



Bundesamt für Strahlenschutz

# Deckblatt

GZ: QM - 9A 33510000 / SE 4.2.3

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: I
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Titel der Unterlage:

SCHACHTANLAGE ASSE II: VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN ZUM MATERIALVERHALTEN VON SORELBETON

Ersteller:

ERCOSPLAN

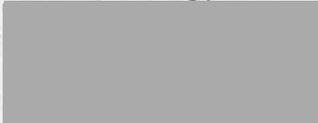
Stempelfeld:

Freigabe durch bergrechtlich verantwortliche Person:

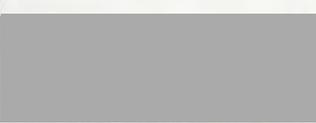


Datum und Unterschrift

Freigabe durch atomrechtlich verantwortliche Person:

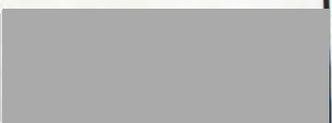


Freigabe PL:



Datum und Unterschrift

Freigabe zur Anwendung:



Datum und Unterschrift

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



Bundesamt für Strahlenschutz

# Revisionsblatt

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: II
NAAN	NNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Titel der Unterlage:

SCHACHTANLAGE ASSE II: VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN ZUM MATERIALVERHALTEN VON SORELBETON

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

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

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 1 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

# Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

### Auftragnehmer

ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH  
Arnstädter Straße 28  
99096 Erfurt

### in Zusammenarbeit mit

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie  
Leipziger Straße 29  
09596 Freiberg

Institut für Gebirgsmechanik GmbH  
Friederikenstraße 60  
04279 Leipzig

Erfurt, 09.03.2016



Geschäftsführer,  
ERCOSPLAN



Projektleiterin,  
IfAC der TU BAF



Prokurist,  
IfG Leipzig

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 2 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

**Impressum**

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz  
Willy-Brandt-Str. 5  
38226 Salzgitter  
Telefon: 030 18333-0  
Telefax: 030 18333-1885  
E-Mail: [epost@bfs.de](mailto:epost@bfs.de)  
Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

Ersteller:

ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH  
Arnstädter Straße 28  
99096 Erfurt  
Telefon: 0361 3810 500  
Telefax: 0361 3810 505  
E-Mail: [mining@ercosplan.com](mailto:mining@ercosplan.com)  
Internet: [www.ercosplan.com](http://www.ercosplan.com)

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie  
Leipziger Straße 29  
09596 Freiberg

Institut für Gebirgsmechanik GmbH  
Friederikenstraße 60  
04279 Leipzig

Abbildungen: ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH  
Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig  
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie  
Institut für Gebirgsmechanik GmbH

Der Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 3 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Stand: 09.03.2016
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		

### Revisionsblatt

Rev.	Rev.-Stand Datum	revidierte Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision
00	09.03.2016			Ersterstellung

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

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 4 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

**KURZFASSUNG**

Autoren: ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH,  
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie,  
Institut für Gebirgsmechanik GmbH

Titel: Schachtanlage Asse II:  
Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Im Rahmen der gegenständlichen ESA-Erweiterung wurden vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten der Sorelbaustoffe A1 (Asse-Baustoff), B2 (DBM2), C3 (R3a-Mörtelvariante) und D4 (MB10) durchgeführt. Vorrangiges Ziel der Untersuchungen war es, die Baustoffe hinsichtlich eines sich entwickelnden und gegebenenfalls verbleibenden Expansionsdruckes zu bewerten. Für jeden Baustoff wurden verschiedene Probekörper hergestellt, die jeweils unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Regimen während des Aushärtens ausgesetzt waren. Die Maximaltemperaturen innerhalb der einzelnen Temperatur-Zeit-Regime lagen in Höhe der Raumtemperatur (TZF RT), bei 60°C (TZF 60°C), bei 90°C (TZF 90°C) sowie bei 120°C (TZF 120°C). Begleitend dazu sollten die baustoffcharakterisierenden Eigenschaften (Porosität, mechanische Eigenschaften und Phasenbestand) ermittelt werden, um einen Einfluss der Höhe der Abbinde-temperatur auf die Ausbildung dieser Materialeigenschaften abschätzen zu können. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollte eine Aussage zur grundsätzlichen Eignung der hier untersuchten Sorelbaustoffe für einen Einsatz in massigen, untertägigen Bauwerken, wie z.B. geotechnischen Barrieren, getroffen werden.

Grundlage für dieses Untersuchungsprogramm bildete u.a. die Reproduzierbarkeit der Baustoffe, weil die Versuchsführung aus Kapazitätsgründen mehrere Anmischtermine für den jeweiligen Baustoff erforderte. Zu diesem Zweck wurden die Qualitätsparameter der Ausgangsstoffe, als auch die Qualitätsparameter der frisch angemischten Baustoffe bestimmt und baustoffbezogen miteinander verglichen. Auf diese Weise konnte die Herstellung von Baustoffen mit nahezu gleichbleibender Qualität abgesichert werden, wobei die Ergebnisse gezeigt haben, dass auch bei guter Reproduzierbarkeit der Baustoffe, jeweils eine geringfügige, natürliche Materialvariabilität vorlag.

Die Dauer der Versuche zur Bestimmung der Expansionsdruckermittlung betrug durchschnittlich ca. 3 Wochen. Zum Ende dieser Versuche wurden mehrheitlich Expansionsdrücke gemessen. Sehr geringe Expansionsdrücke (bis gar kein Druck) wurden für den A1-Baustoff im TZF 60°C, den C3- und den D4-Baustoff im TZF 90°C sowie für den B2- und den D4-Baustoff im TZF 120°C ermittelt.

Das IfAC der TU BAF stellte nach röntgenographischen Untersuchungen zum Phasenbestand an den ausgehärteten Probekörpern fest, dass diese, mit Ausnahme des D4-Baustoffs, noch nicht vollständig ausreagiert waren. Die Beobachtungsdauer zur Erfassung der Expansionsdruckentwicklung über maximal 25 Tage war demnach zu kurz, um eine umfassende und vergleichende Bewertung der vier Sorelbaustoffe hinsichtlich eines sich entwickelnden oder verbleibenden Expansionsdruckes vornehmen zu können. Im Fall von 3-1-8 Rezepturen entwickeln sich Expansionsdrücke infolge Kristallisation neuer Phasen (Sekundärkristallisation 1) in Abhängigkeit der Ab-

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 5 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

kühlrate erst nach Wochen. In der Konsequenz wäre eine längerfristige Messwerterfassung notwendig gewesen. Die erfassten Expansionsdrücke resultierten im Wesentlichen aus einer Behinderung der thermischen Dehnung der Baustoffe. Dieser Sachverhalt war zum Zeitpunkt der Versuchsplanung noch nicht bekannt, sondern wurde aus zwischenzeitlich erhobenen Messdaten anderer, z.T. noch laufender Forschungsprojekte abgeleitet. Wesentliche Aussagen sind (Freyer et al. 2015), (IfAC TU BAF 2015):

1. Für MgO-Baustoffe ist bei Abbindetemperaturen ab bzw. oberhalb 60°C kein dauerhaft auftretender Expansionsdruck nachweisbar.
2. Im eingespannten Zustand ist ein messbarer Druckaufbau aufgrund von Phasenumwandlungen innerhalb des Bindemittelgefüges (Kristallisationsdruck) in Abhängigkeit von der Abbindetemperatur und -zeit im Folgezeitraum aufgrund von Spannungsrelaxation rückläufig.

Diese Aussagen sind das Ergebnis aus bis zu 3-jährigen Datenerfassungszeiten zur Expansionsdruckentwicklung unter isochoren Bedingungen in definierten Temperatur-Zeitfenstern mit Maximaltemperaturen von 60°C, 90°C und 120°C für die Sorelbaustoffe A1 (ESA-Vorhaben) und C3 (MgO-Projekt der TU BAF).

Für alle vier Sorelbaustoffe wurde versuchstechnisch die adiabatische Temperaturerhöhung bestimmt. Dieser baustoffspezifische, thermische Kennwert wurde zur Abschätzung der auftretenden Kerntemperaturen in einem massigen Bauwerk ermittelt. Für die Baustoffe A1, B2 und D4 wurden Werte zwischen 82 K und 85 K ermittelt und für C3 (R3a-Mörtelvariante), aufgrund des hohen Bindemittelanteils, ein Wert von 110 K. Die adiabatische Temperaturerhöhung hängt stark von der Rezeptur des MgO-Betons sowie der eingesetzten MgO-Reaktivität ab.

Anhand der Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie konnten keine Rückschlüsse auf einen Zusammenhang zwischen der Höhe der Temperatur während des Aushärtens und der sich einstellenden Porosität in den Sorelbaustoffen gezogen werden (MPA Braunschweig 2013b).

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften können für die Beurteilung der Eignung der untersuchten Sorelbaustoffe im Hinblick auf einen Einsatz in massigen, geotechnischen Barrieren (Verschlussbauwerken), bei denen keine speziellen Anforderungen an einen dauerhaften Expansionsdruck bestehen, herangezogen werden. Die hierzu im Rahmen dieses Versuchsprogramms durchgeführten triaxialen Druckversuche liefern keine unmittelbar in-situ relevanten Berechnungsparameter, wie sie als Eingangsgrößen für numerische Modellierungen von untertägigen massigen Bauwerken benötigt werden. Das gewählte Versuchsprogramm erlaubt jedoch, dem Versuchsziel entsprechend, die zuverlässige Charakterisierung der Sorelbaustoffe im Vergleich der Baustoffe bzw. ihrer Temperaturvorgeschichte untereinander, bei vertretbarem Versuchsaufwand und -dauern. Da es sich um Indexversuche handelt, sind die Ergebnisse nicht statistisch abgesichert. Dennoch spiegeln sie tendenziell das Materialverhalten der Baustoffe wider. Eine konsistente Bewertung der erzielten Indexergebnisse wurde unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus dem ESA-Vorhaben möglich, weil dadurch als Referenz belastbare Vergleichsergebnisse von A1-Probenserien vorlagen.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 6 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für den A1- und C3-Baustoff wurden mittlere Steifigkeiten<sup>1</sup> und mittlere Festigkeiten<sup>2</sup>, für den B2-Baustoff mittlere Steifigkeiten und (von gering bis hoch) variierende Festigkeiten und für den D4-Baustoff hohe Steifigkeiten und sehr hohe Festigkeiten ermittelt.
- Der A1- und der D4-Baustoff zeigten eine gute Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften. Eine signifikante Beeinflussung der Materialeigenschaften infolge der durchlaufenen Temperatur-Zeit-Regime war hier (im Gegensatz zum B2- und C3-Baustoff) nicht erkennbar.
- Es wurde eine starke Relaxation der A1-, B2- und C3-Prüfkörper bei  $T_{max} \geq 90^\circ\text{C}$  festgestellt. An den D4-Prüfkörpern wurde eine sehr geringe Relaxation festgestellt.

Unterschiede in den Messergebnissen waren in der Konsequenz der unterschiedlichen Baustoffansätze, aber auch als Folge der unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Regime während der Abbindereaktion zum Teil deutlich ersichtlich. Es gab jedoch keine Hinweise auf Eigenschaften, z.B. zu geringe Festigkeiten oder zu hohe Porositäten, die eine Nutzung der Baustoffe grundsätzlich ausschließen. Allgemein gilt, dass für Verschlussbauwerke Baustoffe mit geringer Materialvariabilität zu bevorzugen sind, was zumindest für den A1- und D4-Baustoff offensichtlich vorliegt. Eine abschließende, allgemeingültige Einschätzung zur Eignung der untersuchten Baustoffe im Hinblick auf einen Einsatz in massigen, untertägigen Bauwerken kann an dieser Stelle nicht abgegeben werden, da die Entscheidung über die Eignung eines Baustoffs im Wesentlichen von den jeweiligen Anforderungen (u.a. Dichtigkeitsanforderungen, Anforderungen an mechanische Festigkeiten, Nachweiszeitraum) abhängt, die an den Baustoff gestellt werden.

Die hier vorgelegten Ergebnisse entsprechen dem aktuellen und neuen Stand der Wissenschaft. Weitere vergleichende Untersuchungen zum temperaturabhängigen Expansionsdruckverhalten der vier untersuchten Sorelbaustoffe werden im Hinblick auf das formulierte Versuchsziel als nicht erforderlich angesehen, so dass eine Stufe 2 im Rahmen dieses Untersuchungsprogrammes entfallen kann. Die durchgeführten Indexversuche decken zwar nicht den vollständigen Abbindezeitraum ab, liefern aber ein konsistentes Ergebnisbild zu den noch laufenden Untersuchungen am Sorelbaustoff A1 (ESA-Vorhaben) sowie den zwischenzeitlich abgeschlossenen Untersuchungen an den Sorelbaustoffen C3 und D4 (MgO-Projekt der TU BAF) im Hinblick auf die Fragestellung „langzeitige Entwicklung eines Expansionsdruckes“.

<sup>1</sup> charakterisiert durch den Elastizitätsmodul ( $E_d$ ) sowie die Poissonzahl ( $\nu_d$ ), woraus sich die anderen elastischen Konstanten Kompressionsmodul ( $K_d$ ) und Schubmodul ( $G_d$ ) ableiten lassen; (Die Ermittlung dieser Kennwerte erfolgte im Zuge der gesteinsphysikalischen Charakterisierung der ausgehärteten Probekörper, so dass es sich hier um dynamische elastische Konstanten handelt, gekennzeichnet durch den Index d.)

<sup>2</sup> charakterisiert durch einaxiale bzw., bei  $\sigma_3 > 0$ , durch triaxiale Druckfestigkeiten ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) sowie die MOHR-COULOMB-Parameter: Reibungswinkel ( $\varphi$ ) und Kohäsion ( $c$ )

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 7 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

### INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>7</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>9</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>10</b>
<b>ANHANGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>10</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>11</b>
<b>VERANLASSUNG .....</b>	<b>17</b>
<b>1 AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>18</b>
<b>2 HINWEISE ZUM AUFBAU UND INHALT DER ABSCHLUSSDOKUMENTATION .....</b>	<b>19</b>
<b>3 VORBETRACHTUNGEN .....</b>	<b>20</b>
3.1 ERGEBNISSE AUS VORANGEGANGENEN UNTERSUCHUNGEN ZUR EXPANSIONSDRUCKENTWICKLUNG VON SORELBTEN DER REZEPATUR DBM2 .....	20
3.2 ÜBERSICHT ÜBER DIE IM RAHMEN DER ESA-ERWEITERUNG ZU UNTERSUCHENDEN SORELBAUSTOFFE .....	21
<b>4 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM .....</b>	<b>24</b>
4.1 UNTERSUCHUNGSINHALT .....	24
4.2 VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER EXPANSIONSDRUCKENTWICKLUNG .....	25
4.2.1 Vorbedingung .....	25
4.2.2 Versuchsrandbedingungen .....	25
4.2.3 Auswahl der Temperatur-Zeit-Regime .....	25
4.2.4 Umfang der Untersuchungen zur Expansionsdruckentwicklung .....	27
4.3 ADIABATISCHE TEMPERATURERHÖHUNG .....	27
4.4 VERSUCHE AN DEN AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPERN .....	27
4.5 RANDBEDINGUNGEN DER LEISTUNGSERBRINGUNG .....	28
<b>5 VORBEREITENDE ARBEITEN .....</b>	<b>29</b>
5.1 AUSWAHL DER BINDEMITELE .....	29
5.2 AUSWAHL DER ANMISCHFLÜSSIGKEIT .....	29
5.3 AUSWAHL DER ZUSCHLAGSTOFFE .....	30
5.4 MODIFIZIERTE SORELBAUSTOFFREZEPTUREN .....	32
<b>6 DURCHFÜHRUNG DES UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS .....</b>	<b>34</b>
6.1 VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER EXPANSIONSDRUCKENTWICKLUNG .....	34
6.2 ADIABATISCHE TEMPERATURERHÖHUNG .....	37
6.3 VERSUCHE AN DEN AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPERN .....	37

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 8 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

6.3.1	Versuche zur Bestimmung der Porosität.....	37
6.3.2	Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften .....	37
6.3.3	Versuche zur Bestimmung des Phasenbestandes.....	41

