

DECKBLATT

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

Kurztitel der Unterlage:
 Sorelbeton A1 - Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Ersteller / Unterschrift

DBETEC- 

Geprüft: 

DokId: 11407586

Titel der Unterlage:

**Sorelbeton A1 - Rezepturzusammensetzung
 und Materialeigenschaften**

Freigabevermerk:

Freigabedurchlauf

Stabsstelle Qualitätsmanagement und
 Dokumentation:

Datum: 11.03.09

Name: 

Unterschrift

Fachbereich/Projektleitung:

Datum: 10.03.2009

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	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-GmbHGesellschaft für Betriebsführung und Schließung
der Schachtanlage Asse II

Projekt	PSP-Element	Thema	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev.
NNA A	NNNNNNNNNN	NNA A AN	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	NNA AANN	AANNNA	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/ [Redacted]

Geprüft [Redacted]

DokID:

11407586

Stempelfeld:

Freigabedurchlauf

Freigabe/Abnahme Auftraggeber:

Datum: 5.1.09

Name:



Unterschrift

DBE TECHNOLOGY GmbH - Fachtechnik:

Datum: 15.12.2008

Name:

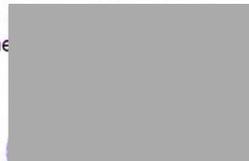


Unterschrift

Freigabe DBE TECHNOLOGY GmbH:

Datum: 17.12.2008

Name:



Unterschrift

	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	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	 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: 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	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0005	00	

Verzeichnis der Abbildungen

Blatt

Abbildung 4.1: Einaxiale Druckfestigkeit von Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden sowie von Probekörpern, die baubegleitend in der Schachtanlage Asse hergestellt wurden.	16
Abbildung 4.2: Statischer E-Modul von Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden sowie von Probekörpern, die in der Schachtanlage Asse 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 ($\sigma_3 = 0,0$ 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.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	
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	AANNNA	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	AANNNNA	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 TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	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, Mahlfineinheit) 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 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	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	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	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0005	00	

Durch visuelle Prüfungen der Oberflächen und der Schnittflächen von Bohrkernen und Probestücken 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 SchachanlageASSE 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	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			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 1 bis 2 mm eingemessen und die dreidimensionalen Koordinaten der gekennzeichneten Punkte bestimmt. Die Messunsicherheit der markscheiderischen 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	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

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	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			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 Prüferie 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

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 72,0 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
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
Einzelmesswerte	[MPa]	33,0 ¹	37,0 ¹	40,0 ¹	43,0 ¹	62,4
		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

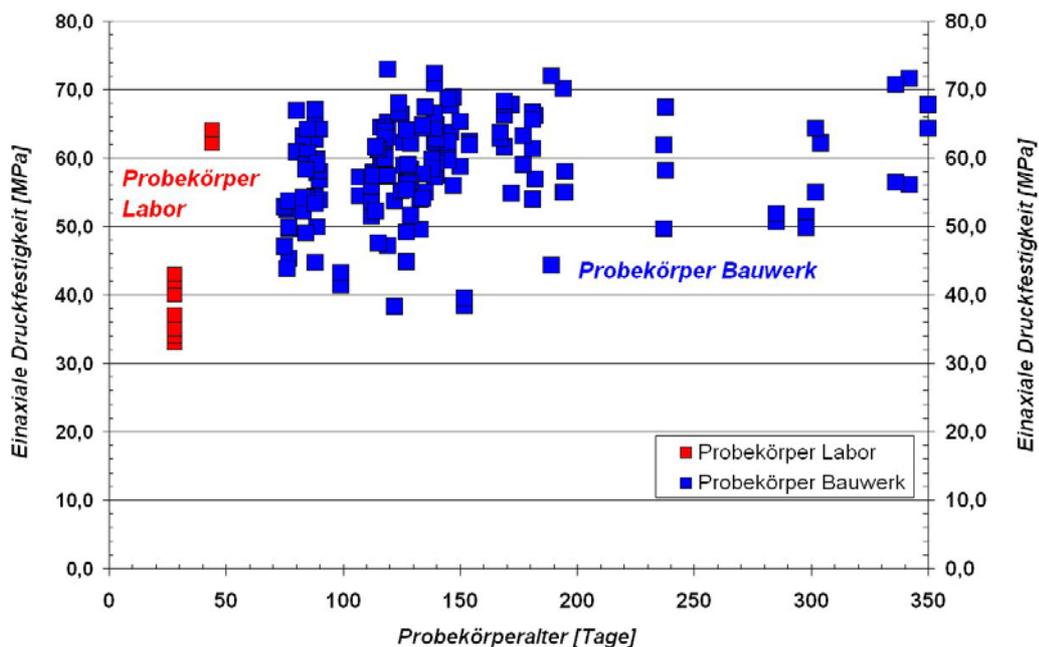


Abbildung 4.1: Einaxiale Druckfestigkeit von Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden sowie von Probekörpern, die baubegleitend in der Schachanlage Asse hergestellt wurden.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	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	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	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.

Erhärtungszeit	[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	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

