Bindemittel-Aktivator-Konfigurationen mit unterschiedlichen Zement/Hüttensand-Verhältnissen nach 28 Tagen erfasst (Abb. 9-10, rechts). Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-29 dokumentiert. Bei dem Vergleich der statischen Elastizitätsmoduln des Basismörtels M0 und des hüttensandhaltigen Mörtels 80\_3,4 (Abb. 9-10, links) zeigte sich selbiges Verhalten wie bei den Druckfestigkeiten. Die Kombination aus Hüttensand und Zement im Bindemittel führte hier bereits nach drei Tagen zu einer höheren Steifigkeit und insbesondere ab 7 Tagen zu einer ausgeprägten Zunahme (+200 %) der Steifigkeit. Unabhängig von der Aktivatorzusammensetzung oder der Bindemittelkonfiguration lagen die statischen Elastizitätsmoduln aller betrachteten Mörtel (Abb. 9-10, rechts) nach 28 Tagen in der gleichen Größenordnung von rd. 2000 bis 2700 N/mm<sup>2</sup> (Vergleich: Basismörtel M0: 800 N/mm<sup>2</sup>, Abb. 8-18).



Abb. 9-10: Links: Zeitlicher Verlauf des Elastizitätsmoduls des alkalisch-aktivierten, hüttensandhaltigen Zwei-Komponenten-Mörtels "80\_3,4" im Vergleich zum Basismörtel M0. Rechts: Elastizitätsmoduln unterschiedlicher Bindemittel/Aktivator-Kombinationen (Probenalter: 28 Tage)

#### 9.2.1.5 Gefügeentwicklung (REM-Aufnahmen)

Die höheren Festigkeiten der hüttensandhaltigen Zwei-Komponenten-Mörtel im Vergleich zu einem rein-zementösen System konnten auch anhand von Rasterelektronenmikroskop(REM)-Aufnahmen des Gefüges verdeutlicht werden (Abb. 9-11). Bei einer alkalischen Aktivierung von Hüttensand kommt es in einem ersten Schritt zu einem Löseprozess des Bindemittels wodurch Reaktionspartner in der Porenlösung zur Verfügung gestellt werden. In Kombination mit dem SiO<sub>2</sub> des Aktivators kommt es, wie auch in Abb. 7-9 schematisch dargestellt, zu einer Strukturbildung in den Porenräumen der Bindemittelpartikel und somit zu einem stärker vernetzten Gefüge. Nach 16 Monaten (Abb. 9-11, rechts) waren keine eindeutigen Partikelgrenzen des Bindemittels mehr identifizierbar, was auf einen vollständigen Löseprozess des Hüttensandes schließen lässt. Bei dem Basismörtel M0 war das Gefüge durch teilweise vernetzte, hydratisierte Zementpartikel bestimmt (Abb. 9-11, Abb. 8-19, rechts).



 Abb. 9-11: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Bruchstücken: Links: Basismörtel M0 (Druckfestigkeit nach 56d: 1,9 N/mm<sup>2</sup>). Rechts: Alkalisch aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel 80\_2,6 (25% Zement, 75% Hüttensand, Druckfestigkeit nach 56d: 8,5 N/mm<sup>2</sup>. Alter: 16 Monate). Maβstab: 100 µm.

#### 9.2.1.6 Gelierung

Aufbauend auf den Festigkeitsuntersuchungen und der Auswahl geeigneter Zement/Hüttensand-Konfigurationen wurde das Gelierverhalten potentiell geeigneter Mörtel betrachtet. Bei der Bestimmung der Gelzeit wurde der Versuchsaufbau aus Kapitel 8.4.1 verwendet. Als Aktivator kam auf Basis der Ergebnisse aus Abb. 9-4 und Abb. 9-5 ein Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4, vgl. Tab. 9-4) zum Einsatz, um eine rasche Reaktion des Portlandzementes zu begünstigen. Bei den Untersuchungen wurden hüttensandhaltige Mörtel mit einem anteiligen Zementgehalt bzw. einem Zement/Hüttensand-Verhältnis von 80 (25/75), 120 (37/63), 160 (50/50) und 200 (63/37) kg/m<sup>3</sup> betrachtet. Die Ergebnisse der Gelzeiten dieser Mörtel und vergleichend die Gelzeiten des Basismörtels M0 sind in Abb. 9-12, links dargestellt. Exemplarisch ist in Abb. 9-12, rechts der Einfluss eines höher-alkalischen Aktivators (MVZ: 2,6) auf das Gelierverhalten dargestellt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-30 dokumentiert.



Abb. 9-12: Links: Gelzeiten alkalisch aktivierter, hüttensandhaltiger Zwei-Komponenten-Mörtel mit variablem Gehalt an Portlandzement (als Gelierhilfe). Rechts: Einfluss der Aktivatorzusammensetzung auf die Gelzeit

Zur Erzielung einer hinreichenden Gelzeit, wurde bereits im Vorherein die Menge an Aktivator im Gesamtsystem reduziert. Wie auch bei dem Basismörtel M0 führte eine Reduktion des Aktivatorgehaltes zu einer verkürzten Gelzeit. Bei dem Mörtel 160\_3,4 konnten so im Bereich von 2,7 bis 5,5 Vol.-% (35 bis 70 kg/m<sup>3</sup>) Gelzeiten im Bereich von 6 bis 12 Sekunden bestimmt werden. Die Gelzeit bei einer Aktivatormenge von 98 kg/m<sup>3</sup>, wie sie im Rahmen der Festigkeitsuntersuchungen verwendet wurde, lag mit > 12 Sekunden außerhalb der üblichen Richtwerte. Der Mörtel 200\_3,4 besaß im Vergleich zum Mörtel 160\_3,4 bei einer um 40 kg erhöhten Zementmenge und entsprechender Mindermenge an Hüttensand (120 kg/m<sup>3</sup>) und gleichen Aktivatorkonfiguration nahezu deckungsgleiche Gelzeiten. Die Erhöhung des Zements bewirkte in diesem Fall keine Zunahme der Gelzeit, was die Annahme zulässt, dass in dem Bereich von 160 bis 200 kg/m<sup>3</sup> Zement eine Art Sättigungspunkt des Zement/Wasserglas-Verhältnisses erreicht wurde. Bei dem Mörtel 80\_3,4 waren durchweg keine Gelzeiten im geforderten Bereich messbar. Eine anteilige Verwendung von Kalium-Wasserglas (Abb. 9-12, rechts) im Aktivator bei dem Mörtel 160\_2,6 führte zu einer Verlängerung der Gelzeit im Mittel um rd. 17 % bei gleicher Aktivatordosierung. Bei einer Molverhältniszahl von 2,2 (Natrium-WG/Kalium-WG: 50/50) waren keine Gelzeiten messbar.

#### 9.2.1.7 Frühfestigkeit

In Abb. 9-13 sind die Ergebnisse der Frühfestigkeitsentwicklung unterschiedlicher alkalisch aktivierter, hüttensandhaltiger Mörtel im Vergleich zum Basismörtel M0 aufgezeigt. Bei der Bestimmung der Frühfestigkeiten mittels modifiziertem Nadelgerät nach Vicat (vgl. Kapitel 8.4.2) wurde deutlich, dass mit zunehmendem Hüttensandgehalt es zu einer Verzögerung der Frühfestigkeitsentwicklung kam. Gleiches Verhalten konnte auch bei den Gelzeiten und bei den Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung beobachtet werden. Bei einem Hüttensandgehalt von rd. 50 % des Gesamtbindemittels (Mörtel: 160\_3,4) ließen sich jedoch den Anforderungen gerechte Frühfestigkeiten bestimmen. Die Einzelergebnisse sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-31 dokumentiert.



Abb. 9-13: Frühfestigkeitsentwicklung von alkalisch aktivierten, hüttensandhaltigen Zwei-Komponenten-Mörteln in Abhängigkeit der Bindemittelzusammensetzung (Variation des Zement/Hüttensand-Verhältnisses)

### 9.2.1.8 Scherfestigkeit

In Abb. 9-14 ist die Scherfestigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 10 bis 60 Minuten der hüttensandhaltigen Mörtel mit 80 (25/75), 120 (37/63) und 160 kg/m<sup>3</sup> (50/50) Zement bei Verwendung des Aktivators mit einer Molverhältniszahl von 3,4 (Natrium-Wasserglas) dargestellt. Zu Vergleichszwecken sind ebenfalls die Scherfestigkeiten des Basismörtels M0 aufgeführt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-32 dokumentiert. Die Scherfestigkeitsmessungen wurden in diesem Fall in Eimern (Durchmesser: 31 cm, Höhe: 26 cm) mit einem Probenvolumen von rd. 12 Litern (Probenhöhe: 16 cm) durchgeführt. Dies hatte zum einen den Hintergrund, dass bei den zu erwartenden geringeren Scherfestigkeiten ein entsprechend großer Scherflügel (Durchmesser / Höhe des Scherflügels: 25/51 mm) zur genauen Bestimmung der Scherfestigkeiten verwendet werden sollte. Zum anderen können durch ein entsprechend vergrößertes Prüfgefäß sich gegenseitig beeinflussende Effekte der Prüfgefäß- und Flügelgeometrie vermieden werden. Je Prüfung wurden in einem separaten Prüfbehältnis maximal zwei Messungen durchgeführt.



Abb. 9-14: Scherfestigkeitsentwicklung von alkalisch aktivierten, hüttensandhaltigen Zwei-Komponenten-Mörteln (Aktivator: 98 kg/m<sup>3</sup>) in Abhängigkeit des Zement/Hüttensand-Verhältnisses und ergänzend der Aktivatorkonfiguration

Mit allen Bindemittelkonfigurationen konnte der Richtwert nach 30 Minuten von 2 kN/m<sup>2</sup> erreicht und zum Teil deutlich überschritten werden. Mit steigendem Zementgehalt bei den hüttensandhaltigen Mörteln nahm die Scherfestigkeit zu. Mit einem Zement/Hüttensand-Verhältnis von 50/50 wurden im Vergleich zum klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel (M0) bei ausschließlicher Verwendung von Portlandzement Scherfestigkeiten auf gleichem Niveau erzielt. Zudem wird ersichtlich, dass mit einer Erhöhung des Zementgehaltes die Scherfestigkeitsentwicklung ab 45 Minuten nach Aktivierung zunehmend anstieg. Ergänzend zu diesen Untersuchungen ist in Abb. 9-14 exemplarisch der Einfluss eines höher alkalischen Aktivators bei einem Zement/Hüttensand-Verhältnis von 25/75 dargestellt. Analog zur Druckfestigkeitsentwicklung zeigten diese Ergebnisse zur Scherfestigkeitsentwicklung des Mörtels mit 80 kg/m<sup>3</sup> Zement, dass ein Natrium-Wasserglas in Kombination mit einem gewissen Anteil an Zement im Bindemittel zur Sicherstellung der Anforderungen an die Scherfestigkeit von erheblicher Bedeutung ist. Der Mörtel 80\_3,4 mit reinem Natrium-Wasserglas erzielte im Vergleich zum Mörtel 80\_2,6 mit der selbigen Komponente A, aber einem gewissen Anteil an Kalium-Wasserglas im Aktivator rd. 75 % höhere Scherfestigkeiten nach 30 Minuten (80\_2,6: 2,0 kN/m<sup>2</sup>; 80\_3,4: 3,5 kN/m<sup>2</sup>).

Es lässt sich aus der Summe der Festigkeitsuntersuchungen ableiten, dass es mit einem Zementgehalt von mindestens 25 % des Gesamtbindemittels (hier 80 kg/m<sup>3</sup> Zement) in Kombination mit Hüttensand und Verwendung eines Natrium-Wasserglases zu anforderungsgerechten Scherfestigkeiten ( $\geq 2$  kN/m<sup>2</sup> nach 30 Minuten) und Druckfestigkeiten ( $\geq 0,5$  N/mm<sup>2</sup> nach 24 Stunden) kam. Zur Erzielung einer hinreichenden Gelierung war jedoch grundsätzlich ein höherer Zementgehalt von rd. 120 bis 160 kg/m<sup>3</sup> notwendig. Vor dem Hintergrund eines möglichst geringen Zementgehaltes besteht zur Optimierung der Gelierung und Frühfestigkeitsentwicklung die Möglichkeit einen feiner gemahlenen Zement, wie beispielsweise einen Portlandzement der Festigkeitsklasse 52,5 R, zu verwenden. Durch die so gesteigerte Reaktionsoberfläche können mehr vernetzte Strukturen unmittelbar nach Aktivierung gebildet werden.

#### 9.2.1.9 Verarbeitbarkeit

In Abb. 9-15 sind die Marsh-Auslaufzeiten hüttensandhaltiger Mörtel mit 80, 160 und 200 kg/m<sup>3</sup> Zement im Vergleich zum Basismörtel M0 über einen Zeitraum von 72 Stunden dargestellt. Es wird ersichtlich, dass ein zunehmender Gehalt an Hüttensand im Gesamtbindemittel zu kürzeren Marsh-Auslaufzeiten und demnach zu einer erhöhten Fließfähigkeit innerhalb der ersten 24 Stunden nach Herstellung führte. Nach 48 Stunden lagen die Marsh-Auslaufzeiten aller betrachteten Mörtel auf gleichem Niveau. Dies kann durch die Kombination aus der beginnenden Hydratation des Bindemittels und dem nicht dauerhaften Durchmischen der Komponente A während der Vorhaltung im Labor bedingt sein. Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-33 dokumentiert.



Abb. 9-15: Marsh-Auslaufzeiten hüttensandhaltiger Zwei-Komponenten-Mörtel im Vergleich zum Basismörtel M0 über einen Zeitraum von 72 Stunden

# 9.2.2 Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid

#### 9.2.2.1 Ausgangsstoffe

Um bei Zwei-Komponenten-Mörteln vollständig auf Portlandzement verzichten zu können, ist der Einsatz eines alternativen, leistungsfähigen Stoffes als Reaktionspartner notwendig, welcher in der Lage ist, die essentielle Eigenschaft der Gelierung unmittelbar nach Aktivierung sicherzustellen. Hierzu wurde der Einsatz einer Calciumhydroxid(Ca(OH)<sub>2</sub>)-Suspension, nachfolgend als Kalkmilch oder Gelierhilfe (GH) bezeichnet, untersucht. Laut [108] werden bei einer Aktivierung von Calciumhydroxid durch Wasserglas Calciumsilikate und möglicherweise entsprechende Hydratphasen gebildet. Dabei reagiert das Calcium mit dem Siliziumdioxid des Wasserglases zu Calciumsilikat und je nach Wasserglas zu Natrium- oder Kaliumhydroxid. Die hier verwendete Kalkmilch bestand zu 30 M.-% aus Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>) und zu 70 % aus entionisiertem Wasser. Eine solche Suspension war sedimentationsstabil und bei luftdichter Lagerung über mehrere Tage verarbeitbar. Als Basis für die Untersuchungen wurde die in Tab. 9-1 angegebene zementfreie, hüttensandhaltige Zusammensetzung des Mörtels "2KM\_AAHS\_red" herangezogen. Diese Rezeptur zeigte eine nur unzureichende Gelierung, erfüllte aber die Anforderungen an die Druckfestigkeit nach 24 Stunden. Bei der Mörtelzusammensetzung wurde je nach Gehalt der Calciumhydroxid-Suspension in Komponente A, das Zugabewasser um eben das in der Kalkmilch enthaltene Wasser reduziert. Als Komponente B wurde ein Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4) eingesetzt (Tab. 9-4). Die dazugehörigen Mischungszusammensetzungen sind im Anhang in Kapitel A-6.2.3, Tab. A-11 dokumentiert. In Voruntersuchungen an dem Mörtel mit anteiliger Calciumhydroxid-Suspension hat sich gezeigt, dass die Sedimentationsstabilität der Komponente A in Kombination mit dem verwendeten Aktiv-Natrium-Bentonit (Bentonit 2), welches ebenfalls bei dem Basismörtel zum Einsatz kam, nicht mehr sichergestellt war. Es kam innerhalb kurzer Zeit nach Herstellung der Komponente A zu ausgeprägten Sedimentationserscheinungen. Demzufolge wurden innerhalb der Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit ein durch den Hersteller modifiziertes Aktiv-Natrium-Bentonit (Bentonit 1) verwendet. Zu Vergleichszwecken und zur orientierenden Bestimmung des Einflusses des Bentonites wurden im Rahmen der Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung beide Bentonite betrachtet.

#### 9.2.2.2 Verarbeitbarkeit

Die Marsh-Auslaufzeiten und die Blutwassermengen der Mörtel mit einer Gelierhilfe (GH) auf Basis von Calciumhydroxid und dahingehend Kalkmilchgehalten von 60 und 90 kg/m<sup>3</sup> sind im Vergleich zum Basismörtel M0 in Abb. 9-16 dargestellt. Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-34 und Tab. A-35 dokumentiert. Anhand der Ergebnisse zur Fließfähigkeit in Abb. 9-15, links wird ersichtlich, dass die Marsh-Auslaufzeiten bei einem Kalkmilchgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> bereits zu Beginn im Bereich des oberen Grenzwertes und bei einem Kalkmilchgehalt von 60 kg/m<sup>3</sup> bereits unmittelbar nach Herstellung über dem Richtwert von 45 Sekunden lagen. Daraufhin erfolgte ein rapider Anstieg der Marsh-Auslaufzeiten bis 24 Stunden nach Herstellung, wobei bei dem Mörtel mit einem Kalkmilchgehalt von 60 kg/m<sup>3</sup> zu diesem Zeitpunkt es ab einer Marsh-Auslaufzeit von rd. 67 Sekunden zu einem Abreißen des Volumenstroms aus dem Marsh-Trichter kam. Über 24 Stunden hinaus waren keine Marsh-Auslaufzeiten messbar. Der Einsatz einer Kalkmilch führte in diesem Fall somit zu einer unmittelbar nach Herstellung erhöhten Viskosität und zu einer raschen Abnahme der Fließfähigkeit innerhalb der ersten Stunden.



Abb. 9-16: Kennwerte zur Verarbeitbarkeit eines Zwei-Komponenten-Mörtels mit einer Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid mit einem Kalkmilchgehalt von 60 (18 kg/m<sup>3</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>) und 90 kg/m<sup>3</sup> (27 kg/m<sup>3</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>) im Vergleich zum Basismörtel M0: Links: Marsh-Auslaufzeiten bis 72 Stunden nach Herstellung. Rechts: Blutwassermenge bis 72 Stunden nach Herstellung

Die gemessenen Blutwassermengen (Abb. 9-15, rechts) lagen mit rd. 8 M.-% nach 24 Stunden deutlich über dem üblichen Richtwert von 4 M.-%. Der Richtwert an die Blutwassermenge nach 3 Stunden von 3 M.-% nach [15] wurde bei beiden Kalkmilchgehalten eingehalten. Wie auch bei dem Basismörtel kam es bei den Mörteln mit einer Calciumhydroxid-Suspension nach 48 Stunden zu einem asymptotischen Verlauf. Die Blutwassermengen nach 72 Stunden lagen im Bereich zwischen 9 und 11 M.-%.

#### 9.2.2.3 Gelierung

Zum Nachweis über die Leistungsfähigkeit des Calciumhydroxides zur Erzielung des Gelzustandes wurden in einem ersten Schritt mit dem in Kapitel 8.4.1 aufgeführten Versuchsstand das Gelierverhalten bei variablem Aktivatorgehalt untersucht. Dazu wurden zwei unterschiedliche Zugabemengen der Kalkmilch von 60 kg/m<sup>3</sup> (18 kg/m<sup>3</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>) und 90 kg/m<sup>3</sup> (30 kg/m<sup>3</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>) und Aktivatorgehalte im Bereich von rd. 3,7 bis 10 % bezogen auf das Volumen der Komponente A untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 9-17 dargestellt, wobei in Abb. 9-17, links die variablen Aktivatorgehalte als Vielfache des Calciumhydroxid-Gehaltes und somit in normierter Form angegeben sind. In Abb. 9-17, rechts ist der Aktivatorgehalt in Vol.-% bezogen auf das Volumen der Komponente A angegeben. Die zugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-36 dokumentiert. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass durch den Einsatz einer Calciumhydroxid-Suspension der Gelierungsprozess forciert werden kann. Dies war allerdings nur bei Verwendung des Bentonit 1 möglich. Mit dem Bentonit 2 waren keine Gelzeiten im Bereich bis 12 Sekunden messbar.



Abb. 9-17: Gelzeiten von Zwei-Komponenten-Mörteln mit einer Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid in Abhängigkeit der Menge an Gelierhilfe und des Aktivatorgehaltes: Links: Angabe des Aktivatorgehaltes als Vielfaches des Gesamt-Calciumhydroxid-Gehaltes. Rechts: Angabe des Aktivatorgehaltes in Vol.-% bezogen auf das Volumen der Komponente A

Bei den gewählten Aktivatorgehalten waren bei beiden Kalkmilchgehalten Gelzeiten im Bereich von rd. 3 bis 10 Sekunden messbar. Bei einer weiteren Erhöhung des Aktivatorgehaltes kam es zu keiner ausreichenden Gelierung innerhalb von 12 Sekunden. Bei Betrachtung der normierten Aktivatorgehalte (Abb. 9-17, links) wird deutlich, dass ab einem Aktivatorgehalt des rd. 4,5-fachen des

Calciumhydroxid-Gehaltes Gelzeiten ab 6 Sekunden erzielt werden konnten. Analog zu den Gelzeiten des Basismörtels M0 (vgl. Kapitel 8.4.1, Abb. 8-10) führte auch hier eine geringe Aktivatormenge zu einer Verkürzung der Gelzeit. Anhand der Kurven in Abb. 9-17, rechts wird deutlich, dass mit zunehmendem Calciumhydroxid-Gehalt auch gleichzeitig eine steigende Menge an Aktivator notwendig wurde.

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Verwendung von Calciumhydroxid eine Gelbildung ermöglichte, dafür aber nur ein eng begrenzter Dosierbereich des Aktivators zur Verfügung stand. Stöchiometrisch ist für die vollständige Reaktion des Calciumhydroxids bei einer Konzentration von 30 M.-% ein Gehalt an Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4) von rd. 659 Gramm je Liter Kalkmilch notwendig. Dies entspricht bei einem Gehalt der Calciumhydroxid-Suspension von 60 kg/m<sup>3</sup> einer notwendigen Aktivatormenge von rd. 29 l/m<sup>3</sup> des Natrium-Wasserglases. Dies ist bei der Zusammensetzung der Mörtel zu berücksichtigen, da ebenfalls für die alkalische Aktivierung des Hüttensandes ein entsprechender Aktivatorgehalt zur Verfügung gestellt werden muss. Allerdings geht mit zunehmendem Aktivatorgehalt eine Verlängerung der Gelzeit einher. Bei dem Zwei-Komponenten-Mörtel mit einem Kalkmilchgehalt von 60 kg/m<sup>3</sup> ergibt eine Aktivatormenge von rd. 62 l/m<sup>3</sup> (85 kg/m<sup>3</sup>) eine Gelzeit von 7,4 Sekunden. Bei dieser Konfiguration stehen für die Festigkeitsentwicklung des Hüttensandes bei abgeschlossener Reaktion des Calciumhydroxids rd. 33 l/m<sup>3</sup> Aktivator zur Verfügung. Ergänzend ist hierbei zu berücksichtigen, dass bei der Reaktion des Calciumhydroxides mit dem Wasserglas als Nebenprodukt je nach Alkalien Kalium- oder Natriumhydroxid anfällt, welches wiederum bei dem Löseprozess des Hüttensandes mitwirkt.

# 9.2.2.4 Scherfestigkeit

Auf Basis der Ergebnisse zum Gelierverhalten (Abb. 9-17) wurden an den Mörteln mit jeweils einer Gelzeit von größer 6 Sekunden (Kalkmilch: 60 kg/m<sup>3</sup>: Aktivatorgehalt: 6,5 Vol.-%/Komp. A; Kalkmilch: 90 kg/m<sup>3</sup>: Aktivatorgehalt: 9,1 Vol.-%/Komp. A) die Scherfestigkeitsentwicklung in einem Zeitraum von 10 bis 90 Minuten nach Aktivierung untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 9-18 aufgezeigt und der Scherfestigkeit des Basismörtels M0 nach 30 Minuten gegenübergestellt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-37 dokumentiert.



Abb. 9-18: Scherfestigkeiten der Zwei-Komponenten-Mörtel mit Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>) als Gelierhilfe mit unterschiedlichen Bentoniten im Vergleich zum Basismörtel M0

Anhand der Ergebnisse in Abb. 9-18 wird deutlich, dass mit steigendem Gehalt an Calciumhydroxid aber gleichbleibendem Verhältnis von Aktivator und Calciumhydroxid die Scherfestigkeiten zunahmen. Nach 30 Minuten nach Aktivierung wurde bei dem Mörtel mit einem Kalkmilchgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> und dem Bentonit 1 eine Scherfestigkeit von rd. 3 kN/m<sup>2</sup> und bei dem Mörtel mit 60 kg/m<sup>3</sup> Gelierhilfe rund 2,5 kN/m<sup>2</sup> bestimmt. Damit sind die Anforderungen an die Scherfestigkeit gemäß [3] erfüllt. Im direkten Vergleich ist zu erkennen, dass mit dem Bentonit 1 grundsätzlich höhere Scherfestigkeiten als mit dem Bentonit 2 gemessen wurden. Im Vergleich zur Scherfestigkeit des Basismörtel (rd. 6 kN/m<sup>2</sup> nach 30 Minuten; vgl. Abb. 8-16) wiesen die Mörtel mit einer Calcium-hydroxid-Suspension wesentlich geringere Scherfestigkeiten auf. Hier kann vermutet werden, dass bei einem Einsatz von Kalkmilch nicht die Reaktivität, sondern die vergleichsweise geringe Menge an Ca(OH<sub>2</sub>) die Höhe der Scherfestigkeit maßgebend beeinflusste. Infolge der geringeren Konzent-ration des Calciumhydroxides im Mörtel im Vergleich zur Verteilung der reaktiven Bindemittel-partikel des Basismörtels M0 (Zementgehalt: 250 kg/m<sup>3</sup>) kann vermutet werden, dass sich eine weniger stark vernetzte Struktur ausbildete. Bei einer Schereinwirkung kam es so zu einem geringen Widerstand des Gefüges.

### 9.2.2.5 Druckfestigkeit und Steifigkeit

In Abb. 9-19 ist die Druckfestigkeitsentwicklung des Mörtels mit einem Kalkmilchgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> (Ca(OH)<sub>2</sub>: 27 kg/m<sup>3</sup>) und einem Hüttensandgehalt von 320 kg/m<sup>3</sup> bis 28 Tage und vergleichend die Druckfestigkeitsentwicklung des Basismörtels M0 dargestellt. Die Einzelergebnisse sind im Anhang in Kapitel A-6.4.2, Tab. A-38 dokumentiert. Die Druckfestigkeit des Mörtels betrug nach 24 Stunden rd. 0,6 N/mm<sup>2</sup> und überschritt somit den üblichen Richtwert von 0,5 N/mm<sup>2</sup> (Tab. 5-2). Unter der Voraussetzung einer abgeschlossenen Reaktion des Calciumhydroxides, wurden durch den Hüttensand, wie auch bei den Systemen mit Portlandzement als Gelierhilfe (Kapitel 9.2.1) im Vergleich zum Basismörtel M0 ab einem Alter von drei Tagen wesentlich höhere Festigkeiten erzielt. Nach 28 Tagen war die Druckfestigkeit mit 6,2 N/mm<sup>2</sup> als arithmetischer Mittelwert um den Faktor 3,5 höher. Der statische Elastizitätsmodul nach 28 Tagen betrug rd. 2000 N/mm<sup>2</sup> und lag im Bereich der hüttensandhaltigen Mörtel mit Portlandzement als Gelierhilfe (vgl. Abb. 9-10) und wesentlich höher als der statische Elastizitätsmodul des Basismörtels M0 mit 800 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen (Kapitel 8.4.6, Abb. 8-18).



Abb. 9-19: Druckfestigkeitsentwicklung eines Zwei-Komponenten-Mörtels mit 90 kg Gelierhilfe (27 kg/m<sup>3</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>, Aktivatorgehalt: 9,1 Vol.-%) und Hüttensand als Bindemittel im Vergleich zum reinzementösen Basismörtel M0

### 9.2.2.6 Gefügeentwicklung (REM-Aufnahmen)

Ergänzend zur Bestimmung der Festigkeitskennwerte sind in Abb. 9-20 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Bruchstücken eines Mörtels mit 90 kg/m<sup>3</sup> Kalkmilch (27 kg/m<sup>3</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>) und einem Aktivatorgehalt von 9,1 Vol.-% bezogen auf Komponente A (120 kg/m<sup>3</sup>) in einem Alter von 90 Tagen dargestellt. Zum Vergleich der Strukturen ist in Abb. 9-20, links eine Gefügeaufnahme des Basismörtels M0 mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> bzw. rd. 7 Vol-% bezogen auf das Volumen der Komponente A mit einem Alter von 16 Monaten dargestellt.



 Abb. 9-20: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen: Links: Zementöser Basismörtel M0 nach 16 Monaten (Maßstab: 100 μm). Mitte/Rechts: Aktivierter Mörtel mit Calciumhydroxid (27 kg/m<sup>3</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>, Aktivatorgehalt: 9,1 Vol.-%) nach rd. 90 Tagen. (Maßstab: Mitte: 100 μm, Rechts: 50 μm)

Die Gefügeaufnahmen des aktivierten Mörtels mit Calciumhydroxid als Gelierhilfe zeigten im Vergleich zum Basismörtel bereits bei einem Alter von 90 Tagen ein dichteres Gefüge (Abb. 9-20, Mitte/rechts). Es waren keine einzelnen Reaktionsprodukte erkennbar und die Grenzen der Bindemittelpartikel konnten nicht eindeutig identifiziert werden (Abb. 9-20, rechts). Vielmehr war eine großteils geschlossene Oberfläche erkennbar. Es kann hier, analog zu den Untersuchungen der hüttensandhaltigen Mörtel mit Portlandzement als Gelierhilfe, davon ausgegangen werden, dass der Hüttensand bei dem vorherrschenden alkalischen Milieu zum Großteil reagiert hat und sich feine innere und äußere Strukturen ausgebildet haben.

# 9.3 Fazit

In diesem Kapitel wurde die alkalische Aktivierung von latent-hydraulischen und puzzolanischen Zusatzstoffen und deren Anwendbarkeit als reaktiver Hauptbestandteil des Bindemittels im System der Zwei-Komponenten-Mörtel untersucht. Durch die üblicherweise eingesetzten alkalischen Aktivatoren (Wassergläser) kann die Festigkeitsentwicklung puzzolanischer und latent-hydraulischer Stoffe gezielt angeregt werden, was eine Integration dieser Zusatzstoffe in das Bindemittelsystem der Zwei-Komponenten-Mörtel ermöglicht. In einer alkalischen Umgebung kommt es zu einem Löseprozess des Zusatzstoffes und durch die daran anschließenden Reaktionsprozesse werden festigkeitsliefernde Strukturen gebildet.

In einem ersten Schritt konnte anhand von Untersuchungen an zementfreien Mörteln festgestellt werden, dass die alkalische Aktivierung von latent-hydraulischen oder puzzolanischen Stoffen als ausschließliches Bindemittel nicht eigenständig in der Lage ist, innerhalb der ersten Sekunden nach Aktivierung eine Gelierung herbeizuführen. Aufgrund dessen wurden zur Sicherstellung der Gelierung und ersten Frühfestigkeitsentwicklung Gelierhilfen auf Basis von Portlandzement und Calciumhydroxid eingesetzt. Der Einsatz dieser Gelierhilfen beschränkte sich hierbei auf die Gelphase und die Entwicklung einer ersten Frühfestigkeit bis wenige Stunden nach Aktivierung. Die Festigkeitsentwicklung nach der Gelphase, ab wenigen Stunden nach Aktivierung bis zur Endfestigkeit, wurde autark durch den Zusatzstoff generiert. Dies ermöglichte eine materialtechnologische Entkopplung des Gelzustandes einschließlich der anfänglichen Frühfestigkeitsentwicklung und der eigentlichen Festigkeitsentwicklung.

Im Rahmen vergleichender Untersuchungen an teil-zementösen Systemen zur Auswahl geeigneter Zusatzstoffe konnte festgestellt werden, dass mit calciumreichen Zusatzstoffen bei sonst gleichen Randbedingungen höhere Festigkeiten nach 24 Stunden erzielt werden können. Darauf aufbauend wurde für die weiteren bindemitteltechnischen Untersuchungen der Zusatzstoff Hüttensand ausgewählt. Im Zuge der Festigkeitsuntersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Kombination eines Natrium-Wasserglases mit Hüttensand als Hauptbestandteil des Bindemittels und die dabei entwickelten Gefügestrukturen zu einer hinreichenden Festigkeitsentwicklung für die Langzeitbettung führten. Dabei wurden durch die verzögert einsetzende Strukturbildung des aktivierten Hüttensandes ab wenigen Tagen nach Aktivierung wesentlich höhere Festigkeiten und Steifigkeiten im Vergleich zu einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel mit Portlandzement als Bindemittel erzielt. Darüber hinaus zeigten die hüttensandhaltigen Systeme sowohl eine erhöhte Langzeitstabilität als auch ein wesentlich dichteres Gefüge, was beides als vorteilhaft bei chemischen Expositionen bzw. als förderlich für die Dauerhaftigkeit eines Ringspaltverfüllmaterials und somit für das gesamte Tunnelbauwerk gewertet werden kann.

Zur Erzielung einer raschen Gelierung auf Basis typischer Richtwerte war bei einem üblichen Aktivatorgehalt von rund 70 l/m<sup>3</sup> ein Portlandzementgehalt von 120 kg/m<sup>3</sup> notwendig. Für eine hinreichende Scherfestigkeit nach 30 Minuten von 2 kN/m<sup>2</sup> sowie für eine ausreichende Druckfestigkeitsentwicklung war ein Portlandzementgehalt von 80 kg/m<sup>3</sup> bei einem Hüttensandgehalt von rd. 240 kg/m<sup>3</sup> ausreichend. Bei Verwendung von Calciumhydroxid als Gelierhilfe konnte eine rapide Gelierung und anforderungsgerechte Scherfestigkeitsentwicklung mit einem Ca(OH)<sub>2</sub>-Gehalt von 18 kg/m<sup>3</sup> forciert werden. Hierbei ist ergänzend zu berücksichtigen, dass durch Bindemittelmodifikationen, wie beispielsweise eine höhere Feinheit des Zementes, als auch durch Anpassung des Aktivators die Gehalte der Gelierhilfen weiter optimiert werden können.

Die Verwendung von Hüttensand in Kombination mit Portlandzement als Gelierhilfe wirkte sich im Vergleich zu einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel zudem insbesondere innerhalb der ersten 24 Stunden positiv auf die Verarbeitbarkeit aus. Bei dem Einsatz einer Calciumhydroxid-Suspension kam es hingegen zu einer negativen Beeinflussung der Verarbeitbarkeit. Es kam zu einer reduzierten Fließfähigkeit des Bereitstellungsgemisches und zu ausgeprägten Sedimentationserscheinungen.

# 10 Untersuchungen zur physikalischen Aktivierung

# **10.1 Untersuchungen am Polymer**

Bei einem Einsatz superabsorbierender Polymere (SAP) als Aktivatoren für Ringspaltverfüllmaterialien müssen diese unmittelbar nach Zugabe zum Mörtel eine entsprechend große Menge an Porenwasser absorbieren können. Die dadurch herbeigeführte innere Entwässerung des nun aktivierten Ringspaltverfüllmaterials muss in kürzester Zeit zu einer Viskositätszunahme mit anschließender Verfestigung führen, um die unmittelbare Bettung der Tunnelröhre zu gewährleisten. In den Kapiteln 10.1.1 und 10.1.2 werden diese Eigenschaften an unterschiedlichen Polymeren untersucht und anschließend auf den Anwendungsfall als physikalischer Aktivator übertragen. Teile der hier vorgestellten Ergebnisse sind in [101, 114, 115] veröffentlicht.