<b>7</b>	<b>MESSERGEBNISSE .....</b>	<b>41</b>
7.1	EXPANSIONSDRUCKENTWICKLUNG DER SORELBAUSTOFFE.....	41
7.1.1	Expansionsdruckentwicklung für das TZF RT.....	41
7.1.2	Expansionsdruckentwicklung für das TZF 60°C.....	42
7.1.3	Expansionsdruckentwicklung für das TZF 90°C.....	44
7.1.4	Expansionsdruckentwicklung für das TZF 120°C.....	45
7.2	ADIABATISCHE TEMPERATURERHÖHUNG .....	46
7.3	POROSITÄT DER AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPER .....	48
7.4	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DER AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPER .....	49
7.4.1	Gesteinsphysikalische Charakterisierung .....	49
7.4.2	Triaxiale isotrope Druckversuche.....	53
7.4.3	Triaxiales Festigkeitsverhalten.....	56
7.4.4	Relaxationsverhalten.....	57
7.5	PHASENBESTAND DER AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPER .....	58
<b>8</b>	<b>ERGEBNISSE AKTUELLER FORSCHUNGSVORHABEN.....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN ZUR WEITEREN VORGEHENSWEISE.</b>	<b>68</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>72</b>
	<b>GLOSSAR .....</b>	<b>74</b>
	<b>ANHANG 1 - UNTERSUCHUNGSBERICHT DER INSTITUT FÜR GEBIRGSMECHANIK GMBH: VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN AN 4 SORELBTENREZEPTUREN ZUM TEMPERATURABHÄNGIGEN QUELLDRUCKVERHALTEN.....</b>	<b>75</b>
	<b>ANHANG 2 - UNTERSUCHUNGSBERICHT DES INSTITUTES FÜR ANORGANISCHE CHEMIE DER TU BERGAKADEMIE FREIBERG: VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN AN 4 SORELBTENREZEPTUREN ZUM TEMPERATURABHÄNGIGEN QUELLDRUCKVERHALTEN .....</b>	<b>102</b>

Gesamtseitenzahl: 115 Seiten

Stichworte: 3-1-8 Phase, 5-1-8 Phase, Abbindereaktion, Expansionsdruck, Mechanische Festigkeiten, Sorelbaustoff, Temperatur-Zeitfenster, Phasenbestand, Porosität

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 9 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

### ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Prüfkörper der untersuchten Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4.....	22
Abbildung 2:	Temperatur-Zeitfenster (TZF) für die Abbindereaktionen .....	26
Abbildung 3:	Kornverteilung der Steinsalzgrusprobe.....	30
Abbildung 4:	Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 bei Raumtemperatur (RT) .....	42
Abbildung 5:	Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 bei einer Maximaltemperatur von 60°C .....	43
Abbildung 6:	Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 bei einer Maximaltemperatur von 90°C .....	44
Abbildung 7:	Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 bei einer Maximaltemperatur von 120°C .....	45
Abbildung 8:	Adiabatische Temperaturerhöhung der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4.....	47
Abbildung 9:	Darstellung der P-Wellengeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Dichte der Sorelbaustoffe inkl. Variationsfeld des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben.....	51
Abbildung 10:	Spannungs-Verformungskurven für die A1-, B2-, C3- und D4-Prüfkörper bei „schneller“ Belastung ( $\dot{p} = 0,1$ MPa/s) inkl. Variationsfeld des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben ...	53
Abbildung 11:	Spannungs-Verformungskurven für die A1-, B2-, C3- und D4-Prüfkörper bei „langsamer“ Belastung ( $\dot{p} = 0,005$ MPa/s) inkl. Variationsfeld des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben.....	54
Abbildung 12:	MOHR-COULOMB-Diagramme der A1-, B2-, C3- und D4-Prüfkörper inkl. Variationsfeld des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben.....	56
Abbildung 13:	Vergleich des Relaxationsverhaltens der untersuchten Prüfkörper (Normierte Axialspannung vs. Zeit).....	58
Abbildung 14:	Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdifraktogrammen der A1-Probekörper .....	59
Abbildung 15:	Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdifraktogrammen der B2-Probekörper .....	60
Abbildung 16:	Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdifraktogrammen der C3-Probekörper .....	61
Abbildung 17:	Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdifraktogrammen der D4-Probekörper .....	62

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 10 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

### TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Standardrezepturen der untersuchten Sorelbaustoffe.....	23
Tabelle 2:	Umfang der Untersuchungen zur Expansionsdruckentwicklung .....	27
Tabelle 3:	Teilleistungen der projektbeteiligten Firmen und Institutionen .....	28
Tabelle 4:	Spezifikation der gewählten MgO-Typen .....	29
Tabelle 5:	Sieblinie des Quarzmehl-Füllers für den C3-Baustoff.....	31
Tabelle 6:	Sieblinie des Sand-Kies-Gemisches für den D4-Baustoff .....	32
Tabelle 7:	Modifizierte Rezepturen und Komponentenanteile der untersuchten Sorelbaustoffe .....	33
Tabelle 8:	Anmischtermine für die Versuche zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung .....	36
Tabelle 9:	Qualitätsparameter der frisch angemischten Sorelbaustoffe.....	36
Tabelle 10:	Porositäten und Porenradien in den ausgehärteten Probekörpern .....	48
Tabelle 11:	Kennwerte der gesteinsphysikalischen Charakterisierung .....	50
Tabelle 12:	MOHR-COULOMB-Parameter der ausgehärteten Probekörper der Expansionsdruckversuche .....	57
Tabelle 13:	Röntgenographisch ermittelter Phasenbestand der Proben.....	63

### ANHANGSVERZEICHNIS

ANHANG 1:	IfG Leipzig (2013): Untersuchungsbericht (B IfG 31/2011): Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen zum temperaturabhängigen Quelldruckverhalten vom 05.08.2013. – Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, August 2013, 26 Seiten
ANHANG 2:	IfAC TU BAF (2013): Untersuchungsbericht: Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen zum temperaturabhängigen Quelldruckverhalten. – Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Oktober 2013, 11 Seiten

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 11 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

Abb.	Abbildung
AG	Aktiengesellschaft
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
bzw.	beziehungsweise
Co. KG	Compagnie Kommanditgesellschaft
d.h.	das heißt
DMS	Dehnmessstreifen
ERA Morsleben / ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
Fa.	Firma
FKZ	Förderkennzeichen
FuE	Forschung und Entwicklung
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
KZL	Kennzeichnungsleiste
MSV	Mehrstufendruckversuch
max.	maximal
n.b.	nicht bestimmbar
Nr.	Nummer
Qualitätsparameter	Qualitätssicherungsparameter
resp.	respektive
RT	Raumtemperatur
Tab.	Tabelle
TZF	Temperatur-Zeitfenster / Temperatur-Zeit-Regime
u. a.	unter anderem

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Seite: 12 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

UTD	Untertagedeponie
UTV	Untertageverwertung
z.B.	zum Beispiel
z.T.	Zum Teil
ZTW	Zitronensäuretestwert

### Formelzeichen

c	[MPa], [kN/m <sup>2</sup> ]	Kohäsion
d	[mm]	Durchmesser
d <sub>i</sub>	[mm]	Innendurchmesser
ΔT	[K]	Temperaturänderung/-erhöhung
ΔV	[m <sup>3</sup> ]	Volumenänderung
ε <sub>AX</sub>	[-]	Axiale Dehnung
ε	[-], [%], [Vol.%]	Dehnung
ε̇	[1/s]	Verformungsrate
E	[GPa]	Elastizitätsmodul
φ	[°]	Reibungswinkel
F <sub>max</sub>	[kN]	Maximalkraft
G	[GPa]	Schermodul / Schubmodul
h	[mm]	Höhe
I	[cps]	Intensität
K	[GPa]	Kompressionsmodul
l	[mm]	Länge
m	[g]	Masse
n	[%]	Porenanteil
ν	[-]	Poissonzahl

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 13 von 115
NAAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

$\rho$	[kPa], [MPa]	Druck
$\dot{\rho}$	[MPa/s]	Belastungsgeschwindigkeit
pH-Wert [-]		Maßzahl für die Wasserstoffionenkonzentration (pH = potentia hydrogenii)
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte
s	[mm]	Wandstärke
$\sigma$	[MPa]	Spannung
$\sigma_1$	[MPa]	Maximale Hauptspannung
$\sigma_3$	[MPa]	Minimale Hauptspannung
$\Theta$	[°]	Bragg-Winkel (Theta) / Winkel zur Netzebene
t	[s], [h], [d],	Zeit
T	[°C]	Temperatur
T <sub>max</sub>	[°C]	Maximaltemperatur
v <sub>P</sub>	[km/s], [m/s]	P-Wellengeschwindigkeit
v <sub>S</sub>	[km/s], [m/s]	S-Wellengeschwindigkeit

### Einheiten

Å	Ångström
bar	Bar
cps	Counts per second
d	Tag
g	Gramm
g/cm <sup>3</sup>	Gramm pro Kubikzentimeter
g/l	Gramm pro Liter
GPa	Gigapascal
h	Stunde
K	Kelvin

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Seite: 14 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

K/h	Kelvin pro Stunde
kg	Kilogramm
km/s	Kilometer pro Sekunde
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
m	Meter
m%	Massenprozent
mm	Millimeter
m/s	Meter pro Sekunde
µm	Mikrometer
µs	Mikrosekunde
mol	Mol
MHz	Megahertz
MPa	Megapascal
Vol. %	Volumenprozent
s	Sekunde
°	Grad
°C	Grad Celsius
%	Prozent

### Chemische Formeln

Ca <sup>2+</sup>	Kalzium-Ionen
CaSO <sub>4</sub>	Anhydrit
Cl <sup>-</sup>	Chlorid-Ionen
H <sub>2</sub> O	Wasser
K <sup>+</sup>	Kalium-Ionen

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 15 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

Mg <sup>2+</sup>	Magnesium-Ionen
MgCl <sub>2</sub>	Magnesiumchlorid
MgCl <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	Bischofit
MgCl <sub>2</sub> -Lösung	Magnesiumchlorid-Lösung
MgO	Magnesiumoxid
Mg(OH) <sub>2</sub>	Magnesiumhydroxid
3 Mg(OH) <sub>2</sub> · MgCl <sub>2</sub> · 8 H <sub>2</sub> O	3-1-8 Phase
5 Mg(OH) <sub>2</sub> · MgCl <sub>2</sub> · 8 H <sub>2</sub> O	5-1-8 Phase
9 Mg(OH) <sub>2</sub> · MgCl <sub>2</sub> · 4 H <sub>2</sub> O	9-1-4 Phase
Na <sup>+</sup>	Natrium-Ionen
NaCl	Natriumchlorid
R-Lösung	4,7 bis 5,1 molale Magnesiumchlorid-Lösung
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfat-Ionen

### Kurzbezeichnungen der Baustoffrezepturen

A1	Rezeptur A1, resp. Asse-Baustoff
B2	Rezeptur B2, resp. DBM2 (FKZ 02C1214)
C3	Rezeptur C3, resp. R3a (FKZ 02E10880)
D4	Rezeptur D4, resp. MB10 (FKZ 02C1204)

### Projekt-Kurztitel

CARLA	Kurztitel des FuE-Vorhabens „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV“ (FKZ 02C1204)
ELSA II-Vorhaben	Kurztitel des FuE-Vorhabens „Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II); Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen (FKZ 02E11193A)

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 16 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

ESA-Vorhaben	Projekt-Kurztitel der Entwurfsplanung der Schachtverschlussysteme für die Schachtanlage Asse II (PSP-Nr.: 9A 3351, BfS-Bestell-Nr.: 8685-9)
ESA-Erweiterung	Projekt-Kurztitel, Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen
MgO-Projekt	Kurztitel des FuE-Vorhabens „Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs“ (FKZ 02E10880)

### Behörden, Firmen und Institute

Asse-GmbH	Asse-GmbH – Gesellschaft für Betriebsführung und Schließung der Schachtanlage Asse II
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
DBE TEC	DBE Technology GmbH
DEUSA	DEUSA International GmbH
ERCOSPLAN	ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH
ESCO	ESCO European Salt Company GmbH & Co. KG
EUROQUARZ	EUROQUARZ GmbH
GE Measurement & Control	GE Measurement & Control bzw. GE Inspection Technologies
GSF	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Schachtanlage Asse II
GTS	GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG
IfAC	Institut für Anorganische Chemie
IfG Leipzig / IfG	Institut für Gebirgsmechanik GmbH
K-UTEK	K-UTEK Salt Technologies AG
L&V	Lehmann & Voss & Co. KG
MPA Braunschweig / MPA	Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig
QUICK-MIX	QUICK-MIX Berg- und Tunnelbaustoffe GmbH & Co. KG
TU BAF / TUBA Freiberg	Technische Universität Bergakademie Freiberg
WPM Leipzig	WPM Werkstoffprüfsysteme Leipzig GmbH

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 17 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### VERANLASSUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat am 01.01.2009 den Betrieb der Schachtanlage Asse II übernommen und ist seitdem Betreiber und Genehmigungsinhaber im berg- und atomrechtlichen Sinn. Gemäß der Vorgabe des § 57b AtG ist die Schachtanlage Asse II unverzüglich stillzulegen. Bis zur Stilllegung, d.h. während des Betriebes der Schachtanlage Asse II zwecks Rückholung der radioaktiven Abfälle, sind die notwendigen Maßnahmen zur Notfallvorsorge zu treffen. Teil dieser Maßnahmen sind u. a. die zu errichtenden Schachtverschlussysteme.

Die ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH (ERCOSPLAN) wurde mit Vertrag vom 07.07./11.07.2011 vom BfS mit der Erarbeitung der Entwurfsplanung der Schachtverschlussysteme für die Schachtanlage Asse II (Kurztitel: ESA-Vorhaben) beauftragt (PSP-Nr.: 9A 3351, BfS-Bestell-Nr.: 8685-9). Grundlage für die Bearbeitung ist die vorliegende Konzeptplanung „Verfüll- und Verschlusskonzept für die Schließung der Tagesschächte 2 und 4 des Bergwerkes Asse“ (GSF 2007), in der für beide Tagesschächte vom Schachtiefsten bis in Höhe der Dichtelemente sowie für das Hauptdichtelement der Einsatz von Sorelbeton der Rezeptur A1 vorgesehen ist. Dieser Sorelbaustoff wurde für Verschlussbauwerke unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen auf der Schachtanlage Asse II entwickelt und besitzt im Hinblick auf den Verwendungszweck angepasste verarbeitungstechnische und gute hydraulisch-mechanische Eigenschaften. Entsprechend dem in der Rezeptur A1 vorliegenden Molverhältnis zwischen Bindemittel und Anmischflüssigkeit bildet sich neben der 3-1-8 Phase anteilig auch die 5-1-8 Phase aus. Diese Phase ist gegenüber potentieller Zutrittslösung, wie auch gegenüber der als Notfallmaßnahme einzuleitenden  $MgCl_2$ -Lösung, nicht chemisch langzeitstabil, d.h. es liegt kein thermodynamisch stabiles Gleichgewicht zwischen Festphase und Lösung vor. Die thermodynamisch stabile Phase im Bindemittelsystem ist gemäß Dinnebier et al. (2010) und Freyer (2011) die 3-1-8 Phase, welche gemäß Pannach (2014) für den Temperaturbereich von 25°C bis 80°C nachgewiesen wurde.

Eine Teilleistung innerhalb des ESA-Vorhabens ist der bislang ausstehende Nachweis zur Langzeitbeständigkeit von Sorelbeton der Rezeptur A1. Dieser soll anhand eines umfangreichen Untersuchungsprogramms durch das Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg (IfAC, TU BAF) in Zusammenarbeit mit der Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG Leipzig), beide jeweils als Unterauftragnehmer von ERCOSPLAN, erbracht werden. Mit den Untersuchungen soll nachgewiesen werden, dass sich die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Sorelbaustoffs im eingespannten Zustand, bei möglichen Umbildungen im Bindemittelphasenbestand des Materials infolge des Kontaktes mit  $MgCl_2$ -Lösung, nicht negativ verändern. Der Nachweis soll als kombinierter geochemisch-geomechanischer Integritätsnachweis geführt werden, indem die baustoffcharakterisierenden Eigenschaften (Festigkeiten, Permeabilität, Phasenbestand) vor und nach Lösungskontakt bestimmt werden. Da sich der nach dem Aushärten des Sorelbaustoffs primär vorliegende Phasenbestand temperatur- und zeitabhängig ausbildet, werden die Untersuchungen für drei unterschiedliche, aus in-situ-Bauwerken abgeleitete Temperatur-Zeitfenster mit Maximaltemperaturen von 60°C, 90°C und 120°C durchgeführt. Darüber hinaus wird die Reaktivität des eingesetzten Bindemittels variiert, um den Einfluss des in der Praxis auftretenden Spektrums der MgO-Reaktivität berücksichtigen zu können.

Innerhalb der zu führenden Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise für die Verschlussysteme der Tagesschächte Asse 2 und Asse 4 wird kein Kredit von einem Expansionsdruck beim Einsatz von Sorelbeton der Rezeptur A1 genommen. Dennoch würde ein dauerhafter Expansionsdruck infolge von Phasenumbildungen im Bindemittelsystem eine zusätzliche Sicher-

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 18 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

heitsreserve für das System darstellen, so dass dieser Parameter bei Vorhandensein zumindest größenordnungsmäßig beschreibbar sein sollte. Bislang liegen keine belastbaren Daten über eine derartige Druckentwicklung im Baustoff vor, so dass diese Daten bei einem Teil der Probekörper im Untersuchungsprogramm des ESA-Vorhabens mit erfasst werden.

