



Bundesamt für Strahlenschutz

Deckblatt

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: I
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	44215100	GHR	TV	0001	00	Stand: 03.03.2009

B141594000U

Titel der Unterlage:

BESCHREIBUNG DER ZUR VERFÜLLUNG DER FIRSTSPALTEN UND RESTHOHLRÄUME IN DER SÜDFLANKE DER SCHACHTANLAGE ASSE AUSGEWÄHLTEN BAUSTOFFE SORELBETON A1 UND A1-560

Ersteller:

ASSE-GMBH/DBE-TEC

Stempelfeld:

Freigabe durch bergrechtlich verantwortliche Person:	Freigabe durch atomrechtlich verantwortliche Person:	Freigabe im Projekt/Betrieb:
Datum und Unterschrift	Datum und Unterschrift	Datum und Unterschrift

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des BfS.



Bundesamt für Strahlenschutz

Revisionsblatt

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	B141594000U	Seite: II
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Stand: 03.03.2009
9A	44215100	GHR	TV	0001	00		

Titel der Unterlage:

BESCHREIBUNG DER ZUR VERFÜLLUNG DER FIRSTSPALTEN UND RESTHOHLRÄUME IN DER SÜDFLANKE DER SCHACHTANLAGE ASSE AUSGEWÄHLTEN BAUSTOFFE SORELBTEN A1 UND A1-560

Rev.	Rev.-Stand Datum	UVST	Prüfer (Zeichn.)	Rev. Seite	Kat. (*)	Erläuterung der Revision

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
Kategorie S = substantielle Revision
mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

Stand: 03.03.2009

DECKBLATT

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
13		BAU	BB	LA	0001	00

Kurztitel der Unterlage:

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560

Ersteller / Unterschrift

[Redacted Signature]

Geg

Dok

[Redacted Signature]

Titel der Unterlage:

**Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten und Resthohlräume
 in der Südflanke der Schachanlage Asse ausgewählten Baustoffe
 Sorelbeton A1 und A1-560**

Freigabevermerk:

Freigabedurchlauf

Stabsstelle Qualitätsmanagement und
 Dokumentation:

Datum: 11.03.09

Name:

[Redacted Name]

Unterschrift

Fachbereich/Projektleitung:

Datum: 11.03.2009

Name:

[Redacted Name]

Unterschrift

Geschäftsführung Asse-GmbH:

Datum: 11.3.09

Name:

[Redacted Name]

Unterschrift

REVISIONSBLATT

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
13		BAU	BB	LA	0001	/

Revisionsstand 00: 03.03.2009

Titel der Unterlage:

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwortl. Stelle	revidierte Blätter	Kat.	Erläuterung der Revision
				R	

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur, Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung, Kategorie S = substantielle Änderung.
Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachtanlage Asse II	Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
	NNA A	NNNNNNNNNN	NNA AANN	AA	AA	NNNN	NN
	13		BAU	BB	LA	0001	00

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560

Blatt: 3

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt	1
Revisionsblatt	2
Inhaltsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
2 Aufgabenstellung	5
3 Anforderungen an den Baustoff	5
4 Auswahl und Beschreibung der einzusetzenden Baustoffe	6
5 Erfahrungen und Beobachtungen an bereits erstellten Bauwerken	7
6 Hinweise zur technischen Umsetzung und Qualitätssicherung	9
7 Zusammenfassung	10
8 Literatur	11

Anlagen

Anlage 1	DBE TECHNOLOGY GmbH - [REDACTED] Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften DBE TECHNOLOGY-KZL: A/AJ/GH/BY/0005/00 Stand: 15.12.2008	55 Blatt
Anlage 2	DBE TECHNOLOGY GmbH- [REDACTED] Sorelbeton A1- Untersuchungen zur Rezepturvariante A1-560 DBE TECHNOLOGY-KZL: A/AJ/GH/BY/0007/00 Stand: 26.02.2009	26 Blatt
Anlage 3	DBE TECHNOLOGY GmbH - [REDACTED] Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz DBE TECHNOLOGY-KZL: A/BE/BZ/0001/00 Stand: 05.02.2009	31 Blatt

Gesamte Blattzahl des Dokumentes 112

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachanlage Asse II	Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
	NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
	13		BAU	BB	LA	0001	00

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560	Blatt: 4
---	----------

1 Einleitung

Im Rahmen der Schließung/Stilllegung der Schachanlage Asse sind geotechnische Bauwerke zur gebirgsmechanischen Stabilisierung und Abdichtung von Wegsamkeiten zu erstellen sowie Firstspalten und Resthohlräume in der Südflanke mit einem fließfähigen Baustoff zu verfüllen [1], [2]. Auf Grundlage umfangreicher Untersuchungen unterschiedlicher Baustoffe wurde der Sorelbeton A1 als geeignete Rezeptur ausgewählt, da dieser bezüglich der zu erwartenden Beanspruchungen und bei den entsprechenden Einbaubedingungen in der Schachanlage Asse über eine ausreichende chemische Beständigkeit, Festigkeit, Steifigkeit und Dichtheit verfügt [3].

Die Standardrezeptur des Sorelbeton A1 wurde insbesondere im Hinblick auf die hydraulisch dichte Verfüllung von vertikalen und horizontalen Wegsamkeiten in der Schachanlage Asse entwickelt. Die technische Machbarkeit einer hydraulisch dichten Verfüllung wurde an mehreren Pilotbauwerken demonstriert. Im Rahmen von baubegleitenden Untersuchungsprogrammen wurden die hydraulischen, mechanischen und thermischen Parameter bestimmt und die Funktionalität der Bauwerke im Sinne der Anforderungen belegt [4], [5], [9]. In diesem Zusammenhang wurden Verfahrensanweisungen zur Überwachung der qualitätsgerechten Baustoffproduktion und -verarbeitung entwickelt und in Form von QS-Programmen festgelegt.

Bei der Verfüllung von Resthohlräumen insbesondere im Tiefenaufschluss wurde auch der Einsatz von Sorelbeton mit einem höheren Anteil an $MgCl_2$ -Lösung erprobt. Auf dieser Grundlage wurde die Rezepturvariante A1-560 definiert und entsprechend der Anforderungen für die Resthohlraumverfüllung im Tiefenaufschluss und damit auch für die Firstspaltverfüllung untersucht. Im Folgenden wird diese Rezepturvariante als Baustoff A1-560 bezeichnet.

Im vorliegenden Bericht sind die Aufgabenstellung und Anforderungen an die Verfüllung der Firstspalte und Resthohlräume in den Abbauen und Strecken im Baufeld an der Südflanke im Kapitel 2 und die daraus resultierenden Anforderungen an den Baustoff im Kapitel 3 dargestellt. Im Kapitel 4 werden die ausgewählten Baustoffe kurz beschrieben. Die detaillierten Beschreibungen zu den vorliegenden Baustoffuntersuchungen befinden sich in den Anlagen bzw. den zitierten Unterlagen. Im folgenden Kapitel 5 werden die umfangreichen Erfahrungen auf der Schachanlage Asse mit den Baustoffen Sorelbeton A1 und A1-560 im Hinblick auf die Eignung der Baustoffe für die beschriebene Aufgabenstellung ausgewertet und damit ihre grundsätzliche Eignung belegt. Um eine ordnungsgemäße Umsetzung der Verfüllmaßnahme zu gewährleisten sind in Kapitel 6 Hinweise zur technischen Umsetzung und zur Qualitätssicherung gegeben.

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
13		BAU	BB	LA	0001	00

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560

Blatt: 5

2 Aufgabenstellung

Die Abbaue in der Südflanke wurden weitgehend mit Salzversatz verfüllt. Hierbei wurden Einbauporositäten von 33 % (Sturzversatz) bis 45 % (Blasversatz) realisiert. Aufgrund der relativ hohen Einbauporosität des Salzversatzes, insbesondere in den im Blasversatzverfahren verfüllten Abbauen, kommt es durch das Eigengewicht und durch migrierende Salzlösungen zu Setzungen bzw. Sackungen, die insbesondere in den ersten Jahren nach der Verfüllung zum Teil deutlich über der konvergenzbedingten Hohlraumreduktion lagen. Daher sind derzeit in den Abbauen bereichsweise noch unregelmäßig ausgebildete Firstspalte von bis zu 1,5 m Höhe vorhanden. Dadurch und wegen der noch teilweise unverfüllten Abbauzugänge ist der Versatz noch nicht eingespannt und auch noch nicht substantiell am Lastabtrag beteiligt. Durch eine Verfüllung der Firstspalte mit einem erhärtenden Pumpversatz soll ein möglichst weitgehender Formschluss zwischen Versatz und den Abbaukonturen hergestellt und eine Stützung der Schweben bzw. Schwebenringe bewirkt werden. Damit soll eine schnellere Lastaufnahme der Versatzkörper und eine Stützung der Tragelemente sowie darauf aufbauend eine Reduktion der Pfeilerstauchungsraten und der Beanspruchung des Deckgebirges bewirkt werden [1], [2]. Bei der Einbringung des Pumpversatzes ist zu gewährleisten, dass es nicht zu einer Durchfeuchtung der Tragelemente kommt, da dies ggf. zu einer Reduktion der Resttragfähigkeit in bereits vorgeschädigten Bereichen führen würde (in [6] S. 103 -104).

Im Rahmen der geplanten Verfüllarbeiten im Baufeld an der Südflanke sind zur Stabilisierung des Tragsystems weiterhin eine Reihe von offenen oder teilversetzten Strecken mit einem Baustoff zu verfüllen, der über eine hohe Steifigkeit verfügt. Da in einem Teil dieser Strecken Carnallitit ansteht, soll der Baustoff auch eine ausreichende Dichtheit aufweisen. Damit soll der anstehende Carnallitit vor Umlösungen geschützt bzw. diese signifikant verlangsamt werden.

3 Anforderungen an den Baustoff

Um die oben beschriebenen Aufgaben zu erfüllen, sind Baustoffe erforderlich die als Pumpversatz in Firstspalte und Resthohlräume einbringbar sind und folgende Anforderungen erfüllen:

1. gute Fließfähigkeit, um einen hohen Verfüllgrad und Formschluss zu erreichen,
2. wenig kompressibel, um die Zeit bis zur Lastaufnahme des Versatzes zu reduzieren,
3. ausreichend chemisch beständig bzw. langzeitstabil,
4. keine relevante Abgabe von Überschuslösung, damit es nicht zu einer Durchfeuchtung von Schweben und Pfeilern kommt,
5. gute Haftfähigkeit des Baustoffs am Gebirge, um durch eine verbesserte Stützung der Schweben bzw. Schwebenringe von unten, eine Erhöhung der Tragfähigkeit zu erreichen,
6. ausreichende Dichtigkeit des Baustoffs und der Kontaktfläche Sorelbeton/Carnallitit, um die im Carnallitit stehenden Streckenabschnitte vor Umlösungen zu schützen.

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
13		BAU	BB	LA	0001	00

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560

Blatt: 6

4 Auswahl und Beschreibung der einzusetzenden Baustoffe

Im Sinne der Anforderungen ist der Sorelbeton A1, wie die in Anlage 1 dokumentierten Untersuchungsergebnisse sowie die Erfahrungen beim Betonieren größerer offener und teilverfüllter Grubenbaue in der Schachtanlage Asse belegen, grundsätzlich geeignet. Insbesondere die gute Fließfähigkeit bewirkt bei großflächigen Firstspalten in Verbindung mit einem ausreichenden Suspensionsdruck und einem möglichst unterbrechungsfreien Verfüllprozess deren weitgehende Verfüllung. Weiterhin gibt der Sorelbeton A1 nur in sehr geringem Umfang Überschusslösung ab. Die Menge liegt, wie Erfahrungen zeigen, an der unteren Grenze für hydraulisch förderfähige Baustoffe. Festigkeitsuntersuchungen an Prüfkörpern belegen weiterhin eine gute Anbindung des Sorelbetons A1 an Carnallit [10].

Die Zusammensetzung der Rezeptur des Sorelbetons A1 ist in Tabelle 4.1 angegeben. Detaillierte Angaben zum Baustoff und seinen Parametern sind aus Anlage 1 zu ersehen.

Tabelle 4.1: Zusammensetzung des Sorelbetons A1 bezogen auf eine Suspensionsdichte von 1.940 kg/m³ ohne Berücksichtigung eines Luftporenanteils

	Massenanteile in Prozent [Ma.-%]	Kilogramm pro Kubikmeter [kg/m ³]
Magnesiumoxid	11,3	218
Steinsalzgrus	63,7	1.237
MgCl ₂ -Lösung	25,0	485

Um auch bei sehr ungünstigen Geometrien der Firstspalte, die auch aus einer Vielzahl nicht verbundener Einzelhohlräume bestehen können, bei Bedarf eine noch höhere Fließfähigkeit bzw. einen hohen Verfüllgrad für die Firstspalte erreichen zu können, wurde eine entsprechende Rezepturanpassung des Sorelbetons A1 erprobt und untersucht. Im Hinblick auf die chemische Beständigkeit des Baustoffs, der bereits nachgewiesenen technischen Machbarkeit und einer anlagentechnisch effizienten Umsetzung, wurde hierbei geprüft inwieweit bei gleicher Zusammensetzung der Trockenmischung der Anteil der Anmachflüssigkeit erhöht werden kann, ohne dass es zu einer relevanten Abgabe von Überschusslösung kommt. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen sind aus Anlage 2 zu ersehen. Hier ist dargestellt, dass die Rezeptur A1-560 die o. a. Anforderungen ebenfalls erfüllt. Je nach Kornverteilung des Steinsalzes in der Suspension ist mit einer geringen Durchfeuchtung, Kompaktion und Verfestigung des liegenden Salzversatzes zu rechnen (vgl. Anlage 3). Hierdurch kann mit dem Sorelbeton A1-560 auch bei sehr flachen und zum Teil geschlossenen Firstspalten ein hoher Verfüllgrad der Resthohlräume erreicht werden. Im Labor durchgeführte Kriechversuche an baubegleitend hergestellten Proben zeigen eine gegenüber der Standardrezeptur A1 erhöhte Verformbarkeit insbesondere bei höherer hydrostatischer Einspannung (in [7] Charge Nr. 44-2). Bei den in den Abbauen zu erwartenden Beanspruchungen ist jedoch im Vergleich zu dem liegenden Salzgrus eine ausreichend geringe Kompressibilität des Baustoffs zuverlässig vorhanden.

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachanlage Asse II	Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
	NNA A	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
	13		BAU	BB	LA	0001	00

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560

Blatt: 7

Die Zusammensetzung der Rezeptur des Sorelbetons A1-560 ist in Tabelle 4.2 angegeben. Detaillierte Angaben zum Baustoff und seinen Parametern sind aus Anlage 2 zu ersehen.

Tabelle 4.2: Zusammensetzung des Sorelbetons A1-560 bezogen auf eine Suspensionsdichte von 1.909 kg/m³ ohne Berücksichtigung eines Luftporenanteils

	Massenanteile in Prozent [Ma.-%]	Kilogramm pro Kubikmeter [kg/m ³]
Magnesiumoxid	10,9	208
Steinsalzgrus	61,3	1.170
MgCl ₂ -Lösung	27,8	531

5 Erfahrungen und Beobachtungen an bereits erstellten Bauwerken

Die Standardrezeptur des Sorelbeton A1 und die Rezepturvariante A1-560 wurden als Baustoffe zum Betonieren mehrerer Pilotbauwerke und zur Verfüllung von Abbauen, Strecken, Blindschächten und Resthohlräumen in der Schachanlage Asse eingesetzt. Bis Ende 2008 wurden so insgesamt ca. 72.000 m³ Sorelbeton A1 in Grubenbaue eingebracht. Im Rahmen von baubegleitenden Untersuchungsprogrammen und der Bauüberwachung wurden die maßgeblichen hydraulischen, mechanischen und thermischen Parameter bestimmt und die Funktionalität im Sinne der Anforderungen belegt [3], [4], [5]. Nachstehend werden zusätzlich Erfahrungen und Beobachtungen insbesondere im Hinblick auf das Austreten von Überschusslösungen beschrieben, die im Rahmen der Bauüberwachung der bisherigen Betonierprozesse auf der 875-, 800-, 775- und 750-m-Sohle gewonnen wurden.

Aus den Untersuchungen zur Bestimmung der Menge an Drainagelösung im Labormaßstab (vgl. Anlage 1 und 2) ergibt sich, dass aus Prüfkörpern mit ca. 0,34 l Volumen ca. 1,0 Ma.-% (Sorelbeton A1) bzw. ca. 1,5 Ma.-% (Sorelbeton A1-560) an Überschusslösung aus der Sorelbetonsuspension drainierbar ist. Bei der großmaßstäblichen Anwendung des Baustoffs zur Resthohlraumverfüllung konnte jedoch keine Abgabe von relevanten Mengen an Überschusslösung aus den versetzten Bereichen festgestellt werden. Dies kann exemplarisch durch folgende Beobachtungen belegt werden:

1. Bauwerk RH-750-13 im 3. westlichen Querschlag auf der 750-m-Sohle (BW-K2C-750-1)
 Das Bauwerk wurde im Jahre 2006 in einem im Carnallitit (K2C) stehender Streckenabschnitt aus ca. 170 m³ Sorelbeton A1 errichtet. Der Betonierabschnitt im Norden war durch eine mobile Schalung und im Süden durch eine Böschung aus Salzgrus begrenzt.

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachtanlage Asse II	Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
	NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
	13		BAU	BB	LA	0001	00

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560

Blatt: 8

Damit waren Drainagemöglichkeiten gegeben. Trotzdem trat an der sichtbaren, nördlichen Schalungswand keine Überschusslösung aus. Wie die durch Kernbohrungen gewonnenen Prüfkörper aus dem Bauwerk belegen, wies der Sorelbeton eine hohe Steifigkeit auf (Ersatzkompaktionsmodul bei 2 MPa isotroper Spannung im Mittel 0,9 GPa) [8]. Weiterhin belegen Permeabilitätsmessungen in Untersuchungsbohrungen, die das Bauwerk durchörtert haben, eine hohe Dichtigkeit des Baustoffs und der Kontaktfläche Sorelbeton/Carnallit [12].

2. Verfüllung der Sumpfstrecken auf der 875-m-Sohle (RH-875-1)

Vor dem Betonieren der Streckenabschnitte wurden die dort zwischengespeicherten Salzlösungen abgepumpt. Es waren jedoch noch Feuchtstellen auf der Sohle und eine Durchfeuchtung der Konturbereiche vorhanden. Die ehemaligen Sumpfstrecken und der angrenzende Bereich der Wendelstrecke wurden im Jahre 2007 mit 4.700 m³ Sorelbeton verfüllt [11]. In die Streckenabschnitte wurden mehrere Varianten des Sorelbetons A1 mit erhöhtem Lösungsanteil, darunter auch die Rezeptur A1-560, eingebracht. Visuelle Kontrollen ergaben, dass der Sorelbeton ohne die Bildung von Überstandslösung abgebunden hatte. Die auf der Sohle lokal vorhandenen Lösungsreste wurden vom Sorelbeton „verbraucht“ bzw. im Baustoff integriert. Baubegleitend erstellte Proben der eingebrachten Sorelbetonrezepturen wurden u. a. auf ihre Steifigkeit untersucht [7]. Die Rezeptur A1-560 wies für hydrostatische Beanspruchungen bis 2 MPa noch Steifigkeiten auf, die an der Untergrenze der für den Sorelbeton A1 typischen Werte liegt (Ersatzkompaktionsmodul bei 2 MPa isotroper Spannung 0,6 GPa). Bei höherer Beanspruchung ist die Steifigkeit im Vergleich zum Sorelbeton A1 jedoch geringer.

3. Bauwerke SV-800-6, SV-800-9 und SV-800-10 (alte Kfz-Werkstatt im Osten der 800-m-S)

Die zum Teil mit Salzgrus versetzte ehemalige Kfz-Werkstatt im Osten der 800-m-Sohle wurde Ende 2007 bis Anfang 2008 mit zusammen ca. 9.400 m³ Sorelbeton A1 verfüllt, um eine langfristige Stabilisierung der hangenden Schwebelose zu gewährleisten. Der südwestliche Zugang zur ehemaligen Kfz-Werkstatt war vorlaufend firstbündig mit Salzgrus versetzt worden. Bei den Betonierarbeiten trat Sorelbeton im Firstbereich an der Hohlraumkontur entlang aus. Ein Austreten von Überschusslösung wurde dabei nicht beobachtet. Visuelle Kontrollen im Februar 2009 belegen, dass der Sorelbeton noch immer an der Firste haftete. An der Unterseite des Sorelbetons befinden sich wenige Zentimeter kompakter Salzgrus. Darunter hat sich im Bereich der Salzgrusböschung bereichsweise ein Firstspalt von wenigen Zentimetern Höhe gebildet.

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachanlage Asse II	Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
	NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
	13		BAU	BB	LA	0001	00

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560

Blatt: 9

6 Hinweise zur technischen Umsetzung und Qualitätssicherung

Beim Verfüllen der Firstspalte kann - wie in dem Technikumsversuch auf der 775-m-Sohle belegt (vgl. Anhang 3) – Überschusslösung im geringen Umfang in den Versatz eindringen, in Verbindung mit dem Suspensionsdruck führt dies zu den versuchstechnisch belegten Kompaktions- und Verfestigungseffekten im Bereich der Versatzoberfläche. Um das so geschaffene zusätzliche Resthohlraumvolumen beim Betonieren mit zu verfüllen, ist als Abbruchkriterium für die Verfüllung ein vorgegebener Suspensionsdruck im Einleitbereich zu gewährleisten, der entweder durch einen entsprechenden Pumpendruck oder bei einfallenden Verfüllbohrungen durch eine entsprechende Suspensionhöhe erreicht wird. Bei großflächigen Firstspalten sollte der Betonierprozess mit der Rezeptur A1 begonnen werden, da hier bei ausreichenden Fließeigenschaften, gemäß Laboruntersuchungen eine geringere Abgabe – wenn sie überhaupt auftritt - von Überschusslösung zu erwarten ist. Bei sehr flachen und zum Teil geschlossenen Firstspalten kann der Sorelbeton A1-560 mit den besseren Fließeigenschaften eingesetzt werden.

Zur Gewährleistung einer qualitätsgerechten Baustoffproduktion sind die für den Sorelbeton A1 geltenden Prüfungen auch beim Einsatz der Rezeptur A1-560 anzuwenden. Eine relevante Menge an freier Überschusslösung, also Lösung die aus den versetzten Abbaubereichen in die Tragelemente eindringen könnte, ist dann bei der Verwendung des Sorelbetons A1 bzw. A1-560 zur Firstspaltverfüllung nicht zu erwarten.

Zum Nachweis des qualitätsgerechten Einbaus und zur Beweissicherung sollen exemplarisch Bohrkern bei der Erstellung einer Prüfbohrung gewonnen und z.B. die Kompaktionseigenschaften untersucht werden.

Beim Betonieren von Streckenabschnitten ist der Sorelbeton A1 einzusetzen, da dieser bei höherer Einspannung im Vergleich zum A1-560 eine größere Steifigkeit aufweist und bei qualitätsgerechter Einbringung einen weitgehenden Schutz des anstehenden Carnallitits vor Umlösung gewährleistet.

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachanlage Asse II	Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
	NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
	13		BAU	BB	LA	0001	00

Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560	Blatt: 10
---	-----------

7 Zusammenfassung

Im Rahmen der Schließung/Stilllegung der Schachanlage Asse sind zur Stabilisierung Firstspalte und Resthohlräume zu verfüllen.

Für die Verfüllung der Firstspalten und Resthohlräume im Baufeld an der Südflanke ist ein als Pumpversatz einbringbarer Baustoff erforderlich, der über eine gute Fließfähigkeit verfügt. Damit es nicht zu einer Durchfeuchtung der Tragelemente kommt, soll aus den versetzten Bereichen keine relevante Menge an Überschusslösung entweichen. Der Baustoff soll eine im Vergleich zu dem eingebrachten Versatz hohe Steifigkeit bzw. geringe Kompressibilität aufweisen und ausreichend chemisch beständig bzw. langzeitstabil sein. Um die im Carnallitit stehenden Streckenabschnitte vor Umlösungen zu schützen, ist eine gute Haftfähigkeit des Baustoffs am Gebirge sowie eine ausreichende Dichtigkeit zu gewährleisten.

Auf Grundlage umfangreicher Untersuchungen unterschiedlicher Baustoffe wurde der Sorelbeton A1 als geeignete Rezeptur ausgewählt, da er bezüglich der zu erwartenden Beanspruchungen und bei den entsprechenden Einbaubedingungen in der Schachanlage Asse über eine ausreichende chemische Beständigkeit, Festigkeit, Steifigkeit und Dichtheit verfügt. Die Standardrezeptur des Sorelbeton A1 wurde insbesondere im Hinblick auf die hydraulisch dichte Verfüllung von Wegsamkeiten in der Schachanlage Asse entwickelt. Die technische Machbarkeit einer den jeweiligen Anforderungen entsprechenden Verfüllung wurde an mehreren Pilotbauwerken demonstriert. Im Rahmen von Untersuchungsprogrammen wurden die maßgeblichen hydraulischen, mechanischen und thermischen Parameter bestimmt. Verfahrensanweisungen zur Überwachung der qualitätsgerechten Baustoffproduktion liegen vor. Bei der Verfüllung von Resthohlräumen insbesondere im Tiefenaufschluss wurde auch der Einsatz von Sorelbeton mit einem höheren Anteil an $MgCl_2$ -Lösung erprobt. In diesem Zusammenhang wurde die Rezeptur A1-560 definiert und weitergehend untersucht.

Die Sorelbetonrezepturen A1 und A1-560 sind für die Verfüllung der Firstspalten geeignet. Relevante Mengen an Überschusslösung, die eine Durchfeuchtung der Tragelemente bewirken könnten, wurden bisher nicht beobachtet und sind auch bei qualitätsgerechter Herstellung und Verarbeitung zukünftig auch nicht zu erwarten. Geringe Mengen an Überschusslösung werden, wie Versuche und Beobachtungen zeigen, in den Porenraum des liegenden Salzgrusversatzes eindringen und diesen im Übergangsbereich verfestigen.

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachanlage Asse II		Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
		NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
		13		BAU	BB	LA	0001	00
Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten ausgewählten Sorelbetone A1 und A1-560							Blatt: 11	
8	Literatur							
[1]	CDM – Glabisch, U.; Jordan, P.; Kisse, A.; Kroll, T.; Raabe, E.-W.; Trapp, T. Konzeptstudie zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Kammern der Südwestflanke der Schachanlage Asse II; Bochum 12.09.2008							
[2]	HMGU - Carstensen, A.; Schauerhammer, M. Kurzbeschreibung der Maßnahmen zur Verfüllung der Firstspalte in der Südflanke; HMGU KZL: 10/77725/BSB/GH/LA/0001/00; Stand: 27.11.2008							
[3]	DBE TECHNOLOGY GmbH - Teichmann, L.; Meyer, T.; GSF - Heydorn, M.; Technisches Konzept zum Bau von Strömungsbarrieren; GSF KZL: 10/77725/BSB/GH/LA/0001/04; Stand: 31.08.2007							
[4]	DBE TECHNOLOGY GmbH - Meyer, T.; Pilotströmungsbarriere A1 (PSB A1) – Bericht zu Baustoffprüfungen und geotechnischen Parametern; Asse-GmbH KZL: 10/77725/BSB/GH/BQ/0006/00; 16.02.2009							
[5]	DBE TECHNOLOGY GmbH - Lerch, C.; Geotechnische Messungen zur Bewertung der Druckentwicklung und Setzungsstabilität im Kavernenhals und Bohrung E21; Asse-GmbH KZL: 16/77767/ERV/HB/BN/0001/01; 19.02.2009							
[6]	IfG Leipzig – Kamlot, P.; Brückner, D.; Günther, R.; Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase; Leipzig, Stand: 06.10.2006							
[7]	IfG Leipzig - Weise, D.; Kamlot, P.; Brückner, D.; Naumann, D. Bericht zu Laboruntersuchungen an Sorelbeton A1 der Charge 44 HMGU KZL: 10/77725/BSB/CC/BW/0010/00; Stand: 23.07.2008							
[8]	IfG Leipzig - Weise, D.; Kamlot, P. ; Brückner, D.; Naumann, D. Bericht zu Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus dem Sorelbeton A1 (Chargen 27 bis 29) und Prüfkörpern aus dem Injektionsmörtel IM3+ Charge 30); Leipzig, Stand: Februar 2007							
[9]	IfG Leipzig - Weise, D.; Kamlot, P. ; Brückner, D.; Bericht zu Laboruntersuchungen an Rückstellproben aus dem Sorelbeton A1 der Chargen 31 bis 38; Stand: 27.08.2007 GSF: 10/77725/BSB/CC/BW/0005/00							
[10]	IfG Leipzig - Weise, D.; Kamlot, P. ; Brückner, D.; Laboruntersuchungen zur Ermittlung der Festigkeit auf der Kontaktfläche Sorelbeton A1 / Carnallitit (Charge 43); HMGU KZL: 10/77725/BSB/CC/BW/0011/00; Stand: 16.05.2008							
[11]	HMGU - Carstensen, A. Jahresbericht 2007 zu den Verfüllmaßnahmen im Zuge der Resthohlraumverfüllung; HMGU KZL: 13/77745/QSS/CC/BL/0001/00; Stand: 19.05.2008							
[12]	IfG Leipzig – Weise, D.; Kamlot, P. Ergebnisse der Erkundungen am Standort BW-K2C-750-1 GSF KZL: 10/77725/BSB/CD/BW/0008/00; Stand: 01.02.2007							

Stand: 15.12.2008

DECKBLATT

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
10	77725	BSB	CC	BW	0013	00

Kurztitel der Unterlage:
 Sorelbeton A1 - Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Ersteller / Unterschrift

DBETEC- [Redacted]

Geprüft: [Redacted]

DokId: 11407586

Titel der Unterlage:

**Sorelbeton A1 - Rezepturzusammensetzung
 und Materialeigenschaften**

Freigabevermerk:

Freigabedurchlauf

Stabsstelle Qualitätsmanagement und
 Dokumentation:

Datum: 11.03.09

Name:

[Redacted Signature]

Unterschrift

Fachbereich/Projektleitung:

Datum: 10.03.2009

Name:

[Redacted Signature]

Unterschrift

Geschäftsführung Asse-GmbH:

Datum: 11.3.09

Name:

[Redacted Signature]

Unterschrift

REVISIONSBLATT

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNA	NNNNNNNNNN	NNAANN	AA	AA	NNNN	NN
10	77725	BSB	CC	BW	0013	/

Revisionsstand 00: 15.12.2008

Titel der Unterlage:

Sorelbeton A1 - Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwortl. Stelle	revidierte Blätter	Kat.	Erläuterung der Revision
				R	

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur, Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung, Kategorie S = substantielle Änderung.
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachtanlage Asse II	Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
	NNA	NNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
	10	77725	BSB	CC	BW	0013	00

Sorelbeton A1 - Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 3

Inhaltsverzeichnis

Blatt

Deckblatt 1

Revisionsblatt 2

Inhaltsverzeichnis 3

Anlage 1

DBETEC- 

Sorelbeton A1 - Rezepturzusammensetzung
und Materialeigenschaften 52

Gesamte Blattzahl

55

DECKBLATT

Blatt: 1

Stand: 15.12.2008



ASSE	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
	A			AJ			GH	BY	0005	00

Titel der Unterlage:

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

(Best.-Nr. 31/167771/05/T)

Ersteller/ Unterschrift:

DBETEC/

Gepn

DokID:

11407586

Stempelfeld:

Freigabedurchlauf

Freigabe/Abnahme Auftraggeber: Datum: <i>5.1.09</i> Name: Unterschrift	DBE TECHNOLOGY GmbH - Fachtechnik: Datum: <i>15.12.2008</i> Name: Unterschrift	Freigabe DBE TECHNOLOGY GmbH: Datum: <i>15.12.2008</i> Name: Unterschrift
---	---	--

T-DRFO02-W00

REVISIONSBLATT

Blatt: 2



Stand:

Revisionsstand 00:	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
	A			AJ			GH	BY	0005	

Titel der Unterlage:

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

(Best.-Nr. 31/167771/05/T)

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwortl. Stelle	revidierte Seiten	Kat. *)	Erläuterungen der Revision

*)
 Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	
Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften										Blatt: 3
Inhaltsverzeichnis										Blatt
Verzeichnis der Abbildungen										5
Verzeichnis der Tabellen										6
1	Einleitung									8
2	Ausgangsstoffe und Rezeptur									9
3	Rheologische Untersuchungen									11
3.1	Fließrinnenmaß									11
3.2	Sedimentationsstabilität									11
3.3	Überschusslösung									12
3.3.1	Baustoffbluten (Überstandslösung)									12
3.3.2	Drainagelösung									12
3.3	Ausbreitwinkel									13
3.4	Erstarrungsbeginn									14
4	Untersuchung physikalischer Materialeigenschaften									15
4.1	Suspensions- und Festmaterialdichte									15
4.2	Einaxiale Druckfestigkeit									15
4.3	Statischer Elastizitätsmodul und Querdehnzahl									17
4.4	Triaxiale Druckfestigkeit									20
4.5	Kompaktionsvermögen unter triaxialer Einspannung (Ersatzkompaktionsmodul)									24
4.6	Spalt- und Biegezugfestigkeit									25
4.7	Direkte bzw. einaxiale Zugfestigkeit									27
4.8	Quellen									28
4.9	Porosität									32
4.10	Permeabilität									32
5	Untersuchung thermischer Materialeigenschaften									36
5.1	Wärmeleitfähigkeit									36
5.2	Spezifische Wärmekapazität									36
5.3	Temperaturerhöhung beim Erhärten									37
5.4	Wärmeausdehnungskoeffizient									40
6	Zusammenfassung									41
7	Verwendete Unterlagen									43

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 4

Inhaltsverzeichnis

Blatt

Anhang 1 Verfahrensbeschreibung Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton

47

Gesamte Blattzahl der Unterlage: 52

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0005	00	

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 5

Verzeichnis der Abbildungen

Blatt

Abbildung 4.1:	Einaxiale Druckfestigkeit von Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden sowie von Probekörpern, die baubegleitend in der SchachtanlageASSE hergestellt wurden.	16
Abbildung 4.2:	Statischer E-Modul von Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden sowie von Probekörpern, die in der SchachtanlageASSE baubegleitend hergestellt wurden.	19
Abbildung 4.3:	Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der triaxialen Druckfestigkeiten in Abhängigkeit des Manteldrucks. Ergänzend sind von einzelnen Probekörperserien die entsprechenden einaxialen Druckfestigkeiten dargestellt ($\sigma_3 = 0,0 \text{ MPa}$).	22
Abbildung 4.4:	Abhängigkeit der Oktaederspannung im Bruchzustand von der mittleren Spannung.	23
Abbildung 4.5:	Spaltzugfestigkeit baubegleitend hergestellter Probekörper in Abhängigkeit des Probekörperalters.	26
Abbildung 4.6:	Quellmaß von Probekörpern, die bei 20 °C lagerten, in Abhängigkeit des Probekörperalters.	29
Abbildung 4.7:	Widerlagerbauwerk zur Ermittlung des Baustoffquellens unter in-situ-Bedingungen vor und während des Befüllens mit Suspension.	30
Abbildung 4.8:	Resultate der Extensometermessungen sowie Änderung der Baustofftemperatur nach dem Füllen der Widerlagerbox.	31
Abbildung 4.9:	Resultate der Extensometermessungen sowie Änderung der Baustofftemperatur nach dem Füllen der Widerlagerbox jeweils normiert auf den ermittelten Maximalwert.	31
Abbildung 4.10:	Schematische Darstellung der Zwei-Kammer-Methode.	33

Projekt	PSP-Element	Obj.Kern.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 6

Verzeichnis der Tabellen

Blatt

Tabelle 2.1:	Zusammensetzung der Rezeptur Sorelbeton A1 in Massenanteile in Prozent (Ma.-%) und Kilogramm pro Kubikmeter (kg/m ³) bezogen auf eine Dichte von 1.940 kg/m ³ ohne Berücksichtigung eines Luftporenanteils.	9
Tabelle 2.2:	Typische chemische und physikalische Daten des Magnesiumoxids.	9
Tabelle 2.3:	Zulässige Bandbreite der Korngrößenverteilung des Auffahrsalzes Asse.	10
Tabelle 2.4:	Zusammensetzung der Magnesiumchlorid-Lösung.	10
Tabelle 4.1:	Einaxiale Druckfestigkeit gemäß DIN 1048-5 im Labor hergestellter zylindrischer Probekörper nach Lagerungszeiten von 28 Tagen und 44 Tagen.	16
Tabelle 4.2:	Einzelmesswerte und Mittelwerte zum statischen Druck-Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Lagerungszeit der Probekörper in Tagen.	18
Tabelle 4.3:	Statischer Elastizitätsmodul von Probekörpern, die aus Bohrkernen von Bauwerken der Schachanlage Asse hergestellt wurden.	18
Tabelle 4.4:	Messresultate zur Querdehnzahl in Abhängigkeit des Alters der Probekörper.	20
Tabelle 4.5:	Dilatanzfestigkeit sowie Oktaederspannung (τ_{DIL}) und mittlere Spannung (σ_{DIL}) der Probekörper bei Einsetzen von Dilatanz in Abhängigkeit des Manteldrucks.	21
Tabelle 4.6:	Triaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Manteldrucks. Ergänzend sind von einzelnen Probekörperserien die einaxialen Druckfestigkeiten dargestellt ($\sigma_3 = 0,0$ MPa).	21
Tabelle 4.7:	Mittlere Spannung (σ_{MAX}) und Oktaederspannung (τ_{MAX}) der Probekörper im Bruchzustand.	22
Tabelle 4.8:	Einaxiale und triaxiale Druckfestigkeit sowie die Festigkeitsparameter Kohäsion C und Winkel der inneren Reibung ϕ nach Mohr-Coulomb.	24

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 7

Verzeichnis der Tabellen

Blatt

Tabelle 4.9: Gesamtvolumenverformung (ϵ_V) in Prozent und Ersatzkompaktionsmodul (K_E) in GPa bei hydrostatischen Spannungen (σ_{hyd}) von 1,0 MPa, 2,0 MPa und 5,0 MPa.	25
Tabelle 4.10: Messresultate zur direkten Zugfestigkeit („Modified Tension Test“).	27
Tabelle 4.11: Quellmaß nach DIN 52450 in mm/m (‰) in Abhängigkeit des Probekörperalters (Tage, d).	28
Tabelle 4.12: Quellmaß nach DIN 52450 in mm/m (‰) in Abhängigkeit des Probekörperalters (Tage, d).	28
Tabelle 4.13: Effektive Porosität in Volumenanteilen in Prozent (Vol.-%).	32
Tabelle 4.14: Resultate zur Lösungspermeabilität (hochkonzentrierte $MgCl_2$ -Lösung).	34

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

1 Einleitung

Im Rahmen der Schließung der SchachanlageASSE sind Strömungsbarrieren, deren Widerlager und stützender Versatz zu erstellen sowie Resthohlräume mit einem fließfähigen Baustoff zu verfüllen. Die Ausgangsstoffe der Rezeptur sind unter Tage zu lagern, zu dosieren und zu einer homogenen Suspension zu vermischen, die über Rohrleitungen zu den einzelnen Verfüllorten transportiert wird. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Rest- und Porenräume mit $MgCl_2$ -reicher Lösung füllen.