# 10.1.1 Wasseraufnahmevermögen

Zur Auswahl eines geeigneten superabsorbierenden Polymers ist die Bestimmung des zeitabhängigen Wasseraufnahmevermögens sowohl in Wasser als auch insbesondere in dem später umgebenden Quellmittel notwendig. Für die Untersuchungen zum Wasseraufnahmevermögen wurden drei unterschiedliche superabsorbierende Polymere verwendet. Die bekannten technischen Größen dieser SAP sind in Tab. 10-1 aufgeführt. In Abb. 10-1 sind Mikroskopaufnahmen der untersuchten SAP im trockenen Zustand dargestellt.

chungen im Rahmen der physikalischen Aktivierung (Herstellerangaben)							
	Herstellerbeschreibung	Partikelgröße [mm]	Schüttdichte [g/dm <sup>3</sup> ]	pH-Wert [-]	Aufnahmevermögen [g/g] (Entionisiertes Wasser)		
SAP 1	Natriumpolyacrylat, quervernetzt	-	ca. 660	ca. 6,0	-		
SAP 2	Kaliumpolyacrylat, quervernetzt	0,2-1,0	ca. 700	ca. 7,7	> 260		
SAP 3	Vernetztes Natriumpolyacrylat	0,1-0,5	600-800	-	> 300		

 

 Tab. 10-1:
 Materialkennwerte der superabsorbierenden Polymere (SAP) für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen der physikalischen Aktivierung (Herstellerangaben)



*Abb. 10-1:* Aufnahmen mit einem Auflichtmikroskop (oben) und einem Rasterelektronenmikroskop (unten) der untersuchten SAP (v.l.n.r.: SAP 1, 2, 3) im trockenen Zustand. Maßstab: 500 μm
Zur Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens wurde der Versuchsaufbau für Langzeitversuche nach DIN 18132 [116] verwendet. Dieser Versuch wird zur Erfassung des Wasseraufnahme- und Wasserbindevermögens von Feinbestandteilen bei Bodenproben verwendet. Zur vergleichenden Ermittlung des Wasseraufnahmevermögens von SAP eignete sich dieser Versuchsaufbau, da die Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit bei gleichbleibenden Bedingungen erfasst werden konnte. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb. 10-2, rechts dargestellt. In Abb. 10-2, links ist das Glasaufsatzrohr mit eingefüllten SAP gezeigt.



*Abb. 10-2:* Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens von SAP mit der Versuchsanordnung für Langzeitversuche gemäß DIN 18132 [116]. Links: Glasaufsatzrohr mit eingefüllter SAP-Probe. Rechts: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Die Randbedingungen der Untersuchungen nach DIN 18132 [116] waren jedoch aufgrund des zu erwartenden hohen Wasseraufnahmevermögens der SAP zu modifizieren. Obwohl die Untersuchungen mit SAP nur eine Versuchsdauer von je 60 Minuten hatten, wurde abweichend zu [116] der Versuchsaufbau für Langzeitversuche verwendet. Dies begründete sich mit dem hohen Wasseraufnahmevermögen der SAP. Da die Messbürette für Untersuchungen  $\leq 60$  Minuten lediglich ein Nennvolumen von 1 ml besitzt, wurde die Messbürette für Langzeitversuche mit 2 ml Nennvolumen verwendet. Des Weiteren wird in [116] die Trockenmasse in Abhängigkeit des Wasseraufnahmevermögens des zu untersuchenden Materials vorgegeben. Für ein Wasseraufnahmevermögen wA von kleiner 100 % wird eine Trockenmasse md von 1 Gramm, für ein Wasseraufnahmevermögen von größer/gleich 100 % wird eine Trockenmasse von 0.2 Gramm empfohlen. Da jedoch das Wasseraufnahmevermögen von SAP laut einschlägiger Literatur bis zu 100.000 % betragen kann [85], waren die angegebenen Trockenmassen für SAP nicht geeignet. Eine Trockenmasse von 0,01 g SAP bei Verwendung einer Messbürette mit 2 ml Nennvolumen gewährt eine maximal ablesbare Wasseraufnahme des 200-fachen. Erste Tastversuche zeigten, dass die vorhandene Messkapazität als ausreichend bewertet werden konnte. Zudem wurde auf den Einsatz von Filterpapier unter der Probe verzichtet, da bei Untersuchungen mit solch geringen Mengen eine Beeinflussung des zeitabhängigen Wasseraufnahmevermögens der SAP durch das Filterpapier nicht ausgeschlossen werden konnte.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei dem verwendeten Versuchsaufbau eine eindimensionale Wasseraufnahme der SAP stattfindet (Abb. 10-2, links). Bei vollständiger Homogenisierung der SAP-Partikel im Mörtel besteht hingegen ein allseitiger Kontakt zu dem umgebendem Quellmittel bzw. Porenwasser, wodurch eine größere Wasseraufnahme in gleicher Zeit stattfinden kann. Um qualitative Unterschiede im zeitabhängigen Wasseraufnahmevermögen verschiedener SAP zu identifizieren und zur Gewährleistung gleichbleibender Prüfbedingungen wurde das zuvor beschriebene Prüfverfahren verwendet. Abb. 10-3 zeigt ein SAP-Partikel (SAP 3) vor und nach der vollständigen Wasseraufnahme (Quellmittel: Leitungswasser).



Abb. 10-3: Mikroskopaufnahmen eines SAP-Partikels vor und nach einem Quellvorgang in Wasser. Links: SAP im Ausgangszustand. Rechts: SAP nach vollständiger Wasseraufnahme

Für die experimentelle Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens der in Tab. 10-1 aufgeführten SAP wurde zum einen herkömmliches Leitungswasser und zum anderen das Porenwasser des Bereitstellungsgemisches (Komponente A) des Basismörtels M0 (Kapitel 8.1, Tab. 8-1), nachfolgend als Blutwasser bezeichnet, verwendet. Hintergrund hierbei war, das tatsächlich mögliche Wasseraufnahmevermögen der SAP in einem Fluid zu bestimmen, dessen Chemie durch Zusatzmittel aber auch durch Zement und Bentonit beeinflusst ist. Der Mörtel war zum Zeitpunkt der Filtration rd. 24 Stunden alt. Laut [96, 97] sind insbesondere die gelösten Ionen Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> bei zementösen Systemen sowie der pH-Wert wesentliche Einflussgrößen auf das Wasseraufnahmevermögen von SAP. Die Ergebnisse sind in Abb. 10-4 für unterschiedliche Zeitskalen dargestellt. Die dazugehörigen Einzelergebnisse sind im Anhang in Kapitel A-6.4.3, Tab. A-40 dokumentiert.



Abb. 10-4: Zeitabhängiges Wasseraufnahmevermögen von drei unterschiedlichen SAP. Links: In Leitungswasser und in Blutwasser des Basismörtels M0 bis 3600 Sekunden. Rechts: In Blutwasser des Basismörtels M0 bis 60 Sekunden

Grundsätzlich wiesen alle SAP bis 3600 Sekunden einen ähnlichen Verlauf des Wasseraufnahmevermögens auf. Die größte Wasseraufnahme fand innerhalb der ersten 600 Sekunden statt. Darauf folgend flachten die Kurven ab und erreichten nach 3600 Sekunden nahezu deren maximale Wasseraufnahme. Bei Einzelbetrachtung der Wasseraufnahmen in Leitungswasser wird deutlich, dass SAP 2 nach 3600 Sekunden im Vergleich zu den anderen SAP eine wesentlich geringere maximale Wasseraufnahme (wA: 8.000% bzw. 80 [g/g]) aufwies. SAP 1 und SAP 3 verhielten sich ab 900 bis 3600 Sekunden ähnlich und unterschieden sich primär in der anfänglichen Wasseraufnahmegeschwindigkeit. Das SAP 1 wies in Leitungswasser die stärkste Wasseraufnahme bis 900 Sekunden auf.

Bei Verwendung von Blutwasser als Quellmittel ist zu erkennen, dass das maximale Wasseraufnahmevermögen und die Wasseraufnahmegeschwindigkeit aller SAP im Vergleich zum Leitungswasser deutlich reduziert waren. Das maximale Wasseraufnahmevermögen war im Vergleich zum verwendeten Leitungswasser um mehr als die Hälfte reduziert. SAP 3 zeigte dabei das größte Wasseraufnahmevermögen. Bei Betrachtung des Zeitfensters bis 60 Sekunden (Abb. 10-4, rechts) zeigte sich weiterhin, dass das SAP 3 bei umgebendem Blutwasser in der Lage war, das Fluid wesentlich rascher aufzunehmen als SAP 1 und SAP 2. Das SAP 3 weist gemäß Abb. 10-1 die höchste Feinheit der untersuchten SAP auf, was als Grund für die vergleichsweise rasche Fluidaufnahme vermutet werden kann. Für den Anwendungsfall im System eines aktivierten Ringspaltverfüllmaterials und für eine rasche Gelierung ist eben diese Zeitskala maßgebend.

### 10.1.2 Viskositätsänderung

Neben einem ausreichenden Wasseraufnahmevermögen der SAP ist die Verfestigung bzw. Viskositätsänderung unmittelbar nach deren Zugabe für den Einsatz als physikalischer Aktivator für Ringspaltverfüllmaterialien von entscheidender Bedeutung. Dazu wurden Drehmomentmessungen mit den in Tab. 10-1 aufgeführten SAP in Wasser und Blutwasser mit unterschiedlichen SAP-Konzentrationen durchgeführt. Ergänzend zu dem Wasseraufnahmevermögen der SAP kann die Bestimmung der Viskositätsänderung herangezogen werden, um das Potential verschiedener SAP im Hinblick auf eine rasche Verfestigung der Komponente A qualitativ zu bewerten. Die Versuche wurden mit dem Viskomat NT der Firma Schleibinger durchgeführt. Das verwendete Messprofil ist in Abb. 10-5, links gezeigt. In Vorversuchen hat sich das Mörtelpaddel als geeignet erwiesen. Bei dem Leimpaddel kam es im Zuge der Wasseraufnahme der SAP bei hohen Konzentrationen und der damit einhergehenden Hydrogelbildung zu einem Aufbrechen des Gesamtgefüges (Abb. 10-5, Mitte, rechts). In der Folge kam es zu stark schwankenden Drehmomentverläufen und teilweise zu einer ausgeprägten Abnahme des Drehmoments.



Abb. 10-5: Links: Messprofil des Rheometers zur Bestimmung der Viskositätsänderung durch den Einsatz von SAP. Mitte: Prüffähiges Medium: 200 g Lsg./ g SAP. Rechts: Unzureichend/kritisch prüffähiges Medium: 100 g Lsg./ g SAP

Für die Untersuchungen zur Viskositätsänderung infolge einer SAP-Zugabe zu Wasser wurden je SAP-Typ zwei unterschiedliche Konzentrationen von 5 g/l und 10 g/l betrachtet. Im Rahmen der Versuche mit Blutwasser kam aufgrund des geringeren Wasseraufnahmepotentials (Abb. 10-4) eine erhöhte SAP-Konzentration von 20 g/l zum Einsatz. Werden diese Konzentrationen auf die Wassergehalte typischer Ein-Komponenten-Mörtel (Tab. 3-2) ohne Berücksichtigung des "gebundenen" Wassers der Bentonitsuspension bezogen, so liegen die SAP-Gehalte bei einer Konzentration von 5 g/l im Bereich von rd. 0,6 bis 1 kg/m<sup>3</sup> und bei einer Konzentration von 20 g/l (Blutwasser) im Bereich von rd. 2,7 bis 4,2 kg/m<sup>3</sup>. Die Ergebnisse der Drehmomentmessungen mit Beginn nach vollständiger Zugabe der SAP sind in Abb. 10-6 dargestellt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.3, Tab. A-45 dokumentiert.



Abb. 10-6: Einfluss der SAP-Konzentration, des SAP-Typs und des umgebenden Fluides auf die Viskosität (Drehmomenterfassung) des Gesamtsystems (SAP und Quellmittel)

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass es mit zunehmender SAP Konzentration zu einer höheren Viskosität bzw. zu einer Steigerung des Drehmomentes kam (Abb. 10-6, links). Bei Verwendung von Blutwasser kam es trotz einer erhöhten Konzentration der SAP zu einer verzögerten Zunahmerate des Drehmomentes (Abb. 10-6, rechts). Bei Einzelbetrachtung der jeweiligen SAP-Typen zeigten diese durchweg die gleichen Tendenzen. Besonderheit hierbei ist die Drehmomententwicklung im Blutwasser. SAP 3 führte im Vergleich zu den anderen SAP zu einer früher einsetzenden und stärkeren Drehmomentzunahme innerhalb der ersten 300 Sekunden. Eine Zunahme des Drehmomentes wurde nach rd. 40 Sekunden aufgezeichnet. Bei dem SAP 2 kam es erst ab rd. 150 Sekunden zu einer Drehmomentzunahme, wobei das Drehmoment dann aber rapide anstieg und zum Ende der Messung den größten Wert annahm. Eine Viskositätszunahme durch SAP 1 konnte ebenfalls nach rd. 40 Sekunden verzeichnet werden. Im Vergleich zum SAP 3 war die Drehmomententwicklung weniger stark ausgeprägt.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde das SAP 3 für die weiteren Untersuchungen am Mörtel ausgewählt. Dieses besaß nach einer Zeit von 60 Sekunden nach Kontakt mit Blutwasser ein Wasseraufnahmevermögen des rd. 10-fachen der eigenen Trockenmasse bzw. 1.000 %. Wird der Zeitpunkt von 60 Sekunden als Grenzwert für eine hinreichende Gelzeit angenommen und bei Betrachtung eines typischen Gesamtwassergehaltes von bedingt-aktiven Ein-Komponenten-Mörtel von durchschnittlich 170 Litern Zugabewasser und rd. 170 Liter Wasser in der Bentonitsuspension (vgl. Tab. 3-2), so wäre je m<sup>3</sup> Mörtel zur Aufnahme eben dieses freien Wassers ein SAP-Gehalt von rd. 34 kg notwendig. In [24] wurde bei einem bedingt-aktiven Ein-Komponenten-Mörtel mit einem Zementgehalt von 120 kg/m<sup>3</sup> (B-120) unter Druck (2,5 bar für 30 Minuten) eine Filtratwasserabgabe von rd. 8 M.-% ermittelt. Wird dies gleich dem freien Wasser im Mörtel gesetzt (mittlere Frischmörtelrohdichte: 2.045 kg/m<sup>3</sup>, vgl. Tab. 3-2), so beträgt der Gehalt an freiem Wasser rd. 164 l/m<sup>3</sup> und entspricht in etwa dem Zugabewasser. Auf dieser Grundlage beträgt der SAP-Gehalt zur Aufnahme des freien Wassers innerhalb der ersten 60 Sekunden nach Zugabe rd. 16,4 kg/m<sup>3</sup>. Wie anfänglich erwähnt, findet in dem Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens nur eine eindimensionale Wasseraufnahme statt. Es wird also folgend davon ausgegangen, dass bei allseitigem Kontakt der SAP zu dem Porenwasser bzw. bei homogener Verteilung der SAP in einem Mörtel eine stärker ausgeprägte Wasseraufnahme in gleicher Zeit stattfindet.

Demzufolge wurde auf Basis orientierender Vorversuche als Ansatz für eine hinreichende Verfestigung bzw. Gelierung des Mörtels und auf Basis eines Wasseraufnahmevermögens des SAP 3 nach 60 Sekunden von 1.000% ein Mengenbereich der SAP von 4 bis 8 kg je m<sup>3</sup> Mörtel ausgewählt. Dies entspricht rd. 25 bis 50 % bezogen auf den SAP-Gehalt, welcher rechnerisch notwendig wäre, das gesamte freie Wasser innerhalb von einer Minute aufzunehmen. Zudem kann die reduzierte Menge an SAP dadurch begründet werden, dass die hier verwendeten Mörtel im Vergleich zum Basismörtel M0 (Tab. 8-1), dessen Blutwasser zur Bestimmung des Fluidaufnahmevermögens verwendet wurde (vgl. 10.1.1, Abb. 10-4), eine geringere Zementmenge besitzen. Dies bedingt eine chemisch günstigere Zusammensetzung des Porenwassers, was wiederrum zu einer größeren Wasseraufnahme der SAP führt. In Abb. 10-7 ist das auf Basis des gemessenen Wasseraufnahmevermögens des SAP 3 (Abb. 10-4, links; Quellmittel: Blutwasser) rechnerische Wasseraufnahmevermögen bei einem Gehalt von 4, 6 und 8 kg SAP je m<sup>3</sup> Mörtel dargestellt. Zudem sind in Abb. 10-7 die Gesamtwassergehalte (Zugabewasser + Wasser aus Bentonitsuspension) sowie die einfachen Mengen des Zugabewassers üblicher Ein-Komponenten-Mörtel (B-120, B-60, I-0; vgl. Tab. 3-2) angegeben.



Abb. 10-7: Rechnerische Wasseraufnahme von SAP 3 im Blutwasser (pH-Wert: 12) und Gegenüberstellung des zeitabhängigen Wasseraufnahmevermögens und den Wassergehalten üblicher Ein-Komponenten-Mörtel (zu aktivierende Komponente)

Es wird ersichtlich, dass das SAP 3 mit einem Gehalt von 6 kg/m<sup>3</sup> in der Lage ist, dass freie Wasser bzw. Zugabewasser der hier betrachteten Ein-Komponenten-Mörtel nach rd. 480 Sekunden vollständig aufzunehmen und bei Erreichen dessen maximalen Wasseraufnahme geringfügig unter dem Gesamtwassergehalt der Mörtel liegt. Unter der Voraussetzung, dass ebenfalls das Wasser aus der Bentonitsuspension für den Quellvorgang zur Verfügung steht, würde eine Erhöhung des SAP-Gehaltes von 6 auf 8 kg/m<sup>3</sup> dazu führen, dass die SAP das gesamte Wasser vollständig aufnehmen und im Endzustand nur teilgequollen vorliegen. Bei zusätzlichem Wasserzutritt in den Ringraum, kann dies zu einer weiteren Wasseraufnahme der SAP führen. Dies hätte unter Umständen ein Quellen und somit bei einem vollständig verfüllten Ringraum einen Spannungsaufbau zur Folge. Bei einer physikalischen Aktivierung von Ein-Komponenten-Mörteln ist somit grundsätzlich zu berücksichtigen, dass der SAP-Gehalt auf das verfügbare Wasser abgestimmt wird und es so bei nachträglichem Wasserkontakt zu keinem weiteren Quellvorgang kommt.

## **10.2 Verwendung unbehandelter SAP als Aktivator**

### 10.2.1 Ausgangsstoffe und Herstellung

Auf Grundlage der ermittelten Wasseraufnahmevermögen und Viskositätsänderungen der SAP in Wasser und Blutwasser wird im Folgenden die Verfestigung von Ein-Komponenten-Mörteln durch eine Zugabe von SAP untersucht. Dabei wurden das Gelierverhalten, die Scherfestigkeitsentwicklung sowie die Druckfestigkeitsentwicklung betrachtet. Als Komponente A wurden zwei praxisübliche bedingt-aktive und ein inerter Mörtel ausgewählt (Tab. 10-2). Die physikalische Aktivierung von Ein-Komponenten-Mörteln entspricht somit gemäß der Differenzierung von Ringspaltverfüllmaterialien in Abb. 3-1 einem Zwei-Komponenten-Mischsystem. Die Zusammensetzungen der Mörtel für die Laboruntersuchungen sind im Anhang in Kapitel A-6.3.1, Tab. A-12 dokumentiert.

	Zement	Wasser	Sand 0-1 mm	Sand 0-2 mm	Kies 2-8 mm	Bentonit-Suspension (Konzentration 6 %)	Flugasche
	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m <sup>3</sup>	kg/m³
B-120	120	177	169	674	454	183	268
B-60	60	164	169	674	454	166	328
I-0	0	135	169	674	454	183	420

Tab. 10-2:Zusammensetzungen bedingt-aktiver und inerter Ein-Komponenten-Mörtel nach [24] für die<br/>experimentellen Untersuchungen im Rahmen der physikalischen Aktivierung

Die Herstellung des Ein-Komponenten-Mörtels (Komponente A) erfolgte mit einem Eimermischer. In einem ersten Schritt wurden die trockene Gesteinskörnung und das Bindemittel in den Mischer eingefüllt und für rund 30 Sekunden homogenisiert. Anschließend wurden das Zugabewasser und die Bentonitsuspension vollständig in den laufenden Mischprozess hinzugegeben. Darauffolgend wurde der gesamte Mörtel für zwei Minuten gemischt. Zur separaten Herstellung der Bentonitsuspension kam ein hochtouriger Dispergierer zum Einsatz (vgl. Kapitel 8.2). Die Bentonitsuspension wurde 24 Stunden vor Herstellung des Mörtels hergestellt, um einen ausreichenden Quellvorgang des Bentonites zu gewährleisten. Die Aktivierung des Mörtels über die Zugabe der SAP erfolgte durch einen hochtourigen, handgeführten Quirl innerhalb eines Zugabezeitraums von 30 Sekunden. Die SAP wurden dem Mörtel bei drehendem Mischwerkzeug gleichmäßig beigegeben.

Gemäß den Betrachtungen in Kapitel 10.1 wurde das SAP 3 für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, da dieses Produkt sowohl das höchste Wasseraufnahmevermögen aufwies als auch die stärkste Viskositätszunahme im Blutwasser verursachte. Als Zugabemengen wurden gemäß den Betrachtungen in Abb. 10-7 4, 6 und 8 kg/m<sup>3</sup> ausgewählt.

# 10.2.2 Gelierung und anfängliche Verfestigung

In Abb. 10-8 ist das Ausbreitmaß nach DIN EN 1015-3 [117] des inerten Mörtels I-0 unmittelbar nach Herstellung (links) und 2 Minuten nach Zugabe der SAP (rechts) bei einem SAP-Gehalt von 6 kg/m<sup>3</sup> dargestellt. Die Verfestigung des Mörtels hat innerhalb von zwei Minuten das durch den Konus definierte Minimum von 10 cm erreicht. Selbst bei zugeführter Energie infolge der Schläge bei der Bestimmung des Ausbreitmaßes blieb das Material formstabil und zeigte ein gutes Zusammenhaltevermögen.



*Abb. 10-8: Links: Ausbreitmaβ gemäβ [117] des zementfreien Mörtels I-0 ohne SAP. Rechts: Ausbreitmaβ des Mörtels I-0 zwei Minuten nach Zugabe der SAP (6 kg/m<sup>3</sup>)* 

#### **10.2.3 Scherfestigkeit**

Im Rahmen der Untersuchungen zur Scherfestigkeitsentwicklung wurden die bedingt-aktiven Mörtel B-120 und B-60 und der inerte Ein-Komponenten-Mörtel I-0 (vgl. Tab. 10-2) verwendet, um den Einfluss unterschiedlicher Zementgehalte bzw. der Alkalität des Porenwassers auf das Verfestigungspotential ermitteln zu können. Die Scherfestigkeit wurde mit einem Flügelschergerät gemäß [60] bestimmt (vgl. Kapitel 9.2.1.8). Dafür wurden für jeden Prüfzeitpunkt rd. 15 Liter des Mörtels in einem Eimermischer hergestellt und die SAP wie in Kapitel 10.2.1 beschrieben in den Mörtel eingemischt. Die Ergebnisse der Scherfestigkeitsprüfungen sind differenziert nach SAP-Gehalt für die Mörtel B-120, B-60 und I-0 sowie exemplarisch für den Mörtel B-120 bei variablem SAP-Gehalt in Abb. 10-9 aufgeführt. Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.3, Tab. A-42 dokumentiert.



Abb. 10-9: Scherfestigkeitsentwicklung bis 30 Minuten nach Aktivierung von Ein-Komponenten-Mörteln mit variierendem Zementgehalt bei unterschiedlichen SAP-Zugabemengen

Anhand der Ergebnisse in Abb. 10-9 wird grundsätzlich deutlich, dass eine zunehmende Menge an SAP erwartungsgemäß auch zu einer höheren Scherfestigkeit führte. Weiterhin wird ersichtlich, dass mit steigendem Zementgehalt im Mörtel die Scherfestigkeit reduziert wurde, was auf das reduzierte Wasseraufnahmevermögen der SAP durch die Chemie bzw. höhere Alkalität des Porenwassers zurückzuführen ist (vgl. Abb. 10-4). Somit wies der inerte Mörtel I-0 die höchste Scherfestigkeit über den gesamten Prüfzeitraum auf. Nichtdestotrotz erfüllten und überstiegen alle hier geprüften Kombinationen den Richtwert der Scherfestigkeit von 2 kN/m<sup>2</sup> nach 30 Minuten. Im Vergleich zu den in [24] ermittelten Scherfestigkeiten der Mörtel B-120, B-60 und I-0 im Rahmenscherversuch (direkter Scherversuch nach [118]) mit einem Entwässerungsvorgang bei einem Druck von 2,5 bar über 30 Minuten weisen die physikalisch aktivierten Mörtel nach 30 Minuten leicht geringere Scherfestigkeiten auf, welche aber nach 60 Minuten auf vergleichbarem Niveau und zum Teil darüber liegen (Abb. 10-10). Das sich die Scherfestigkeiten der im Rahmenscherversuch geprüften Mörtel nicht signifikant in Abhängigkeit des Mörtels unterscheiden, liegt an deren vergleichbaren Sieblinien und dem maßgeblichen Anteil der Gesteinskörnung an der Höhe der Scherfestigkeit bei einem direkten Scherversuch [24]. Der zementfreie Mörtel I-0 besitzt bereits 10 Minuten nach Aktivierung vergleichbare Scherfestigkeiten.



Abb. 10-10: Vergleich der Scherfestigkeitsentwicklung von physikalisch aktivierten Ein-Komponenten-Mörteln und den im Rahmenscherversuch ermittelten Scherfestigkeiten von nicht-aktivierten Ein-Komponenten-Mörteln aus [24]

## **10.2.4 Druckfestigkeit**

Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit der physikalisch aktivierten Ein-Komponenten-Mörtel B-120, B-60 und I-0 erfolgte nach [104] an zylindrischen Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm. Es wurde ein SAP-Gehalt von 6 kg/m<sup>3</sup> gewählt. Die Ergebnisse sind in Abb. 10-11 dargestellt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.3, Tab. A-43 dokumentiert. Die Proben wurden, wenn möglich, nach 24 Stunden ausgeschalt, in Folie eingewickelt und auf nassem Sand in einem verschließbaren Behälter gelagert (vgl. Abb. 8-3). Im Rahmen der Prüfung konnte an dem inerten Mörtel I-0 zu keinem Zeitpunkt eine einaxiale Druckfestigkeit ermittelt werden.



Abb. 10-11: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit durch SAP aktivierter bedingt aktiver Ein-Komponenten-Mörtel im Vergleich zu einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel

Bei den bedingt aktiven Mörteln B-120 und B-60 konnte mit steigendem Zementgehalt eine zunehmende Druckfestigkeit ermittelt werden, wobei eine Verdopplung des Zementgehaltes von 60 auf 120 kg/m<sup>3</sup> zu einer signifikanten Erhöhung der Druckfestigkeit zu jedem Zeitpunkt führte. Die Druckfestigkeiten des Mörtels B-60 mit 6 kg/m<sup>3</sup> SAP und die des Basismörtels liegen nach 28 Tagen auf gleichem Niveau. Nach 230 Tagen wies der Mörtel B-60 eine Druckfestigkeit von 1,5 N/mm<sup>2</sup> auf. Bei dem Mörtel B-120 wurden mit rd. 2,8 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen wesentlich höhere Festigkeiten im Vergleich zum Basismörtel erzielt. Bei kombinierter Betrachtung der relevanten Festigkeiten im Bereich der unmittelbaren Bettung (Scherfestigkeit) und im Bereich der Langzeitbettung (Druckfestigkeit) lässt sich ein Schnittpunkt hinsichtlich des notwendigen Zement- und SAP-Gehaltes ableiten. Bei Verwendung von 60 kg/m<sup>3</sup> Zement und 6 kg/m<sup>3</sup> SAP wurde den superabsorbierenden Polymeren nach Zugabe zum Mörtel ein chemisches Milieu geboten, in welchem das Wasseraufnahmevermögen ausreichend für eine rasche Verfestigung war und folglich die Generierung einer anforderungsgerechten Scherfestigkeit ermöglicht wurde. Zudem entwickelte das aktivierte Material mit einem Zementgehalt von 60 kg/m<sup>3</sup> über die Zeit eine Druckfestigkeit, wie sie im Endzustand von Ringspaltverfüllmaterialien (Tab. 5-2) gefordert wird.

## 10.2.5 Einmischbarkeit von SAP in Mörtel

Bei der Zugabe von SAP zu einem wasserhaltigen System kommt es unmittelbar nach Kontakt zu einer Wasseraufnahme und somit zu einer Viskositätserhöhung des Gesamtgemischs. Innerhalb der Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung des physikalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterials konnte festgestellt werden, dass bis zu einer Menge an SAP von 6 kg/m<sup>3</sup> diese noch homogen in den Mörtel einmischbar waren. Die Einmischzeit der SAP betrug grundsätzlich 30 Sekunden. Wie in Abb. 10-12 anhand der Bruchfläche eines zylindrischen Prüfkörpers (Ø: 100 mm) zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit gezeigt, kam es bei einer SAP Menge von 8 kg/m<sup>3</sup> teilweise zu einer Agglomeration der SAP.



Abb. 10-12: Bildung von Agglomeraten aus SAP während des Einmischprozesses in einen bedingt aktiven Ein-Komponenten-Mörtel (Bruchfläche eines Festkörpers des Mörtel B-120 mit 8 kg/m<sup>3</sup> SAP)

Als Grund für die Agglomeratbildung kann vermutet werden, dass es durch die über 30 Sekunden stattfindende stetige Zugabe der SAP zum Mörtel während des Einmischprozesses bereits innerhalb dieses Zugabezeitraums zu einem ausgeprägten Anstieg der Viskosität kam. Als Folge wurde eine weitere homogene Einmischung der SAP erschwert, was schließlich zu einer Agglomeratbildung der SAP-Partikel im Mörtel führte. Im Falle einer notwendigen Erhöhung des SAP-Gehaltes zur Erzielung der geforderten Verfestigung liegt es nahe, die SAP in einer suspendierten Form beizugeben.

## 10.2.6 Gefügeentwicklung (REM-Aufnahmen)

Zur Beurteilung der Verteilung und der Einbindung der SAP in das Mörtelgefüge wurden Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) an Bruchstücken des bedingt aktiven Ein-Komponenten-Mörtels B-60 mit einer SAP-Gehalt von 6 kg/m<sup>3</sup> erstellt (Abb. 10-13). Das Alter der Probe zum Zeitpunkt der Aufnahme betrug 7 Tage. In Abb. 10-13, links ist eine Gesamtaufnahme eines SAP (rot umrandet) im Mörtel sowie die durch den Quellvorgang entstandene Pore (blaue Linie) gezeigt. Diese Pore entspricht der eigentlichen Größe des SAP im ungestörten Mörtel. Durch die Präparation der Probe und dem Aufbau eines Vakuums in der Aufnahmekammer des REM kam es zu einem Wasserverlust und somit zu einem "Schrumpfen" des SAP.



Abb. 10-13: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von SAP im Mörtel (B-60) nach 7 Tagen: Links: Ansicht eines SAP im Mörtelgefüge (Maßstab: 500 μm). Rechts: Gequollenes SAP (Hydrogel) mit Anhaftungen von Flugaschepartikeln (Maßstab: 20 μm).

Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass das SAP-Partikel vollständig suspendiert im Mörtel vorlag. Es waren keine Agglomerate, wie in Abb. 10-12 gezeigt, aufzufinden. Diese Primärpartikelverteilung ist wesentliche Voraussetzung für eine optimale innere Entwässerung des Mörtels. Zudem ist in Abb. 10-13, rechts erkennbar, dass die SAP als ungestörtes Hydrogel vorlagen und Flugaschepartikel nur teilweise an den Randbereichen der SAP anhafteten.

# 10.3 Verwendung von SAP-Suspensionen als Aktivator

## 10.3.1 Ausgangsstoffe

Die Verwendung vorgequollener bzw. suspendierter SAP ergibt sich aus verfahrenstechnischen Gründen. Innerhalb von Voruntersuchungen zur verfahrenstechnischen Eignung der physikalischen Aktivierung kam es während der Injektion unbehandelter SAP (Komponente B) in den Volumenstrom der Komponente A zu einer vorzeitigen Wasseraufnahme dieser an der Injektionsöffnung. Dies führte zu einem Verstopfen der Düsenöffnung und einem Stillstand der Förderung der SAP. Bei diesen Versuchen wurde eine Sandstrahldüse zur Injektion der SAP verwendet. Um ein Verstopfen der Leitungen zu vermeiden, ist es notwendig, die SAP in einer stabilen suspendierten Form dem Mörtelstrom beizugeben. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es bei einer Suspendierung von SAP in einer wässrigen Lösung immer zu einer gewissen Wasseraufnahme kommt. Somit besitzen die SAP nicht das gleiche Quellpotential wie in unbehandelter bzw. trockener Form. Die Konsequenz dieses Ansatzes war eine Erhöhung des SAP-Gehaltes und somit die Kompensation der vorzeitigen Wasseraufnahme in der Lösung. Zudem wird durch die Verwendung einer wässrigen Lösung zusätzliches Wasser in den Mörtel eingebracht. Dies kann durch eine Anpassung des Wassergehaltes des Mörtels zum Teil kompensiert werden. Treffen die suspendierten teil-vorgequollenen SAP auf den Mörtel so wird durch das Porenfluid des zementarmen Mörtels eine Art Verdünnung des auf chemischer Ebene nachteiligeren Trägerfluids verursacht. Dadurch wird der Quellprozess der SAP wieder angeregt bzw. fortgesetzt. Hierbei spielt allerdings die Chemie des freien Wassers im Mörtel eine wesentliche Rolle (vgl. Kapitel 10.1.1, Abb. 10-4), weshalb als Basis für die Komponente A eine zementarme Rezeptur bzw. ein bedingt-aktiver Ein-Komponenten-Mörtel herangezogen wurde. Für die Verwendung suspendierter SAP war es notwendig den Wassergehalt des Mörtels zu reduzieren. Grundlage hierfür bieten die Ergebnisse aus Kapitel 10.2 und die Zusammensetzung des Mörtels B-60 (vgl. Tab. 10-2). Ziel dieser Modifikationen war die Reduktion des Wassergehaltes bei Einhaltung der geforderten Konsistenz und Pumpbarkeit. Der modifizierte Mörtel ist in Tab. 10-3 dargestellt und dem klassischen bedingt-aktiven Mörtel gegenübergestellt.

 Tab. 10-3:
 Modifizierter bedingt-aktiver Ein-Komponenten-Mörtel "mod. B-60" als Komponente A für die physikalische Aktivierung durch suspendierte SAP

	CEM I 42,5 R	Wasser	Sand 0-1 mm	Sand 0-2 mm	Kies 2-8 mm	Bentonit- Suspension (Konzentration 6%)	Flug- asche	Fließ- mittel
	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
B-60	60	164	169	674	454	166	328	0
mod. B-60	60	68	272	735	598	166	328	2,4-4,0

Das Zugabewasser wurde dabei von 164 auf 68 Liter reduziert und es wurde ein Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether eingesetzt. Der Wassergehalt der Bentonitsuspension wurde konstant belassen. Zeitgleich wurde der Gehalt an Gesteinskörnung im Mörtel erhöht, um eine entsprechend hohe Packungsdichte der Gesteinskörnung zu erzielen. Aufgrund des reduzierten Wassergehaltes besaß der Mörtel mod. B-60 eine signifikant reduzierte Fließfähigkeit. Dies war durch eine Zugabe von Fließmittel (FM) kompensierbar, wie in Abb. 10-14 gezeigt.