Da 2012 bei Untersuchungen der Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig (MPA Braunschweig) an Sorelbeton der Rezeptur DBM2, eine starke Abhängigkeit der Expansionsdruckentwicklung von der Einwirkungsdauer und Höhe der Temperatur beim Aushärten des Baustoffs festgestellt wurde (MPA Braunschweig 2013a), sollten nun für das BfS in einer Erweiterung des ESA-Vorhabens (ESA-Erweiterung) im Rahmen dieses Berichtes vergleichende Untersuchungen zur Expansionsdruckentwicklung an unterschiedlichen Sorelbaustoffen durchgeführt werden.

## 1 AUFGABENSTELLUNG

Ein Konzept für die ESA-Erweiterung stellte das BfS im Zuge einer Projektbesprechung am 23.02.2012 in Salzgitter gegenüber Vertretern von ERCOSPLAN, der MPA Braunschweig, dem IfAC der TU BAF sowie dem IfG Leipzig zur Diskussion. Die Anwesenden verständigten sich über den Untersuchungsrahmen sowie die Untersuchungsinhalte und den -umfang wie folgt:

- **Stufe 1:** Durchführung von Indexversuchen<sup>3</sup>
  - a) zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung der Baustoffe:
    - für vier verschiedene Sorelbaustoffe, wenn möglich unter Verwendung eines Bindemittels mit einheitlicher MgO-Reaktivität;
    - für vier Temperatur-Zeitfenster (TZF) mit Maximaltemperaturen (a) in Höhe der Raumtemperatur (RT), (b) von 60°C, (c) von 90°C sowie (d) von 120°C, mit jeweils 2-tägiger Aufheizphase, einer Haltephase der Maximaltemperatur über 2 Tage sowie einer anschließenden Abkühlphase bei einheitlicher Abkühlrate auf Raumtemperatur über maximal 10 Tage in den TZF's mit Maximaltemperaturen oberhalb der RT;
    - mit je drei Probekörpern pro Rezeptur und TZF,
    - mit vorlaufenden Versuchen zur Bestimmung der Qualitätsparameter an den Ausgangsstoffen und den frisch angemischten Sorelbaustoffen;

<sup>3</sup> Zur Charakterisierung der verschiedenen Sorelbetonvarianten wurden vergleichende Indexversuche gewählt, die tendenziell das Materialverhalten, insbesondere unter Berücksichtigung der Temperaturvorgeschichte, widerspiegeln, jedoch nicht statistisch abgesichert sind. Der Probenumfang eignet sich nur eingeschränkt für die Ableitung umfassender allgemeingültiger Aussagen, dennoch erlaubt er eindeutige Aussagen in Bezug auf die Fragestellungen (Versuchsziele).

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 19 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

b) als ergänzende Versuche zur Charakterisierung einzelner ausgehärteter Probekörper der vorgenannten Expansionsdruckversuche, mit:

- Versuchen zur Bestimmung der Porosität,
- Versuchen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften,
- Versuchen zur Bestimmung des bei Versuchsende vorliegenden Phasenbestandes;

c) als ergänzende Versuche an zusätzlich hergestellten Probekörpern zur Bestimmung der adiabatischen Temperaturerhöhung der Baustoffe.

Die vorgenannten Indexversuche werden teilweise durch die MPA Braunschweig, das IfG Leipzig sowie das IfAC der TU BAF durchgeführt<sup>4</sup>.

- **Stufe 2:** In Abhängigkeit der Ergebnisse aus Stufe 1 werden gegebenenfalls weiterführende Versuche empfohlen und durchgeführt.

Die Firma ERCOSPLAN wurde vom BfS am 07.08.2012 mit der Projektkoordinierung und Steuerung der Projektbeteiligten sowie der federführenden Bearbeitung bei der Erstellung der Abschlussdokumentation beauftragt.

## 2 HINWEISE ZUM AUFBAU UND INHALT DER ABSCHLUSSDOKUMENTATION

Die Abschlussdokumentation „Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen“ stellt im Wesentlichen eine Zusammenfassung folgender Untersuchungsberichte der Projektbeteiligten dar:

- MPA Braunschweig (2013b): Untersuchungsbericht (1080/032/12) – Wth: „ERA Morsleben – Ermittlung des Kristallisationsdrucks bei hohen Temperaturen an vier unterschiedlichen Magnesiabinderrezepturen“ vom 22.10.2013. – Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig, Braunschweig, Oktober 2013, 19 Seiten, 44 Anlagen, KZL 9M/22343031/GH/RB/0349;
- IfG Leipzig (2013): Untersuchungsbericht (B IfG 31/2011) „Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen zum temperaturabhängigen Quelldruckverhalten“ vom 05.08.2013. – Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, August 2013, 26 Seiten, ANHANG 1 der gegenständlichen Abschlussdokumentation;
- IfAC TU BAF (2013): Untersuchungsbericht „Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen zum temperaturabhängigen Quelldruckverhalten“. – Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Oktober 2013, 11 Seiten, ANHANG 2 der gegenständlichen Abschlussdokumentation.

<sup>4</sup> Eine Übersicht über die Aufgabenverteilung enthält Tabelle 3.

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 20 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

Die Abschlussdokumentation wurde von den Verfassern gegenüber den Inhalten dieser Untersuchungsberichte in folgenden Punkten ergänzt:

- Vorbetrachtungen zum Untersuchungsprogramm (Kapitel 3),
- Beschreibung des Untersuchungsprogramms (Kapitel 4),
- Beschreibung der vorbereitenden Arbeiten (Kapitel 5),
- Auszugsweise Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs“ (Kurztitel: MgO-Projekt) (Kapitel 8).

Darüber hinaus enthält die Zusammenfassung der Abschlussdokumentation und dementsprechend auch die Kurzfassung gegenüber der Darstellung in den oben genannten Untersuchungsberichten aktualisierte Aussagen zur Expansionsdruckentwicklung der Sorelbaustoffe A1 und C3, da diese Aussagen aus derzeit noch laufenden Forschungsvorhaben (ESA-Vorhaben und MgO-Projekt) abgeleitet wurden. Der Kenntnisstand hat sich zwischenzeitlich fortgeschrieben.

Der fortgeschriebene Kenntnisstand spiegelt sich auch in der veränderten Bezeichnung des Druckes wider, der infolge der Behinderung der Volumenzunahme der Sorelbaustoffe während des Aushärtens in den Druckzellen gemessen wurde. In den oben genannten Untersuchungsberichten (IfG Leipzig 2013) sowie (IfAC TU BAF 2013) wurde hierfür noch die veraltete Bezeichnung „Quelldruck“ verwendet. Innerhalb des Untersuchungsberichtes (MPA Braunschweig 2013b) wurde für den gleichen Sachverhalt die Bezeichnung „Kristallisationsdruck“ gewählt. Innerhalb der Abschlussdokumentation wird dieser Druck sachlich richtig als „Expansionsdruck“ bezeichnet, weil er sowohl durch eine thermische Expansion (bei Abkühlung thermische Kontraktion) als auch durch die Kristallisation neuer Bindemittelphasen (Sekundärkristallisation 1) bzw. aus einer Kombination beider Effekte verursacht worden sein kann. Die Begriffsdefinitionen befinden sich in einem Glossar am Ende der Abschlussdokumentation.

### 3 VORBETRACHTUNGEN

#### 3.1 ERGEBNISSE AUS VORANGEGANGENEN UNTERSUCHUNGEN ZUR EXPANSIONSDRUCKENTWICKLUNG VON SORELBETON DER REZEPTUR DBM2

Gemäß (MPA Braunschweig 2013a) wurde bei Untersuchungen an Sorelbeton der Rezeptur DBM2 eine starke Abhängigkeit der Expansionsdruckentwicklung von der Einwirkungsdauer und Höhe der Temperatur beim Aushärten des Baustoffs festgestellt. Die Versuche zeigten, dass sich bei Abbinde Temperaturen von 120°C kein Expansionsdruck mehr ausgebildet hat. Aus diesen Versuchsergebnissen wurde von der MPA Braunschweig abgeleitet, dass es eine kritische Temperatur bei etwa 90°C gibt, bei der chemisch-mineralogische Prozesse eintreten, die zu einer gravierenden Verringerung des Expansionsdruckes führen.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 21 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

Die Expansionsdruckentwicklung von anderen Sorelbaustoffen, deren Abbindereaktion in diesem Temperaturbereich verläuft, war zu diesem Zeitpunkt unbekannt.

### 3.2 ÜBERSICHT ÜBER DIE IM RAHMEN DER ESA-ERWEITERUNG ZU UNTERSUCHENDEN SORELBAUSTOFFE

Um den Kenntnisstand zur Expansionsdruckentwicklung bei Sorelbaustoffen zu erhöhen, sollten im Rahmen der ESA-Erweiterung vergleichende Materialuntersuchungen an 4 verschiedenen Sorelbaustoffen durchgeführt werden. Bei den ausgewählten Rezepturen handelt es sich um Baustoffe, die in Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingungen am Einsatzort, bei der Herstellung von Schacht- und / oder Streckenverschlüssen im Salinar Anwendung finden können.

Die Grundbestandteile aller Sorelbaustoffe sind reaktionsfähiges, kaustisches Magnesiumoxid (MgO) als Bindemittel und konzentrierte Magnesiumchloridlösung (MgCl<sub>2</sub>-Lösung) als Anmischflüssigkeit. Im entsprechenden Molverhältnis reagieren beide Komponenten unter Ausbildung basischer Magnesiumhydroxidchlorid-Hydrate „x-y-z“ [x Mg(OH)<sub>2</sub> · y MgCl<sub>2</sub> · z H<sub>2</sub>O], welche die Bindemittelphasen des Baustoffs darstellen. In Abhängigkeit vom Verhältnis des MgO zur MgCl<sub>2</sub>-Lösung mit entsprechender Konzentration, bildet sich die 3-1-8 Phase, die 5-1-8 Phase oder ein Gemisch aus beiden Phasen aus. Auch kann noch unumgesetztes MgO nach dem Abbinden enthalten sein, wenn dessen Reaktivität niedrig oder der Lösungsanteil für dessen vollständige Umsetzung zu gering eingestellt ist. Zusätzlich können die Sorelbaustoffe noch Zuschlagstoffe, Zusatzstoffe und / oder Zusatzmittel enthalten (ANHANG 2).

Innerhalb der ESA-Erweiterung wurden folgende Sorelbaustoffe untersucht:

#### 1. Sorelbaustoff A1

Der Sorelbaustoff A1 wurde von der DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC) in Zusammenarbeit mit der K-UTEC für Verschlussmaßnahmen auf der Schachtanlage Asse II entwickelt. Dort wird der Baustoff seit 2006 eingesetzt und im Rahmen der Qualitätssicherung hinsichtlich der an ihn gestellten Anforderungen geprüft. Der A1-Baustoff ist entsprechend des stöchiometrischen Ansatzes der Rezeptur (molares Ansatzverhältnis von >3:1:11) auf die Ausbildung eines Gemisches aus 5-1-8 Phase und 3-1-8 Phase eingestellt und enthält neben den Grundbestandteilen der Sorelbaustoffe einen Steinsalzgruszuschlag mit einem Größtkorn von 4 mm.

#### 2. Sorelbaustoff B2

Der Sorelbaustoff B2, welcher dem DBM2 entspricht, wurde von der Fa. K-UTEC im Rahmen des Forschungsvorhabens „Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar“ (FKZ 02C1214) entwickelt (K-UTEC 2008). Der B2-Baustoff ist entsprechend des stöchiometrischen Ansatzes der Rezeptur (molares Ansatzverhältnis von 3:1:11) auf die Ausbildung der langzeitstabilen 3-1-8 Phase eingestellt. Als Zuschlagstoffe sind Anhydritmehl und Quarzsand, als Zusatzstoff Mikrosilikat und als Zusatzmittel ein Fließmittel enthalten.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 22 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

### 3. Sorelbaustoff C3

Der Sorelbaustoff C3 wurde innerhalb des FuE-Vorhabens „Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs“ (Kurztitel: MgO-Projekt) entwickelt und trägt darin die Bezeichnung R3a-Mörtelvariante<sup>5</sup>. Dieser Baustoff ist entsprechend des stöchiometrischen Ansatzes der Rezeptur (molares Ansatzverhältnis von 3:1:11) auf die Ausbildung der langzeitstabilen 3-1-8 Phase eingestellt. Als Zuschlagstoff kommt Quarzmehl zum Einsatz (IfAC TU BAF 2015).

### 4. Sorelbaustoff D4

Der Sorelbaustoff D4 wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens mit dem Kurztitel „CARLA“ (GTS 2006) für eine Anwendung als Ort- sowie als Spritzbeton in der Grube Teutschenthal entwickelt und an Versuchsbauwerken erprobt. Der D4-Baustoff, welcher innerhalb des Forschungsvorhabens die Bezeichnung MB10 trägt, bildet entsprechend des stöchiometrischen Ansatzes der Rezeptur die metastabile 5-1-8 Phase und enthält silikatische Zuschlagstoffe in Form eines Sand-Kies-Gemisches.

Die Standardrezepturen dieser 4 Sorelbaustoffe sind in Tabelle 1 enthalten. Prüfkörper aus diesen Baustoffen lassen sich gemäß ANHANG 1 bereits makroskopisch unterscheiden (Abbildung 1).



Abbildung 1: Prüfkörper der untersuchten Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4

<sup>5</sup> Innerhalb des FuE-Vorhabens „Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs“ (FKZ 02E10880) existiert neben der R3a-Mörtelvariante auch eine Betonvariante. Die R3a-Betonrezeptur befindet sich im Rahmen des ELSA II-Vorhabens in der halbtechnischen Erprobung (IfBuS 2015).

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 23 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Tabelle 1: Standardrezepturen der untersuchten Sorelbaustoffe

	Sorelbaustoff A1 (Asse-Baustoff, DBE TEC 2007)	Komponenten- anteile in m%	Sorelbaustoff B2 (DBM2, K-UTEC 2010)	Komponenten- anteile in m%	Sorelbaustoff C3 (R3a-Mörtelvariante, IfAC TU BAF 2015)	Komponenten- anteile in m%	Sorelbaustoff D4 (Sorelbeton MB10, GTS 2006)	Komponenten- anteile in m%
<b>Bindemittel</b>	MgO: F4-200 (Fa. L&V)	11,3 %	MgO: F4-200 (Fa. L&V)	10,5 %	MgO: F4-200 (Fa. L&V)	18,7 %	MgO: Styromag G75	18,3 %
<b>Zuschlagstoffe</b>	Steinsalz: 0 mm - 4 mm	63,7 %	Quarzsand, Anhydritmehl,	34,3 % 29,5 %	Quarzmehl	37,4 %	Sand: 0 mm – 2 mm Kies: 2 mm – 8 mm	37,1 % 26,3 %
<b>Zusatzstoffe</b>	-	-	Mikrosilikat	4,5 %	-	-	-	-
<b>Zusatzmittel</b>	-	-	Fließmittel	0,4 %	-	-	-	-
<b>Anmischflüssigkeit</b>	MgCl <sub>2</sub> -Lösung nahe einer R-Lösung mit einer MgCl <sub>2</sub> -Konzentration von ca. 400 g/l und einer Dichte von 1,32 g/cm <sup>3</sup> bei 20°C	25,0 %	MgCl <sub>2</sub> -Lösung mit einer MgCl <sub>2</sub> -Konzentration von ca. 390 g/l - 430 g/l und einer Dichte von 1,32 g/cm <sup>3</sup> bei 20°C	20,8 %	5 molale MgCl <sub>2</sub> -Lösung	43,9 %	R-Lösung	18,3 %
<b>Phasenbestand<sup>6</sup></b>	3-1-8 und 5-1-8 Phase		3-1-8 Phase		3-1-8 Phase		5-1-8 Phase	

<sup>6</sup> Phasenbestand im Baustoff, der sich in Abhängigkeit des stöchiometrischen Ansatzes der Ausgangskomponenten nach dem Abbinden ausbilden sollte.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 24 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

## 4 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

Anlässlich der Erkenntnisse aus den Expansionsdruckversuchen an Sorelbeton der Rezeptur DBM2, welche im Jahre 2012 im Nachgang zum in-situ-Versuch „Versuchsbauwerk im Anhydrit der Grube Bleicherode“ durch die MPA Braunschweig abgeleitet wurden (MPA Braunschweig 2013a), wurde vom BfS die ESA-Erweiterung mit vergleichenden Untersuchungen zum Materialverhalten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 in Auftrag gegeben.