In Abhängigkeit der eingesetzten Misch- und Fördertechnologie sowie dem Einsatzzweck bestehen an den Baustoff unterschiedliche Materialanforderungen. Darüber hinaus müssen für Sicherheitsnachweise Zahlenwerte zu physikalischen und/oder thermischen Materialeigenschaften des Baustoffs bekannt sein.

Auf der Grundlage umfangreicher Untersuchungen unterschiedlicher Baustoffe wurde der Sorelbeton A1 als geeignete Rezeptur ausgewählt. Ziel des vorliegenden Berichts ist daher die Rezeptur Sorelbeton A1, deren Ausgangsstoffe sowie durchgeführte Labor-, Technikums- und in-situ-Untersuchungen zu beschreiben sowie den Kenntnisstand zu den Prüfergebnissen zusammen zu fassen. In Bezug auf die Materialeigenschaften werden rheologische Untersuchungen am frischen Baustoff, die in Bezug auf die Einbringtechnologie erforderlich sind sowie die Untersuchung physikalischer und thermischer Materialeigenschaften unterschieden. Die Baustoffuntersuchungen wurden in Anlehnung an Richtlinien und Normen im Bereich der Baustofftechnologie vorgenommen. Stünden für einzelne Parameter keine geeigneten Prüfverfahren zur Verfügung, wurden diese Parameter mit Hilfe anderer Verfahren bestimmt. Die zugehörigen Erläuterungen bzw. Verfahrensbeschreibungen sind in der Unterlage enthalten.

Auf die Darstellung von Vorversuchen während der Rezepturentwicklung sowie den Resultaten von Rezepturvarianten, bei denen alternative Ausgangsstoffe und/oder von der Grundrezeptur A1 abweichende Baustoffzusammensetzungen Verwendung fanden, wird im Rahmen dieses Berichtes verzichtet.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

2 Ausgangsstoffe und Rezeptur

Die Bestandteile der Rezeptur „Sorelbeton A1“ sind Magnesiumoxid (MgO) als Bindemittel und Steinsalzgrus als Gesteinskörnung (Zuschlagstoff), die mit Magnesiumchlorid-Lösung (MgCl₂-Lösung) angemischt werden. Die Zusammensetzung der Rezeptur zeigt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Zusammensetzung der Rezeptur Sorelbeton A1 in Massenanteile in Prozent (Ma.-%) und Kilogramm pro Kubikmeter (kg/m³) bezogen auf eine Dichte von 1.940 kg/m³ ohne Berücksichtigung eines Luftporenanteils.

	Massenanteile in Prozent [Ma.-%]	Kilogramm pro Kubikmeter [kg/m ³]
Magnesiumoxid	11,3	218
Steinsalzgrus	63,7	1.237
MgCl ₂ -Lösung	25,0	485

Als Magnesiumoxid MgO (kaustische Magnesia) kamen Produkte zum Einsatz, die die Spezifikationen gemäß DIN EN 14016-1 /1/ (Chemische Zusammensetzung, Mahlfeinheit) erfüllen. Tabelle 2.2 fasst chemische und physikalische Daten zusammen.

Tabelle 2.2: Typische chemische und physikalische Daten des Magnesiumoxids.

	Anteil [Ma.-%]
MgO (geglühte Basis)	97,0
CaO	1,8
Fe	0,2
SO ₃	0,1
Glühverlust	2,0
Schlammrückstand 63-µm-Sieb	0,2
Schlammrückstand 40-µm-Sieb	3,5

Als Zuschlagstoff kommt Steinsalz, das beim Auffahren von Hohlräumen bzw. durch Nachschnitarbeiten in der SchachanlageASSE gewonnen wird, zum Einsatz. Das Auffahrsalz hat nach der Aufbereitung (Baustoffanlage 20BA) ein Größtkorn von rund 4 mm. Steinsalz kann auch extern, beispielsweise von der K+S AG beschafft werden. Das angelieferte Steinsalz wird in der Regel pneumatisch nach unter Tage gefördert. Tabelle 2.3 fasst Werte zur zulässigen Bandbreite der Korngrößenverteilung zusammen.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Tabelle 2.3: Zulässige Bandbreite der Korngrößenverteilung des Zuschlagstoffes Steinsalz.

Fraktion	Siebrückstände	Schwankungsbreite	Summe der Siebdurchgänge
[mm]	[Ma.-%]	[Ma.-%]	[Ma.-%]
8,0 – 16,0	0,0	± 0,0	100,0
4,0 – 8,0	1,0	± 0,5	99,0
2,0 – 4,0	19,0	± 5,0	80,0
1,0 – 2,0	22,0	± 5,0	58,0
0,5 – 1,0	17,0	± 5,0	41,0
0,25 – 0,5	12,0	+ 5,0 bis –3,0	29,0
0,125 – 0,25	12,0	+ 10,0 bis –3,0	17,0
0,063 – 0,125	9,0	+ 10,0 bis –3,0	8,0
< 0,063	8,0	+ 10,0 bis –3,0	0,0

Als Anmischlösung kommt eine Magnesiumchlorid-Lösung gemäß der in Tabelle 2.4 angegebenen Spezifikation zum Einsatz. Die Magnesiumchlorid-Lösung weist bei 30 °C eine mittlere Dichte von 1,32 g/cm³ auf.

Tabelle 2.4: Zusammensetzung der Magnesiumchlorid-Lösung.

	Konzentrationsbereich	Durchschnittswert
	[Ma.-%]	[Ma.-%]
Magnesiumchlorid, MgCl ₂	28,6 – 31,6	30,1
Magnesiumsulfat, MgSO ₄	2,3 – 2,5	2,4
Calciumsulfat, CaSO ₄	0,07 – 0,1	0,1
Kaliumchlorid, KCl	0,1 – 0,11	0,1
Natriumchlorid, NaCl	0,3 – 0,36	0,3

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

3 Rheologische Untersuchungen

Labor-, Technikums- und In-situ-Untersuchungen zeigen, dass die Ausgangsstoffe der Rezeptur Sorelbeton A1 gemäß den Anforderungen der DIN EN 206-1 /2/ dosiert, gewogen und zu einer homogenen Suspension gemischt werden können. Des Weiteren belegen In-situ-Befunde, dass der frische Baustoff in entsprechend dimensionierten Rohrleitungen über Förderweiten von mehreren hundert Metern verpumpt werden kann und in einen Hohlraum mit geringem Fließwinkel ausfließt. Im Folgenden sind Prüfergebnisse zur Baustoffkonsistenz, der Sedimentationsstabilität, zum Baustoffbluten sowie zur Menge an Drainagelösung zusammengefasst. Die Prüfung des Erstarrungsbeginns nach DIN EN 196-3 /3/ ist zwar keine rheologische Untersuchung, wird jedoch ebenso in diesem Kapitel beschrieben, da die Prüfergebnisse Aussagen zur Verarbeitungsdauer der Rezeptur ermöglichen.

3.1 Fließrinnenmaß

Das Fließrinnenmaß ist ein Konsistenzprüfverfahren und dient zur Bewertung der Förderbarkeit und des Ausbreitverhaltens von Baustoffsuspensionen bzw. ihrem Vermögen der Selbstnivellierung. Grundlage der Prüfungen war das DBV-Merkblatt /4/ bzw. die DIN EN 13395-2 /5/. Abweichend von der DIN EN 13395-2 wurde das Fließrinnenmaß als Fließweg der Suspension in der Fließrinne eine Minute nach dem Ziehen des Stopfens aus dem Trichter ermittelt. Die Messwerte können demnach ebenso als durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten der Suspension in der Fließrinne gewertet werden. Die Messungen wurden direkt nach dem Anmischen der Ausgangsstoffe durchgeführt, das im Labor mit Mörtel- oder Zwangsmischern und unter Bergwerksbedingungen in Freifallmischern sowie einer Baustoffmischanlage erfolgte.

Das Fließrinnenmaß variierte zwischen 420 mm und 600 mm und kam im Durchschnitt auf einen Wert von 540 mm.

3.2 Sedimentationsstabilität

Bei fließfähigen Baustoffen ist nicht auszuschließen, dass grobe und/oder schwere Partikel bevorzugt sedimentieren, d.h. die Feststoffe entmischen. Der Prozess kann die Förderbarkeit oder Stationierbarkeit der Suspension durch Brückenbildung von Gesteinskörnung beeinträchtigen und führt zu einem inhomogenen Kornaufbau des erhärteten Baustoffs.

Bei der Rezeptur A1 ist zu erwarten, dass in Folge des schmalen Korngrößenbereiches der Feststoffe (Steinsalzgrus mit Größtkorn rund 4 mm) und der geringen Dichte der Gesteinskörnung (ca. 2,17 g/cm³), die nur geringfügig höher als die Baustoffdichte (vgl. Kapitel 4.1) und deutlich niedriger als die des Bindemittels ist, ein Entmischen der Feststoffe ausgeschlossen ist.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Durch visuelle Prüfungen der Oberflächen und der Schnittflächen von Bohrkernen und Probestkörpern konnte die Sedimentationsstabilität nachgewiesen werden.

3.3 Überschusslösung

Bei Suspensionen kann bis zum Erstarren ein Teil der Lösung aus dem Baustoffgefüge austreten. Hierfür bestehen zwei Möglichkeiten, die beide zur Bildung von Überschusslösung führen:

- „Baustoffbluten“ (Bildung von Überstandslösung auf der Baustoffoberfläche) sowie
- das Ausfließen von Lösung an den Seitenflächen und der Basis des Baustoffkörpers (Ausfließen oder Abseigern von Drainagelösung)

Die Menge an Überstands- und Drainagelösung wird an ruhenden Suspensionen ermittelt. Im Folgenden sind die Messverfahren und -resultate beschrieben.

3.3.1 Baustoffbluten (Überstandslösung)

Die Bildung der überstehenden Lösung wurde im Labor und unter In-situ-Bedingungen untersucht. Die frisch angemischte Baustoffsuspension wurde in Messzylinder (Mindestvolumen 1 Liter) gefüllt, die während der Standzeit von 24 Stunden luftdicht versiegelt waren. Die visuellen Prüfungen ergaben, dass sich zunächst geringfügig Überstandslösung bildet, die mit fortschreitender Erhärtung vom Baustoff wieder aufgenommen wird. Die Höhe der Lösungsschicht liegt im Rahmen der Messgenauigkeit des Verfahrens und beträgt maximal 1 mm. Die Befunde können auf größere Baustoffvolumina übertragen werden, da die Höhe der Lösungsschicht unabhängig von der Größe der Suspensionsoberfläche ist.

3.3.2 Drainagelösung

Erfahrungen mit konventionellen Betonen zeigen, dass die Menge an Drainagelösung bei einer Baustoffrezeptur mit steigender Temperatur aufgrund des Anstiegs der Erhärtungsgeschwindigkeit sinkt. Zur Gewährleistung der Repräsentativität der Messresultate erfolgten daher die Untersuchungen in der SchachtanlageASSE auf der 775-m-Sohle, da dort vergleichbare klimatische Bedingungen gewährleistet sind. Die Suspension wurde in Röhrrchen gefüllt, in deren untere Öffnung ein Siebgewebe fixiert wurde. Die Maschenweite des Siebgewebes ist so gewählt, dass ein Transport von Partikeln weitestgehend vermieden, jedoch das Ausfließen von Baustofflösung möglichst wenig behindert wird. Zum Erfassen der gesamten Menge an Drainagelösung wurden die Röhrrchen nach 20 und 24ständiger Standzeit gewogen. Die Resultate sind als Massenanteile in Prozent in Bezug auf die Baustoffmenge in den einzelnen Röhrrchen angegeben.

Bei Laborversuchen mit geringen Suspensionshöhen sinkt bei der Drainage von Baustofflösung die Menge an Überstandslösung. Nach Kapitel 3.3.1 ist die Neigung der Rezeptur A1 zum Baustoffbluten sehr gering. Trotz dieser Befunde wurde während der Untersuchungen ebenso das

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A			ÄJ			GH	BY	0005	00	

Auftreten von Überstandslösung geprüft. Eine detaillierte Beschreibung des Messverfahrens und der Datenauswertung enthält /6/.

Der Baustoff wurde mit einem Doppelwellen-Handmischer angemischt, wobei nach visueller Homogenität das Mischen der Suspension weitere 3 Minuten fortgesetzt wurde. Das Chargenvolumen betrug etwa 10 Liter.

Die Resultate nach 20 und 24stündiger Standzeit sind im Rahmen der Messgenauigkeit des Verfahrens identisch. Die 10 Messwerte der Drainagelösung reichten von 0,7 Massen-% bis 1,0 Massen-%. Der Mittelwert für den prozentualen Anteil der Drainagelösung beträgt 0,9 Massen-%. Nach etwa 2 Tagen nahm die Lösung eine gelartige Konsistenz mit thixotropen Eigenschaften an. Überstandslösung wurde nicht festgestellt.

Die möglichen Auswirkungen von Drainagelösung bei der Firstspaltverfüllung in Abbauen der Südflanke wurden in einem Technikumsversuch mit einem Sorelbeton, der gegenüber der Rezeptur A1 einen erhöhten Anteil an $MgCl_2$ -Lösung enthält, überprüft /6/.

3.4 Ausbreitwinkel

Der Ausbreitwinkel erlaubt Aussagen zum Ausbreitverhalten des Frischbetons, zum Verfüllvorgang von Grubenbauen sowie zur Firstanbindung. Nach visuellen Befunden fließt der frische Sorelbeton auf intaktem Untergrund mit vernachlässigbarem Ausbreitwinkel (vgl. Kapitel 4.8). Der Ausbreitwinkel wurde in zwei Grubenbauen gemessen (SV-800-4, SV-775-7), in die der Sorelbeton über seigere Bohrungen gepumpt wurde sowie beim Erstellen eines Widerlagers (WL-775-6).

Die Befüllbohrungen der Grubenbaue endeten in der Firste. Der Frischbeton breitete sich auf einer Länge von ca. 23 m bzw. über eine Strecke von ca. 30 m beidseitig der Befüllbohrung aus. Über die erhärtete Baustoffoberfläche wurde ein Raster von Vermessungspunkten gelegt, die einen durchschnittlichen Abstand von ca. 3,5 m hatten. Die Vermessungspunkte wurden mit einem Tachymeter markscheiderisch mit einer Genauigkeit von maximal ± 2 mm eingemessen und die dreidimensionalen Koordinaten der gekennzeichneten Punkte bestimmt. Die Messunsicherheit der Aufnahme beträgt auf den mittleren Rasterabstand maximal $0,06^\circ$.

Die berechneten Ausbreitwinkel lagen zwischen $0,03^\circ$ und $2,8^\circ$ bei einem Mittelwert von $1,2^\circ$. Im Widerlager wurde der Ausbreitwinkel gegen die horizontal verlaufenden Fugen der Schalungsmauer zu durchschnittlich etwa $1,7^\circ$ ermittelt.

Die Messwerte sind repräsentativ für die Ausbreitung von Sorelbetonsuspensionen auf einem ebenen und intaktem Untergrund, wie beispielsweise bereits erstarrten Sorelbeton oder festen Gebirge. Bei der Ausbreitung auf Salzgrus sind im Bereich der Schichtgrenze die in Kapitel 3.3 beschriebenen Drainageeffekte zu erwarten. Dies führt an der vorderen Ausbreitungsfront zu einem steileren Ausbreitwinkel.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0005	00	

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 14

3.5 Erstarrungsbeginn

Der Erstarrungsbeginn nach DIN EN 196-3 /3/ ist definiert als der Übergang der Mischung vom plastischen in den festen Zustand /7/ und wird bestimmt als Widerstand, den der Baustoff einer eindringenden Nadel entgegensetzt. Dem Erstarren folgt die Zeitphase des Erhärtens. Bei zwei Prüfungen setzte das Erstarren der Suspension nach 215 Minuten und 300 Minuten ein.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NN A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
A			Ä J			GH	BY	0005	00	

4 Untersuchung physikalischer Materialeigenschaften

Im Folgenden werden die Resultate physikalischer Untersuchungen beschrieben. Sie umfassen im Wesentlichen die Ermittlungen von Parametern, die das Verformungs- und Festigkeitsverhalten im ein- und triaxialen Spannungszustand sowie das hydraulische Verhalten beschreiben.

4.1 Suspensions- und Festmaterialdichte

Die Dichte eines Baustoffes ergibt sich aus den Mengenverhältnissen und spezifischen Dichten seiner Komponenten. Die Suspensionsdichte der Rezeptur wurde in Anlehnung an die Norm ASTM D 4380 /8/ mit einer sogenannten Spülungs- oder Suspensionswaage und gemäß DIN EN 12350-7 /9/ in einem Luftporentopf bestimmt. Die Messung der Festmaterialdichte erfolgte gemäß DIN 1048-5 /10/ bzw. DIN EN 12390-7 /11/. Für Indexmessungen der Reindichte (durchschnittlichen Rohkorndichte) kam die DIN 18124 /12/ (vgl. /13/,/14/) zum Einsatz.

Basierend auf den Durchschnittsdichten der Ausgangsstoffe ergibt sich für die Suspension ohne Luftporen eine rechnerische Dichte von etwa 1,92 g/cm³ bis 1,94 g/cm³ (vgl. Tabelle 2.1). Gemessen wurden bei luftporenhaltigen Suspensionen Werte zwischen 1,77 g/cm³ bis 1,90 g/cm³ und im Durchschnitt eine Dichte von 1,85 g/cm³.

An unverdichteten Probekörpern wurde nach 7tägiger Lagerung bei Raumtemperatur eine Festmaterialdichte von 1,89 g/cm³ ermittelt und nach 28tägiger Lagerung von 1,86 g/cm³. Bohrkern aus Bauwerken in der Schachtanlage Asse hatten nach rund 90 Tagen eine durchschnittliche Dichte von 1,85 g/cm³ und nach etwa 190 Tagen eine Dichte von 1,82 g/cm³ bzw. 1,84 g/cm³. Probekörper, die zwischen 214 Tagen und 285 Tagen bei etwa 30 °C lagerten, kamen auf Werte von 1,82 g/cm³ bis 1,86 g/cm³. Im Mittel kamen unverdichtete Probekörper auf eine Dichte von 1,85 g/cm³. Bei einer Prüferserie verdichteter Prismen variierten die Dichten zwischen 1,90 g/cm³ und 1,92 g/cm³ bei einem Mittelwert von 1,91 g/cm³.

Für die Reindichte von festen Probekörpern wurden Werte von 2,15 g/cm³, 2,17 g/cm³ und 2,08 g/cm³ ermittelt.

4.2 Einaxiale Druckfestigkeit

Die Untersuchungen zur einaxialen Druckfestigkeit erfolgten nach DIN 1048-5, Abschnitt 7,2 /10/ bzw. DIN EN 12390-3 /15/ an zylindrischen Probekörpern. Im Labor hergestellte Probekörper wurden bei Raumtemperatur in luftdichten Formen gelagert und für die Prüfung auf einen Durchmesser von etwa 103 mm sowie eine Höhe von ca. 212 mm trocken präpariert. Das Prüfalter der Probekörper betrug 28 Tage und 44 Tage. Weitere Zylinder mit einem Verhältnis des

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Durchmessers zur Höhe von 1 zu 2 wurden begleitend zur Bauwerkserstellung in der Schachanlage Asse hergestellt. Die befüllten und versiegelten Kunststoffrohre lagerten unter Tage. Das Alter dieser Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung zwischen 75 Tagen und 350 Tagen.

Die einaxialen Druckfestigkeiten der Laborproben sind angegeben in Tabelle 4.1. Die baubegleitend hergestellten Probekörper kamen auf Druckfestigkeiten von 38,3 MPa bis 73,0 MPa, bei einem Mittelwert von 58,7 MPa. Die Prüfwerte sind dargestellt in Abbildung 4.1. Weitere 8 Bohrkerne von Bauwerken mit einem Alter > 120 Tage zum Zeitpunkt der Prüfung kamen auf Druckfestigkeiten von 48,7 MPa, 48,8 MPa, 51,1 MPa, 54,4 MPa, 58,5 MPa, 58,5 MPa, 61,1 MPa und 66,5 MPa. Hieraus resultiert ein Mittelwert von 56,0 MPa.

Tabelle 4.1: Einaxiale Druckfestigkeit gemäß DIN 1048-5 im Labor hergestellter zylindrischer Probekörper nach Lagerungszeiten von 28 Tagen und 44 Tagen. Index¹: Rundung auf eine Genauigkeit von 1 MPa.

Erhärtungszeit	[Tage]	28 d				44 d
		Einzelmesswerte	[MPa]	33,0 ¹	37,0 ¹	40,0 ¹
34,0 ¹	37,0 ¹			42,0 ¹	43,5	62,1
35,0 ¹	37,0 ¹			43,0 ¹		64,1
Mittelwert	[MPa]	38,6				62,9

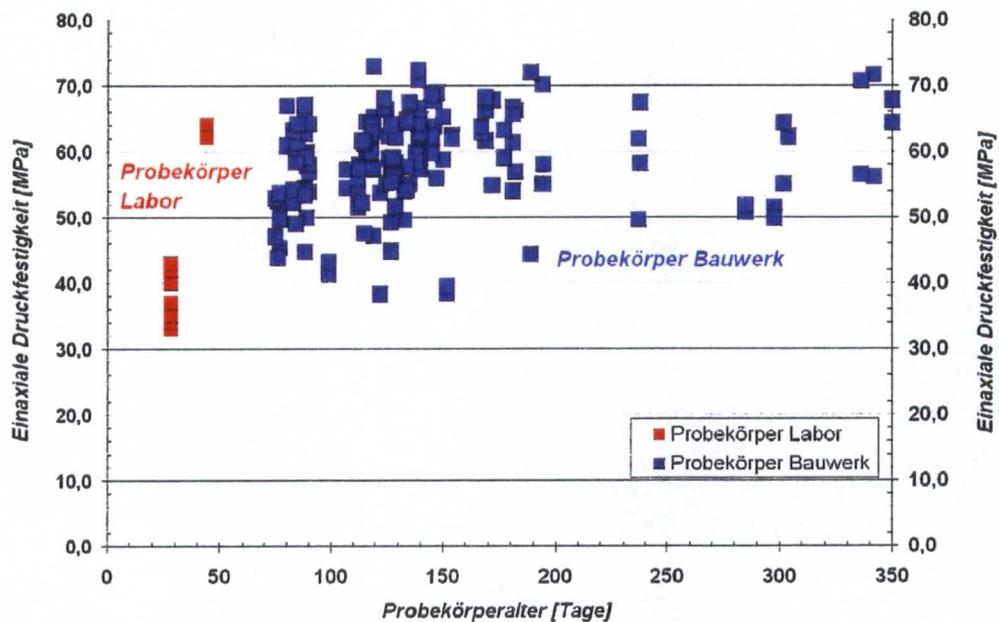


Abbildung 4.1: Einaxiale Druckfestigkeit von Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden sowie von Probekörpern, die baubegleitend in der Schachanlage Asse hergestellt wurden.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Für die Bewertung der Druckfestigkeit wird der charakteristische Wert f_{ck} der 28-Tage-Werte zu Grunde gelegt. Dies ist gemäß DIN EN 206-1 /2/ (vgl. /16/,/17/) der erwartete Festigkeitswert, unter den 5 % der Grundgesamtheit aller möglichen Messwerte der Menge des betrachteten Baustoffs fallen. Die Berechnung erfolgt auf der Grundlage der Student-t-Verteilung gemäß Gl. (4.1) mit X_M dem Mittelwert der Messwerte, 1,812 als Wert der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die in Tabelle 4.1 aufgeführten 11 Messwerte für das 5 %-Signifikanzniveau, der Standardabweichung σ bezogen auf den sicheren Mittelwert und der Anzahl an Messwerten n (vgl. /13/). Die Student-t-Verteilung nähert sich mit zunehmender Anzahl an Stichproben (Messresultaten) der Gauß'schen Normalverteilung an.

$$f_{ck} = X_M - 1,812 \cdot s / \sqrt{n} \tag{4.1}$$

Für die 28-Tage-Werte der Tabelle 4.1 beträgt die Standardabweichung 3,865 MPa, so dass der charakteristische Wert f_{ck} 36,5 MPa beträgt.

4.3 Statischer Elastizitätsmodul und Querdehnzahl

Der Elastizitätsmodul gibt das Verhältnis der Prüfspannung zur zugehörigen Verformung des Probekörpers an (vgl. /10/). Die Querdehnzahl, auch als Querdehnungszahl, Querkontraktionszahl oder Poissonzahl bezeichnet, ergibt sich aus dem Verhältnis der Quer- zur Längsverformungsdifferenz (vgl. /10/). Der statische Druck-Elastizitätsmodul und die statische Querdehnzahl wurden unter triaxialen Belastungsbedingungen nach Beendigung der isotropen Druckversuche (Kapitel 4.5) bestimmt. Die Be- und Entlastungsschleifen wurden dabei zwischen 7,5 MPa und 12,5 MPa Belastung gefahren.

Statischer Elastizitätsmodul

Geprüft wurden im Labor hergestellte Zylinder mit einem Verhältnis des Durchmessers zur Höhe von 1 zu 2. Die Probekörper erhärteten 28 Tage bzw. 44 Tage bei Raumtemperatur im luftdicht versiegelten Kunststoffrohr. Tabelle 4.2 fasst die Resultate zusammen, die auf eine Genauigkeit von 100 MPa gerundet wurden. Die Messwerte in Tabelle 4.2 zeigen einen Anstieg des Elastizitätsmoduls bei einer Zunahme der Lagerungszeit von 28 Tagen auf 44 Tagen.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Tabelle 4.2: Einzelmesswerte und Mittelwerte zum statischen Druck-Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Lagerungszeit der Probekörper in Tagen.

Erhärungszeit	[Tage]	28 d	44 d
Einzelmesswerte	[MPa]	13.800	17.500
		13.800	20.500
		14.600	22.400
		15.600	–
Mittelwert	[MPa]	14.500	20.100

Weitere Probekörper wurden in der SchachanlageASSE baubegleitend hergestellt und lagerten in versiegelten Kunststoffrohren unter Tage. Die weitere Bearbeitung erfolgte trocken im Labor. Die Probekörper waren bei der Prüfung zwischen 75 Tage und 350 Tage alt. Die Messwerte dieser Probekörper sind zusammen mit den Resultaten, der im Labor hergestellten Zylinder dargestellt in Abbildung 4.2. Die Messwerte der baubegleitend hergestellten Probekörper liegen zwischen 14.400 MPa und 25.800 MPa. Der Mittelwert beträgt 21.800 MPa.

Die Daten von 24 Bohrkernen mit einem Prüfalter > 120 Tage können aufgrund ihrer Zuordnung zu verschiedenen Bauwerken bzw. Bauwerksabschnitten zu 8 Chargen zusammengefasst werden. Die Messresultate zeigt Tabelle 4.3. Die Elastizitätsmoduli reichen von 17.600 MPa bis 26.900 MPa, bei einem Mittelwert von 21.900 MPa. Für sämtliche Messwerte an Probekörpern mit einem Mindestalter zum Prüfzeitpunkt von 75 Tagen ergibt sich eine Variation zwischen 14.400 MPa und 26.900 MPa, bei einem Mittelwert von 21.800 MPa.

Im Rahmen der Messungen der triaxialen Druckfestigkeit wurde bei einem Manteldruck von 5 MPa und 10 MPa statische Elastizitätsmoduli von 20.000 MPa bzw. 21.600 MPa ermittelt.

Tabelle 4.3: Statischer Elastizitätsmodul von Probekörpern, die aus Bohrkernen von Bauwerken der SchachanlageASSE hergestellt wurden. Das Alter der Probekörper betrug zum Zeitpunkt der Prüfung > 120 Tage.

Charge		1	2	3	4	5	6	7	8
Einzelmesswerte	[MPa]	19.200	20.600	20.800	22.400	20.600	21.300	17.600	18.800
		19.600	21.100	21.100	25.100	20.700	22.000	22.200	19.600
		26.100	21.700	24.200	26.900	25.900	23.500	25.400	19.600
Mittelwert	[MPa]	21.600	21.100	21.000	24.800	20.700	22.300	21.700	19.300

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE TEC DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

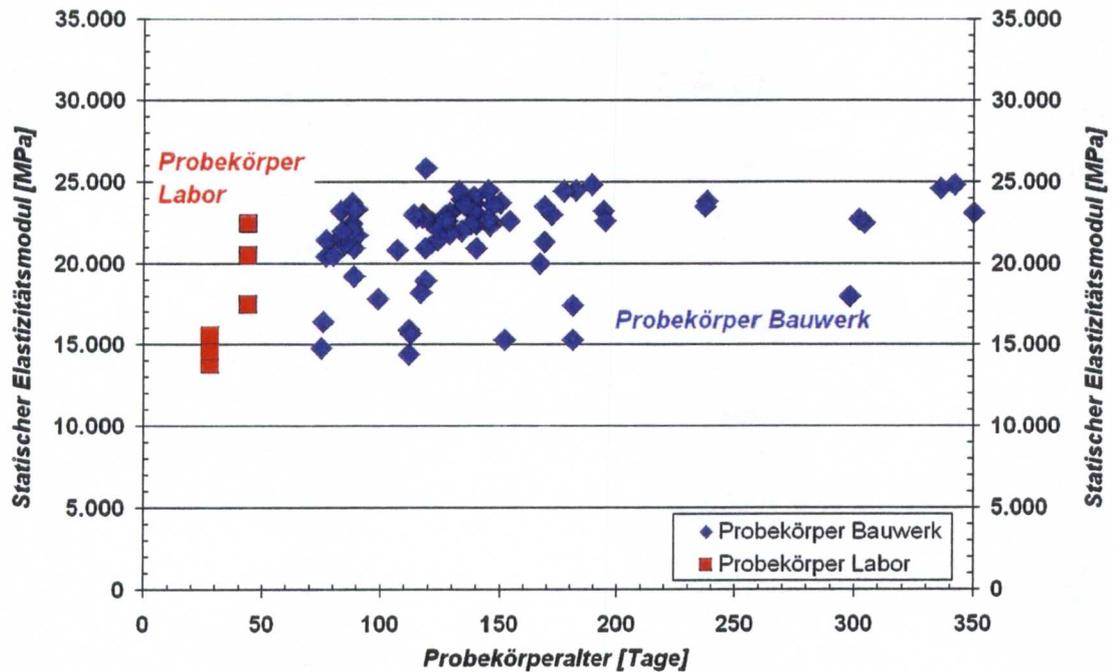


Abbildung 4.2: Statischer E-Modul von Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden sowie von Probekörpern, die in der Schachanlage Asse baubegleitend hergestellt wurden.

Querdehnzahl

Die Probezylinder hatten einen Durchmesser von ca. 100 mm und ein Verhältnis des Durchmessers zur Höhe von rund 1 zu 2. Des Weiteren erfolgten Messungen an rund 90 Tage alten Probekörpern, die in der Schachanlage Asse baubegleitend hergestellt wurden und bis zur weiteren Bearbeitung unter Tage lagerten. Die Messresultate fasst Tabelle 4.4 zusammen. Sie reichen von 0,20 bis 0,27. Eine Abhängigkeit der Querdehnzahl vom Alter der Probekörper ist nicht festzustellen. Im Durchschnitt ergibt sich ein Wert von 0,24.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Tabelle 4.4: Messresultate zur Querdehnzahl in Abhängigkeit des Alters der Probekörper.

Lagerungszeit	44 d	88 d	176 d	237 d	238 d	268 d	285 d
Einzelmesswerte	0,20	0,22				0,23	
	0,24	0,25; 0,26	0,23	0,26	0,25	0,24	0,22
	0,25	0,27					

Für Messungen der Querkontraktionszahl in der Triaxialzelle bei Manteldrücken von 5,0 MPa und 10,0 MPa wurden Zylinder mit einem Durchmesser von 96 mm und einer Höhe von 192 mm verwendet. Die hydrostatische Drucksteigerung bis zum Manteldruck sowie die Geschwindigkeit während der Be- und Entlastungsschleifen betrug 0,1 MPa/s. Bei einem Manteldruck von 5,0 MPa betrug die Querkontraktionszahl 0,33 und bei einem Manteldruck von 10,0 MPa 0,32.

4.4 Triaxiale Druckfestigkeit

Die triaxialen Druckversuche hatten zum Ziel, die Dilatanz- und Bruchfestigkeit des Baustoffs in Abhängigkeit des Manteldrucks zu ermitteln. Die Untersuchungen erfolgten an zylindrischen Probekörpern mit einer Höhe von 192 mm und einem Durchmesser von 96 mm. Das Alter der Probekörper betrug > 56 Tage. Die Zylinder lagerten bei Raumtemperatur und wurden vor den Messungen mittels Ultraschall (100 kHz) auf Vorschädigungen geprüft. Die Manteldrücke lagen im Bereich von 1,0 bis 10,0 MPa. Die Manteldruckmessung erfolgte mit einer Genauigkeit von 0,01 MPa. Im Versuchsablauf wurden die Zylinder hydrostatisch mit 0,1 MPa/s bis zum vorgesehenen Manteldruck belastet. Im Anschluss erfolgte die Belastung mit einer Verformungsrate von $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ bis in den Entfestigungsbereich.

Für die Dilatanz- und Bruchfestigkeit wurden nach Gl. (4.2) und Gl. (4.3) die Oktaederspannungen (τ) und die mittleren Spannungen (σ) berechnet. Dabei wurde die der Dilatanzfestigkeit (Dilatanzgrenze) entsprechende Spannung an Stelle von σ_1 eingesetzt.

$$\tau = \frac{1}{3} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0,5} = \left(\frac{2}{9}\right)^{0,5} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3 \cdot 2) = (\sigma_1 - \sigma_3) / 3 + \sigma_3 \quad (4.3)$$

Dilatanzfestigkeiten konnten bei Manteldrücken von 1,0 MPa, 2,0 MPa und 5,0 MPa ermittelt werden. Die Prüfergebnisse sowie die mittleren Spannungen und Oktaederspannungen fasst Tabelle 4.5 zusammen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Tabelle 4.5: Dilatanzfestigkeit sowie Oktaederspannung (τ_{DIL}) und mittlere Spannung (σ_{DIL}) der Probekörper bei Einsetzen von Dilatanz in Abhängigkeit des Manteldrucks. Sämtliche Angaben in MPa.

Manteldruck (σ_3)	1,0		2,0		5,0	
Dilatanzfestigkeit	51,7		54,9		59,4	
σ_{DIL} bzw. τ_{DIL}	σ_{DIL}	τ_{DIL}	σ_{DIL}	τ_{DIL}	σ_{DIL}	τ_{DIL}
	17,9	23,9	19,6	24,9	23,1	25,6

Die Prüfergebnisse zur Bruchfestigkeit fasst Tabelle 4.6 zusammen und Tabelle 4.7 stellt die Oktaederspannungen und die mittleren Spannungen im Bruchzustand dar. Die Abbildung 4.3 und 4.4 zeigen die Resultate in Abhängigkeit des Manteldrucks. Mit zunehmender Belastungs- bzw. Verformungsgeschwindigkeit steigt die Festigkeit von Normalbeton. Es ist davon auszugehen, dass dieser Zusammenhang auch für den Sorelbeton A1 gilt.