Abb. 10-14: Pumpverhalten des modifizierten Ein-Komponenten-Mörtels "mod. B-60". Links: Ohne Zugabe von Fließmittel. Rechts: Mit Zugabe von Fließmittel

Trotz der im Vergleich zum klassischen Mörtel B-60 weniger fließfähigen Konsistenz zeigte sich der modifizierte Mörtel mit Fließmittelzugabe für einen Pumpvorgang geeignet. Das Material verteilte sich nach Austritt aus der Förderleitung bei angeschlossenem Statikmischer gleichmäßig. Untersuchungen zur Verpresseignung dieses Mörtels bzw. der Komponenten A sind in Kapitel 11.6.3 gezeigt. Neben der Fließfähigkeit ist eine hohe Sedimentationsstabilität, z.B. für den Fall eines Stillstandes der Tunnelvortriebsmaschine und dem dadurch bedingten Verbleib des Mörtels in den Leitungen, entscheidend für die Eignung eines Ringspaltverfüllmaterials. Die Blutwassermengen nach 24 Stunden betrugen bei dem modifizierten Mörtel "mod. B-60" sowohl mit als auch ohne Zugabe von Fließmittel nach 24 Stunden rd. 1,1 M.-% und entsprechen somit den üblichen Anforderungen.

### 10.3.2 Methoden zur Suspendierung von SAP

Auf Basis der physikalischen Vorgänge während eines Quellvorgangs von superabsorbierenden Polymeren (vgl. Kapitel 7.3) bestehen unterschiedliche Möglichkeiten die SAP in eine Suspension zu überführen. Das hierbei verwendete superabsorbierende Polymer (SAP 3) basiert auf vernetztem Natriumpolyacrylat. Diese Netzwerke sind polar und besitzen durch das angelagerte Natrium-Ion einen Salzcharakter. Das Wasseraufnahmevermögen wird daher zum einen durch deren Polarität, vor allem aber durch den osmotischen Druck verursacht. Um superabsorbierende Polymere in einen suspendierten Zustand ohne ausgeprägten Quellvorgang überführen zu können, bestehen die Möglichkeiten den osmotischen Druck zu reduzieren, unpolare bzw. schwach polare Flüssigkeiten zu verwenden oder grundlegend den Wasserzutritt zum SAP zu verhindern. Mögliche materialtechnologische Ansätze sind nachstehend aufgeführt:

- <u>Natriumsalzhaltige, wässrige Lösungen (Verringerung des osmotischen Drucks)</u> Beispiel: Natriumchlorid (NaCl), Natrium-Dihydrogen-Phosphat (NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>). Die Verwendung von natriumsalzhaltigen, wässrigen Lösungen sind wirtschaftlich vorteilhaft, müssen aber in hohen Konzentrationen eingesetzt werden. Im Zuge des direkten Kontakts zwischen Tübbing und Ringspaltverfüllmaterial kann dies zu dauerhaftigkeitsrelevanten Problemen bzw. einer Verschärfung der Randbedingungen für eine schädigende Korrosion der Bewehrung der Tübbinge führen. Natrium-Dihydrogen-Phosphat besitzt zudem eine verzögernde Wirkung in zementösen Systemen durch die Bildung von schwerlöslichen Calciumphosphaten.
- 2. Unpolare oder schwach polare Flüssigkeiten als Transportmittel

Beispiele: Alkohole, Fett/Fettsäuren, Öle/Ölsäuren, Alkane (Paraffine).

Der Einsatz solcher Trägerfluide ist durch deren Brennbarkeit begrenzt. Zudem sind diese Stoffe leicht flüchtig, wasserunlöslich und zum Teil gesundheitsschädlich. Weiterhin können Fette/Fettsäuren langfristig betonschädigend wirken. Ausnahme hierbei ist Glycerin (schwache Polarität). Dabei handelt es sich um einen Zucker-Alkohol, welcher schwerflüchtig, entflammbar erst ab 160/176°C, wasserlöslich und ungiftig ist. Zudem kann bei Verwendung von Glycerin als Trägerfluid unter Sauerstoff- und Lichtabschluss keine Betonschädigung eintreten.

### 3. Hydrophobierung der SAP mit wasserabweisenden Substanzen

Beispiele: Fette, Wachse, Silikone.

Eine Hydrophobierung über eine Imprägnierung der SAP ist auf technischer Ebene schwer umsetzbar. Damit das SAP unmittelbar nach der Injektion in den Mörtel das Wasser aufnehmen kann, muss auf chemischer Ebene in sehr schneller Zeit die Hydrophobierung gelöst werden. Demzufolge muss der Mörtel (Komponente A) eine Substanz (z.B. Alkohol, Lösungsmittel, etc.) dafür beinhalten.

Zur Untersuchung der Suspendierung der SAP für den Anwendungsfall eines physikalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterials wurde exemplarisch die Verwendung von Glycerin als Trägerfluid betrachtet. Zum einen aufgrund der Umweltverträglichkeit, zum anderen aber auch aufgrund der Viskosität (über den Wassergehalt steuerbar), welche mit der Viskosität klassischer Wassergläser vergleichbar ist. Daneben wurden auch Natriumchlorid- sowie Natrium-Dihydrogen-Phosphat-Lösungen orientierend untersucht. Bei der Natriumchlorid-Lösung wurde zur Reduktion des Saugverhaltens der SAP eine NaCl-Konzentration zwischen 3 und 5 M.-% notwendig. Zur Erzielung einer pumpfähigen Komponente B (Lösung + SAP) wurde iterativ und unter Berücksichtigung einer noch hinreichenden Viskosität eine optimale Lösungsmenge von 41,6 Gramm Lösung je Gramm SAP (Konzentration: 24 g SAP/l) bestimmt. Dies hat zur Folge, dass bei einer SAP-Menge von 6 kg/m<sup>3</sup> dem Mörtel eine Gesamtmenge an Komponente B von 250 Litern hinzugegeben werden muss. Allerdings war die SAP-NaCl-Lösung über 24 Stunden stabil. Bei der Verwendung von Natrium-Dihydrogen-Phosphat war unter Berücksichtigung der Viskosität und Verarbeitbarkeitsdauer eine Konzentration von 10 M.-% notwendig. Hierbei wurde ebenfalls eine SAP-Konzentration von 24 g/l eingesetzt. Unabhängig der Art des Trägerfluids konnte unmittelbar nach Zugabe der suspendierten SAP zum Mörtel keine hinreichende Gelierung und Verfestigung beobachtet werden. Vielmehr kam es bei den aktivierten Mörteln über mehrere Tage hinweg zu einer starken Sedimentation und einem Entmischen der beiden Komponenten. Dies war primär durch die große Menge an Komponente B und der dadurch hervorgerufenen Verflüssigung in Kombination mit dem nur unzureichenden Saugverhalten der SAP in dem resultierenden Porenwasser des Gesamtsystems bedingt. Die beiden verwendeten Natrium-Träger waren somit nicht in der Lage eine Gelierung und anschließende Verfestigung in hinreichender Zeit herbeizuführen.

In den weiteren Versuchen wurde Glycerin als Trägerfluid herangezogen. Hierbei konnte bei einer Konzentration von 95 % Glycerin und 5 % Wasser in der Gesamtlösung eine hinreichende Viskosität – ähnlich der von Kalium-Wasserglas – erzeugt werden. Zudem war kein Quellen der SAP in kritischem Ausmaß zu beobachten und die Langzeitstabilität (Lagerung über 24 Stunden) war gegeben. Es kam hierbei augenscheinlich betrachtet zu keiner signifikanten Viskositätszunahme der Lösung über die Zeit. Unter 50 % Glycerin in der Gesamtlösung (Rest: demineralisiertes Wasser) kam es zu einem raschen und fast vollständigen Aufquellen der SAP und zu einem Ansteifen der Komponente B innerhalb weniger Minuten. Für die weiteren Versuche wurde ein SAP-Gehalt von 9 kg/m<sup>3</sup> gewählt, um die vorzeitige Wasseraufnahme der SAP in dem Trägerfluid zu kompensieren. Dabei konnte in Vorversuchen eine optimale Lösungsmenge (95 % Glycerin, 5 % Wasser) von 16,7 g je g SAP bestimmt werden. Bei einer SAP-Zugabemenge von 9 kg/m<sup>3</sup> entspricht dies einer Gesamtmenge an Lösung von Komponente B von rd. 150 kg (121 Liter). Diese Mehrmenge an Trägerfluid im Gesamtsystem kann durch den reduzierten Wassergehalt des Mörtels "mod. B-60" kompensiert werden (Tab. 10-3). Innerhalb der Versuche kam als Komponente A der in Tab. 10-3 angegebene modifizierte Ein-Komponenten-Mörtel zum Einsatz. Das Verhältnis vom Komponente A zu Komponente B beträgt 6,5/1.

#### 10.3.3 Viskositätsänderung bei Verwendung einer SAP-Suspension

Analog zu den Untersuchungen in Kapitel 10.1.2, Abb. 10-6 wurden mit der SAP-Suspension Drehmomentmessungen zur Erfassung der Viskositätsänderung durchgeführt. Als Quellmittel wurden 230 ml des Blutwassers des Basismörtels M0 verwendet. Dies entspricht dem Gesamtwassergehalt von einem Liter des Ein-Komponenten-Mörtels "mod. B-60". Die SAP-Suspension setzt sich aus rd. 150 g (120 ml) Trägerfluid (95% Glycerin, 5% Wasser) mit einer darin suspendierten SAP-Menge von 9 g (Konzentration: 16,7 g Trägerfluid / g SAP) zusammen. In dem Gesamtsystem lagen folglich rd. 380 g (350 ml) Quellmittel vor. Damit betrug die SAP-Konzentration rund 25 g/l. Der damit ermittelte Verlauf des Drehmomentes über einen Zeitraum von 900 Sekunden im Vergleich zu einer Zugabe von unbehandelten SAP mit einer Konzentration von 20 g/l mit Blutwasser als Quellmittel ist in Abb. 10-15 dargestellt. Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.3, Tab. A-45 dokumentiert.



Abb. 10-15: Links: Vergleichende Gegenüberstellung der Viskositätsänderung nach Zugabe von unbehandelten und suspendierten SAP zu Blutwasser (pH: 12). Rechts: Durch suspendierte SAP (1g SAP auf 16,7 g Trägerfluid bestehend aus 95% Glycerin und 5 % Wasser) aktivierter Mörtel (mod. B-60) nach 15 Minuten (Kantenlänge: 100 mm).

Im Vergleich zu der unbehandelten Zugabe der SAP wurde bei Verwendung von suspendierten SAP deutlich, dass die Viskositätszunahme verzögert stattfand, es aber mit zunehmender Zeit ab ca. 400 Sekunden zu einem starken Anstieg des Drehmoments und somit indirekt der Viskosität kam. Dabei wurden die maximalen Drehmomente der unbehandelt zugegebenen SAP deutlich überschritten. Hier kann die erhöhte Konzentration der SAP als Grund für das höhere Drehmoment vermutet werden. Anhand der Ergebnisse in Abb. 10-15 bestätigt sich das eingangs angenommene Prinzip, dass es zu einer Verdünnung des Trägerfluids durch das auf chemischer Ebene für eine Wasseraufnahme günstigere Blutwasser kommt und so der Quellvorgang der SAP – wenn auch zeitlich verzögert – wieder angeregt wird und der Gelzustand herbeigeführt wird. In Abb. 10-15, rechts ist eine nach 15 Minuten entformte Probe des durch suspendierte SAP aktivierten Mörtels "mod. B-60" dargestellt. Die gewählte Kombination aus Mörtel, SAP-Menge und Trägerfluid führte innerhalb eines kurzen Zeitraumes zu der angestrebten Verfestigung des Mörtels.

#### **10.3.4 Scherfestigkeit**

Die mit der zuvor beschriebenen Kombination (SAP: 9 kg/m<sup>3</sup>; Trägerfluid: 16,7 g/g SAP; Mörtel: mod. B-60) generierbaren Scherfestigkeiten bis 60 Minuten nach Aktivierung sind in Abb. 10-16 dargestellt. Zusätzlich ist in Abb. 10-16 die Scherfestigkeitsentwicklung bei einer reduzierten Menge an Trägerfluid von 15 g/g SAP (135 kg Trägerfluid bzw. 109 Liter für 1m<sup>3</sup> Mörtel) sowie ergänzend die Scherfestigkeitsentwicklung des Mörtels B-60 bei unbehandelter SAP-Zugabe dargestellt. Das volumetrische Verhältnis von Komponente A zu B beträgt 6,5/1. Die Einzelergebnisse sind im Anhang in Kapitel A-6.4.3, Tab. A-44 dokumentiert.



Abb. 10-16: Scherfestigkeiten von physikalisch aktivierten Ein-Komponenten-Mörteln. Gegenüberstellung von "mod. B-60" mit suspendierten SAP mit einem SAP-Gehalt von 9 kg/m<sup>3</sup> aber unterschiedlichen Gehalten an Trägerfluid und "B-60" mit 6 kg/m<sup>3</sup> SAP bei unbehandelter Zugabe

Anhand der Ergebnisse in Abb. 10-16 wird ersichtlich, dass mit einem SAP Gehalt von 9 kg/m<sup>3</sup> und einem Gehalt an Trägerfluid von 16,7 g/g SAP der Richtwert an die Scherfestigkeit von 2 kN/m<sup>2</sup> nach 30 Minuten erreicht werden konnte. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Scherfestigkeiten bei Verwendung suspendierter SAP im Vergleich zu einer unbehandelten Zugabe wesentlich reduziert waren. Eine Reduktion der Menge an Trägerfluid in Komponente B um 15 kg (15g Trägerfluid/g SAP: 135 kg Lösung; 16,7g Lsg./g SAP: 150 kg Lösung) führte zu einer Steigerung der Scherfestigkeit, insbesondere innerhalb der ersten 15 Minuten. Zeitgleich war allerdings festzustellen, dass es durch die Reduktion der Lösungsmenge in Komponente B unmittelbar nach Zugabe zum Mörtel zu einem raschen Ansteifen gekommen war, sodass Probekörper nur mit unzureichender Homogenität hergestellt werden konnten. Um die Gefahr einer unzureichenden Fließfähigkeit unmittelbar nach Aktivierung und somit eine mögliche inhomogene Verfüllung des Ringspaltes zu vermeiden, wurde bei einem SAP-Gehalt von 9 kg/m3 eine Menge an Trägerfluid (95% Glycerin, 5 % Wasser) von 16,7 g/g SAP (Gesamtmenge: 150,3 kg) für die anschließenden Untersuchungen zur Verpresseignung herangezogen (Kapitel 11.6.3). Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass das Material auch unmittelbar nach der Aktivierung und während des Einpressvorgangs in den Ringspalt noch in der Lage ist, den Ringraum und dahingehend auch Imperfektionen in der Ausbruchlaibung vollständig und homogen auszufüllen, bevor der Gelzustand bzw. das Ende der Verarbeitungsphase erreicht wird.

## 10.4 Fazit

Die Verwendung superabsorbierender Polymere als physikalische Aktivatoren für Ringspaltverfüllmaterialien hat sich als zielführendes und gleichsam steuerbares Instrument erwiesen. Durch das enorme Wasseraufnahmevermögen kam es nach Zugabe innerhalb weniger Minuten zu einer Gelierung bzw. Verfestigung sowie zu einer anschließenden raschen Scherfestigkeitsentwicklung. Die Endfestigkeit wurde bei bedingt-aktiven Mörteln und einer unbehandelten Zugabe der SAP durch die Hydratation des Bindemittels sichergestellt. Das Wasseraufnahmevermögen, als wesentliche Eigenschaft für die Wirksamkeit von SAP als physikalische Aktivatoren, ist stark von der Chemie des Porenwassers abhängig. Ein steigender Zementgehalt des Mörtels verursachte durch die erhöhte Alkalität im System eine Reduktion des Wasseraufnahmevermögens der SAP (Abb. 10-17, links). Dies führte zu einer weniger rasch ablaufende Scherfestigkeitsentwicklung. Zeitgleich war aber für eine hinreichende Druckfestigkeitsentwicklung und Endfestigkeit ein entsprechender Zementgehalt notwendig (Abb. 10-17, rechts). Bei dem Einsatz von SAP als physikalischer Aktivator für Ringspaltverfüllmaterialien sind somit der indirekte Einfluss des Zementgehaltes auf die Frühfestigkeitsentwicklung sowie der direkte Einfluss auf die Endfestigkeit zu berücksichtigen.



Abb. 10-17: Schematische Darstellung der Abhängigkeit zwischen dem Zementgehalt des Mörtels und dem Wasseraufnahmevermögen der SAP (links) sowie der Früh- bzw. Scherfestigkeits- und Druckfestigkeitsentwicklung (rechts) eines durch SAP aktivierten Ringspaltverfüllmaterials

Eine rasche Verfestigung des aktivierten Ringspaltverfüllmaterials sowie eine hinreichende Scherfestigkeitsentwicklung konnte bei einem bedingt-aktiven Ein-Komponenten-Mörtel durch einen SAP-Gehalt von 6 kg/m<sup>3</sup> erzielt werden. Bei der Verwendung von suspendierten SAP wurde zur Kompensation des zusätzlichen Fluides in Komponente B ein modifizierter, bedingt aktiver Mörtel mit geringerem Wassergehalt eingesetzt. Bei einem SAP-Gehalt von 9 kg/m<sup>3</sup> und einem Gehalt des Trägerfluids von 16,7 g/g SAP konnte sowohl eine verarbeitbare Komponente B als auch eine hinreichende Verfestigung und Scherfestigkeitsentwicklung erzielt werden. Zusammenfassend konnten eindeutige und für den praktischen Anwendungsfall relevante Korrelationen zwischen dem SAP-Gehalt, der Chemie der Komponente A, dem Gehalt an Trägerfluid und den erzielbaren Eigenschaften des aktivierten Mörtels identifiziert werden. Die Scherfestigkeitsentwicklung kann über den Zement- und SAP-Gehalt oder durch die Menge an Trägerfluid bei suspendierten SAP gesteuert werden. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist eine Bereitstellung der SAP in suspendierter Form vorzuziehen. Bei einer Injektion von unbehandelten SAP in den Volumenstrom des Mörtels ist eine unzureichende Durchmischung bzw. Agglomeratbildung der SAP bis hin zu einem Verstopfen der Mischeinheit nicht auszuschließen.

# 11 Simulation der Ringspaltverpressung

Im Rahmen der Konzeptionierung neuartiger, aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien ist neben der Ermittlung von zeitabhängigen Materialeigenschaften auch die Überprüfung der verfahrenstechnischen Eignung bzw. grundlegend der Verpressbarkeit notwendig. Dahingehend wurde ein großformatiger Versuchsstand entwickelt, mit welchem die Vorgänge der Ringspaltverpressung von zweikomponentigen Ringspaltverfüllmaterialien im maschinellen Tunnelbau realitätsnah simuliert werden können. Hierbei stehen die Ausbreitung des aktivierten Ringspaltverfüllmaterials bei Eintritt in den Ringspalt, eine mögliche Mörtel/Boden-Interaktion sowie die einschlägigen Festigkeiten nach einem Verpressvorgang im Fokus. Im Zuge dessen wurden ebenfalls Modifikationen der Verpresseinrichtung bzw. Mischeinheiten für die neu konzeptionierten Mörtel notwendig. In [11, 119] sind Versuche zur Ringspaltverpressung von ein-komponentigen Mörteln im halb-technischen Maßstab dargestellt. Bei diesen Untersuchungen stand neben der Verteilung des Ein-Komponenten-Mörtels im Ringspalt und den Scherfestigkeiten nach einem druckbedingten Verpressvorgang auch die Entwicklung des Verpressdruckes und der Grad der Entwässerung im Fokus. Teile der hier vorgestellten Ergebnisse sind auch in [101, 120] veröffentlicht.

# 11.1 Konzept des Versuchsstandes

Der Versuchsstand hat die Aufgabe den Prozess der Ringspaltverpressung unter realitätsnahen Randbedingungen im halb-technischen Maßstab zu simulieren. Der Aufbau bildet im Querschnitt einen Teilausschnitt des Schildschwanzes mit einer Lisene, den Tübbingausbau, den Ringspalt sowie den angrenzenden Boden ab. Die Systemgrenzen sind in Abb. 11-1 veranschaulicht.



Abb. 11-1: Querschnitt eines Tübbingausbaus mit verfülltem Ringspalt und angrenzendem Boden sowie Differenzierung der Systemgrenzen für den Versuchsstand zur Simulation einer Ringspaltverpressung

Zur möglichst realitätsnahen Simulation der Ringspaltverpressung wurden in der Planung und Entwicklung des Versuchsstandes typische System- und Steuergrößen von Tunnelbauprojekten adaptiert. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, liegt die durchschnittliche Ringspaltdicke zwischen 8 und 20 cm. Für den Versuchsstand wurde eine Ringspaltdicke von 15 cm gewählt. Eine übliche Segmentbreite des Tübbingausbaus in Tunnellängsrichtung liegt bei ca. 1,5 m [121]. Diese Abmessung in Längsrichtung wurde übernommen und die Ringspaltbreite zu 0,6 m gewählt. Der resultierende Ringraum besitzt somit die Form eines Quaders (Länge: 1,5 m, Breite: 0,6 m, Höhe: 0,15 m) mit einem Volumen von 135 Litern. Die Verfahrgeschwindigkeit und somit die resultierende Dauer eines Verpressvorgangs wurde von bekannten Vortriebsgeschwindigkeiten realer Tunnelbauprojekte abgeleitet [11, 47, 57]. Die Vortriebsgeschwindigkeit kann stufenlos in einem Bereich von 0 bis 120 mm/min eingestellt werden. Der Versuchsstand ist auf einen maximalen Druck im Ringraum von 2,5 bar ausgelegt (vgl. Kapitel 4.2). Die Dicke des simulierten Bodens wurde zu 30 cm gewählt, um im Rahmen der druckbeaufschlagten Verpressung von Ein-Komponenten-Mörteln die Entwässerung in den Baugrund bzw. eine Sättigung über die Tiefe erfassen zu können.

## 11.2 Konstruktive Durchbildung

Der Versuchsstand (Abb. 11-2) kann in sechs Baugruppen eingeteilt werden: Wanne (Aufnahme des Bodens), Schlitten (simulierte Tunnelvortriebsmaschine bzw. dessen Schildschwanz), der Ringspalt, die Mischeinheit (Vermischung von Komponente A und B), die Rahmenkonstruktion und den Hydraulikantrieb inkl. Widerlager. Die Wanne (Abb. 11-2, Pos. 1), dient der Aufnahme von unterschiedlichen, gesättigten oder ungesättigten Böden. Die Innenmaße der Wanne betragen 1500 mm x 600 mm x 310 mm. Der Ringspalt (Pos. 2) wird durch einen Deckel aus Acrylglas mit einer allseitigen Stärke von 40 mm oder Stahl mit einer allseitigen Stärke von 10 mm geometrisch begrenzt. Die Innenabmessungen des Deckels betragen 1700 mm x 600 mm x 150 mm. Ein Auszug der Konstruktionszeichnungen des Versuchsstandes mit Angabe von Abmessungen ist im Anhang in Kapitel A-7, Abb. A-6 dargestellt.



Abb. 11-2: Gesamtansicht des Versuchsaufbaus zur Simulation einer Ringspaltverpressung

Die Tunnelvortriebsmaschine bzw. der Schildschwanz wird von dem Schlitten (Pos. 3) im Versuchsstand abgebildet. Dieser fährt während eines Versuches mit definierter Geschwindigkeit rückwärts aus dem Ringraum und gibt das zu verfüllenden Volumen frei. Die Mischeinheit als zentrales Bauteil (Pos. 4) dient der homogenen Durchmischung der Komponenten A und B. Die restlichen Teile des Versuchsaufbaus sind in die Baugruppen Rahmen (Pos. 5) und Hydraulik inkl. Widerlager (Pos. 6) unterteilt. Der Rahmen und das Widerlager sind mit dem Boden fest verankert. Die Abmessungen des gesamten Versuchsaufbaus ohne separate Bestandteile wie Hydraulikaggregat oder Zentralschmieranlage betragen 5,3 m in der Länge und rd. 1,0 m in der Breite und Höhe. Der Schlitten (Abb. 11-2, Pos. 3 und Abb. 11-3) bildet den Schildschwanz mit integrierter Lisene und Mischeinheit ab. Dieser ist in eine vordere (Pos. 1) und hintere Baugruppe (Pos. 2) unterteilt. Zudem ist an dem hinteren Teil des Schlittens die Verbindung zum Hydraulikzylinder (Pos. 3) angeordnet.



Abb. 11-3: Gesamtansicht des Schlittens (simulierter Schildschwanz)

Der vordere Schlitten erfüllt mehrere Aufgaben (Abb. 11-4). Die mittlere Öffnung (Abb. 11-4, links; Pos. 1) dient zur Injektion des Mörtels, die verbleibenden vier Öffnungen (Pos. 2) können mit Drucksensoren versehen werden, um den Druck im Ringspalt während des Verpressvorgangs in der Ebene der Mörtelöffnung zu erfassen. Bei den Sensoren handelt es sich um Einschraubsonden, welche für eine Druckerfassung in pastösen Medien ausgelegt sind. Die Anordnung der Drucksensoren ist so gewählt, dass die linken Sensoren den Druck über die Höhe messen, die rechten Sensoren die nächste sowie die weiteste Entfernung ausgehend von der Mörtelöffnung erfassen. Damit das Verpressmaterial während der druckbeaufschlagten Verfüllung nicht aus dem Ringraum herausgedrückt wird, wurden in Analogie zur tatsächlichen Durchbildung der Bürstendichtung einer Tunnelvortriebsmaschine zwei hintereinanderliegende Bürstendichtungen (Abb. 11-4, rechts; Pos. 1) in der Abbildung transparent dargestellt) am vorderen Schlitten angeordnet. Der Raum zwischen den Dichtungen wird mittels einer Zentralschmieranlage über neun Stellen (Abb. 11-4, rechts; Pos. 2) mit Mehrzweckfett kontinuierlich verfüllt, was eine zusätzlich abdichtende Ebene schafft und zudem die Reibung zwischen Schlitten und Deckel allseitig reduziert.



Abb. 11-4: Vorderer Schlitten: Links: Mörtelöffnung und Sensoren. Rechts: Abdichtungsebene

Die Verlegung der Rohre, Leitungen und Kabel im Schlitten ist in Abb. 11-5 dargestellt. Die Komponente A wird über eine DN 50 Leitung (Pos. 1) befördert. Hierbei stehen zwei alternative Fördermöglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann der Mörtel über eine Schneckenpumpe gefördert werden. Dies wurde in der Regel bei gesteinskörnungsfreien Leimen, wie beispielsweise der Komponente A eines Zwei-Komponenten-Mörtels praktiziert. Alternativ dazu, insbesondere für Mörtel bei Verwendung von Gesteinskörnungen, kommt ein mit druckluftbeaufschlagter Behälter mit einem Fassungsvermögen von 300 Litern zum Einsatz. Hierbei wird über Luftdruck das Material beaufschlagt und kontrolliert geregelt über einen Absperrschieber zur Mischeinheit geführt. Die Komponente B wird von einer separaten Exzenterschneckenpumpe gefördert und über eine Leitung (Abb. 11-5, Pos. 2) zur Mischeinheit transportiert. Das für die Dichtung benötigte Fett wird über neun Zuleitungen (Pos. 3) zum vorderen Schlitten befördert. Die Fettleitungen werden über Schnellkupplungen mit der Zentralschmieranlage verbunden, sodass ein fest montiertes Leitungssystem im Schlitten für die Abdichtung gegeben ist. Die Datenkabel (Pos. 4) der Sensoren werden parallel zu den Fettleitungen angeordnet.



Abb. 11-5: Kabel- und Leitungsmanagement im Schlitten

Das Verfahren des Schlittens erfolgt über einen Hydraulikzylinder. Der Zylinder ist über einen Gelenkkopf mit dem Schlitten verbunden (Abb. 11-6, links), was eine momentenfreie Kopplung ermöglicht. Durch Ventile kann die Verfahrgeschwindigkeit stufenlos geregelt werden. Die jeweils aktuelle Geschwindigkeit wird über eine digitale Prozessanzeige ausgegeben, welche mit einem Geschwindigkeitssensor (Seilzugaufnehmer) verbunden ist (Abb. 11-6, Mitte). Dieser ist am Widerlager des Zylinders befestigt und das dazugehörige Seil ist mit dem Schlitten verbunden (Abb. 11-6, rechts). Der Zylinder ist für eine Geschwindigkeit von 2,0 mm/min ausgelegt, was einer maximalen Vortriebsgeschwindigkeit von 120 mm/min entspricht.



Abb. 11-6: Links: Kopplung von Schlitten und Hydraulikzylinder. Mitte: Steuereinheit und Prozessanzeige. Rechts: Geschwindigkeitssensor

Die restliche Konstruktion dient zur Lagerung bzw. Stabilisierung der beweglichen und druckbeaufschlagten Bauteile. Die Wanne lagert auf drei HEM-Profilen (Abb. 11-7, Pos. 1), um den Transport des Versuchsstandes mit einem Gabelstapler zu ermöglichen. Darüber angeordnet liegen weitere HEM-Profile (Pos. 2), die das Verschieben der Wanne in horizontaler Richtung verhindern. Damit die Wanne nicht nach vorne bzw. hinten verschoben werden kann, sind Stirnbleche (Pos. 3) an die Träger geschraubt. Um ein Abheben des Deckels während der durchbedingten Verpressung zu verhindern, wird dieser mittels U-Profilen (Abb. 11-7, Pos. 4) in vertikaler Richtung gehalten. Dazu kann der Deckel über die umschließenden U-Profile fest mit der Unterkonstruktion (Pos. 2) verbunden werden. Um ein seitliches Verschieben des Deckels zu verhindern, werden am Fußpunkt der umschließenden Bügel Platten (Abb. 11-7, rechts, rot und gelb dargestellt) angesetzt, die durch den Anschraubdruck eine Konterwirkung erzeugen. Damit der Schlitten während des Ausfahrens stetig gelagert und geführt ist, wurden zwei HEM-Profile (Pos. 5) angeordnet. Zur Reibungsreduktion ist der Schlitten über den gesamten Verfahrweg auf Polytetrafluorethylen-Schienen (Pos. 6) gelagert.



Abb. 11-7: Links: Tragende Rahmenkonstruktion des Versuchstandes. Rechts: Kontereinrichtung zur horizontalen Lagerung des Deckels

Nach Abschluss eines Verpressvorgangs bzw. der vollständigen Verfüllung des Ringraumes kann der Deckel samt der darüber angeordneten Bügel abgehoben und die Probe für anschließende Untersuchungen freigegeben werden (Abb. 11-8).



Abb. 11-8: Darstellung des Versuchsstandes zur Simulation einer Ringspaltverpressung in der Endposition mit vollständig verpresstem Ringraum nach Freilegen der Probe

In Abb. 11-9, links ist eine Gesamtansicht des montierten Versuchsaufbaus mit angeschlossenen Leitungen in der Startposition dargestellt. In Abb. 11-9, rechts ist ein Blick in den Ringspalt mit noch nicht vollständig eingefahrenem Schlitten sowie eine Aufsicht der zweilagigen Bürstendichtung mit durch Fett verfülltem Zwischenraum gezeigt.



Abb. 11-9: Links: Versuchsaufbau in der Gesamtansicht. Rechts oben: Blick in den Ringspalt auf die Mörteleinfüllöffnung mit angeordnetem Boden. Rechts unten: Aufsicht der zweilagigen Bürstendichtungen mit durch Fett verfülltem Zwischenraum

# 11.3 Mischtechnik

# 11.3.1 Klassische und alkalisch aktivierte Zwei-Komponenten-Mörtel

Die Aktivierung klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel erfolgt im Versuchsstand über eine speziell angefertigte Mischvorrichtung, die aus Komponenten einer Spritzbetondüse besteht und in vier Bauteile aufgeteilt werden kann (Abb. 11-10). Das Kernstück ist die doppelwandige Injektionseinheit für den Aktivator (Abb. 11-10, Pos. 1). Diese Einheit besitzt zwei Schnellkupplungen (Pos. 1.1 / Pos. 1.2). Hierüber erfolgt zum einen die Zuleitung des Aktivators. Zum anderen kann eine Wasserleitung zur Reinigung der Injektionskanäle angeschlossen werden. Der Aktivator wird über ringförmig verteilte Öffnungen gleichmäßig in den Volumenstrom des Mörtels injiziert (Abb. 11-10, rechts). An der Injektionseinheit befinden sich zwei Kupplungsstücke (Pos. 2), die das Verbinden einer DN 50 Leitungskupplung (Camlock-Adapter) und einem 2-zölligen Gewinde ermöglichen. Des Weiteren verfügt die Mischeinheit über eine Reduktionseinheit (Pos. 3), die das Anbringen verschiedener Statikmischer mit unterschiedlichen Durchmessern, Längen und variabler Anordnung der Mischwerkzeuge ermöglicht. Der Statikmischer (Pos. 4) sorgt abschließend für eine homogene Vermischung der beiden Komponenten. Detaillierte Konstruktionszeichnungen der Mischeinheit sind im Anhang in Kapitel A-8 dargestellt.



Abb. 11-10: Links: Gesamtansicht der vollständig montierten Mischeinheit für klassische Zwei-Komponenten-Mörtel und das Konzept der alkalischen Aktivierung. Rechts: Aktivatorinjektion über ringförmig angeordnete Öffnungen

Zur Überprüfung einer hinreichenden Durchmischung der beiden Komponenten wurden Probekörper (Ø: 100 mm; Höhe: 200 mm) des Basismörtels M0, mit der in Abb. 11-10 gezeigten Mischeinheit hergestellt und die Druckfestigkeiten nach 1, 7, 14 und 28 Tagen bestimmt und mit den im Labor hergestellten Probekörpern (Kapitel 8.2) verglichen (Abb. 11-11). Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.4, Tab. A-46 dokumentiert. Die ermittelten Druckfestigkeiten zeigten eine gute Übereinstimmungen in deren Größenordnung und Verlauf und bestätigen somit, dass die konstruktive Durchbildung der Mischeinheit sowie die dazugehörige Pumpentechnik ein homogenes Vermischen beider Komponenten ermöglicht. Die Abweichung der Druckfestigkeiten der mittels Mischeinheit hergestellten Proben zu den im Labor hergestellten Proben betrug im Mittel über alle Prüfzeitpunkte rd. 10 %, was üblichen Prüfstreuungen zugeordnet werden kann.



Abb. 11-11: Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten des Basismörtels M0 bei einer händischen Vermischung der Komponenten und bei Verwendung der Mischeinheit

#### 11.3.2 Physikalisch aktivierte Mörtel

Für die Verpressung von physikalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien auf Basis klassischer Ein-Komponenten-Mörtel wurde eine separate Mischeinheit konzipiert (Abb. 11-12). Hierbei wurde ein Durchmesser der Mischeinheit von zwei Zoll gewählt, da das zu verpressende Ringspaltverfüllmaterial Gesteinskörnung bis 8 mm beinhaltet und Stopfer, insbesondere an den angeordneten Mischwerkzeugen im Statikmischer, zu vermeiden sind. Bei dieser Mischvorrichtung erfolgt die Injektion des Aktivators durch eine mittig im Volumenstrom des Mörtels angeordnete separate Leitung und nicht wie bei den gesteinskörnungsfreien Zwei-Komponenten-Mörteln über die Innenwandung der Mischeinheit. Dadurch soll vermieden werden, dass es zu Verstopfungen der Injektionsöffnung infolge einer Agglomeratbildung bereits (teil)gesättigter SAP-Partikel kommt. Bei einer zentrierten Injektion in den Volumenstrom der zu aktivierenden Komponente werden Anhaftungen durch den vorbei fließenden Mörtel selber dauerhaft abgetragen und die Gefahr einer Stopferbildung in der Zuleitung von Komponente B reduziert. Der Aktivator wird dabei mit einem auf das Fördervolumen und den Förderdruck von Komponente A leicht erhöhten Druck injiziert. Detaillierte Konstruktionszeichnungen der Mischeinheit sind im Anhang in Kapitel A-9 dargestellt.