Ziel der Untersuchungen im gegenständlichen Untersuchungsprogramm war es, die Baustoffe hinsichtlich eines sich entwickelnden und gegebenenfalls verbleibenden Expansionsdruckes zu bewerten. Begleitend dazu sollten die baustoffcharakterisierenden Eigenschaften (Porosität, mechanische Eigenschaften und Phasenbestand) ermittelt werden, um den Einfluss der Abbinde temperatur auf die Ausbildung dieser Materialeigenschaften abschätzen zu können. Anhand dieser Erkenntnisse sollte eine Aussage zur grundsätzlichen Eignung der untersuchten Sorelbaustoffe für einen Einsatz in massigen, untertägigen Bauwerken, wie geotechnischen Barrieren, getroffen werden.

### 4.1 UNTERSUCHUNGSINHALT

Zu diesem Zweck wurden für jeden der 4 Sorelbaustoffe Versuche zur Bestimmung:

- der Qualitätsparameter an den Ausgangskomponenten der Sorelbaustoffe,
- der Qualitätsparameter an den frisch angemischten Sorelbaustoffen,
- der Expansionsdruckentwicklung,
- der adiabatischen Temperaturerhöhung,
- der Porosität der ausgehärteten Probekörper,
- der mechanischen Eigenschaften der ausgehärteten Probekörper

sowie

- des Phasenbestandes in den ausgehärteten Probekörpern

durchgeführt.

Bei diesen Versuchen handelte es sich gemäß ANHANG 1 jeweils um vergleichende Indexversuche zur Charakterisierung der verschiedenen Sorelbaustoffe. Diese Versuche spiegeln tendenziell das Materialverhalten unter Berücksichtigung der Temperaturvorgeschichte wider, sind jedoch nicht statistisch abgesichert. Der Probenumfang eignet sich nur eingeschränkt für die Ableitung umfassender allgemeingültiger Aussagen, dennoch erlaubt er eindeutige Aussagen in Bezug auf die Fragestellungen (Versuchsziele).

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 25 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

### 4.2 VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER EXPANSIONSDRUCKENTWICKLUNG

Mit den Versuchen zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung sollte der direkte messtechnische Nachweis für einen sich entwickelnden und gegebenenfalls verbleibenden Expansionsdruck erbracht werden. Hierzu wurden die Baustoff Suspensionen nach dem Anmischen in stählerne, gasdicht verschlossene Druckzellen eingefüllt. Die befüllten, instrumentierten Druckzellen wurden in Klimaschränken gelagert, um während des Abbindeprozesses definierte Temperatur-Zeit-Regime mit Aufheiz-, Halte- und Abkühlphase aufbringen zu können. Versuchsbegleitend wurde jeweils eine befüllte, instrumentierte Druckzelle bei Raumtemperatur gelagert. Auf diese Weise konnte das Abbindeverhalten der Baustoffe unter Einspannung für insgesamt vier verschiedene Temperatur-Zeitfenster simuliert werden.

#### 4.2.1 Vorbedingung

Grundlage für eine spätere Bewertung der Ergebnisse aus den Indexversuchen war eine qualitätsgesicherte Herstellung der Sorelbaustoffe. Diese erforderte vor der Versuchsdurchführung die Bestimmung der Qualitätsparameter an den Ausgangskomponenten und den frisch angemischten Baustoffen sowie einen baustoffbezogenen Vergleich der Parameter untereinander, da Referenzwerte bislang nicht für jeden Baustoff vorliegen.

#### 4.2.2 Versuchsrandbedingungen

Um bei der Ergebnisinterpretation Einflüsse aus Varianzen in der MgO-Reaktivität ausschließen zu können, regte das BfS an, im Rahmen der vergleichenden Untersuchungen für alle Sorelbaustoffe ein einheitlich reaktives Bindemittel zu verwenden. Dies wurde geprüft, ebenso wie die Möglichkeit, eine einheitliche Anmischflüssigkeit für alle 4 Baustoffrezepturen einsetzen zu können, um die Beschaffung der Baustoffkomponenten vereinfachen bzw. beschleunigen zu können.

#### 4.2.3 Auswahl der Temperatur-Zeit-Regime

Die Temperatur-Zeit-Regime, denen die Sorelbaustoffe während des Abbindeprozesses unterliegen, wurden zum einen anhand des vorliegenden Kenntnisstandes aus dem in-situ-Versuch Bleicherode sowie den im Nachgang an der MPA Braunschweig durchgeführten Expansionsdruckversuchen am Sorelbaustoff DBM2 und zum anderen anhand des vorliegenden Kenntnisstandes aus dem ESA-Vorhaben ausgewählt. Demnach war bekannt, dass in untertägigen, massigen Bauwerken aus Sorelbaustoffen Abbinde Temperaturen im Bereich von 100°C auftreten können und dass gemäß (MPA Braunschweig 2013a) beim Sorelbaustoff DBM2, möglicherweise aufgrund der hohen Abbinde Temperaturen, Prozesse eintreten, die zu einer gravierenden Verringerung des Expansionsdruckes führen. Inwieweit hohe Abbinde Temperaturen das Materialverhalten der Sorelbaustoffe A1, C3 und D4 beeinflussen, war unbekannt.

Als Maximaltemperaturen für die Temperatur-Zeitfenster (TZF) wurden neben 120°C und 90°C noch zwei niedrigere Werte, nämlich 60°C und 20°C (d.h. Raumtemperatur) gewählt, um bestenfalls einen großen Temperaturbereich für den Erhalt eines dauerhaften Expansionsdruckes identi-

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 26 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

fizieren zu können. Die Versuche bei 20°C dienten gleichzeitig als Referenz zur Qualitätssicherung. Die gewählten Maximaltemperaturen der TZF 60°C, 90°C und 120°C stimmten mit denen des ESA-Vorhabens überein.

Die Dauer der Aufheizphase bis zum Erreichen der Maximaltemperatur innerhalb von 48 h sowie die Dauer der Haltephase dieser Temperatur ebenfalls für 48 h wurde aus In-situ-Bauwerken<sup>7</sup> abgeleitet. Die Abkühlrate wurde dagegen mit 0,42 K/h deutlich schneller gegenüber in-situ Bedingungen gewählt, um den Versuchsablauf zu beschleunigen. Die resultierenden Temperatur-Zeitfenster für die Abbindereaktionen sind gemäß (MPA Braunschweig 2013b) in Abbildung 2 dargestellt.

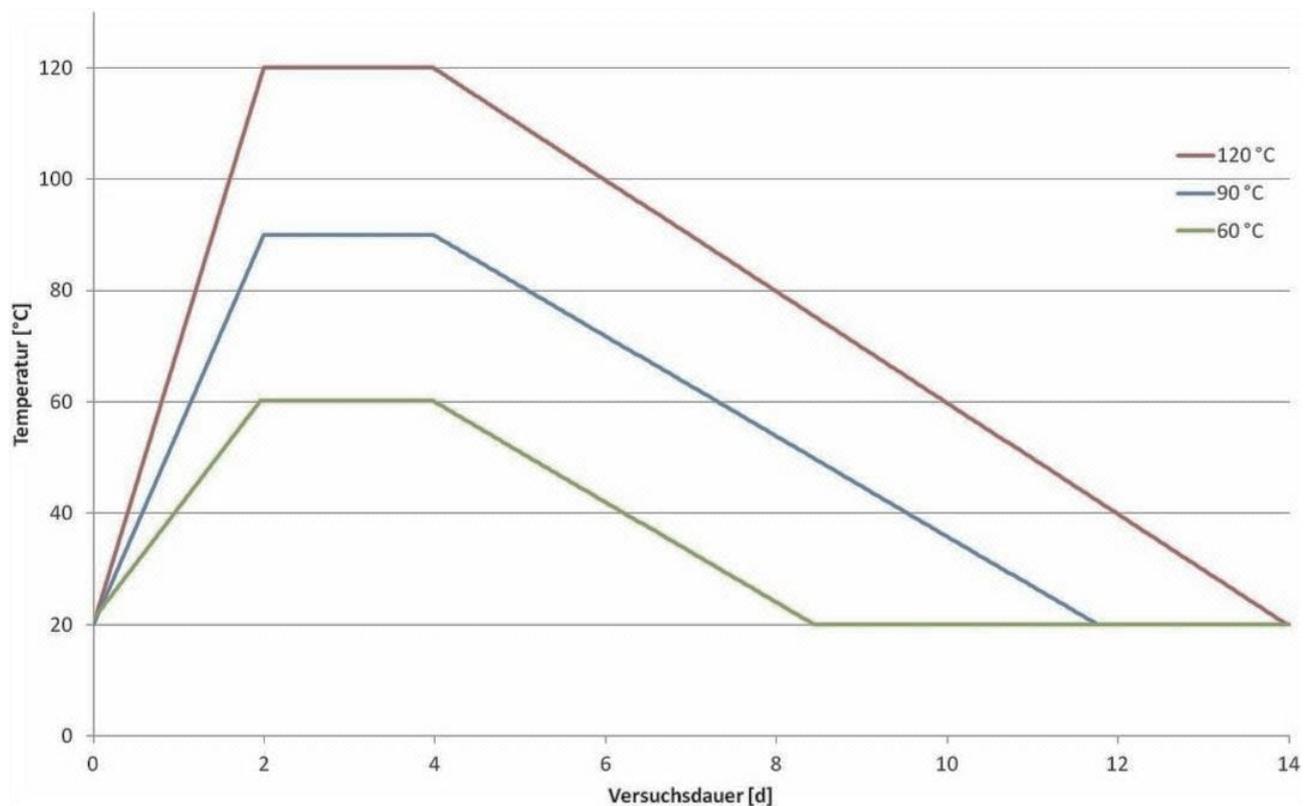


Abbildung 2: Temperatur-Zeitfenster (TZF) für die Abbindereaktionen

<sup>7</sup> Versuchsbauwerk aus DBM2 im Anhydrit der Grube Bleicherode (MPA Braunschweig 2013a) sowie Verfüllabschnitt zwischen der 850-m-Sohle und 800-m-Sohle im Blindschacht 4 der Schachtanlage Asse II, Untersuchungsprogramm zum Nachweis der Setzungsstabilität einer Füllsäule aus Sorelbeton der Rezeptur A1 (ERCOSPLAN und IfG Leipzig 2009)

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 27 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### 4.2.4 Umfang der Untersuchungen zur Expansionsdruckentwicklung

Je Sorelbaustoff und TZF wurden parallel 3 Versuche zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung realisiert, um die Ergebnisse validieren zu können. Die bei Raumtemperatur (RT), d.h. etwa 20°C, durchzuführenden Versuche wurden jeweils als Begleitversuche zu den Versuchen der TZF 60°C, 90°C und 120°C durchgeführt. Eine Übersicht zum Umfang der Untersuchungen der MPA Braunschweig enthält Tabelle 2 (MPA Braunschweig 2013b).

Tabelle 2: Umfang der Untersuchungen zur Expansionsdruckentwicklung

Temperatur	Rezeptur	Anzahl Versuche	Anzahl Begleitversuche bei RT
120 °C (TZF 120°C)	A1	3 Stück	1 Stück
	B2	3 Stück	1 Stück
	C3	3 Stück	1 Stück
	D4	3 Stück	1 Stück
90 °C (TZF 90°C)	A1	3 Stück	1 Stück
	B2	3 Stück	1 Stück
	C3	3 Stück	1 Stück
	D4	3 Stück	1 Stück
60 °C (TZF 60°C)	A1	3 Stück	1 Stück
	B2	3 Stück	1 Stück
	C3	3 Stück	1 Stück
	D4	3 Stück	1 Stück

### 4.3 ADIABATISCHE TEMPERATURERHÖHUNG

Für die 4 Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 wurde die adiabatische Temperaturerhöhung ermittelt, um den Temperaturbereich abschätzen zu können, der innerhalb eines massigen Bauwerkes aus diesen Baustoffen maximal auftreten kann.

### 4.4 VERSUCHE AN DEN AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPERN

An repräsentativen, ausgehärteten Probekörpern der Versuche zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung wurden im Weiteren folgende Indexversuche durchgeführt:

- Bestimmung der Porosität,
- Bestimmung der mechanischen Eigenschaften
- Bestimmung des Phasenbestandes,

um eine Beeinflussung dieser baustoffcharakterisierenden Eigenschaften durch das durchlaufene Temperatur-Zeit-Regime während der Abbindereaktion identifizieren zu können.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 28 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Stand: 09.03.2016
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		

### 4.5 RANDBEDINGUNGEN DER LEISTUNGSERBRINGUNG

Die einzelnen Teilleistungen dieses Untersuchungsprogramms wurden von den projektbeteiligten Institutionen entsprechend der in Tabelle 3 dargestellten Aufgabenverteilung erbracht.

Tabelle 3: Teilleistungen der projektbeteiligten Firmen und Institutionen

	MPA Braunschweig	IfG Leipzig	IfAC, TU BAF
Versuche zur Bestimmung:			
(1) der Qualitätsparameter an den Komponenten der Sorelbaustoffe			X
(2) der Qualitätsparameter an den frisch angemischten Sorelbaustoffen	X		
(3) der Expansionsdruckentwicklung	X		
(4) der adiabatischen Temperaturerhöhung	X		
(5) der Porosität der ausgehärteten Probekörper	X		
(6) der mechanischen Eigenschaften der ausgehärteten Probekörper		X	
(7) des Phasenbestandes der ausgehärteten Probekörper			X

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 29 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

## 5 VORBEREITENDE ARBEITEN

Im Vorfeld der Versuche zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung wurden federführend durch das IfAC der TU BAF die Komponenten der Sorelbaustoffe ausgewählt und diese auf ihre Eignung hin bewertet. Darüber hinaus wurden die einzelnen Rezepturen, unter Berücksichtigung der Versuchsrandbedingungen, spezifiziert und ggf. modifiziert. Teil dieser vorbereitenden Arbeiten waren die Versuche zur Bestimmung der Qualitätsparameter an den Ausgangskomponenten der Baustoffe sowie die Überprüfung auf deren Einhaltung, um die Herstellung qualitätsgesicherter Sorelbaustoffe zu gewährleisten.

### 5.1 AUSWAHL DER BINDEMITTEL

Nach Prüfung der jeweils einzusetzenden MgO-Reaktivitäten durch das IfAC der TU BAF konnte für die Rezepturen A1, B2 und D4 ein identisches Bindemittel ausgewiesen werden. Für die Rezeptur C3 wurde ein weniger reaktives Magnesiumoxid benötigt. Die Spezifikationen der gewählten MgO-Typen sind in Tabelle 4 enthalten. Beide Reaktivitätstypen werden von der Firma Lehmann & Voss Co. KG (Fa. L&V) vertrieben. Die seitens des Herstellers angegebenen Reaktivitäten in Form des Zitronensäuretestwertes (ZTW)<sup>8</sup> konnten für beide Reaktivitätstypen mit einer Bandbreite von  $\pm 20$  s reproduziert werden. Die Werte lagen in einer Größenordnung, wie sie üblicherweise bei der Bestimmung durch verschiedene Labore erhalten werden (ANHANG 2).

Das Bindemittel F4-200 der Charge 105733A wurde von der Fa. K-UTEC an das IfAC der TU BAF sowie an die MPA Braunschweig geliefert. Das Bindemittel F4-200 der Charge 105760B wurde durch das IfAC der TU BAF von der Fa. Lehmann & Voss Co. KG bezogen.

Tabelle 4: Spezifikation der gewählten MgO-Typen

Sorelbaustoff	MgO-Typ	Zeit bis pH-Wert 7	Zeit bis pH-Wert 8,6
A1, B2 und D4	F4-200 (Fa. L&V), Charge 105733A	220 s $\pm$ 20 s	240 s $\pm$ 20 s
C3	F4-200 (Fa. L&V), Charge 105760B	270 s $\pm$ 20 s	320 s $\pm$ 20 s

### 5.2 AUSWAHL DER ANMISCHFLÜSSIGKEIT

Gemäß ANHANG 2 konnte für alle 4 Baustoffrezepturen eine einheitliche Anmischflüssigkeit eingesetzt werden. Diese wurde von der Asse-GmbH bereitgestellt und entsprach einer S<sub>EES</sub> 30-Lösung der DEUSA International GmbH (DEUSA). Bei diesem Lösungstyp handelt es sich um eine nahe am Sättigungspunkt von Bischofit ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) liegende, konzentrierte  $\text{MgCl}_2$ -Lösung, welche noch geringe Anteile an  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  enthalten kann. Die durchschnittliche  $\text{MgCl}_2$ -Konzentration dieser Lösung beträgt gemäß Produktdatenblatt (DEUSA 2010) zwischen 375 g/l und 400 g/l. Mit einer Dichte von 1,28 g/cm<sup>3</sup> bei 20°C beträgt die molale  $\text{MgCl}_2$ -Konzentration zwischen 4,4 mol/(kg H<sub>2</sub>O) und 5 mol/(kg H<sub>2</sub>O).