Tabelle 4.6: Triaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Manteldrucks. Ergänzend sind von einzelnen Probekörperserien die einaxialen Druckfestigkeiten dargestellt ($\sigma_3 = 0,0$ MPa). Sämtliche Angaben in MPa. Index¹: Einzel-Messwert.

Manteldruck (σ_3)	0,0	1,0	2,0	4,0	5,0	10,0
Einzel-Messwerte (σ_1)		53,4	56,9		60,0 ¹	67,2 ¹
	51,1	49,1	51,0	47,0		
	48,7	49,4	51,1	52,6		
	48,8	50,0	51,0	53,5		
	54,4	57,8	60,7	67,5		
	58,5	59,7	59,0	61,4		
	58,5	60,7	63,0	67,3		
	61,1	62,4	60,4	63,1		
66,5	68,0	67,9	70,8			
Maximalwert	66,5	68,0	67,9	70,8		
Mittelwert	56,0	56,7	57,9	60,4	60,0 ¹	67,2 ¹
Minimalwert	48,7	49,1	51,0	47,0		

Tabelle 4.7: Mittlere Spannung (σ_{MAX}) und Oktaederspannung (τ_{MAX}) der Probekörper im Bruchzustand. Sämtliche Angaben in MPa. Index¹: Einzel-Messwert.

Manteldruck (σ_3)	0,0		1,0		2,0		4,0		5,0		10,0	
	σ_{MAX}	τ_{max}	σ_{MAX}	τ_{max}	σ_{MAX}	τ_{max}	σ_{MAX}	τ_{max}	σ_{MAX}	τ_{max}	σ_{MAX}	τ_{max}
Einzelwerte					20,3	25,9			23,3 ¹	25,9 ¹	29,1 ¹	27,0 ¹
Mittlere Spannung (σ_{MAX}) und Oktaederspannung im Bruchzustand (τ_{max})	16,2	23,0	17,0	22,7	18,4	23,1	20,2	22,9				
	16,3	23,0	17,1	22,8	18,3	23,1	20,5	23,3				
	17,0	24,1	17,3	23,1	18,3	23,1	18,3	20,3				
	18,1	25,6	19,9	26,8	21,6	27,7	25,2	29,9				
	19,5	27,6	20,6	27,7	21,0	26,9	23,1	27,1				
	19,5	27,6	20,9	28,1	22,3	28,8	25,1	29,8				
	20,4	28,8	21,5	28,9	21,5	27,5	23,7	27,9				
	22,2	31,3	23,3	31,6	24,0	31,1	26,3	31,5				
Maximalwert	20,4	28,8	23,3	31,6	24,0	31,1	26,3	31,5				
Mittelwert	18,1	25,6	19,6	26,3	20,6	26,4	22,8	26,6	23,3 ¹	25,9 ¹	29,1 ¹	27,0 ¹
Minimalwert	16,2	23,0	17,0	22,7	18,3	23,1	18,3	20,3				

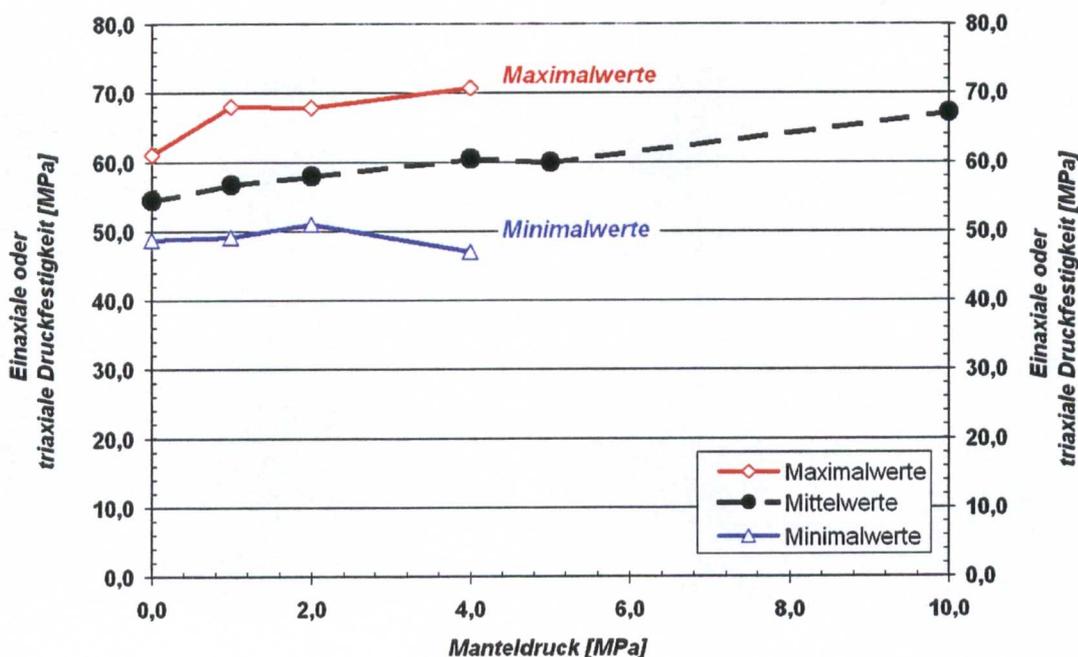


Abbildung 4.3: Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der triaxialen Druckfestigkeiten in Abhängigkeit des Manteldrucks. Ergänzend sind von einzelnen Probekörperserien die entsprechenden einaxialen Druckfestigkeiten dargestellt ($\sigma_3 = 0,0$ MPa).

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev	DBE TEC DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AA NNNA	A A NN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
Ä			ÄJ			GH	BY	0005	00	

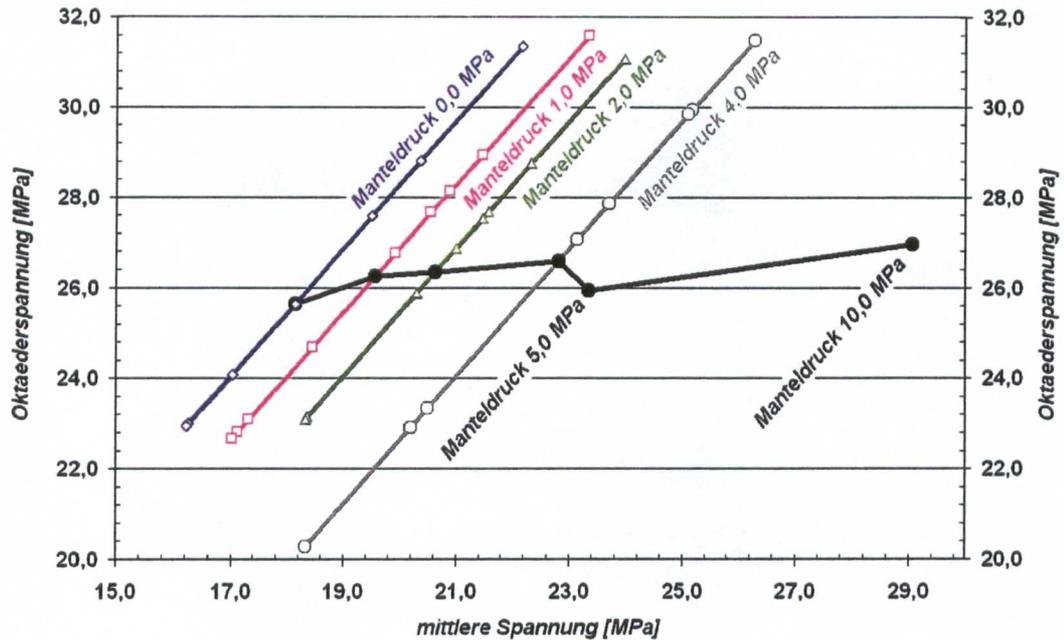


Abbildung 4.4: Abhängigkeit der Oktaederspannung im Bruchzustand von der mittleren Spannung. Die Mittelwerte der Messresultate sind durch die schwarze Linie mit schwarzen Punkten gekennzeichnet.

Die Daten erlauben eine Bestimmung der Festigkeitsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung nach Mohr-Coulomb (vgl. /18/). Bei der Herleitung wird zunächst für die einzelnen Messserien die Abhängigkeit der triaxialen Druckfestigkeit σ_1 vom Manteldruck σ_3 gemäß Gl. (4.4) ermittelt. Bei dieser Geradengleichung entspricht a der Steigung und d dem y-Achsenabschnitt. Kohäsion C und der Winkel der inneren Reibung ϕ ergeben sich anschließend nach Gl. (4.5) und Gl. (4.6):

$$\sigma_1 = a \cdot \sigma_3 + d \tag{4.4}$$

$$\phi = \arcsin [(a - 1) / (a + 1)] \tag{4.5}$$

$$C = [d \cdot (1 - \sin \phi)] / (2 \cdot \cos \phi) \tag{4.6}$$

Die ermittelten Werte sind angegeben in Tabelle 4.8.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNA A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Tabelle 4.8: Einaxiale und triaxiale Druckfestigkeit sowie die Festigkeitsparameter Kohäsion C und Winkel der inneren Reibung ϕ nach Mohr-Coulomb.

Manteldruck (σ_3)	0,0	1,0	2,0	4,0	C	ϕ
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
Einaxiale und triaxiale Druckfestigkeit	51,1	49,1	51,0	47,0	25,6	0,0
	48,7	49,4	51,1	52,6	24,1	0,6
	48,8	50,0	51,0	53,5	22,5	4,5
	54,4	57,8	60,7	67,5	15,1	32,0
	58,5	59,7	59,0	61,4	29,3	0,0
	58,5	60,7	63,0	67,3	19,7	22,0
	61,1	62,4	60,4	63,1	30,5	0,0
66,5	68,0	67,9	70,8	32,8	0,8	

4.5 Kompaktionsvermögen unter triaxialer Einspannung (Ersatzkompaktionsmodul)

Zur Ermittlung des Kompaktionsvermögens vom Baustoff wurden triaxiale Kompaktions- und Kriechversuche unter isotropen (hydrostatischen) Bedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Kompaktions- und Kriechversuche wurden nach der in Anhang 1 dargestellten Verfahrensbeschreibung kombiniert.

Geprüft wurden im Labor hergestellte Probekörper, Rückstellproben der Baustoffproduktion, auch als baubegleitend hergestellte Probekörper bezeichnet und in einigen Fällen Bohrkerne von Bauwerken in der SchachanlageASSE. Die Probekörper lagerten > 56 Tage bei Raumtemperatur und wurden im Labor trocken zu zylindrischen Probekörpern präpariert. Verwendet wurden im Falle der Kompaktionsversuche Zylinder mit einer Höhe von 192 mm und einem Durchmesser von 96 mm sowie bei den Kriechversuchen Zylinder einer Höhe von 80 mm und einem Durchmesser von 40 mm. Das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser betrug somit einheitlich 2,0.

Die Kompaktionsversuche erfolgten bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,1 MPa/s. Die Kriechversuche dauerten mindestens 42 Tage. Die Resultate wurden auf eine Verformungsrate von 10^{-10} s^{-1} extrapoliert. Bei beiden Prüfungen wurden die Verformungen für hydrostatische Spannungen von 1,0 MPa, 2,0 MPa und 5,0 MPa ermittelt. Die Gesamtvolumenverformung für die einzelnen hydrostatischen Spannungen (σ_{hyd}) ergibt sich als Summe der Volumenverformungen (ϵ_v) der Kompaktions- und Kriechversuche.

Aus der Gesamtvolumenverformung wird entsprechend Anhang 2 der sogenannte Ersatzkompaktionsmodul (Steifigkeitsniveau, K_E) abgeleitet, der das Kompaktionsvermögen des Baustoffs bei hydrostatischer Einspannung in den eigenen Porenraum charakterisiert. Einen Überblick

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

über die bisher bestimmten Messresultate verschafft Tabelle 4.9 /19/. Aufgrund der einheitlichen Lagerungsbedingungen und der vergleichbaren Prüfergebnisse wurde in der Tabelle nicht zwischen den Bauwerksproben und den im Labor hergestellten Probekörpern unterschieden.

Tabelle 4.9: Gesamtvolumenverformung (ϵ_v) in Prozent und Ersatzkompaktionsmodul (K_E) in GPa bei hydrostatischen Spannungen (σ_{hyd}) von 1,0 MPa, 2,0 MPa und 5,0 MPa.

	$\sigma_{hyd} = 1,0 \text{ MPa}$		$\sigma_{hyd} = 2,0 \text{ MPa}$		$\sigma_{hyd} = 5,0 \text{ MPa}$	
	ϵ_v	K_E	ϵ_v	K_E	ϵ_v	K_E
	[%]	[GPa]	[%]	[GPa]	[%]	[GPa]
Maximalwert	0,19	2,6	0,32	2,2	0,70	2,9
Mittelwert	0,11	1,1	0,18	1,3	0,34	1,7
Minimalwert	0,04	0,5	0,09	0,6	0,17	0,7
Standardabweichung	0,04	0,5	0,06	0,4	0,14	0,5

4.6 Spalt- und Biegezugfestigkeit

Bei Spaltzugverfahren werden Probekörper einem zunehmenden Druck ausgesetzt, so dass Zugspannungen senkrecht zur Druckspannung entstehen. Die Zugfestigkeit der Probekörper wird somit indirekt bestimmt.

Die Spaltzugfestigkeit wurde nach DIN 12390-6 /20/ (vgl. /10/, Abschnitt 7.4) an zylindrischen Probekörpern bestimmt, die in der Schachanlage Asse begleitend zur Bauwerkserstellung hergestellt, anschließend unter Tage gelagert und im Labor trocken präpariert wurden. Geprüft wurden Probekörper mit einem Alter von 31 Tagen bis 327 Tagen. Die Spaltzugfestigkeiten lagen zwischen 3,18 MPa und 6,92 MPa bei einem Mittelwert von 4,92 MPa und sind in Abhängigkeit des Probekörperalters in Abbildung 4.5 dargestellt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A			ÄJ			GH	BY	0005	00

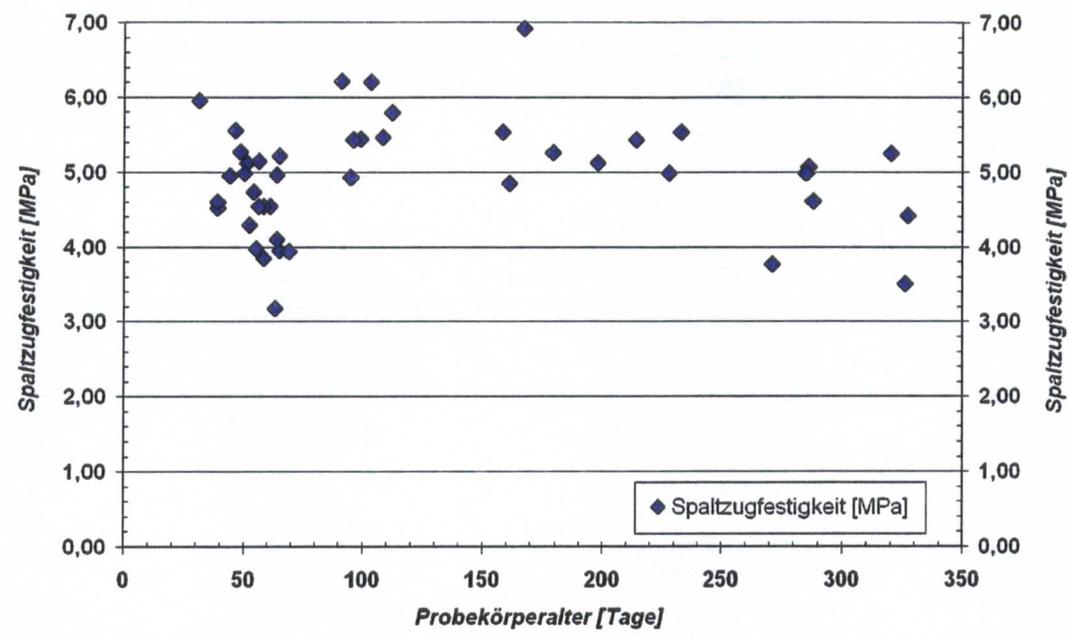


Abbildung 4.5: Spaltzugfestigkeit baubegleitend hergestellter Probekörper in Abhängigkeit des Probekörperalters.

Die Biegezugfestigkeit bezeichnet die maximal aufnehmbare Spannung eines Probekörpers auf Biegung. Sie wurde nach DIN 1048-5, Abschnitt 7.3 /10/ (vgl. /21/, Zweipunkt-Lasteintragung) an prismatischen Probekörpern (Kantenlänge 40 · 40 · 160 mm) ermittelt, die 7 Tage bzw. 28 Tage luftdicht versiegelt lagerten.

Nach 7 Tagen variierte die Biegezugfestigkeit zwischen 7,15 MPa und 8,14 MPa. Der Mittelwert betrug 7,70 MPa. Nach 28 Tagen lagen die Messwerte zwischen 9,37 MPa und 11,0 MPa, bei einem Mittelwert von 10,3 MPa.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

4.7 Direkte bzw. einaxiale Zugfestigkeit

Die direkte Zugfestigkeit wurde mit dem modifizierten Zugversuch („Modified Tension Test“, MTT) ermittelt /22–25/. Hergestellt wurde von einer Mischung ein einzelner Probekörper (Indexversuch) sowie aus Bohrkernen eines Bauwerks eine Serie, die 6 Probekörper umfasste. Das Alter der Probekörper betrug mindestens 28 Tage. Die von den Endseiten der Zylinder ausgehenden Ringspalte hatten einen Innendurchmesser von 51 mm bzw. 99 mm. Die Zugspannungen im Baustoff entstehen im Bereich der sich überlappenden Ringspalte (überbohrter Bereich) bei der Druckbelastung auf den Zylinder des kleineren Spaltes. Die Probekörper wurden verformungsgeregelt mit einer Geschwindigkeit von $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s bis $2,0 \cdot 10^{-9}$ m/s belastet. Die Versuchszeit bis zum Versagen betrug maximal 5 Minuten. Die Messresultate fasst Tabelle 4.10 zusammen. Der Durchschnittswert sämtlicher Messresultate beträgt 4,6 MPa, bei einer Standardabweichung von 0,5 MPa.

Tabelle 4.10: Messresultate zur direkten Zugfestigkeit („Modified Tension Test“). Sämtliche Angaben in MPa.

	Indexversuch	Probekörperserie	
Einzelmesswerte	3,7	4,2	5,1
		4,5	5,1
		4,6	5,1
Mittelwert	3,7	4,8	

Die Bestimmung der zentrischen oder einaxialen Zugfestigkeit erfolgte an Probekörpern, die in der SchachanlageASSE baubegleitend hergestellt wurden. Die befüllten Kunststoffrohre lagerten bis zur weiteren Präparation im Probenmagazin unter Tage. Die Prüfungen erfolgten bei Probekörperaltern von rund 32 Tagen gemäß Vorgaben des DAfStb /14/. Die Zylinder wurden an Lasteintragungsplatten geklebt und parallel zur Längserstreckung auf Zug beansprucht. Gemessen wurden einaxiale Zugfestigkeiten von 1,97 MPa, 2,48 MPa und 2,67 MPa, so dass sich im Durchschnitt ein Wert von 2,37 MPa ergibt und eine Standardabweichung von 0,36 MPa.

In Bezug auf die niedrigeren Werte der zentrischen oder einaxialen Zugfestigkeit ist festzustellen, dass eine unzureichende Klebwirkung der Lasteintragungsplatten auf den Probekörpern vorlag. Daher wird in der Regel das oben beschriebene MTT-Verfahren eingesetzt, bei dem nicht die Notwendigkeit besteht, die Probekörper zu kleben.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AAANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

4.8 Quellen

Das Quellen ist eine lastunabhängige Verformung des Baustoffs und wurde unter Labor- und In-situ-Bedingungen ermittelt.

Labormessungen erfolgten unter konstanten Umgebungsbedingungen (Luftfeuchtigkeit, Temperatur) nach DIN 52450 /26/ (vgl. /27/). Die Prismen wurden nach 24 Stunden ausgeschalt, um sie danach bei 30 °C und 40 % relativer Luftfeuchtigkeit zu lagern. Die manuell gemessenen Abstandsänderungen der Messkegel normiert auf eine Weglänge von 1 m (Quellmaße) sowie die berechneten Mittelwerte der Quellmaße fasst Tabelle 4.11 zusammen.

Tabelle 4.11: Quellmaß nach DIN 52450 in mm/m (‰) in Abhängigkeit des Probekörperalters (Tage, d). Lagerung der Probekörper bei 30 °C und 40 % relative Luftfeuchtigkeit.

Probekörperalter	1,5 d	2,5 d	3 d	6 d	65 d	71 d	143 d
Einzel- messwerte	0,40	0,47	0,47	0,60	0,94	0,93	–
	0,39	0,47	0,33	0,45	0,69	0,69	0,66
	0,38	0,45	0,29	0,49	0,72	0,71	0,67
Mittelwert	0,39	0,46	0,37	0,52	0,78	0,78	0,67

Für weitere Messungen des Quellmaßes (autogenes Quellen) wurde frisch angemischter Baustoff in zylindrische Schalkkörper gegossen und die Verformung der Probekörper durch axial messende Weggeber elektronisch registriert. Es erfolgte eine Doppelbestimmung bei 20 °C. Tabelle 4.12 gibt die Quellmaße für die Zeitabschnitte an, nach denen die Prüferserie nach DIN 52450 /26/ untersucht wurde sowie für ein Probekörperalter von 208 Tagen. Das Probekörperalter ist bei diesem Verfahren identisch mit der Dauer der Messungen. Abbildung 4.7 zeigt den gesamten zeitlichen Verlauf der Quellmaße. Bei einem weiteren Indexversuch wurde an einem im Labor hergestellten Prisma ein Quellmaß von 2,0 mm/m festgestellt.

Tabelle 4.12: Quellmaß nach DIN 52450 in mm/m (‰) in Abhängigkeit des Probekörperalters (Tage, d). Lagerung der Probekörper in geschlossenen Formen bei 20 °C.

Probekörperalter	1,5 d	2,5 d	3 d	6 d	65 d	71 d	143 d	208 d
Einzel- messwerte	1,27	1,68	1,78	2,16	5,54	5,75	7,24	7,76
	2,36	2,90	3,03	3,54	7,77	7,92	8,95	9,24
Mittelwert	1,82	2,29	2,41	2,85	6,66	6,84	8,10	8,50

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNA A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	NN
A			AJ			GH	BY	0005	00

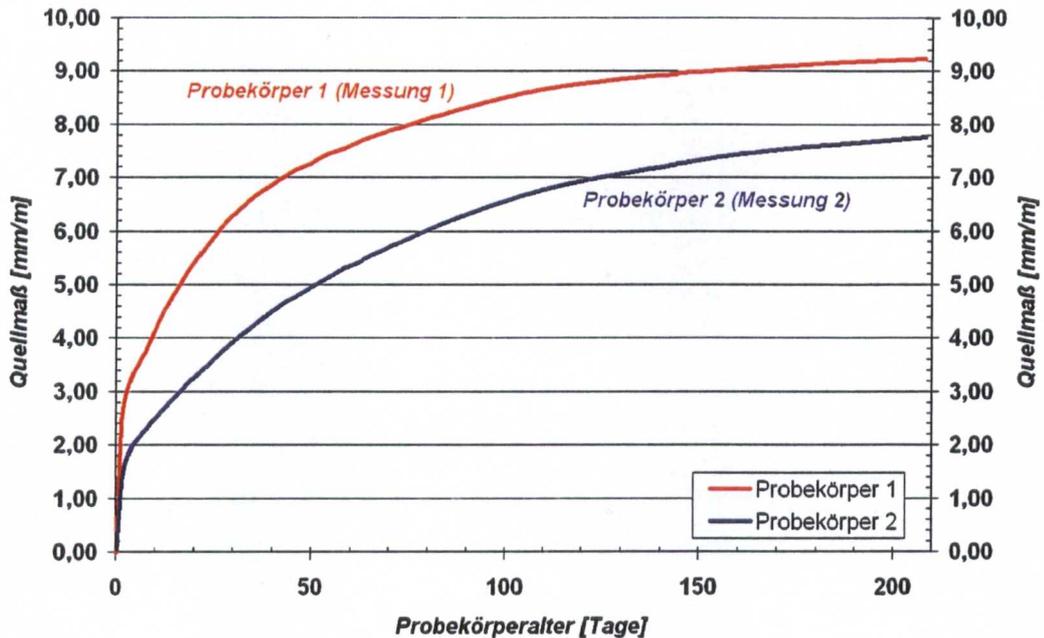


Abbildung 4.6: Quellmaß von Probekörpern, die bei 20 °C lagerten, in Abhängigkeit des Probekörperalters.

Unter In-situ-Bedingungen wurde das Quellen des Baustoffs qualitativ an zylindrischen Probekörpern und quantitativ an einem quaderförmigen Widerlagerbauwerk ermittelt.

Das quaderförmige Widerlagerbauwerk wurde auf der 775-m-Sohle der Schachanlage Asse in der Begleitstrecke zur 2. südlichen Richtstrecke nach Westen errichtet. Das Bauwerk bestand aus 3 Schalungen; an einer Seite sowie auf der Sohle bestand ein Kontakt mit dem Steinsalzgebirge. Drei Extensometer waren parallel zu den Begrenzungen des Widerlagerbauwerkes und mittig zu den Seitenflächen und zur Grundfläche des Bauwerkes sowie senkrecht zueinander angeordnet. Die Längen der Messstrecken betragen 2,55 m (Extensometer 1), 1,00 m (Extensometer 2) und 1,65 m (Extensometer 3) Zusätzlich wurde die Baustofftemperatur registriert. Die Baustoffsuspension wurde auf der 750-m-Sohle angemischt. In das Widerlagerbauwerk floss sie bei visuell vernachlässigbarem Ausbreitwinkel. Abbildung 4.7 zeigt das Bauwerk mit den Extensometern vor und während dem Befüllen mit Suspension.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
Ä			ÄJ			GH	BY	0005	00	

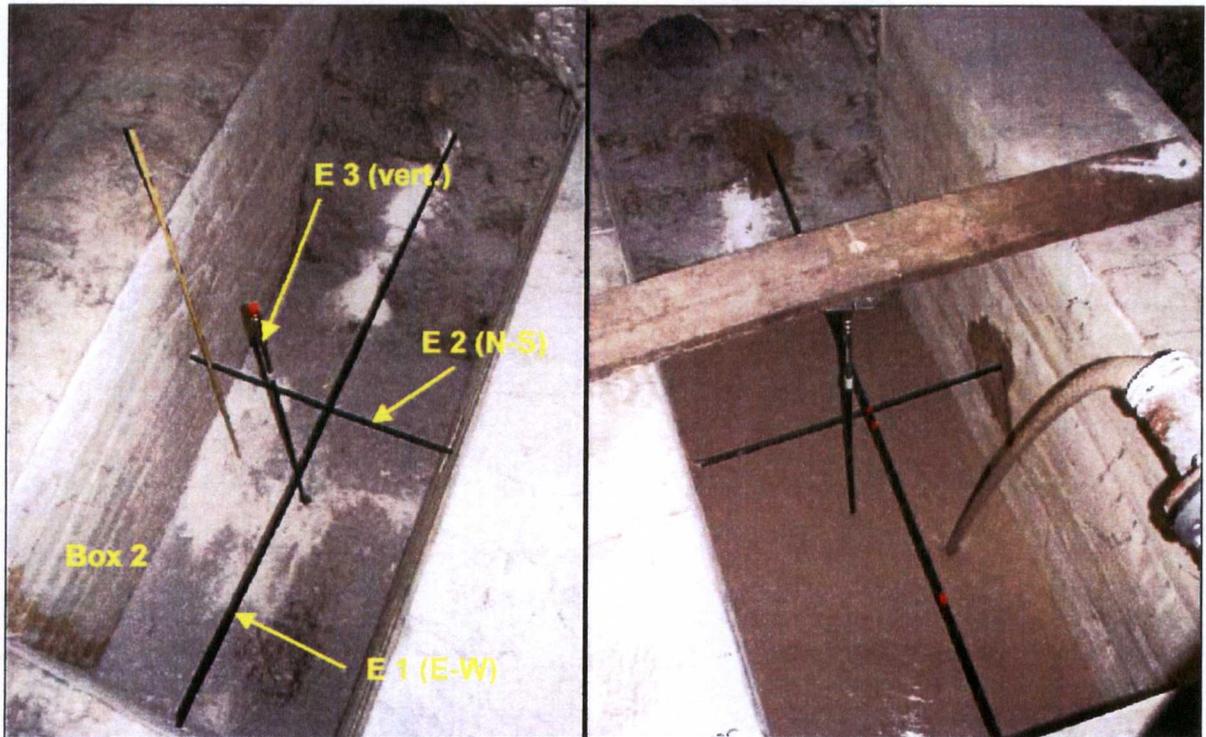


Abbildung 4.7: Widerlagerbauwerk zur Ermittlung des Baustoffquellens unter In-situ-Bedingungen vor und während des Befüllens mit Suspension. Die parallel zu den Begrenzungen des Widerlagerbauwerkes und senkrecht zueinander angeordneten Kunststoffanker-Extensometer sind mit E1, E2 und E3 bezeichnet. Das Thermoelement zur Registrierung der Baustofftemperatur wurde am Kreuzungspunkt der Extensometer E1 und E3 befestigt. Am oberen Bildrand ist der Steinsalzstoß erkennbar.

Die Probekörper zeigten auch bei trockenem Grubenklima ein verbleibendes Quellmaß. Die Messdaten des Widerlagerbauwerkes sind dargestellt in Abbildung 4.8. Abbildung 4.9 zeigt die Resultate normiert auf den jeweiligen Maximalwert der Messreihen bis zu einer Zeitdauer der Messungen von 700 Stunden. Das Quellen ist insbesondere aus dem Anstieg der Quellmaße während der Temperaturabnahme des Baustoffs ersichtlich. Befunde weiterer In-situ-Bauwerke bestätigen die am Widerlagerbauwerk gewonnenen Untersuchungsergebnisse.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

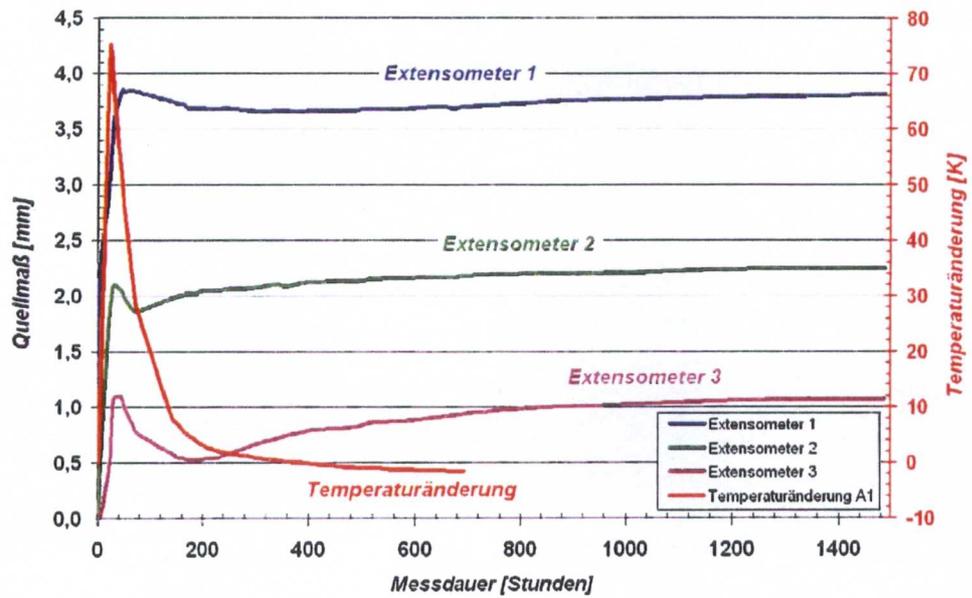


Abbildung 4.8: Resultate der Extensometermessungen sowie Änderung der Baustofftemperatur nach dem Füllen der Widerlagerbox.

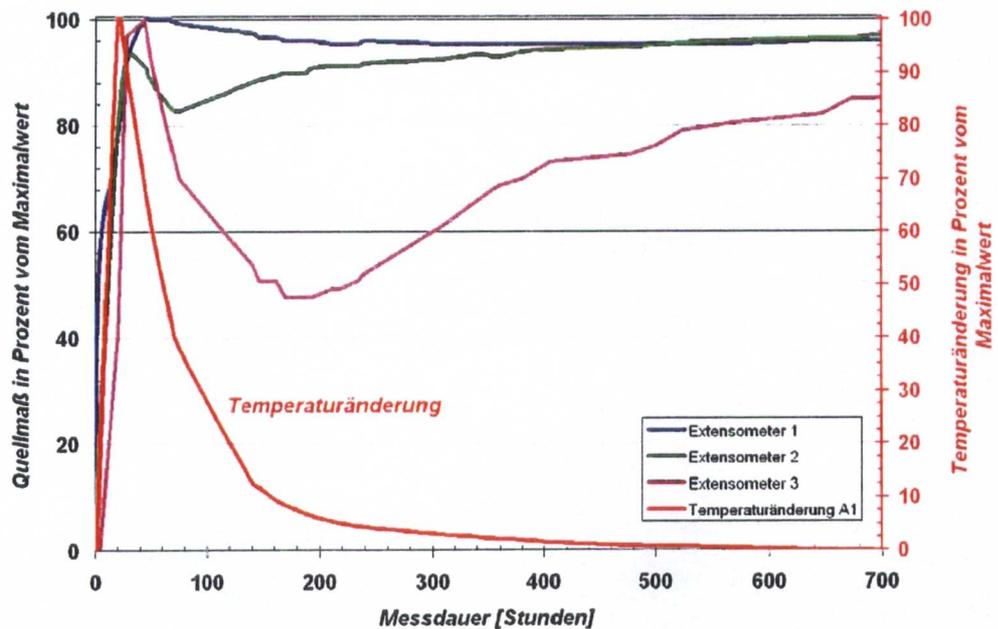


Abbildung 4.9: Resultate der Extensometermessungen sowie Änderung der Baustofftemperatur nach dem Füllen der Widerlagerbox jeweils normiert auf den ermittelten Maximalwert.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AAANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

4.9 Porosität

Die Gesamtporosität (auch totale Porosität) ist das Verhältnis (als Anteil in Prozent) zwischen dem Volumen der Poren (offene und eingeschlossene) und dem Rohvolumen des Probekörpers. Die Messungen erfolgten in Anlehnung an DIN EN 1936 /28/ (Pyknometerverfahren), wobei berücksichtigt wurde, dass der Salzgehalt der Porenlösung während des Trocknens der Probekörper in den Baustoffporen als Salze verbleibt. Abweichend von der DIN EN 1936 wurden die Probekörper definierter Abmessung bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Die Werte für die Gesamtporosität betragen für Probekörper unverdichteter Suspensionen zwischen 16,1 Vol.-% und 23,6 Vol.-%, bei einem Mittelwert von 19,7 Vol.-% und einer Standardabweichung von 2,1 Vol.-%. Die Resultate verdichteten Baustoffs liegen mit 17,9 Vol.-% ± 0,9 Vol.-% im unteren Bereich dieser Bandbreite.

Ermittelt wurde neben der Gesamtporosität auch die durchströmbare oder offene Porosität des Baustoffs, hier als effektive Porosität bezeichnet.

Messwerte zur durchströmbaren bzw. offenen Porosität, die hier nicht unterschieden werden, zeigt Tabelle 4.13. Der Mittelwert beträgt 17,0 Vol.-% und die Standardabweichung 2,1 Vol.-%.

Tabelle 4.13: Effektive Porosität in Volumenanteilen in Prozent (Vol.-%).

12,3	15,8	17,0	19,0
15,4	16,1	17,9	19,4
15,6	16,6	18,0	20,8

4.10 Permeabilität

Die Permeabilität beschreibt den hydraulischen Widerstand eines Festkörpers definierter Abmessungen gegenüber Fluiden. Die Materialeigenschaften wurden bei instationärer Durchströmung im Labor und in einem Bauwerk unter In-situ-Bedingungen gemessen.

Im Labor kam die Zwei-Kammer-Methode zum Einsatz (vgl. Abbildung 4.10). Bei diesem Verfahren wird der Probekörper in eine Druckzelle eingebaut. Die Endflächen des Zylinders sind mit Druckbehältern definierten Volumens verbunden, die mit einem Gas, das nicht sorbiert wird, oder einer entgasten Flüssigkeit befüllt sind. Der Druck des Strömungsfluids in der sog. Eingangskammer (Startdruck p_E) ist höher als der Druck in der Ausgangskammer (Startdruck p_A). Nach dem Öffnen der Kammern liegt somit an den Endflächen des Zylinders ein Druckgefälle an. Der zeitliche Verlauf des Druckausgleichs ist ein Maß für die Permeabilität. Ein Manteldruck auf die den Probekörper umhüllende Gummimanschette verhindert ein Umströmen und ermöglicht Messungen in Abhängigkeit der Druckeinspannung.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

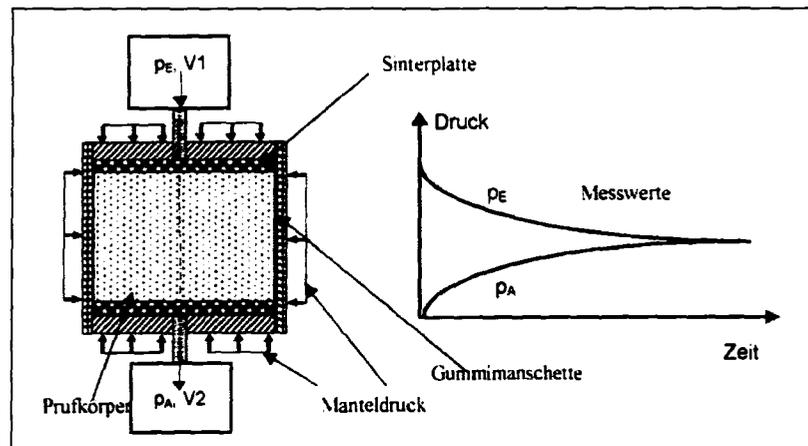


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung der Zwei-Kammer-Methode. In Folge der Probekörperpermeabilität sinkt der Druck in der Eingangskammer V1 und steigt der Druck in der Ausgangskammer V2 an.