Abb. 11-12: Mischeinheit für die physikalische Aktivierung und Konstruktionsdetail zur Injektion von suspendierten SAP (Komponente B) in den Volumenstrom eines Ein-Komponenten-Mörtels (Komponente A)

## 11.4 Druckerfassung im Ringraum

Zur Überprüfung der Druckverteilung im Ringspalt während eines Verpressvorgangs wurde orientierend im Rahmen der Untersuchungen zur Verpresseignung von nicht-aktivierten Ein-Komponenten-Mörteln ein Abgleich des eingestellten Drucks im Mörtelvoratsbehälter und des im Ringraum resultierenden Drucks durchgeführt. Bei den an der Stirnseite angeordneten Drucksensoren (vgl. Abb. 11-3 und Abb. 11-4) handelt es sich um Einschraubsonden mit Keramiksensor und einem messbaren Nenndruckbereich von 0 bis 4 bar. Die Ergebnisse der Druckmessung und die Anordnung der Messstellen sind in Abb. 11-13 gezeigt. Die Zuleitung (M) für den Ein-Komponenten-Mörtel wurde außermittig angeordnet und der Druck über drei separate Sensoren (P1-P3) erfasst. Die Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.4, Tab. A-47 dokumentiert.



Abb. 11-13: Druckmessung im Ringraum in der Ebene der Mörtelöffnung während eines Verpressvorgangs eines Ein-Komponenten-Mörtels (Verpressdruck: 0,5 bar, Geschwindigkeit: 60 mm/min)

Hierbei wurde der Schlitten zu Beginn des Verpressvorgangs nicht vollständig eingefahren, sondern rd. 10 cm vor dem Ende des Ringraums gehalten. Die Mörtelleitung wurde geöffnet und der freie Ringraum gefüllt. Unmittelbar danach wurde der Schlitten mit einer Geschwindigkeit von 60 mm/min ausgefahren. Nach Füllung des ersten Bereiches kam es zu einem steilen Druckanstieg innerhalb von rd. 90 Sekunden auf den Sollwert von 0,5 bar. Dieser Wert wurde während des gesamten Versuches konstant gehalten. Es wurden ca. 75 cm des Ringraums (entspricht einem Volumen von rd. 70 Litern) verpresst. Der Druckanstieg am Ende des Verpressvorgangs wurde durch das "Einschießen" der Druckluft mit dem verbleibenden Mörtel im Druckbehälter verursacht. Anhand der Einzelverläufe der Drucksensoren (Abb. 11-13, rechts) ist erkennbar, dass die Drücke und die gemessenen Schwankungen der jeweiligen Kurven parallel verliefen. Die gemessenen Drücke aller Sensoren lagen im Bereich zwischen 0,49 und 0,51 bar. Daraus ist zu schließen, dass die Druckverteilung im Ringraum über die Höhe und Breite konstant war. Hiermit ist gewährleistet, dass es an jeder Stelle des verpressten Ringspaltverfüllmaterials zu einer gleichen Druckbeaufschlagung kommt und ein homogenes Material für anschließende Prüfungen vorliegt.

# 11.5 Laborböden (simulierter Baugrund)

Zur Bestimmung möglicher Interaktionen zwischen Boden und Mörtel im Anschluss an einen Verpressvorgang, wie beispielsweise eine Entwässerung oder Infiltration von Feinteilen, können in den Versuchsstand zur Simulation einer Ringspaltverpressung rd. 300 Liter Bodenmaterial eingebracht werden. Hierzu wurden drei unterschiedliche Laborböden konzipiert und deren Durchlässigkeitsbeiwerte rechnerisch bestimmt. Gemäß DIN 18130-1 [122] können Böden anhand der Durchlässigkeitsbeiwerte charakterisiert werden. Diesen Durchlässigkeitsbewerten können folgend in grober Unterteilung auch Bodenarten zugeordnet werden [123] (Tab. 11-1).

Durchlässigkeitsbeiwert k (m/s)	Bezeichnung	Bodenart [123]
über 10 <sup>-2</sup>	sehr stark durchlässig	Sandiger Kies
10 <sup>-4</sup> bis 10 <sup>-2</sup>	stark durchlässig	Sand
10 <sup>-6</sup> bis 10 <sup>-4</sup>	durchlässig	Schluff-Sand-Gemisch
10 <sup>-8</sup> bis 10 <sup>-6</sup>	schwach durchlässig	Schluff
unter 10 <sup>-8</sup>	sehr schwach durchlässig	Ton

Tab. 11-1: Durchlässigkeitsbeiwerte unterschiedlicher Bodenarten gemäß DIN 18130-1 [122]

Die Zusammensetzungen der Laborböden für die Verpressversuche wurden in der Art festgelegt, dass Boden 1 einen Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  von  $10^{-2}$  m/s (stark durchlässig), Boden 2 von  $10^{-4}$  m/s (durchlässig) und Boden 3 von  $10^{-5}$  m/s (durchlässig bis schwach-durchlässig) aufweist. Diese Unterteilung wurde gewählt, um mit Boden 3 ( $k_f$ :  $10^{-5}$  m/s) für die Verpressvorgänge von Ein-Komponenten-Mörteln und den physikalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien grenzwertige Bedingungen für eine Entwässerung zu schaffen (vgl. Tab. 3-4). Bei Verwendung von Boden 2 ( $k_f$ :  $10^{-4}$  m/s) für die Verpressvorgänge klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel und alkalisch aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien werden kritische Randbedingungen für eine Infiltration des Mörtels in den Boden generiert. Die Laborböden wurden aus gewaschenem Quarzsand und Quarzkies unterschiedlicher Korngruppen zusammengestellt. In Abb. 11-14 sind die Kornverteilungen der Böden dargestellt.



Abb. 11-14: Kornverteilung der für die Verpressversuche ausgewählten Böden mit Durchlässigkeiten k<sub>f</sub> von: 10<sup>-2</sup>, 10<sup>-4</sup>, 10<sup>-5</sup> m/s (Anhang, Kapitel A-6.4.4, Tab. A-48)

Zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes ist vergleichend die theoretische Bestimmung nach Hazen und nach Beyer angewendet worden [124]. Bei der Berechnung nach Hazen wird die Durchlässigkeit ( $k_f$  [m/s]) des Bodens anhand des Korndurchmessers bei 10 und 60 Gew.-% der Bestandteile und einem empirischen Beiwert C, welcher von dem Ungleichförmigkeitsgrad U abhängt, ermittelt. Voraussetzung für die Anwendung der Berechnung nach Hazen ist ein Ungleichförmigkeitsgrad U  $\leq$  5, da es sich dabei um gleichförmige Böden handelt. Der Anwendungsbereich ist hierbei auf Durchmesser von 0,1 bis 3 mm bei einem Durchgang von 10 M.-% begrenzt. Bei der Methode nach Beyer wird die Durchlässigkeit durch Multiplikation eines Koeffizienten C mit dem Quadrat des Korndurchmessers bei 10 M.-% bestimmt. Für die in Abb. 11-14 aufgeführten Kornverteilungen resultieren gemäß den Berechnungen nach Hazen und Beyer die in Tab. 11-2 aufgelisteten Beiwerte und Durchlässigkeiten. Auf Basis dieser Berechnungsverfahren gilt Boden 1 nach DIN 18130-1 als sehr stark durchlässig, Boden 2 als stark durchlässig und Boden 3 als durchlässig (vgl. Tab. 11-1). In Abb. 11-15 sind Fotoaufnahmen der Laborböden dargestellt.

Beiwerte	Boden 1	Boden 2	Boden 3			
Durchmesser bei 10 M% [mm]	1,45	0,14	0,072			
Durchmesser bei 60 M% [mm]	4,49	0,49	0,155			
Cu [-] nach DIN EN ISO 14688-2	3,10	3,66	2,15			
Charakterisierung gemäß Ungleich- förmigkeitszahl	Gleichförmig	Gleichförmig	Gleichförmig			
Berechnung nach Hazen						
Empirischer Gesteinsbeiwert C	0,0116	0,0116	0,0139			
k <sub>f</sub> [m/s]	3,4*10-2	2,9*10-4	7,2*10 <sup>-5</sup>			
Berechnung nach Beyer						
Koeffizient C	0,0090	0,0090	0,0100			
k <sub>f</sub> [m/s]	1,9*10-2	1,7*10-4	5,2*10-5			

Tab. 11-2: Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte der Laborböden nach Hazen und Beyer



Abb. 11-15: Fotodokumentation der Laborböden. Links: Laborboden 1 ( $k_f$ : 10<sup>-2</sup> m/s), Mitte: Laborboden 2 ( $k_f$ : 10<sup>-4</sup> m/s), Rechts: Laborboden 3 ( $k_f$ : 10<sup>-5</sup> m/s)

# 11.6 Verpressvorgänge von Ringspaltverfüllmaterialien

In den nachfolgenden Kapiteln sind die Untersuchungen zur verfahrenstechnischen Eignung der in dieser Arbeit betrachteten Ringspaltverfüllmaterialien aufgeführt. Zur Validierung der Funktionsfähigkeit des Versuchsstandes wurde in einem ersten Schritt ein Verpressvorgang mit dem Basismörtel M0 als klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel durchgeführt. Weiterhin wurden zwei alkalisch aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien mit unterschiedlichen Zement/Hüttensand-Verhältnissen und variablem Aktivatorgehalt und ein zementfreier Zwei-Komponenten-Mörtel bei Verwendung einer Calciumhydroxid-Suspension als Gelierhilfe betrachtet. Im Bereich der physikalischen Aktivierung wurden in einem ersten Schritt mit einem modifizierten, nicht-aktivierten Ein-Komponenten-Mörtel Verpressversuche mit Blick auf dessen verfahrenstechnische Eignung als Komponente A für die Aktivierung durch SAP durchgeführt. Daran anschließend wurde zur Überprüfung der Eignung einer SAP-Suspension als physikalischer Aktivator ein separater Verpressversuch durchgeführt.

## 11.6.1 Klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel

Vorgeschaltet zu den Verpressvorgängen der Materialkonzepte wurde als "verfahrenstechnische Bezugsebene" der Basismörtel M0 in einem Verpressvorgang hinsichtlich dessen Fließeigenschaften nach Aktivierung im Ringspalt und anschließender Festigkeitsentwicklung untersucht. Hierbei wurde Boden 2 mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 1,7\*10<sup>-4</sup> m/s (durchlässig) eingesetzt. Die Vortriebsgeschwindigkeit wurde zu 90 mm/min (Verpressdauer: ca. 17 Minuten) gewählt. Die Versuche wurden drucklos gefahren, da hierdurch die Verwendung einer Begrenzung des Ringraumes aus Acrylglas ermöglicht wird, wodurch das Fließ- und Gelierverhalten bzw. die Ausbreitung des aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels (Aktivatorgehalt: 90 kg/m<sup>3</sup>; Gelzeit: 9,5 Sek.) direkt bei Eintritt in den Ringraum beobachtet werden kann (Abb. 11-16).



Abb. 11-16: Füllvorgang des Ringraumes mit einem praxisüblichen Zwei-Komponenten-Mörtel (Basismörtel M0, Aktivatorgehalt: 90 kg/m<sup>3</sup>, Gelzeit: rd. 9 Sek.)

In Abb. 11-17 sind die Kontaktbereiche von aktiviertem Mörtel zum vorderen Schlitten bzw. zur zweischichtigen Bürstendichtung in der Draufsicht (links) und in der Seitenansicht (rechts) während eines laufenden Verpressvorgangs dargestellt. Dabei kam es zu keinem Austritt von Mörtel bzw. zu keinem Durchdringen der Dichtungsebene.



Abb. 11-17: Füllvorgang des Ringraumes mit einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel (Basismörtel M0). Links: Kontakt von Mörtel und umlaufender Dichtebene in der Aufsicht. Rechts: Seitenansicht des vollständig verpressten Ringraumes

Der verpresste Basismörtel wurde ausgehend vom Erstkontakt von Mörtel und Aktivator nach 30 Minuten entformt. Somit lagen zwischen Aktivierung und Entformen des zuletzt verpressten Mörtels rd. 13 Minuten. Das aktivierte Material war an jeder Stelle formstabil und augenscheinlich betrachtet homogen bzw. gleichmäßig geliert (Abb. 11-18).



Abb. 11-18: Freigelegte Probe des Basismörtels M0 (Aktivator: 90 kg/m<sup>3</sup>, Gelzeit: 9 Sek.) nach einem Verpressvorgang (Alter der Probe: 30 Minuten nach Verpressbeginn)

An dem freigelegten Material wurde die Scherfestigkeitsentwicklung mit einem Flügelschergerät nach DIN 4094-4 [60] bestimmt (Abb. 11-19, links/Mitte). Die erste Messung fand dabei nach rd. 40 Minuten nach Verpressbeginn statt. Zur Bestimmung der Scherfestigkeit wurde der Scherflügel grundsätzlich mittig über die Probenhöhe, d.h. mit gleichem Abstand zur Ober- und Unterkante des Mörtels, positioniert. Die Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen sind in Abb. 11-19, rechts dargestellt und der Scherfestigkeitsentwicklung des gleichen Mörtels bei separater Herstellung im Labor gegenübergestellt (vgl. Abb. 8-16). Die Einzelwerte sind im Angang in Kapitel A-6.4.4, Tab. A-49 dokumentiert.



Abb. 11-19: Links/Mitte: Vorgehen zur Bestimmung der Scherfestigkeiten am Basismörtel M0 nach einem Verpressvorgang. Rechts: Vergleich der Scherfestigkeiten des Basismörtels M0 (Aktivatorgehalt: 90 kg/m<sup>3</sup>) nach einem Verpressvorgang mit den Ergebnissen an Laborprüfkörpern

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass das verpresste Material insbesondere bis rd. 40 Minuten nach Aktivierung tendenziell eine höhere Scherfestigkeit aufwies, was durch eine intensivere Durchmischung der beiden Komponenten in der Mischeinheit bedingt sein kann. Ab einem Zeitraum von ca. 80 Minuten lagen die Scherfestigkeiten auf annähernd gleichem Niveau, wobei die Laborproben einen stärkeren Festigkeitszuwachs aufwiesen.

Die vergleichenden Betrachtungen der Scherfestigkeitsentwicklung bestätigen, dass die konstruktive Durchbildung des Versuchsstandes in Kombination mit der gewählten Mischtechnik zu einer homogenen Vermischung der beiden Komponenten und gleichmäßigen Verteilung des aktivierten Materials im Ringraum führt. Lokal unzureichend verfestigte Bereiche oder Imperfektionen hinsichtlich der Ausbreitung des aktivierten Mörtels im Ringraum würden zu deutlich geringeren Scherfestigkeiten führen. Weiterhin konnte während des Ausbaus der Probe keine Interaktion mit dem angrenzenden Boden in Form von zum Beispiel einer Infiltration beobachtet werden.

Neben der Bestimmung der wesentlichen Materialparameter im jungen Mörtelalter wurde ebenfalls das Fließverhalten des Basismörtel M0 während des Eintritts in den Ringspalt separat untersucht. Dazu wurden dem Mörtelstrom über eine Dosiereinrichtung zu Anfang der Förderleitung suspendierte Farbpigmente zugegeben. Die sich ergebenden Farbausbreitung nach Eintritt in den Ringspalt ist in Abb. 11-20 gezeigt. Anhand der Farbverteilung wird ersichtlich, dass es ausgehend von der Mörtelöffnung primär zu einer horizontalen Mörtelausbreitung kam. Dabei verteilte sich die Farblösung in Höhe der Verpressöffnung über die Gesamtbreite des Ringraumes gleichmäßig. Bei einer Simulation der Ringspaltverpressung mit dem hier eingesetzten Versuchsaufbau ist demnach von einer homogenen Verteilung des Ringspaltverfüllmaterials auszugehen.



Abb. 11-20: Visualisierung des Fließverhaltens eines Zwei-Komponenten-Mörtels (Basismörtel M0) durch Injektion einer hochpigmentierten Lösung in die Mörtelleitung während eines laufenden Verpressversuches

## 11.6.2 Alkalisch aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien

Zur Überprüfung der Verpresseigenschaften von alkalisch aktivierten Zwei-Komponenten-Mörteln, deren eine gezielte Aktivierung von latent-hydraulische Stoffen zugrunde liegt und welche dahingehend veränderte Geliereigenschaften aufweisen, wurden zwei Mörtel mit Zement als Gelierhilfe aber unterschiedlichen Bindemittel-Aktivator-Konfigurationen sowie ein Mörtel mit Verwendung einer Calciumhydroxid-Suspension als Gelierhilfe untersucht.

### 11.6.2.1 Alkalisch aktivierte Mörtel mit Zement als Gelierhilfe

Bei den teil-zementösen Systemen mit Hüttensand als Hauptbindemittelanteil wurden zwei Mörtel untersucht, welche sich sowohl in deren Gelierverhalten als auch in der anschließenden Frühfestigkeitsentwicklung wesentlich voneinander unterscheiden. Zum einen wurde der Mörtel mit 80 kg/m<sup>3</sup> Zement und 239 kg/m<sup>3</sup> Hüttensand in Kombination mit dem Aktivator mit einer MVZ von 2,6 und einem Gehalt von 90 kg/m3 (rd. 6,9 Vol.-%/Komp. A) (Mörtelbezeichnung: 80 2,6) untersucht. Dieser Mörtel besitzt eine verlängerte Gelzeit und eine verzögerte Frühfestigkeitsentwicklung. Zum anderen wurde der Mörtel mit 160 kg/m3 Zement und 159 kg/m3 Hüttensand in Kombination mit einem Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4) mit einem Gehalt von 60 kg/m<sup>3</sup> (4,5 Vol.-%/Komp. A) (Mörtelbezeichnung: 160 3,4) verpresst. Mit dieser Zusammensetzungen wurde innerhalb der Untersuchungen zum Gelierverhalten eine anforderungsgerechte Gelzeit von rd. 11 Sekunden erzielt (Abb. 9-12). Diese Mörtel wurden ausgewählt, um den kombinierten Effekt eines höher-alkalischen Aktivators mit geringem Zementgehalt (Mörtel: 80 2,6) und einer auf Basis der Untersuchung zur Gelzeit abgestimmten Bindemittel/Aktivator-Konfiguration (160 3,4) auf die verfahrenstechnische Eignung zu eruieren. Die Verfahrgeschwindigkeit des Schlittens wurde bei dem Mörtel 80 2,6 zu 60 mm/min und bei dem Mörtel 160 3,4 zu 90 mm/min gewählt, um entsprechend der zu erwartenden Festigkeitsentwicklung ein schnelles Entformen und eine zeitnahe Bestimmung der Scherfestigkeiten zu ermöglichen. Bei allen Versuchen wurde der Boden 2 mit einem Durchlässigkeitsbeiwert nach Beyer von 1,7\*10<sup>-4</sup> m/s (vgl. Kapitel 11.5) verwendet.

Während des Verpressversuches konnte bei dem Mörtel 80\_2,6 durchweg eine homogene Verfüllung des Ringspaltes beobachtet werden. Der verpresste Mörtel wurde eine Stunde nach Abschluss des Verpressvorgangs freigelegt (Abb. 11-21, links). An gezielt erzeugten Bruchflächen (Abb. 11-21, rechts) war ein homogenes Gefüge erkennbar und der Mörtel zeigte eine gleichmäßige Verfestigung. Eine Infiltration des Mörtels in den angrenzenden Boden konnte trotz der verzögerten Gelierung nicht identifiziert werden. Im Vergleich zum Basismörtel M0 erwies sich der Mörtel in dessen Festigkeitsentwicklung vergleichsweise träge, was auch an der reduzierten Formbeständigkeit des Materials nach Entformen ersichtlich wurde. Bei nicht mehr gegebener seitlicher Halterung kam es aufgrund der verzögerten Frühfestigkeitsentwicklung zu Verformungen des verpressten Materials und zu einer Rissbildung (Abb. 11-21, links). Die Scherfestigkeit des Mörtels wurde mit einem Flügelschergerät gemäß [60] nach rd. 2,5 Stunden nach Verpressbeginn bestimmt. Dabei wurde an insgesamt vier, gleichmäßig über den Querschnitt verteilten Messstellen im Mittel eine Scherfestigkeit von rd. 1,5 kN/m<sup>2</sup> bestimmt.



Abb. 11-21: Links: Verpresster alkalisch aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel "80\_2,6" mit Portlandzement als Gelierhilfe und einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> (Alter: I Stunde). Rechts: Erzeugte Bruchfläche im Randbereich des verpressten Mörtels

Innerhalb des zweiten Versuches wurde der Mörtel 160\_3,4 mit einer reduzierten Aktivatormenge (60 kg/m<sup>3</sup>) verpresst, um den Einfluss einer rascheren Gelierung auf verfahrenstechnischer Ebene zu erfassen. Der erhöhte Zementgehalt im Bindemittel der Komponente A wurde gewählt, um eine entsprechende Frühfestigkeitsentwicklung zu generieren. Wie in Abb. 11-22, links ersichtlich, war der Mörtel bereits bei der Entformung nach rd. 18 Minuten formstabil und zeigte nur im vorderen Bereich Verformungserscheinungen. Mit Beginn des Verpressversuches sammelte sich in diesem Bereich durch die geringfügig zeitversetzte Öffnung der Leitungen von Mörtel und Aktivator aktiviertes Material mit einem unstimmigen Verhältnis. Dieser Bereich blieb daher im Rahmen der Scherfestigkeitsuntersuchungen unberücksichtigt. Die Scherfestigkeiten wurden in einem Zeitraum von 22 bis 70 Minuten nach Aktivierung bestimmt (Abb. 11-22, rechts). Die dazugehörigen Einzelergebnisse sind im Angang in Kapitel A-6.4.4, Tab. A-50 dokumentiert.



Abb. 11-22: Links: Verpresster Zwei-Komponenten-Mörtel "160\_3,4" mit Portlandzement als Gelierhilfe und einem Aktivatorgehalt von 60 kg/m<sup>3</sup>. Rechts: Scherfestigkeiten des Mörtels "160\_3,4" mit einem Aktivatorgehalt von 60 (verpresster Mörtel) und 90 kg/m<sup>3</sup> (Laborproben)

Durch die Reduktion des Aktivatorgehaltes wurde ein auf verfahrenstechnischer Ebene günstiges Gelierverhalten erzielt und eine hinreichende Formstabilität gewährleistet. Allerdings wurden dadurch zeitgleich die Frühfestigkeitsentwicklung und somit auch die Scherfestigkeitsentwicklung verzögert. Im Vergleich zum Mörtel 160\_3,4 mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup>, besaß der Mörtel mit einem Aktivatorgehalt von 60 kg/m<sup>3</sup> erwartungsgemäß wesentlich geringere Scherfestigkeiten. Der Richtwert der Scherfestigkeit von 2 kN/m<sup>2</sup> wurde nach rd. 45 Minuten erzielt. Nach rd. 65 Minuten erreicht der Mörtel 160\_3,4 mit einem Aktivatorgehalt von 60 kg/m<sup>3</sup> den Wert der Scherfestigkeit nach 30 Minuten des Mörtels mit einem Aktivatorgehalt von 90 kg/m<sup>3</sup> und gleicher

Bindemittelzusammensetzung. Eine weitere Steigerung der Frühfestigkeit kann hier durch bindemitteltechnische Optimierungen (höhere spezifische Oberfläche, höhere Reaktivität) oder zusätzlich durch Modifikationen des Aktivators in dessen Art und der Menge erreicht werden. Die Abstimmung der Gelierung und Frühfestigkeitsentwicklung erweist sich demnach sowohl auf materialtechnologischer als auch auf verfahrenstechnischer Ebene als Optimierungsaufgabe.

### 11.6.2.2 Alkalisch aktivierte Mörtel mit Calciumhydroxid als Gelierhilfe

Zur Überprüfung der Verpresseignung von Mörteln, deren Gelierung durch eine Calciumhydroxid-Suspension sichergestellt wird, wurde der Mörtel mit 90 kg/m<sup>3</sup> Kalkmilch (27 kg/m<sup>3</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>) und einem Aktivatorgehalt von 9,1 Vol.-% (Natrium-Wasserglas, MVZ: 3,4) untersucht. Dieser zeigte im Rahmen der Laboruntersuchungen mit einer Gelzeit von rd. 6-7 Sekunden und einer Scherfestigkeit von 3 kN/m<sup>2</sup> nach 30 Minuten eine zwar kritische Gelzeit aber auch eine den Anforderungen entsprechende Frühfestigkeitsentwicklung. Die Vortriebsgeschwindigkeit wurde zu 40 mm/min gewählt. Während des Verpressversuches zeigte der Mörtel mit einem Aktivatorgehalt von 9,1 Vol.-% eine zu rasche Gelierung und verteilte sich nicht gleichmäßig im Ringraum. Daraufhin wurde der Aktivatorgehalt iterativ erhöht, bis sich eine entsprechend verlängerte Gelzeit und eine länger andauernde Fließfähigkeit des aktivierten Mörtels einstellten. Um dies zu erreichen musste der Aktivator um rd. 75 kg/m<sup>3</sup> auf 195 kg/m<sup>3</sup> bzw. 14,7 Vol.-% bezogen auf Komponente A erhöht werden. Nach dieser Erhöhung zeigte der Mörtel im Vergleich zum Basismörtel ein vergleichbares Fließverhalten (Kapitel 11.6.1, Abb. 11-17). Es kam durchweg zu einer homogenen Verteilung und anschließender Gelierung. Trotz der verlängerten Gelzeit kam es zu keiner Infiltration des Mörtels in den anstehenden Boden (kf: 1,7\*10<sup>-4</sup> m/s). Der entformte Mörtel nach 60 Minuten nach Aktivierung sowie eine Detailaufnahme der Grenzschicht zwischen Boden und Mörtel sind in Abb. 11-23 gezeigt.



Abb. 11-23: Links: Entformter Zwei-Komponenten-Mörtel mit einer Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>: 27 kg/m<sup>3</sup>, Aktivatorgehalt: 14,7 Vol.-%) nach einem Verpressversuch. Rechts: Detailaufnahme der Mörtel/Boden-Grenzschicht

Nach Abschluss des Verpressversuches wurde die Scherfestigkeit nach 60 und 90 Minuten an jeweils fünf separaten Messstellen bestimmt. Dabei wurden im Vergleich zu den innerhalb der Laboruntersuchungen ermittelten Scherfestigkeiten deutlich gesteigerte Scherfestigkeiten gemessen. Nach 60 Minuten nach Aktivierung wurde bereits eine Scherfestigkeit in Höhe von rd. 10 kN/m<sup>2</sup> (Laborprobe mit 9,1 Vol.-% Aktivator: 4,3 kN/m<sup>2</sup>) ermittelt. Nach 90 Minuten wurde eine Scherfestigkeit in Höhe von 19 kN/m<sup>2</sup> (Laborprobe mit 9,1 Vol.-% Aktivator: 5,3 kN/m<sup>2</sup>) gemessen. Durch die Erhöhung des Aktivators wurden somit um den Faktor 2 höhere Scherfestigkeiten nach 60 Minuten und um den Faktor 4 höhere Scherfestigkeiten nach 90 Minuten im Vergleich zur ursprünglichen Aktivatormenge erzielt. Innerhalb der Untersuchungen des Basismörtels M0 wurden im Rahmen der Bestimmung der zeitabhängigen Scherfestigkeitsentwicklung unterschiedliche Aktivatorgehalt untersucht (siehe Kapitel 8.4.4). Dabei wurde bei einer schrittweisen Erhöhungen der Aktivatormenge um jeweils 20 kg/m<sup>3</sup>, von 70 auf 90 auf 110 kg/m<sup>3</sup>, im Mittel ab 40 Minuten nach Aktivierung ebenfalls ein faktorieller Zuwachs der Scherfestigkeit von 2 ermittelt.

In der Summe erweist sich das Material als geeignet für einen Verpressvorgang. Unter wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten sind hingegen weitere Optimierungen notwendig. Dies betrifft primär die Abstimmung zwischen dem Aktivatorgehalt und der Reaktivität der Gelierhilfe, sodass die erzielbaren Gelzeiten den verfahrenstechnischen Anforderungen entsprechen und die Frühfestigkeiten auf ein notwendiges Maß beschränkt werden.

# 11.6.3 Physikalisch aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien

Im Zuge der physikalischen Aktivierung wurde in einem ersten Schritt der modifizierte Ein-Komponenten-Mörtel "mod. B-60" (Tab. 10-3) zur Überprüfung dessen Verpresseignung als Komponente A bei unterschiedlichen Drücken verpresst. Dieser Mörtel besitzt im Vergleich zu klassischen, bedingt-aktiven Ein-Komponenten-Mörteln einen reduzierten Wassergehalt und eine entsprechende Mehrmenge an Gesteinskörnung. Zur Sicherstellung der Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit wurde Fließmittel eingesetzt. Darauf aufbauend erfolgte ein Verpressversuch zur Aktivierung dieses Mörtels mit einer SAP-Suspension. Bei den Verpressversuchen von Mörteln mit Gesteinskörnung kam zur Begrenzung des Ringraumes ein Stahldeckel zum Einsatz, an welchem auf der Oberseite in gleichbleibenden Abständen Überdruckventile angeordnet sind (Abb. 11-24). Diese Sicherheitsventile haben die Aufgabe die eingeschlossene Luft bei einer kritischen Druckerhöhung im Ringraum von größer 2,5 bar entweichen zu lassen.



Abb. 11-24: Modifikationen des Versuchsstandes zur Ringspaltverpressung im Rahmen der physikalischen Aktivierung. Links: Rückansicht des Versuchsstandes mit Stahldeckel, Sicherheitsventilen u. Abflussleitungen. Rechts: Frontansicht mit vollständig eingefahrenem Schlitten

## 11.6.3.1 Verpressvorgang des nicht-aktivierten Ein-Komponenten-Mörtels

In den Untersuchungen zur Verpresseignung des nicht aktivierten, modifizierten Ein-Komponenten-Mörtels ("mod. B-60", Komponente A innerhalb der physikalischen Aktivierung) wurde in einem ersten Schritt dessen Verpresseignung bei unterschiedlichen Verpressdrücken (0,5, 1, 1,5 bar) untersucht. Die Vortriebsgeschwindigkeit betrug bei allen Verpressvorgängen 60 mm/min. Auf Grundlage der Betrachtungen in Kapitel 11.5 wurde der Boden 3 mit einer Durchlässigkeit nach Beyer von 5,2\*10<sup>-5</sup> m/s eingesetzt. Unter Berücksichtigung der in Tab. 3-4 angegebenen Anwendungsbereiche von Ein-Komponenten-Mörteln liegen somit kritische Randbedingungen für ein druckbedingte Entwässerung vor. Als Mischeinheit wurde eine starre Leitung mit einem Durchmesser von zwei Zoll ohne zusätzliche Mischwerkzeuge verwendet. Der entformte Ein-Komponenten-Mörtel "mod. B-60" (Alter: 4 Stunden) nach dem Verpressvorgang mit einem Druck von 1,0 bar ist in Abb. 11-25 dargestellt. Der Ringraum war vollständig verfüllt und das Material war gleichmäßig verfestigt und formstabil.



Abb. 11-25: Verpresster nicht-aktivierter Ein-Komponenten-Mörtel "mod. B-60" (Verpressdruck 1,0 bar, Verpressdauer: 25 Minuten, Probenalter: 4 Stunden)

Zur Visualisierung der Fließverhaltens im Ringspalt bei einem druckbedingten Verpressvorgang (1,0 bar) wurde der Mörtel während der Befüllung des Mörtelbehälters chargenweise durch Farbpigmente eingefärbt. Zudem wurde die Mischeinheit linksseitig angeordnet. In Abb. 11-26 ist der Mörtel im vorderen Bereich am Austritt der Mörtelöffnung gezeigt. Dabei ist anhand der Farbunterschiede zu erkennen, dass sich der Mörtel ausgehend von der Mörtelöffnung ringförmig verteilte. Zudem ist in Abb. 11-26, rechts die Ausbreitung im realen Versuch skizziert und eine Projektion auf eine mittige Anordnung schematisch dargestellt. Gemäß der Mörtelausbreitung im Versuch kann von einer gleichmäßigen und ringförmigen Verteilung des Mörtels ausgegangen werden.



Abb. 11-26: Links: Visualisierung des Fließverhaltens des Mörtels "mod. B-60" durch Einfärbung nach einem Verpressversuch (Verpressdruck: 1,0 bar, Verfahrgeschwindigkeit: 60 mm/min). Rechts: Schematischer Übertrag der Mörtelausbreitung bei exzentrischer Mörtelöffnung auf eine mittige Anordnung
Nach dem Verpressvorgang des teilweise eingefärbten Mörtels mit einem Verpressdruck von 1,0 bar und einer Vortriebsgeschwindigkeit von 60 mm/min konnte an freigelegten Querschnitten ein Farbgradient über die Höhe der Probe und eine geringfügige Infiltration bzw. Entwässerung in den darunter angeordneten Boden identifiziert werden. In Abb. 11-27, links ist eine händisch erzeugte Schnittfläche des verpressten Ein-Komponenten-Mörtels (Probenalter: 4 Stunden) und ergänzend dazu rechts eine Detailaufnahme der Grenzschicht zwischen Mörtel und Boden gezeigt.



Abb. 11-27: Links: Erzeugte Schnittfläche des verpressten, nicht-aktivierten Mörtels "mod. B60" (Probenalter: 4 h, Verpressdruck: 1,0 bar). Rechts: Detailansicht der Mörtel/Boden-Grenzschicht

Die Verteilung der Farbpigmente über die Höhe des Mörtels weist darauf hin, dass sich das Wasser bzw. die Farbpigmente primär im unteren Drittel des Mörtels angereichert haben. Dies lässt auf eine Umlagerung der Feinstoffe in Richtung Boden schließen. Um diesen Zustand zu erreichen, ist eine Entwässerung des Materials in Richtung des angrenzenden Bodens notwendig. Allerdings war kein signifikantes Wassereindringen (maximale Endringtiefe: 1,5 cm) bzw. Entwässern des Mörtels in den Boden erkennbar (Abb. 11-27, rechts). Der Boden war nach Versuchsende nicht wassergesättigt und bei Tiefen größer zwei Zentimetern noch trocken. An den mit unterschiedlichen Drücken verpressten Mörteln wurden die Scherfestigkeiten nach einem Verpressvorgang erfasst. Die Bestimmung der Scherfestigkeiten erfolgte gleichverteilt über die Gesamtfläche der entformten Proben an jeweils fünf Messstellen mit einem Flügelschergerät nach [60]. Die Scherfestigkeiten in Abhängigkeit des Verpressdruckes sind in Abb. 11-28 dargestellt. Die Fehlerindikatoren geben dabei die absolute maximale und minimale Abweichung vom Mittelwert an. Die zugehörigen Einzelwerte sind im Anhang in Kapitel A-6.4.4, Tab. A-51 dokumentiert.



Abb. 11-28: Mittlere Scherfestigkeiten des verpressten, nicht-aktivierten Ein-Komponenten-Mörtels "mod. B-60" in Abhängigkeit des Verpressdruckes und des Probenalters

Anhand der Ergebnisse in Abb. 11-28 wird deutlich, dass die Scherfestigkeiten mit steigendem Verpressdruck tendenziell zunahmen, der Verpressdruck und die Scherfestigkeiten aber nicht zwingend linear korrelieren. Eine Erhöhung des Verpressdruckes um das Dreifache führte auf Basis der gemittelten Scherfestigkeiten zu einem Festigkeitszuwachs von rd. 25 %. Ein Einfluss der Hydratation des Zementes ist bei den frühen Prüfzeitpunkten auszuschließen bzw. noch von untergeordneter Bedeutung.

Die Verpressvorgänge mit dem Mörtel "mod. B-60" bestätigen dessen verfahrenstechnische Eignung als Komponente A für die physikalische Aktivierung. Zudem wird ersichtlich, dass es bei einem Boden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10<sup>-5</sup> m/s zu einer nur geringfügigen Entwässerung kam. Eine Aktivierung über SAP kann bei den gegebenen Randbedingungen zu einer rascheren Verfestigung führen und somit übertragen auf den baupraktischen Anwendungsfall bei ungünstigen geologischen Bedingungen respektive einer zu geringen Durchlässigkeit des umgebenden Bodens einen wesentlichen Beitrag zur Sicherstellung der unmittelbaren Bettung der Tunnelröhre liefern.