<sup>8</sup> Zeit in s für die Neutralisationsreaktion von MgO und Zitronensäure bis zum Erreichen des pH-Wertes 7 bzw. des pH-Wertes 8,6; (Die Ermittlung der Reaktivität des Bindemittels erfolgte gemäß einer Verfahrensanweisung des IfAC der TU BAF, da für die Bestimmung des Zitronensäurewertes kein einheitliches Verfahren existiert.)

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 30 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### 5.3 AUSWAHL DER ZUSCHLAGSTOFFE

Die untersuchten Sorelbaustoffe unterscheiden sich in Art und Komponentenanteil der Zuschlagstoffe.

Der Steinsalzgruszuschlag für die Rezeptur A1 wurde von der Firma ESCO European Salt Company GmbH & Co. KG (ESCO), Werk Braunschweig-Lüneburg bereitgestellt. Eine Probe dieses Steinsalzgruses wurde im Prüflabor für Bau- und Feststoffe der Asse-GmbH untersucht. Wassergehalt und Korndichte lagen demnach innerhalb der auf der Schachtanlage Asse II vorkommenden Bandbreite. Die Kornverteilungskurve lag im unteren Körnungsbereich etwas außerhalb der Grenzkurven aus der Rezepturentwicklung (Abbildung 3). Nach Einschätzung der Asse-GmbH konnte der Steinsalzgrus trotz des etwas verminderten Feinkornanteils für die geplanten Versuche eingesetzt werden.

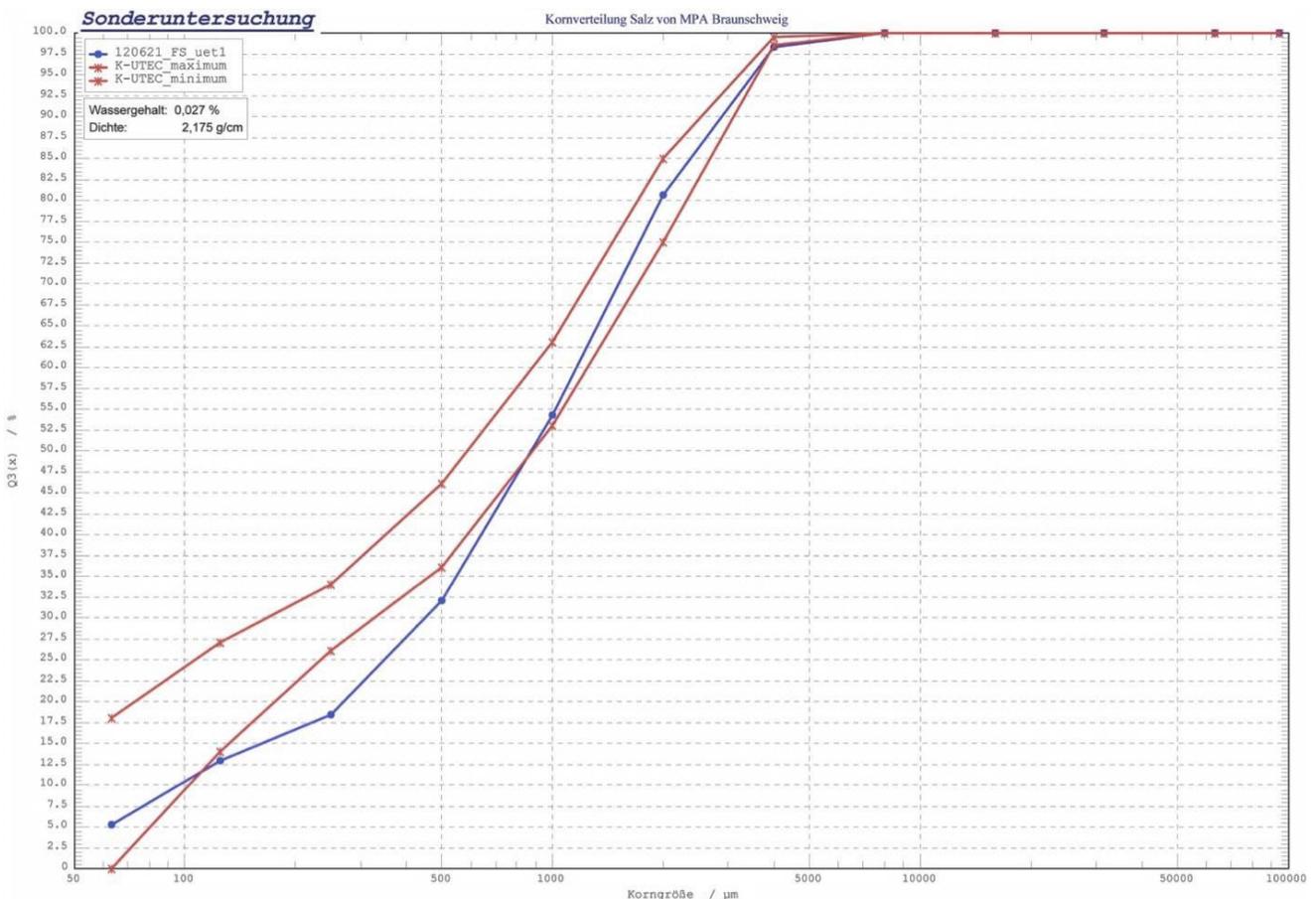


Abbildung 3: Kornverteilung der Steinsalzgrusprobe

Die Trockenmischung, d.h. das Gemisch aus MgO-Bindemittel und Zuschlagstoffen, für den Sorel-beton der Rezeptur A1 wurde an der MPA Braunschweig hergestellt.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 31 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Die Zuschlagstoffe und der Zusatzstoff für die Rezeptur B2, d.h. Quarzsand, Anhydritmehl und Mikrosilikat, wurden durch die Fa. K-UTEC bezogen. An die MPA Braunschweig wurde eine Trockenmischung geliefert.

Für die Sorelbaustoffe C3 und D4 wurden am IfAC der TU BAF ebenfalls Trockenmischungen vorbereitet. In der Rezeptur C3 kam das Quarzmehl MICROSIL® M 300 der EUROQUARZ GmbH (EUROQUARZ) als Füller zum Einsatz. Dieses Gesteinsmehl umfasst einen Korngrößenbereich von 0,001 mm bis 0,1 mm (EUROQUARZ 2012). Die zugehörige Sieblinie ist in Tabelle 5 enthalten.

Tabelle 5: Sieblinie des Quarzmehl-Füllers für den C3-Baustoff

Korngröße in mm	Siebdurchgang in m%
0,100	100,00
0,063	97,3
0,040	86,2
0,030	75,3
0,020	58,2
0,010	33,9
0,005	18,2
0,002	5,1
0,001	0,9

Für den Sorelbaustoff D4 kam ein Sand-Kies-Gemisch in der Lieferkörnung 0/8 mm der Firma QUICK-MIX Berg- und Tunnelbaustoffe GmbH & Co. KG (QUICK-MIX) zum Einsatz. Die Sieblinie dieses Gemisches wurde gemäß (GTS 2006) an die Fuller-Kurve dieses Korngrößenbereiches angepasst und ist in Tabelle 6 enthalten.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 32 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Tabelle 6: Sieblinie des Sand-Kies-Gemisches für den D4-Baustoff

Korngröße in mm	Siebdurchgang in m%	
	Sand-Kies-Gemisch	Fuller-Kurve (Körnung 0 / 8 mm)
8	100	100,00
5	-	79,06
4	76	70,71
3,15	-	62,75
2,2	56	-
2	-	50,00
1,6	-	44,72
1,4	47	-
1	37	35,36
0,8	-	31,62
0,63	29	-
0,5	-	25,00
0,25	-	17,68
0,1	-	11,18
0,063	-	8,87
0,021	-	5,12
0,008	-	3,16
0,004	-	2,24
0,0016	-	1,41

### 5.4 MODIFIZIERTE SORELBAUSTOFFREZEPTUREN

Vor dem Hintergrund, ein einheitlich reaktives Bindemittel und eine einheitliche Anmischflüssigkeit für alle 4 Baustoffrezepturen zu verwenden, musste die Rezeptur D4 in ihren Komponentenanteilen geringfügig modifiziert werden, um ein zur Originalrezeptur vergleichbares molares Ansatzverhältnis zu gewährleisten sowie um eine Eignung im Hinblick auf den Einsatz der Spritzbetontechnologie zu gewährleisten.

Die modifizierten Sorelbaustoffrezepturen sowie die jeweiligen Komponentenanteile, wie sie innerhalb dieses Untersuchungsprogramms zum Einsatz kamen, sind zusammengefasst in Tabelle 7 enthalten (ANHANG 2).

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 33 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Tabelle 7: Modifizierte Rezepturen und Komponentenanteile der untersuchten Sorelbaustoffe

	Sorelbaustoff A1 (Asse-Baustoff)	Komponenten- anteile in m%	Sorelbaustoff B2 (DBM2)	Komponenten- anteile in m%	Sorelbaustoff C3 (R3a-Mörtelvariante)	Komponenten- anteile in m%	Sorelbaustoff D4 (Sorelbeton MB10)	Komponenten- anteile in m%
<b>Bindemittel</b>	MgO: F4-200 (Fa. L&V), Charge 105733A pH 7: 220 ± 20 s pH 8,6: 240 ± 20 s	11,3 %	MgO: F4-200 (Fa. L&V), Charge 105733A pH 7: 220 ± 20 s pH 8,6: 240 ± 20 s	10,5 %	MgO: F4-200 (Fa. L&V), Charge 105760B pH 7: 270 ± 20 s pH 8,6: 320 ± 20 s	18,7 %	MgO: F4-200 (Fa. L&V), Charge 105733A pH 7: 220 ± 20 s pH 8,6: 240 ± 20 s	15,0 %
<b>Zuschlagstoffe</b>	Steinsalz (Fa. ESCO), Körnung: Bandbreite mit Größtkorn 4 mm	63,7 %	Quarzsand, Anhydritmehl (Fa. QUICK-MIX)	34,3 % 29,5 %	Quarzmehl (Fa. EUROQUARZ) MICROSIL® M 300, Band- breite: 0,001 mm bis 0,1 mm	37,4 %	Sand-Kies-Gemisch (Fa. QUICK-MIX) Lieferkörnung: 0/8 mm	70,0 %
<b>Zusatzstoffe</b>	-	-	Mikrosilikat	4,5 %	-	-	-	-
<b>Zusatzmittel</b>	-	-	Fließmittel	0,4 %	-	-	-	-
<b>Anmischflüssigkeit</b>	MgCl <sub>2</sub> -Lösung S <sub>EES</sub> 30, (Fa. DEUSA)	25,0 %	MgCl <sub>2</sub> -Lösung S <sub>EES</sub> 30, (Fa. DEUSA)	20,8 %	MgCl <sub>2</sub> -Lösung S <sub>EES</sub> 30, (Fa. DEUSA)	43,9 %	MgCl <sub>2</sub> -Lösung S <sub>EES</sub> 30, (Fa. DEUSA)	15,0 %

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 34 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

## 6 DURCHFÜHRUNG DES UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS

Nachfolgend werden für jeden Versuch dieses Untersuchungsprogramms separat die Versuchseinrichtungen und das Versuchsverfahren bzw. die Versuchsdurchführung beschrieben. Die Ausführungen in diesem Kapitel sind Kurzfassungen der Erläuterungen in (MPA Braunschweig 2013b), in ANHANG 1 bzw. in ANHANG 2.

### 6.1 VERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER EXPANSIONSDRUCKENTWICKLUNG

Die Versuchseinrichtung für die Erfassung der Expansionsdruckentwicklung war eine stehende, zylindrische Stahlform (Innendurchmesser  $d_i = 148$  mm, Zylinderhöhe  $h = 300$  mm, Wandstärke  $s = 5$  mm), die oben und unten mit quadratischen biegesteifen Stahlplatten (200 mm x 200 mm) verschweißt wurde. In der oberen Widerlagerplatte befanden sich zwei Öffnungen: eine zum Befüllen der Druckzelle (Bohrung mit einem M42 Innengewinde) und eine zum Entlüften der Druckzelle während des Befüllvorgangs (Bohrung mit M10 Innengewinde). Beide Bohrungen wurden nach dem Befüllen mit passenden Verschlusschrauben abgedichtet, so dass die Druckzellen flüssigkeits- und gasdicht bis 250 bar waren (MPA Braunschweig 2013b).

Der Expansionsdruck wurde aus der radialen Stahlverformung der Druckzellen ermittelt. Diese Verformung wurde über 4 Dehnmessstreifen (DMS) aufgenommen, welche auf der Außenseite der Druckzellen angebracht waren. Innerhalb des Untersuchungsprogramms kamen 2 Typen von DMS zum Einsatz:

- DMS QFLA-6-11 für die Versuche im TZF 60°C, 90°C und 120°C

und

- DMS PFL-20-11 für die Versuche bei Raumtemperatur.

In einem vergleichbaren Projekt<sup>9</sup> mit nahezu identischen Druckzellen wurde von der MPA Braunschweig anhand eines Kalibrierversuchs gezeigt, dass die Druckentwicklung anhand der radialen Stahlverformung bestimmbar war und dass eine Beeinflussung der DMS durch die Temperaturlagerung nicht vorlag (MPA Braunschweig 2013b).

Gemäß (MPA Braunschweig 2013b) wurden an insgesamt 8 Anmischterminen (2 dieser 8 Termine resultierten aus Wiederholungsmessungen) die Sorelbaustoffe aus den vorbereiteten Trockenmischungen unter Zugabe der Anmischflüssigkeit hergestellt und in die Druckzellen eingefüllt (Tabelle 8). An den frisch angemischten Baustoffen wurden folgende Materialeigenschaften bzw. Qualitätsparameter bestimmt (Tabelle 9):

- die Laugentemperatur<sup>10</sup>,

<sup>9</sup> Untersuchungsbericht (1318/650/11-a) - Wth: ERA Morsleben – Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Quellverhalten auf DBM2 vom 19.06.2013 der MPA Braunschweig (2013a)

<sup>10</sup> Zitat gemäß (MPA Braunschweig 2013b), besser: Temperatur der Anmischflüssigkeit bzw. Lösungstemperatur

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Seite: 35 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

- die Mörteltemperatur,
- das Fließmaß und das Fließmaß nach 2 h,
- die Rohdichte

sowie

- der Luftporengehalt.

Die Bestimmung der Qualitätsparameter an den Ausgangsstoffen sowie den frisch angemischten Baustoffen diente dem Nachweis, dass an den einzelnen Anmischterminen Baustoffe mit vergleichbaren Eigenschaften reproduziert wurden. Die Ergebnisse haben auch gezeigt, dass trotz guter Reproduzierbarkeit der Baustoffe, dennoch eine geringfügige, natürliche Materialvariabilität vorlag.

Die Messwerterfassung zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung begann jeweils unmittelbar nach dem Verschluss der Druckzellen mit Beginn der Temperaturlagerung in den Klimaschränken. Die Messergebnisse sind zusammengefasst in Abschnitt 7.1 enthalten.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 36 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Tabelle 8: Anmischtermine für die Versuche zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung

		Sorelbaustoff A1 (Asse-Baustoff)	Sorelbaustoff B2 (DBM2)	Sorelbaustoff C3 (R3a-Mörtelvariante)	Sorelbaustoff D4 (Sorelbeton MB10)
Anmisch- termine	TZF RT	10.07.2012, 21.08.2012 und 18.10.2012		03.05.2012, 07.06.2012, 17.09.2012, 19.11.2012 und 20.12.2012	
	TZF 60°C	18.10.2012		19.11.2012	
	TZF 90°C	21.08.2012		17.09.2012 und 20.12.2012	
	TZF 120°C	10.07.2012		03.05.2012 und 07.06.2012	

Tabelle 9: Qualitätsparameter der frisch angemischten Sorelbaustoffe

	Sorelbaustoff A1 (Asse-Baustoff)			Sorelbaustoff B2 (DBM2)			Sorelbaustoff C3 (R3a-Mörtelvariante)					Sorelbaustoff D4 (Sorelbeton MB10)				
Laugentemperatur <sup>10</sup> in °C	20,2	22,8	15,5	20,2	22,8	15,5	19,3	20,6	19,3	17,0	17,1	19,3	20,6	19,3	17	17,1
Mörteltemperatur in °C	21,0	24,1	18,6	21,4	25,0	18,9	20,6	22,7	20,3	17,5	18,6	21,6	22,7	21,0	19,9	19,6
Fließmaß in mm	560	530	380	460	490	400	780	750	720	800	620	n.b. <sup>11</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Fließmaß 2h in mm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	820	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Rohdichte in g/cm <sup>3</sup>	1,860	1,860	1,900	2,120	2,160	2,200	1,858	1,850	1,880	1,860	1,860	2,220	2,231	2,300	2,260	2,240
Luftporengehalt in %	3,0	3,9	4,6	3,5	3,4	3,3	2,4	2,7	2,8	2,3	2,2	5,9	5,7	2,75	5,9	5,6

<sup>11</sup> n.b. – nicht bestimmbar (Fließmaße der Baustoffe nicht bestimmbar, da die Baustoffe nach dem Anmischen nicht gut fließfähig waren bzw. 2 h nach dem Anmischen nicht mehr gut fließfähig waren.)