Die Probekörper wurden im Labor durch Füllen von Formen mit frisch angemischter Suspension hergestellt. Des Weiteren wurden in der Schachtanlage Asse baubegleitend Kunststoffrohre befüllt, die unter Tage gelagert wurden. Die Präparation für die Messung erfolgte trocken im Labor (Erhärtungszeit > 56 Tage). Die endbearbeiteten Probekörper hatten einen Durchmesser und eine Höhe von 50 mm und wurden zunächst bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet (vgl. /29,30/). Nach der Messung der Gaspermeabilität erfolgte das Aufsättigen mit hochkonzentrierter $MgCl_2$ -Lösung und abschließend die Bestimmung der Lösungspermeabilität. Als Strömungsfluide wurden Stickstoff (Gaspermeabilität) bzw. hochkonzentrierte $MgCl_2$ -Lösung (Lösungspermeabilität) eingesetzt.

In-situ-Untersuchungen erfolgten am Bauwerk BW-K2C-750-1 sowie ergänzend an der Pilotströmungsbarriere PSB A1. Das Bauwerk BW-K2C-750-1 wurde in der Schachtanlage Asse auf der 750-m-Sohle im 3. westlichen Querschlag errichtet. Die PSB A1 befindet sich auf der 950-m-Sohle in der südlichen Dammbaustrecke. Diese Lokalität schließt Staßfurt-Steinsalz auf.

Im Folgenden werden im Detail die Befunde des Bauwerks BW-K2C-750-1 dargestellt. Die Resultate der ergänzenden Untersuchungen an der PSB A1 bestätigen diese Messungen. Am Bauwerk BW-K2C-750-1 wurde die Gaspermeabilität in 5 Vollbohrungen mit einem Durchmesser von 42 mm bestimmt. 3 dieser Bohrungen sind axial zum Bauwerk ausgerichtet. 2 Bohrungen wurden von der senkrecht zum 3. Querschlag verlaufenden Strecke abgeteuft und durchstoßen das Bauwerk von der Seite aus. Für die Gasdruckmessungen wurden 2-fach- und 4-fach-Packersysteme eingesetzt. Des Weiteren kamen zur Messung integraler Permeabilitäten Abschlusspacker zum Einsatz. Die Prüfraumlänge lag demnach im Dezimeterbereich (4-fach-Packer) oder betrug rund 1 m (2-fach-Packer) bzw. mehrere Meter (Abschlusspacker).

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Gaspermeabilität

In Folge des Trocknens war der Porenraum von den im Labor geprüften Probekörpern weitgehend vollständig mit Gas gesättigt. Ermittelt wurden daher absolute Gaspermeabilitäten. Bei einem initialen Druck des Strömungsfluids von 0,6 MPa und einem Manteldruck von 1,1 MPa lagen die Werte zwischen $8,6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $4,2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Der Mittelwert beträgt $1,8 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$.

Beim Bauwerk BW-K2C-750-1 ist der Porenraum des Sorelbetons aufgrund des Auftretens von Porenlösung nur teilweise mit Gas gesättigt. Die ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten lagen zwischen $7,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ - $1,2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$, bei einem Mittelwert von rund $4,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$.

Die effektiven sind im Vergleich zu den absoluten Gaspermeabilitäten niedriger, da bei vergleichbarem Druckregime die Permeabilität mit zunehmender Porenraumsättigung abnimmt.

Lösungspermeabilität

Die Untersuchungen mit Lösung erfolgten bei unterschiedlichem Manteldruck und initialem Strömungsdruck. Die Resultate fasst Tabelle 4.14 zusammen, wobei für eine Reihe an Probekörpern, die bei einem Manteldruck von 1,1 MPa geprüft wurden der Maximal-, Mittel- und Minimalwert aufgeführt ist. Des Weiteren ist in der Tabelle 4.14 die effektive Spannung als Differenz des Manteldrucks und des initialen Strömungsdrucks angegeben. Bei einem Manteldruck von 2,5 MPa erfolgte bei Strömungsdrücken von 0,9 MPa, 1,1 MPa und 2,1 MPa jeweils eine Einzelmessung. Die Resultate dieser Einzelmessungen liegen in der Bandbreite der Resultate für einen Manteldruck von 1,1 MPa. Unabhängig vom Mantel- und Strömungsdruck sowie der effektiven Spannung kann damit ein Permeabilitätsbereich von $1,0 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bis $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ angegeben werden.

Tabelle 4.14: Resultate zur Lösungspermeabilität (hochkonzentrierte MgCl₂-Lösung).

Manteldruck	[MPa]	1,1	2,5	2,5	2,5
Strömungsdruck	[MPa]	0,6	0,9	1,1	2,1
Effektive Spannung	[MPa]	0,5	1,6	1,4	0,4
Maximalwert	[m ²]	$1,6 \cdot 10^{-19}$			
Mittelwert	[m ²]	$5,4 \cdot 10^{-20}$	$5,4 \cdot 10^{-20}$	$1,2 \cdot 10^{-20}$	$1,6 \cdot 10^{-20}$
Minimalwert	[m ²]	$1,0 \cdot 10^{-20}$			

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	JA	Lfd.Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Gaseindringdruck

Der Gaseindringdruck ist der zur Verdrängung der Porenflüssigkeit im Probekörper erforderliche Mindestdruck eines Gases. Er entspricht dem Kapillardruck der größten Poren im Material.

Die Untersuchungen erfolgten an drei gesättigten Proben (hochkonzentrierte MgCl₂-Lösung), die mindestens 28 Tage lagerten. In Analogie zu den Messungen der Gaspermeabilität betrug der Manteldruck auf die Probekörper 1,1 MPa. Im Verlauf der Bestimmungen wird der Gasdruck stufenweise erhöht.

Das Eindringen von Gas wurde festgestellt bei 1,2 MPa, 2,4 MPa und 3,0 MPa. Diese Werte sind sehr hoch. Erfahrungen an Sorelbetonen weisen auf einen eher niedrigeren Gaseindringdruck in der Größenordnung von 0,3 MPa hin.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

5 Untersuchung thermischer Materialeigenschaften

Als thermische Materialeigenschaften werden im Folgenden die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Temperaturerhöhung beim Erhärten zusammengefasst. Abschließend werden Untersuchungen zur Ermittlung des Wärmeausdehnungskoeffizienten beschrieben. Kenntnisse zu den thermischen Materialeigenschaften sind beispielsweise für einen rechnerischen Nachweis der Rissbeschränkung bei thermischer Kontraktion eines Bauwerks erforderlich.

5.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt den Wärmestrom an, der unter der Wirkung eines Temperaturgefälles eine Fläche in Richtung der Flächennormale durchströmt. Die Messungen erfolgten an planparallel geschliffenen Scheiben mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von rund 30 mm, die aus einem Zylinder trocken herausgesägt wurden. Sie lagerten ca. 65 Tage unter isothermen Bedingungen (40 °C und 60 °C).

Zum Einsatz kam ein Heizplattengerät nach DIN 52612-1 /31/. Bei einer Temperaturdifferenz von ca. 10 K, der die Proben zwischen den Messplatten ausgesetzt waren, lagen die Probenmitteltemperaturen zwischen ca. 15 °C und 25 °C. Beim Probekörper, der bei 40 °C getrocknet wurde, betrug die Wärmeleitfähigkeit 1,90 W/(m·K). Der bei 60 °C getrocknete Probekörper kam auf eine Wärmeleitfähigkeit von 2,22 W/(m·K).

5.2 Spezifische Wärmekapazität

Die Wärmekapazität ist die Wärmemenge, die von der Prüfsubstanz bei einer Temperaturzunahme aufgenommen wird. Die spezifische Wärmekapazität c_p kann aus den Massenanteilen der Baustoffbestandteile und deren Wärmekapazitäten berechnet werden. Für die frisch angemischte Suspension der Rezeptur A1 gilt Gl. (5.1)

$$c_p \text{ [J/kg·K]} = (c_{MgO} \cdot 0,113) + (c_{STS} \cdot 0,637) + (c_{MGL} \cdot 0,250) \quad (5.1)$$

mit c_{MgO} : spezifische Wärmekapazität Magnesiumoxid,
 c_{STS} : spezifische Wärmekapazität Steinsalz und
 c_{MGL} : spezifische Wärmekapazität Anmischlösung.

Die Bestimmungen der spezifischen Wärmekapazität des erhärteten Baustoffs erfolgten mittels der dynamischen Differenzkalorimetrie in Anlehnung an DIN 51007 /32/ („Saphirmethode“). Die Messungen erfolgten an gemahlenden und bei 100 °C getrockneten Proben zwischen 20 °C und 90 °C. Die Auswertung der Messdaten folgte der Norm ASTM E1269-1 /33/.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Für die Suspension kann eine spezifische Wärmekapazität von 1,295 J/(g·K) berechnet werden. Nach den Messungen steigt die spezifische Wärmekapazität c_p des erhärteten und getrockneten Materials gemäß Gl. (5.2) mit der Temperatur T.

$$c_p = 976 \text{ J/(g·K)} + 0,89 \text{ J/(g·K}^2) \cdot T. \quad (5.2)$$

Bei 30 °C ist demnach eine Wärmemenge von 1,246 Joule erforderlich, um die Temperatur von einem Gramm des erhärteten Sorelbetons um 1 Kelvin zu erhöhen. Die Werte zeigen ebenso, dass die spezifische Wärmekapazität im Verlauf der Baustoffhärtung geringfügig sinkt.

5.3 Temperaturerhöhung beim Erhärten

Die chemischen Reaktionen des Magnesiumoxids mit MgCl₂-Lösung sind exotherm. Die daraus resultierende Temperaturerhöhung des Baustoffs wurde im Labor unter adiabatischen und in der SchachanlageASSE unter quasiadiabatischen Bedingungen gemessen.

Adiabatische Temperaturerhöhung

Die Ausgangsstoffe und die Mischtrommel wurden bei rund 30 °C gelagert. Der frische Baustoff wurde nach der Zugabe sämtlicher Ausgangsstoffe in den Mischer 4 Minuten homogenisiert.

Der Aufbau des Kalorimeters entsprach im Wesentlichen dem vom Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, herausgegebenen „Vorläufigen Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter“ /34/.

Bei einer Starttemperatur von 30,6 °C wurde ein Temperaturanstieg um 76,0 K gemessen und bei einer weiteren Messung, die bei 31,0 °C gestartet wurde, eine Temperaturerhöhung um 81,1 K.

Ergänzende Untersuchungen ergaben, dass der Temperaturanstieg sinkt, wenn der Steinsalzanteil der Rezeptur erhöht wird.

Quasiadiabatische Temperaturerhöhung

Das quasiadiabatische Kalorimeter besteht aus einem mit Polystyrolextruderschäum ausgefüllten Isolierbehälter, das eine Höhe von 71 cm und einen Durchmesser von 40 cm hat. Der frische Baustoff wird in ein KG-Rohr (DN 110 x 3,2) gefüllt, das axial in der Mitte des Isolierbehälters platziert ist. Nach dem Eintauchen des Temperatursensors in den Baustoff wird der Isolierbehälter mit einem Deckel verschlossen und der Sensor mit einer Datenaufzeichnungseinheit verbunden.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Die Messungen wurden baubegleitend durchgeführt. Eine repräsentative Auswahl an Messresultaten zeigt die Tabelle 5.1. In Abbildung 5.1 sind die registrierten Temperaturerhöhungen in Abhängigkeit der Messzeit dargestellt. Demnach steigt die Temperatur des Baustoffs bei Starttemperaturen zwischen 28,3 °C und 37,1 °C zwischen 41,2 K (Messung 5) und 58,1 K (Messung 6). Ein deutlicher Temperaturanstieg tritt nach einer Messzeit von etwa 6 bis 8 Stunden auf. Nach 15 bis 20 Stunden erreichten die Mischungen das Temperaturmaximum.

Messung	Starttemperatur	Maximale Messtemperatur	Temperaturerhöhung
1	28,3 °C	74,6 °C	46,3 °C (K)
2	30,5 °C	85,7 °C	55,2 °C (K)
3	31,1 °C	81,7 °C	50,6 °C (K)
4	31,4 °C	84,4 °C	53,0 °C (K)
5	33,9 °C	75,1 °C	41,2 °C (K)
6	34,4 °C	92,5 °C	58,1 °C (K)
7	37,1 °C	86,1 °C	49,0 °C (K)
8	37,1 °C	86,4 °C	49,3 °C (K)

Tabelle 5.1: Messdaten zur quasiadiabatischen Temperaturerhöhung des Sorelbetons A1: Starttemperatur sowie maximale Messtemperatur und daraus hergeleitete Temperaturerhöhung.

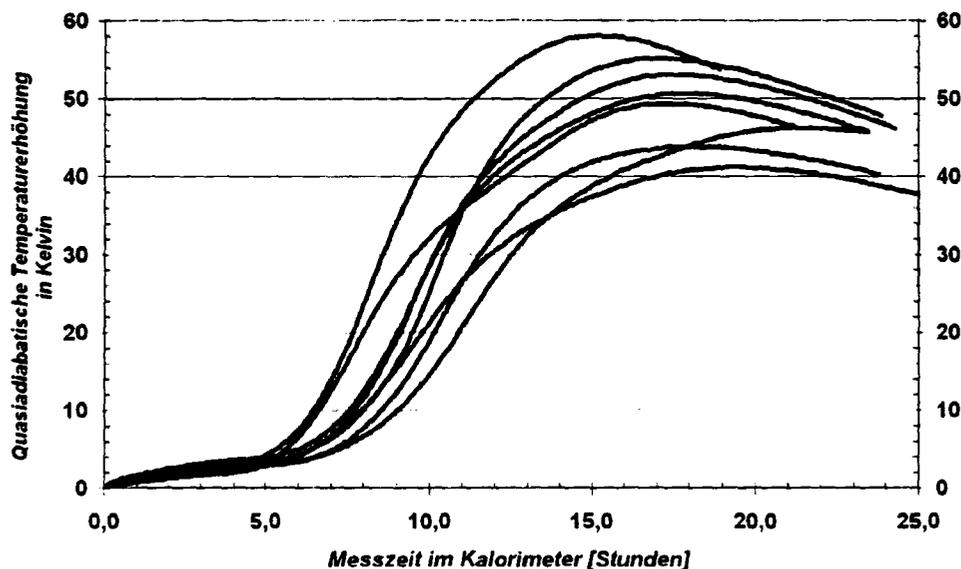


Abbildung 5.1: Messungen der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung von Sorelbeton A1.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Die quasiadiabatischen Messwerte wurden korrigiert unter der Annahme, dass die lineare Temperaturabnahme zum Ende der Messungen den Wärmeverlust des Messsystems widerspiegelt. Zusätzlich wurde eine lineare Abhängigkeit des Wärmeverlustes von der Temperaturerhöhung berücksichtigt. Die korrigierten Temperaturerhöhungen und resultierenden Endtemperaturen sind dargestellt in Tabelle 5.2. Abbildung 5.2 zeigt, in Analogie zu den adiabatischen Kalorimetermessungen, zeitlich konstante Endtemperaturen. Die Temperaturerhöhungen liegen zwischen 66,8 K und 85,1 K.

Messung	Starttemperatur	Endtemperatur	Temperaturerhöhung
1	28,3 °C	99,8 °C	71,5 °C (K)
2	30,5 °C	112,6 °C	82,1 °C (K)
3	31,1 °C	107,7 °C	76,6 °C (K)
4	31,4 °C	112,0 °C	80,6 °C (K)
5	33,9 °C	100,7 °C	66,8 °C (K)
6	34,4 °C	119,5 °C	85,1 °C (K)
7	37,1 °C	106,4 °C	69,3 °C (K)
8	37,1 °C	110,1 °C	73,0 °C (K)

Tabelle 5.2: Messdaten zur quasiadiabatischen Temperaturerhöhung des Sorelbetons A1: Starttemperatur sowie durch Korrektur des Wärmeverlustes abgeschätzte Endtemperatur und Temperaturerhöhung beim Erhärten.

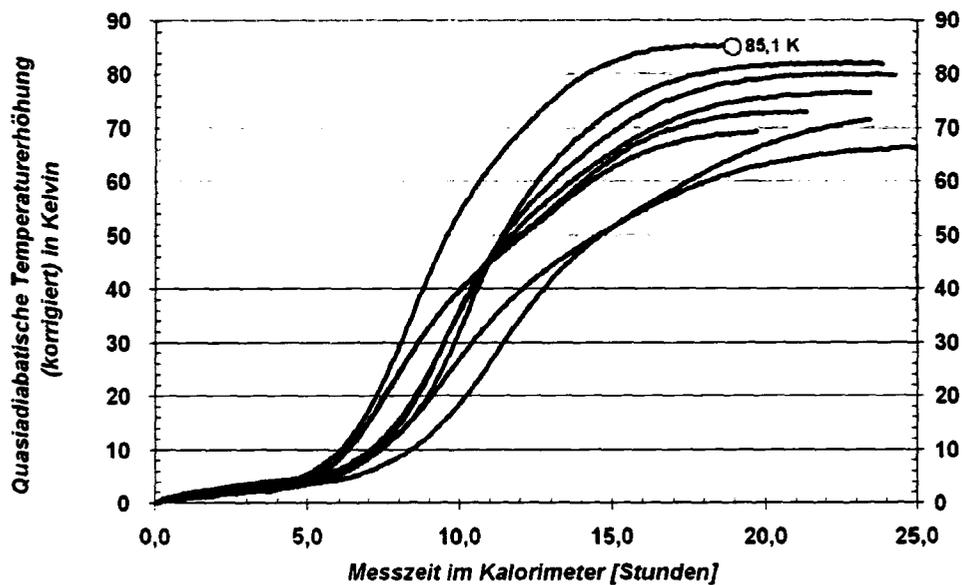


Abbildung 5.2: Messungen der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung von Sorelbeton A1 korrigiert um den Wärmeverlust des Messsystems.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

5.4 Wärmeausdehnungskoeffizient

Für die Untersuchungen wurden 6 Prismen mit einer Kantenlänge der Grundfläche von 40 mm und einer Länge von 160 mm hergestellt und über 28 Tage luftdicht verpackt bei 30 °C gelagert. Vor Beginn der Messungen wurden die Prismen ein Tag auf 20 °C temperiert. Die Messungen erfolgten nach DIN 51045 /35/, d.h., dass der Abstand von Messmarken der Prismen bei definierten Temperaturstufen ermittelt wurde. Die Messungen erfolgten bei 20 °C, 60 °C und nach dem Abkühlen der Prismen auf 20 °C. Bei 3 Prismen erfolgten zusätzlich Messungen bei 90 °C, bevor die Temperatur der Prismen auf 20 °C gesenkt wurde.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient α beträgt zwischen 20 °C und 60 °C als Durchschnitt der einzelnen Messresultate $34 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ und zwischen 20 °C und 90 °C $31 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

6 Zusammenfassung

Auf der Grundlage umfangreicher Untersuchungen unterschiedlicher Baustoffe wurde der Sorelbeton A1 als geeignete Rezeptur zum Erstellen von Strömungsbarrieren, als stützender Versatz und zum Verfüllen von Resthohlräumen in der SchachanlageASSE ausgewählt. Die Rezeptur wird aus Magnesiumoxid (MgO) als Bindemittel, Steinsalz als Gesteinskörnung (Zuschlagstoff) und Magnesiumchlorid-Lösung (MgCl₂-Lösung) hergestellt. Zur Charakterisierung des Materialverhaltens des Sorelbetons erfolgten im Labor, in Technikumsbauwerken und unter In-situ-Bedingungen bei Anwendung anerkannter Prüfverfahren Untersuchungen am frischen und erhärteten Baustoff.

Rheologische Untersuchungen belegen, dass ein Suspensionstransport durch Rohrleitungen und Bohrungen möglich und der Baustoff im Sinne eines Fließbetons einsetzbar ist. Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen sowie ein signifikantes Baustoffbluten waren bei ruhenden Suspensionen nicht nachweisbar. Die Menge an Lösung, die aus dem frischen Baustoff drainieren kann, betrug bei der angewendeten Messmethodik unter Laborbedingungen rund 0,9 % der Baustoffmasse. Unter In-situ-Bedingungen sind solche Drainageeffekte beim Einbringen von Sorelbeton A1 auf durchlässigem Untergrund, wie z.B. Salzgrus, zu erwarten. Hier kommt es zur Durchfeuchtung, Kompaktion und Verfestigung der oberen, ca. 10 cm dicken Schicht des liegenden Versatzes. Die Kontaktflächen zwischen Sorelbeton und Gebirge weisen eine vergleichsweise hohe Festigkeit und Dichtigkeit auf.

Die Untersuchungen physikalischer Eigenschaften umfassten Dichtebestimmungen, Messungen im ein- und triaxialen Spannungszustand, zur autogenen Volumenverformung sowie die Untersuchung hydraulischer Eigenschaften. Die Probekörper hatten ein Alter zwischen 7 Tagen bis 350 Tagen. In Tabelle 6.1 sind die Befunde zusammenfassend dargestellt, für die kein funktionaler Zusammenhang berücksichtigt wird.

Die Dilatanz- und Bruchfestigkeit nehmen bei ansteigendem Manteldruck zu und nähern sich an. Für die Kohäsion und den Winkel der inneren Reibung wurden auf der Basis der triaxialen Druckfestigkeiten Werte zwischen 15,1 MPa und 32,8 MPa bzw. 0,0° und 32,0° berechnet.

Der Ersatzkompaktionsmodul beschreibt den Ausbauwiderstand des Materials gegen das durch Konvergenzprozesse aufkriechende Gebirge. Der Ersatzkompaktionsmodul wird aus dem Verhältnis der hydrostatischen Spannung zur Gesamtvolumenverformung berechnet. Er nimmt bei dem Sorelbeton A1 im Durchschnitt bei ansteigendem Manteldruck (σ_{hyd}) von 1,1 GPa ($\sigma_{hyd} = 1,0$ MPa), über 1,3 GPa ($\sigma_{hyd} = 2,0$ MPa) auf 1,7 GPa ($\sigma_{hyd} = 5,0$ MPa) zu.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AA NNNA	A ANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 42

Tabelle 6.1: Zusammenstellung physikalischer Materialeigenschaften. Index ¹: Siehe Kapitel 4.7. Index ²: Erfahrungen an Sorelbetonen weisen auf einen eher niedrigeren Gaseindringdruck in der Größenordnung von 0,3 MPa hin.

Festmaterialdichte (unverdichtet)	1,82 – 1,89 g/cm ³	Einaxiale Zugfestigkeit	1,97 – 2,67 MPa ¹
Einaxiale Druckfestigkeit	33,0 – 73,0 MPa	Gaspermeabilität (absolut, Labor)	8,6·10 ⁻¹⁶ – 4,2·10 ⁻¹⁷ m ²
Statischer Elastizitätsmodul	13,8 – 25,8 GPa	Gaspermeabilität (effektiv, in-situ)	7,0·10 ⁻¹⁸ – 1,2·10 ⁻¹⁹ m ²
Querdehnzahl	0,20 – 0,27	Lösungspereabilität (Labor)	1,0·10 ⁻²⁰ – 1,6·10 ⁻¹⁹ m ²
Spaltzugfestigkeit	3,18 – 6,92 MPa	Gaseindringdruck	1,2 – 3,0 MPa ²
Biegezugfestigkeit	7,15 – 11,0 MPa	Gesamtporosität	16,1 – 23,6 Vol.-%
Direkte Zugfestigkeit (MTT)	3,7 – 5,1 MPa	(unverdichtet)	

Ohne Veränderung der Umgebungsbedingungen und bei trockenem Grubenklima ist ein Quellen des Sorelbetons festzustellen. Eine Volumenzunahme kann auch aus den Baustoffdichten hergeleitet werden, da die Dichte der Suspension im Vergleich zu erhärteten Probekörpern geringfügig höher ist. Die Gas- und die Lösungspereabilität war stets geringer als 10⁻¹⁵ m² bzw. 10⁻¹⁹ m². Die Permeabilität von Sorelbeton bei Beaufschlagung mit MgCl₂-Lösung ist demnach deutlich geringer, als die Gaspermeabilität. Im Labor beträgt der Permeabilitätsunterschied rund 3 Größenordnungen. Die in-situ ermittelte Gaspermeabilität zeigt im Vergleich zur Gaspermeabilität im Labor, dass nicht der gesamte Porenraum am Strömungsprozess teilnimmt.

Die thermischen Materialeigenschaften sind für Bewertungen der Bauzustände von Relevanz und wurden am erhärteten Baustoff gemessen. Für die Wärmeleitfähigkeit wurden Werte von 1,90 W/(m·K) und 2,22 W/(m·K) ermittelt sowie für die spezifische Wärmekapazität rund 1,00 J/(g·K). Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Rezeptur beträgt rund 3·10⁻⁵ 1/K. Unter quasiadiabatischen Bedingungen nahm die Temperatur des Baustoffs beim Erhärten zwischen 41,2 K und 58,1 K zu und unter adiabatischen Bedingungen (kein Wärmeaustausch mit der Umgebung) um 76,0 K bzw. 81,1 K.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

7 Verwendete Unterlagen

- /1/ DIN EN 14016-1
Bindemittel für Magnesiaestriche – Kaustische Magnesia und Magnesiumchlorid. Begriffe und Anforderungen. April 2004.
- /2/ DIN EN 206-1
Beton: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Juli 2001.
- /3/ DIN EN 196-3
Prüfverfahren für Zement: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Mai 2005.
- /4/ Deutscher Beton-Verein e.V. (DBV)
DBV-Merkblatt Vergussmörtel. Fassung September 1990, redaktionell überarbeitet 1996.
- /5/ DIN EN 13395-2
Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren; Bestimmung der Verarbeitbarkeit. Prüfung des Fließverhaltens von Vergussmörtel, Feinmörtel oder Mörtel. September 2002.
- /6/ DBE Technology GmbH
Sorelbeton A1 – Untersuchungen zur Rezepturvariante A1-560. DBE Technology-KZL A/AJ/GH/BY/0007/00.
- /7/ Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. (BDZ)
Zement-Merkblatt Betontechnik B3. Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe. September 2005.
- /8/ ASTM D 4380
Standard Test Method for Density of Bentonitic Slurries (Bestimmung der Dichte von Bentonitschlämme). 1984.
- /9/ DIN EN 12350-7
Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalte; Druckverfahren. November 2000.
- /10/ DIN 1048-5
Prüfverfahren für Beton. Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Juni 1991.
- /11/ DIN EN 12390-7
Prüfung von Festbeton. Dichte von Festbeton. Februar 2001.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
A			A J			G H	B Y	0 0 0 5	0 0	

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 44

- /12/ DIN 18124
Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte. Bestimmung der Korndichte. Kapillarpyknometer – Weithalspyknometer. September 1989.
- /13/ DIN EN 196-6
Prüfverfahren für Zement - Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit. März 1990.
- /14/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)
Prüfung von Beton. Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048 erarbeitet vom Arbeitsausschuss DIN 1048. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 422, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1991.
- /15/ DIN EN 12390-3
Prüfung von Festbeton. Druckfestigkeit von Probekörpern. April 2002.
- /16/ DIN-Fachbericht 100
Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Ausgabe 2001.
- /17/ DIN EN 1997-1
Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Oktober 2008.
- /18/ Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG)
Bericht zu den Laboruntersuchungen an Rückstellproben aus Sorelbeton A1 der Chargen 31 bis 38. Stand 04.06.2007.
- /19/ Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (DGEG)
Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB. Teil C2. Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben. Ausgabe 1979. Redaktionell überarbeitete Fassung 1986.
- /20/ DIN EN 12390-6
Prüfung von Festbeton. Spaltzugfestigkeit von Probekörpern. Februar 2001.
- /21/ DIN EN 12390-5
Prüfung von Festbeton. Biegezugfestigkeit von Probekörpern. Februar 2001.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

- /22/ Blümel, M. (2000)
 Neue Laborversuchstechniken für felsmechanische Versuche (Improved Procedures for Laboratory Rock testing). DGGT (Hrsg.), Proc. EUROCK 2000 Symposium, Aachen, 27.–31.03.2000, p. 573–578, Essen, Glückauf-Verlag.
- /23/ Plinninger, R.J.; Wolski, K.; Spaun, G.; Thomée, B. & Schikora, K. (2003)
 Experimental and model studies on the Modified Tension Test (MTT) – a new and simple testing method for direct tension tests. In: Natau, O.; Fecker, E. & Pimentel, E. (Hrsg.), GeoTechnical Measurements and Modelling, Karlsruhe 2003, p. 361–366, Balkema/Swets & Zeilinger.
- /24/ Plinninger, R.J., Thomée, B. & Wolski, K. (2004)
 The Modified Tension Test (MTT) - Evaluation and Testing Experiences with a New and Simple Direct Tension Test. - in: Schubert, W. (ed): Rock engineering - theory and practise, Proceedings of the ISRM regional Symposium EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy: 599-604, Essen (Glückauf).
- /25/ Plinninger, R.J.; Wolski, K.; Spaun, G.; Thomee, B. & Schikora, K. (2004) Experimentelle Erfahrungen und Modellstudien zum Modified Tension Test (MTT) - einem neuen und einfachen Versuchsverfahren zur Untersuchung der direkten Zugfestigkeit. Geotechnik, 4: 376-381.
- /26/ DIN 52450
 Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe. Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern. August 1985.
- /27/ DIN 273-1
 Ausgangsstoffe für Magnesiaestriche. Kaustische Magnesia. Mail 1981.
- /28/ DIN EN 1936
 Prüfverfahren für Naturstein- Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität. Februar 2007.
- /29/ DIN EN 1097-5
 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung. Juni 2008.
- /30/ DIN 18121-1
 Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt. Bestimmung durch Ofentrocknung. April 1998.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NN A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
A			A J			GH	BY	0005	00	

- /31/ DIN 52612-1
Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Durchführung und Auswertung. September 1979.
- /32/ DIN 51007
Thermische Analyse (TA). Differenzthermoanalyse (DTA). Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Juni 1994.
- /33/ ASTM E1269, part 1
Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry.
- /34/ Verein Deutscher Zementwerke e.V.
Vorläufiges Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter. Beton 20 (1970), 12: 545–549; ebenso Betontechnische Berichte (1970), Beton-Verlag, Düsseldorf: 179–192.
- /35/ DIN 51045-1
Bestimmung der thermischen Längenänderung fester Körper. Grundlagen. September 1989.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXX	AA	NNNN	NN
A			AJ			GH	BY	0005	00

Anhang 1

**Verfahrensbeschreibung Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton**

Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton
Verfahrensbeschreibung

Auftrag Nr. B IFG 16/2008

Bearbeiter:

Leipzig, 12.02.2009

Projektleiter

Geschäftsführer

Ermittlung des Spannungs-
Verformungsverhaltens von Sorelbeton
Verfahrensbeschreibung

Institut
für
Gebirgsmechanik
GmbH



Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton 1

INHALT

1. **Veranlassung und Aufgabenstellung**2

2. **Spannungs-Verformungsverhalten von Sorelbeton**.....2

3. **Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens**.....3

3.1 Ablauf zur Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens 3

3.2 Triaxiale, isotrope Druckversuche..... 4

3.3 Isotrope Kriechversuche 5

4. **Simulation des Spannungs-Verformungsverhaltens in numerischen Modellberechnungen**6

ANLAGEN

Anlage 2.1 Spannungs- Verformungsverhalten von Sorelbeton, Prinzipdarstellung

Anlage 3.1 Ermittlung des Spannungs- Verformungsverhaltens von Sorelbeton, Prinzipdarstellung

Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton 2

1. Veranlassung und Aufgabenstellung

Das Schließungskonzept für die Schachanlage Asse sieht im Nahbereich der LAW-Einlagerungskammern den Bau von Strömungsbarrieren vor. Die Strömungsbarrieren werden in radialer Richtung durch das aufkriechende Gebirge und in axialer Richtung durch das Schutzfluid belastet, wobei die Belastungsraten entsprechend der In-situ-Bedingungen gering sind. Die Strömungsbarrieren erfahren durch das aufkriechende Gebirge und den Fluiddruck eine Erstbelastung. Als Baustoff für die Barrieren wird Sorelbeton verwendet. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass Sorelbeton je nach Zusammensetzung mehr oder weniger stark zur Volumenkompaktion neigt.

Die Bestimmung des Verformungsmoduls in Anlehnung an die DIN 1048 erfolgt bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten und nach mehreren im Versuch gefahrenen Hysteresen. Die so ermittelten Verformungsmoduln sind als Eingangsgrößen für numerische Modellberechnungen nur bedingt geeignet, da die In-situ-Randbedingungen bei dem schnellen Versuch nur unzureichend erfasst werden und somit häufig zu hohe Steifigkeiten ermittelt werden.

Um das Spannungs-Verformungsverhalten von Sorelbeton zu bewerten, ist eine Berücksichtigung der gegenüber den o. g. Laboruntersuchungen in situ deutlich geringeren Belastungsgeschwindigkeit erforderlich. Hierzu werden die Ergebnisse aus triaxialen Druckversuchen unter isotroper Belastung und isotropen Kriechversuchen genutzt.

2. Spannungs-Verformungsverhalten von Sorelbeton

Das prinzipielle Spannungs-Verformungsverhalten von Sorelbeton ist in der Anlage 2.1 im Diagramm 1 dargestellt. Mit zunehmender hydrostatischer Einspannung kompaktiert der Baustoff und die Volumenverformungen wachsen an (rote Kurve). Durch die Kompaktion wird der Porenraum reduziert und der wirkende Versatzwiderstand erhöht sich, was sich in einer Zunahme des Anstiegs der Spannungs-Verformungskurve mit steigender Spannung äußert. Die Gesamtverformungen (rot) setzen sich aus elastischen (grün) und plastischen (blau), d. h. bleibenden Verformungen zusammen.

In Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung und den Einbaubedingungen sind die elastischen und plastischen Verformungsanteile unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei vergleichsweise „weichen“ Materialien mit ausgeprägter Neigung zum Volumenkriechen sind die plastischen Verformungsanteile deutlich größer als die elastischen Verformungsanteile (Anlage 2.1, Diagramm 2). Der Versatzwiderstand des Materials ist gering und der Spannungsaufbau in der Barriere infolge des aufkriechenden Gebirges schreitet nur langsam voran. Grundsätzlich wirkt sich ein schneller Spannungsaufbau in der Barriere günstig auf die Funk-

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Blatt: 48

Anhang 1

A	Projekt	NAAN	PSP-Element	NNNNNNNNNN	Obj.Kenn.	NNNNNN	Funktion	NNAANN	Komponente	AAANNNA	Baugruppe	AAANN	Aufgabe	XAAXX	UA	Lfd Nr.	AA	NNNN	Rev	NN
							AJ						GH	BY	0005	00				
 DBE TECHNOLOGY GmbH																				

lionsfähigkeit einer Barriere, die stirnflächenseitig einer Fluidbelastung ausgesetzt ist, aus. Dementsprechend ist das Ziel die Herstellung von Barrieren mit einem möglichst hohen Ausbawiderstand ohne bzw. mit nur geringer Neigung zum Volumenkriechen (Anlage 2.1, Diagramm 3).

Im Diagramm 4 der Anlage 2.1 ist der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Verformungsverhalten des Sorelbetons dargestellt. Prinzipiell ist der Ausbawiderstand des Sorelbetons gleicher Rezeptur bei hoher Belastungsgeschwindigkeit (z. B. kurzzeitiger Belastungsversuch im Labor) größer als bei geringer Belastungsgeschwindigkeit (z. B. Barriere in situ). Weiterhin wird die Abhängigkeit des Ausbawiderstandes von der Belastungsgeschwindigkeit bei vergleichsweise „weichen“ Materialien mit Neigung zum Volumenkriechen stärker ausgeprägt sein als bei vergleichsweise „steifen“ Materialien.

3. Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens

3.1 Ablauf zur Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens

Die Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbetonproben wird in folgenden Teilschritten durchgeführt:

- Durchführung triaxialer, isotroper Druckversuche (Belastungsrate 0,1 MPa/s) in der Triaxialzelle und Auftrag der Spannungs-Volumenverformungs-Kurve entsprechend der durchgezogenen Linie in der Anlage 3.1. Die Spannungs-Volumenverformungs-Kurve enthält sowohl elastische als auch plastische Verformungsanteile aus dem Kurzzeitversuch.
- Durchführung isotroper Kriechversuche für verschiedene hydrostatische Spannungsniveaus. Im Ergebnis der Versuche werden Volumenverformungs-Zeit-Kurven ermittelt. Der Versuchszeitraum beträgt ≥ 42 Tage. Für den Sorelbeton A1, der für die Strömungsbarrieren auf der Asse entwickelt wurde, war die Verformungsrate zum Ende des Versuchszeitraums i. d. R. kleiner als die In-situ-Verformungsrate. Die Nullmessung im Versuch erfolgt unmittelbar nach Aufbringen der hydrostatischen Belastung, so dass die Volumenverformungs-Zeit-Kurven ausschließlich zeitabhängige Verformungsanteile enthalten. Die hydrostatischen Spannungen in den Versuchen orientieren sich an den im relevanten Bemessungszeitraum zu erwartenden Spannungsniveaus.
- Durch Ableitung der Volumenverformungs-Zeit-Kurven lässt sich für jede Spannung für die vorherrschende In-situ-Konvergenzrate die Volumenverformung bestimmen. Die Bestimmung des rheologischen Verformungsanteils erfolgt im Detail wie folgt:

- Anpassung der Ergebnisse der Kriechversuche an eine Funktion $v_v = f(t)$ mit:
 v_v , Volumenverformung,
 t , Zeit.

Bei vergleichsweise „weichen“ Materialien und/oder geringen zu erwartenden In-situ-Konvergenzraten ist ggf. eine Extrapolation der in den Kriechversuchen ermittelten Volumenverformungs-Zeit-Kurven über den Versuchszeitraum hinaus erforderlich.

Durch Ableitung der Volumenverformungs-Zeit-Funktion erhält man eine Funktion der Volumenverformungsrate über die Zeit $v'_v = f(t)$. Aus dieser Funktion wird für die gewünschte In-situ-Verformungsrate die Zeit t ermittelt.

- Für die Zeit t wird anschließend mit der an die Kriechversuche angepassten Funktion $v_v = f(t)$ der rheologische Verformungsanteil bestimmt.
- Die für die verschiedenen hydrostatischen Spannungen ermittelten rheologischen Verformungsanteile werden entsprechend der Anlage 3.1 zu den im triaxialen Druckversuch ermittelten Verformungen addiert. Im Ergebnis erhält man eine Spannungs-Volumenverformungskurve (gestrichelte Linie der Anlage 3.1), die das Spannungs-Verformungsverhalten des Sorelbetons unter In-situ-Bedingungen in guter Näherung beschreibt.

3.2 Triaxiale, isotrope Druckversuche

Für die triaxialen Druckversuche wird eine servohydraulische Prüfmaschine (Hersteller Schenk/Trebel) verwendet, die in Kraft- und Verformungsregelung betrieben werden kann. Die Prüfkörper haben Durchmesser von 96 mm und Höhen von 192 mm.

Die triaxialen, isotropen Druckversuche werden mit einer in die Prüfmaschine integrierten Druckzelle durchgeführt. Der erforderliche Manteldruck wird durch einen Druckübersetzer erzeugt. Die Axialbelastung bzw. -verformung und der Manteldruck können unabhängig voneinander geregelt werden. Aus der Axialdeformation und der gemessenen Volumenveränderung des lateralen Druckraumes (Kolbenverschiebung des Druckübersetzers) kann bei konstantem Manteldruck die Volumenveränderung des Prüfkörpers bestimmt werden. Die Manteldruckmessung erfolgt durch einem Druckaufnehmer (Hersteller Hollinger/Baldwin) mit einer Genauigkeit von 0,01 MPa.

Die Axialverformung des Prüfkörpers wird als Verschiebung des axialen Druckstempels gemessen und als Mittelwert von drei induktiven Wegaufnehmern, die im Winkel von 120° zueinander angeordnet sind, erfasst. Die Kraftmessung erfolgt mit einer Kraftmessdose ebenfalls außerhalb der Druckzelle. Durch eine speziell angepasste Nachverstärkung des Kraftmesssignals kann sie mit einer Genauigkeit von 0,5 % des Endwertes betrieben werden.

A	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
	NAAN										
				AJ			GH	BY	0005	00	

Die Prüfkörper werden mit einer Rate von 0,1 MPa/s bis auf 15 MPa hydrostatisch belastet, wobei bei den Laststufen 1, 2, 5, 10 und 15 MPa Be- und Entlastungsschleifen gefahren werden. Im Ergebnis der triaxialen Druckversuche werden die Spannungs-Volumenverformungskurven bei Erstbelastung ausgewertet.

3.3 Isotrope Kriechversuche

Die Versuchsstände arbeiten nach dem Prinzip der Druckwaage und ermöglichen Axiallasten von maximal 200 kN. Es wurden Druckzellen verwendet, die in einem Druckbereich bis 30 MPa einsetzbar sind. Zur Erfassung der Verformungswerte werden drei zwischen den Druckplatten um je 120° versetzt angebrachte Messuhren abgelesen. Bei einer Ablesegenauigkeit von 0,002 mm erfolgt eine Mittelwertbildung für die Verformung des Prüfkörpers. Die vertikale Belastung der Prüfkörper im Dauerstandgerät wird vor Versuchsbeginn mit Hilfe eines geeichten Kraftmessbügels bestimmt.

Der Druckstempel der Druckzelle (Stempeldurchmesser = 42 mm) ist größer als der Durchmesser des Prüfkörpers. Die Bestimmung der auf den Prüfkörper wirkenden Axialspannung erfolgt deshalb unter Berücksichtigung der Zusatzlast, die sich aus der Differenz der Querschnitte von Prüfkörper und Stempel und aus der verformungsabhängigen Zunahme der Prüfkörperquerschnitte ergibt. Der Manteldruck in den Druckzellen wird über den Versuchszeitraum mit einer Genauigkeit ± 1 % konstant gehalten. Die Prüfkörper werden zum Schutz vor dem Druckmedium Öl mit ölresistenten Gummimanschetten dicht ummantelt.

Die Versuchsdurchführung erfolgt bei Raumtemperatur. Für die Regelung der Raumtemperatur (± 1 K) wird eine handelsübliche Klimaanlage verwendet.

Die Kriechversuche werden bei isotroper Belastung mit Standzeiten von ≥ 42 Tagen durchgeführt, wobei die Größe der Belastung bei den verschiedenen Versuchen variiert. Die Prüfkörper haben einen Durchmesser von 40 mm und eine Höhe von 80 mm. Nach dem Einbau der Prüfkörper in die Druckzellen wird das gewünschte hydrostatische Spannungsniveau eingestellt. Das Ablesen der Messwerte unmittelbar nach Erreichen des hydrostatischen Spannungsniveaus liefert für t = 0 den Nullpunkt der Kriechverformung. Die Kriechverformung ergibt sich dabei aus dem Mittelwert der an den drei Messuhren ermittelten Einzelwerte. Während der Kriechversuche werden die Werte für Verformung, Druck und Temperatur im Abstand von 5, 10, 15, 30 und 60 Minuten, dann stündlich und ab dem 2. Versuchstag täglich abgelesen und tabellarisch protokolliert.

4. Simulation des Spannungs-Verformungsverhaltens in numerischen Modellberechnungen

Die Auswahl des Stoffgesetzes für die Simulation des Baustoffs in numerischen Berechnungen erfolgt in Abhängigkeit von den Versuchsergebnissen zum Spannungs-Verformungsverhalten.

Bei vergleichsweise „weichen“ Materialien, bei denen die in den Kriechversuchen ermittelten plastischen, zeitabhängigen Volumenverformungsanteile deutlich größer sind, als die im Triaxialversuch ermittelten Volumenverformungen (Anlage 2.1, Diagramm 2), sollten in der numerische Simulation Stoffansätze verwendet werden, die das volumetrische Kompaktionskriechen erfassen können. Im Programmsystem FLAC steht dafür beispielsweise das Stoffgesetz „Crushed-Salt-Model“ zur Verfügung.

Für „steife“ Materialien, für die in den Versuchen nur geringe plastische Verformungsanteile ausgewiesen werden (Anlage 2.1, Diagramm 3), wird durch Ableitung der Funktion der Spannungs-Volumenverformungskurve die Funktion für den Deformationsmodul (Ersatzkompaktionsmodul) ermittelt. Der Name „Ersatzkompaktionsmodul“ wurde vor dem Hintergrund gewählt, dass keine Verwechslungen mit den rein elastischen Kompaktionsmodul nach DIN auftreten. Ist das Spannungs-Verformungsverhalten des Sorelbetons im für die In-situ-Situation relevanten Spannungs-Verformungsbereich annähernd linear (Ersatzkompaktionsmodul etwa konstant), wird der Sorelbeton in den numerischen Berechnungen näherungsweise mit dem elastisch/plastischen Stoffansatz nach MOHR COULOMB nachgebildet.

Projekt	PSP-Element	Obj./Kam.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AA>NNNA	AA>NN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A			AJ			GH	BY	0005	00



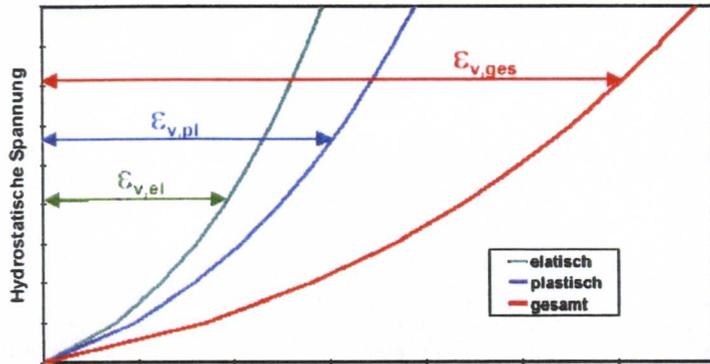


Diagramm 1: **prinzipielles Verhalten**

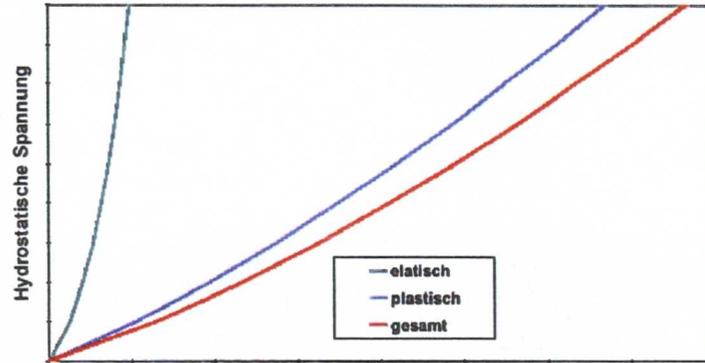


Diagramm 2: **„weiches“ Material mit Neigung zum Volumenkriechen**

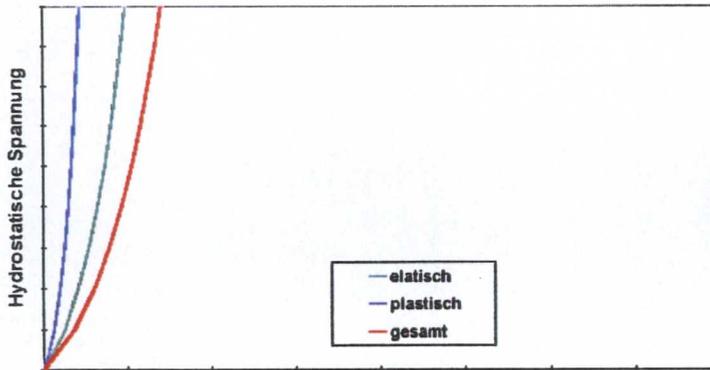


Diagramm 3: **„steifes“ Material**

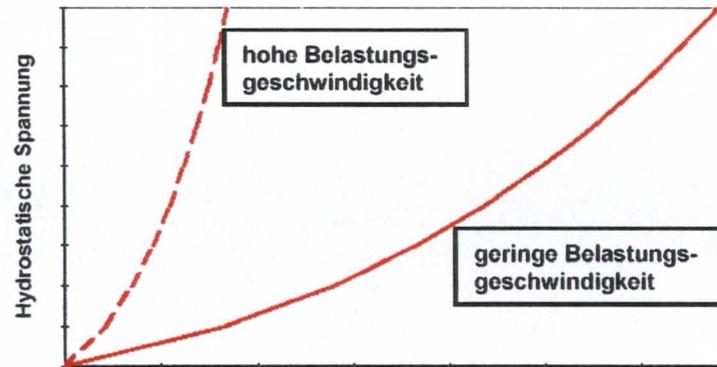
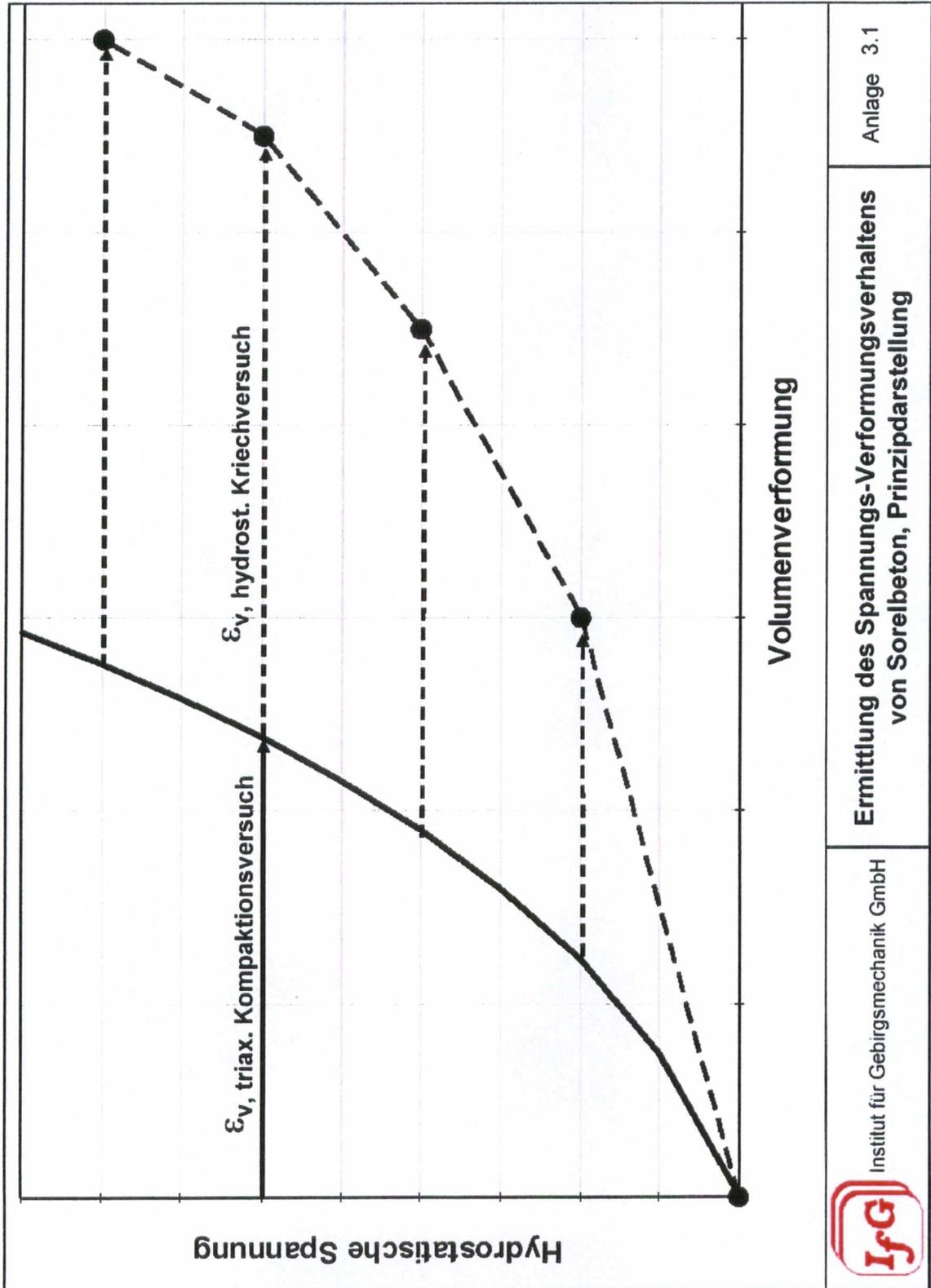


Diagramm 4: **Einfluss hoher und geringer Belastungsgeschwindigkeit**

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AA>NNNA	AA>NN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A			AUT			GH	BY	0005	00

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN
A			AJ			GH	BY	0005	00

Anhang 1



Anlage 3.1

Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton, Prinzipdarstellung

Institut für Gebirgsmechanik GmbH



Stand: 24.02.2009

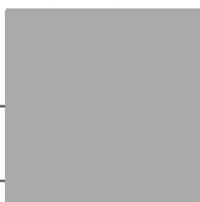
DECKBLATT

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
10	77725	BSB	CC	BW	0015	00

Kurztitel der Unterlage:
 Sorelbeton A1 - Untersuchungen zur Rezepturvariante A1 - 560

Ersteller / Unterschrift

DBETEC/ 

Geprüft: 

DokId: 11430461

Titel der Unterlage:

**Sorelbeton A1 - Untersuchungen
 zur Rezepturvariante A1 - 560**

Freigabevermerk:

Freigabedurchlauf

Stabsstelle Qualitätsmanagement und
 Dokumentation:

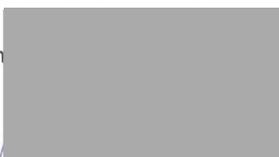
Datum: 11.03.09

Name: 

Unterschrift

Fachbereich/Projektleitung:

Datum: 11.03.2009

Name: 

Unterschrift

Geschäftsführung Asse-GmbH:

Datum: 11.3.09

Name: 

Unterschrift

REVISIONSBLATT

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
10	77725	BSB	CC	BW	0015	/

Revisionsstand 00: 24.02.2009

Titel der Unterlage:

Sorelbeton A1 - Untersuchungen zur Rezepturvariante A1 - 560

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwortl. Stelle	revidierte Blätter	Kat.	Erläuterung der Revision
				R	

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur, Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung, Kategorie S = substantielle Änderung.
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

Asse-GmbHGesellschaft für Betriebsführung und Schließung
der Schachanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
10	77725	BSB	CC	BW	0015	00

Sorelbeton A1 - Untersuchungen zur Rezepturvariante A1 - 560

Blatt: 3

Inhaltsverzeichnis**Blatt**

Deckblatt 1

Revisionsblatt 2

Inhaltsverzeichnis 3

Anlage 1

DBETEC/ Sorelbeton A1 - Untersuchungen
zur Rezepturvariante A1 - 560 28**Gesamte Blattzahl****31**

DECKBLATT

Blatt: 1

Stand: 24.02.2009



Asse	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr	Rev.
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
	A			AJ			GH	BY	0007	00

Titel der Unterlage:

Sorelbeton A1 - Untersuchungen zur Rezepturvariante A1 - 560

(Best.-Nr. 31/167771/05/T)

Ersteller/ Unterschrift:

DBETEC/

Geprüft

DokID:

11430461

Stempelfeld:

Freigabedurchlauf

DBE TECHNOLOGY GmbH - Fachtechnik:

Datum: 24.02.2009

Name:

[Redacted Signature]

Unterschrift

Freigabe/Abnahme Auftraggeber:

Datum: 11.03.2009

Name:

[Redacted Signature]

Unterschrift

Freigabe DBE TECHNOLOGY GmbH:

Datum: 25.02.2009

Name:

[Redacted Signature]

Unterschrift

REVISIONSBLATT

Blatt: 2



Stand:

Revisionsstand 00: 24.02.2009	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN
	A			AJ			GH	BY	0007	

Titel der Unterlage:
Sorelbeton A1 - Untersuchungen zur Rezepturvariante A1 - 560
 (Best.-Nr. 31/167771/05/T)

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwortl. Stelle	revidierte Seiten	Kat. *)	Erläuterungen der Revision

*)
 Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0007	00	

Inhaltsverzeichnis		Blatt
	Verzeichnis der Abbildungen	5
	Verzeichnis der Tabellen	6
1	Einleitung	7
2	Ausgangsstoffe und Rezeptur	8
3	Rheologische Untersuchungen	9
3.1	Suspensionsdichte	9
3.2	Fließrinnenmaß	9
3.3	Sedimentationsstabilität	9
3.4	Überschusslösung	9
3.4.1	Baustoffbluten (Überstandslösung)	10
3.4.2	Drainagelösung	10
4	Anwendungsversuche zum Eindringverhalten der Anmachflüssigkeit in Salzversatz	11
4.1	Anwendungsversuch Glasbox	11
4.1.1	Vorbereitungsarbeiten	11
4.1.2	Versuchsdurchführung	13
4.1.3	Ergebnisse Glasboxversuch	17
4.1.3.1	Suspensionsparameter und Überstandslösung	17
4.1.3.2	Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit in den Salzgrusversatz	17
4.1.3.3	Absenkverhalten	18
4.1.3.4	Temperaturentwicklung	18
4.2	Anwendungsversuch Säulen	18
4.2.1	Vorbereitungsarbeiten	18
4.2.2	Versuchsdurchführung	21
4.2.3	Ergebnisse Säulenversuch	22
4.2.3.1	Suspensionsparameter und Überstandslösung	22
4.2.3.2	Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit	23
4.2.3.3	Absenkverhalten	23
4.2.3.4	Temperaturentwicklung	23
5	Untersuchung physikalischer Materialeigenschaften	23
5.1	Festmaterialdichte	23
5.2	Kompaktionsvermögen unter triaxialer Einspannung (Ersatzkompaktionsmodul)	24

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

Sorelbeton A1 – Untersuchungen zur Rezepturvariante A1-560

Blatt: 4

5.3	Porosität	24
6	Verwendete Unterlagen	25
	Anhang 1 Arbeitsanleitung zur Bestimmung der Menge an Drainagelösung	26
Gesamte Blattzahl der Unterlage: 28		

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0007	00	

Sorelbeton A1 – Untersuchungen zur Rezepturvariante A1-560

Blatt: 5

Verzeichnis der Abbildungen

Blatt

Abbildung 4.1: Glasbox	12
Abbildung 4.2: Einbringen von Ronnenberg-Salz	12
Abbildung 4.3: Verdichtetes Ronnenberg-Salz	13
Abbildung 4.4: Eindringen von Feuchtigkeit in Salzgrus	14
Abbildung 4.5: Absenken des Sorelbetons an der Oberfläche	14
Abbildung 4.6: Absenken des Sorelbetons am Kontakt Beton/Salzgrus	15
Abbildung 4.7: Anhaftender Salzgrusversatz	15
Abbildung 4.8: In den Salzgrus eingedrungene Anmachflüssigkeit unter UV-Licht	16
Abbildung 4.9: Zusammenbau der Säulen	19
Abbildung 4.10: Säulenversuch	20
Abbildung 4.11: Freigelegte Eindringbereiche der Säulen 1, 2 und 3	21
Abbildung 4.12: Eindringbereich der Säule 3 unter UV-Licht	22

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0007	00	

Verzeichnis der Tabellen

Blatt

Tabelle 2.1:	Zusammensetzung der Rezeptur Sorelbeton A1-560 in Massenanteile in Prozent (Ma.-%) und Kilogramm pro Kubikmeter (kg/m ³) bezogen auf eine Dichte von 1.909 kg/m ³ ohne Berücksichtigung eines Luftporenanteils	7
Tabelle 4.1:	Suspensionsparameter Glasboxversuch	16
Tabelle 4.2:	Suspensionsparameter Säulenversuch	21
Tabelle 4.3:	Gesamtvolumenverformung (ϵ_V) in Prozent und Ersatzkompaktionsmodul (K_E) in GPa bei hydrostatischen Spannungen (σ_{hyd}) von 1,0 MPa, 2,0 MPa und 5,0 MPa	24

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0007	00	

1 Einleitung

Im Rahmen der Schließungsmaßnahmen wurden die Abbaue der SchachtanlageASSE zur Stabilisierung der Südflanke mit Steinsalz versetzt. Die im Zeitraum von 1984 bis 2004 mit Eigensalz und Salz der Halde Ronnenberg versetzten Abbaue weisen im Firstbereich durch Setzung des Salzes Hohlräume (Firstspalte) auf. Neben dem Salzversatz ist u.a. die Verfüllung des Resthohlraumvolumens im Firstbereich zur Stützung des umgebenden Gebirges vorgesehen. Die in den jeweiligen Grubenräumen entstandenen Firstspalte sollen mit Sorelbeton A1 bzw. bei sehr flachen Firstspalten, die auch aus einer Vielzahl nicht verbundener Einzel Hohlräume bestehen können, bei Bedarf einem Sorelbeton mit einem höheren Anteil von Anmachflüssigkeit (z.B. Sorelbeton A1-560) verfüllt werden.

Um eine potenzielle, relevante Migration der Anmachflüssigkeit aus der Sorelbetonsuspension und die Bildung von Überstandslösung weitgehend auszuschließen, wurde das Drainageverhalten von Anmachflüssigkeit aus der Sorelbetonsuspension A1-560 und das Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit in Salzversatz (Ronnenberg-Salz) untersucht. Kapitel 3 und 4 des vorliegenden Berichtes dokumentieren das Untersuchungsprogramm und dessen Ergebnisse.

Auf der 875-m-Sohle wurden im Jahre 2007 die ehemaligen Sumpfstrecken und der angrenzende Bereich der Wendelstrecke mit ca. 4.700 m³ Sorelbeton verfüllt. In die Streckenabschnitte wurden mehrere Varianten des Sorelbetons A1 mit erhöhtem Lösungsanteil, darunter auch die Rezeptur A1-560, eingebracht. Baubegleitend erstellte Proben der eingebrachten Sorelbetonrezepturen wurden u. a. auf ihre Steifigkeit untersucht. Die Untersuchungsergebnisse für die Rezeptur A1-560 sind im Kapitel 5 dargestellt.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0007	00	

2 Ausgangsstoffe und Rezeptur

Für die Durchführung der Untersuchungen zu Sorelbeton-A1-Rezepturvarianten mit erhöhtem Lösungsanteil wurde die Rezepturvariante Sorelbeton A1-560 ausgewählt.

Die Bestandteile der Rezeptur „Sorelbeton A1-560“ sind Magnesiumoxid (MgO) als Bindemittel und Steinsalz als Gesteinskörnung (Zuschlagstoff), die mit Magnesiumchlorid-Lösung (MgCl₂-Lösung) angemischt werden. Die Zusammensetzung der Rezeptur zeigt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Zusammensetzung der Rezeptur Sorelbeton A1-560 in Massenanteile in Prozent (Ma.-%) und Kilogramm pro Kubikmeter (kg/m³) bezogen auf eine Dichte von 1.909 kg/m³ ohne Berücksichtigung eines Luftporenanteils.

	Massenanteile in Prozent [Ma.-%]	Kilogramm pro Kubikmeter [kg/m ³]
Magnesiumoxid	10,9	208
Steinsalzgrus	61,3	1170
MgCl ₂ -Lösung	27,8	531

Als Magnesiumoxid kam beispielhaft MgO vom Typ F4-200 der Firma Lehmann & Voss zum Einsatz, als Anmachflüssigkeit MgCl₂-Lösung der Firma Deusa und als Steinsalz wurde Fremdsalz der Firma ESCO Körnung 0 – 4 mm gewählt /1/.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

3 Rheologische Untersuchungen

Die Ausgangsstoffe der Rezeptur Sorelbeton A1–560 können gemäß den Anforderungen der DIN EN 206-1 /2/ dosiert, gewogen und zu einer homogenen Suspension gemischt werden. Die Untersuchungen belegen, dass der frische Baustoff analog zum Sorelbeton A1 in entsprechend dimensionierten Rohrleitungen über Förderweiten von mehreren hundert Metern verpumpt werden kann und in einen Hohlraum mit geringem Fließwinkel ausfließt. Im Folgenden sind Prüfergebnisse zur Baustoffkonsistenz, sowie zur Überschusslösung am Sorelbeton A1–560 zusammengefasst.

3.1 Suspensionsdichte

Gemessen wurden bei luftporenhaltigen Suspensionen, die im Rahmen von Baustoffuntersuchungsprogrammen erstellt wurden, Werte von 1,76 g/cm³, 1,80 g/cm³ und 1,85 g/cm³.

3.2 Fließrinnenmaß

Das Fließrinnenmaß wurde analog zu /3/ im Rahmen von Baustoffuntersuchungsprogrammen bestimmt. Es stehen mit 580 mm und 680 mm zwei Werte zur Verfügung.

3.3 Sedimentationsstabilität

Bei der Rezeptur A1–560 ist zu erwarten, dass in Folge des schmalen Korngrößenbereiches des Steinsalzgrußes (Größtkorn 4 mm) und der geringen Dichte der Gesteinskörnung (2,17 g/cm³), die deutlich niedriger als die des Bindemittels ist, ein Entmischen der Feststoffe ausgeschlossen ist. Durch visuelle Prüfungen der Oberflächen von Probekörpern im Labormaßstab konnte die Sedimentationsstabilität nachgewiesen werden.

3.4 Überschusslösung

Die Bildung von Überschusslösung beim Einbringen des Sorelbetons in Abbaue kann zur Durchfeuchtung der umgebenden Gebirgs- und Versatzbereiche führen. Dies trifft auch auf den Sorelbeton A1-560 zu, der alternativ zum Sorelbeton A1 zur Firstspaltverfüllung vorgesehen ist.

Bei Suspensionen kann ein Teil der Anmachflüssigkeit als Überschusslösung aus dem Baustoffgefüge austreten. Hierfür bestehen zwei Möglichkeiten:

- „Baustoffbluten“ (Bildung von Überstandslösung auf der Baustoffoberfläche) sowie

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

- das Ausfließen von Lösung an den Seitenflächen und der Basis des Baustoffkörpers (Ausfließen oder Abseigern von Drainagelösung)

Die Menge an Überstands- und Drainagelösung wird an ruhenden Suspensionen ermittelt. Im Folgenden sind die Messresultate beschrieben. Informationen zur Versuchsdurchführung finden sich in /1/3/.

Erfahrungen zeigen, dass die Menge an Drainagelösung bei einer Baustoffrezeptur mit steigender Temperatur aufgrund des Anstiegs der Erhärtungsgeschwindigkeit sinkt. Zur Gewährleistung der Repräsentativität der Messresultate erfolgten daher die Untersuchungen unter klimatisch den In-situ-Verhältnissen vergleichbaren Bedingungen.

3.4.1 Baustoffbluten (Überstandslösung)

Die Bildung der überstehenden Lösung wurde unter In-situ-Bedingungen im Rahmen von Anwendungsversuchen untersucht. Auf den Baustoffoberflächen der frisch angemischten Baustoff suspension wurde ca. 30 min nach Abschluss des Betoniervorganges ein Lösungsfilm von 1 bis 2 mm beobachtet. Er löste sich mit zunehmender Erhärtung des Baustoffs auf.

3.4.2 Drainagelösung

Die Bildung der Drainagelösung wurde unter klimatisch den In-situ-Verhältnissen vergleichbaren Bedingungen nach dem in Anhang 1 beschriebenen Verfahren untersucht. Die Suspension wurde in Röhrchen gefüllt, an deren unterer Öffnung ein Siebgewebe mit definierter Maschenweite fixiert wurde. Zum Erfassen der gesamten Menge an Drainagelösung wurden die Röhrchen nach 24stündiger Standzeit gewogen. Die Resultate sind als Massenanteile in Prozent in Bezug auf die Baustoffmenge in den einzelnen Röhrchen angegeben.

Im Allgemeinen sinkt unter Laborbedingungen bei geringen Suspensionshöhen bei der Drainage von Baustofflösung die Menge an Überstandslösung. Nach Kapitel 3.4.1 ist die Neigung der Rezeptur A1-560 zum Baustoffbluten sehr gering. Trotz dieser Befunde wurde während der Untersuchungen ebenso das Auftreten von Überstandslösung geprüft. Eine detaillierte Beschreibung des Messverfahrens und der Datenauswertung enthält Anhang 1.

Der Baustoff Sorelbeton A1-560 wurde am 23.02.2009 mit einem Handmischer (Fa. Beba; ca. 100 U/min) angemischt. Zunächst wurde die Anmachflüssigkeit (MgCl₂-Lösung) vorgelegt, die Feststoffkomponenten Steinsalz Körnung und MgO hinzugegeben und homogenisiert. Die Mischdauer nach vollständigem Homogenisieren betrug 3 min. Für den Drainageversuch wurde eine Gesamtmasse von 20 kg Sorelbeton A1 bei einer Umgebungstemperatur von 33°C angemischt.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

Die Menge an Drainagelösung lag zwischen 1,2 und 1,7 Massen-% und betrug im Durchschnitt 1,5 Massen-%. Überstandslösung konnte nicht festgestellt werden.

4 Anwendungsversuche zum Eindringverhalten der Anmachflüssigkeit in Salzversatz

Da der Baustoff zur Firstspaltverfüllung vorgesehen ist, wurde das Eindringverhalten der Anmachflüssigkeit in Salzgrus untersucht. Als Salzgrus für die Versuche wurde Steinsalz der Körnung 0 bis 2 mm gewählt. Bei dem Salzgrus handelte es sich um Salz der Halde Ronnenberg, dass im Blasversatzverfahren im Jahre 2000 in den Abbau 1/595 gefördert wurde.

Die Untersuchungen wurden in der 42. – 50. KW 2008 auf der 775-m-Sohle der SchachanlageASSE im Bereich der Pilotströmungsbarriere A2 ausgeführt. Gemäß /1/ erfolgte die Durchführung der Untersuchung in zwei unterschiedlichen Anwendungsversuchen, die im Folgenden als Anwendungsversuch Glasbox und Anwendungsversuch Säulen bezeichnet werden. Vorlaufend zu den Anwendungsversuchen wurden Vorversuche durchgeführt /1/.

4.1 Anwendungsversuch Glasbox

Das Ziel des Anwendungsversuchs Glasbox war es eine anschauliche, visuelle Darstellung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit in den Versatzkörper in einem Maßstab zu realisieren, bei dem die Dicke der Sorelbetonschicht und die Porosität des liegenden Versatzes den In-situ-Bedingungen weitgehend entspricht. Die Eindringtiefe und –verteilung von Anmachflüssigkeit, sowie der Absenkung der Suspensionsoberfläche unter Verdichtung des Versatzes sollten sichtbar sein. Daher wurde als Behältnis für die Versuchsdurchführung eine „Glasbox“ mit transparenter Acrylglaswandung gewählt und für die Anmachflüssigkeit ein farbiges Tracern vorgenommen. Um Rückschlüsse auf die zu erwartende Temperaturentwicklung und deren Einflussbereich ziehen zu können, wurden im Salzgrus, im Übergangsbereich zum Sorelbeton und im Sorelbeton Temperatursensoren installiert.

4.1.1 Vorbereitungsarbeiten

Im Vorfeld der durchzuführenden Untersuchungen wurde in der Werkstatt über Tage ein Behältnis aus Plexiglas und Stahlprofilen (Abb. 4.1) gebaut. Das Innenvolumen des Behältnisses betrug 0,125 m³ (B 0,5 m x T 0,5 m x H 0,5 m). Es wurde eine Funktionsprüfung durchgeführt /1/.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

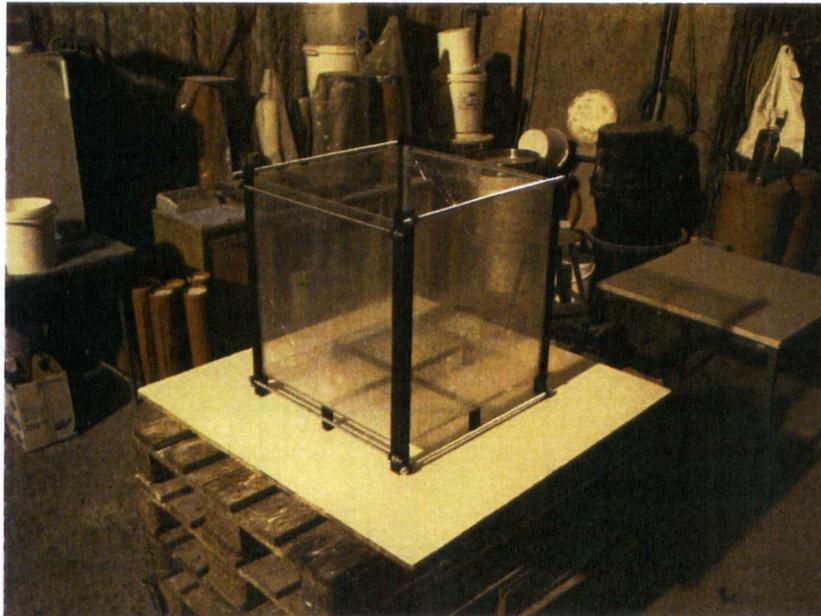


Abb. 4.1: Glasbox

Nach erfolgreicher Funktionsprüfung wurde folgende Versuchsanordnung aufgebaut. Die Glasbox wurde auf einer perforierten Grundplatte aufgestellt. Um ein Zusetzen der Bohrungen durch die Salzschüttung aus der Box zu verhindern, wurde der Boden mit einem Vliestuch abgedeckt.

In die montierte Glasbox wurden 65,0 kg Ronnenberg-Salz unter Verdichtung durch Einstampfen mit einem Holzstab (Abb. 4.2 und 4.3) bis zu einer 20-cm-Markierung eingefüllt. Bei einem Volumen von 50 Liter wird die Schüttdichte mit $1,3 \text{ g/cm}^3$ berechnet.