#### 11.6.3.2 Verpressvorgang eines durch SAP aktivierten Mörtels

Zur verfahrenstechnischen Überprüfung der physikalischen Aktivierung mit superabsorbierenden Polymeren wurde der Mörtel "mod. B-60" in einem Verpressversuch durch eine SAP-Suspension aktiviert. Dabei kam gemäß den Untersuchungen in Kapitel 10.3 als Trägerfluid eine Lösung aus 95 % Glycerin und 5% Wasser zum Einsatz. Die beiden Komponenten wurden über separate Leitungen in die Mischeinheit (Kapitel 11.3, Abb. 11-12) befördert und im Statikmischer vermischt. Die Abstimmung der beiden Komponenten erfolgte volumengesteuert über das in den Vorversuchen ermittelte günstige Verhältnis von Komponente A und B von 6,5:1. Der aktivierte Mörtel setzt sich somit aus rd. 1931 kg Mörtel (rd. 886 Liter) und rd. 159 kg Aktivator (134 Liter) zusammen. Die Mischungszusammensetzung ist im Anhang in Kapitel A-6.3.2, Tab. A-13 dokumentiert. Der Druck im System von Komponente B wurde mit 0,6 bar um 0,1 bar höher gewählt als der Druck in der Leitung von Komponente A mit 0,5 bar, sodass es im Falle eines Stopfers nicht zu einem Eindringen des Mörtels in die Leitung des Aktivators kommen kann. Die Vortriebsgeschwindigkeit wurde zu 90 mm/min gewählt. Der eingesetzte Boden 3 hat einen Durchlässigkeitsbeiwert nach Bever von 5,2\*10<sup>-5</sup> m/s. Dieser Boden wurde gewählt, um eine Filtratwasserabgabe in den angrenzenden Boden zu erschweren. Durch die hohe Verfahrgeschwindigkeit wird zudem die für eine mögliche Entwässerung zur Verfügung stehende Zeit reduziert.

In Abb. 11-29, links ist der aktivierte Mörtel nach rund einer Stunde nach Verpressbeginn kurz nach dem Entformen gezeigt. Rechts in Abb. 11-29 ist eine Detailaufnahme des Mörtelgefüges und der Mörtel/Boden-Grenzschicht aufgezeigt. Die Hohlräume im Gefüge sind dabei primär auf das händische Freilegen zurückzuführen.



Abb. 11-29: Links: Physikalisch aktivierter Mörtel "mod. B-60" nach Aktivierung durch suspendierte SAP nach einem Verpressvorgang. Rechts: Detailaufnahme des Mörtelgefüges und der Mörtel/Boden-Grenzschicht

Wie in Abb. 11-29, links dargestellt, kam es während des Verpressvorgangs zu einer teilweisen Entmischung von Aktivator und Mörtel, was anhand einer Anreicherung der suspendierten SAP an der Probenoberfläche ersichtlich wurde. Die ungleichmäßige Verteilung der SAP im Mörtel hatte eine teilweise inhomogene und reduzierte Entwässerung des Materials zur Folge. Dies führte zu einer Verformung des aktivierten Mörtels während des Herausfahrens des Schlittens unmittelbar nach Beendigung des Verpressvorgangs. Grundsätzlich zeigte der Mörtel im vorderen Drittel der Probe ein über die Höhe homogenes Gefüge und eine ausreichende Formstabilität, wobei es auch dort zum Teil zu einer Anreicherung der SAP an der Mörteloberseite kam. Durch Modifikationen der Mischeinheit, mit dem Ziel einer intensiveren Durchmischung von Aktivator und Mörtel, kann ein Separieren der Komponenten vermieden werden. Durch einen turbulenten Mischvorgang in Kombination mit einer längeren Mischstrecke kann zudem eine gleichmäßige Einmischung des Aktivators in den Mörtel erzielt werden. Wie anhand der Laborprüfungen in Kapitel 10.3.3, Abb. 10-15, rechts gezeigt, kommt es bei einer gleichmäßigen Vermischung von Aktivator und Mörtel zu einer homogenen und raschen Verfestigung innerhalb von 15 Minuten. Weiterhin konnte an der freigelegten Probe festgestellt werden, dass keine druckbedingte Interaktion zwischen Boden und Mörtel und somit keine Entwässerung des aktivierten Materials stattgefunden hat (Abb. 11-29, rechts). Der angrenzende Laborboden war über die gesamte Höhe trocken. Im Bereich des homogen vermischten Mörtels wurde in einem Zeitfenster von rd. 60 bis 80 Minuten nach Aktivierung die Scherfestigkeit mit einem Flügelschergerät nach [60] bestimmt. Die mittlere Scherfestigkeit aus sieben Messstellen betrug 4,3 kN/m<sup>2</sup> wobei die maximale messbare Scherfestigkeit zu 5,8 kN/m<sup>2</sup> und die minimale Scherfestigkeit zu 3,2 kN/m<sup>2</sup> bestimmt wurden. Die ermittelte Scherfestigkeit des verpressten Mörtels entspricht in etwa der Scherfestigkeit, welche an den Laborproben mit suspendierten SAP nach 15 Minuten erzielt wurde (Kapitel 10.3, Abb. 10-16). Im Vergleich zum verpressten, nicht-aktivierten Bereitstellungsgemisch bei 0,5 bar (Abb. 11-28) wurden geringfügig niedrigere Scherfestigkeiten an dem aktivierten Mörtel ermittelt, was auf die unzureichende Vermischung von Mörtel und Aktivator zurückzuführen ist. Dies führte aufgrund der reduzierten absoluten Wasseraufnahme der SAP zu einer weniger stark ausgeprägten inneren Entwässerung und somit zu einer reduzierten Scherfestigkeitsentwicklung. Bei vollständiger Durchmischung von Mörtel und SAP-Suspension konnte innerhalb der Laboruntersuchungen bei Verwendung der gleichen Mischungszusammensetzung eine Scherfestigkeit nach 30 Minuten in Höhe von 5,5 kN/m<sup>2</sup> ermittelt werden (vgl. Abb. 10-16).

In Abb. 11-30 sind Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Bruchstücken des durch eine SAP-Suspension aktivierten Mörtels "mod. B-60" nach einem Verpressvorgang mit einem Alter von 50 Tagen (links) sowie Aufnahmen einer im Labor hergestellten Probe des gleichen Materials mit einem Alter von rd. 400 Tagen (rechts) gezeigt. Grundsätzlich war ein homogenes Gefüge vorzufinden. Die SAP-Partikel lagen gleichmäßig verteilt im Mörtel vor und es waren keine Agglomerate oder größere Zusammenschlüsse von SAP-Partikeln zu erkennen. Im Vergleich zu einer unbehandelten Zugabe (vgl. Abb. 10-13) zeigten die suspendierten SAP-Partikel eine abweichende Struktur. Klare geometrische Formen und Partikelgrenzen waren nicht mehr eindeutig identifizierbar. Zum Teil war ebenfalls ein Anhaften der Partikel an der Gesteinskörnung erkennbar. Inwieweit dies mit der Suspendierung bzw. dem Trägerfluid in Zusammenhang steht, kann auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen nicht abschließend geklärt werden.



Abb. 11-30: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen eines physikalisch aktivierten Mörtels mit suspendierten SAP (Mörtel "mod. B-60", 9 kg/m<sup>3</sup> SAP und Trägerfluid (95% Glycerin, 5 % Wasser)): Links: Nach einem Verpressversuch (Alter: 50 Tage). Rechts: Laborprobe (Alter: 400 Tage). Maßstab: 500 μm

Zusammenfassend zeigt die Verwendung von SAP als physikalischer Aktivator für Ringspaltverfüllmaterialien großes Potential auf materialtechnologischer und verfahrenstechnischer Ebene. Zum einen konnte durch die SAP als Aktivator eine hinreichende Gelierung und Scherfestigkeit im Material systeminhärent ohne notwendige Mörtel/Boden-Interaktion erzielt werden. Zum anderen konnte der Aktivator durch eine Suspendierung der SAP auf verfahrenstechnischer Ebene ähnlich wie ein klassischer Aktivator behandelt werden.

Zusätzlich ermöglichen die im Rahmen der Laboruntersuchungen identifizierten Abhängigkeiten wie beispielweise der Zementgehalt in Komponente A, die Menge an SAP sowie die Menge an Trägerfluid im Aktivator eine gezielte Steuerung der Eigenschaften, insbesondere der Verfestigung und der Frühfestigkeitsentwicklung. Innerhalb der Verpressversuche konnte hingegen eine Entmischung von Aktivator und Mörtel identifiziert werden, was zu teilweise inhomogenen und weniger verfestigten Bereichen führte. Aufgrund dessen sind auf verfahrenstechnischer Ebene weitere Modifikationen des Mischsystems vorzunehmen, durch welche eine intensivere und gleichmäßigere Durchmischung von Aktivator und Mörtel sichergestellt wird.

# 12 Zusammenfassung / Fazit

Globales Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung neuartiger Konzepte zur Aktivierung von Ringspaltverfüllmaterialien und die verfahrenstechnische Eignungsprüfung dieser für die Ringspaltverpressung im maschinellen Tunnelbau. Methodisch erfolgte dies in drei, teil-konsekutiven Themenblöcken.

Zur Erfassung des Stands der Technik und zur Schaffung einer materialtechnologischen Bezugsebene war es in einem ersten Schritt notwendig, die charakteristischen Eigenschaften aktivierter Ringspaltverfüllmaterialien systematisch zu erfassen und zu beschreiben. Im Zuge dessen wurde ein klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel (Basismörtel) festgelegt. Im Rahmen der Bestimmung der wesentlichen Materialkennwerte wurden neue Prüfverfahren entwickelt und bestehende Verfahren modifiziert. Diese Prüfmethoden fanden bei den experimentellen Untersuchungen innerhalb der Materialkonzepte Anwendung und die gewonnenen Erkenntnisse dienten den Konzepten als materialtechnologische Bezugsebene.

Bei der Entwicklung neuartiger Mörtelsysteme wurden zwei separate Entwicklungsstränge betrachtet. Zum einen wurde die alkalische Aktivierung geeigneter Zusatzstoffe im System der Zwei-Komponenten-Mörtel untersucht. Dabei lag der Fokus auf deren möglichen Anwendbarkeit im Bereich der Festigkeitsentwicklung unter Berücksichtigung typischer Anforderungen an aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien. Zum anderen wurde die physikalische Aktivierung von Mörteln durch superabsorbierende Polymere (SAP) untersucht. Durch den Einsatz von SAP als Aktivatoren wird eine innere Entwässerung des Ringspaltverfüllmaterials forciert. Dies führt zu einer raschen Verfestigung des aktivierten Materials im Ringspalt und trägt somit zu Sicherstellung der unmittelbaren Bettung der Tunnelröhre bei.

Im Rahmen der ganzheitlichen Betrachtung des Vorgangs einer Ringspaltverpressung mit aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien wurde ein großformatiger Versuchsstand entwickelt, in welchem der Vorgang der Ringspaltverpressung unter realitätsnahen Randbedingungen simuliert werden kann. Hiermit erfolgte die Überprüfung der verfahrenstechnischen Eignung der Materialkonzepte.

# 12.1 Klassische Zwei-Komponenten-Mörtel

Als materialtechnologische Bezugsgröße und als Bindeglied zwischen dem aktuellen Stand der Technik von Zwei-Komponenten-Mörteln, den gestellten Anforderungen und formulierten Richtwerten sowie der hier gegenständlichen Entwicklung neuer Materialkonzepte für aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien wurden in einem ersten Schritt die charakteristischen Eigenschaften eines klassischen Zwei-Komponenten-Mörtels bestimmt. Die Verarbeitbarkeit sowie die Festigkeitsentwicklung, aber auch anwendungsspezifische Parameter wie die Gelzeit wurden untersucht. Hier war es notwendig, neue Prüfverfahren zu entwickeln, um eine reproduzierbare Beschreibung der Eigenschaften zu ermöglichen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden diese Prüfverfahren ebenfalls innerhalb der Entwicklung der Materialkonzepte angewendet. Der festgelegte Basismörtel erfüllte die aus der Literatur bekannten Richtwerte. Die Untersuchungen, welche bis über die bautechnisch relevanten Zeitfenster hinausgehen, lieferten Erkenntnisse über das Strukturverhalten bzw. die Festigkeitsentwicklung eines aktivierten Zwei-Komponenten-Mörtels. Unabhängig von weiteren Variationen der Ausgangsstoffe und unter Berücksichtigung des betrachteten Einsatzgebietes erwies sich die Zusammensetzung des Basismörtels als geeignete Referenz für die Materialkonzepte.

# 12.2 Alkalische Aktivierung

Das Konzept der alkalischen Aktivierung fokussierte die Anwendbarkeit von latent-hydraulischen und/oder puzzolanischen Stoffen als reaktiver Hauptbestandteil des Bindemittels für Zwei-Komponenten-Mörtel und deren Festigkeitsentwicklung innerhalb der Erhärtungsphase. Dies hat den Hintergrund, dass bei Verwendung eines alkalischen Aktivators lokal verfügbare Zusatzstoffe wie beispielsweise Hüttensande, Flugaschen oder Metakaoline in das System der Zwei-Komponenten-Mörtel integriert werden und aktiv bei der Festigkeitsentwicklung mitwirken können. Aufgrund der vergleichsweise trägen Reaktion von alkalisch aktivierten Zusatzstoffen und den zeitlich-kritischen Anforderungen an die Gelzeit, Erosionsstabilität und Frühfestigkeitsentwicklung, wurden calciumbasierte "Gelierhilfen" eingesetzt. Hierzu wurde Portlandzement sowie in einem separaten Ansatz eine Calciumhydroxid-Suspension verwendet. Deren Anteil wurde auf die Entwicklung einer gelbildenden Struktur und ersten Frühfestigkeit abgestimmt und beschränkt. Die Festigkeit des Materials wurde – vom Gelzustand entkoppelt – durch den Zusatzstoff autark generiert.

Auf Grundlage der hier herangezogenen Zusatzstoffe und deren chemischer Zusammensetzung konnten Bindemittelkonfigurationen abgeleitet werden, mit welchen die zeitlich-kritischen Anforderungen nach Aktivierung erfüllt werden konnten. Dabei konnte herausgestellt werden, dass calciumreiche Stoffe für eine rasche Festigkeitsentwicklung vorteilhaft sind. Durch die Kombination von Portlandzement und dem latent-hydraulischen Hüttensand (50 bis 75% des Bindemittels) konnten die Anforderungen an die Gelierung und Festigkeitsentwicklung erfüllt werden. Gleiches gilt bei der Verwendung einer Calciumhydroxid-Suspension mit einem Gehalt von rd. 18 kg/m<sup>3</sup>. Durch deren gewissen Anteil im Gesamtbindemittel wurden dabei eine rasche Gelierung und die erste Frühfestigkeitsentwicklung sichergestellt. Die eigentliche Langzeitfestigkeit wurde anschließend durch die Reaktion des Hüttensandes bewirkt. Die materialtechnologische Entkopplung der Gelund Festigkeitsphase ermöglicht folglich die Verwendung unterschiedlicher Bindemittelkompositionen aus latent-hydraulischen und/oder puzzolanischen Stoffen.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass durch den exemplarischen Einsatz von Hüttensand ein enormer Festigkeits- und Steifigkeitszuwachs bereits bei Verwendung eines klassischen Aktivators im Vergleich zu herkömmlichen rein-zementösen Zwei-Komponenten-Mörteln generiert werden kann. Die Verwendung von Hüttensand als primärer Festigkeitslieferant und die alkalische Aktivierung derer für Ringspaltverfüllmaterialien sind abschließend, auch aufgrund deren Langzeitstabilität, als vorteilhaft zu werten. Dies betrifft neben der Wirtschaftlichkeit auch das weitere materialtechnische Optimierungspotential hinsichtlich des chemischen Widerstandes bzw. allgemein der Dauerhaftigkeit von Ringspaltverfüllmaterialien.

# 12.3 Physikalische Aktivierung

Das Konzept der physikalischen Aktivierung befasste sich mit der gezielt herbeigeführten inneren Entwässerung des Mörtels durch superabsorbierende Polymere (SAP) und die daraus resultierende Verfestigung des Materials. Die physikalische Aktivierung hat zur Aufgabe, eine rasche Verfestigung des Mörtels unmittelbar nach Zugabe der SAP bei Eintritt in den Ringspalt und eine erste Frühfestigkeitsentwicklung sicherzustellen. Als Basis für die Komponente A kamen dabei Ein-Komponenten-Mörtel zum Einsatz. Das für die Verarbeitbarkeit notwendige Überschusswasser im Mörtel wird durch die zugemischten SAP im Ringspalt in kürzester Zeit aufgenommen. Somit liegt unmittelbar nach dem Verpressvorgang ein Material mit einer gewissen Steifigkeit vor, welche mit fortlaufender Zeit bis zum Ende des Quellvorgangs der SAP weiter zunimmt. Das für die Verfestigung wesentliche Wasseraufnahmevermögen der SAP ist dabei stark von der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers des Mörtels abhängig. Innerhalb der Untersuchungen wurden neben der eigentlichen Charakterisierung unterschiedlicher SAP zwei verfahrenstechnische Methoden differenziert betrachtet. Zum einen wurde der Einsatz von SAP in bedingt-aktiven und inerten Ein-Komponenten-Mörteln bei unbehandelter Zugabe untersucht. Zum anderen wurde unter Berücksichtigung des Stands der Technik der Mischeinheiten für aktivierte Ringspaltverfüllmaterialien eine gezielte Suspendierung der SAP-Partikel in geeigneten Trägerfluiden betrachtet.

Die Verwendung von SAP als physikalischer Aktivator zur Verfestigung von Ein-Komponenten-Mörteln hat sich zusammenfassend als zielführendes und gleichsam steuerbares Instrument erwiesen. Durch das enorme Wasseraufnahmevermögen der SAP kam es innerhalb weniger Minuten zu einer inneren Entwässerung des Mörtels und dahingehend zu einer Verfestigung und anschließenden Scherfestigkeitsentwicklung, welche den typischen Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien gerecht wurden. Hierbei konnten eindeutige Korrelationen zwischen der Zugabemenge der SAP und der Chemie der Komponente A bzw. dem Zementgehalt des Mörtels in Bezug auf die Festigkeitsentwicklung identifiziert werden. Eine rasche Verfestigung bzw. gesteigerte Scherfestigkeitsentwicklung kann bei unbehandelter Zugabe der SAP über einen reduzierten Zementgehalt und ein dadurch gesteigertes Wasseraufnahmevermögen der SAP forciert werden. Weiterhin wird die Verfestigung grundlegend von dem SAP-Gehalt oder durch den Gehalt an Trägerfluid bei Verwendung einer SAP-Suspension beeinflusst.

# 12.4 Verfahrenstechnische Eignung

Im Rahmen einer ganzheitlichen Konzeptionierung von aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien ist neben der Bestimmung von charakteristischen Materialkennwerten ebenfalls die Überprüfung der verfahrenstechnischen Eignung notwendig. Dahingehend wurde ein Versuchsstand entwickelt, welcher einen Verpressvorgang des Ringspaltes im maschinellen Tunnelbau realitätsnah simuliert. Die Systemgrenzen sind dabei durch die Tübbingaußenseite, den anstehenden Boden und den Schildschwanz definiert. Neben einem klassischen Zwei-Komponenten-Mörtel (Basismörtel M0) und einem modifizierten Ein-Komponenten-Mörtel wurden ausgewählte Mörtel der jeweiligen Konzepte hinsichtlich deren verfahrenstechnischen Eignung für einen Verpressvorgang untersucht. Die alkalisch aktivierten Mörtel konnten hierbei ohne umfangreiche Modifikationen der Mischeinheit verpresst werden, da sich deren Frischmörtelcharakteristika und das Verhalten nach Aktivierung grundsätzlich nicht von klassischen Zwei-Komponenten-Mörteln unterschieden. Durch den beschränkten Einsatz von Gelierhilfen (Portlandzement, Ca(OH)<sub>2</sub>) konnte ein anforderungsgerechtes Gelierverhalten erzielt werden. Die Mörtel erwiesen sich nach dem Verpressvorgang als formstabil und homogen verfestigt und durch die gezielte Adaption des Verhältnisses von Komponente A und B sowie durch die Anpassung des Bindemittels mit Blick auf den größtmöglichen Anteil an Hüttensand konnte eine hinreichende (Früh-)Festigkeitsentwicklung generiert werden.

Bei der physikalischen Aktivierung von modifizierten Ein-Komponenten-Mörteln war es möglich den Mörtel durch die Zugabe von suspendierten SAP hinreichend zu verfestigen und eine Scherfestigkeitsentwicklung zu forcieren. Der Mörtel verteilte sich gleichmäßig im Ringspalt, besaß aber eine geringere Formstabilität als ein klassisch aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel. Zum Teil konnten inhomogene Bereiche, bedingt durch ein unstimmiges Verhältnis von Komponente A und B, sowie ein Aufschwimmen des Aktivators beobachtet werden, was zu einer verzögerten Frühfestigkeitsentwicklung führte. Diese Aspekte können durch eine verfahrenstechnische Optimierung bzw. Modifikation der Mischeinheit kompensiert werden.

# **13** Ausblick

Zwei-Komponenten-Mörtel für den maschinellen Tunnelbau werden bis dato auf rein empirischer Basis und aufgrund von Erfahrungen aus vorhergegangenen Projekten konzeptioniert. Für die Zusammensetzung gibt es keinen normativen Rahmen oder Regelwerke und die Anforderungen an das Bereitstellungsgemisch und den aktivierten Mörtel sind uneinheitlich formuliert, obwohl einem Ringspaltverfüllmaterial im maschinellen Tunnelbau eine zentrale Rolle für ein dauerhaftes Tunnelbauwerk zugesprochen werden muss. Zur Erfassung der charakteristischen Eigenschaften typischer Zwei-Komponenten-Mörtel wurde in der vorliegenden Arbeit ein klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel auf Basis der aktuell in der Literatur vorzufinden Zusammensetzungen festgelegt und gemäß den Anforderungen und den dazugehörigen Richtwerten geprüft. Im Durchschnitt konnten die Anforderungen bestätigt werden, wobei keine einheitlichen Prüfverfahren für bestimmte Kennwerte (Gelzeit, Frühfestigkeit, Steifigkeit) des aktivierten Systems zur Verfügung stehen. Dahingehend wurden neuen Prüfverfahren entwickelt oder bestehende Verfahren modifiziert. Zur einheitlichen Beschreibung der wesentlichen Charakteristika von aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien ist ein uniformes Prüfprogramm zu etablieren, mit welchem die grundlegenden Eigenschaften bestimmt werden können. Dazugehörig ist die Formulierung von Mindestanforderungen notwendig.

Das materialtechnologische System der Zwei-Komponenten-Mörtel und die in der Regel eingesetzten Ausgangsstoffe bieten gemäß dem Stand der Technik ein großes Potential für Materialoptimierungen und neuartige Ansätze. Hierin ist ein Übertrag des Stands der Technik der Betontechnologie und den dortigen Entwicklungen und Resultaten der gegenwärtigen Materialforschung auf die Ringspaltverfüllmaterialien anzustreben. Zu nennen sind hier exemplarisch die bindemitteltechnischen Optimierungen bei chemischen Angriffen. Dies ermöglicht die Entwicklung leistungsfähiger und dauerhafter Ringspaltverfüllmaterialien. Ergänzend können belastbare materialtechnologische Steuergrößen adaptiert werden, um trotz aktuell fehlender Regelwerke robuste und steuerbare Ringspaltverfüllmaterialien zu entwickeln. Das in dieser Arbeit dargelegte Konzept der alkalischen Aktivierung zeigte am Beispiel des Zusatzstoffes "Hüttensand" systematisch auf, dass dieser in der Lage ist bei geeigneter Aktivierung ein Gefüge zu schaffen, welches für die Bettung der Tunnelröhre, insbesondere die Langzeitfestigkeiten betreffend, aber auch aus dauerhaftigkeitstechnischer Sicht als vorteilhaft zu werten ist. Die alleinige Verwendung von latent-hydraulischen oder puzzolanischen Stoffen ist allerdings im wasserreichen System der Zwei-Komponenten-Mörtel nur schwer umsetzbar, da der Gelzustand und somit auch die Erosionsstabilität aufgrund deren trägen Reaktion zum aktuellen Zeitpunkt nicht hinreichend erfüllt werden können. Zur Sicherstellung der Gelierung ist bei einem Einsatz von Alkalisilikaten ein reaktionsfreudiger, calciumbasierter Stoff notwendig, um gelbildende Strukturen zu generieren. Dies wurde durch einen begrenzten Einsatz von Gelierhilfen, zum einen durch die anteilige Verwendung von Portlandzement und zum anderen durch eine Calciumhydroxid-Suspension sichergestellt.

Auf Basis der materialtechnologischen Entkopplung der Gel- und Festigkeitsphase können weitere, lokal-verfügbare Zusatzstoffe zielgerichtet eingesetzt werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass das Gelierverhalten und die Festigkeitsentwicklung durch die Anpassung von Aktivator und Bindemittelzusammensetzung aufeinander abgestimmt werden können und somit ein verfahrenstechnisch geeignetes Verpressmaterial generiert werden kann. Hierauf aufbauend ist es ratsam, dass insbesondere für den internationalen Tunnelbau, weitere verfügbare Zusatzstoffe für das Bindemittel, mit der Funktion des Festigkeitslieferanten über den Gelzustand hinaus, systematisch untersucht werden. Dazugehörig ist es notwendig, Korrelationen zwischen möglichen Aktivatoren, deren technischen Charakteristika und den einzusetzenden Ausgangsstoffen unter Beachtung der spezifischen Anforderungen an Ringspaltverfüllmaterialien zu eruieren.

Am Beispiel der verfügbaren Daten des Tunnelprojektes Metro Line C in Italien [42] ohne Berücksichtigung von unbekannten Randbedingungen, welche für die Konzeptionierung des Ringspaltverfüllmaterials herangezogen wurden, können die ökologischen und auch wirtschaftlichen Vorteile eines teilweisen Austausches des Zementes verdeutlicht werden. Der in Tübbingbauweise erstellte unterirdische Bereich ist rd. 18 km lang. Der Tunnelaußendurchmesser beträgt 6,4 m und die Ringspaltdicke rd. 0,15 m. Dies ergibt je erstelltem Meter Tunnelbauwerk ein Ringraumvolumen von rd. 3,1 m<sup>3</sup>. Bei dem dort verwendeten Zwei-Komponenten-Mörtel wurde im Mittel 330 kg/m<sup>3</sup> Zement eingesetzt. Das entspricht ohne Berücksichtigung von etwaigen Mehrmengen einer Gesamtmenge an Zement für den unterirdischen Bereich von rd. 18.000 Tonnen. Unter Beachtung der in dieser Arbeit eruierten möglichen Austauschraten des Zements durch Hüttensand könnte bereits bei einer Austauschrate von rd. 63 % (210 kg Hüttensand, 120 kg Zement) der Bedarf an Zement auf rd. 7.000 Tonnen reduziert werden. Neben der gezielten chemischen Aktivierung kann eine Verfestigung des Materials anforderungsgerecht auf physikalischer Ebene erfolgen. Eine inverse Anwendung der Entwässerung klassischer Ein-Komponenten-Mörtel durch eine gezielt herbeigeführte innere Entwässerung wurde in dieser Arbeit im Rahmen des Konzeptes der physikalischen Aktivierung untersucht. Durch die Zugabe von superabsorbierenden Polymeren (SAP) als Aktivator kam es bereits unmittelbar nach dem Zusammentreffen von SAP und Mörtel aufgrund deren enormen Wasseraufnahmevermögen zu einer Abnahme des freien Wassers im Mörtel, was eine rasche Viskositätszunahme und folglich eine Verfestigung des aktivierten Systems innerhalb weniger Minuten zur Folge hatte. Das Zusammenspiel von SAP und Mörtel erwies sich hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung des aktivierten Systems als steuerbar. Eine genaue Abstimmung von SAP-Gehalt und Wasser im Gesamtsystem ist dabei notwendig. Zudem ist die Chemie des Bereitstellungsgemisches von essentieller Bedeutung für eine rapide Verfestigung. Hierzu sind neben tiefergehenden materialtechnischen Untersuchungen auch verfahrenstechnische Optimierungen im Hinblick auf eine praktische Anwendung anzustreben, um eine gleichmäßige Einmischung des Aktivators im Mörtel sicherzustellen und eine Entmischung der beiden Komponenten zu vermeiden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Konzeptionierung von aktivierten Ringspaltverfüllmaterialien und die Prüfungen zur Bestimmung charakteristischer Kennwerte gemäß dem aktuellen Stand der Technik und Forschung und den bis dato praktizierten Anwendungen noch umfangreiche Optimierungspotentiale aufweisen. Dies betrifft neben geeigneten Prüfverfahren insbesondere die Materialtechnologie und somit die Zusammensetzung sowie die Auswahl geeigneter, aufeinander abgestimmter Ausgangsstoffe.

# 14 Literaturverzeichnis

- [1] B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl und G. Wehmeyer, *Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb*. Berlin: John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V., *Empfehlungen zur Auswahl* von Tunnelvortriebsmaschinen. Köln, 2010.
- [3] M. Thewes und C. Budach, "Mörtel im Tunnelbau Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen zur Verfüllung des Ringspalts bei Tunnelvortriebsmaschinen", *BauPortal*, Jg. 121, Nr. 12, S. 706–711, 2009.
- [4] Herrenknecht AG, ABWASSERKANAL EMSCHER: Groβprojekt im Kleindurchmesser.
   [Online]. Verfügbar unter: https://www.herrenknecht.com/de/referenzen/referenzendetail/abwasserkanal-emscher/. Zugriff am: 7. Januar 2019.
- [5] R. Rengshausen und B. Schockemmöhle, "Maschineller Tunnelvortrieb mit sehr kleinem Durchmesser Erfolgreiches Generationenprojekt im Ruhrgebiet mit einer der kleinsten EPB-TVM der Welt" in Bd. 43, *Taschenbuch für den Tunnelbau 2019: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau*, DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Hg., Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2018, S. 79–96, doi: 10.1002/9783433609736.ch3.
- [6] Herrenknecht AG, *HONG KONG TUEN MUN CHEK LAP KOK LINK: Einzigartiges Konzept mit neuer Weltrekord-TBM.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.herren-knecht.com/de/referenzen/referenzendetail/hong-kong-tuen-mun-chek-lap-kok-link/. Zugriff am: 7. Januar 2019.
- [7] Herrenknecht AG, *EPB Schild*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/epb-schild/. Zugriff am: 6. April 2020.
- [8] S. Babendererde, L. Babendererde und J. Holzhäuser, "Verpressen der Schildschwanzfuge hinter einer Tunnelvortriebsmaschine" in Bd. 26, *Taschenbuch für den Tunnelbau* 2002: Kompendium der Tunnelbautechnologie - Planungshilfe für den Tunnelbau, DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Hg., Essen: Verlag Glückauf GmbH, 2001, S. 228–254.
- [9] M. Pulsfort und C. Thienert, "Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim maschinellen Tunnelvortrieb" in *Forschung + Praxis: STUVA-Tagung 2011*, S. 253–258.
- [10] A. Bezuijen, W. H. van den Zon und A. M. Talmon, "Laboratory testing of grout properties and their influence on backfill grouting" in *Tunnelling*. *A Decade of Progress GeoDelft 1995-2005*, S. 115–121.
- [11] C. Thienert, Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2010.
- [12] B. Maidl, M. Herrenknecht und L. Anheuser, "Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb", 1. Aufl. Berlin: Ernst und Sohn Verlag, 1994.
- [13] V. Guglielmetti, Hg., *Mechanized tunnelling in urban areas: Design methodology and construction control.* London: Taylor & Francis, 2008.
- [14] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, *Richtlinie Tübbingsysteme aus Beton. Ausgabe: August 2009.*
- [15] D. Peila, L. Borio und S. Pelizza, "The behaviour of two component backfilling grout used in a Tunnel Boring Machine" in *Acta geotechnica slovenia*, 2011, 8. Jg., Nr. 1, S. 5–15.

- [16] MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG, "Stuttgart 21 stellt Weichen für die Zukunft", *MC Reportage 3-2019*, Nr. 3, S. 8–10, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mc-bauchemie.de/assets/magazine/MC%20aktiv 03 2019 Deutsch.pdf
- [17] D. Mähner, M. Hausmann, D. Handke und D. Edelhoff, "Neuentwicklung einer Zwei-Komponenten-Ringspaltmörtelrezeptur", *Tunnel*, Jg. 35, Nr. 4, S. 12–21, 2016.
- [18] L. Bayer, T. Berner und M. Wittke, "Anwendung eines phosphatbasierten Ringspaltmörtels beim Bau des Fildertunnels im anhydritführenden Gebirge" in Bd. 43, *Taschenbuch für den Tunnelbau 2019: Kompendium der Tunnelbautechnologie - Planungshilfe für den Tunnelbau*, DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Hg., Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2018, S. 97–121.
- [19] K. Smith, "Lessons learned from two component grout", *Tunneling Journal*, S. 10–18, 2012.
- [20] International Tunnelling and Underground Space Association, "ITAtech guidelines on best practices for segment backfilling", Lausanne, ITAtech report N 4 Mai 2014.
- [21] M. Thewes, "Tunnelbau im Schildvortrieb Verfahrenstechniken und Planungsgrundlagen" in *Beton-Kalender 2014: Schwerpunkte: Unterirdisches Bauen ; Grundbau ; Eurocode 7*, Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D., Hg., Ernst & Sohn GmbH & Co. KG., 2014, S. 121–170.
- [22] A. Bezuijen und A. M. Talmon, "Grout pressures around a tunnel lining, influence of grout consolidation and loading on lining" in *Tunnelling*. A Decade of Progress. GeoDelft 1995-2005, H. van Lottum und A. Bezuijen, Hg., CRC Press, 2005, S. 109–114, doi: 10.1201/9781439834268.ch16.
- [23] EFNARC European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, "Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock", Farnham, UK, Apr. 2005.
- [24] B.-Y. Youn, Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten und zur Scherfestigkeitsentwicklung von einkomponentigen Ringspaltmörteln im Tunnelbau. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2016.
- [25] P. Barnett, *Construction of bored tunnels in urban areas Essential techniques for success*, 2008.
- [26] D. Peila, A. Chieregato, D. Martinelli, C. Salazar Onate, R. Shah, A. Boscaro, Dal Negro und A. Picchio, "Long term behavior of two component back-fill grout mix used in full face mechanized tunneling", *GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MIN-ERARIA. ISSN 1121-9041*, Nr. 144, S. 57–63, 2015.
- [27] O. L. Veriuska, *Tunneling with full face shield machines: Study of the backfill of the tail void.* Dissertation, Politecnico di Torino. 2010.
- [28] J. N. Shirlaw, D. P. Richards, P. Ramond und P. Longchamp, "Recent experience in automatic tail void grouting with soft ground tunnel boring machines", *Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, Singapore. 2004*, S. 22–27, doi: 10.1016/j.tust.2004.02.056.
- [29] K. Bäppler, "Entwicklung eines Zweikomponenten-Verpressystems für Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb" in *Taschenbuch für den Tunnelbau 2008: Kompendium der Tunnelbautechnologie - Planungshilfe für den Tunnelbau*, DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Hg., Berlin: VGE-Verlag, S. 263–304.
- [30] K. Bäppler, 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, Golden, Colorado, 2006.