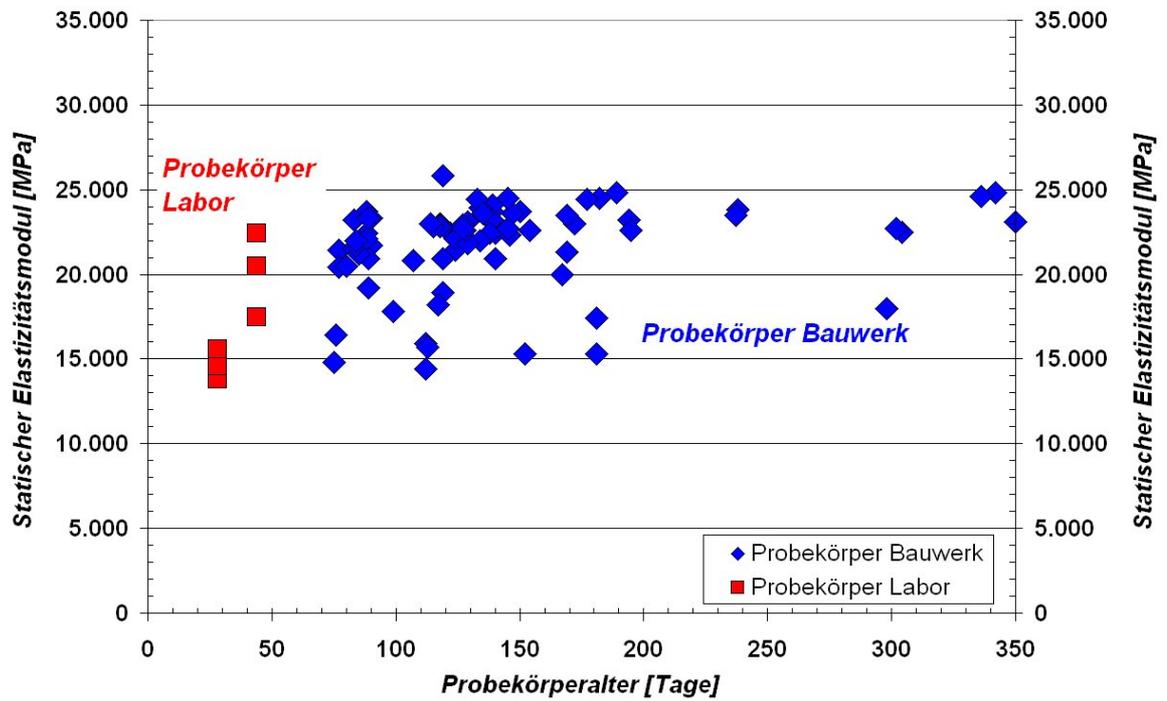


Abbildung 4.2: Statischer E-Modul von Probekörpern, die im Labor hergestellt wurden sowie von Probekörpern, die in der Schachanlage Asse baubegleitend hergestellt wurden.

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.

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.

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

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

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.

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 4.4 und 4.5 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				

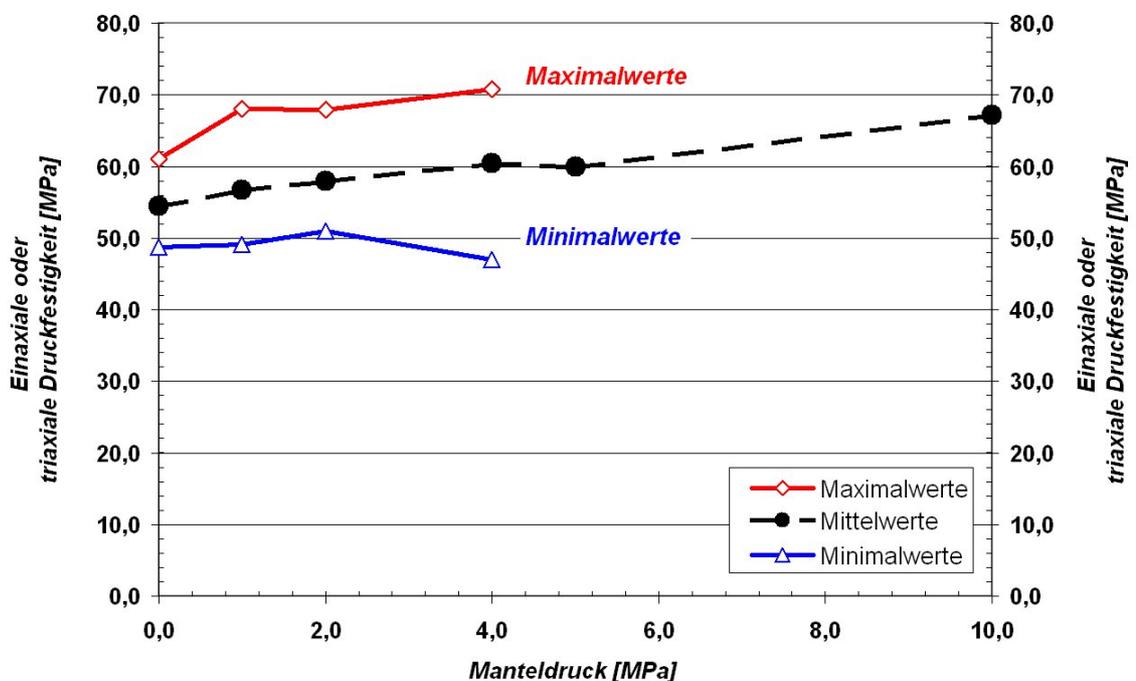


Abbildung 4.3: Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der triaxialen Druckfestigkeiten in Abhängigkeit des Manteldrucks. Ergänzt sind von einzelnen Probekörperserien die entsprechenden einaxialen Druckfestigkeiten dargestellt ($\sigma_3 = 0,0$ MPa).