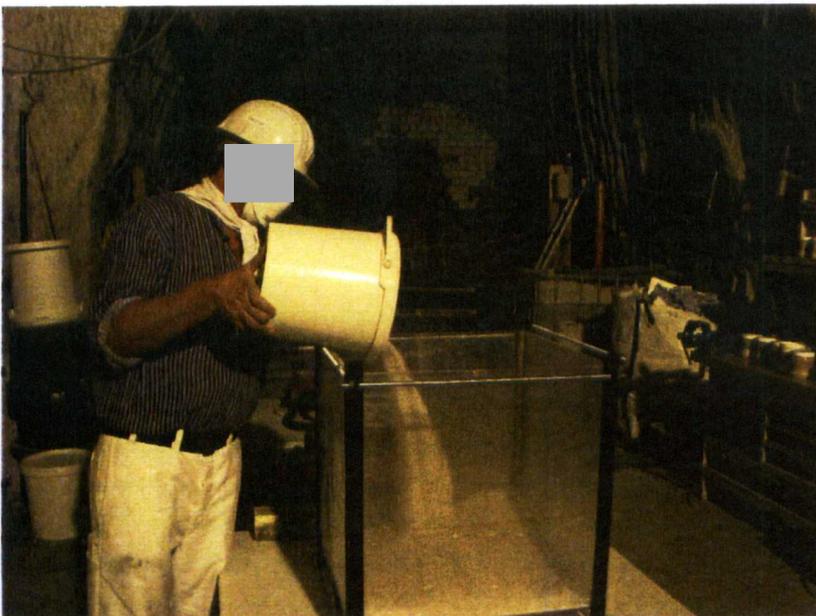


Abb. 4.2: Einbringen von Ronnenberg-Salz

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

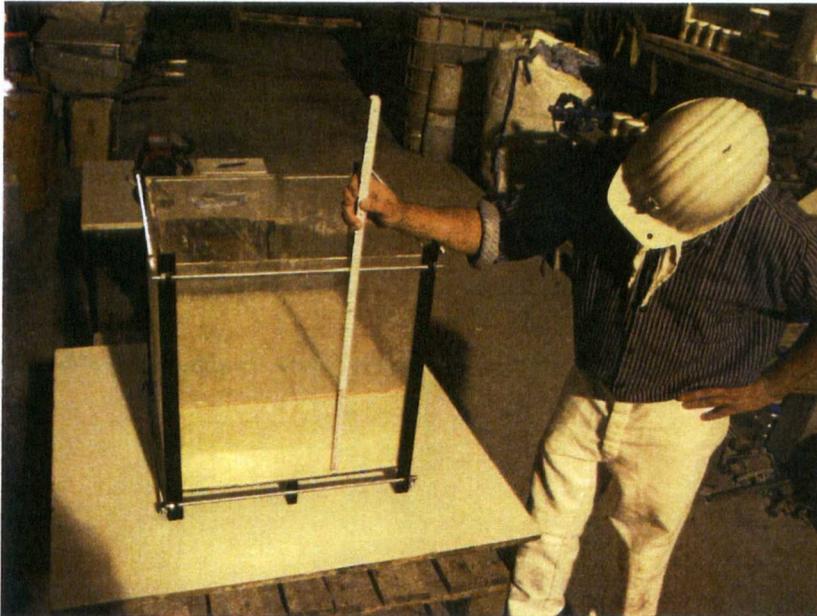


Abb. 4.3: Verdichtetes Ronnenberg-Salz

Für die Beobachtung der Temperaturentwicklung während der Versuchsdurchführung wurden ergänzend in der Versuchsanordnung Thermoelemente platziert. Das Thermoelement T4 wurde 5 cm oberhalb der Bodenplatte in der Salzschüttung positioniert. Das Thermoelement T3 wurde 12 cm oberhalb der Bodenplatte (nach den Ergebnissen aus dem Vorversuch potenzieller Eindringbereich von Feuchtigkeit) in der Salzschüttung angebracht. Das Thermoelement T2 wurde in den Kontaktbereich Beton/Salz eingebunden. Das Thermoelement T1 wurde zum Abschluss der Versuchsdurchführung in die Sorelbetonsuspension gegeben. Alle Thermoelemente wurden an Temperatur-Messgeräte mit Loggerfunktion (Fa. GREISINGER, Typ GMH 3250) angeschlossen.

4.1.2 Versuchsdurchführung

Am 20.11.2008 wurde die Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbetonsuspension A1-560 in Salzgrus durchgeführt. Es wurden 120 kg Sorelbetonsuspension A1-560 hergestellt. Von der Sorelbetonsuspension wurden Teilmengen auf die 20 cm hohe Salzversatzschüttung aufgegeben bis eine Füllhöhe von insgesamt 42 cm im Gefäß erreicht wurde (Salzgrus+Sorelbeton). Als Farbindikator wurde der Anmachflüssigkeit Uranin zugesetzt.

Während der Kontrolle der Box am 21.11.2008, ca. 24 h nach Einbringen der Betonsuspension, konnten folgende Beobachtungen gemacht werden.

- Der Sorelbeton A1-560 war ausgehärtet, die Oberfläche konnte jedoch angeritzt werden.
- Durch die Last des Betons wurde der darunter liegende Salzgrus verdichtet (die Trennfläche Beton/Salz lag bis ca. 1 cm unterhalb der 20-cm-Markierung).

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

- An allen Seitenwänden der Box konnte das Eindringen von Feuchtigkeit aus der Suspension in den Salzgrus in Form eines „Schattens“ (7 bis 10 cm Tiefe) beobachtet werden (Abb. 4.4).
- An der Trennfläche Beton/Salzgrus nahm die eingedrungene Lösung die hellgelbe Farbe des Uranins an.

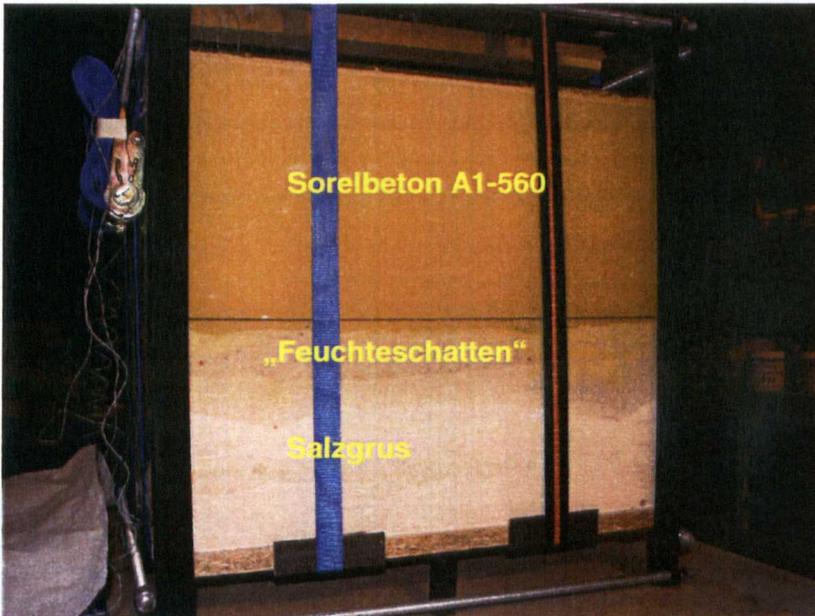


Abb. 4.4: Eindringen von Feuchtigkeit in Salzgrus

Die folgenden Abbildungen (Abb. 4.5 und 4.6) zeigen beispielhaft das Absenken des Betonkörpers in der Box. Eine genaue Vermessung ergab sowohl an der Oberfläche als auch unterhalb der 20-cm-Markierung einen Betrag von 7 mm Absenkung.



Abb. 4.5: Absenken des Sorelbetons an der Oberfläche

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

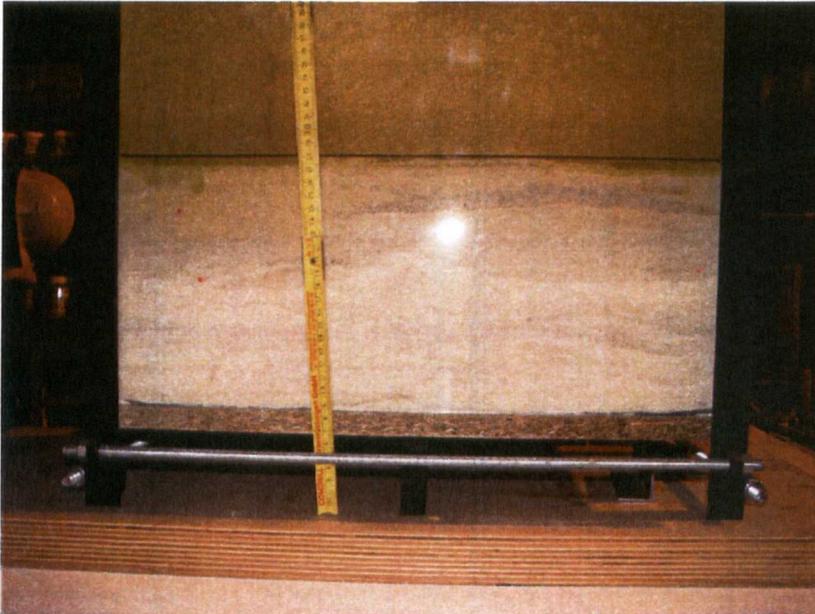


Abb. 4.6: Absenken des Sorelbetons am Kontakt Beton/Salzgrus

Am 24.11.2008 vor Demontage der Versuchsanordnung wurden zusätzliche Beobachtungen gemacht:

- Im oberen Bereich der Box wies der Betonkörper keinen Kontakt zur Plexiglaswand auf.
- In der Salzgrusschüttung unterhalb des Eindringbereiches entstanden stellenweise horizontal verlaufende Luftspalten mit einer Öffnungsweite von ca. 1,5 mm, die an allen Seiten der Box beobachtet wurden.

Im weiteren Verlauf wurde die Versuchsanordnung demontiert und der Betonkörper ausgeschalt. Ein Teil der Salzgrusschüttung haftete am Betonkörper (Abb. 4.7).



Abb. 4.7: Anhaftender Salzgrusversatz

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

Der freigelegte Betonkörper (Beton-Salzgrus) wurde mit einer UV-Lampe beleuchtet. Hierdurch konnte die Eindringtiefe der Anmachflüssigkeit (mit beigemischtem Fluoreszenzfarbstoff Uranin) aus der Sorelbetonsuspension in die Salzgrusschüttung deutlich beobachtet werden. Exemplarisch ist eine Detailaufnahme in Abb. 4.8 dargestellt.

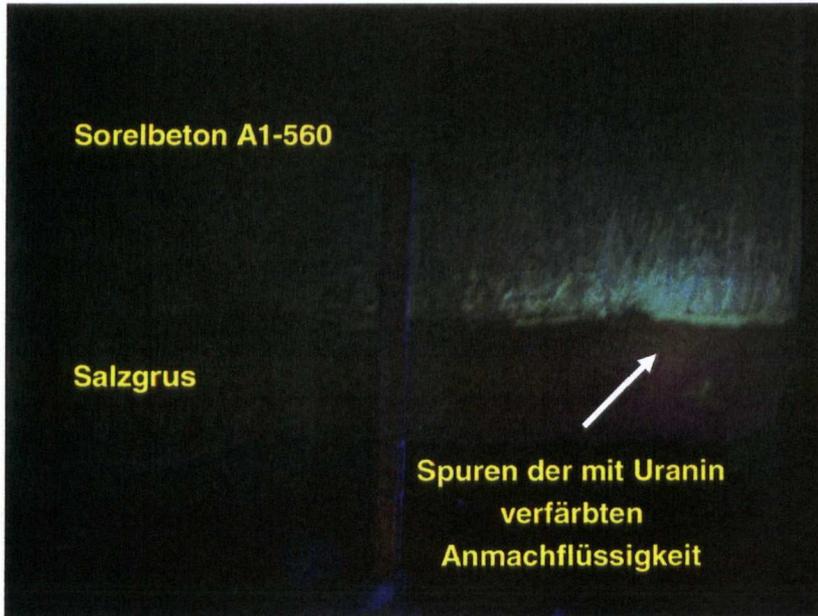


Abb. 4.8: In den Salzgrus eingedrungene Anmachflüssigkeit unter UV-Licht

Abschließend wurde (unter Beleuchtung mit UV-Licht) das am Betonkörper anhaftender Salzgrus händisch soweit entfernt, bis die hellgelben (Uranin) Spuren der Anmachflüssigkeit freigelegt wurden.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
	A			A J			GH	BY	0 0 0 7	0 0	

4.1.3 Ergebnisse Glasboxversuch

4.1.3.1 Suspensionsparameter und Überstandslösung

Begleitend zur Versuchsdurchführung wurden entsprechend den aktuellen Arbeitsanweisungen die in nachfolgender Tabelle 4.1 aufgeführten Suspensionsparameter untersucht und die folgenden Messwerte ermittelt.

Tabelle 4.1: Suspensionsparameter Glasboxversuch

Parameter	Dim.	Sorelbeton A1-560 (Versuch vom 20.11.2008)
Suspensions- temperatur	°C	34,5
Suspensions- leitfähigkeit	mS/cm	18,68
Suspensions- Dichte	g/cm ³	1,80
Fließbrinnen- Maß	mm	680
Luftporengehalt	%	4,5
quasiadiabatische Maximaltemperatur	°C	72,4

Ca. 30 min nach Abschluss der Befüllvorganges kam es zur temporären Bildung von flüssiger Phase auf der Betonoberfläche mit einer Schichtdicke von ca. 1 mm, die sich während des Abbindeprozesses auflöste. Entmischungserscheinungen (Verlust der Sedimentationsstabilität) oder eine substantielle Bildung von Überstandslösung (Bluten) sind nicht erkennbar gewesen.

4.1.3.2 Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit in den Salzgrusversatz

Anhand der Wärmeentwicklung und der visuellen Befunde der Eindringfront unter UV-Licht wird davon ausgegangen, dass die Eindringfront von Lösung im Liegenden der Kontaktzone ca. 1 bis 5 cm beträgt. In diesem Bereich zeigt das UV-Licht die gelblichen Fluoreszenzerscheinungen des Uranintracers in der Anmachflüssigkeit. Die Mächtigkeit der Eindringfront variiert und ist offensichtlich vom lokalen Verdichtungsgrad des Salzgrusversatzes abhängig.

Die Mächtigkeit der sich darunter ausgebildeten Durchfeuchtungszone im Salzgrus („Schatten“) beträgt ca. 7 bis 10 cm. Sie zeigt unter UV-Licht keine Fluoreszenzerscheinungen.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

4.1.3.3 Absenkverhalten

Durch die Auflast des Betons und durch das Eindringen der Anmachflüssigkeit wurde der darunter liegende Salzgrus verdichtet. Während der Kontrollbeobachtung wurde ein Versetzen des Betonkörpers an der Oberfläche und im Bereich der 20-cm-Markierung mit 7 mm gemessen.

4.1.3.4 Temperaturentwicklung

Die Aufzeichnung der Temperaturentwicklung (Thermoelemente T1 – T4) der gesamten Versuchsanordnung während der Versuchsdurchführung wurde am 24.11.2008 abgeschlossen.

Danach zeigte der Sorelbeton infolge der Temperaturabführung mit 55,8°C nach 15 h gegenüber der quasiadiabatischen Temperaturmessung (T_{max} 72,4°C nach 21,2 h) eine deutlich geringere Maximaltemperatur. Direkt in der Kontaktzone Beton/Salzgrus wurden nach 15,9 h 54,6°C gemessen und im darunter liegenden Durchfeuchtungsbereich nach 18 h 49,9°C. Im liegenden, trockenen Salzgrus wurde nach 22,2 h das Temperaturmaximum mit 43,5°C erreicht.

4.2 Anwendungsversuch Säulen

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus dem Eindringversuch in der Glasbox wurde eine weitere Untersuchungskampagne in KG-Rohren durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung der Eindringtiefe der Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in den Salzgrusversatz unter Berücksichtigung der hydrostatischen Belastung der anstehenden Betonsuspension. Hierfür waren Betonierhöhen von ca. 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m vorgesehen.

4.2.1 Vorbereitungsarbeiten

Im Vorfeld der durchzuführenden Untersuchungen wurde am 01.12.2008 mit der Montage der Versuchsanordnung begonnen. Es wurden insgesamt drei Säulen unterschiedlicher Höhe aus KG-Rohren (\varnothing innen 190 mm, Länge 550 mm) zusammengebaut.

In einem ersten Schritt wurden drei von unten geschlossene KG-Rohre mit Salzgrus befüllt. Die Verschlussdeckel wurden zuvor perforiert und mit Vliestuch ausgelegt. Der eingebrachte Salzgrus wurde durch Klopfen an den Außenwänden verdichtet. Nach dem Verdichten wurde die Salzgrus-Oberfläche in allen KG-Rohren mit 50,0 cm Höhe ab Deckelboden gemessen ($V = 14,2$ l). Da in jedes KG-Rohr 19,0 kg Salzgrus vorgelegt wurde, betrug die Schüttdichte 1,34 g/cm³. In Säule 3 (mit ca. 1,5 m höchste Füllsäule) wurden zur Überwachung der Temperaturentwicklung während der Versuchsdurchführung zwei Thermoelemente im Salzgrusversatz installiert. Das Thermoelement T4 wurde ca. 5 cm oberhalb des Bodens positioniert. Das Ther-

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

moelement T3 wurde ca. 10 cm unterhalb der Oberkante Salzgrus im potentiellen Eindringbereich der Feuchtigkeit angebracht. Anschließend erfolgte das Aufstecken weiterer KG-Rohren und der Zusammenbau der Säulen (Abb. 4.9 und Abb. 4.10), so dass Säule 1 aus 2 Stück, Säule 2 aus 3 Stück und Säule 3 aus 4 Stück KG-Rohren zusammengesetzt wurden.



Abb. 4.9: Zusammenbau der Säulen

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	X A A X X	A A	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	



Abb. 4.10: Säulenversuch

Abschließend wurde in jeder Säule die noch verbliebene Höhe (gemessen von Oberkante Salzgrus bis Oberkante KG-Rohr) bestimmt:

Säule 1: 58,4 cm

Säule 2: 105,8 cm

Säule 3: 154,0 cm

Für die Herstellung der Betonsuspension zum Befüllen der Säulen wurde der Einsatz einer Mischpumpe Typ PFT MS1 vorgesehen. Aus diesem Grund war es erforderlich, die zu verarbeitenden Baustoffkomponenten in Chargen zu konfektionieren. Basierend auf der Rezeptur Sorelbeton A1-560 wurden am 02.12.2008 vier Chargen vorbereitet. Jede Charge bestand aus:

MgCl ₂ -Lösung:	16,68 kg (mit Uranin gefärbt)
NaCl:	36,78 kg
MgO:	6,54 kg

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE TEC DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

4.2.2 Versuchsdurchführung

Am 04.12.2008 erfolgte das Befüllen von drei Säulen mit der im Chargenbetrieb hergestellten Betonsuspension Sorelbeton A1-560 bis ca. 2 cm unter Oberkante der KG-Rohr-Säulen.

Vor dem Befüllen der Säule 3 wurden hier zwei weitere Thermoelemente installiert. Im Kontaktbereich Beton/Salzgrus wurde das Thermoelement T2 eingebracht. Das Thermoelement T1 wurde zum Abschluss der Versuchsdurchführung mittig in der Frischbetonsäule platziert. Alle Thermoelemente wurden an Temperatur-Messgeräte mit Loggerfunktion (Fa. GREISINGER, Typ GMH 3250) angeschlossen.

Am 09.12.2008 war die Betonsuspension in allen Säulen ausgehärtet. Die Versuchsanordnung wurde demontiert. Nach Entfernen der Befestigungsurte wurden die Säulen auf vorbereitete Paletten gelegt und fixiert. Mit einem Winkelschleifer wurde bei jeder Säule zwischen Fußbereich und Übergangsbereich Salzgrus/Beton eine Öffnung herausgeschnitten (Abb. 4.11).



Abb. 4.11: Freigelegte Eindringbereiche der Säulen 1, 2 und 3

Die freigelegten Versuchskörper Salzgrus/Sorelbeton A1-560 wurden auch hier mit einer UV-Lampe beleuchtet, um die Eindringtiefe der Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton in den Salzgrusversatz deutlich nachweisen zu können. Exemplarisch ist eine Detailaufnahme (Säule 3) in Abb. 4.12 dargestellt.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
	A			A J			GH	BY	0 0 0 7	0 0	



Abb. 4.12: Eindringbereich der Säule 3 unter UV-Licht

4.2.3 Ergebnisse Säulenversuch

4.2.3.1 Suspensionsparameter und Überstandslösung

Begleitend zur Versuchsdurchführung wurden entsprechend den aktuellen Arbeitsanweisungen die in nachfolgender Tabelle 4.2 aufgeführten Suspensionsparameter untersucht und die folgenden Messwerte ermittelt.

Tabelle 4.2: Suspensionsparameter Säulenversuch

Parameter	Dim.	Sorelbeton A1-560 (Versuch vom 04.12.2008)
Suspensionstemperatur	°C	34,4
Suspensionsleitfähigkeit	mS/cm	16,06
Suspensionsdichte	g/cm ³	1,76
Fließrinnenmaß	mm	580
Luftporengehalt	%	8,5
quasiadiabatische Maximaltemperatur	°C	69,6

Ca. 30 min nach Abschluss des Betoniervorgangs war in den jeweiligen Säulen ein Film von ca. 1 bis 2 mm angefärbte Lösung auf der Betonoberfläche erkennbar, der sich mit zunehmendem Abbindegrad auflöste.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

4.2.3.2 Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit

Anhand der Fluoreszenzerscheinungen unter UV-Beleuchtung waren in allen drei Säulen Eindringtiefen der Anmachflüssigkeit von 30 bis 40 mm erkennbar, d.h. es ist davon auszugehen, dass der Salzgrus im Bereich unterhalb der Kontaktzone Beton/Salzgrus nahezu vollständig durchfeuchtet war.

Die Eindringtiefe der Durchfeuchtungszone betrug 83 mm bei Säule 1, 103 mm bei Säule 2 und 153 mm bei Säule 3.

4.2.3.3 Absenkungsverhalten

Die hydraulischen Druckhöhen der Suspension in den einzelnen Säulen betrug ca. 10 kPa (Säule 1), ca. 18 kPa (Säule 2) und ca. 26 kPa (Säule 3). Trotz der unterschiedlichen Druckhöhen wurden in allen drei Säulen mit jeweils ca. 10 mm vergleichbare Absenkungsbeträge beobachtet.

4.2.3.4 Temperaturentwicklung

Die Aufzeichnung der Temperaturentwicklung (Thermoelemente 1 – 4) in Säule 3 während der Versuchsdurchführung wurde am 08.12.2008 abgeschlossen.

Gegenüber der quasiadiabatischen Temperaturmessung (T_{\max} 69,6°C nach 21,2 h) betrug die Maximaltemperatur innerhalb des abbindenden Sorelbetons in Säule 3 lediglich 46,6 °C nach 14,7 h. Direkt in der Kontaktzone wurden 45,3°C nach 15 h gemessen. Der liegende Durchfeuchtungsbereich zeigte ein T_{\max} von 37,8°C nach 17,7 h. Im trockenen Salzgrusversatz wurden 34,1°C gemessen. Hier war keine Temperaturerhöhung infolge des Abbindeprozesses des darüber befindlichen Sorelbetons erkennbar. Diese Temperatur entspricht der Umgebungstemperatur.

5 Untersuchung physikalischer Materialeigenschaften

5.1 Festmaterialdichte

Die Dichte eines Baustoffes ergibt sich aus den Mengenverhältnissen und spezifischen Dichten seiner Komponenten. Die Messung der Festmaterialdichte erfolgte gemäß DIN 1048-5 /8/ bzw. DIN EN 12390-7 /6/. Basierend auf den Durchschnittsdichten der Ausgangsstoffe ergibt sich für die Suspension ohne Luftporen eine rechnerische Dichte von etwa 1,91 g/cm³. An einem unverdichteten ausgehärteten Probekörper wurde bei Raumtemperatur eine Festmaterialdichte von 1,88 g/cm³ ermittelt /5/.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0007	00	

5.2 Kompaktionsvermögen unter triaxialer Einspannung (Ersatzkompaktionsmodul)

Zur Ermittlung des Kompaktionsvermögens des Baustoffs wurden triaxiale Kompaktions- und Kriechversuche unter isotropen (hydrostatischen) Bedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Kompaktions- und Kriechversuche wurden nach der in /3/ dargestellten Verfahrensbeschreibung kombiniert. Die Kompaktionsversuche erfolgten bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,1 MPa/s. Die Kriechversuche dauerten mindestens 42 Tage. Die Resultate wurden auf eine Verformungsrate von 10^{-10} 1/s extrapoliert. Bei beiden Prüfungen wurden die Verformungen für hydrostatische Spannungen von 1,0 MPa, 2,0 MPa und 5,0 MPa ermittelt. Die Gesamtvolumenverformung für die einzelnen hydrostatischen Spannungen (σ_{hyd}) ergibt sich als Summe der Volumenverformungen (ϵ_V) der Kompaktions- und Kriechversuche. Aus der Gesamtvolumenverformung wird entsprechend /3/ der sogenannte Ersatzkompaktionsmodul (Steifigkeitsniveau, K_E) abgeleitet, der das Kompaktionsvermögen des Baustoffs bei hydrostatischer Einspannung in den eigenen Porenraum charakterisiert.

Die bisher bestimmten Messresultate sind in Tabelle 4.3 angeben /5/. Für hydrostatische Beanspruchungen bis 2 MPa weist die Rezeptur A1-560 Steifigkeiten auf, die an der Untergrenze der für den Sorelbeton A1 typischen Werte liegen. Bei einer Beanspruchung von 5 MPa ist die Steifigkeit im Vergleich zum Sorelbeton A1 jedoch geringer. Da das Verfahren hier an seine Grenzen stößt, wurden die Werte für die Beanspruchung von 5 MPa in Klammern gesetzt.

Tabelle 4.3: Gesamtvolumenverformung (ϵ_V) in Prozent und Ersatzkompaktionsmodul (K_E) in GPa bei hydrostatischen Spannungen (σ_{hyd}) von 1,0 MPa, 2,0 MPa und 5,0 MPa.

	$\sigma_{hyd} = 1,0$ MPa		$\sigma_{hyd} = 2,0$ MPa		$\sigma_{hyd} = 5,0$ MPa	
	ϵ_V	K_E	ϵ_V	K_E	ϵ_V	K_E
	[%]	[GPa]	[%]	[GPa]	[%]	[GPa]
Sorelbeton A1-560	0,18	0,5	0,35	0,6	(6,5)	(0,08)

5.3 Porosität

Die Gesamtporosität (auch totale Porosität) ist das Verhältnis (als Anteil in Prozent) zwischen dem Volumen der Poren (offene und eingeschlossene) und dem Rohvolumen des Probekörpers. Die Messungen erfolgten in Anlehnung an DIN EN 1936 /9/ (Pyknometerverfahren), wobei berücksichtigt wurde, dass der Salzgehalt der Porenlösung während des Trocknens der Probekörper in den Baustoffporen als Salze verbleibt. Abweichend von der DIN EN 1936 wurden die Probekörper definierter Abmessung bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Der Wert für die Gesamtporosität beträgt für einen ausgehärteten Probekörper der baubegleitend aus unverdichteter Suspension erstellt wurde 22,4 % /5/.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
A			A J			GH	BY	0 0 0 7	0 0	

6 Verwendete Unterlagen

- /1/ DBE TECHNOLOGY GmbH
Untersuchungen des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz, Stand 05.02.2009.
- /2/ DIN EN 206-1
Beton: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Juli 2001.
- /3/ DBE TECHNOLOGY GmbH
Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften.
- /4/ ASTM D 4380
Standard Test Method for Density of Bentonitic Slurries (Bestimmung der Dichte von Bentonitschlämme). 1984.
- /5/ Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Bericht zu Laboruntersuchungen an Sorelbeton A1 der Charge 44. Stand 23.07.2008
- /6/ DIN EN 12390-7
Prüfung von Festbeton. Dichte von Festbeton. Februar 2001.
- /7/ DIN 18124
Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte. Bestimmung der Korndichte. Kapillarpyknometer – Weithalspyknometer. September 1989.
- /8/ DIN 1048-5
Prüfverfahren für Beton. Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Juni 1991.
- /9/ DIN EN 1936
Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität. Februar 2007.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0007	00	

Anhang 1

Arbeitsanleitung zur Bestimmung der Menge an Drainagelösung

Für die Messungen werden PVC-Rohre mit einem Außendurchmesser von 40 mm, einem Innendurchmesser von 36 mm (Wandstärke 2 mm) und einer Länge von 330 mm verwendet. Eine Öffnung der Rohre wird mit Siebgewebe der Fa. Sefar (SEFAR NITEX 03-30/18; Maschenweite 30 µm) bespannt. Die Drainagelösung wird mit einem 250 ml-Becherglas aus Kunststoff (hohe Form) aufgefangen. Als Abstandhalter zwischen Unterkante Rohr und Becherglasboden dienen in sternförmiger Anordnung verschweißte PVC-Streifen (Abbildung 2). Um ein Verdunsten von Wasser zu verhindern, wird die obere Öffnung der Rohre mit einem Gummistopfen verschlossen und eine Kunststoffolie über das Becherglas bis an die Mantelfläche des Rohres gezogen. Die Folie wird mit Klebeband am Rohr fixiert. Die Messvorrichtung wird nach dem Füllen mit Baustoff und dem Aufsetzen des Stopfens auf eine erschütterungsfreie Unterlage gestellt, wobei auf eine senkrechte Ausrichtung des Rohres geachtet wird. Den Gesamtaufbau der Messvorrichtung zeigt Abbildung 1.

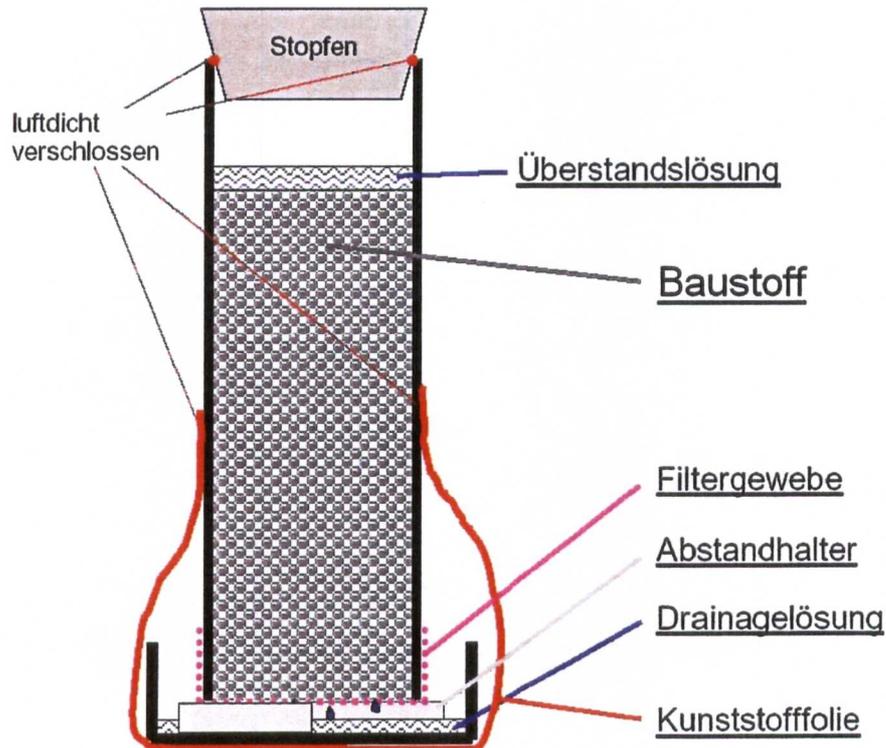


Abbildung 1: Aufbau der Messvorrichtung. Als Auffangbehälter unter dem mit einem Gewebe unten bespannten Rohr wird ein Becherglas verwendet.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A			AJ			GH	BY	0007	00

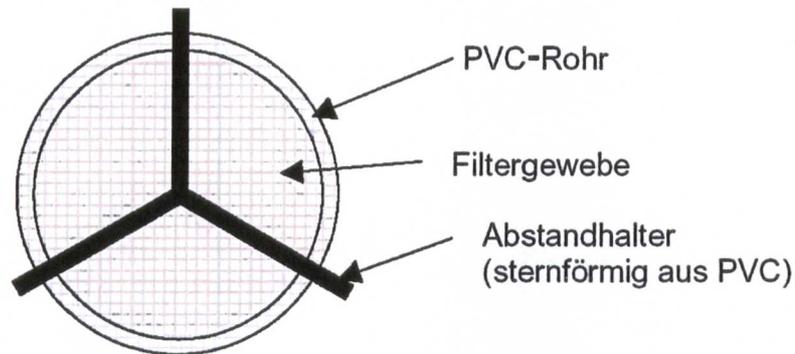


Abbildung 2: Untersicht Drainagerohr mit Abstandhalter.

Die Durchführung der Untersuchung gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- Vom leeren Becherglas wird mit dem eingesetzten Abstandhalter die Masse bestimmt (m_1).
- In die obere Rohröffnung wird der Stopfen eingesetzt.
- Das einseitig mit Gewebe bespannte Rohr wird in das Becherglas gestellt und mit Kunststoffolie luftdicht verklebt.
- Von der verschlossenen Messvorrichtung wird das Leergewicht bestimmt (m_2).
- Nach dem Entfernen des Stopfens wird das Rohr mit Hilfe eines abgeschnittenen Trichters (Lochdurchmesser ca. 25 bis 30 mm) bis zu einer Höhe von ca. 28 cm mit Baustoff befüllt (ca. 5 cm Luftraum über dem Baustoff) und falls erforderlich durch leichtes Klopfen am Rohr eine ebene Oberfläche erzeugt.
- Das Rohr wird mit dem Stopfen luftdicht verschlossen.
- Anschließend wird die befüllte Messvorrichtung gewogen (m_3).
- Nach 24 Stunden wird die Drainagelösung mit Becherglas und Abstandhalter gewogen (m_4). Falls Überstandslösung vorhanden ist, wird diese in ein Becherglas dekantiert und ebenso gewogen.

Die Menge bzw. das Maß an Drainagelösung und ggf. Überstandslösung wird in der Einheit Massen-% angegeben. Ein Messprotokoll zeigt Abbildung 3. Die Auswertung erfolgt gemäß den Gl. (1) bis (4):

$$\text{Baustoffmasse} \quad m_{SB} = m_3 - m_2 \quad (1)$$

$$\text{Masse Drainagelösung} \quad m_D = m_4 - m_1 \quad (2)$$

$$\text{Maß Überstandslösung} \quad M_{ÜST} = m_{ÜST} / m_{SB} \quad (3)$$

$$\text{Maß der Drainagelösung} \quad M_D = m_D / m_{SB} \quad (4)$$

Probenehmer :					
Datum :					
Probenahme, Zeitraum :					
Temperatur: [°C]					
Proben Nr. :	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Masse Becherglas + Abstandshalter : [g]					
Masse Becherglas + Abstandshalter + Kunststoffrohr mit Stopfen + Kunststoffolie: [g]					
Befüllung Kunststoffrohr, Uhrzeit:					
Masse Becherglas + Abstandshalter + Kunststoffrohr mit Stopfen + Kunststoffolie + Baustoff: [g]					
Masse Baustoff: [g]					
Auswertung, Uhrzeit:					
Bestimmung Drainagelösung					
Masse Becherglas + Abstandshalter + Drainagelösung: [g]					
Masse Drainagelösung : [g]					
Maß Drainagelösung in Prozent :					
Bestimmung Überstandslösung					
Masse Überstandslösung : [g]					
Maß Überstandslösung in Prozent :					
Mittelwert der Überschusslösung in Prozent:					

Abbildung 3: Messprotokoll zur Protokollierung der Messdaten und zur Berechnung der Menge an Drainage- und Überstandslösung.