- [31] M. Sharghi, H. Chakeri, H. Afshin und Y. Ozcelik, "An Experimental Study of the Performance of Two-Component Backfilling Grout Used behind the Segmental Lining of a Tunnel-Boring Machine", *Journal of Testing and Evaluation*, Jg. 46, Nr. 5, S. 2083– 2099, 2018, doi: 10.1520/JTE20160617.
- [32] C. Gipperich, A. Schaab und H.-J. Otremba, "Material technology developments in shield tunnelling – annular gap mortar, high-strength concrete and fire-protection concrete: Materialtechnologische Entwicklungen im Schildvortrieb – Ringspaltmörtel, hochfeste Betone und Brandschutzbeton", *Geomechanics and Tunnelling*, Jg. 2010, Nr. 3, S. 283–294, 2010, doi: 10.1002/geot.201000020.
- [33] E. Schneider und M. Spiegl, "Nachgiebiger Ausbau für druckhaftes Gebuirge: Compex-Support-System" in *Taschenbuch für den Tunnelbau 2015: Kompendium der Tunnelbautechnologie - Planungshilfe für den Tunnelbau*, DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Hg., Ernst und Sohn Verlag, S. 251–254.
- [34] E. Schneider, K. Rotter, A. Saxer und R. Röck, "Compex Support System: Komprimierbarer Ringspaltmörtel zur Bewältigung druckhafter Gebirgsbereiche bei TBM-Vortrieben mit starrem Tübbingausbau", *Felsbau*, Nr. 23, S. 95–101, 2005.
- [35] C. Thienert, F. Leismann, D. Edelhoff, H. Valentini, N. Hörlein und E. Kleen, "Development of a water-permeable annular gap fill for single-shell drained segmental linings", *Geomechanics and Tunnelling*, Jg. 11, Nr. 5, S. 599–607, 2018, doi: 10.1002/geot.201800027.
- [36] J.-Y. Oh, Interaktion der Ringspaltverpressung mit dem umgebenden Baugrund und der Tunnelauskleidung. Dissertation, Rheinisch-Westfälische technische Hochschule Aachen, 2013.
- [37] TAC Corporation, *Backfill Grout Injection*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.tacco.com/en/about/backfill/injection-pipe/. Zugriff am: 6. April 2020.
- [38] T. Hashimoto, T. Konda, J. Brinkman, A. Feddema und Y. Kano, "Simultaneous backfill grouting, pressure development in construction phase and in the long-term" in *Tunnelling. A Decade of Progress. GeoDelft 1995-2005*, H. van Lottum und A. Bezuijen, Hg., CRC Press, 2005, S. 101–108.
- [39] Feddema, A., Möller, M., van den Zon, W.H., Hashimoto, T., "ETAC two-component grout field test at Botlek rail tunnel" in *Tunnelling*. *A Decade of Progress*. *GeoDelft* 1995-2005, H. van Lottum und A. Bezuijen, Hg., CRC Press, 2005, S. 19–26.
- [40] E. Dal Negro, A. Boscaro und E. Plescia, "Two-component backfill grout system in TBM. The experience of the tunnel "Sparvo" in Italy" in *Proceedings of the TAC Congress 2014: Tunneling in a Resource Driven World, Vancouver*.
- [41] A. Reschke und C. Noppenberger, "Brisbane Airport Link Earth Pressure Balance Machine Two Component Tailskin Grouting - A New Australian Record" in 14th Australasian Tunnelling Conference 2011: Development of Underground Space. Engineers Australia and Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Auckland, New Zealand, S. 609.
- [42] Pelizza, s., Peila, d., Sorge, R., Cignitti, F., "Back-fill grout with two component mix in EPB tunneling to minimize surface settlements: Rome Metro-Line C case history" in *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, G. Viggiani, Hg., CRC Press, 2012, S. 291–299.

- [43] E. Dal Negro, A. Boscaro, A. Picchio, E. Barbero, C. Acquista und G. Comin, "Main advantages and operational aspects of two-components backfilling grout in mechanized tunnelling with hard-rock TBM: Example of the Saint-Martin-La-Porte TBM job-site at Lyon-Turin" in *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art. Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3-9, 2019, Naples, Italy*, D. Peila, G. Viggiani und T. Celestino, Hg., CRC Press, 2019, S. 1982–1989, doi: 10.1201/9780429424441-209.
- [44] D. G. Aggelis, K. Kasai und T. Shiotani, "Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Nr. 23, S. 629–637, 2008, doi: 10.1016/j.tust.2007.12.001.
- [45] P. Hybský und M. Řeháková, *Two-component grouting applied at "Metro V.A" tunnelling - Evaluation of prerequisites and experiences with practical use.*
- [46] S. Suwansawat, *Earth Pressure Balance Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of Surface Settlements using Artificial Neural Networks*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [47] L. Pellegrini und P. Peruzza, "Sao Paulo Metro Project Control of Settlements In Variable Soil Conditions Through EPB Pressure And Bicomponent Backfill Grout" in *Rapid Excavation and Tunneling Conference 2009*.
- [48] ALLWEILER GmbH und Colfax, *Pumpen beim Tunnelbau: Lange Lebensdauer ist entscheidend*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.allweiler.de/bausteine.net/f/7322/PumpenbeimTunnelbau D web.pdf?fd=2. Zugriff am: 8. März 2020.
- [49] R. Breitenbücher, K. Langenhans und M. Thewes, "Verfahren zum Verpressen des Ringraums zwischen Tübbingen und Gebirge mit Mörtel," Deutschland EP 0 931 909 A1, Jan 5, 1999.
- [50] A. Bezuijen, A. M. Talmon, F. J. Kaalberg und R. Plugge, "Field Measurements of Grout Pressure During Tunnelling of the Sophia Rail Tunnel", *Soils and Foundations*, Jg. 44, Nr. 1, S. 39–48, 2004.
- [51] E. Dal Negro, A. Boscaro, A. Picchio und E. Barbero, "Two-component backfilling grout for double shield TBM – The experience at Follo Line Project" in *Tunnels and* Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art. Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3-9, 2019, Naples, Italy, D. Peila, G. Viggiani und T. Celestino, Hg., CRC Press, 2019, S. 1974–1981, doi: 10.1201/9780429424441-208.
- [52] E. Dal Negro, A. Boscaro, R. Schulkins und G. Gulino, "Two-Component backfill grouting on Rome's Line C", *Tunnels and Tunneling International*, Jg. 2010, S. 45–48.
- [53] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 4127:2014-02 Erd- und Grundbau Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau und für deren Ausgangsstoffe.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [54] American Society for Testing and Materials, *ASTM D6910/D6910M-09, Test Method* for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [55] American Society for Testing and Materials, *ASTM C940-16, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory.* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [56] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 480-4:2005 Zusatzmittel für Beton*, *Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren: Teil 4: Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten).* Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [57] P. Antunes, "Testing Procedures for Two-Component Annulus Grouts" in *North American Tunneling: 2012 Proceedings*, S. 14–22.
- [58] R. Shah, *A numerical study on backfilling of the tail void with two-component grout based on laboratory tests.* Dissertation, Politecnico di Torino, 2017.
- [59] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 196-3:2017-03 Prüfverfahren für Zement: Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [60] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 4094-4:2002-01 Baugrund Feldunter*suchungen: Teil 4: Flügelscherversuche. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [61] P. Antunes und A. E. Reschke, *Performance Benefits of Colloidally Mixed Two-Component Grouts*. [Online]. Verfügbar unter: https://simemug.com/wp-content/uploads/Performance-Benefits-of-Colloidally-Mixed-Two-Component-Grouts.pdf. Zugriff am: 27. März 2020.
- [62] American Society for Testing and Materials, *ASTM C939 / C939M-16a, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [63] Gruskovnjak, A., Lothenbach, B., Holzer, L., Figi, R., Winnefeld, F, "Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement.", *Advances in Cement Research*, Jg. 18, Nr. 3, S. 119–128, 2006, doi: 10.1680/adcr.2006.18.3.119.
- [64] J. Davidovits, "Geopolymers: Inorganic Polymeric new Materials" in *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 1991, 37. Jg., Nr. 8, S. 1633–1656, doi: 10.1007/BF01912193.
- [65] J. L. Provis und J. S. van Deventer, *Alkali Activated Materials. RILEM State-of-the-Art Report*. Dordrecht: Springer Verlag, 2014.
- [66] J. L. Provis, "Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?", *Materials and Structures*, Jg. 47, 1-2, S. 11–25, 2014, doi: 10.1617/s11527-013-0211-5.
- [67] R. Tänzer und D. Stephan, "Portlandzementfreie Bindemittel auch in der Baustoffindustrie werden Alternativen gesucht." in Die Aktuelle Wochenschau zu Bauen und Chemie, Gesellschaft Deutscher Chemiker, Woche, 2011, 18. Jg., Nr. 09.05.
- [68] J. L. Provis, "Alkali-activated materials", *Cement and Concrete Research*, Jg. 114, S. 40–48, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009.
- [69] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes und S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture", *Construction and Building Materials*, Jg. 22, Nr. 7, S. 1315–1322, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019.
- [70] A. Buchwald, *Der Einfluss des Kalziums auf die Kondensation von Silikaten in alkaliaktivierten Bindern*. Habilitationsschrift, Bauhaus-Universität Weimar, 2012.
- [71] A. Herrmann, A. König und F. Dehn, "Vorschlag zur Klassifizierung von alkalisch-aktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln", *Beton* 7+8, S. 390–395, 2015.
- [72] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo und A. Fernández-Jiménez, "An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders" in *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Elsevier, 2015, S. 19–47, doi: 10.1533/9781782422884.1.19.
- [73] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes und S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products", *Construction and Building Materials*, Jg. 22, Nr. 7, S. 1305–1314, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015.

- [74] Y.-S. Wang, Y. Alrefaei und J.-G. Dai, "Silico-Aluminophosphate and Alkali-Aluminosilicate Geopolymers: A Comparative Review", *Frontiers in Materials*, Jg. 6, S. 1735, 2019, doi: 10.3389/fmats.2019.00106.
- [75] F. Škvára, "Alkali activated materials or geopolymers?", *Ceramics-Silikáty*, Jg. 51, Nr. 3, S. 173–177, 2007.
- [76] A. Fernández-Jiménez und A. Palomo, "Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator", *Cement and Concrete Research*, Jg. 35, Nr. 10, S. 1984–1992, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.03.003.
- [77] R. Tänzer, Alkalisch aktivierte Systeme auf Basis von Hüttensandmehlen: Untersuchung des Einflusses der Hüttensandzusammensetzung auf die Bindemitteleigenschaften und Verhalten alkalisch aktivierter Mörtel hinsichtlich einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2018.
- [78] A. Fernández-Jiménez und F. Puertas, "Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements", *Advances in Cement Research*, Jg. 15, Nr. 3, S. 129–136, 2003, doi: 10.1680/adcr.2003.15.3.129.
- [79] F. W. Locher, *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, 1. Aufl. Erkrath: Verlag Bau+Technik, 2015.
- [80] S. Song und H. M. Jennings, "Pore solution chemistry of alkali-activated ground granulated blast-furnace slag", *Cement and Concrete Research*, Jg. 29, Nr. 2, S. 159–170, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00212-9.
- [81] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 196-1:2016-11 Prüfverfahren für Zement: Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [82] J. L. Provis, C. Z. Yong, P. Duxson und J. S.J. van Deventer, "Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Jg. 336, 1-3, S. 57–63, 2009, doi: 10.1016/j.colsurfa.2008.11.019.
- [83] L. Weng und K. Sagoe-Crentsil, "Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I—Low Si/Al ratio systems", *J Mater Sci*, Jg. 42, Nr. 9, S. 2997–3006, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0820-2.
- [84] M. B. Haha, B. Lothenbach, G. Le Saout und F. Winnefeld, "Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part I: Effect of MgO", *Cement* and Concrete Research, Jg. 41, Nr. 9, S. 955–963, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.05.002.
- [85] M. J. Zohuriaan-Mehr und K. Kabiri, "Superabsorbent Polymer Materials: A Review", *Iranian Polymer Journal*, Nr. 17, S. 451–477, 2008.
- [86] V. Mechtcherine und H. W. Reinhardt, *Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee* 225-SAP, 1. Aufl. Springer Netherlands, 2012.
- [87] V. Mechtcherine, I. Dudziak, A.-E. Brüdern, S. Hempel und C. Schröfl, "Superabsorbierende Polymere (SAP): Innovative multifunktionale Betonzusatzmittel", *beton*, Nr. 3, S. 76–80, 2011.
- [88] H. Wack, *Zum Quellungsdruck von polymeren Hydrogelen*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2006.
- [89] M. Elliott, *"Superabsorbent polymers"*. [Online]. Verfügbar unter: http://chimianet.zefat.ac.il/download/Super-absorbant\_polymers.pdf. Zugriff am: 28. März 2020.
- [90] A. Ruttenscheid, *Synthese und Charakterisierung von superabsorbierenden Polymeren mit Kern/Schale-Struktur*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004.

- [91] J. Rault, "The state of water in swollen polymers", *Macromolecular Symposia*, Jg. 100, Nr. 1, S. 31–38, 1995, doi: 10.1002/masy.19951000106.
- [92] M. D. Lechner, K. Gehrke und Nordmeier E. H., Hg., *Makromolekulare Chemie: Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker,* 3. Aufl. Springer Basel AG, 2003.
- [93] F. Buchholz und A. Graham, Hg., *Modern superabsorbent polymer technology*. New-York: Wiley-Vch, 1998.
- [94] G. Rehage, *Kolloidchemisches Taschenbuch, herausgeg. von A. Kuhn.* Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, 1960.
- [95] S. Koltzenburg, M. Maskos, O. Nuyken und R. Mülhaupt, *Polymere: Synthese, Eigen-schaften und Anwendungen*. Berlin: Springer Spektrum, 2014. [Online]. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-34773-3
- [96] S. Mönnig, *Superabsorbing additions in concrete applications, modelling and comparison of different internal water sources*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2009.
- [97] V. Mechtcherine, "Superabsorber im Betonbau" in *Baustoff und Konstruktion*, R. Nothnagel und H. Twelmeier, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 155–160, doi: 10.1007/978-3-642-29573-7\_16.
- [98] C. Schröfl, V. Mechtcherine und M. Gorges, "Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage", *Cement and Concrete Research*, Jg. 42, Nr. 6, S. 865–873, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.03.011.
- [99] C. Schulte-Schrepping, B.-Y. Youn und R. Breitenbücher, "Strength development of two-component mortars for annular gap grouting", *Tunnel*, 3/2018, S. 24–33.
- [100] C. Schulte-Schrepping und R. Breitenbücher, "Festigkeitsentwicklung von Zwei-Komponenten-Mörteln zu bautechnisch relevanten Zeitpunkten" in 58. Forschungskolloquium des DAfStb (2017), Kaiserslautern, S. 141–151.
- [101] C. Schulte-Schrepping, "Neuartige Materialkonzepte für Ringspaltmörtel im maschinellen Tunnelbau" in *Forschung + Praxis 53: STUVA Conference 2019 in Frankfurt a. M.*, S. 112–118.
- [102] IBECO Bentonit-Technologie GmbH, Bentonit für Tunnelbau und unterirdische Bauverfahren – Ein Handbuch für die Baupraxis. Mannheim, 1999.
- [103] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Richtlinie Prüfung von hydraulisch- und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (RPV). Karlsruhe, 2008.
- [104] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 12390-3:2019 Prüfung von Festbe*ton: Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [105] K. Eichler, C. Flohrer und W. Pichler, *Spritzbeton-Technologie: Bindemittel und Verfahren - Bautechnik und Umwelt - Verstärken und Instandsetzen - Sichern und Schützen.* Renningen: Expert-Verl., 2003.
- [106] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 12390-13:2014-06 Prüfung von Festbeton: Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [107] American Society for Testing and Materials, *ASTM D2435-03, Standard Test Method* for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [108] K. Eichler, Fels- und Tunnelbau 2: Verfahren und Kenngrößen Technologie und Umwelt – Vortrieb und Sicherung – Baustoffe und Eigenschaften. Expert-Verlag, 2007.

- [109] C. Schulte-Schrepping und R. Breitenbücher, "Two-component grouts with alkali-activated binders" in *Tunnels and Underground Cities*. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art. Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3-9, 2019, Naples, Italy, S. 3078–3085.
- [110] DIN Deutsches Institut f
  ür Normung e. V., DIN EN 196-6:2019-03 Pr
  üfverfahren f
  ür Zement: Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit; Deutsche Fassung EN 196-6:2018. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [111] B. S. Gebregziabiher, R. Thomas und S. Peethamparan, "Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag", *Cement and Concrete Composites*, Jg. 55, S. 91–102, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.001.
- [112] D. Krizan und B. Zivanovic, "Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali–slag cements", *Cement and Concrete Research*, Jg. 32, Nr. 8, S. 1181– 1188, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00717-7.
- [113] P. Antunes, "Performance Analysis of Fly Ash in Two-Component Grouts" in *Rapid Excavation and Tunneling Conference 2015 Proceedings*, S. 727–734. [Online]. Verfügbar unter: https://simemug.com/technical-case-studies/performance-analysis-of-fly-ash-in-two-component-grouts
- [114] C. Schulte-Schrepping, D. Ov und R. Breitenbücher, "Solidification of Two-Component Grouts by the Use of Superabsorbent Polymers as Activator" in *3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers (SAP) and Other New Admixtures Towards Smart Concrete, RILEM Bookseries Volume 24*, S. 230–238.
- [115] M. Sauerwein, C. Schulte-Schrepping, B.-Y. Youn-Čale und H. Steeb, "Applicability of superabsorbent polymers for the consolidation and strength development of two-component mortars for the annular gap" in *G. Hofstetter, K. Bergmeister, J. Eberhardsteiner, G. Meschke, & H. F. Schweiger (Eds.), EURO:TUN 2017: Proceedings of the IV International Conference on Computational Methods in Tunneling and Subsurface Engineering*, S. 313–320.
- [116] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 18132:2012-04 Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [117] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 1015-3:1999+A1:2004+A2:2006 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk: Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [118] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 18137-3:2002-09 Bestimmung der Scherfestigkeit: Teil 3: Direkter Scherversuch*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [119] Philipp Holzmann AG/ Herrenknecht AG, Fließverhalten und Druckverhältnisse ausgewählter Mörtelrezepturen im simulierten Ringraum. Bericht zum Forschungsprojekt zur Ringraumverpressung der Philipp Holzmann AG/ Herrenknecht AG.
- [120] C. Schulte-Schrepping und R. Breitenbücher, "Development of a test setup for the simulation of the annular gap grouting on a semi technical scale" in *Tunnels and Underground Cities*. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art: Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3-9, 2019, Naples, Italy, S. 3070–3077.
- [121] Pressedienst der Landeshauptstadt Düsseldorf, Wehrhahn-Linie: Schienen sind vollständig verlegt. [Online]. Verfügbar unter: https://www2.duesseldorf.de/fileadmin/Amt13/pld/archive/pld/d2015/d2015\_04/d2015\_04\_15/15040910\_162.pdf. Zugriff am: 28. März 2020.
- [122] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 18130-1:1998-05 Bestimmung des Was*serdurchlässigkeitsbeiwerts: Teil 1 : Laborversuche. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [123] G. Möller, *Geotechnik Bodenmechanik*, 2. Aufl. Berlin: Ernst und Sohn Verlag, 2013.
- [124] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), "Merkblätter und -Richtlinien: Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen (MAK)", 2013.
- [125] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 52450:1985-08 Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe: Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern.* Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [126] P. Grübl, H. Weigler und S. Karl, *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften,* 2. Aufl. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn (Verlag), 2001.

# Anhang

A-1	Charal	cteristische Kenngrößen der Ausgangsstoffe	147
A-2	Vorsch Kompo	lag zur Prüfung charakteristischer Eigenschaften aktivierter Zwei- menten-Mörtel	148
A-3	Konstr von Zw	uktionsansichten des Gelversuchstandes zur Bestimmung der Gelzeiten zei-Komponenten-Mörteln und ergänzende Hinweise	149
A-4	Messst modifiz	ellenanordnung bei der Prüfung der Frühfestigkeiten mit dem zierten Nadelgerät nach Vicat	150
A-5	Ergänz Kompo	ænde Untersuchungen zum Schwindverhalten klassischer Zwei- onenten-Mörtel mit Hinblick auf Laborprüfungen	151
A-6	Mörtel	zusammensetzungen	154
А	-6.1 N	förtelzusammensetzungen zu Kapitel 8 "Zwei-Komponenten-Mörtel"	154
А	-6.2 N	förtelzusammensetzungen zu Kapitel 9 "Alkalische Aktivierung"	155
	A-6.2.1	Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 9.1	155
	A-6.2.2	Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 9.2.1	155
	A-6.2.3	Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 9.2.2	158
А	-6.3 N	förtelzusammensetzungen zu Kapitel 10 "Physikalische Aktivierung"	159
	A-6.3.1	Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 10.2	159
	A-6.3.2	Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 10.3 und Kapitel 11.6.3.2	159
А	-6.4 E	inzelergebnisse	160
	A-6.4.1	Klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel (Kapitel 8)	160
	A-6.4.2	Alkalische Aktivierung (Kapitel 9)	165
	A-6.4.3	Physikalische Aktivierung (Kapitel 10)	172
	A-6.4.4	Einzelergebnisse im Rahmen der Verpressversuche (Kapitel 11)	175
A-7	Konstr	uktionszeichnung des Versuchstandes zur Simulation einer	
	Ringsp	altverpressung	177
A-8	Konstr	uktionszeichnung der Mischeinheit für Zwei-Komponenten-Mörtel	178
A-9	Konstr	uktionszeichnung der Mischeinheit für die physikalische Aktivierung	179

#### CEM I Hüttensand Hüttensand hydraulisch aufbereiteter Flug-Substituent Metakaolin 42,5 R 2 Betonzusatzstoff asche 1 HS1 HS2 CEM hrB FA Meta 19,8 36,1 25-40\* 51 53,6\* SiO<sub>2</sub> 38,1 TiO<sub>2</sub> 0,3 0,8 1,3 0,8 0,3\* k.A. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5,3 10,3 11,2 15-20\* 24,9 29,2\* 0,4 6-12\* 0,4\* Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,0 0,3 5,1 [M.-%] CaO 59,5 39,7 42,3 30-45\* 4,4 2,9\* 1,4 1,2 2-3\* 0,4\* MgO 6,7 5,1 MnO 0,10,2 0,4 k.A. 0,1 k.A. $K_2O$ 0,9 0,6 0,5 k.A. 2,0 1,8\* 9,7\* Na<sub>2</sub>O 0,2 0,3 0,2 k.A. 0,6 0,2 6-12\* 0.3 0,1\* $SO_3$ 3,1 k.A.

A-1 Charakteristische Kenngrößen der Ausgangsstoffe



Tab. A-1: Chemische Zusammensetzung der Zusatzstoffe im Rahmen der alkalischen Aktivierung



*Abb. A*-1: Partikelgrößenverteilung des Zementes und der Zusatzstoffe im Rahmen der alkalischen Aktivierung

Zeitraum nach Aktivierung	Unmittelbar (0 – 20 Sek.)	Unmittelbar (bis ca. 5 Min.)	rd. 10 bis 90 Min.	rd. 10 bis 90 Min.	ca. 2 Std 28 Tage	ca. 2 Std 28 Tage
Materialeigen- schaft	Gelierung	Erosionsstabilität Auswaschwiderstand	Frühfestigkeit	Scherfestigkeit	Druckfestigkeit	Steifigkeit
Prüfung	Gelversuch	Ausspülverfahren	Mod. Nadelgerät nach Vicat	Flügelsondierung	Einaxiale Druckfestigkeit	Statischer Elastizitätsmodul
Norm / Regel- werk	Eigenentwicklung (Anhang, Kapitel A-3)	BAW-Merkblatt "RPV" (2008)	DIN EN 196-3	DIN 4094-4	DIN EN 12390-3	DIN EN 12390-13
Prüfverfahren		Fallricitumg	100 Gramm 200 Gramm			
Beschreibung/ Hinweis	Ermittlung der Zeit bis zum Eintreten des Gelzustandes.	Ermittlung des Masseverlustes bei simuliertem Kontakt mit strömendem Wasser.	Ermittlung der Frühfestigkeitsentwicklung bzw. des Penetrations- widerstandes durch in Lastrichtung aufgebrachte Zusatzgewichte.	Ermittlung der Scher- festigkeitentwicklung.	Ermittlung der einaxialien Druckfestigkeit mit einer Druckprüfmaschine	Festlegung einer prüfalter- abhängigen unteren Prüfspannungen anhand der Spannungs-Dehnungslinien der Druck- festigkeitsprüfungen.

# A-2 Vorschlag zur Prüfung charakteristischer Eigenschaften aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel



A-3 Konstruktionsansichten des Gelversuchstandes zur Bestimmung der Gelzeiten von Zwei-Komponenten-Mörteln und ergänzende Hinweise

Abb. A-2: Detailansicht des Versuchstandes zur Gelzeitbestimmung von Zwei-Komponenten-Mörteln. Links: Mischeinheit. Rechts: Trichter mit definierter Auslauföffnung

#### Versuchsablauf

Vorbereitungen

- Gerät standsicher auf einem Tisch oder an einem Stativ befestigen
- Gerät vor erster Prüfung mit Wasser spülen
- Mischwerkzeuge auf Anhaftungen und Rohrinnenwandungen auf Korrosionserscheinungen prüfen

#### Prüfvorgang

- 1) Kammern verschließen (horizontale Hebelstellung wie in Abb. A-2).
- 2) Befüllen der oberen Kammer über den Trichter mit Komponente A.
- 3) Befüllen der unteren Kammer mit Komponente B (Kammer anschließend mit Stopfen verschließen).
- Das aus dem Statikmischer ausfließende Material füllt den unteren Trichter. Zeitmessung stoppen wenn der Volumenstrom aus dem unteren Trichter abreißt.
- 6) Trichter leeren und Versuchsstand mittels Wasserstrahl durch den oberen Trichter und die Einfüllöffnung von Komponente B reinigen. Die Mischwerkzeuge im Statikmischer sind regelmäßig auf Anhaftungen zu überprüfen und gegebenenfalls auszutauschen.

A-4 Messstellenanordnung bei der Prüfung der Frühfestigkeiten mit dem modifizierten Nadelgerät nach Vicat



Abb. A-3: Geometrie des Prüfgefäßes und Anordnung der Messstellen zur Bestimmung der Frühfestigkeitsentwicklung aktivierter Zwei-Komponenten-Mörtel mit dem modifizierten Nadelgerät nach Vicat

#### A-5 Ergänzende Untersuchungen zum Schwindverhalten klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel mit Hinblick auf Laborprüfungen

Für einen dauerhaften und ungestörten Verbleib eines Zwei-Komponenten-Mörtels im Ringspalt, ungeachtet etwaiger chemischer Expositionen, ist die Durchlässigkeit des Baugrundes von Bedeutung. In der Regel stellen wasserführende Böden oder aber Böden mit einer Durchlässigkeit von 10<sup>-8</sup> m/s eine günstige Umgebungsbedingung für die wasserreichen Zwei-Komponenten-Mörtel dar. In [21] wird ein Einsatz von Zwei-Komponenten-Mörteln unterhalb des Grundwasserspiegels empfohlen. In [37] sind experimentell bestimmte Durchlässigkeiten von zementösen Zwei-Komponenten-Mörteln angegeben. Diese besitzen bei typischen Zementgehalten von 270 und 330 kg/m<sup>3</sup> eine mittlere Durchlässigkeit von 1,8\*10<sup>-10</sup> m/s. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die dort untersuchten Mörtel künstliche Luftporen zur Verbesserung des Frost-Widerstands in einem Größenbereich von 15 bis 30 % beinhaltet haben.

Im Falle eines "Austrockens" des umgebenden Bodens kann es bei Zwei-Komponenten-Mörteln aufgrund der hohen Wassergehalte und dem nur geringen chemisch und physikalisch gebundenen Wasser zu starken Schwindverformungen kommen. Allerdings sind bis dato noch keine Schäden bei Ringspaltverpressungen mit Zwei-Komponenten-Mörteln dokumentiert worden, welche auf einen Volumenverlust durch Schwinden zurückzuführen sind [42]. Nichtdestotrotz gilt es das Schwindverhalten solcher Mörtel zu erfassen, um auch bei der laborseitigen Prüfung von Probekörpern den Einfluss des Schwindens während der Präparation und Prüfvorbereitung zu erfassen. Dazu wurde an drei Prüfserien mit je drei Prüfkörpern das Schwindmaß an Prismen gemäß DIN 52450 [125] ermittelt. Je Serie wurden drei Probekörper des Basismörtels M0 hergestellt und in einem Alter von zwei Tagen geprüft. Das mittlere Schwindmaß des Basismörtels M0 lag nach 15 Minuten ungeschützter Lagerung an Luft nach dem Ausschalen einer zwei Tage alten Probe bei 0,34 mm/m. In Abb. A-4 links ist zu erkennen, dass die relative Längenänderung über einen Zeitraum von 15 Minuten bei ungeschützter Lagerung nahezu linear stieg.



Abb. A-4: Schwindmessung an prismatischen Probekörpern des Basismörtels M0 (Alter: 2 Tage). Rechts: Vergleich von Probekörpern unmittelbar nach dem Ausschalen und nach 7 Tagen ungeschützter Lagerung in einer Klimakammer (20°C, 65 % rel. F.)

In Abb. A-4, rechts ist ein Vergleich zweier gleichaltriger Proben des Basismörtels M0 bei unterschiedlichen Lagerungsarten und den daraus ergebenden Schwindverformungen gezeigt. Die Fotoaufnahme wurde sieben Tage nach Aktivierung erstellt, wobei ein Probekörper dauerhaft in der Schalung verblieben ist, die andere Probe hingegen nach zwei Tagen ausgeschalt und ohne weiteren Schutz gegen Austrocknung in einer Klimakammer (20°C; 65 % r. F.) für weitere fünf Tage gelagert wurde. Die ungeschützte Lagerung führte zu einem erheblichen Volumenverlust der Probe.

Aufgrund des hohen Schwindmaßes nach 15 Minuten von 0,34 mm/m ist anzunehmen, dass das Schwinden des Zwei-Komponenten-Mörtels während der unterschiedlichen Prüfungen am aktivierten Material Einfluss auf das Ergebnis bzw. die Festigkeit und die Steifigkeit nimmt. Um dies genauer zu eruieren, wurden Schwindmessungen an zylindrischen Probekörpern, wie sie auch bei der Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit und des statischen Elastizitätsmoduls verwendet wurden, unter Prüfbedingungen durchgeführt. Des Weiteren wurde untersucht, inwieweit es zu einer Beeinflussung der einaxialen Druckfestigkeit kommt. Um das Schwindmaß an zylindrischen Probekörpern unter den Bedingungen, wie sie auch bei Prüfungen zur Festigkeit oder Steifigkeit des Materials vorherrschen, bestimmen zu können, wurden Prüfkörper jeweils für 15 Minuten in die Prüfmaschine gestellt, ohne dass Last aufgebracht wurde. Die vertikalen Verformungen in diesem Zeitraum wurden dabei mit einem Messrahmen mit zwei seitlich angeordneten Dehnungsaufnehmern (Messstrecke 10 cm) erfasst. Je Probekörper wurden die gemessenen Dehnungen gemittelt und das Schwindmaß bestimmt. Die Ergebnisse sind in (Abb. A-5, links) dargestellt. Das mittlere Schwindmaß nach 15 Minuten lag bei 0,11 mm/m. Ähnlich wie bei den Schwindmessungen an Prismen war der Verlauf der Längenänderung innerhalb von 15 Minuten nahezu linear ansteigend.



*Abb. A-5:* Schwindmessung an zwei Tage alten zylindrischen Probekörpern des Basismörtels (Aktivatorgehalt: 90 kg/m<sup>3</sup>). Rechts: Einfluss des Schwindens auf die 2-Tages-Druckfestigkeit

Um den Einfluss des Schwindens auf die Druckfestigkeiten des Basismörtels zu untersuchen, wurden fünf zylindrische Probekörper (Ø: 100 mm, Höhe: 200 mm) hergestellt und deren Druckfestigkeit im Alter von zwei Tagen nach unterschiedlich lang andauernder ungeschützter Lagerung bestimmt. Die Probekörper wurden zeitgleich aus der Folie entnommen und ohne Schutz vor Austrocknung bis zum Prüfbeginn an Luft gelagert. Anschließend wurden alle 15 Minuten die Druckfestigkeiten an separaten Probekörpern bestimmt. In Abb. A-5, rechts sind die Druckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Prüfzeitpunkt dargestellt. Die Druckfestigkeiten lagen zwischen 1,03 N/mm<sup>2</sup>, unmittelbar nach dem Entnehmen aus der Folie und 1,16 N/mm², nach 60 Minuten ungeschützter Lagerung. Es ist zu erkennen, dass das Schwinden innerhalb einer Stunde keinen negativen Einfluss auf die Druckfestigkeit der Probekörper hatte. Des Weiteren nahm die Druckfestigkeit über die Zeit nicht ab, wie es bei einem negativen Einfluss des Schwindens zu erwarten wäre, sondern es kam zu einem Festigkeitszuwachs. Hier kann von einer Art Einschnürung des Probekörpers infolge Schwinden ausgegangen werden, was dem bei einaxialer Druckbelastung mit Querdehnungsbehinderung entstehenden Querzug einen entsprechenden Widerstand entgegensetzt und so zu einer höheren Druckfestigkeit führte. Dies ist allerdings nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Die Ergebnisse der Schwindversuche zeigen abschließend, dass das Material innerhalb von 15 Minuten bereits starke Schwindverformungen erfuhr. Die zylindrischen Probekörper wiesen mit 0,11 mm/m eine geringere Schwindverformung auf als die Prismen mit 0,34 mm/m. Dies ist auf die unterschiedliche Geometrie und das Volumen/Oberflächenverhältnis der Probekörper zurückführen. Schlankere Probekörper trocknen schneller aus und Erreichen ihr Endschwindmaß deutlich früher als gedrungene Probekörper [126].

Aus der Summe der Untersuchungen ergibt sich, dass Zwei-Komponenten-Mörtel, besonders während der Lagerung, vor Austrocknung geschützt werden müssen. Dazu müssen diese luftdicht mit Folie eingefasst und in Behältern über Wasser oder mit ausreichend hoher Luftfeuchte (z. B. wassergesättigter Sand) gelagert werden. Bei ungünstigen Lagerungsbedingungen kann es ansonsten zu einem Wasserverlust und somit zu Schwindverformungen kommen, die die Prüfergebnisse negativ beeinflussen können. Um reproduzierbare Prüfergebnisse zu erzeugen, sind schwer kalkulierbare Einflussfaktoren, wie das Schwinden zu minimieren. Eine Vorgehensweise zur Handhabung von Prüfkörpern, ähnlich wie in DIN EN 196-1 [81] beschrieben, ist auch für die Prüfungen von Zwei-Komponenten-Mörteln anzustreben.