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 37 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### 6.2 ADIABATISCHE TEMPERATURERHÖHUNG

Die adiabatische Temperaturerhöhung der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 wurde gemäß (MPA Braunschweig 2013b) ermittelt, um die maximale Temperaturentwicklung in einem massigen Bauwerk aus diesen Baustoffen abschätzen zu können.

Die frisch angemischten Sorelbaustoffe wurden hierzu in eine Versuchseinrichtung gefüllt, für die adiabatische Bedingungen simuliert wurden. Dabei wurde die Temperaturentwicklung der Baustoffe über Temperatursensoren aufgenommen und die Umgebungsluft in der Versuchseinrichtung jeweils auf die gleiche Temperatur geregelt, so dass die Baustoffe innerhalb des Beobachtungszeitraumes von max. 80 h theoretisch ohne Wärmeverlust die maximale Temperatur aus der Reaktion des Bindemittels erreichen konnten (MPA Braunschweig 2013b).

Die Messergebnisse sind zusammengefasst in Abschnitt 7.2 enthalten.

### 6.3 VERSUCHE AN DEN AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPERN

Nach Abschluss der Versuche zur Bestimmung der Expansionsdruckentwicklung nach maximal 25 Tagen Beobachtungszeit wurden die Druckzellen durch die MPA Braunschweig aufgetrennt. Es erfolgte eine visuelle Kontrolle des erreichten Verfüllstandes in den Druckzellen.

Bei den Sorelbaustoffen A1, B2 und C3 konnten keine Auffälligkeiten beobachtet werden. Dagegen wurden bei einigen Probekörpern der Rezeptur D4 lokale Luftblasen auf der oberen Widerlagerplatte festgestellt. Ein durchgängiger Luftspalt oder ähnliches war nicht vorhanden (MPA Braunschweig 2013b).

Aus den ausgehärteten Probekörpern wurden zylindrische Bohrkerne mit einem Durchmesser von 40 mm in unterschiedlicher Länge gewonnen. Gebohrt wurde mit Luftspülung. Aus dem Restmaterial wurden Kleinproben für die Bestimmung der Porositäten herausgearbeitet (MPA Braunschweig 2013b).

#### 6.3.1 Versuche zur Bestimmung der Porosität

Die Kleinproben für die Bestimmung der Porositäten wurden zunächst bis zur Massekonstanz gefriergetrocknet. Anschließend wurde der Porenraum mittels Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt. Für Porenradien bis ca. 0,004  $\mu\text{m}$  konnte durch die Beziehung zwischen aufgebrachtem Druck (Maximaldruck 2000 bar) und eindringendem Volumen auf das Porenvolumen geschlossen werden (MPA Braunschweig 2013b).

Die Messergebnisse sind zusammengefasst in Abschnitt 7.3 enthalten.

#### 6.3.2 Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die an der MPA Braunschweig gewonnenen Bohrkerne wurden an das IfG Leipzig geliefert, um dort die mechanischen Eigenschaften der ausgehärteten Probekörper bestimmen zu lassen.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 38 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### a.) Versuchsprogramm

Bezogen auf eine Probencharge<sup>12</sup> wurden gemäß ANHANG 1 zur Charakterisierung der Probekörper prinzipiell folgende Teilleistungen erbracht:

- Herstellung von jeweils 2 zylindrischen Prüfkörpern ( $d = 40 \text{ mm}$ ,  $l = 80 \text{ mm}$ ) mit Ablängen und Feinschleifen der Endflächen der von der MPA Braunschweig bereitgestellten Bohrerkerne;
- Dichtebestimmung und Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten  $v_p$ ,  $v_s$  zur Bestimmung der „dynamischen“ elastischen Konstanten;
- Fotografische Dokumentation der Prüfkörper vor und nach der Versuchsdurchführung;
- Untersuchungen am Prüfkörper 1 (Kurzzeitversuche):
  - Isostatischer Kompaktionsversuch (schnelle Belastung:  $\dot{p} = 0,1 \text{ MPa/s}$ ), mit 3 zwischengeschalteten axialen und / oder lateralen Zwischenentlastungen bei  $p = 5 \text{ MPa}$ ,  $10 \text{ MPa}$  und  $15 \text{ MPa}$  zur Charakterisierung des Kompaktionsverhaltens bei „schneller“ Belastung,
  - Triaxialer Mehrstufenversuch bei  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ ,  $4 \text{ MPa}$ ,  $6 \text{ MPa}$  und  $10 \text{ MPa}$  in Kompression mit konstanter Axialverformungsrate ( $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/s}$ ) zur Bestimmung der Bruchspannung in den verschiedenen Manteldruckstufen zur Ableitung der Festigkeitskurve mit den MOHR-COULOMB-Parametern;
- Untersuchungen am Prüfkörper 2 (Langzeitversuche):
  - Isostatischer Kompaktionsversuch (langsame Belastung:  $\dot{p} = 0,005 \text{ MPa/s}$ ), mit 3 zwischengeschalteten axialen und / oder lateralen Zwischenentlastungen bei  $p = 5 \text{ MPa}$ ,  $10 \text{ MPa}$  und  $15 \text{ MPa}$  zur Charakterisierung des Kompaktionsverhaltens bei „langsamer“ Belastung,
  - Triaxialer Druckversuch bei  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$  in Kompression mit konstanter Axialverformungsrate ( $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/s}$ ) bis ca. 80% der für diese Manteldruckstufe im vorhergehenden Mehrstufenversuch bestimmten Bruchfestigkeit,
  - Wechsel in Relaxationsversuch (Verformung wird konstant gehalten:  $\dot{\epsilon} = 0$ , Dauer 2 Tage) zur Aufnahme der zeitabhängigen Spannungsrelaxation,
  - Fortsetzung des triaxialen Druckversuchs zur Bestimmung der Bruchfestigkeit mit Verformung bis in das Restfestigkeitsniveau zur Überprüfung der Ergebnisse aus dem Mehrstufenversuch.

Die ursprüngliche Versuchsmatrix umfasste die Untersuchung von 32 Prüfkörpern<sup>13</sup>. Letztlich wurden gemäß ANHANG 1 insgesamt 39 Prüfkörper untersucht, weil innerhalb einer Serie z. T. erheb-

<sup>12</sup> Insgesamt gab es 16 planmäßige Probenchargen (4 Sorelbaustoffe, deren Abbindereaktionen jeweils unter 4 verschiedenen Temperatur-Zeit-Regimen, d.h. bei RT bzw. bei Temperaturen von  $60^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  und  $120^\circ\text{C}$  abgelaufen sind), wobei eine Probencharge 3 Probekörper umfasst hat. Ein Probekörper ist der ausgehärtete Baustoff in einer Druckzelle der MPA Braunschweig.

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 39 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

liche Streuungen in den Versuchsergebnissen auftraten, die durch Doppeluntersuchungen überprüft werden mussten.

**b.) Prüfkörpervorbereitung**

Die von der MPA Braunschweig gelieferten Bohrkern wurden zunächst grob auf Länge gebracht. Die Mantelflächen der Bohrkern waren ausreichend glatt und frei von Unregelmäßigkeiten, so dass zur Herstellung der Prüfkörper nur die Endflächen geplant werden mussten (ANHANG 1).

**c.) Gesteinsphysikalische Probencharakterisierung**

Unmittelbar vor Versuchsbeginn erfolgte die Vermessung der vorbereiteten Prüfkörper mittels digitaler Schublehre. Darüber hinaus wurde das Eigengewicht der Prüfkörper bestimmt. Aus diesen Parametern wurde die Dichte abgeleitet, die verfahrensbedingt einen Fehler von ca.  $0,002 \text{ g/cm}^3$  aufweist (ANHANG 1).

Die Messung der Ultraschall-Laufzeiten der P- und S-Wellen nach der Durchschallungsmethode diente der Bewertung der vorhandenen Prüfkörperintegrität bzgl. Auflockerung. Hierfür wurde das Gerät USN 58L (Fa. GE Measurement & Control) in Verbindung mit den paarweise eingesetzten Krautkrämer P-Wellengebern und -empfängern B 0,5 y (Senkrechtprüfköpfe: Frequenz 0,5 MHz) eingesetzt. Aus den P- und S-Wellengeschwindigkeiten sowie der ermittelten Dichte wurden die „dynamisch“ bestimmten, elastischen Konstanten berechnet. Aufgrund der Ankopplungsschwierigkeiten des Messgerätes an die Prüfkörper beträgt die Genauigkeit der ermittelten Geschwindigkeiten ca. 10 m/s (ANHANG 1).

Die Messergebnisse sind zusammengefasst in Abschnitt 7.4.1 enthalten.

**d.) Triaxialversuche**

Für die Durchführung der triaxialen Druckversuche wurde die servohydraulische Prüfmaschine SHM 250 (mit  $F_{\max} = 250 \text{ kN}$ ) der Fa. WPM Werkstoffprüfsysteme Leipzig GmbH (WPM Leipzig) eingesetzt. Nähere Erläuterungen zur Ausstattung dieser Versuchseinrichtung sind in ANHANG 1 enthalten.

Die im Rahmen dieses Versuchsprogramms durchgeführten triaxialen Druckversuche liefern keine unmittelbar in-situ relevanten Berechnungsparameter, wie sie als Eingangsgrößen für numerische Modellierungen von untertägigen massigen Bauwerken (wie z.B. geotechnischen Barrieren) benötigt werden. Das gewählte Versuchsprogramm erlaubt jedoch, dem Versuchsziel entsprechend, die zuverlässige Charakterisierung der Sorelbaustoffe im Vergleich der Baustoffe bzw. ihrer Temperaturvorgeschichte untereinander, bei vertretbarem Versuchsaufwand und -dauern.

<sup>13</sup> Aus einer Probencharge wurden mindestens 2 Prüfkörper zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften gewonnen, bei Wiederholungsmessungen entsprechend mehr.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 40 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Die Versuche wurden gemäß ANHANG 1 wie folgt durchgeführt:

### 1. Triaxiale isotrope Druckversuche

Die Charakterisierung des belastungsabhängigen Kompaktionsverhaltens der Sorelbaustoffe erfolgte in Anlehnung an die DIN 1048 (Bestimmung des Verformungsmoduls), wobei hier zwei verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten, nämlich „schnell“ mit  $\dot{p} = 0,1 \text{ MPa/s}$  bzw. „langsam“ mit  $\dot{p} = 0,005 \text{ MPa/s}$ , in einem Belastungsregime mit Manteldrücken zwischen 0,2 MPa und 15 MPa mit mehreren Hysteresen realisiert wurden. Die Proben wurden in drei Belastungszyklen (mit Zwischenentlastung bei jeweils 5 MPa, 10 MPa und 15 MPa) schrittweise belastet und die Spannungs-Volumenverformungskurve aufgezeichnet. Da bei den kleinen Proben mit einem Durchmesser von 40 mm keine exakte Querdehnungs- bzw. integrale Volumenmessung möglich ist, wurde im Rahmen der hier durchgeführten Indexversuche vereinfachend die Volumenverformung über die axiale Dehnungsmessung abgeschätzt:  $\Delta V = 3 \cdot \varepsilon_{Ax}^{14}$ .

Die Messergebnisse sind zusammengefasst in Abschnitt 7.4.2 enthalten.

### 2. Triaxiales Festigkeitsverhalten

Zur Charakterisierung des triaxialen Festigkeitsverhaltens wurden triaxiale Druckversuche in Mehrstufenversuchstechnik ohne Dilatanzmessung durchgeführt. Hierzu wurden die Prüfkörper analog zu den konventionellen Einstufen-Druckversuchen bei konstantem Manteldruck axial unter Vorgabe einer definierten Verformungsrate verformt. Bei Erreichen charakteristischer Verschiebungen oder Spannungszustände nahe dem Bruchpunkt (Annäherung an ein Maximum) wurde die Belastung der Probe durch schnelles Absenken der erreichten Axialspannung rapide abgebrochen, so dass im Idealfall keine signifikante Schädigung des Prüfkörpers eintrat. Danach wurde die nächste Belastungsstufe durch gleichzeitige Erhöhung der Axialkraft und des Manteldrucks angefahren und der Belastungsversuch analog zu vorher wiederholt. Es wurden 4 Belastungsstufen bei  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ , 4 MPa, 6 MPa und 10 MPa realisiert.

Die Messergebnisse sind zusammengefasst in Abschnitt 7.4.3 enthalten.

<sup>14</sup> Für eine exakte Bestimmung der Querdehnung sind Proben mit einem Durchmesser von 100 mm erforderlich. Proben dieses Durchmessers können nicht mehr mit der servohydraulischen Prüfmaschine SHM 250 charakterisiert werden. Für diese Probengröße stünde bspw. beim IfG Leipzig die servohydraulische Prüfmaschine RBA 2500 zur Verfügung. Die Auswahl der Probengröße und damit der Prüfmaschine orientiert sich am Versuchsziel, unter Berücksichtigung der damit einhergehenden Versuchsdauern sowie des wirtschaftlich vertretbaren Aufwandes.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 41 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

### 3. Relaxationsverhalten

Zur vergleichenden Charakterisierung der Relaxationseigenschaften wurden die Prüfkörper nach der hydrostatischen Belastung („langsame Belastung“) einheitlich unter Vorgabe einer definierten Verformungsrate von  $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5}$  1/s bis in den Bereich von 80% der im Mehrstufenversuch für  $\sigma_3 = 2$  MPa bestimmten maximalen Festigkeit belastet und im Anschluss einer Relaxationsphase ausgesetzt, d.h. die Verformung wurde gestoppt und dabei die zeitabhängige Entlastung 2 Tage lang beobachtet.

Die Messergebnisse sind zusammengefasst in Abschnitt 7.4.4 enthalten.

### 6.3.3 Versuche zur Bestimmung des Phasenbestandes

Nach der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften an den ausgehärteten Probekörpern durch das IfG Leipzig, erfolgte der Versand von Prüfkörper-Reststücken an das IfAC der TU BAF zur qualitativen Phasenanalyse mittels Pulver-Röntgendiffraktometrie.

Unmittelbar vor den Messungen wurden die Prüfkörper-Reststücke pulverisiert. Die Pulverproben wurden auf einem Flachprobeträger mit einem Röntgendiffraktometer D8 Discover der Firma Bruker mit Cu-K $\alpha$ -Strahlung (1,5406 Å) in Parallelstrahlgeometrie (Göbelspiegel, 0,6 mm Blende) und einem Lineardetektor Vantec-1 mit einem Öffnungswinkel von 1° in einem 2-Theta Messbereich von 5° - 95° mit einer Schrittweite von 0,017° und einer Zählzeit von 1 s vermessen (ANHANG 2).

Die Messergebnisse sind zusammengefasst in Abschnitt 7.5 enthalten.

## 7 MESSERGEBNISSE

Nachfolgend werden die Messergebnisse der verschiedenen Untersuchungen gezeigt und kurz erläutert. Eine ausführliche Darstellung und Bewertung der erhobenen Daten ist in (MPA Braunschweig 2013b), in ANHANG 1 sowie in ANHANG 2 enthalten.

### 7.1 EXPANSIONSDRUCKENTWICKLUNG DER SORELBAUSTOFFE

In den Abschnitten 7.1.1 bis 7.1.4 ist die Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der untersuchten Sorelbaustoffe in den Temperatur-Zeit-Fenstern RT, 60°C, 90°C und 120°C enthalten.