Stand: 29.01.2009

DECKBLATT

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
10	77725	BSB	CC	BW	0014	00

Kurztitel der Unterlage:
 Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit
 aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz

Ersteller / Unterschrift

DBETEC/ [Redacted]
 DBETEC [Redacted]

Geprüft: [Redacted]

DokId: 11427489

Titel der Unterlage:

**Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit
 aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz**

Freigabevermerk:

Freigabedurchlauf

Stabsstelle Qualitätsmanagement und
 Dokumentation:

Datum: 11.03.09

Name: [Redacted]

Unterschrift

Fachbereich/Projektleitung:

Datum: 11.03.2009

[Redacted]

Unterschrift

Geschäftsführung Asse-GmbH:

Datum: 11.3.09

Name: [Redacted]

Unterschrift

REVISIONSBLATT

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
10	77725	BSB	CC	BW	0014	/

Revisionsstand 00: 29.01.2009

Titel der Unterlage:

Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit
 aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwrtl. Stelle	revidierte Blätter	Kat.	Erläuterung der Revision
				R	

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur, Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung, Kategorie S = substantielle Änderung.
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

Asse-GmbH Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachanlage Asse II	Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
	NNAA	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AA	AA	NNNN	NN
	10	77725	BSB	CC	BW	0014	00

Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz Blatt: 3

Inhaltsverzeichnis

Blatt

Deckblatt 1

Revisionsblatt 2

Inhaltsverzeichnis 3

Anlage 1

DBETEC/ XXXXXXXXXX

Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz 31

DECKBLATT

Blatt: 1

Stand: 29.01.2009

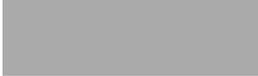


Asse	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
	A						BE	BZ	0001	

Titel der Unterlage:

Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz

Ersteller/ Unterschrift:



Geprüft:



DokID:
11427489

Stempelfeld:

Freigabedurchlauf

DBE TECHNOLOGY GmbH - Fachtechnik:

Datum: 03.02.2009

Name:



Unterschrift

Freigabe/Abnahme Auftraggeber:

Datum: 05.02.2009

Name:



Unterschrift

Freigabe DBE TECHNOLOGY GmbH:

Datum: 09.02.2009

Name:



Unterschrift

REVISIONSBLATT

Blatt: 2

Stand:



Revisionsstand 00:
29.01.2009

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A						BE	BZ	0001	

Titel der Unterlage:

Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwortl. Stelle	revidierte Seiten	Kat. *)	Erläuterungen der Revision

*)
 Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
	A						BE	BZ	0001	00	

Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz

Blatt: 3

Inhaltverzeichnis

Blatt

1	Einleitung / Aufgabenstellung	5
2	Untersuchungsumfang	5
3	Untersuchungen	5
4	Beschreibung der Baustoffkomponenten	6
5	Beschreibung der Rezeptur	6
6	Anwendungsversuch Glasbox	6
6.1	Tastversuche	7
6.2	Verfahrens- und Funktionsprüfung	10
6.3	Vorbereitungsarbeiten	13
6.4	Versuchsdurchführung	14
6.5	Ergebnisse Glasboxversuch	17
6.5.1	Suspensionsparameter	17
6.5.2	Temperaturentwicklung	17
6.5.3	Überstandslösung	17
6.5.4	Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit	18
6.5.5	Absenkverhalten	18
7	Anwendungsversuch Säulen	19
7.1	Untersuchungsumfang	19
7.2	Vorbereitungsarbeiten	19
7.3	Versuchsdurchführung	21
7.4	Ergebnisse Säulenversuch	23
7.4.1	Suspensionsparameter	23
7.4.2	Temperaturentwicklung	24
7.4.3	Überstandslösung	24
7.4.4	Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit	24
7.4.5	Absenkverhalten	24
8	Zusammenfassung und Bewertung der Messergebnisse	25

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
	A						B E	B Z	0 0 0 1	0 0	

Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Salzversatz

Blatt: 4

Tabellenverzeichnis

Blatt

Tabelle 1: Suspensionsparameter Glasboxversuch..... 17
Tabelle 2: Suspensionsparameter Säulenversuch..... 23
Tabelle 3: Messergebnisse aus Glasbox- und Säulenversuchen..... 25

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1: Arbeitsprotokoll Sorelbeton A1-560 vom 20.11.2008.....26
Anhang 1a: Quasiadiabatische Temperaturentwicklung Sorelbeton A1-560
vom 20.11.2008.....27
Anhang 2: Temperaturentwicklung Glasbox vom 20.11.2008.....28
Anhang 3: Arbeitsprotokoll Sorelbeton A1-560 vom 04.12.2008.....29
Anhang 3a: Quasiadiabatische Temperaturentwicklung Sorelbeton A1-560
vom 04.12.2008.....30
Anhang 4: Temperaturentwicklung Säulenversuch vom 04.12.2008.....31

Gesamtblattzahl der Unterlage: 31

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NN A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

1 Einleitung / Aufgabenstellung

Im Rahmen der Schließungsmaßnahmen wurden die Abbaue der SchachanlageASSE zur Stabilisierung der Südflanke mit Steinsalz versetzt. Die im Zeitraum von 1984 bis 2004 mit Eigensalz und Salz der Halde Ronnenberg versetzten Abbaue weisen im Firstbereich durch Absenkung des Salzes Hohlräume (Firstspalte) auf. Neben dem Salzversatz ist u.a. die Verfüllung des Resthohlraumvolumens im Firstbereich zur Stützung des umgebenden Gebirges vorgesehen. Die in den jeweiligen Grubenräumen entstandenen Firstspalte sollen mit Sorelbeton A1 bzw. Firstspalten geringer Öffnungsweite, die auch aus einer Vielzahl nicht verbundener Einzelhöhlräume bestehen können, bei Bedarf mit einem Sorelbeton mit einem höheren Anteil von Anmachflüssigkeit (z.B. Sorelbeton A1-560) verfüllt werden.

Um eine potenzielle, relevante Migration der Anmachflüssigkeit aus der Sorelbetonsuspension weitestgehend auszuschließen, wurde die DBE TECHNOLOGY GmbH unter der Auftragsnummer 31/167771/05 (Ingenieurtechnischer Einzelnachweis zur Baufreigabe) beauftragt das Drainageverhalten von Anmachflüssigkeit aus der Sorelbetonsuspension A1-560 sowie die Bildung von Überstandslösung und das Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit in Salzversatz zu untersuchen.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Gestaltung des Untersuchungsprogramms und dessen Ergebnisse.

2 Untersuchungsumfang

Die Untersuchungen wurden in folgende Arbeitsschritte gegliedert:

- Planung und Koordination der Erstellung eines Behältnisses zur Prüfung des Eindringverhaltens
- Tastversuche mit Farbindikatoren und Fluoreszenzfarbstoff Uranin
- Vorversuch zur Funktionsprüfung des Behältnisses
- Durchführung der Versuche und Durchführung von begleitenden Baustoffuntersuchungen (Suspensionsdichte, Suspensionstemperatur, Fließrinnenmaß, Luftporengehalt und Temperaturüberwachung des Sorelbetons)
- Auswertung der Ergebnisse
- Dokumentation der Ergebnisse

3 Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden in der 42. – 50. KW 2008 auf der 775-m-Sohle der SchachanlageASSE im Bereich der Pilotströmungsbarriere A2 ausgeführt. Die Versuchsdurchführung ist in den Baustellenberichten aus dem Bautagebuch Okt. bis Dez. 2008 dokumentiert. Entsprechend der Fragestellung wurden für die Durchführung der Versuche zwei unterschiedli-

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

che Versuchsbehältnisse hergestellt, die im Folgenden als Glasbox und Säulen bezeichnet werden.

4 Beschreibung der Baustoffkomponenten

Im Rahmen der Untersuchungen wurden folgende Baustoffkomponenten verwendet:

- MgCl₂-Lösung (Anmachflüssigkeit; Lieferant Fa. Deusa)
- MgO (Typ F4-200; Lieferant Fa. Lehmann & Voss)
- Salzgrus Körnung 0 – 4 mm (ESCO-Salz)
- Salzgrus Körnung 0 – 2 mm (Ronnenberg-Salz aus Abbau 1/595)

5 Beschreibung der Rezeptur

Für die Durchführung der Untersuchungen wurde eine Sorelbeton-A1-Rezepturvariante mit erhöhtem Lösungsanteil unter der Bezeichnung Sorelbeton A1-560 ausgewählt, da für weitere Stabilisierungsmaßnahmen im Bereich der Abbaukammern neben dem Sorelbeton A1 voraussichtlich ein Baustoff auf Sorelbetonbasis mit erhöhtem Ausbreitmaß, d.h. mit einem erhöhten Anteil an Anmachflüssigkeit zur Anwendung kommen kann.

Rezeptur Sorelbeton A1-560

- 27,8 Ma-% MgCl₂-Lösung (531 kg/m³)
- 10,9 Ma-% MgO (208 kg/m³)
- 61,3 Ma-% Steinsalz (1.170 kg/m³)

6 Anwendungsversuch Glasbox

Im Vorfeld der Untersuchungen wurde in der Werkstatt über Tage ein Behältnis aus Plexiglas und Stahlprofilen (Abb. 1) gebaut. Das Innenvolumen des Behältnisses beträgt 0,125 m³ (B 0,5 m x T 0,5 m x H 0,5 m).

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	



Abbildung 1

6.1 Tastversuche

16.10.2008

In einem ersten Schritt wurden zunächst Tastversuche (Abb. 2 und 2a) durchgeführt. Beim ersten Tastversuch wurden zwei Weithalsgefäße (mit einer 500-cm³-Markierung) jeweils mit 670 g ESCO-Salz bzw. Ronnenberg-Salz unverdichtet gefüllt. In die so vorbereiteten Weithalsgefäße wurde die von Hand hergestellte Sorelbetonsuspension A1-560 (mit ESCO-Salz) gegeben. Nach wenigen Minuten konnten Veränderungen des Salzes in Form eines „Schattens“ unterhalb der Markierung beobachtet werden.

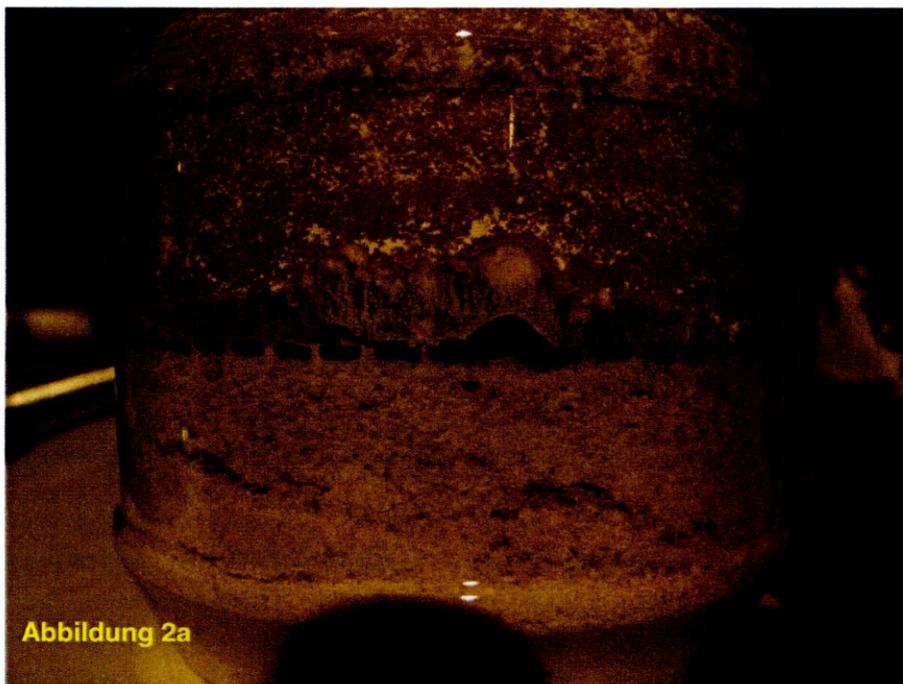
Um die o.a. Veränderungen zu verdeutlichen, wurde im nächsten Tastversuch der hergestellten Sorelbetonsuspension A1-560 (hier mit Ronnenberg-Salz) der Farbstoff Rhodamin zugegeben. Die Farbe der Betonsuspension veränderte sich. Danach wurde die Suspension ebenfalls in zwei Weithalsgefäße mit Salz gegeben. Die erwartete Verfärbung des Salzes unterhalb der Markierung blieb jedoch aus.

Abschließend wurde der erste Tastversuch wiederholt. Hier wurde die Anmachflüssigkeit vor der Herstellung der Suspension mit Rhodamin angefärbt. Auch in diesem Fall trat keine Verfärbung des liegenden Salzgruses ein.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	



Anmerkung: Die im Salzgrus eingeschlossene Luft wurde durch die eindringende Lösung verdrängt. An der Trennfläche Suspension/Salzgrus konnte die Bildung von Luftblasen beobachtet werden (Abb. 2a).



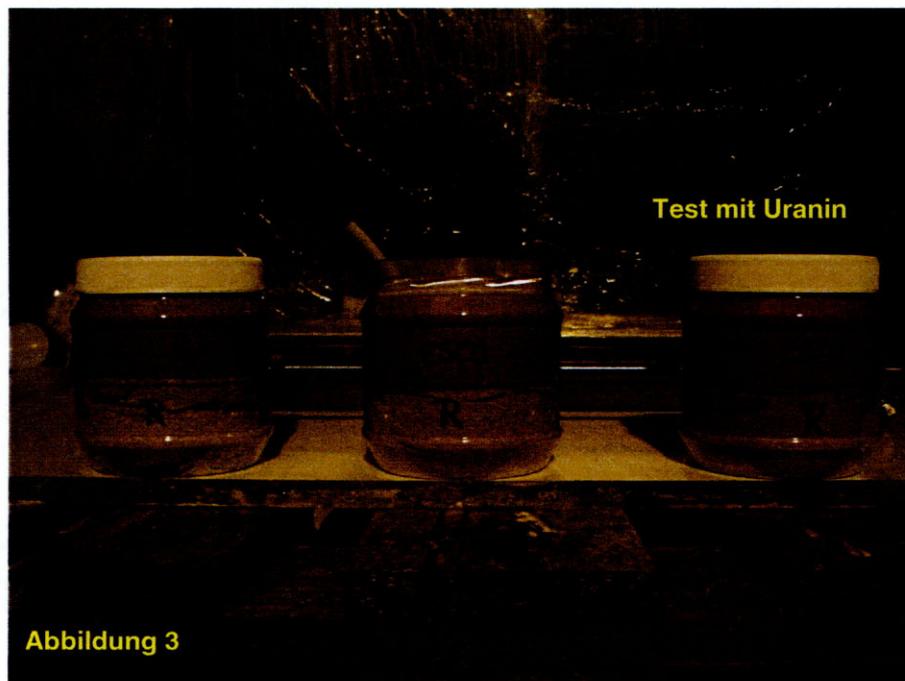
	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE-TEC DBE TECHNOLOGY GmbH
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A						BE	BZ	0001	00	

20.10.2008

In einer weiteren Tastversuchsreihe (Abb. 3) wurde das Ronnenberg-Salz für die Salzschüttung ausgewählt, um die In-situ-Verhältnisse in geeigneter Form abzubilden. Die von Hand angemischte Sorelbetonsuspension A1-560 wurde mit ESCO-Salz hergestellt. Als Farbstoff wurden Kaliumpermanganat und Uranin eingesetzt.

Vor dem Hintergrund, dass die zu verfüllenden Abbaue keine in sich geschlossenen Systeme sind und die Luft aus dem Salzversatz entweichen kann, wurden (Simulation eines offenen Systems) im Boden der Weithalsgefäße Öffnungen (\varnothing 5 mm) hergestellt. Abschließend wurde im letzten Tastversuch ein Entlüftungsrohr im Salzgrus platziert. Die von Hand hergestellte Sorelbetonsuspension wurde in die so vorbereiteten Weithalsgefäße gegeben. Die im Salzgrus eingeschlossene Luft konnte sowohl durch die hergestellten Öffnungen als auch durch das Entlüftungsrohr entweichen. Die Bildung von Luftblasen an der Trennfläche Suspension/Salz wurde damit ausgeschlossen.

Das als Farbstoff eingesetzte Kaliumpermanganat ergab keine Verfärbung der Lösung. Nur mit dem Fluoreszenzfarbstoff Uranin konnte eine Verfärbung (hellgelb) des Salzgruses und damit das Eindringverhalten unterhalb der Markierung beobachtet werden.



Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

6.2 Verfahrens- und Funktionsprüfung

27.10.2008

Nach Abschluss der Tastversuche erfolgte die Funktionsprüfung des Behältnisses für die Durchführung der Untersuchung. Die Acrylglasplatten wurden vor der Funktionsprüfung mit Haushalts-Klarsichtfolie ummantelt, um sie vor möglichen Anhaftungen zu schützen. In die Glasbox wurden 65,0 kg Ronnenberg-Salzversatz unter Verdichtung durch Einstampfen mit einem Holzstab (Abb. 4 und 5) bis zu einer 20-cm-Markierung eingefüllt.



Auf der Grundlage der ausgewählten Rezeptur wurden 120 kg Sorelbetonsuspension A1-560 hergestellt. Als Farbindikator wurde Uranin eingesetzt. Vor dem Befüllen der Box mit Sorelbeton wurde zum Entlüften ein Kupferrohr bündig mit einer Ecke der Glasbox in der Salzschüttung platziert. Nach Herstellung wurde die Suspension in Teilmengen in die Box gegeben. Vor dem Hintergrund der Gesamtlast (Salzgrus + Suspension) wurden an der Box zusätzliche Profileisen und Befestigungsgurte angebracht, um ein Ausbeulen der Seitenwände und das Entstehen von Umläufigkeiten zu verhindern. Die Funktionsprüfung wurde mit Erfolg abgeschlossen (Abb. 6 und 7).



Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

28.10.2008

Während der Kontrolle der Box konnte folgendes beobachtet werden:

- Die Glasbox hielt der Last stand und war damit für die Durchführung der Untersuchung geeignet.
- Der Sorelbeton A1-560 war ausgehärtet, die Oberfläche konnte jedoch angeritzt werden.
- Durch die Last des Betons (120 kg) wurde der darunterliegende Salzgrus verdichtet (die Trennfläche Beton/Salzgrus lag bis 1 cm unterhalb der 20-cm-Markierung).
- An allen Seitenwänden der Box konnte das Eindringen von Feuchtigkeit aus der Suspension in Form eines „Schattens“ (7 bis 10 cm Tiefe) beobachtet werden (Abb. 8).
- An der Trennfläche Beton/Salzgrus nahm die eingedrungene Lösung die hellgelbe Farbe des Uranins an.
- Auf Grund der Versuchsanordnung konnte entlang dem Zwickel, der sich zwischen dem Entlüftungsrohr und der Ecke der Glasbox bildete, Lösung bis zum Boden der Box durchdringen und tropfenweise an einer undichten Stelle aus der Box austreten.

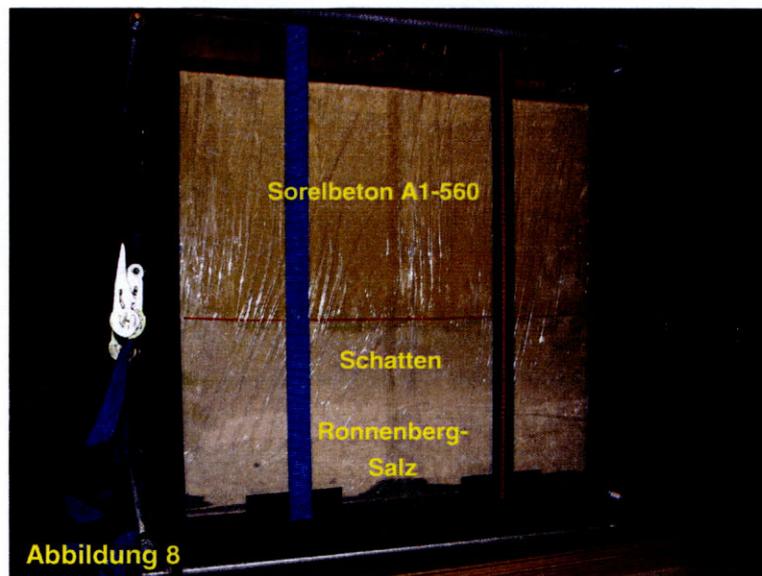


Abbildung 8

30.10.2008

Nach erfolgter Funktionsprüfung wurde die Demontage der Versuchsanordnung durchgeführt. An der Oberfläche des Betonkörpers wurde ein Bügel befestigt. An diesem wurde der Betonkörper mit Hilfe eines Gabelstaplers angeschlagen und angehoben (Abb. 9 und 10).



Abbildung 9



Abbildung 10

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
Ä						BE	BZ	0001	00	

In einem weiteren Schritt erfolgte die Demontage der Box (Abb. 11).



Abbildung 11

Ein Teil des Salzgruses haftete am Betonkörper. Die Mächtigkeit dieser Salzschrift stimmte mit der Form des „Schattens“ überein, der während der Kontrolle beobachtet werden konnte.

Der freigelegte Betonkörper (Beton-Salzgrus) wurde mit einer UV-Lampe beleuchtet. Hierdurch konnte die Eindringtiefe der Anmachflüssigkeit (mit beigemishtem Fluoreszenzfarbstoff Uranin) aus der Sorelbetonsuspension in den Salzgrus deutlich beobachtet werden (Abb. 12).

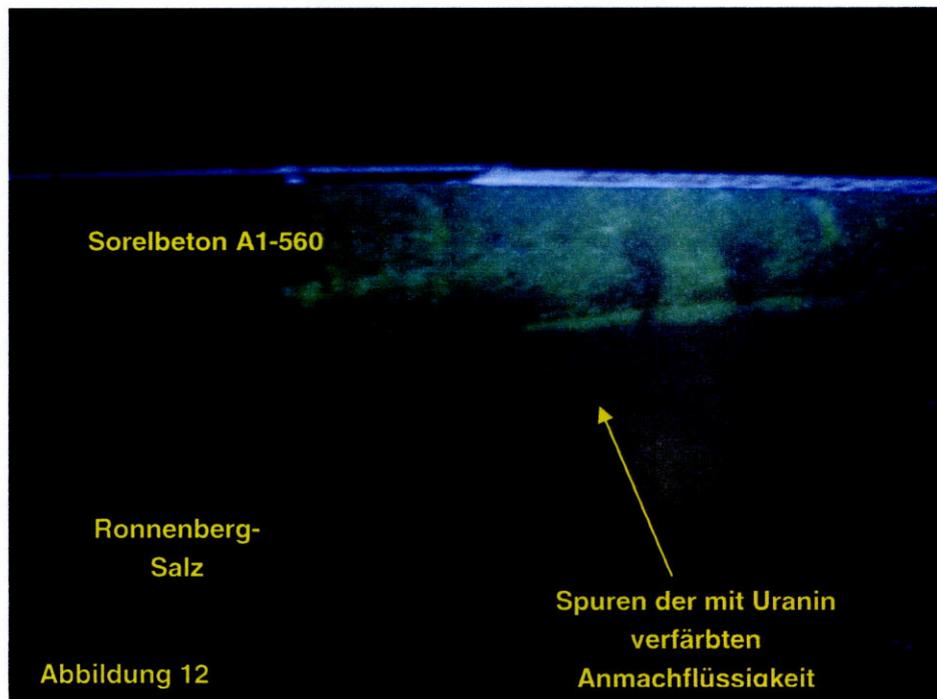


Abbildung 12

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

03.11.2008

Aus der Beobachtung des freigelegten Beton-Salzgrus-Körpers mit der UV-Lampe konnte festgestellt werden, dass die Spuren der mit Uranin verfärbten Anmachflüssigkeit nicht die gesamte, am Betonkörper haftenden Salzschrift durchdringt.

Im letzten Arbeitsschritt wurde (unter Beleuchtung mit UV-Licht) das am Betonkörper anhaftende Salz händisch soweit entfernt, bis die hellgelben (Uranin) Spuren der Anmachflüssigkeit freigelegt wurden (Abb. 13). Somit konnte eine minimale Eindringtiefe von 1 – 7 cm nachgewiesen werden (Abb. 14).



Abbildung 13



Abbildung 14

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

6.3 Vorbereitungsarbeiten

Nach der Funktionsprüfung wurde die Versuchsanordnung erneut aufgebaut. Resultierend aus den Beobachtungen vom 28.10.2008 wurde auf den Einsatz des Kupferrohres als Entlüftung verzichtet. Stattdessen wurde die Grundplatte der Box perforiert. Um ein Zusetzen der Bohrungen durch den Salzgrus aus der Box zu verhindern, wurde der Boden mit einem Vliestuch abgedeckt (Abb. 15 und 16).



Abbildung 15

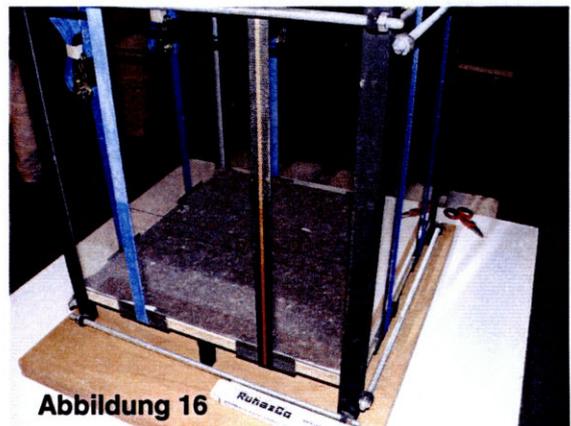


Abbildung 16

Für die Beobachtung der Temperaturentwicklung während der Versuchsdurchführung wurden in der Versuchsanordnung Thermoelemente platziert. Das Thermoelement T4 wurde 5 cm oberhalb der Bodenplatte im Salzgrus positioniert. Das Thermoelement T3 wurde 12 cm oberhalb der Bodenplatte (nach den Ergebnissen aus dem Vorversuch potentieller Eindringbereich von Feuchtigkeit) im Salzgrus angebracht. Das Thermoelement T2 wurde in den Kontaktbereich Beton/Salzgrus eingebunden. Das Thermoelement T1 wurde zum Abschluss der Versuchsdurchführung in die Sorelbetonsuspension gegeben (Abb. 17). Alle Thermoelemente (Abb. 18) wurden an Temperatur-Messgeräte mit Loggerfunktion (Fa. GREISINGER, Typ GMH 3250) angeschlossen.

Es wurde insgesamt, wie während der Funktionsprüfung, 65,0 kg Ronnenberg-Salzgrus vorgelegt. Bei einem Volumen von 50 Liter wird die Schüttdichte mit $1,3 \text{ g/cm}^3$ berechnet.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	



Abbildung 17



Abbildung 18

6.4 Versuchsdurchführung

Am 20.11.2008 wurde die Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbetonsuspension in Salzgrus durchgeführt. Auch hier wurden 120 kg Suspension A1-560 hergestellt. Von der Suspension wurden Teilmengen auf die 20 cm hohe Salzgrusschüttung aufgegeben bis eine Füllhöhe von 42 cm im Gefäß erreicht wurde (Salzgrus+Sorelbeton). Als Farbindikator wurde der Anmachflüssigkeit Uranin zugesetzt. Nach Herstellung wurde die Suspension in Teilmengen in die Box gegeben (Abb. 19 und 20).



Abbildung 19

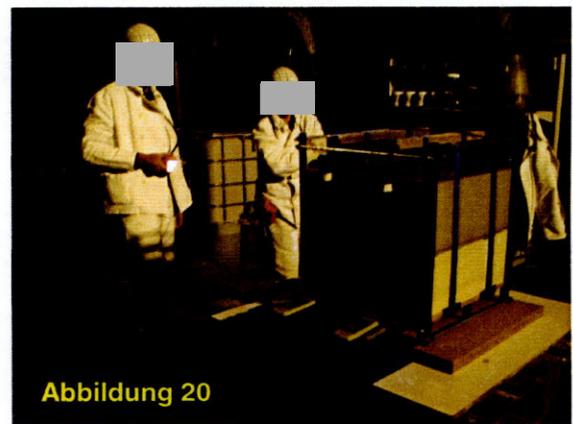


Abbildung 20

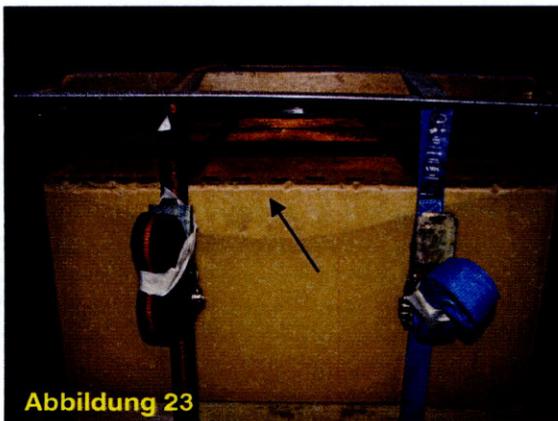
Während der Kontrolle der Box am 21.11.2008 konnten ähnliche Beobachtungen, wie nach der Funktionsprüfung vom 28.10.2008 gemacht werden. Die folgenden Abbildungen (Abb. 21 und 22) zeigen beispielsweise das Absinken des Betonkörpers in der Box. Dieses konnte sowohl an der Oberfläche als auch unterhalb der 20-cm-Markierung mit 7 mm gemessen werden.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	



Am 24.11.2008 vor Demontage der Versuchsanordnung wurden zusätzliche Beobachtungen gemacht, die während der Kontrolle nach der Funktionsprüfung am 28.10.2008 nicht eingetreten waren:

- Im oberen Bereich der Box (Abb. 23) wies der Betonkörper keinen Kontakt zu Plexiglaswand auf.
- Im Salzgrus unterhalb des Eindringbereiches (Abb. 24) entstanden stellenweise horizontal verlaufende Luftspalten mit einer Öffnungsweite von ca. 1,5 mm, die an allen Seiten der Box beobachtet wurden.



Im weiteren Verlauf wurde die Versuchsanordnung demontiert und der Betonkörper ausgeschalt (Abb. 25 und 26).

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	



Abbildung 25



Abbildung 26

Wie bei der Funktionsprüfung haftete auch hier ein Teil des Salzgruses am Beton. Die Mächtigkeit dieser Salzschiicht war jedoch geringer und stimmte nicht mit der Form des „Schattens“ überein, der während der Kontrolle am 21.11.2008 beobachtet und mit 7 bis 10 cm gemessen wurde.

Während der Beleuchtung des freigelegten Körpers mit UV-Licht konnten nahezu ähnliche Beobachtungen wie bereits in den Voruntersuchungen (siehe Kapitel 6.3) gemacht werden. Exemplarisch ist eine Detailaufnahme in Abbildung 27 dargestellt.

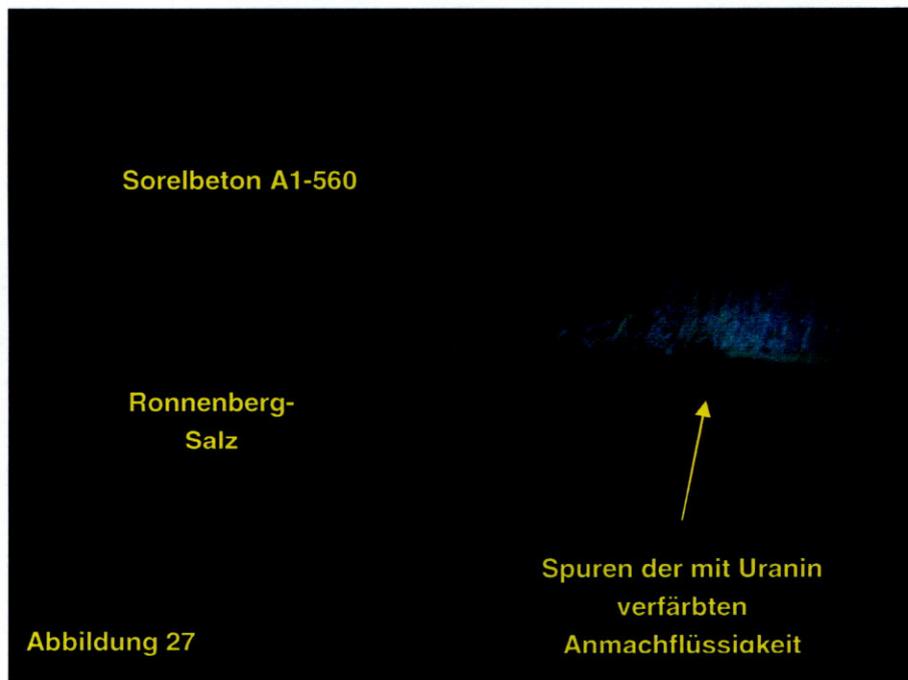


Abbildung 27

Abschließend wurde (unter Beleuchtung mit UV-Licht) das am Betonkörper anhaftende Salz händisch soweit entfernt, bis die hellgelben (Uranin) Spuren der Anmachflüssigkeit freigelegt wurden. Somit konnte eine minimale Eindringtiefe von 3 bis 5 cm nachgewiesen werden.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE-TEC DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
	A						BE	BZ	0001	00	

6.5 Ergebnisse Glasboxversuch

6.5.1 Suspensionsparameter

Begleitend zur Versuchsdurchführung wurden entsprechend den aktuellen Arbeitsanweisungen die in Tabelle 1 aufgeführten Suspensionsparameter bestimmt. Die Einzeldaten finden sich im Arbeitsprotokoll vom 20.11.2008 (Anhang 1 und 1a).

Tabelle 1: Suspensionsparameter Glasboxversuch

Parameter	Dim.	Sorelbeton A1-560 (Versuch vom 20.11.2008)
Suspensions- temperatur	°C	34,5
Suspensions- leitfähigkeit	mS/cm	18,68
Suspensions- dichte	g/cm ³	1,80
Fließrinnen- maß	mm	680
Luftporengehalt	%	4,5
quasiadiabatische Maximaltemperatur	°C	72,4

6.5.2 Temperaturentwicklung

Die Aufzeichnung der Temperaturentwicklung (Thermoelemente T1 – T4) der gesamten Versuchsanordnung wurde am 24.11.2008 abgeschlossen. Die Auswertung der Daten wird im Anhang 2 grafisch dargestellt.

Danach zeigt der Sorelbeton infolge der Temperaturabführung mit 55,8°C nach 15 h gegenüber der quasiadiabatischen Temperaturmessung (T_{max} 72,4°C nach 21,2 h) eine deutlich geringere Maximaltemperatur. Direkt in der Kontaktzone Beton/Salzgrus werden nach 15,9 h 54,6°C gemessen und im darunterliegenden Durchfeuchtungsbereich nach 18,0 h 49,9°C. Im liegenden, trockenen Salzgrus wird nach 22,2 h das Temperaturmaximum mit 43,5°C erreicht.

6.5.3 Überstandslösung

Ca. 30 min nach Abschluss der Befüllvorganges kam es zur temporären Bildung von flüssiger Phase auf der Betonoberfläche mit einer Schichtdicke von ca. 1 mm, die sich während des Ab-

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

bindeprozesses auflöste. Entmischungserscheinungen (Verlust der Sedimentationsstabilität) oder eine substantielle Bildung von Überstandslösung (Bluten) sind nicht erkennbar gewesen.

6.5.4 Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit

Anhand der Wärmeentwicklung und der visuellen Befunde der Eindringfront unter UV-Licht wird davon ausgegangen, dass die Eindringfront von Lösung im Liegenden der Kontaktzone ca. 1 – 5 cm beträgt. In diesem Bereich zeigt das UV-Licht die Fluoreszenzerscheinungen des Uranintracers in der Anmachflüssigkeit. Die Mächtigkeit der Eindringfront variiert und ist offensichtlich vom lokalen Verdichtungsgrad des Salzgruses abhängig.

Die Mächtigkeit der sich darunter ausgebildeten Durchfeuchtungszone im Salzgrus („Schatten“) beträgt ca. 7 bis 10 cm. Sie zeigt unter UV-Licht keine Fluoreszenzerscheinungen.

6.5.5 Absenkverhalten

Durch die Auflast des Betons (120 kg) und durch das Eindringen der Anmachflüssigkeit wurde der Salzgrus verdichtet. Es wurde ein Absenken des Betonkörpers an der Oberfläche und im Bereich der 20-cm-Markierung mit 7 mm gemessen.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

7 Anwendungsversuch Säulen

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus dem Eindringversuch in der Glasbox wurde eine weitere Untersuchungskampagne in KG-Rohren durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung der Eindringtiefe der Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in den Salzgrus unter Berücksichtigung der hydrostatischen Belastung der anstehenden Betonsuspension. Hierfür waren Betonierhöhen von ca. 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m vorgesehen.

7.1 Untersuchungsumfang

Die Untersuchungen wurden, vergleichbar dem Anwendungsversuch Glasbox, in folgende Arbeitsschritte gegliedert:

- Montage der Versuchsanordnung zur Prüfung des Eindringverhaltens,
- Durchführung des Versuches incl. begleitenden Baustoffuntersuchungen (Suspensionsdichte, Suspensionstemperatur, Fließbrinnenmaß, Luftporengehalt und Temperaturüberwachung der Versuchsanordnung),
- Demontage der Versuchsanordnung,
- Auswertung der Ergebnisse,
- Dokumentation der Ergebnisse,
- Bewertung der Ergebnisse.

Die Untersuchungen wurden in der 49. und 50. KW 2008 auf der 775-m-Sohle der SchachtanlageASSE im Bereich der Pilotströmungsbarriere A2 (PSB A2) durch die DBE TECHNOLOGY GmbH ausgeführt (vgl. Baustellenberichte aus dem Bautagebuch Dez. 2008).

Im Rahmen der Untersuchung wurden die in Kapitel 4 beschriebenen Baustoffkomponenten verwendet. Die Zusammensetzung der Sorelbeton-A1-560-Rezepturvariante mit ihrem gegenüber der Standardrezeptur Sorelbeton A1 erhöhtem Lösungsanteil blieb ebenfalls unverändert.

7.2 Vorbereitungsarbeiten

Im Vorfeld der durchzuführenden Untersuchungen wurde am 01.12.2008 im Bereich der PSB A2 mit der Montage der Versuchsanordnung begonnen. Es wurden insgesamt drei Säulen unterschiedlicher Höhe aus KG-Rohren (\varnothing innen 190 mm, Länge 550 mm) zusammengebaut.