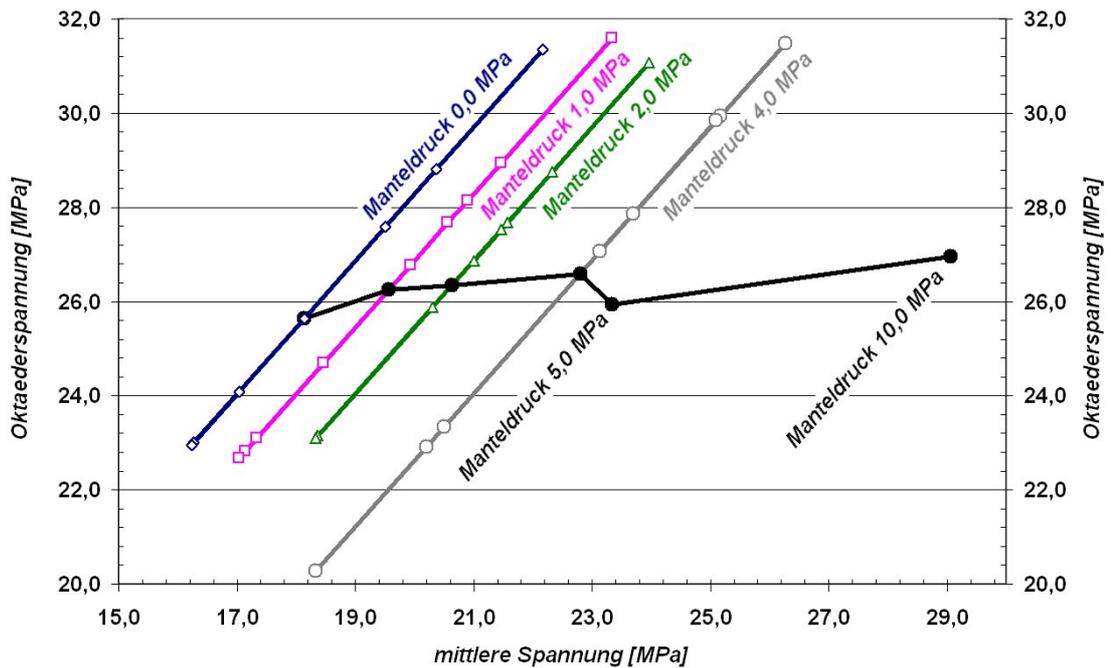


Abbildung 4.4: Abhängigkeit der Oktaederspannung im Bruchzustand von der mittleren Spannung. Die Mittelwerte der Messresultate sind durch die schwarze Linie mit schwarzen Punkten gekennzeichnet.

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):

$$\sigma_1 = a \cdot \sigma_3 + d \quad (4.4)$$

$$\phi = \arcsin [(a - 1) / (a + 1)] \quad (4.5)$$

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

Die ermittelten Werte sind angegeben in Tabelle 4.8.

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} 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 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	 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 4.6 dargestellt.

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			AJ			GH	BY	0005	00	

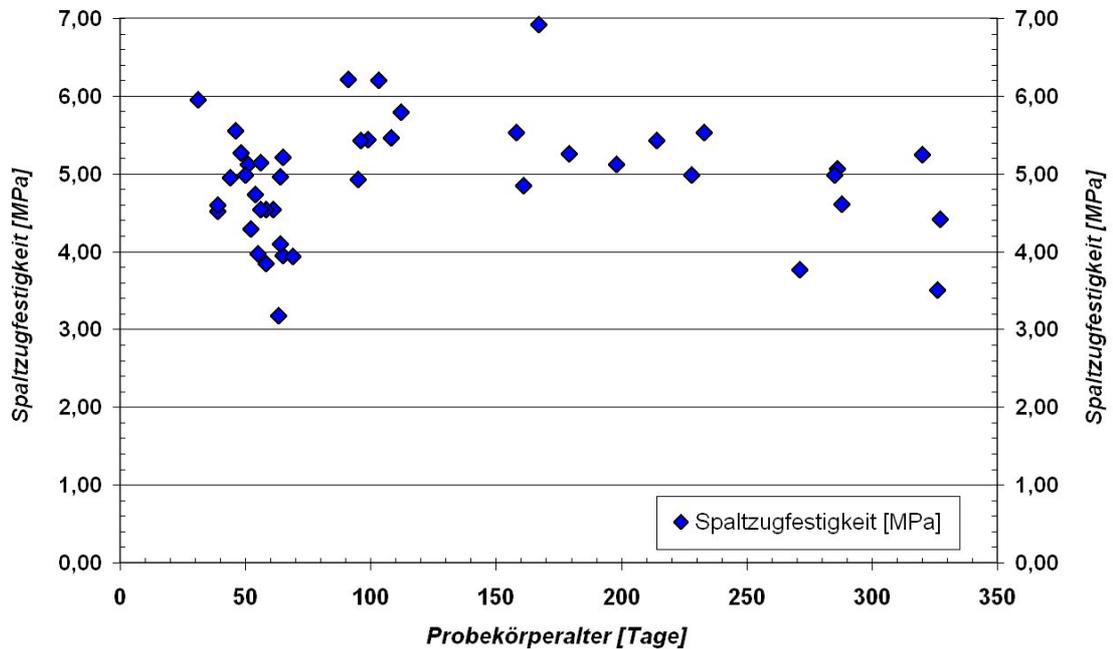


Abbildung 4.5: Spaltzugfestigkeit baubegleitend hergestellter Probekörper in Abhängigkeit des Probekörperalters.

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 TECHNOLOGY GmbH
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	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 (siehe Kapitel 4.9) 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 Lasteintragsplatten 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 Lasteintragsplatten 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	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	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 Prüfserie 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	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