#### 7.1.1 Expansionsdruckentwicklung für das TZF RT

Die Expansionsdruckentwicklung für das TZF RT wurde 25 Tage lang beobachtet und ist in Abbildung 4 gemäß (MPA Braunschweig 2013b) dargestellt<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Hinweis zur Achsenbeschriftung in Abbildung 4, Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7: Die in (MPA Braunschweig 2013b) verwendete Bezeichnung „Kristallisationsdruck“ ist, wie bereits eingangs in Kapitel 2 erwähnt, nach heutigem Stand der Wissenschaft durch die Bezeichnung „Expansionsdruck“ zu ersetzen.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 42 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

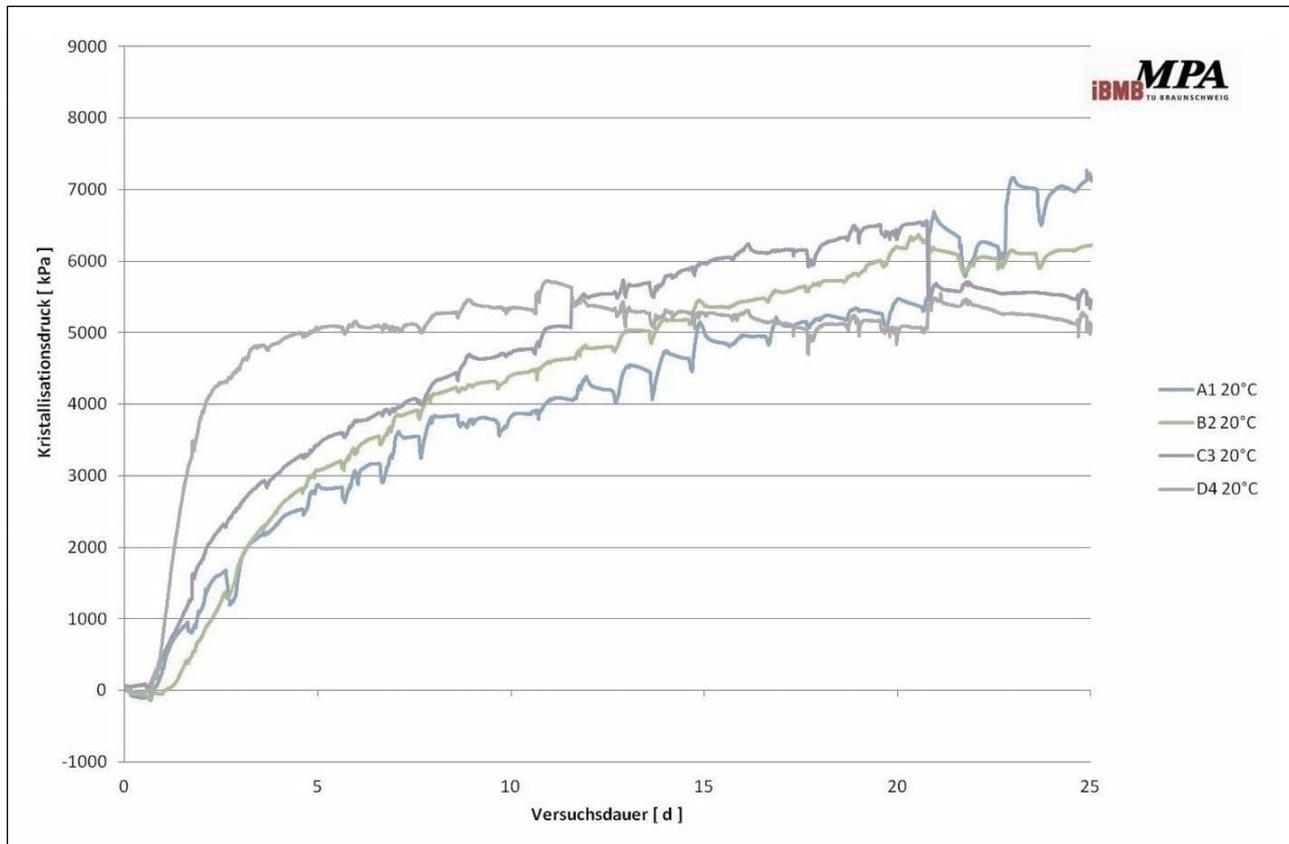


Abbildung 4: Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 bei Raumtemperatur (RT)

Die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei Lagerung der Druckzellen bei Raumtemperatur (ca. 20°C) verlief die Expansionsdruckentwicklung bei den Sorelbaustoffen A1, B2 und C3 innerhalb der Versuchsdauer von 25 Tagen, nach kurzer Ruhephase ohne Druckentwicklung, mit relativ homogenem Druckanstieg. Die Baustoffe erreichten in diesem Zeitraum Expansionsdrücke zwischen 5 MPa und 7 MPa. Es konnte kein wesentlicher Unterschied in der Expansionsdruckentwicklung dieser Baustoffe, trotz des Einsatzes eines weniger reaktiven Bindemittels beim C3-Baustoff, festgestellt werden.
- Der Sorelbaustoff D4 baute nach kurzer Ruhephase innerhalb von 5 Tagen einen Expansionsdruck von ca. 5 MPa auf, der innerhalb des verbleibenden Beobachtungszeitraumes auf diesem Niveau stagnierte.

### 7.1.2 Expansionsdruckentwicklung für das TZF 60°C

Die Expansionsdruckentwicklung für das TZF 60°C wurde 21 Tage lang beobachtet und ist in Abbildung 5 gemäß (MPA Braunschweig 2013b) dargestellt<sup>15</sup>.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 43 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

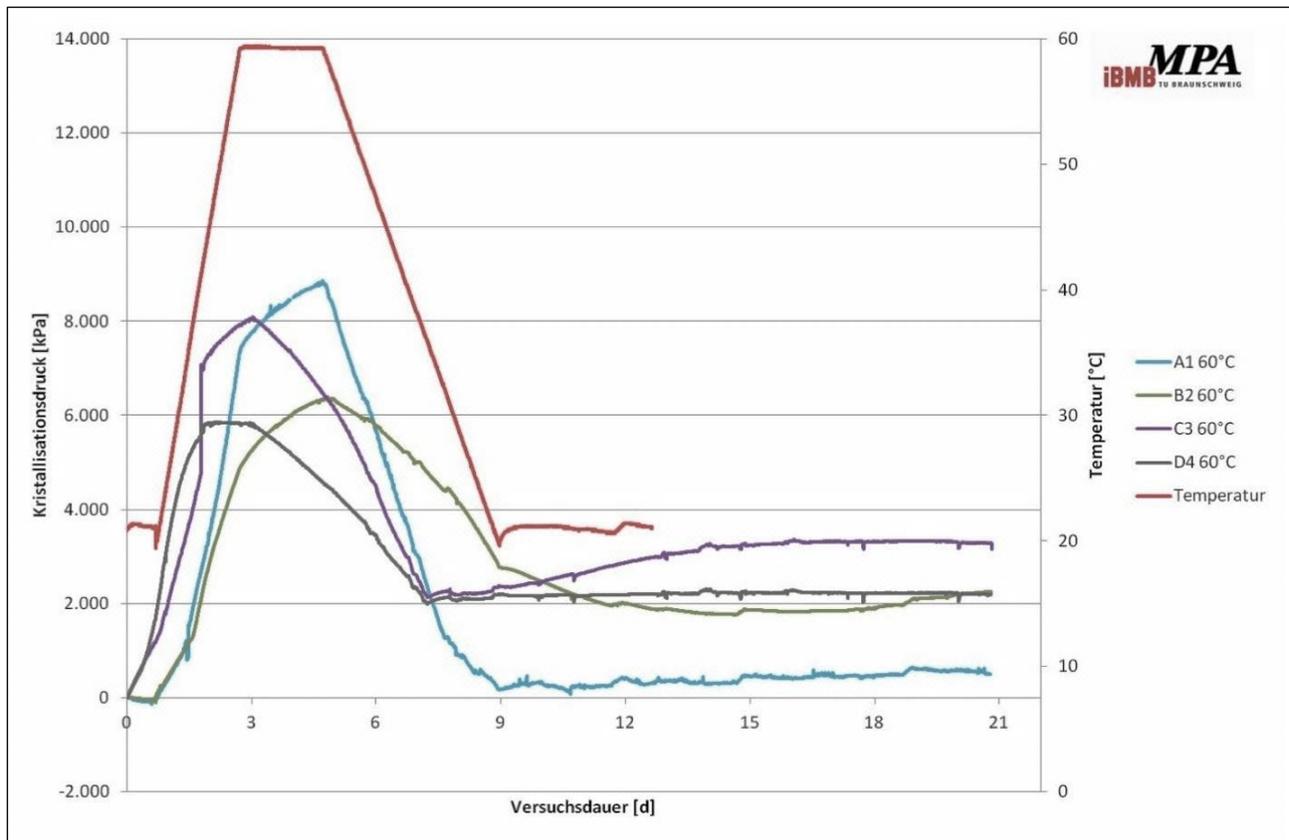


Abbildung 5: Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 bei einer Maximaltemperatur von 60°C<sup>16</sup>

Die in Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Sorelbaustoff A1 entwickelte in der gesamten Aufheizphase einen stetig steigenden Expansionsdruck bis etwa 7,5 MPa. Dieser stieg in der Haltephase bis maximal 9 MPa weiter an. Innerhalb der Abkühlphase fiel der Druck auf nahezu Null ab und stieg während der weiteren Lagerung bei Raumtemperatur wieder leicht an, so dass bei Versuchsende ein Expansionsdruck von etwa 0,5 MPa vorlag.
- Ähnlich im Verlauf verhielt sich der Sorelbaustoff B2, der am Ende der Haltephase einen maximalen Expansionsdruck in Höhe von 6,5 MPa erreichte. Innerhalb der Abkühlphase fiel der Druck auf knapp 3 MPa ab. Der Druckabfall hielt innerhalb der anschließenden Lagerung der Druckzellen bei Raumtemperatur einige Tage an, bis etwa 15 Tage nach dem Anmischtermin ein Druckminimum von etwa 2 MPa erreicht wurde. Danach konnte ein sehr schwacher Wiederanstieg des Expansionsdruckes verzeichnet werden.

<sup>16</sup> In Abbildung 5 liegt bei den Baustoffen C3 und D4 eine Verschiebung in den Ergebniskurven um 2 Tage nach vorne vor.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 44 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

- Auch für den Sorelbaustoff C3 wurde während der Aufheizphase ein Druckanstieg ermittelt. Nach Erreichen des Druckmaximums innerhalb der Haltephase in Höhe von 8 MPa fiel der Expansionsdruck bis zum Ende der Abkühlphase auf 2 MPa ab. Im Zuge der anschließenden Lagerung der Druckzellen bei Raumtemperatur stieg der Druck innerhalb von etwa 10 Tagen bis auf 3 MPa wieder an. Auf diesem Niveau verblieb der Expansionsdruck bis zum Versuchsende.
- Der Sorelbaustoff D4 entwickelte bis zum Ende der Aufheizphase einen Expansionsdruck in Höhe von 6 MPa, der während der Haltephase nahezu konstant blieb. Beim Abkühlen sank der Druck auf 2 MPa ab. Dieser Expansionsdruck blieb während der anschließenden Lagerung bei Raumtemperatur nahezu konstant.

### 7.1.3 Expansionsdruckentwicklung für das TZF 90°C

Die Expansionsdruckentwicklung für das TZF 90°C wurde 23 Tage (A1- und B2-Baustoff) bzw. 25 Tage (C3- und D4-Baustoff) lang beobachtet und ist gemäß (MPA Braunschweig 2013b) in Abbildung 6 dargestellt<sup>15</sup>.

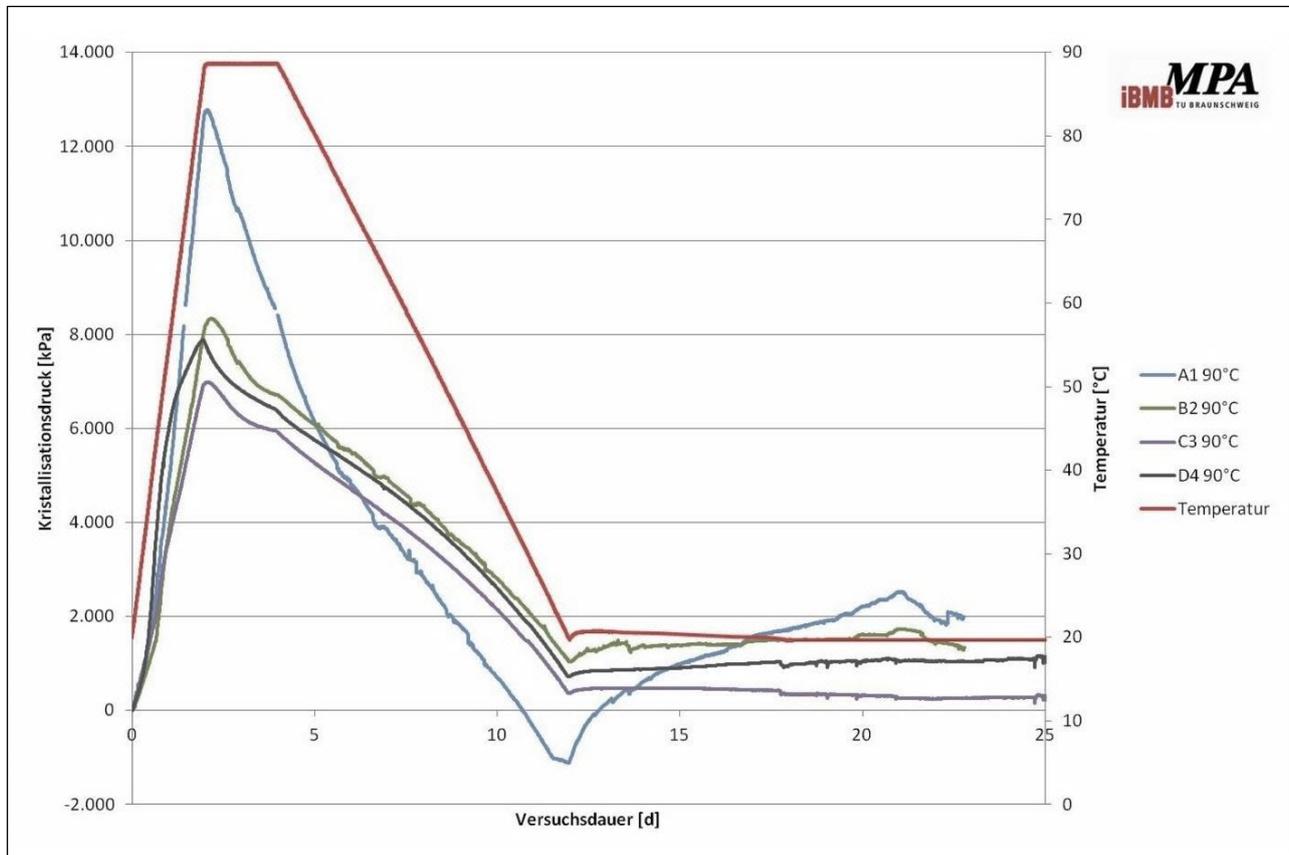


Abbildung 6: Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 bei einer Maximaltemperatur von 90°C

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 45 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der A1-Baustoff entwickelte in der Aufheizphase einen maximalen Expansionsdruck in Höhe von 13 MPa. Dieser fiel in der Haltephase stark ab. Der Druckabfall setzte sich während der gesamten Abkühlphase fort bis zum Erreichen eines Unterdruckes von 1 MPa. Während der abschließenden Lagerung bei Raumtemperatur stieg der Expansionsdruck auf etwa 2 MPa wieder an.
- Die Druckentwicklung der Sorelbaustoffe B2, C3 und D4 verlief sehr ähnlich. Bis zum Erreichen der Maximaltemperatur entwickelten sich Expansionsdrücke zwischen 7 MPa und 8 MPa, die bereits während der Haltephase deutlich abfielen und nach der Abkühlphase Werte zwischen 0,5 MPa und 1 MPa annahmen. Diese Druckniveaus wurden bei der abschließenden Lagerung bei Raumtemperatur im Wesentlichen gehalten, abgesehen von minimalen Temperatureffekten.

### 7.1.4 Expansionsdruckentwicklung für das TZF 120°C

Die Expansionsdruckentwicklung für das TZF 120°C wurde 25 Tage lang beobachtet und ist gemäß (MPA Braunschweig, 2013b) in Abbildung 7 dargestellt<sup>15</sup>.