In einem ersten Schritt wurden drei von unten geschlossene KG-Rohre mit Salzgrus befüllt. Die Verschlussdeckel wurden zuvor perforiert und mit Vliestuch ausgelegt. Der eingebrachte Salzgrus wurde durch Klopfen an den Außenwänden verdichtet. Nach dem Verdichten wurde die Salzgrus-Oberfläche in allen KG-Rohren mit 50,0 cm Höhe ab Deckelboden gemessen ($V = 14,2$ l). Da in jedes KG-Rohr 19,0 kg Salzgrus vorgelegt wurde, betrug die Schüttdichte

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

1,34 g/cm³. In Säule 3 (mit ca. 1,5 m höchste Füllsäule) wurden zur Überwachung der Temperaturentwicklung während der Versuchsdurchführung zwei Thermoelemente im Salzversatz installiert. Das Thermoelement T4 wurde ca. 5 cm oberhalb des Bodens positioniert. Das Thermoelement T3 wurde ca. 10 cm unterhalb der Oberkante Salzgrus im potentiellen Eindringbereich der Feuchtigkeit angebracht. Anschließend erfolgte das Aufstecken weiterer KG-Rohren und der Zusammenbau der Säulen (Abb. 28 und 29), so dass Säule 1 aus 2 Stück, Säule 2 aus 3 Stück und Säule 3 aus 4 Stück KG-Rohren zusammengebaut wurden.

Abschließend wurde in jeder Säule die noch verbliebene Höhe (gemessen von Oberkante Salzgrus bis Oberkante KG-Rohr) bestimmt:

Säule 1: 58,4 cm

Säule 2: 105,8 cm

Säule 3: 154,0 cm



Abbildung 28

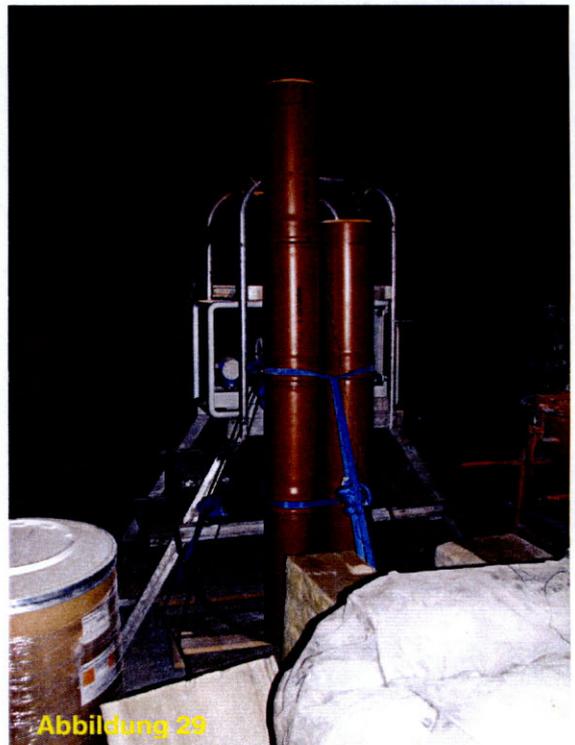


Abbildung 29

Für die Herstellung der Betonsuspension zum Befüllen der Säulen wurde der Einsatz einer Mischpumpe Typ PFT MS1 vorgesehen. Aus diesem Grund war es erforderlich, die zu verarbeitenden Baustoffkomponenten in Chargen zu konfektionieren. Basierend auf der Rezeptur Sorelbeton A1-560 wurden am 02.12.2008 vier Chargen (Abb. 30) vorbereitet. Jede Charge bestand aus:

MgCl ₂ -Lösung:	16,68 kg (mit Uranin gefärbt)
NaCl:	36,78 kg
MgO:	6,54 kg

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	



Abbildung 30

7.3 Versuchsdurchführung

Am 04.12.2008 erfolgte das Befüllen von drei Säulen mit der im Chargenbetrieb hergestellten Betonsuspension Sorelbeton A1-560 (siehe Abb. 31 und 32).



Abbildung 31

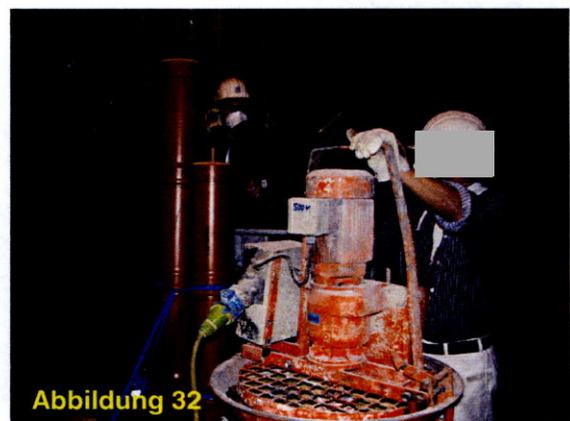


Abbildung 32

Vor dem Befüllen der Säule 3 wurden hier zwei weitere Thermoelemente installiert. Im Kontaktbereich Beton/Salsgrus wurde das Thermoelement T2 eingebracht. Das Thermoelement T1 wurde zum Abschluss der Versuchsdurchführung mittig in die Frischbetonsäule gegeben. Alle Thermoelemente wurden an Temperatur-Messgeräte mit Loggerfunktion (Fa. GREISINGER, Typ GMH 3250) angeschlossen.

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

Am 09.12.2008 war die Betonsuspension in allen Säulen ausgehärtet. Die Versuchsanordnung wurde demontiert. Nach Entfernen der Befestigungsurte wurden die Säulen auf vorbereitete Paletten gelegt und fixiert. Mit einem Winkelschleifer wurde bei jeder Säule zwischen Fußbereich und Übergangsbereich Steinsalz/Beton eine Öffnung herausgeschnitten (Abb. 33).

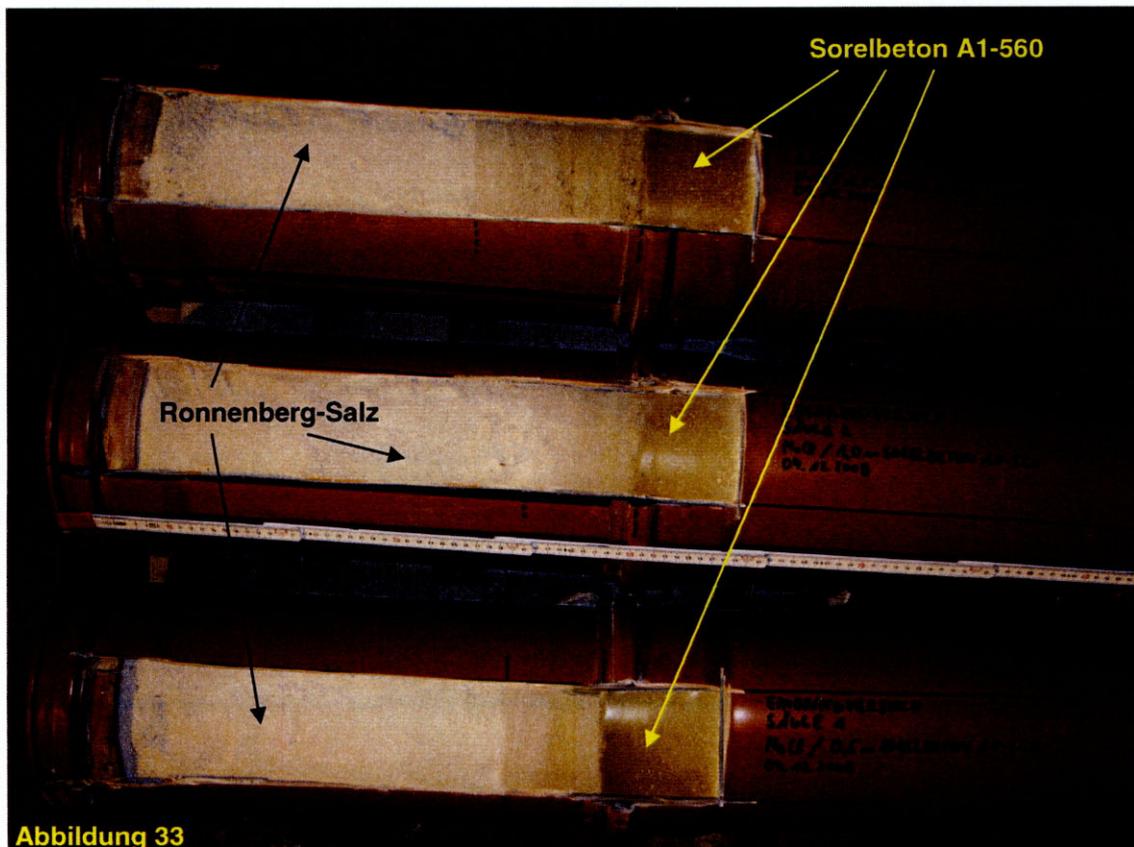
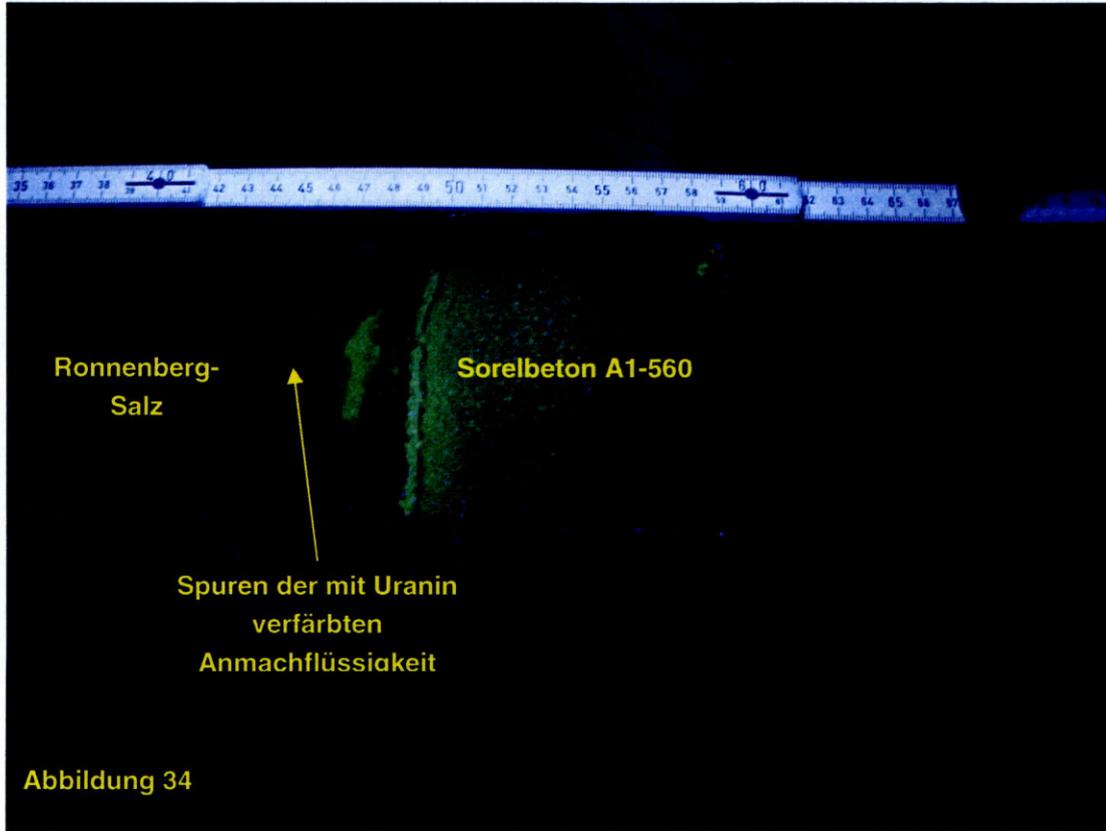


Abbildung 33

Die freigelegten Versuchskörper Salzgrus/Sorelbeton A1-560 wurden auch hier mit einer UV-Lampe beleuchtet, um die Eindringtiefe der Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton in den Salzgrus deutlich beobachten zu können. Exemplarisch ist eine Detailaufnahme (Säule 3) in Abbildung 34 dargestellt.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBETEC DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
	A						BE	BZ	0001	00	



7.4 Ergebnisse Säulenversuch

7.4.1 Suspensionsparameter

Begleitend zur Versuchsdurchführung wurden entsprechend den aktuellen Arbeitsanweisungen die in nachfolgender Tabelle 2 aufgeführten Suspensionsparameter untersucht und die folgenden Messwerte ermittelt. Die Einzeldaten finden sich im Arbeitsprotokoll vom 04.12.2008 (Anhang 3 und 3a).

Tabelle 2: Suspensionsparameter Säulenversuch

Parameter	Dim.	Sorelbeton A1-560 (Versuch vom 04.12.2008)
Suspensionstemperatur	°C	34,4
Suspensionsleitfähigkeit	mS/cm	16,06
Suspensionsdichte	g/cm ³	1,76
Fließrinnenmaß	mm	580
Luftporengehalt	%	8,5
quasiadiabatische Maximaltemperatur	°C	69,6

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NN A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	NNNN	NN	
A						BE	BZ	0001	00	

7.4.2 Temperaturentwicklung

Die Aufzeichnung der Temperaturentwicklung (Thermoelemente 1 – 4) in Säule 3 wurde am 08.12.2008 abgeschlossen. Die Auswertung der Daten ist in Anhang 4 grafisch dargestellt.

Gegenüber der quasiadiabatischen Temperaturmessung (T_{\max} 69,6°C nach 21,2 h) beträgt die Maximaltemperatur innerhalb des abbindenden Sorelbetons in Säule 3 lediglich 46,6°C nach 14,7 h. Direkt in der Kontaktzone wurden 45,3°C nach 15,0 h gemessen. Der liegende Durchfeuchtungsbereich zeigt ein T_{\max} von 37,8°C nach 17,7 h. Im trockenen Salzversatz werden 34,1°C gemessen. Hier ist keine Temperaturerhöhung infolge des Abbindeprozesses des Sorelbetons erkennbar. Diese Temperatur entspricht der Umgebungstemperatur.

7.4.3 Überstandslösung

Ca. 30 min nach Abschluss des Betoniervorgangs war in den jeweiligen Säulen ein Film von ca. 1 - 2 mm angefärbte Lösung auf der Betonoberfläche erkennbar, der sich mit zunehmendem Abbindegrad auflöste.

7.4.4 Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit

Anhand der Fluoreszenzerscheinungen unter UV-Beleuchtung waren in allen drei Säulen Eindringtiefen der Anmachflüssigkeit von 30 – 40 mm erkennbar, d.h., es ist davon auszugehen, dass der Salzgrus im Bereich unterhalb der Kontaktzone Betonsuspension/Salzgrus nahezu vollständig durchfeuchtet war.

Die Eindringtiefe der Durchfeuchtungszone betrug 83 mm bei Säule 1, 103 mm bei Säule 2 und 153 mm bei Säule 3.

7.4.5 Absenkverhalten

Die hydraulischen Druckhöhen der Suspension in den einzelnen Säulen betrug ca. 10 kPa (Säule 1), ca. 18 kPa (Säule 2) und ca. 26 kPa (Säule 3). Trotz der unterschiedlichen Druckhöhen wurden in allen drei Säulen mit jeweils ca. 10 mm vergleichbare Absenkungen beobachtet.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	DBE-TEC DBE TECHNOLOGY GmbH
	N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
	A						BE	BZ	0001	00	

8 Zusammenfassung und Bewertung der Messergebnisse

Tabelle 3 fasst die Messergebnisse aus den Anwendungsversuchen Glasbox und Säulen zusammen.

Tabelle 3: Messergebnisse aus Glasbox- und Säulenversuchen

Parameter	Glasbox	Säulen		
		Säule 1	Säule 2	Säule 3
Füllhöhe der Betonsuspension (m)	0,22	0,56	1,03	1,52
Schüttdichte Ronnenbergsalz-Versatz (g/cm ³)	1,30	1,34	1,34	1,34
Hydraulische Druckhöhe (kPa)	4	10	18	26
Absenkbetrag nach Aushärten (mm)	7	10	10	10
Eindringtiefe der uraningefärbten Anmachflüssigkeit (mm)	30 - 50	40	40	40
Eindringtiefe der Feuchtigkeit (mm)	70 - 100	83	103	153
T _{max} , quasiadiabatisch der Prüfkörper (°C)	72,4	69,6		
T1 _{max} Betonsuspension (°C)	55,8			46,6
T2 _{max} Kontakt Salzversatz/Betonsuspension (°C)	54,6			45,3
T3 _{max} Durchfeuchtungszone (°C)	49,9			37,8
T4 _{max} Trockener Salzversatz (°C)	43,5			34,4

Aus den vorliegenden Messergebnissen werden folgende Bewertungen abgeleitet:

- 1) Die gewählten Versuchsanordnungen (Glasbox und Säulen) waren im Sinne der Aufgabenstellung geeignet.
- 2) Die Bildung von Überstandslösung (Bluten) ist ein kurzzeitiger, temporärer Effekt, der im Falle dieser Versuchsdurchführung auf den erhöhten Anteil an Anmachflüssigkeit in der Rezeptur zurückzuführen ist. Die Lösung wird vom Baustoff selbst verbraucht. Hinweise auf einen Verlust von Sedimentationsstabilität waren nicht erkennbar.
- 3) Das Absenkverhalten ist von der Geometrie des Betonkörpers abhängig. Im Fall der Säulenversuche bewirkt der Siloeffekt einen höheren Absenkwiderrstand und damit trotz unterschiedlicher Druckhöhe einen gleichmäßigen geringen Absenkbetrag. Die Absenkung tritt unmittelbar mit dem Betonierprozess ein. Die Kompaktion des liegenden Salzgruses beschränkt sich auf die obersten Zentimeter des durchfeuchteten Salzgruses.
- 4) Die Feuchtezone untergliedert sich in einen Bereich von wenigen Zentimetern mit starker Durchfeuchtung des Porenraumes und einen vergleichsweise größeren Bereich mit einer geringeren Befeuchtung des Porenraumes entlang der Korngrenzen (anhaltende Feuchtigkeit).
- 5) Die Temperaturentbreitung ist jeweils abhängig von der Geometrie des Betonkörpers. Auftretende Maximaltemperaturen liegen ca. 20 K unter Maximaltemperaturen, die unter isolierten Verhältnissen gemessen werden.

HIMGU / DBE TECHNOLOGY GmbH

Arbeitsprotokoll
Eindringverhalten von Anmachflüssigkeit aus Sorbeton A1 mit erhöhtem Laugenanteil (500 kg AF) in Salzschildung (Konnenberg-Salz)

Datum	Proben- gewicht (g)	Proben- bezeichnung	Arbeitslösung		Feststoffkomponente 1		Feststoffkomponente 2		Leit- fähigkeit (mS/cm)	Temp. (°C)	Dichte (g/cm ³)	Suspension Fließmaß (mm)	Luftporen- gehalt (%)	quasistab. max. Temp. (°C)	Bemerkungen				
			Bezeichnung	Menge (g)	Anteil (Ma-%)	Bezeichnung	Menge (g)	Anteil (Ma-%)								Bezeichnung	Menge (g)	Anteil (Ma-%)	
20.11.08	120000	Sorbeton A1 (500 AF)	MgCl ₂ -Lösung (Anmach- flüssigkeit)	33360	27,8	Steinsalz 0-4 mm (ESCO)	73560	61,3	MgO F4-200 L&V	13080	10,9	18,88	34,5	1,80	680	4,5	72,4	Suspension ist pedimentationsstabil Sut verarbeitbar Sehr gute Fließigenschaften	
		Sorbet A1 (500 AF) MgCl ₂ -Lsg. (27,8%) NaCl (0,3%) H ₂ O (71,9%) Pr. 1. 20.11.2008																	
Summe:	120000			33360			73560												

Bearbeiter:

Beucher:

Mischverfahren Sorbeton A1

- MgCl₂-Lösung (mit Urrein gefüllt) vorgelegt
- Feststoffkomponente Steinsalzlösung zugegeben und homogenisiert
- MgO in Teilmengen zugegeben und homogenisiert
- nach vollständigem Homogenisieren 3 min gemischt

Emulsions-Suspensionsverfahren

- Bestimmung der Suspensionsdichte mit WTW LF 197, Sonde TetraCon 326
- Bestimmung der Suspensionsdichte mit Spüluwaage, Fa. Leuter
- Bestimmung der Anmachflüssigkeitdichte mit Densito 30 PX, Fa. Mettler Toledo
- Bestimmung des Fließmaßes mit Fließrinne (Fließrinne justiert und vor Befüllen des Trichters feucht ausgewischt)
- Ableseung des Fließmaßes nach 60 sec
- Ermittlung des Luftporengehaltes der Suspension, Luftgehaltsprüfer Fa. TESTING
- Ermittlung der quasistabilen Maximaltemperatur der Suspension, Verfahren mit Styrodur

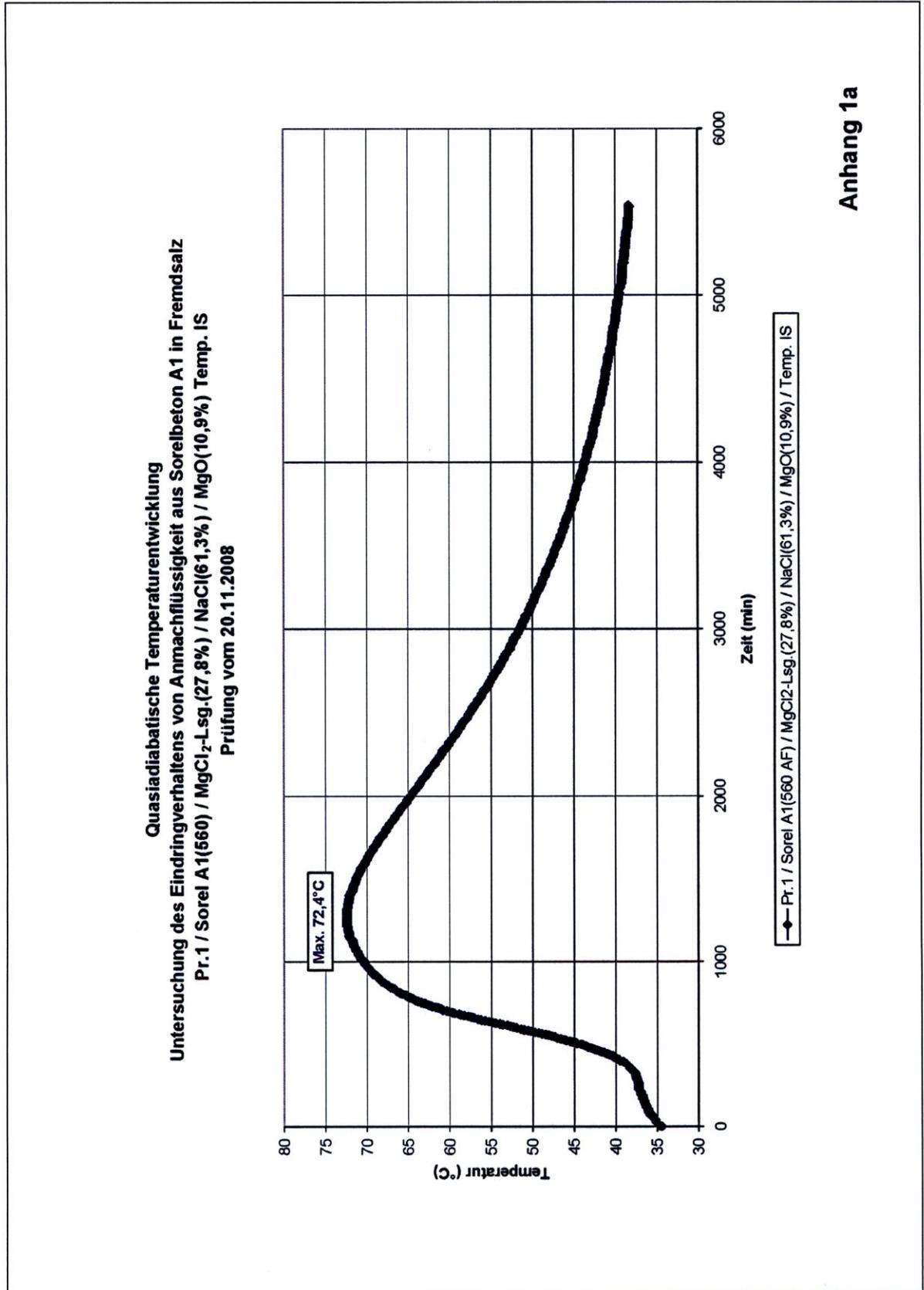
Mischer:
Beba-Handmischer

Anhang 1

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AAANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A						BE	BZ	0001	00

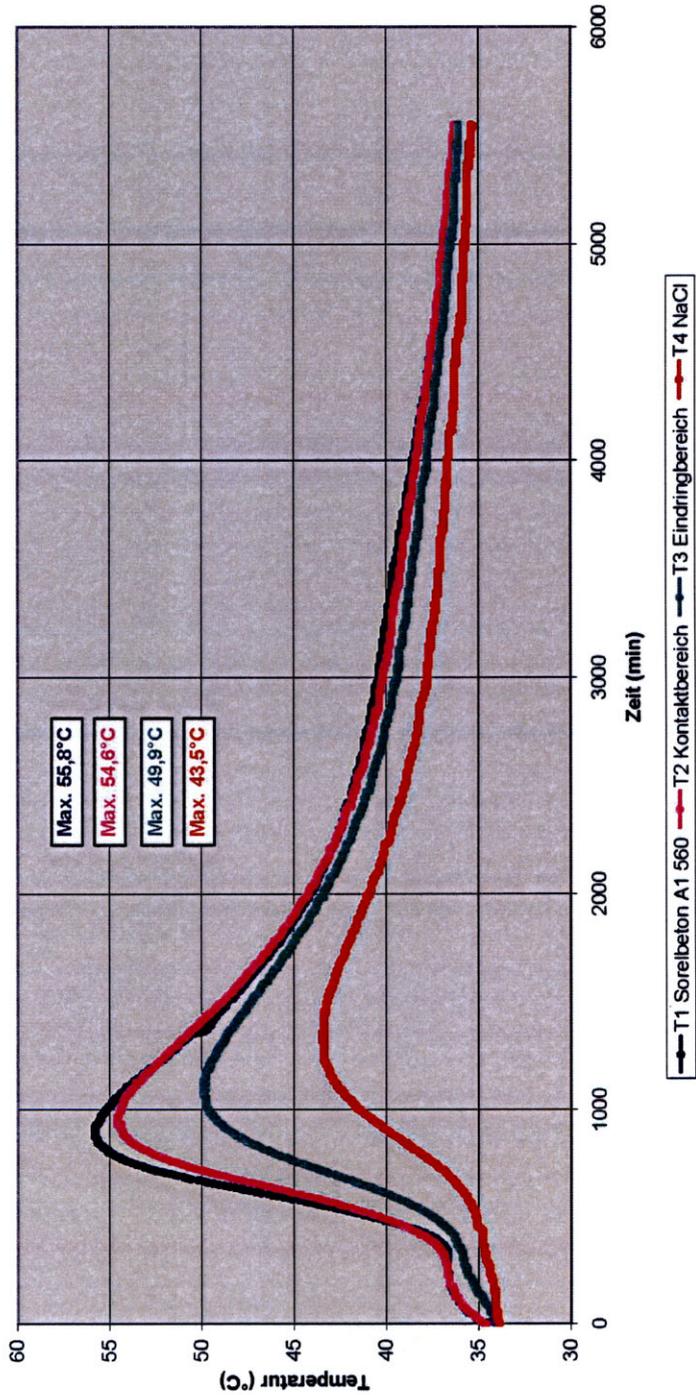


Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A						BE	BZ	0001	00



Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A						BE	BZ	0001	00

Temperaturentwicklung Glasbox
Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1 in Fremdsalz
T1(Sorelbeton A1 560), T2 (Kontaktbereich Sorel A1/NaCl), T3(Eindringbereich), T4(NaCl)
Prüfung vom 20.11.2008



Anhang 2

Arbeitsprotokoll
Ergänzende Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorbeton A1 mit erhöhtem Laugenanteil (560 kg AP) in Salzschüttung (Ronnenberg-Salz)

Datum	Proben- gewicht (g)	Proben- bezeichnung	Anmachlösung		Feststoffkomponente 1		Feststoffkomponente 2		Leit- fähigkeit (mS/cm)	Temp. (°C)	Dichte (g/cm³)	Suspension Fließmaß (mm)	Luftporen- gehalt (%)	quasistab. max. Temp. (°C)	Bemerkungen
			Bezeichnung	Menge (g)	Anteil (Ma-%)	Bezeichnung	Menge (g)	Anteil (Ma-%)							
04.12.08	60000	Sorbeton A1-560 Charge 1		16680	27,8		36780	61,3							
	60000	Sorbeton A1-560 Charge 2		16680	27,8		36780	61,3							
	60000	Sorbeton A1-560 Charge 3	MgCl ₂ -Lösung (Anmach- flüssigkeit)	16680	27,8	Steinsalz 0-4 mm (ESCO)	36780	61,3							
		Sorbeton A1-560 Charge 4		16680	27,8		36780	61,3							
	60000	Sorbeton A1-560 MgCl ₂ -Lsg (27,8%) MgO (0,3%) Temp. IS PT-1 04.12.2008													Suspension ist sedimentationsstabil Sole Fließeigenschaften Bildung von Filterkuchen in der Pumpleitung
Summe:	240000			66720			147120								

Bearbeiter:

Mischverfahren Sorbeton A1

- MgCl₂-Lösung (mit Urtem gefrier) vorgelegt
- Feststoffkomponente Steinsalzformung zugeben und homogenisiert
- MgO in Teilmengen zugeben und homogenisiert
- nach vollständigem Homogenisieren 3 min gemischt

Ermittlung Suspensionsdichte

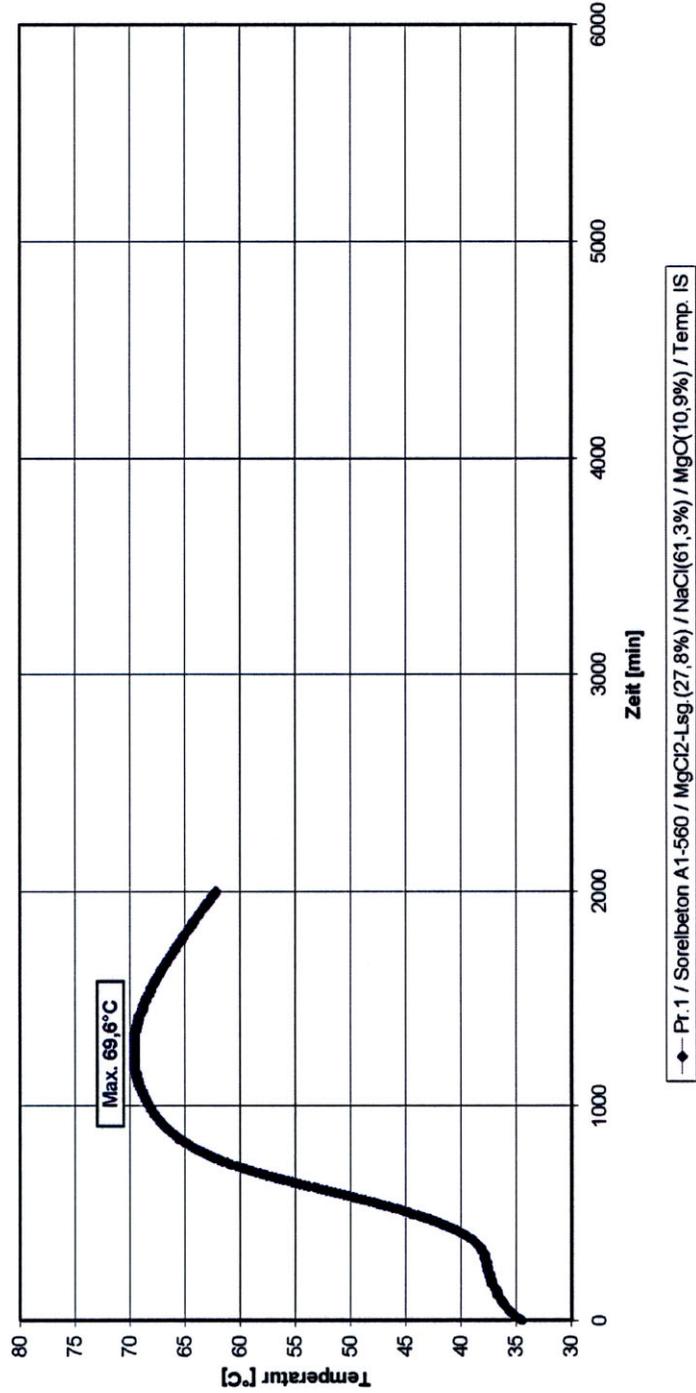
- Bestimmung der Suspensionstemperatur und -leitfähigkeit mit WTW LF 197, Sonde TetraCon 325
- Bestimmung der Suspensionsdichte mit Spüßwaage, Fa. Leudert
- Bestimmung des Fließmaßes mit Fließrinne (Fließrinne Justiert und vor Befüllen des Trichters frucht ausgewischt)
- Abreueung des Fließmaßes nach 60 sec
- Ermittlung des Luftporengehaltes der Suspension, Luftgehaltspfeifer Fa. TESTING
- Ermittlung der quasistatischen Maximaltemperatur der Suspension, Verfahren mit Styrodur

Mischer:
PFT-MS1-4flschpumpe

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AAANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A						BE	BZ	0001	00

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A						BE	BZ	0001	00

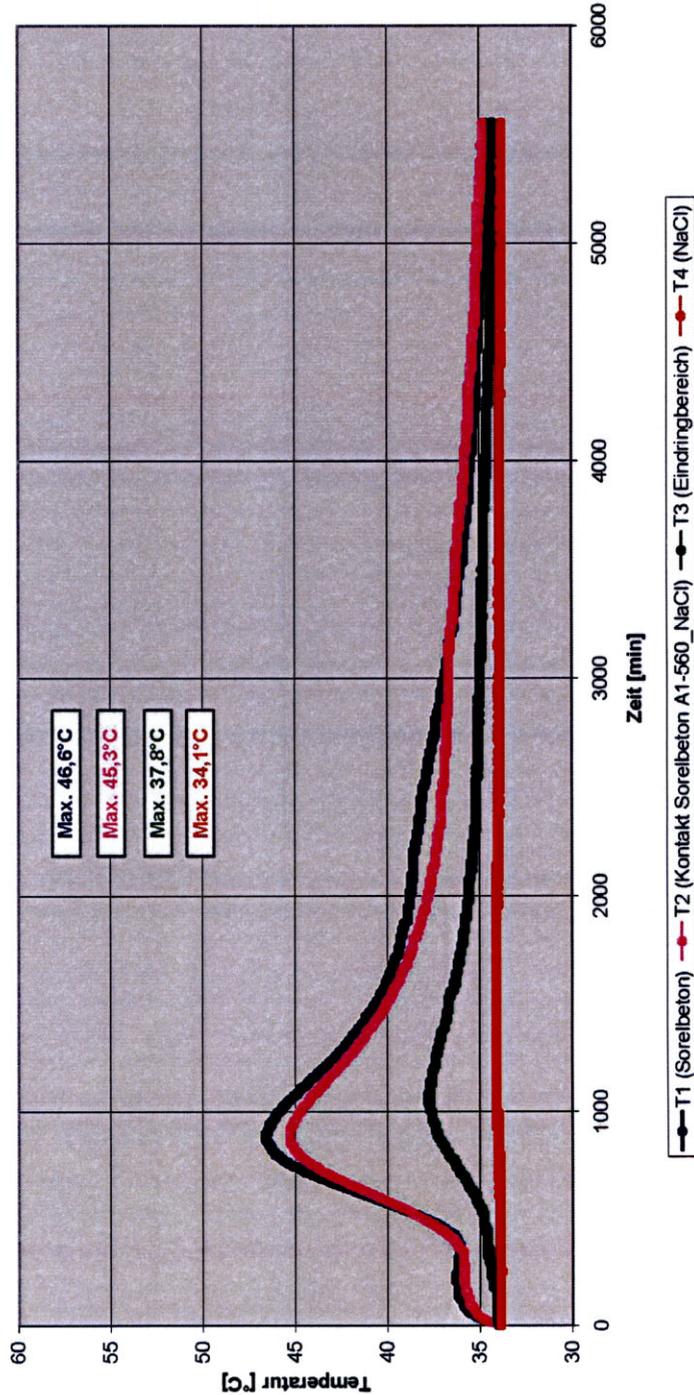
Quasiadiabatische Temperaturentwicklung
Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1 in Fremdsalz
Pr.1 / Sorelbeton A1-560 / MgCl₂-Lsg.(27,8%) / NaCl(61,3%) / MgO(10,9%) Temp. IS
Prüfung vom 04.12.2008



Anhang 3a

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
A						BE	BZ	0001	00

Temperaturentwicklung Säulenversuch
Untersuchung des Eindringverhaltens von Anmachflüssigkeit aus Sorelbeton A1-560 in Fremdsalz
T1 (Sorelbeton A1-560), T2 (Kontakt Sorelbeton A1-560_NaCl), T3 (Eindringbereich NaCl), T4 (NaCl)
Prüfung vom 04.12.2008



Anhang 4