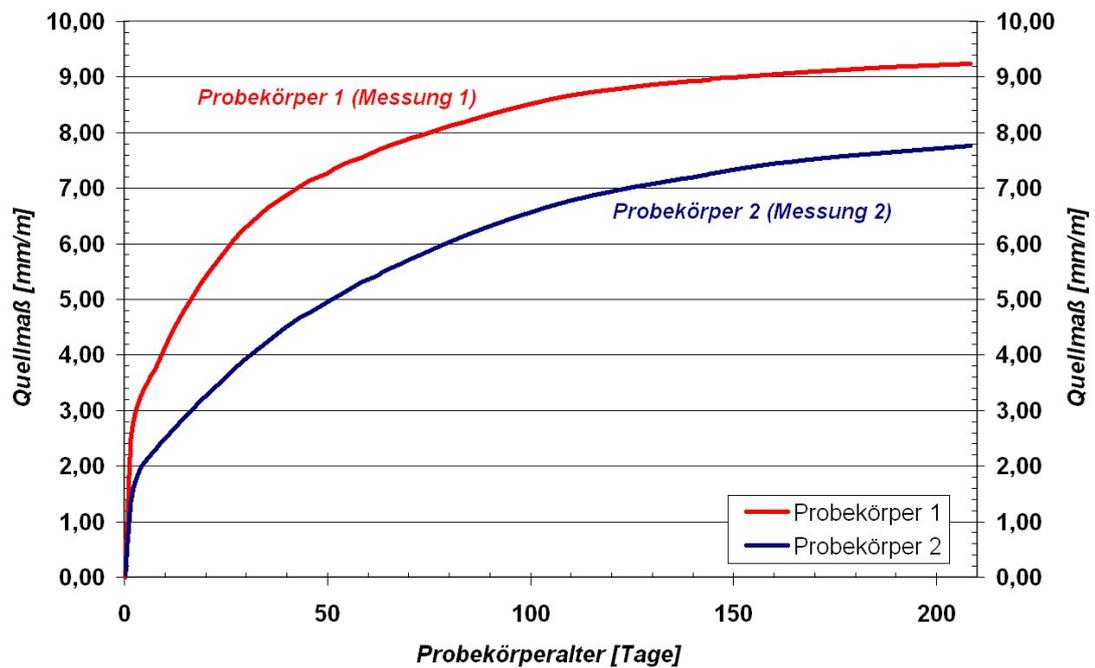


Abbildung 4.6: Quellmaß von Probekörpern, die bei 20 °C lagerten, in Abhängigkeit des Probekörperalters.

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 SchachanlageASSE 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	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

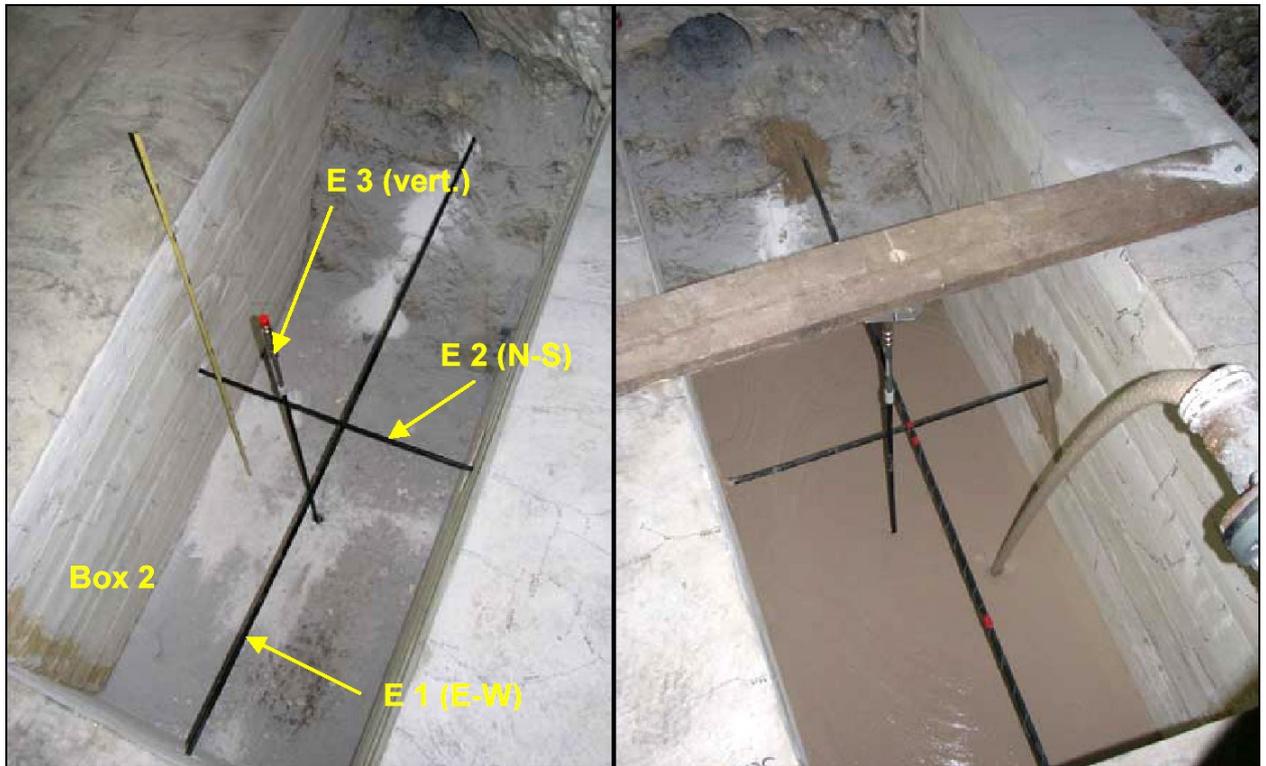


Abbildung 4.7: Widerlagerbauwerk zur Ermittlung des Baustoffquellens unter In-situ-Bedingungen vor und während des Befüllens mit Suspension. Die parallel zu den Begrenzungen des Widerlagerbauwerkes und senkrecht zueinander angeordneten Kunststoffanker-Extensometer sind mit E1, E2 und E3 bezeichnet. Das 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-TEC DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	