#### A-6 Mörtelzusammensetzungen

### A-6.1 Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 8 "Zwei-Komponenten-Mörtel"

	Ausgangsmaterialien		M0 - B MV	asismörtel Z 3,4	M0 - Ba MV	asismörtel Z: 2,6	M0 - Basismörtel MVZ: 2,2	
			Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	250	80,9	250	80,9	250	80,9
	Verzögerer	1,09	6,25	5,73	6,25	5,73	6,25	5,73
٨	Natrium-Bentonit	2,65	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3
A	Zugabewasser	1,00	836	836	836	836	836	836
	W/B-Wert	-	3,34	-	3,34	-	3,34	-
	Summe	-	1122	934	1122	934	1122	934
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	90,0	65,7	63,0	46,0	45,0	32,8
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	27,0	17,9	45,0	29,8
	Summe	-	90,0	65,7	90,0	63,9	90,0	62,6
A+B	Summe	-	1212	1000	1212	998	1212	997

#### Tab. A-2: Basismörtel: Variation Aktivatorzusammensetzung

Tab. A-3: Basismörtel: Variation Aktivatorgehalt

Ausgangsmaterialien		Dichte	M0 - B 70 kg/m	asismörtel <sup>3</sup> , MVZ 3,4	M0 - B 90 kg/m	asismörtel <sup>3</sup> , MVZ 3,4	M0 - Basismörtel 110 kg/m <sup>3</sup> , MVZ 3,4	
		[kg/dm <sup>3</sup> ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	250	80,9	250	80,9	250	80,9
	Verzögerer	1,09	6,25	5,73	6,25	5,73	6,25	5,73
	Natrium-Bentonit	2,65	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3
А	Zugabewasser	1,00	850	850	836	836	821	821
	W/B-Wert	-	3,40	-	3,34	-	3,28	-
	Summe	-	1136	948	1122	934	1107	919
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	70,0	51,1	90,0	65,7	110,0	80,3
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	0	0	0	0,0
	Summe	-	70,0	51,1	90,0	65,7	110	80,3
A+B	Summe	-	1206	1000	1212	1000	1217	1000

# A-6.2 Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 9 "Alkalische Aktivierung"

A-6.2.1 Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 9.1

Tab. A-4:	Alkalische Aktivierung:	Mörtelzusammensetzung	zementfreier	Zwei-Komponenten-Mörtel
-----------	-------------------------	-----------------------	--------------	-------------------------

Ausgangsmaterialien		Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	2KM	_AAHS	2KM_AAHS_red		
	Ausgangsmatchanen		Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	0	0	0	0	
	Hüttensand - HS 1	2,89	0	0	319	110	
	Hüttensand - HS 2	2,94	250	85,0	0	0	
	Verzögerer	1,09	0	0	0	0	
А	Natrium-Bentonit	2,65	30,0	11,3	30,0	11,3	
	Zugabewasser	1,00	853	853	815	815	
	W/B-Wert	-	3,41	-	2,55	-	
	Summe	-	1133	949	1164	937	
	Kalium-Lauge (H <sub>2</sub> O:KOH: 60:40)	1,00	23,3	23,3	29,7	29,7	
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	41,8	27,7	53,3	35,3	
	Summe	-	65,1	51,0	83,0	65,0	
A+B	Summe	-	1198	1000	1247	1002	

### A-6.2.2 Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 9.2.1

Tab. A-5: Alkalische Aktivierung: Variation: Art des Zusatzstoffes (65%)

Ausgangsmaterialien		Dichte	M0-Variation mit HS1 (65%)		M0-V mit HS	M0-Variation mit HS2 (65%)		ariation 3 (65%)	M0-V mit FA	ariation A (65%)	M0-V mit M	'ariation eta (65%)
		[kg/dm <sup>3</sup> ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [l]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [l]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [l]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	112	36,2	112	36,2	112	36,2	112	36,2	112	36,2
	Hüttensand - HS 1	2,89	207	71,6	0	0	0	0	0	0	0	0
	Hüttensand - HS 2	2,94	0	0	207	70,4	0	0	0	0	0	0
	Flugasche - SFA	2,26	0	0	0	0	207	91,6	0	0	0	0
	Betonzusatzstoff - hrB	2,65	0	0	0	0	0	0	207	78,1	0	0
А	Metakaolin	2,60	0	0	0	0	0	0	0	0	207	79,6
	Verzögerer	1,09	2,80	2,57	2,80	2,57	2,80	2,57	2,80	2,57	2,80	2,57
	Natrium-Bentonit	2,65	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3
	Zugabewasser	1,00	805	805	805	805	790	790	805	805	800	800
	W/B-Wert	-	2,52	-	2,52	-	2,48	-	2,52	-	2,51	-
	Summe	-	1157	927	1157	926	1142	932	1157	933	1152	930
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe	-	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5
A+B	Summe	-	1255	998	1255	997	1240	1003	1255	1005	1250	1001

Ausgangsmaterialien		Dichte	M0-Variation mit HS1 (50%)		M0-V mit HS	ariation 2 (50%)	M0-Va mit hrF	ariation 3 (50%)	M0-V mit FA	ariation A (50%)	M0-V mit Me	ariation eta (50%)
		[kg/dm <sup>3</sup> ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [l]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [l]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	160	51,8	160	51,8	160	51,8	160	51,8	160	51,8
	Hüttensand - HS 1	2,89	159	55,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Hüttensand - HS 2	2,94	0	0	159	54,1	0	0	0	0	0	0
	Flugasche - SFA	2,26	0	0	0	0	159	70,4	0	0	0	0
	Betonzusatzstoff - hrB	2,65	0	0	0	0	0	0	159	60,0	0	0
А	Metakaolin	2,60	0	0	0	0	0	0	0	0	159	61,2
	Verzögerer	1,09	4,00	3,67	4,00	3,67	4,00	3,67	4,00	3,67	4,00	3,67
	Natrium-Bentonit	2,65	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3
	Zugabewasser	1,00	805	805	805	805	790	790	805	805	800	800
	W/B-Wert	-	2,52	-	2,52	-	2,48	-	2,52	-	2,51	-
	Summe	-	1158	927	1158	926	1143	927	1158	932	1153	928
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Summe	-	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5	98,0	71,5
A+B	Summe	-	1256	998	1256	997	1241	999	1256	1003	1251	999

 Tab. A-6:
 Alkalische Aktivierung: Variation: Art des Zusatzstoffes (50%)

 Tab. A-7:
 Alkalische Aktivierung: Variation: Art des Zusatzstoffes (75%)

		Dichte	M0-Variation	n mit HS1 (75%)	M0-Variation	n mit HS2 (75%)
	Ausgangsmaterialien	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	80,0	25,9	80,0	25,9
	Hüttensand - HS 1	2,89	239	82,7	0	0
	Hüttensand - HS 2	2,94	0	0	239	81,3
	Verzögerer	1,09	2,00	1,83	2,00	1,83
А	Natrium-Bentonit	2,65	30,0	11,3	30,0	11,3
	Zugabewasser	1,00	805	805	805	805
	W/B-Wert	-	2,52	-	2,52	-
	Summe	-	1156	927	1156	925
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	98,0	71,5	98,0	71,5
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	0	0
	Summe	-	98,0	71,5	98,0	71,5
A+B	Summe	-	1254	998	1254	997

Ausgangsmaterialien		Dichte	160	0_3,4	16	0_2,6	160	_2,2
		[kg/dm <sup>3</sup> ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	160	51,8	160	51,8	160	51,8
	Hüttensand - HS 1	2,89	0	0	0	0	0	0
	Hüttensand - HS 2	2,94	159	54,1	159	54,1	159	54,1
	Verzögerer	1,09	4,0	3,67	4,0	3,67	4,0	3,67
А	Natrium-Bentonit	2,65	30,0	11,3	30,0	11,3	30,0	11,3
	Zugabewasser	1,00	805	805	805	805	805	805
	W/B-Wert	-	2,52	-	2,52	-	2,52	-
	Summe	-	1158	926	1158	926	1158	926
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	98,0	71,5	68,6	50,1	49,0	35,8
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	29,4	19,5	49,0	32,5
	Summe	-	98,0	71,5	98,0	69,5	98,0	68,2
A+B	Summe	-	1256	997	1256	995	1256	994

Tab. A-8:Alkalische Aktivierung: Variation der Aktivatorzusammensetzung bei einem Hüttensandgehalt<br/>von 50%

Tab. A-9:Alkalische Aktivierung: Variation der Aktivatorzusammensetzung bei einem Hüttensandgehalt<br/>von 75%

		Dichte	80	_3,4	80	_2,6	80_2,2	
	Ausgangsmaterialien		Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	80	25,9	80	25,9	80	25,9
	Hüttensand - HS 1	2,89	0	0	0	0	0	0
	Hüttensand - HS 2	2,94	239	81,3	239	81,3	239	81,3
	Verzögerer	1,09	2,00	1,83	2,00	1,83	2,00	1,83
А	Natrium-Bentonit	2,65	30,0	11,32	30,0	11,32	30,0	11,32
	Zugabewasser	1,00	805	805	805	805	805	805
	W/B-Wert	-	2,52	-	2,52	-	2,52	-
	Summe	-	1156	925	1156	925	1156	925
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	98,0	71,5	68,6	50,1	49,0	35,8
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	29,4	19,5	49,0	32,5
	Summe	-	98,0	71,5	98,0	69,5	98,0	68,2
A+B	Summe	-	1254	997	1254	995	1254	994

		Dichte	12	0_3,4	20	0_3,4
Ausgangsmaterialien		[kg/dm <sup>3</sup> ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [l]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	120	38,8	200	64,7
	Hüttensand - HS 1	2,89	0	0	0	0
	Hüttensand - HS 2	2,94	199	67,7	139	47,3
	Verzögerer	1,09	3	2,75	5	4,59
А	Natrium-Bentonit	2,65	30	11,3	30	11,3
	Zugabewasser	1,00	805	805	805	805
	W/B-Wert	-	2,52	-	2,37	-
	Summe	-	1157	926	1179	933
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	98,0	71,5	98,0	71,5
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	0	0
-	Summe	-	98	71,5	98	71,5
A+B	Summe	-	1255	997	1277	1004

Tab. A-10: Alkalische Aktivierung: Variation des Zement/Hüttensand-Verhältnis

#### A-6.2.3 Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 9.2.2

Tab. A-11: Alkalische Aktivierung: Gelierhilfe auf Basis von Calciumhydroxid

Ausgangsmaterialien		Dichte	60 kg ( (Aktiva 6,5 Vol%/I	Gelierhilfe atorgehalt: Komponente A)	90 kg Gelierhilfe (Aktivatorgehalt: 9,1 Vol%/Komponente A)		
		[kg/dm <sup>3</sup> ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	0	0	0	0	
	Hüttensand - HS 2	2,94	320	109	320	109	
	Kalkmilch (Suspension)	-	60	-	90	-	
	Calciumhydroxid (30 %)	2,21	18	8,14	27	12,2	
	Wasser (70%)	1,00	42	42,0	63	63,0	
А	Verzögerer	1,09	1,5	1,38	2,25	2,06	
	Natrium-Bentonit	2,65	30	11,3	30	11,3	
	Zugabewasser	1,00	770	770	749	749	
	W/B-Wert	-	2,41	-	2,34	-	
	Summe	-	1242	942	1281	946	
	Natrium-Wasserglas (MVZ: 3,4)	1,37	85,0	62,0	120	87,6	
В	Kalium-Wasserglas (MVZ: 1,5)	1,51	0	0	0	0	
	Summe	-	85,0	62,0	120	87,6	
A+B	Summe	-	1327	1004	1401	1034	

# A-6.3 Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 10 "Physikalische Aktivierung"

A-6.3.1 Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 10.2

Ausgangsmaterialien		Dichte	В	-120	E	8-60	I-0	
		[kg/dm <sup>3</sup> ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	120	38,8	60	19,4	0	0
	Flugasche	2,26	268	119	328	145	420	186
	Quarzsand 0-1 mm	2,63	169	64,3	169	64,3	169	64,3
	Quarzsand 0-2 mm	2,63	674	256	674	256	674	256
А	Quarzkies 2-8 mm	2,63	454	173	454	173	454	173
	Bentonitsuspension (6% Konzentration)	1,03	183	177	166	161	183	177
	Zugabewasser	1,00	177	177	164	164	135	135
	W/B-Wert	-	0,93	-	0,85	-	0,76	-
	Summe	-	2045	1005	2015	982	2035	991
В	Superabsorbierende Polymere - SAP 3	0,70	6,00	8,57	6,00	8,57	6,00	8,57
2	Summe	-	6,00	8,57	6,00	8,57	6,00	8,57
A+B	Summe	-	2051	1013	2021	991	2041	1000

Tab. A-12: Physikalische Aktivierung: Grundrezepturen von Ein-Komponenten-Mörtel

#### A-6.3.2 Mörtelzusammensetzungen zu Kapitel 10.3 und Kapitel 11.6.3.2

Tab. A-13:	Physikalische Aktivierung: modifizierter, bedingt-aktiver Ein-Komponenten-Mörtel für die Ak-
	tivierung durch suspendierte SAP

Ausgangsmaterialien		Dichte	moc (Betrachtur) und B	1. B-60 ng d. Komp. A separat)	mod. B-60 (für Verpressversuche)	
		[kg/ulli ]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [1]
	Zement CEM I 42,5 R	3,09	60	19,42	52,0	16,82
	Flugasche	2,26	328	145,1	284,1	125,7
	Quarzsand 0-1 mm	2,63	272	103,4	235,6	89,6
	Quarzsand 0-2 mm	2,63	735	279,5	636,7	242,1
	Quarzkies 2-8 mm	2,63	598	227,4	518,0	197,0
А	Bentonitsuspension (6% Konzentration)	1,03	166	160,7	143,8	139,2
	Fließmittel (PCE)	1,01	2,40	2,38	2,08	2,06
	Zugabewasser	1,00	68	68,0	58,9	58,9
	W/B-Wert	-	0,60	-	0,60	-
	Summe	-	2229	1000	1931	866
	Superabsorbierende Polymere - SAP 3	0,70	9,00	12,9	9,00	12,9
р	Trägerfluid - Glycerin	1,26	143	113	143	113
В	Trägerfluid - Wasser	1,00	7,51	7,51	7,51	7,51
	Summe	-	159	134	159	134
A+B	Summe	-	-	-	2091	1000

# A-6.4 Einzelergebnisse

A-6.4.1 Klassischer Zwei-Komponenten-Mörtel (Kapitel 8)

Marsh-Auslaufzeiten t <sub>M,1000</sub> - Basismörtel M0								
Zeit nach Herstellung [h]	0	24	48	72				
Messung 1 [s]	42,1	40,5	40,4	49,2				
Messung 2 [s]	41,4	40,0	40,4	49,4				
Messung 3 [s]	41,3	40,6	41,2	49,4				
Messung 4 [s]	41,2	39,0	41,4	51,7				
Messung 5 [s]	40,3	39,8	42,3	49,0				
Messung 6 [s]	41,6	40,5	44,5	48,3				
Messung 7 [s]	42,2	40,0	44,0	48,6				
Messung 8 [s]	42,1	40,2	40,2	50,7				
Messung 9 [s]	42,7	38,3	40,3					
Messung 10 [s]	40,4	39,7	41,3					
Messung 11 [s]		39,8	41,4					
Messung 12 [s]		39,5	41,4					
Messung 13 [s]		40,9	44,0					
Messung 14 [s]		40,2	43,4					
Messung 15 [s]		39,9	43,5					
Marsh-Auslaufzeit (Mittelwert) [s]	41,5	39,9	42,0	49,5				

Tab. A-14: Basismörtel: Marsh-Auslaufzeiten bis 72 Stunden nach Herstellung

Tab. A-15: Basismörtel: Blutwasser / Sedimentationsstabilität bis 48 Stunden nach Herstellung

Blutwasser - Basismörtel M0								
Zeit nach Herstellung [h]	4	6	24	48				
Messung 1 [M%]	1,8	2,9	5,8	6,4				
Messung 2 [M%]	2,5	4,2	5,6	6,7				
Messung 3 [M%]	1,9	3,1	5,4	5,1				
Blutwasser Mittelwert [M%]	2,1	3,4	5,6	6,1				

Zeitabhängiges Drehmoment [Ncm] - Basismörtel M0												
	Hinweis: Reduzierter Datensatz der Messergebnisse											
	Aktiv	/atorgeh	alt: 70 k	.g/m³	Aktivatorgehalt: 90 kg/m <sup>3</sup>			tg/m <sup>3</sup>	Aktivatorgehalt: 120 kg/m <sup>3</sup>			cg/m <sup>3</sup>
Zeit [s]	0h	24h	48h	72h	0h	24h	48h	72h	0h	24h	48h	72h
50	0,12	0,15	0,14	0,11	0,13	0,12	0,11	0,13	0,18	0,15	0,13	0,14
51	0,12	0,15	0,14	0,11	0,13	0,12	0,11	0,14	0,18	0,15	0,13	0,15
52	0,12	0,15	0,14	0,12	0,13	0,12	0,11	0,20	0,18	0,15	0,13	0,15
53	0,14	0,16	0,15	0,15	0,13	0,15	0,12	0,33	0,19	0,22	0,14	0,16
54	0,21	0,18	0,14	0,24	0,14	0,28	0,17	0,54	0,26	0,42	0,18	0,24
55	0,36	0,23	0,14	0,47	0,16	0,48	0,35	0,74	0,48	0,73	0,32	0,56
56	0,56	0,35	0,17	0,73	0,24	0,71	0,59	0,85	0,82	0,98	0,63	1,30
57	0,77	0,49	0,22	0,92	0,42	0,90	0,84	0,94	1,17	1,17	1,22	1,91
58	0,98	0,61	0,30	1,07	0,87	0,93	0,94	0,96	1,68	1,36	1,95	1,91
59	1,02	0,65	0,42	0,98	1,23	0,92	0,91	0,98	1,98	1,46	2,07	1,60
60	0,95	0,62	0,55	0,85	1,30	0,89	0,84	0,95	1,87	1,34	1,98	1,30
61	0,85	0,58	0,63	0,75	1,26	0,85	0,77	0,85	1,61	1,28	1,82	1,09
62	0,75	0,55	0,67	0,71	1,14	0,79	0,72	0,87	1,46	1,30	1,68	1,05
63	0,71	0,51	0,64	0,66	1,00	0,71	0,68	0,88	1,56	1,29	1,59	1,18
64	0,65	0,46	0,60	0,58	0,85	0,64	0,64	0,81	1,51	1,28	1,47	1,50
65	0,66	0,43	0,55	0,54	0,74	0,59	0,65	0,96	1,52	1,24	1,38	1,71
66	0,65	0,40	0,51	0,49	0,67	0,56	0,64	0,90	1,51	1,15	1.37	1,79
67	0,65	0,39	0,49	0,45	0,64	0,55	0,61	0,80	1,44	1,10	1,31	1,80
68	0,65	0,39	0,46	0,44	0,63	0,53	0,58	0,77	1,59	1,10	1,25	1,69
69	0,62	0,38	0,43	0,42	0,63	0,58	0,54	0,72	1,77	1,05	1,31	1,60
70	0.59	0.38	0.40	0.40	0.65	0.54	0.51	0.70	1.65	1.02	1.39	1.71
71	0.56	0.37	0.38	0.38	0.60	0.48	0.50	0.65	1.44	0.99	1.40	1.74
72	0.54	0.35	0.36	0.38	0.56	0.45	0.51	0.63	1.28	0.95	1.37	1.85
73	0.53	0.33	0.36	0.36	0.53	0.43	0.49	0.61	1.15	0.91	1.30	1.99
74	0.52	0.32	0.35	0.34	0.50	0.41	0.48	0.59	1.05	0.87	1.23	1.86
75	0.49	0.32	0.34	0.33	0.51	0.39	0.47	0.59	0.98	0.82	1.15	1.75
76	0.46	0.31	0.35	0.32	0.49	0.38	0.44	0.56	0.93	0.77	1.07	1 71
77	0.44	0.30	0.35	0.32	0.46	0.36	0.42	0.53	0.88	0.74	1.00	1.78
78	0.42	0.30	0.34	0.31	0.43	0.35	0.41	0.50	0.84	0.70	0.95	1 91
79	0.41	0.29	0.34	0.32	0.42	0.34	0.39	0.49	0.80	0.66	0.91	2.01
80	0.40	0.29	0.33	0.32	0.41	0.33	0.38	0.47	0.75	0.63	0.89	1 75
85	0.35	0.29	0.29	0.79	0.38	0.31	0.35	0.37	0.66	0.60	0.95	1 39
90	0.31	0.28	0.27	0.34	0.35	0.30	0.32	0.35	0.62	0.55	0.91	1.08
95	0.29	0.28	0.27	0.32	0.32	0.32	0.30	0.33	0.55	0.48	0.83	0.98
100	0.29	0.27	0.26	0.32	0.29	0.30	0.29	0.34	0.55	0.48	0.73	0.88
105	0.27	0.26	0.25	0.33	0.30	0.30	0.29	0.34	0.52	0.45	0.66	0.85
110	0.26	0.26	0.25	0.34	0.28	0.28	0.29	0.33	0.52	0.43	0.63	0.82
115	0.26	0.23	0.23	0.37	0.29	0.25	0.29	0.33	0.48	0.44	0.55	0.81
120	0.26	0.23	0.24	0.39	0.29	0.25	0.28	0.33	0.46	0.39	0.53	0.81
120	0,20	0,24	0,24	0,57	0,27	0,25	0,20	0,55	0,40	0,57	0,55	0,01
					1	1						
900	0,21	0,29	0,50	1,29	0,25	0,29	0,48	0,73	0,53	0,44	0,61	2,79
950	0,20	0,30	0,51	1,37	0,27	0,30	0,49	0,81	0,55	0,45	0,63	2,90
1000	0,21	0,30	0,53	1,30	0,26	0,32	0,52	0,85	0,55	0,46	0,64	3,32
1050	0,21	0,36	0,55	1,40	0,27	0,32	0,58	0,89	0,56	0,47	0,72	3,43
1100	0,23	0,38	0,56	1,41	0,28	0,34	0,61	0,99	0,57	0,48	0,73	3,62
1150	0,23	0,39	0,62	1,43	0,29	0,38	0,62	1,11	0,60	0,48	0,78	3,93
1200	0,25	0,40	0,66	1,42	0,30	0,40	0,67	1,16	0,61	0,51	0,79	4,05

Tab. A-16:Basismörtel: Drehmomenterfassung zur Bestimmung der Gelzeit an einem klassischen Zwei-<br/>Komponenten-Mörtel mit unterschiedlichen Altern und variablem Aktivatorgehalt

Gelzeit [s] – Basismörtel M0									
Aktivatordosierung kg/m <sup>3</sup>	70	80	90	100	110	120			
Aktivatordosierung Vol%	5,5	6,2	7,0	7,8	8,6	9,4			
Aktivatordosierung M%	6,2	7,1	8,0	8,9	9,8	10,7			
Gelzeit - Messwert 1 [s]	7,44	8,50	9,31	10,94	11,49	12,16			
Gelzeit - Messwert 2 [s]	7,74	8,69	9,44	10,80	11,56	12,31			
Gelzeit - Messwert 3 [s]	7,38	8,39	9,63	11,10	11,50	12,22			
Gelzeit Mittelwert [s]	7,52	8,53	9,46	10,95	11,52	12,23			

Tab. A-17: Basismörtel: Gelzeiten bei unterschiedlichen Aktivatorgehalten

Tab. A-18: Basismörtel: Erosionsstabilität (Masseverlust nach Ausspülverfahren)

Erosionsstabilität - Basismörtel M0								
	Masse der Probe vorMasse der Probe nachVerlustVersuchsdurchführung [g]Versuchsdurchführung [g][g]							
Prüfung 1	2224,3	2222,5	1,8	0,08				
Prüfung 2	2161,6	2158,6	3,0	0,14				
Prüfung 3	2226,4	2219,1	7,3	0,33				
Mittlerer Massenverlust [g]								

*Tab. A-19: Basismörtel: Frühfestigkeit bei unterschiedlichen Aktivatorgehalten (Prüfgerät: mod. Nadelgerät nach Vicat)* 

Frühfestigkeit - Basismörtel M0											
		Zeit bis Er	Zeit bis Erreichen des jeweiligen Spannungslevels in Minuten								
Aktivatorgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]		70	80	90	100	110					
	0,037	45,0	30,0	25,0	22,5	22,5					
gen	0,050	47,5	32,5	30,0	27,5	27,5					
anung [ <sup>2</sup> ]	0,063	52,5	40,0	35,0	30,0	32,5					
s Spai	0,075	67,5	42,5	40,0	32,5	35,0					
tikale	0,087	72,5	47,5	45,0	35,0	37,5					
ver	0,100	85,0	52,5	47,5	40,0	40,0					
	0,137	107,5	72,5	50,0	45,0	47,5					
Scherfestigkeiten [kN/m <sup>2</sup> ] - Basismörtel M0											
---------------------------------------------------------	----------------------------	-----	------	------	------	------	------	------	------	--	--
Zeit nach Aktivier	ung [Min.]	25	30	35	40	45	55	70	80		
	Messwert 1		1,0	3,7	5,1	6,9	14,1	17,3	28,6		
Basismörtel M0	Messwert 2	0,3	1,9	3,2	5,4	8,7	14,4	20,4	30,4		
70 kg/m <sup>3</sup>	Messwert 3	0,0	0,4	1,9	4,3	7,2	13,5	17,9	25,7		
	Scherfestigkeit Mittelwert	0,2	1,1	2,9	5,0	7,6	14,0	18,5	28,2		
	Messwert 1		6,3	7,9	14,7	16,9	22,2	31,6	53,1		
Basismörtel M0	Messwert 2		5,7	7,0	12,5	16,1	21,9	38,2	46,8		
90 kg/m <sup>3</sup>	Messwert 3	2,9	5,6	7,2	12,8	15,4	21,3	30,7	44,5		
	Scherfestigkeit Mittelwert	2,9	5,9	7,4	13,3	16,1	21,8	33,5	48,2		
	Messwert 1	8,4	11,0	15,9	27,2	33,2	53,1	76,8	91,8		
Basismörtel M0 110 kg/m <sup>3</sup>	Messwert 2	7,2	13,8	22,2	28,5	34,5	50,6	72,7	91,0		
	Messwert 3	7,9	11,5	19,1	26,1	31,0	43,6	68,7	83,7		
	Scherfestigkeit Mittelwert	7,8	12,1	19,0	27,2	32,9	49,1	72,7	88,8		

Tab. A-20: Basismörtel: Scherfestigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Aktivatorgehalten

Tab. A-21: Basismörtel: Druckfestigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Aktivatorgehalten

Einaxiale Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] - Basismörtel M0													
Aktiva- Druckfes-			Prüfzeitpunkt nach Aktivierung [h/d]										
tor [kg/m³]	tigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	2h	4h	6h	1d	2d	7d	14d	21d	28d	35d	56d	90d
70 Einzel- werte	0,08	0,15	0,16	0,46		1,08			(1,02)		1,37	1,38	
	Einzel- werte	0,08	0,12	0,15	0,50		1,09			1,24		1,40	1,39
		0,07	0,17	0,17	0,56		1,14			1,25		1,40	1,45
	Mittelwert	0,08	0,15	0,16	0,50		1,10			1,25		1,39	1,41
		0,28	0,35	0,41	0,76	1,12	1,45	1,55	1,59	1,74	1,79	1,80	(1,57)
00	Einzel- werte	0,30	0,40	0,42	0,83	1,14	1,47	1,59	1,73	1,66	1,82	1,92	1,92
90		0,31	0,36	0,42	0,80	1,16	1,48	1,61	1,76	1,79	1,83	1,95	1,97
	Mittelwert	0,29	0,37	0,42	0,80	1,14	1,46	1,58	1,69	1,73	1,81	1,89	1,95
		0,25	0,42	0,70	1,07		1,54			1,87		2,05	2,03
110	Einzel- werte	0,28	0,44	0,68	1,04		1,56			1,92		2,11	2,29
110		0,29	0,46	0,69	0,97		1,57			1,93		2,12	2,30
	Mittelwert	0,27	0,44	0,69	1,03		1,56			1,91		2,09	2,21

\*Werte in Klammern bleiben aufgrund überdurchschnittlicher Abweichungen unberücksichtigt

Einaxiale Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] - Basismörtel M0 in Abhängigkeit der Aktivatorkonfiguration												
Aktivator	Druckfestigkeit		Prüfzeitpunkt nach Aktivierung [h/d]									
(90 kg/m <sup>3</sup> )	[IN/mm <sup>2</sup> ]	2h	4h	6h	1d	2d	7d	28d				
MVZ: 3,4	Mittelwert	0,29	0,37	0,42	0,80	1,14	1,46	1,73				
MVZ: 2,6	Mittelwert	0,11	0,19	0,26	0,77	0,89	1,30	1,56				
MVZ: 2,2	Mittelwert	0,06	0,11	0,15	0,55	0,72	1,08	1,15				

Tab. A-22: Basismörtel: Druckfestigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Aktivatorkonfigurationen

Tab. A-23: Basismörtel: Statischer Elastizitätsmodul bei unterschiedlichen Aktivatorgehalten

statischer Elastizitätsmodul [N/mm²] - Basismörtel M0									
Aktivator	Elastizitätsmodul			Prüfzeit	punkt na	ch Aktiv	ierung [h	/d]	
[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	2h	2d	7d	14d	21d	28d	35d	56d
				486			(365)		627
70	Einzelwerte			488			558		636
70				531			605		676
	Mittelwert			501			582		646
		97	437	550	623	650	683	749	(481)
00	Einzelwerte	97	465	579	630	661	707	749	775
90		99	467	(656)	636	668	734	766	820
	Mittelwert	97	456	595	629	660	707	755	797
				573			809		783
110	Einzelwerte			635			750		886
				652			731		890
	Mittelwert			620			763		853

# A-6.4.2 Alkalische Aktivierung (Kapitel 9)

# Ergebnisse zu Kapitel 7.2.6

Tab. A-24:Alkalische Aktivierung: Druckfestigkeit an Normprismen bei variabler Molverhältniszahl des<br/>Aktivators

24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] an Normprismen - alkalisch aktivierter Hüttensand										
Drughtostickoit [N/mm2]	Molverhältniszahl [-]									
	1,5	1,1	0,9	0,5	0,3	0,1	0,0			
Messwert 1.1	11,1	16,0	21,4	24,7	12,1	7,2				
Messwert 1.2	10,8	15,7	21,8	26,0	12,2	6,6	3,0			
Messwert 2.1	11,4	16,2	21,4	25,0	12,2	6,5	2,8			
Messwert 2.2	11,1	15,7	22,0	25,4	12,1	6,9	2,8			
Messwert 3.1	11,1	15,9	22,8	27,3	12,7	7,7	2,7			
Messwert 3.2	11,2	16,2	22,4	24,5	12,5	6,7	1,8			
Mittelwert	11,1	16,0	22,0	25,5	12,3	6,9	2,3			

Tab. A-25:Alkalische Aktivierung: 24h-Druckfestigkeit an Normprismen bei unterschiedlichen Aktivator-<br/>gehalten

24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] an Normprismen - alkalisch aktivierter Hüttensand												
Aktivator [M%/HS]		4,4			11,0			15,4			19,7	
Finzalwort	-	0,14	0,13	0,73	0,74	0,67	1,12	1,01	1,15	3,19	3,25	3,13
Ellizeiweit	0,12	0,13	0,13	0,73	0,68	0,71	1,13	1,05	1,09	3,12	3,24	3,23
Mittelwert		0,13			0,71			1,09			3,19	
Aktivator [M%/HS]		24,1			30,7			36,6			40,9	
Finalment	6,34	6,30	6,54	11,1	11,4	11,1	14,6	15,5	14,1	16,4	17,1	17,1
Einzelwert	6,47	6,28	6,83	10,8	11,1	11,2	14,4	14,3	14,8	15,7	16,8	17,2
Mittelwert		6,46			11,1			14,6			16,7	
Aktivator [M%/HS]		45,6			53,6			60,6				
Ein	17,6	18,2	17,4	20,7	21,2	21,5	22,8	22,5	22,7			
Einzeiwert	17,9	18,6	18,2	21,6	20,6	21,0	22,7	23,0	22,6			
Mittelwert		18,0			21,1			22,7				
Aktivator [M%/HS]		73,1			90,4							
Einzelwert	24,2	24,7	24,9	26,3	26,7	26,5						
	23,8	23,8	23,2	26,4	25,4	26,3						
Mittelwert		24,1	•		26,2							

# Ergebnisse zu Kapitel 9.1

Druckfestigkeit - Zementfreier Zwei-Komponenten-Mörtel "2KM_AAHS_red"								
Einquiala Drughtastishait [NI/mm2]	Prüfzeitp	unkt [h/d]						
	24 h	7 d						
Prüfung 1	0,67	3,74						
Prüfung 2	0,79	3,45						
Prüfung 3	0,63	2,94						
Mittelwert	0,70	3,38						

#### Tab. A-26: Alkalische Aktivierung: Druckfestigkeiten zementfreier Zwei-Komponenten-Mörtel

# Ergebnisse zu Kapitel 9.2.1

Tab. A-27:Alkalische Aktivierung: 24h-Druckfestigkeit bei variablen Bindemittelkonfigurationen und un-<br/>terschiedlichen Aktivatorzusammensetzungen

Druckfestigkeit (24Stunden) unterschiedlicher Zement/Zusatzstoff-Kombinationen											
			Zei	nent/Z	usatzs	toff (G	esamtl	oinden	nittel: 3	329 kg/	'm³)
Ausgangsstoff				35/65			25/75			50/50	
Material		MVZ	3,4	2,6	2,2	3,4	2,6	2,2	3,4	2,6	2,2
Hüttensand 1 HS1		Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	1,36	1,22	0,98	1,21	1,15	1,08			
CaO-Gehalt: 39,7 [M%]			1,33	1,17	0,93	1,24	1,14	1,03			
		Einzelwerte	1,35	1,26	0,99	1,13	1,18	1,14			
			1,39	1,23	1,02	1,26	1,13	1,06			
Hüttensand 2	HS2	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	1,16	0,96	0,71	0,60	0,57	0,54	0,96	0,77	0,67
			1,12	0,95	0,75	0,64	0,55	0,53	0,96	0,85	0,69
CaO-Gehalt: 42,3 [M	[%]	Einzelwerte	1,12	0,96	0,67	0,54	0,61	0,54	0,92	0,76	0,71
			1,24	0,98	0,72	0,61	0,56	0,55	1,01	0,71	0,61
hydr. aufbereiteter Betonzusatzstoff	hrB	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	0,63	0,54	0,43				0,84	0,69	0,61
			0,65	0,55	0,42				0,84	0,72	0,62
CaO-Gehalt: 30-35 [	M. <b>-</b> %]	Einzelwerte	0,56	0,52	0,43				0,88	0,66	0,60
			0,67	0,54	0,43				0,81	0,70	0,61
Metakaolin	Meta	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	0,47	0,31	0,24				0,98	0,99	0,74
			0,48	0,31	0,24				1,01	0,98	0,69
CaO-Gehalt: 2,9 [M.	-%]	Einzelwerte	0,51	0,30	0,23				1,02	1,00	0,70
			0,42	0,32	0,24				0,93	0,99	0,69
Flugasche	FA	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	0,30	0,25	0,20				0,61	0,53	0,39
			0,30	0,24	0,20				0,58	0,52	0,41
CaO-Gehalt: 4,4 [M%]		Einzelwerte	0,32	0,25	0,21				0,63	0,54	0,39
			0,30	0,26	0,20				0,61	0,53	0,38

Einaxiale Druckfestigkeit unterschiedlicher Zement/Hüttensand-Kombinationen											
	Druckfestigkeit	Zement Gesamtbi Aktiva	t/Hüttensand indemittel: 3 torgehalt: 98	: 50/50 19 kg/m <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	Zement/Hüttensand: 25/75 Gesamtbindemittel: 319 kg/m <sup>3</sup> Aktivatorgehalt: 98 kg/m <sup>3</sup>						
Pruizeitpunkt	[N/mm <sup>2</sup> ]	Z: 160 MVZ: 3,4 ,,160 3,4"	Z: 160 MVZ: 2,6 ,,160 2,6"	Z: 160 MVZ: 2,2 ,,160 2,2"	Z: 80 MVZ: 3,4 ,,80 3,4"	Z: 80 MVZ: 2,6 ,,80 2,6"	Z: 80 MVZ: 2,2 "80 2,2"				
	Mittelwert	0,96	0,77	0,67	0,60	0,57	0,54				
1d		0,96	0,85	0,69	0,64	0,55	0,53				
	Einzelwerte	0,92	0,76	0,71	0,54	0,61	0,54				
		1,01	0,71	0,61	0,61	0,56	0,55				
	Mittelwert	2,37	1,28	1,09	2,11	2,22	1,85				
24	Einzelwerte	2,40	1,26	1,09	2,11	2,36	1,85				
30		2,36	1,26	1,06	2,06	2,19	1,84				
		2,34	1,31	1,11	2,17	2,12	1,86				
	Mittelwert	3,58	2,64	1,96	5,03	4,97	4,42				
74		3,41	2,68	1,97	(4,19)	5,00	4,43				
/u	Einzelwerte	3,59	2,73	1,94	5,06	4,98	4,35				
		3,75	2,50	1,97	5,00	4,94	4,48				
	Mittelwert	7,39	7,09	5,53	8,95	7,16	6,09				
204		6,91	6,75	5,29	9,33	7,18	6,09				
200	Einzelwerte	7,72	7,13	6,05	8,56	6,95	5,98				
		7,54	7,39	5,25	8,95	7,35	6,20				
	Mittelwert	7,21	9,86	8,19	8,10	8,51	6,64				
		7,19	10,04	8,26	8,01	8,14	6,87				
	Einzelwerte	7,07	9,82	8,11	8,32	8,41	5,41				
		7,36	9,73	(5,56)	7,98	8,97	7,65				

 

 Tab. A-28:
 Alkalische Aktivierung: Druckfestigkeiten unterschiedlicher Zement/Hüttensand-Kombinationen bei variablem Aktivatorgehalt

\*Werte in Klammern bleiben aufgrund überdurchschnittlicher Abweichungen unberücksichtigt

 