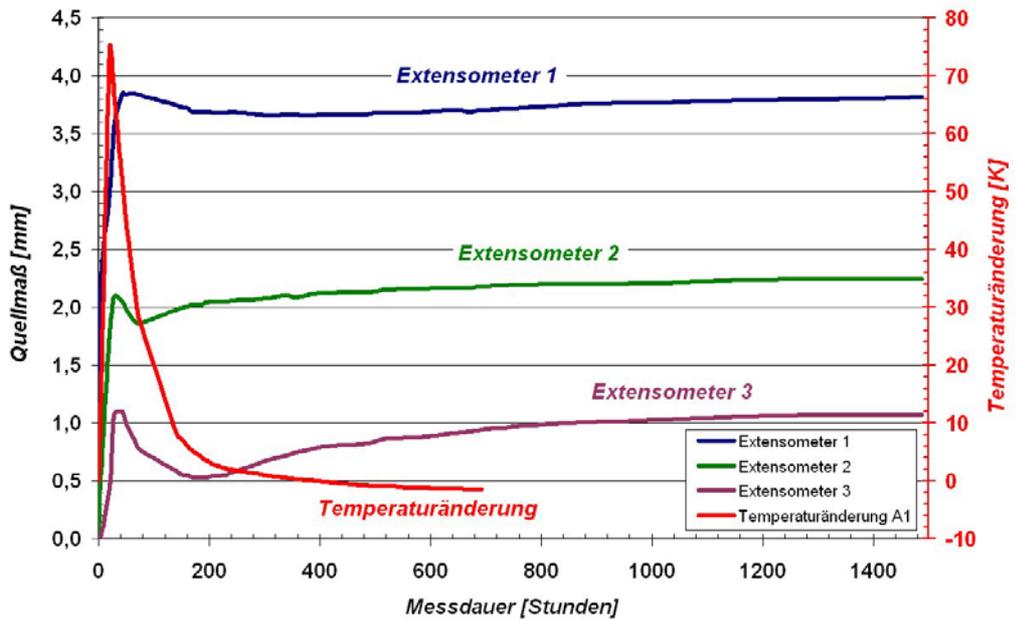


Abbildung 4.8: Resultate der Extensometermessungen sowie Änderung der Baustofftemperatur nach dem Füllen der Widerlagerbox.

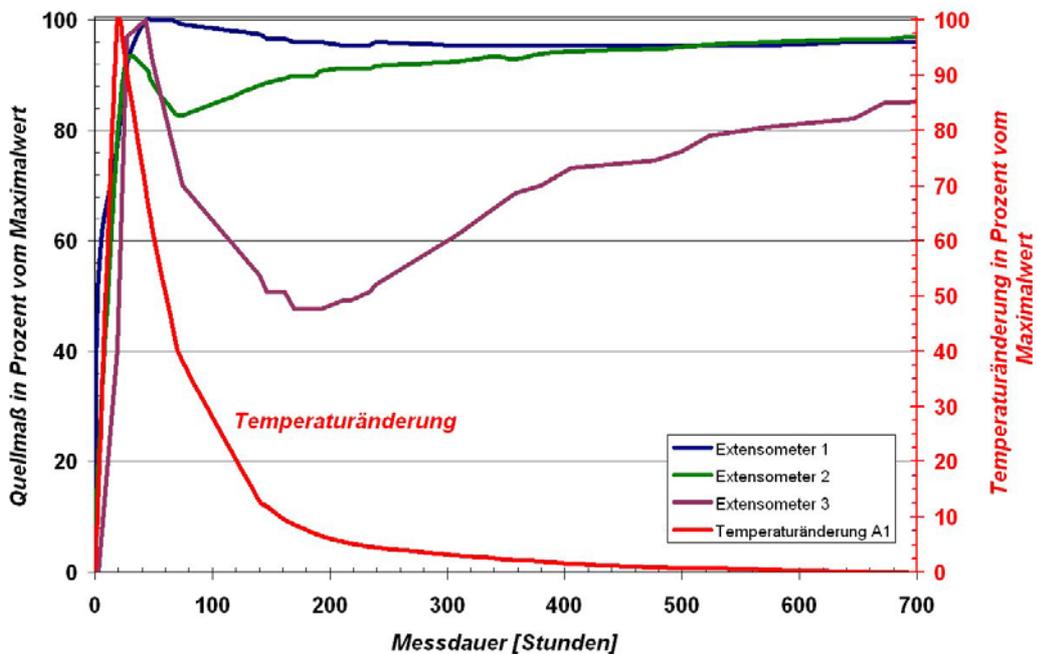


Abbildung 4.9: Resultate der Extensometermessungen sowie Änderung der Baustofftemperatur nach dem Füllen der Widerlagerbox jeweils normiert auf den ermittelten Maximalwert.

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

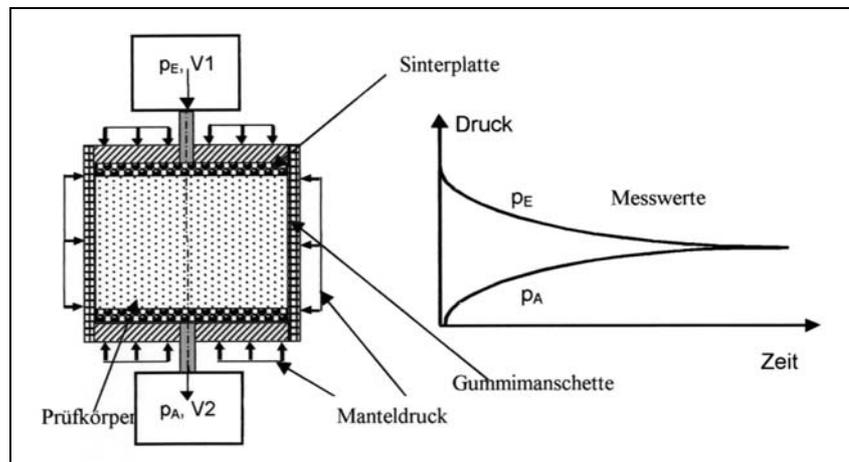


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung der Zwei-Kammer-Methode. In Folge der Probekörperpermeabilität sinkt der Druck in der Eingangskammer V1 und steigt der Druck in der Ausgangskammer V2 an.

Die Probekörper wurden im Labor durch Füllen von Formen mit frisch angemischter Suspension hergestellt. Des Weiteren wurden in der Schachanlage 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 MgCl₂-Lösung und abschließend die Bestimmung der Lösungspereabilität. Als Strömungsfluide wurden Stickstoff (Gaspermeabilität) bzw. hochkonzentrierte MgCl₂-Lösung (Lösungspereabilität) 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 Schachanlage 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 TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	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.

Lösungspерmeabilität

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 Lösungspерmeabilität (hochkonzentrierte MgCl_2 -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]	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$5,4 \cdot 10^{-20}$	$1,2 \cdot 10^{-20}$	$1,6 \cdot 10^{-20}$
Mittelwert	[m ²]	$5,4 \cdot 10^{-20}$			
Minimalwert	[m ²]	$1,0 \cdot 10^{-20}$			

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	0005	00	

Gaseindringdruck

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

Die Untersuchungen erfolgten an drei gesättigten Proben (hochkonzentrierte $MgCl_2$ -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	AANNNA	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)

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

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.