 Tab. A-29:
 Alkalische Aktivierung: Statischer Elastizitätsmodul unterschiedlicher Zement/Hüttensandkombinationen bei variablem Aktivatorgehalt

statischer Elastizitätsmodul [N/mm²] - alkalisch aktivierte Mörtel									
Dagaiahnung	Zucommongotzung	Elastizitätsmodul	Prüfzeit	ounkt nach A	ktivierung [d]				
Bezeichnung	Zusammensetzung	[N/mm <sup>2</sup> ]	3	7	28				
	Zement/Hüttensand: 25/75		512	1377	(1821)				
80.34	Gesamtbindemittel: 319 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte	544	1370	2674				
80_3,4	Aktivatorgehalt: 98 kg/m <sup>3</sup>		593	1356	2733				
	MVZ: 3,4 (pH: 11,4)	Mittelwert	550	1367	2704				
	Zement/ Hüttensand: 25/75				2478				
80.26	Gesamtbindemittel: 319 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte			2092				
80_2,6	Aktivatorgehalt: 98 kg/m <sup>3</sup>				2124				
	MVZ: 2,6 (pH: 13,4)	Mittelwert			2231				
	Zement/ Hüttensand: 50/50				2016				
160 2 4	Gesamtbindemittel: 319 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte			(3372)				
100_3,4	Aktivatorgehalt: 98 kg/m <sup>3</sup>				1965				
	MVZ: 3,4 (pH: 11,4)	Mittelwert			1991				
	Zement/ Hüttensand: 50/50				1911				
160 2 6	Gesamtbindemittel: 319 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte			2141				
100_2,0	Aktivatorgehalt: 98 kg/m <sup>3</sup>				2032				
	MVZ: 2,6 (pH: 13,4)	Mittelwert			2028				
	Zement/ Hüttensand: 50/50				2081				
160 2 2	Gesamtbindemittel: 319 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte			2071				
160_2,2	Aktivatorgehalt: 98 kg/m <sup>3</sup>				1850				
	MVZ: 2,2 (pH: 13,3)	Mittelwert			2001				

Gelzeiten alkalisch aktivierter Mörtel (Zement/Hüttensand-Kombinationen)										
160_3,4 (Zement:	160 kg	g/m³; H	üttensa	nd 159	kg/m³	; Aktiva	torgehal	t: variab	el)	
Aktivatordosierung kg/m <sup>3</sup>	25	30	35	40	45	51,3	55	60	70	80
Aktivatordosierung Vol%	1,95	2,34	2,73	3,12	3,51	4,00	4,28	4,67	5,45	6,23
Messwert 1	4,19	4,57	6,30	7,09	7,54	9,56	10,75	11,62	12,91	14,20
Messwert 2	4,21	4,72	6,23	7,15	7,44	9,69	10,50	11,72	12,60	14,38
Messwert 3	4,21	4,57	6,28	7,11	7,46	9,87	10,74	11,80	12,72	14,15
Gelzeit Mittelwert [s]	4,20	4,62	6,27	7,12	7,48	9,71	10,66	11,71	12,74	14,24
160_2,6 (Zement:	160 kg	g/m³; H	üttensa	nd 159	kg/m³	; Aktiva	torgehal	t: variab	el)	
Aktivatordosierung Vol%			2,61		3,36			4,48		5,97
Messwert 1			7,84		9,56			12,75		16,00
Messwert 2			7,85		9,37			12,22		15,88
Messwert 3			7,28		9,87			12,31		15,63
Gelzeit Mittelwert [s]			7,66		9,60			12,43		15,84
120_3,4 (Zement:	120 kg	g/m³; H	üttensa	nd 219	kg/m³	; Aktiva	torgehal	t: variab	el)	
Aktivatordosierung Vol%	1,87		2,61		3,36	3,73	4,10			
Messwert 1	4,72		6,10		8,28	10,35	12,87			
Messwert 2	4,50		6,18		8,40	10,56	12,58			
Messwert 3	4,98		6,50		8,53	10,52	12,70			
Gelzeit Mittelwert [s]	4,73		6,26		8,40	10,48	12,72			
<b>200_3,4</b> (Zement:	200 kg	g/m³; H	üttensa	nd 119	kg/m³	; Aktiva	torgehal	t: variab	el)	
Aktivatordosierung Vol%	1,95				3,51			4,67		6,23
Messwert 1	3,96				7,25			11,31		14,50
Messwert 2	3,90				7,22			11,50		14,88
Messwert 3	4,04				7,30			11,22	]	14,85
Gelzeit Mittelwert [s]	3,97				7,26			11,34		14,74

 Tab. A-30:
 Alkalische Aktivierung: Gelzeiten unterschiedlicher Zement/Hüttensand-Kombinationen bei variablem Aktivatorgehalt

 Tab. A-31:
 Alkalische Aktivierung: Frühfestigkeiten unterschiedlicher Zement/Hüttensand-Kombinationen (mod. Nadelgerät nach Vicat)

F	Frühfestigkeit - alkalisch aktivierte Mörtel (Zement/Hüttensand-Kombinationen)										
		Zeit bis Erreichen des jeweiligen Spannungslevels in Minuten									
	Bezeichnung	120_3,4	160_3,4	200_3,4							
Mörtel	Zementgehalt [kg/m3]	120	160	200							
	Hüttensandgehalt [kg/m3]	219	159	119							
	Aktivator kg/m <sup>3</sup> / MVZ [-]	98 / 3,4	98 / 3,4	98 / 3,4							
[2	0,037	75,0	35,0	30,0							
mm	0,050	85,0	40,0	32,5							
ale [N/	0,063	90,0	45,0	37,5							
rtika gen	0,075	95,0	47,5	42,5							
ver Dannung	0,087	100,0	52,5	45,0							
	0,100	105,0	55,0	47,5							
SI	0,137	112,5	60,0	55,0							

Scherfestigkeiten [kN/m <sup>2</sup> ] - alkalisch aktivierte Mörtel											
Mörtel		80_	_3,4	80	_2,6	120	_3,4	160	_3,4		
Zement [kg/m <sup>3</sup> ]		8	30	80 120		20	1	60			
Hüttensand [kg/m	l <sup>3</sup> ]	2	39	239		239		219		1:	59
Aktivator [kg/m <sup>3</sup> ]	(MVZ)	98 (	(3,4)	98	(2,6)	98	(3,4)	98 (	(3,4)		
Prüfzeitpunkt	Mes-	Mess-	Mittel-	Mess-	Mittel-	Mess-	Mittel-	Mess-	Mittel-		
[Min.]	sung	wert	wert	wert	wert	wert	wert	wert	wert		
10	#1	2,5	25	1,0	1.0	3,5	35	4,0	4.0		
10	#2	2,5	2,5	1,0	1,0	3,5	5,5	4,0	יי,ד		
20	#1	3,0	2.2	2,0	2.0	4,0	4.0	4,5	4.5		
20	#2	3,5	3,3	2,0	2,0	4,0	4,0	4,5	4,5		
20	#1	3,5	25	2,0	2.0	4,5	4.5	5,0	5.0		
50	#2	3,5	3,5	2,0	2,0	4,5	4,5	5,0	5,0		
45	#1	4,0	2.0	2,0	2.0	5,0	5.0	13,0	12.0		
45	#2	3,5	3,8	2,0	2,0	5,0	5,0	13,0	13,0		
(0)	#1 4,0		2.0	2,0		7,0	7.0	25,0	25.0		
OU OU	#2	3,5	3,8	2,0	2,0	7,0	7,0	25,0	25,0		

Tab. A-32:Alkalische Aktivierung: Scherfestigkeiten unterschiedlicher Zement/Hüttensand-Kombinatio-<br/>nen mit orientierend ausgewählten Aktivatorkonfigurationen

*Tab. A-33: Alkalische Aktivierung: Marsh-Auslaufzeiten unterschiedlicher Zement/Hüttensand-Kombinationen* 

Marsh-Auslaufzeiten t <sub>M,1000</sub> - alkalisch aktivierte Mörtel										
Mörtel	Zeit nach Herstellung [h]	it nach Herstellung [h] 0 2 4 6 24								
	Messung 1 [s]	34	34	35	34	38	43	51		
Zement: 80 kg/m <sup>3</sup> Hüttensand <sup>2</sup> 239 kg/m <sup>3</sup>	Messung 2 [s]	34	34	34	34	37	42	53		
1100001000100. 20 y 11 <u>8</u> /111	Mittelwert [s]	34	34	35	34	38	43	52		
	Messung 1 [s]	34	34	34	35	36	42	48		
Zement: 160 kg/m <sup>3</sup> Hüttensand: 159 kg/m <sup>3</sup>	Messung 2 [s]	33	34	34	35	37	40	50		
1100001000100. 10 y 11 <u>8</u> /11	Mittelwert [s]	34	34	34	35	37	41	49		
	Messung 1 [s]	37	37	37	37	37	41	47		
Zement: 200 kg/m <sup>3</sup> Hüttensand: 119 kg/m <sup>3</sup>	Messung 2 [s]	37	37	37	37	37	40	46		
	Mittelwert [s]	37	37	37	37	37	41	47		

#### Ergebnisse zu Kapitel 9.2.2

Marsh-Auslaufzeiten t <sub>M,1000</sub> - alkalisch aktivierte Mörtel – Ca(OH)2 als Gelierhilfe										
Zeit nach Herstellung [h]024624										
Gelierhilfe: 60 kg/m <sup>3</sup>	Messung 1 [s]	50,1	50,8	51,2	52,2	67,7				
	Messung 2 [s]	50,5	50,6	51,6	51,8	66,3				
	Mittelwert [s]	50,3	50,7	51,4	52,0	67,0				
	Messung 1 [s]	42,9	44,4	45,7	46,4	67,5				
Gelierhilfe: 90 kg/m <sup>3</sup> Ca(OH)2-Gehalt: 27 kg/m <sup>3</sup>	Messung 2 [s]	43,4	44,5	45,8	46,3	66,7				
Ca(OH)2-Genall. 27 kg/II <sup>2</sup>	Mittelwert [s]	43,2	44,5	45,8	46,4	67,1				

 

 Tab. A-34:
 Alkalische Aktivierung: Marsh-Auslaufzeiten hüttensandhaltiger Mörtel mit einer Gelierhilfe auf Basis von Ca(OH)2

 

 Tab. A-35:
 Alkalische Aktivierung: Sedimentationsstabilität hüttensandhaltiger Mörtel mit einer Gelierhilfe auf Basis von Ca(OH)2

Blutwasser [M%] - alkalisch aktivierte Mörtel – Ca(OH)2 als Gelierhilfe										
Zeit nach Herstellung [h]	0	2	4	6	24	48	72			
Gelierhilfe: 60 kg/m <sup>3</sup> Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt: 18 kg/m <sup>3</sup>	0,0	0,9	1,6	2,5	7,4	8,7	9,1			
Gelierhilfe: 90 kg/m <sup>3</sup> Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt: 27 kg/m <sup>3</sup>	0,0	1,0	1,7	3,2	7,6	10,3	10,5			

Tab. A-36:Alkalische Aktivierung: Gelzeiten hüttensandhaltiger Mörtel mit einer Gelierhilfe auf Basis<br/>von Ca(OH)2 bei variablen Aktivatorgehalten

Gelzeiten alkalisch akt	ivierter Mörte	el – Ca(OH)2 a	als Gelierhilfe	(Aktivator: M	VZ: 3,4)
Gel	ierhilfe: 60 kg	/m <sup>3</sup> , Ca(OH) <sub>2</sub>	-Gehalt: 18 kg	g/m³	
Aktivatorgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	50	80	85	90	
Aktivatorgehalt[Vol%]	3,8	6,1	6,5	6,9	
Aktivatorgehalt bez. auf Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt [-] oder [%]	2,78 (278%)	4,44 (444%)	4,72 (472%)	5,00 (500%)	
Messwert 1	3,28	5,00	7,75	8,43	
Messwert 2	3,12	5,15	7,50	8,38	
Messwert 3	3,34	6,21	7,00	10,0	
Messwert 4	3,21	6,32	7,43	9,34	
Gelzeit Mittelwert [s]	3,24	5,67	7,42	9,04	
Gel	ierhilfe: 90 kg	/m <sup>3</sup> , Ca(OH) <sub>2</sub>	-Gehalt: 27 kg	g/m³	
Aktivatordosierung kg/m <sup>3</sup>	90	100	110	120	130
Aktivatordosierung Vol%	6,8	7,6	8,3	9,1	9,8
Aktivatordosierung bez. auf Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt [-] oder [%]	3,33 (333%)	3,70 (370%)	4,07 (407%)	4,44 (444%)	4,81 (481%)
Messwert 1	3,16	3,37	4,16	6,66	9,60
Messwert 2	3,41	3,41	4,19	6,90	9,22
Messwert 3	3,18	3,19	5,56	6,79	9,56
Messwert 4	3,22	2,87	5,96	6,82	9,62
Gelzeit Mittelwert [s]	3,24	3,21	4,97	6,79	9,50

Scherfestigkeiten [kN/m²] - alkalisch aktivierte Mörtel – Ca(OH)2 als Gelierhilfe													
Zusammensetzung	Zeit nach Aktivierung [Min.]	h ing 10		20		30		40		60		90	
	Messung	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
Gelierhilfe: 60 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte	1,0	1,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	3,0	4,0	4,0
Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt: 18 kg/m <sup>3</sup> Aktivator: 6,5 Vol% (MVZ: 3,4) Bentonit 1	Mittelwert [kN/m <sup>2</sup> ]	1,0		2,0		2,5		2,8		3,3		4,0	
Gelierhilfe: 60 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5
Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt: 18 kg/m <sup>3</sup> Aktivator: 6,5 Vol% (MVZ: 3,4) Bentonit 2	Mittelwert [kN/m²]	1,0		1,3		1,	,8	2	,3	2	,8	3	,5
Gelierhilfe: 90 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte	2,0	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0	4,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt: 27 kg/m <sup>3</sup> Aktivator: 9,1 Vol% (MVZ: 3,4) Bentonit 1	Mittelwert [kN/m <sup>2</sup> ]	t 2,0 2,0		2,8		3,0		3,8		4,3		5,3	
Gelierhilfe: 90 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte	2,0	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0	4,0	3,0	4,0	4,0	4,0	5,0
Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt: 27 kg/m <sup>3</sup> Aktivator: 9,1 Vol% (MVZ: 3,4) Bentonit 2	Mittelwert [kN/m <sup>2</sup> ]	2,	,0	2	,8	3,	,0	3	,5	4	,0	4,	,5

 

 Tab. A-37:
 Alkalische Aktivierung: Scherfestigkeiten hüttensandhaltiger Mörtel mit einer Gelierhilfe auf Basis von Ca(OH)<sub>2</sub> bei Variation des Bentonites

 Tab. A-38:
 Alkalische Aktivierung: Druckfestigkeit eines hüttensandhaltigen Mörtels mit einer Gelierhilfe auf Basis von Ca(OH)2

Einaxiale Druckfestigkeit [N/mm²] - alkalisch aktivierte Mörtel – Ca(OH)2 als Gelierhilfe										
Zucommonsotzung	Druckfestigkeit	Prüfzeitpunkt nach Aktivierung [d]								
Zusammensetzung	[N/mm <sup>2</sup> ]	1d	3d	7d	14d	28d				
Gelierhilfe: 90 kg/m <sup>3</sup>	Einzelwerte	0,68	1,59	(1,59)	(2,15)	5,26				
Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt: 27kg/m <sup>3</sup>		0,51	1,62	2,57	3,10	6,78				
(MVZ: 3,4) Bentonit 1		0,58	2,02	2,73	3,13	6,58				
	Mittelwert	0,59	1,74	2,65	3,12	6,21				

\*Werte in Klammern bleiben aufgrund überdurchschnittlicher Abweichungen unberücksichtigt

*Tab. A-39: Alkalische Aktivierung: Statischer Elastizitätsmodul eines hüttensandhaltigen Mörtels mit einer Gelierhilfe auf Basis von Ca(OH)*<sub>2</sub>

Statischer Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ] - alkalisch a	ktivierte Mörtel – Ca(OH)2 als Gelierhilfe
Zusammensetzung	Prüfzeitpunkt nach Aktivierung [d]	28d
Gelierhilfe: 90 kg/m <sup>3</sup> Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt: 27 kg/m <sup>3</sup> Aktivator: 9,1 Vol% (MVZ: 3,4)		1817
	Einzelwerte	2069
		2182
Bentonit I	Mittelwert	2023

#### A-6.4.3 Physikalische Aktivierung (Kapitel 10)

Tab. A-40:Physikalische Aktivierung: Zeitabhängiges Wasseraufnahmevermögen unterschiedlicher SAP<br/>in Wasser und Blutwasser

Wasseraufnahmevermögen [%] unterschiedlicher SAP in Wasser/ Blutwasser											
SAD/Eluid Kombination	Zeit nach Wasserkontakt [s]										
SAF/Fluid-Komomation	5	10	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600
SAP 1 Wasser (pH-Wert: 7)	50	200	250	750	2250	4750	7200	8750	9500	9900	10350
SAP 2 Wasser (pH-Wert: 7)	100	200	200	550	1400	2850	4900	6400	7300	7700	8100
SAP 3 Wasser (pH-Wert: 7)	150	250	350	750	1500	2750	4900	7700	10000	10550	10750
SAP 1 Blutwasser (pH-Wert: 12)	0	0	10	100	250	650	1600	2600	3200	3700	4200
SAP 2 Blutwasser (pH-Wert: 12)	0	50	100	200	300	650	1400	2200	2800	3150	3400
SAP 3 Blutwasser (pH-Wert: 12)	100	175	250	500	950	1750	2800	3850	4250	4500	4600

Tab. A-41:Physikalische Aktivierung: Zeitabhängiges Wasseraufnahmevermögen in Wasser und bei un-<br/>terschiedlichen NaCl-Konzentrationen

Wasseraufnahmevermögen [-] bzw. [g/g] unterschiedlicher SAP in Wasser und NaCl-Lösungen											
SAP 2/Fluid Kombination		Zeit nach Wasserkontakt [s]									
SAP 2/Fluid-Kombination	5	10	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600
Wasser (pH-Wert: 7)	0,50	2,00	2,50	7,50	22,5	47,5	72,0	87,5	95,0	99,0	103,5
0,1% NaCl-Lösung	0,00	0,00	1,50	2,50	6,00	16,0	30,5	42,0	50,5	57,0	62,0
0,2% NaCl-Lösung	0,00	0,50	1,00	3,00	8,00	19,0	32,0	42,0	48,0	50,5	55,0
0,3% NaCl-Lösung	0,00	0,00	0,00	0,50	2,00	6,50	20,0	32,5	40,0	45,5	48,0
0,4% NaCl-Lösung	0,00	0,10	1,00	2,00	9,00	11,0	16,5	24,0	26,5	33,0	37,0

 

 Tab. A-42:
 Physikalische Aktivierung: Scherfestigkeitsentwicklung nach Zugabe unterschiedlicher SAP-Mengen zu klassischen Ein-Komponenten-Mörteln

Scherfestigkeiten [kN/m <sup>2</sup> ] – physikalisch aktivierte Mörtel: unbehandelte SAP										
Märtal	SAP	Prüfzeitpunkt [Min.]	1	0	2	0	3	0	6	0
Monter	[kg/m <sup>3</sup> ]	Messwert	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
	4	Einzelwerte	6,5	6,5			8,7	10,9		
	4	Mittelwert	6	6,5				,8		
D 120	6	Einzelwerte	8,7	8,7	10,9	10,9	13,1	15,3	15,3	15,3
<b>D-120</b> 0		Mittelwert	8	,7	10	,9	14	1,2	15	5,3
	Q	Einzelwerte	13,1	15,3			19,6	19,6		
	0	Mittelwert	14	,2			19	9,6		
4		Einzelwerte	6,5 8,7				10,9 10,9			
	4	Mittelwert	7.	,6			10	),9		
R 60	6	Einzelwerte	13,1	10,9	13,1	13,1	15,3	15,3	17,5	17,5
D-00	0	Mittelwert	12	12,0 13,1		15,3		17	',5	
	Q	Einzelwerte	19,6	19,6			24,0	24,0		
	0	Mittelwert	19	,6			24	1,0		
	4	Einzelwerte	8,7	8,7			8,7	8,7		
	4	Mittelwert	8	,7			8	,7		
D 60	6	Einzelwerte	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	21,8	21,8	21,8
D-00	0	Mittelwert	17	',5	17	',5	- 19	),6	21	. <b>,8</b>
	Q	Einzelwerte	21,8	24,0			30,6	32,7		
	8	Mittelwert	22	2,9			31	1,6		

Einaxiale Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] - Physikalisch aktivierte Mörtel: unbehandelte SAP										
Mäntol	Druckfestigkeit	Prüfzeitpunkt nach Aktivierung [d]								
Mortei	[N/mm <sup>2</sup> ]	nm²] - Physikalisch aktivierte Mörtel: unbehandelt           Prüfzeitpunkt nach Aktivierung [d]           1         2         7           0,37         0,81         1,36           0,38         0,56         1,31           0,38         0,77         1,35           0,38         0,71         1,34           0,07         0,22         0,31           0,06         0,24         0,30           0,06         0,23         0,29	28							
B-120		0,37	0,81	1,36	2,83					
	Einzelwerte	0,38	0,56	1,31	2,77					
6 kg/m³ SAP		0,38	0,77	1,35	2,90					
	Mittelwert	0,38	0,71	1,34	2,83					
		0,07	0,22	0,31	1,52					
B-60 6 kg/m³ SAP	Einzelwerte	0,06	0,24	0,30	1,37					
		0,06	0,22	0,27	1,40					
	Mittelwert	0,06	0,23	0,29	1,43					

 

 Tab. A-43:
 Physikalische Aktivierung: Druckfestigkeitsentwicklung nach SAP-Zugabe zu klassischen Ein-Komponenten-Mörteln

Tab. A-44:Physikalische Aktivierung: Scherfestigkeitsentwicklung eines modifizierten, bedingt-aktiven<br/>Mörtels nach Zugabe suspendierter SAP (9 kg/m³) (Trägerfluid: Glycerin: 95%, Wasser: 5%)

Scherfestigkeiten [kN/m²] – physikalisch aktivierte Mörtel: Suspendierte SAP												
Mörtel	Aktivator: Trägerfluid/SAP	Prüfzeitpunkt [Min.]	itpunkt 5		10		15		30		60	
		Messwert	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
mod. B-60	$16.7 \alpha L \alpha \alpha / 1 \alpha S A D$	Einzelwert	0,65	0,65	1,94	2,59	3,23	5,17	5,17	5,82	6,47	6,47
	10,/g LSg./1g SAP	Mittelwert	0,65		2,26		4,20		5,50		6,47	
	15,0g Lsg./1g SAP	Einzelwert	3,88	3,88	5,17	5,17	5,82	5,82	6,47	6,47	12,9	12,9
		Mittelwert	3,88		5,17		5,82		6,47		12	2,9

Zeitabhängiges Drehmoment [Nmm] - Superabsorbierende Polymere (SAP)										
	Wasser (nH Wart: 7) Blutwasser (nH Wart: 12)							Wort: 12)		
Zeit nach Wasserkontakt [s]	5 g SAP / Liter			10 g SAP / Liter			20 g SAP / Liter			25 g SAP / Liter Suspendierte SAP
wasserkontakt [5]	SAP 1	SAP 2	SAP 3	SAP 1	SAP 2	SAP 3	SAP 1	SAP 2	SAP 3	SAP 3
0	0,0	0,0	0.0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,6	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0
9	0,1	0,0	0,0	0,6	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,8	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,0
20	0,2	0,0	0,0	2,5	0,2	0,4	0,0	0,2	0,3	0,1
30	0,2	0,0	0,0	4,8	0,3	1,0	0,4	0,4	0,9	0,1
40	0,2	0,1	0,1	/,1	0,5	2,2	1,1	0,6	2,0	0,1
50	0,3	0,1	0,1	9,6	0,6	4,0	2,0	0,7	2,2	0,1
<u> </u>	0,3	0,1	0,1	12,4	0,7	0,7	3,0	0,8	2,5	0,1
/0	0,3	0,1	0,2	15,2	0,7	10,4	4,2	0,8	3,2	0,1
80	0,5	0,2	0,2	20.0	1,5	14,1	5,1 6.2	0,9	4,0 6.3	0,1
100	0,3	0,2	0,2	20,9	5.2	21.7	73	0,9	8.1	0,1
110	0,3	0,2	0,3	26.5	7.8	21,7	8.8	0,9	0,1	0,1
120	0,5	0,3	0,3	20,5	10.7	31.8	9.0	1.0	11.7	0,1
130	0,4	0,3	0.4	31.3	13.6	35.7	11.0	1,0	13.3	0.1
140	0,5	0,3	0.4	34.1	16.2	39.6	12.1	1.8	15,5	0,1
150	0.6	0.3	0.4	35.3	19.8	43.3	13.1	2.6	16,7	0.1
160	0.6	0.3	0.5	37.9	23.0	45.7	13.8	3.7	18.1	0.1
170	0,6	0,3	0,5	39,1	26,2	47,8	14,8	5,2	19,4	0,1
180	0,7	0,3	0,6	40,8	28,4	49,8	15,6	6,2	20,9	0,1
190	0,7	0,4	0,7	42,0	32,4	51,1	16,2	8,0	22,2	0,1
200	0,8	0,4	0,8	42,7	35,3	51,4	17,2	9,5	23,5	0,1
210	0,8	0,5	0,9	43,7	38,5	51,7	18,0	11,1	24,5	0,1
220	0,9	0,6	0,9	44,4	40,4	52,0	19,0	12,7	25,6	0,1
230	0,9	0,6	1,0	45,0	43,7	52,4	19,4	14,3	26,6	0,1
240	0,9	0,8	1,1	46,3	46,2	51,9	20,4	16,4	27,8	0,2
250	0,9	0,9	1,1	46,4	48,6	51,3	21,3	18,2	28,4	0,2
260	1,1	1,1	1,2	47,7	50,6	51,5	21,9	20,1	29,3	0,2
270	1,2	1,3	1,3	47,3	51,5	51,1	22,4	22,0	30,0	0,4
280	1,1	1,4	1,3	47,5	53,4	51,1	22,6	24,0	30,8	0,5
290	1,1	1,5	1,4	48,1	54,2	50,9	23,8	25,4	31,6	0,8
300	1,2	1,7	1,4	48,0	55,5	50,5	23,6	26,5	32,1	1,0
350	1,4	3,1	1,7	48,5	56,5	46,5	25,6	33,4	34,7	3,8
400	1,6	4,4	1,8	48,3	56,8	44,6	27,4	40,7	36,0	12,7
450	1,0	5,8	2,0	48,2	55,0	42,9	28,6	47,5	37,8	27,2
550	1,8	0,8	2,1	47,9	54.5	41,1	29,4	52,8	30,2	30,3 74 °
600	1,/	7.8	2,1	40,9	53.8	40,1 30.6	29,0	57,4 60.4	30,4	/4,0
650	1,/	2 2	2,2	47,2	53,0	30.0	31.6	61.8	380	87.7
700	1,/	8.8	2,5	45.0	53,0	38.6	30.8	63.8	30.5	87.0
750	1,0	92	2,5	45.6	52.4	37.9	31.1	62.9	39.6	85.9
800	1,0	9.5	2,4	-5,0	52,4	38.1	313	63.1	39.6	84.1
850	1,9	97	2.4			38.2	31.0	63.5	39.6	84.1
900	2,0	10,1	2,4	1		37,5	30,7	62,4	40.6	83.0

Tab. A-45:Physikalische Aktivierung: Zeitabhängige Entwicklung des Drehmomentes (Änderung der Vis-<br/>kosität) unterschiedlicher SAP und SAP-Konzentrationen in Wasser und Blutwasser sowie bei<br/>Verwendung suspendierter SAP in Trägerfluid (95% Glycerin, 5% Wasser)

A-6.4.4 Einzelergebnisse im Rahmen der Verpressversuche (Kapitel 11)

Tab. A-46:	Einzelergebnisse im Rahmen der Verpressversuche: Druckfestigkeiten des Basismörtels bei
	einer Probenherstellung mittels Mischeinheit

Einaxiale Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] mit der Mischeinheit hergestellter Probekörper-Basismörtel M0							
	Druckfestigkeit	Prüfzeitpunkt nach Aktivierung [d]					
	[N/mm <sup>2</sup> ]	1	2	7	28		
Basismörtel M0		0,91	1,35	1,46	1,64		
(bei einer Herstellung mittels Mischeinheit)	Einzelwerte	0,86	1,26	1,44	1,57		
		0,94	1,29	1,44	1,67		
	Mittelwert	0,90	1,30	1,45	1,63		

Tab. A-47:	Einzelergebnisse im Rahmen der Verpressversuche: Druckmessung in der Ebene der Mörtel-
	öffnung im Rahmen des Verpressversuches des Mörtels "mod. B-60" ohne Aktivierung (Soll-
	druck: 0,5 bar). (Hinweis: reduzierter Datensatz)

Druckmessung [bar] bei der Verpressung des Mörtels "mod. B-60" ohne Aktivator					
Zeit [s]	Drucksensor P1 links-außen	Drucksensor P2 mitte-oben	Drucksensor P3 rechts-außen		
0	0,000	0,000	0,000		
5	0,000	0,000	0,000		
10	0,000	0,000	0,000		
15	0,236	0,233	0,241		
20	0,247	0,242	0,252		
25	0,329	0,326	0,333		
30	0,305	0,300	0,308		
35	0,398	0,393	0,401		
40	0,419	0,413	0,422		
45	0,434	0,429	0,436		
50	0,445	0,440	0,448		
55	0,454	0,450	0,459		
60	0,460	0,456	0,464		
65	0,466	0,461	0,470		
70	0,468	0,464	0,472		
75	0,474	0,469	0,477		
80	0,477	0,472	0,481		
85	0,486	0,481	0,489		
90	0,486	0,481	0,489		
95	0,489	0,485	0,492		
100	0,492	0,488	0,496		
105	0,495	0,491	0,499		
110	0,497	0,493	0,501		
115	0,499	0,495	0,502		
120	0,501	0,497	0,505		
125	0,501	0,497	0,504		
130	0,502	0,498	0,506		
135	0,504	0,500	0,507		
140	0,501	0,497	0,504		
145	0,501	0,496	0,503		
150	0,503	0,499	0,506		
160	0,501	0,497	0,504		
170	0,501	0,498	0,504		
180	0,499	0,495	0,503		
190	0,500	0,496	0,503		
200	0,499	0,495	0,502		
250	0,493	0,490	0,496		
300	0,486	0,482	0,489		
350	0,480	0,475	0,482		
400	0,464	0,459	0,467		
430	0,496	0,492	0,499		
435	0,508	0,504	0,511		
440	0,592	0,589	0,596		
445	0,542	0,539	0,547		
450	0.167	0.165	0.175		

Sieblin Eingeset	Sieblinie der Laborböden für die Verpressversuche [M%] Eingesetztes Material: Quarzsand / Quarzkies (Dichte: 2,63 kg/m <sup>3</sup> )					
Sieblochweite	Boden 1	Boden 2	Boden 3			
[mm]	k <sub>f</sub> : 10 <sup>-2</sup>	k <sub>f</sub> : 10 <sup>-4</sup>	k <sub>f</sub> : 10 <sup>-5</sup>			
16	100	100	100			
8	93,4	100	100			
4	55,4	100	100			
2	11,4	96,0	100			
1	8,89	79,3	100			
0,5	5,14	60,2	100			
0,25	3,17	51,8	94			
0,125	0,38	6,27	18,7			
0,063	0,03	0,03	0,10			
0	0	0	0			

Tab. A-48: Einzelergebnisse im Rahmen der Verpressversuche: Sieblinien der verwendeten Laborböden

*Tab. A-49:* Einzelergebnisse im Rahmen der Verpressversuche: Scherfestigkeitsentwicklung des verpressten Basismörtels M0

Zeitabhängige Scherfestigkeiten [kN/m <sup>2</sup> ] des verpressten Basismörtels M0					
Zeit nach Aktivierung [Min.]	Messwert 1	Messwert 2	Mittelwert		
41	24,0	21,8	22,9		
50	23,9	23,9	23,9		
94	52,4	52,4	52,4		
96	50,2	52,4	51,3		
100	54,6	52,4	53,5		

*Tab. A-50:* Einzelergebnisse im Rahmen der Verpressversuche: Scherfestigkeitsentwicklung des alkalisch aktivierten Mörtels 160\_3,4 (Aktivatorgehalt: 60 kg/m<sup>3</sup>) nach einem Verpressversuch

Zeitabhängige Scherfestigkeiten [kN/m <sup>2</sup> ] des alkalisch aktivierten Mörtels "160_3,4" mit einem Ak-								
tivatorgehalt von 60 kg/m <sup>3</sup>								
Zeit nach Aktivierung [Min.]	22	26	30	34	40	50	60	70
Scherfestigkeit [kN/m <sup>2</sup> ]	0,65	0,97	0,97	1,29	1,29	1,62	2,59	4,20

*Tab. A-51:* Einzelergebnisse im Rahmen der Verpressversuche: Scherfestigkeit des Mörtels "mod. B-60" in Abhängigkeit des Verpressdruckes (ohne zusätzliche Aktivierung)

Scherfestigkeiten [kN/m <sup>2</sup> ] des Mörtels "mod. B-60" nach einem Verpressvorgang bei unterschiedli- chen Verpressdrücken ohne zusätzliche Aktivierung								
Verpressdruck	Scherfestigkeit			Me	ssstellen			
(Probenalter)	$[kN/m^2]$	1	2	3	4	5	6	
0,5 bar	Einzelwerte	8,4	8,4	9,1	5,8	6,5		
(2 Stunden)	Mittelwerte	7,6						
1,0 bar	Einzelwerte	5,8	9,1	8,4	10,3	7,8		
(4 Stunden)	Mittelwerte	8,3						
1,5 bar	Einzelwerte	9,7	9,7	9,1	9,7	10,3	9,1	
(2 Stunden)	Mittelwerte	9,6						



#### A-7 Konstruktionszeichnung des Versuchstandes zur Simulation einer Ringspaltverpressung

Abb. A-6: Ausgewählte Konstruktionsansichten des Versuchsstandes zur Simulation einer Ringspaltverpressung



# A-8 Konstruktionszeichnung der Mischeinheit für Zwei-Komponenten-Mörtel

*Abb. A-7: Vollständig montierte Mischeinheit mit angeschlossenem Statikmischer für Zwei-Komponenten-Mörtel (Angaben in mm)* 

A-9 Konstruktionszeichnung der Mischeinheit für die physikalische Aktivierung



Abb. A-8: Vollständig montierte Mischeinheit mit angeschlossenem Statikmischer für Mörtel des Konzeptes der physikalischen Aktivierung

# Lebenslauf

# PERSÖNLICHE DATEN

Name	Christoph Schulte-Schrepping
Geburtsdatum	23.07.1986
Geburtsort	Dorsten
Staatsangehörigkeit	deutsch
BERUFLICHER WER	DEGANG
04/2013 - heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum unter der Leitung von UnivProf. DrIng. Rolf Breitenbücher
07/2016 - 12/2016	Mitarbeiter der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Ver-
06/2015 - 11/2015	kehrswesen (FGSV) im Rahmen einer kooperativen Bearbei- tung eines interdisziplinären Forschungsvorhabens
09/2011 - 03/2013	Wissenschaftliche / Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum
AUSBILDUNG	
10/2010 - 03/2013	Master-Studium an der Ruhr-Universität Bochum
	Studiengang: Bauingenieurwesen Fachrichtung: Konstruktiver Ingenieurbau
	Thema der Masterarbeit: Entwicklung der Scherfestigkeit mit Hilfe eines Rahmenschergerätes an entwässerten Mörtelrezepturen für die Ringspaltverpressung
	Abschluss: Master of Science
10/2007 - 10/2010	Bachelor-Studium an der Ruhr-Universität Bochum
	Studiengang: Umwelttechnik und Ressourcenmanagement Fachrichtung: Bauingenieurwesen
	Thema der Bachelorarbeit: Energetische Modernisierung von Be- standsgebäuden im Wohnungsbau
	Abschluss: Bachelor of Science
06/1997 - 06/2006	St. Ursula Gymnasium Dorsten. Abschluss: Allgemeine Hochschulreife