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

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 luftdicht verschlossen und der Sensor mit einer Datenaufzeichnungseinheit verbunden.

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.

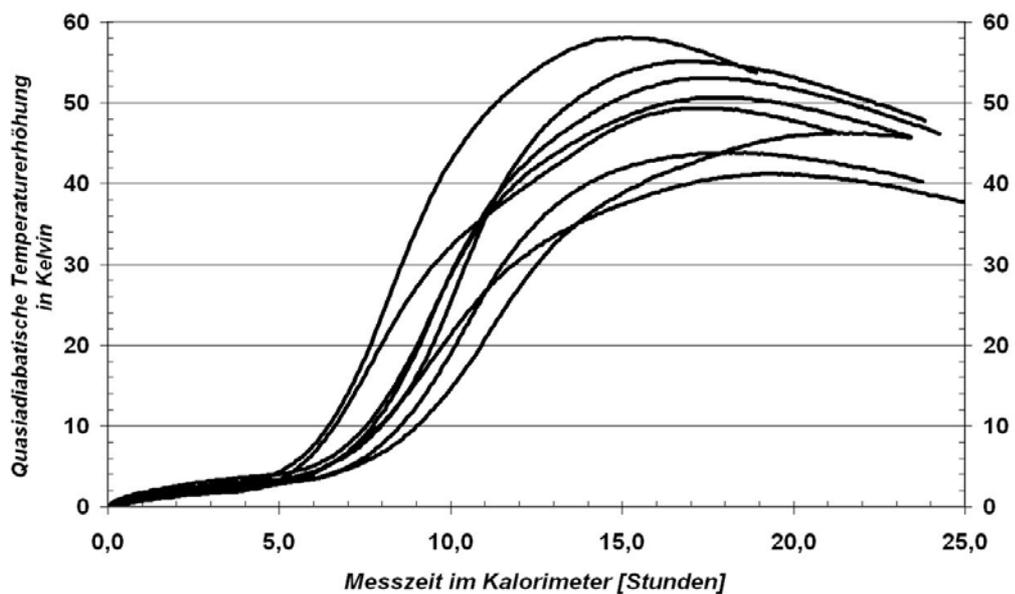


Abbildung 5.1: Messungen der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung von Sorelbeton A1.

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 Kalorimetern, 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.

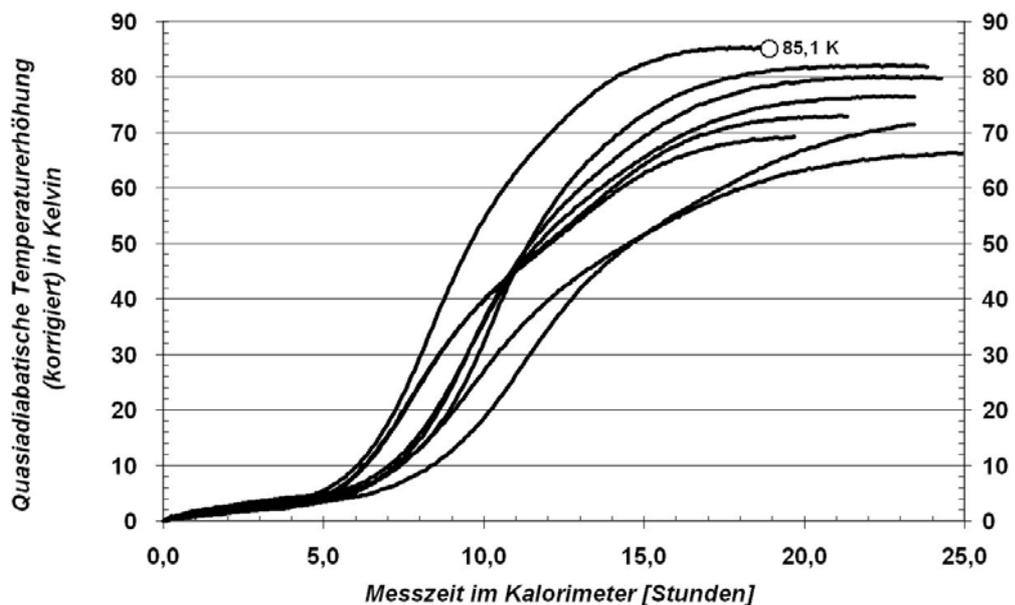


Abbildung 5.2: Messungen der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung von Sorelbeton A1 korrigiert um den Wärmeverlust des Messsystems.

	Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	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 $34 \cdot 10^{-6}$ 1/K und zwischen 20 °C und 90 °C $31 \cdot 10^{-6}$ 1/K.

	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			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 SchachtanlageASSE 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.

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.

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 – 8,14 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	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	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	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	A			AJ			GH	BY	0005	00	

- /12/ DIN 18124
Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte. Bestimmung der Korndichte. Kapillarpyknometer – Weithalpyknometer. 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 TECHNOLOGY GmbH
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	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
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			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	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	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**



	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 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	0005	00	

Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften

Anhang 1

Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton 2

1. Veranlassung und Aufgabenstellung
 Das Schließungskonzept für die Schachtanlage 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 Fluidruck eine Ersbelastung. 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 Verformungsmodulin 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-

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

Institut für Gebrügmmechanik GmbH Leipzig, Friederikenstraße 60, 04279 Leipzig, Teil/(Fax): 0341/33600-(0/9308)

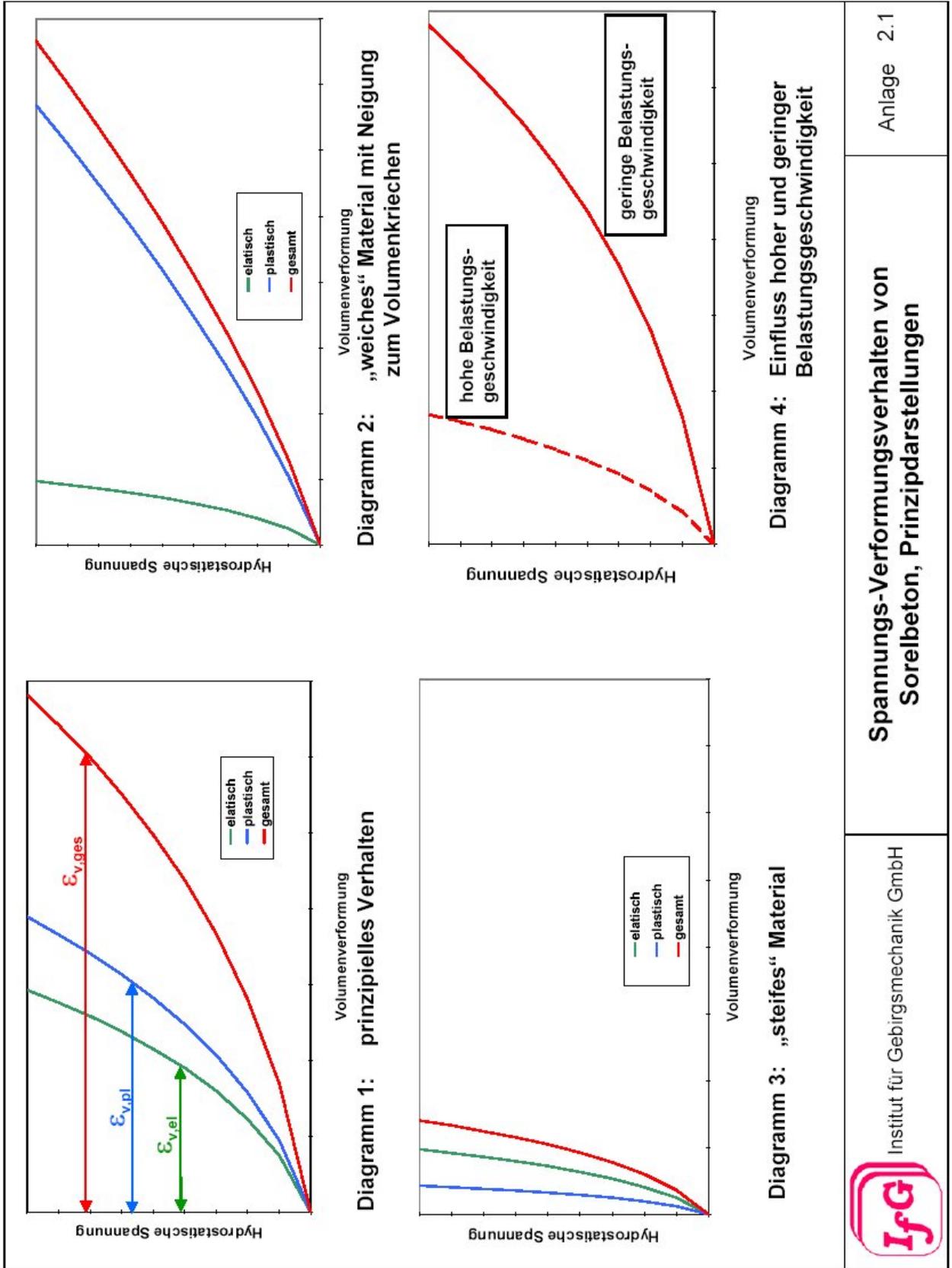
Institut für Gebrügmmechanik GmbH Leipzig, Friederikenstraße 60, 04279 Leipzig, Teil/(Fax): 0341/33600-(0/9308)

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	 DBE TECHNOLOGY GmbH
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNN	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
A			AJ			GH	BY	0005	00	
Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften										Blatt: 49
Anhang 1										
<p>Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton</p> <p>3 Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton</p> <p>4</p> <p>ionsfähigkeit einer Barriere, die stirnflächenseitig einer Fluidbelastung ausgesetzt ist, aus. Dementsprechend ist das Ziel die Herstellung von Barrieren mit einem möglichst hohen Ausbauwiderstand ohne bzw. mit nur geringer Neigung zum Volumenkriechen (Anlage 2.1, Diagramm 3).</p> <p>Im Diagramm 4 der Anlage 2.1 ist der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Verformungsverhalten des Sorelbetons dargestellt. Prinzipiell ist der Ausbauwiderstand des Sorelbetons gleicher Rezeptur bei hoher Belastungsgeschwindigkeit (z. B. kurzzeitiger Belastungsversuch im Labor) größer als bei geringerer Belastungsgeschwindigkeit (z. B. Barriere in situ). Weiterhin wird die Abhängigkeit des Ausbauwiderstandes von der Belastungsgeschwindigkeit bei vergleichsweise „weichen“ Materialien mit Neigung zum Volumenkriechen stärker ausgeprägt sein als bei vergleichsweise „steifen“ Materialien.</p> <p>3. Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens</p> <p>3.1 Ablauf zur Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens</p> <p>Die Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbetonproben wird in folgenden Teilschritten durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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 derASSE 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: 	<p>Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton</p> <p>3 Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton</p> <p>4</p> <p>o Anpassung der Ergebnisse der Kriechversuche an eine Funktion $\epsilon_{v,t} = f(t)$ mit $\epsilon_{v,t}$ Volumenverformung, t, Zeit.</p> <p>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.</p> <ul style="list-style-type: none"> o Durch Ableitung der Volumenverformungs-Zeit-Funktion erhält man eine Funktion der Volumenverformungsrate über die Zeit $\dot{\epsilon}_{v,t} = f(t)$. Aus dieser Funktion wird für die gewünschte In-situ-Verformungsrate die Zeit t ermittelt. o Für die Zeit t wird anschließend mit der an die Kriechversuche angepassten Funktion $\epsilon_{v,t} = f(t)$ 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. <p>3.2 Triaxiale, isotrope Druckversuche</p> <p>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.</p> <p>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 einen Druckaufnehmer (Hersteller Hottinger/Baldwin) mit einer Genauigkeit von 0,01 MPa.</p> <p>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.</p> <p>Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig; Friederikenstraße 60; 04279 Leipzig; Tel/(Fax): 0341/33600-(0)309</p>									

	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 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			AJ			GH	BY	0005	00	
Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften											Blatt: 50
Anhang 1											
<p>Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton</p> <p>5</p>	<p>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.</p> <p>3.3 Isotrope Kriechversuche</p> <p>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.</p> <p>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 $\pm 1\%$ konstant gehalten. Die Prüfkörper werden zum Schutz vor dem Druckmedium Öl mit ölresistenten Gummimanschetten dicht ummantelt.</p> <p>Die Versuchsdurchführung erfolgt bei Raumtemperatur. Für die Regelung der Raumtemperatur ($\pm 1\text{ K}$) wird eine handelsübliche Klimaanlage verwendet.</p> <p>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.</p>										
<p>Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton</p> <p>6</p>	<p>4. Simulation des Spannungs-Verformungsverhaltens in numerischen Modellrechnungen</p> <p>Die Auswahl des Stoffgesetzes für die Simulation des Baustoffs in numerischen Berechnungen erfolgt in Abhängigkeit von den Versuchsergebnissen zum Spannungs-Verformungsverhalten.</p> <p>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 numerischen Simulation Stoffansätze verwendet werden, die das volumetrische Kompaktionskriechen erfassen können. Im Programmsystem FLAC steht dafür beispielsweise das Stoffgesetz „Crushed-Salt-Model“ zur Verfügung.</p> <p>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.</p>										
<p>Institut für Gebergemechanik GmbH Leipzig, Friederikenstraße 60, 04279 Leipzig, Teil/(Fax): 0341/33600-(0/308)</p>											

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			AJ			GH	BY	0005	00	

Anhang 1



Spannungs-Verformungsverhalten von Sorelbeton, Prinzipdarstellungen

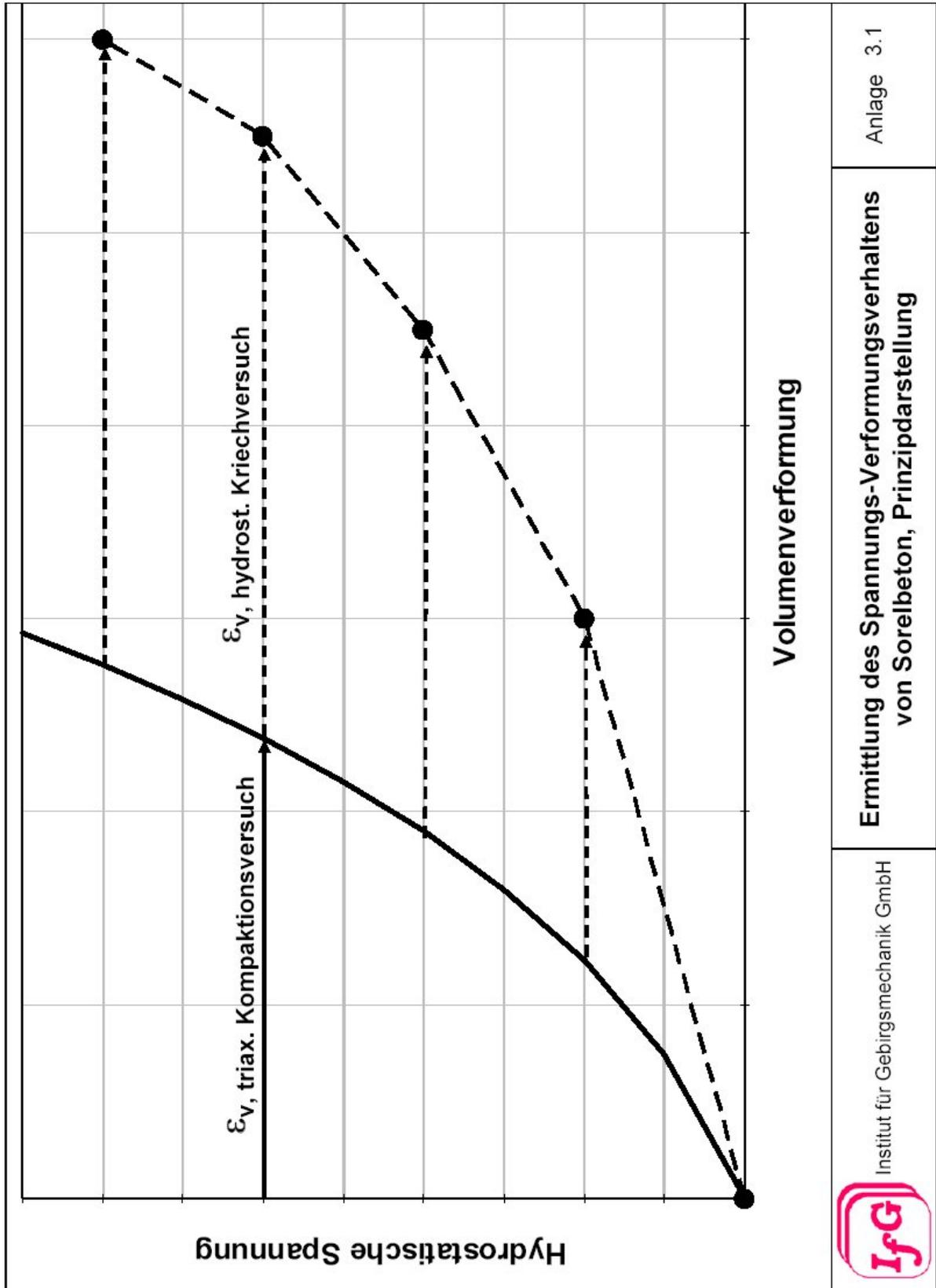
Institut für Gebirgsmechanik GmbH



Anlage 2.1

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			AJ			GH	BY	0005	00	

Anhang 1



Anlage 3.1

Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Sorelbeton, Prinzipdarstellung

Institut für Gebirgsmechanik GmbH