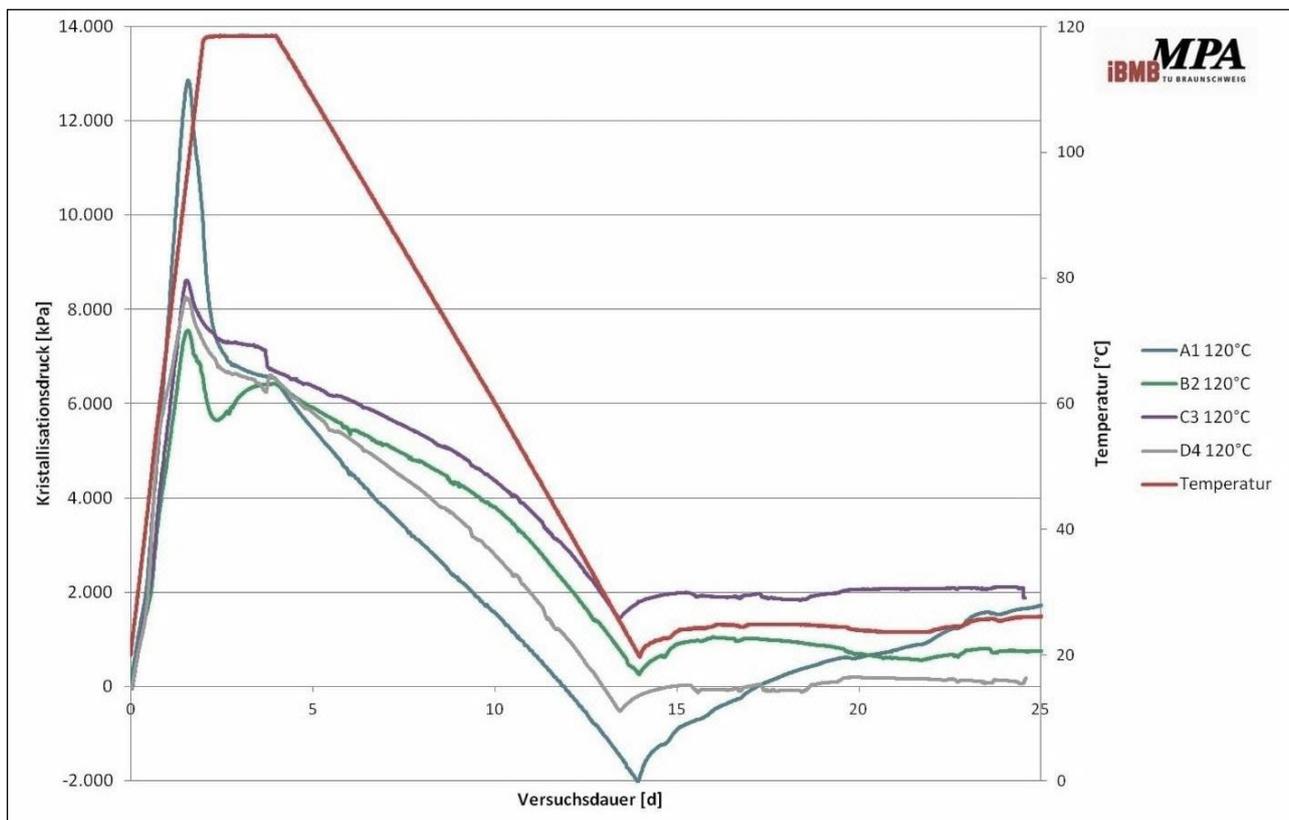


Abbildung 7: Expansionsdruckentwicklung beim Aushärten der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4 bei einer Maximaltemperatur von 120°C

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 46 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Expansionsdruckentwicklung des A1-Baustoffs für das TZF 120°C ähnelte dem Verlauf für das TZF 90°C. Kurz vor Erreichen der Maximaltemperatur begann der stetig aufgebaute Expansionsdruck, der im Maximum 13 MPa betrug, bereits wieder abzufallen. Während der Haltephase verringerte sich der Druck zunächst sehr schnell auf 7 MPa, danach langsamer bis auf 6,5 MPa. In der Abkühlphase verminderte sich der Druck mit nahezu konstanter Rate bis zu einem Unterdruck von max. 2 MPa. Während der abschließenden Lagerung bei Raumtemperatur stieg der Expansionsdruck wieder auf etwa 2 MPa an.
- Der B2-Baustoff wies bereits vor Erreichen der Maximaltemperatur einen Druckabfall um 2 MPa, auf etwa 5,5 MPa auf. Während der Haltephase baute sich ein Teil des Expansionsdruckes wieder auf. In der Abkühlphase verringerte sich der Druck analog zur Temperaturverringering auf nahezu Null. Ein Anstieg des Expansionsdruckes während der abschließenden Lagerung bei Raumtemperatur wurde, abgesehen von minimalen Temperatureffekten, nicht beobachtet.
- Beim C3-Baustoff wurde ebenfalls vor Erreichen der Maximaltemperatur ein Druckabfall um ca. 1 MPa auf 7,5 MPa gemessen. Diese Druckentwicklung setzte sich während der Haltephase weiter fort. Analog zur Temperaturverringering während der Abkühlphase verringerte sich der Druck bis auf einen Wert von ca. 2 MPa. Dieser Expansionsdruck blieb bis zum Ende der Messung nahezu konstant.
- Der D4-Baustoff wies einen ähnlichen Druckverlauf gegenüber dem B2-Baustoff auf. Nach einem zunächst raschen Anstieg des Expansionsdruckes während der Aufheizphase, fiel dieser noch vor Erreichen der Maximaltemperatur um ca. 1,5 MPa ab. In der Abkühlphase verringerte sich der Druck analog zur Temperaturverringering auf etwa Null. Ein Anstieg des Expansionsdruckes während der abschließenden Lagerung bei Raumtemperatur wurde, abgesehen von minimalen Temperatureffekten, nicht gemessen.

## 7.2 ADIABATISCHE TEMPERATURERHÖHUNG

Die Messergebnisse der adiabatischen Temperaturerhöhung sind in Abbildung 8 dargestellt (MPA Braunschweig, 2013b).

Für die Sorelbaustoffe A1 und B2 wurde unter adiabatischen Bedingungen eine in ihrem Verlauf ähnliche Wärmeentwicklung ermittelt. Die Temperaturerhöhung lag bei diesen beiden Baustoffen zwischen 82 K und 85 K. Der ähnliche Verlauf ist auf die Verwendung des einheitlich reaktiven Bindemittels bei der Herstellung der Trockenmischungen zurückzuführen sowie ggf. auf den geringeren Bindemittelanteil dieser beiden Rezepturen im Vergleich zur C3- und zur D4-Rezeptur. Andere reaktive, wärmeentwickelnde Stoffe sind zumindest nicht in nennenswerten Größenordnungen in den Baustoffen enthalten.

Der Sorelbaustoff C3 weist von den hier untersuchten Rezepturen den größten Bindemittelanteil auf. Zum Einsatz kam ein weniger reaktives Bindemittel. Die adiabatische Temperaturerhöhung dieses Baustoffs lag bei ca. 110 K. Der C3-Baustoff entwickelte aufgrund des reaktionsträgeren Bindemittels sehr lange (ca. 65 h) kaum Wärme, bis die Reaktion dann unter stärkerer Wärmeentwicklung ablief (MPA Braunschweig, 2013b).

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 47 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Der D4-Baustoff zeigte unter adiabatischen Bedingungen einen vergleichbaren Verlauf gegenüber den Sorelbaustoffen A1 und B2. Zwar weist der D4-Baustoff im Vergleich zum A1- und zum B2-Baustoff einen höheren Bindemittelanteil auf, doch liegt nicht genug Anmischlösung im Baustoff vor, um das Bindemittel vollständig umzusetzen, so dass für den anteiligen Umsatz auch eine Temperaturerhöhung von 82 K ermittelt wurde.

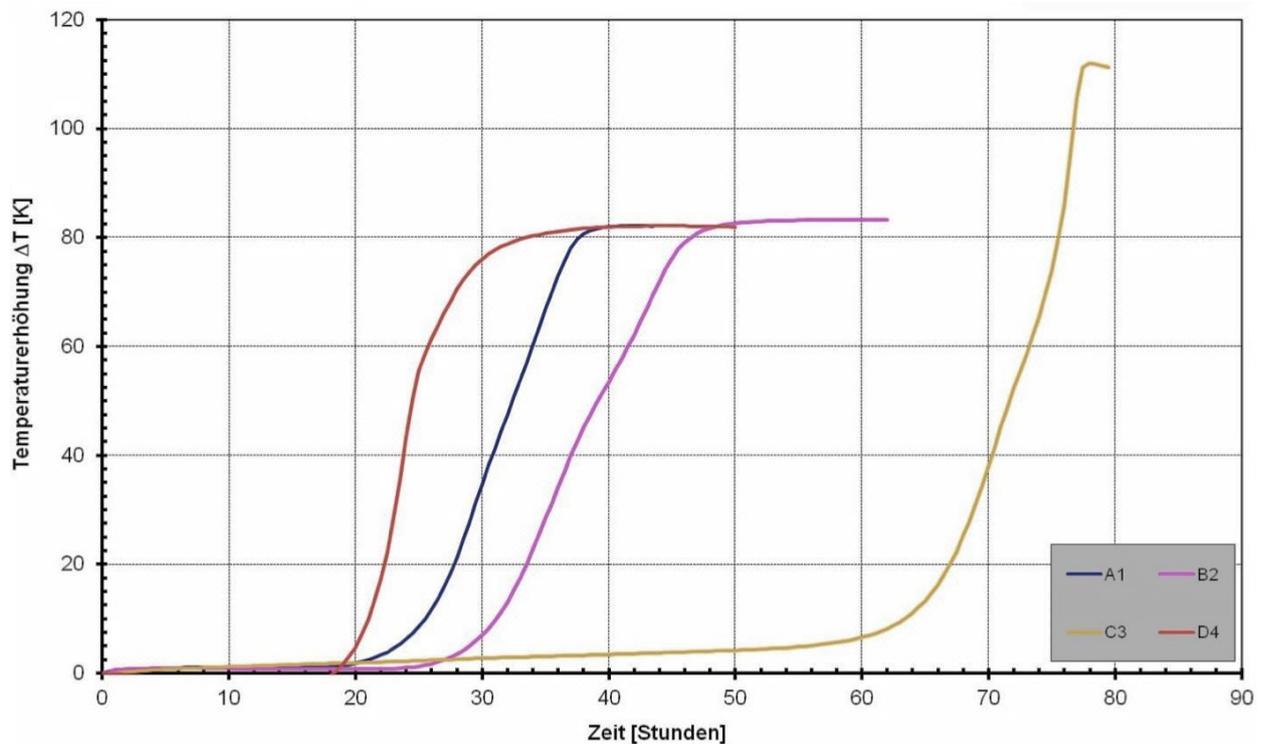


Abbildung 8: Adiabatische Temperaturerhöhung der Sorelbaustoffe A1, B2, C3 und D4

Ein Ansatz zur Ermittlung der Wärmefreisetzung von MgO-Baustoffen (C3- und D4-Baustoff) wird in (Freyer et al. 2015) angegeben (siehe Kapitel 8, Punkt 3).

Eine Korrelation zwischen den Versuchen zur adiabatischen Temperaturerhöhung und den Versuchen zur Expansionsdruckentwicklung bei Raumtemperatur in Abbildung 4 besteht nicht. Korrelationen bestehen nur, wenn gleiche Baustoffmengen unter gleichen Randbedingungen in Bezug auf Wärmezufuhr bzw. -abfluss abbinden.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 48 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### 7.3 POROSITÄT DER AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPER

Die gemessenen Porositäten sind in Tabelle 10 enthalten (MPA Braunschweig 2013b). Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass lediglich das zugängliche Porenvolumen abgebildet werden konnte und dass es durch die Trocknung der Proben zu Kristallisationseffekten in den Porenräumen gekommen sein kann. Der Einfluss dieses Kristallisationseffektes lässt sich mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nicht quantifizieren. Die Lösungspermeabilitäten sind vermutlich geringfügig größer als die angegebenen Messwerte.

Tabelle 10: Porositäten und Porenradien in den ausgehärteten Probekörpern

		Sorelbaustoff A1 (Asse-Baustoff)			Sorelbaustoff B2 (DBM2)			Sorelbaustoff C3 (R3a-Mörtelvariante)			Sorelbaustoff D4 (Sorelbeton MB10)	
Porositäten in % Porenradien in µm	TZF RT	10,3 % 0,060 µm	10,5 % 0,138 µm	8,2 % 0,150 µm	11,0 % 0,036 µm	8,9 % 0,101 µm	14,5 % 0,036 µm	14,1 % 0,025 µm	15,2 % 0,033 µm	13,7 % 0,217 µm	9,8 % 0,125 µm	
	TZF 60°C	8,1 % 0,053 µm			6,0 % 0,037 µm			16,1 % 0,050 µm			8,4 % 0,091 µm	
	TZF 90°C	5,8 % 0,089 µm			9,9 % 0,029 µm	15,9 % 0,037 µm	22,5 % 0,075 µm	19,4 % 0,060 µm	14,5 % 0,041 µm	14,2 % 0,131 µm		
	TZF 120°C	6,5 % 0,065 µm			13,5 % 0,029 µm	22,1 % 0,077 µm	14,6 % 0,051 µm	13,0 % 0,032 µm		6,5 % 0,124 µm		
Porosität in %	Mittelwerte	8 % ± 3 %			10 % ± 4 %			14 % ± 2 %			10 % ± 4 %	
	Vergleichswerte <sup>17</sup>	7 % ± 3 %			11 % ± 2 %			14 % ± 2 %			-	

<sup>17</sup> Die Vergleichswerte entstammen für den Sorelbaustoff A1 dem ESA-Vorhaben, für den Sorelbaustoff B2 dem K-UTEC-„Ursachen“-Bericht (K-UTEC, 2010) und für den Sorelbaustoff C3 dem MgO-Projekt der TU BAF. Für den Sorelbaustoff D4 waren keine Vergleichswerte recherchierbar.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Seite: 49 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

### 7.4 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DER AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPER

#### 7.4.1 Gesteinsphysikalische Charakterisierung

Die an den Prüfkörpern gemessenen Dichten und P- bzw. S-Wellengeschwindigkeiten sowie die daraus abgeleiteten dynamischen elastischen Konstanten (dynamischer E-Modul  $E_d$ , dynamische Poissonzahl  $\nu_d$ , dynamischer Kompressionsmodul  $K_d$ , dynamischer Schermodul  $G_d$ ) sind als die Kennwerte der gesteinsphysikalischen Charakterisierung in Tabelle 11<sup>18</sup> zusammengefasst (ANHANG 1).

<sup>18</sup> Der Prüfkörper A1-T60 (d.h. A1-Baustoff im TZF 60°C) wurde vermutlich falsch zugeordnet. Die Kennwerte der gesteinsphysikalischen Charakterisierung deuten bei diesem Prüfkörper auf einen B2-Baustoff hin (TZF unbekannt).

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 50 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Tabelle 11: Kennwerte der gesteinsphysikalischen Charakterisierung

IfG - Labor.-Nr.	A1-T20		A1-T60	A1-T90	A1-T120	B2-T20		B2-T60	B2-T90	B2-T90(2)	B2-T120	C3-T20	C3-T90(2)	C3-T90	C3-T120		D4-T20	D4-T20-2	D4-T60	D4-T90-1	D4-T120																					
	MGO-Beton ERAM A1-20 QD10	A1-T20 QD27	MGO ERAM 514A1_20QD18	A1-2-60 QD28	x	MGO-Beton ERAM A1-90 QD14	MGO ERAM 514A1_90QD15	MGO-Beton ERAM 514A1-120QD9	x	514B2-20QD13	MGO-Beton ERAM B2-20 QD12	B2-T20 QD25	B2-T20 QD26	B2-2-60 QD23	B2-2-60 QD24	MGO-Beton ERAM B2-90 QD16	MGO ERAM 514B2_90QD17	MGO-Beton 526B2-90QD5	MGO ERAM 526B2-90QD6	MGO-Beton 526B2-120QD7	MGO ERAM 526B2-120QD8	MGO ERAM 514B2_120QD11	MGO-Beton ERAM C3-20 QD1	MGO ERAM 514C3_20QD2	C3-T90 QD30	C3-T90 QD29	C3-T90 QD29	C3-T90 QD30	MGO-Beton ERAM C3-120 QD3	MGO ERAM 514C3_120QD4	MGO-Beton 526C3-120QD11	MGO ERAM 526C3-120QD12	MGO-Beton ERAM D4-20 QD6	MGO-Beton ERAM 514D4-20QD5	MGO-Beton ERAM D4-20QD19	MGO ERAM 514D4-20QD20	x	x	D4-1-90 QD 21	D4-1-90 QD 22	MGO-Beton ERAM D4-120 QD7	MGO ERAM 514D4_120QD8
Höhe h (mm) =	80,45	80,08	80,67	80,21	x	80,16	73,27	80,33	x	80,01	80,25	80,43	80,20	80,35	80,31	80,16	80,38	80,08	80,19	80,18	80,31	80,37	80,62	72,33	80,19	80,09	71,91	76,73	80,96	80,98	80,23	80,65	81,06	71,75	80,25	79,89	x	x	72,78	74,00	80,72	80,37
Durchmesser (mm) =	39,75	39,82	39,75	39,86	x	39,71	39,70	39,74	x	39,75	39,77	39,81	39,65	39,63	39,79	39,76	39,87	40,29	40,29	40,23	40,23	39,67	40,37	40,39	40,30	40,29	40,25	40,18	40,23	40,23	40,14	40,20	40,22	40,26	40,11	40,01	x	x	39,88	39,82	40,20	40,09
Masse M (g) =	194,2	190,2	193,1	216,3	x	192,8	175,0	193,9	x	208,0	210,6	216,3	211,3	214,1	214,9	214,9	216,7	216,1	216,3	219,5	220,1	209,7	195,9	173,3	194,7	196,9	174,8	182,6	196,0	196,6	193,4	195,8	232,6	204,6	222,4	222,4	x	x	202,6	197,9	233,2	225,7
Dichte ρ (g/cm³) =	1,946	1,907	1,929	2,161	x	1,942	1,930	1,946	x	2,095	2,112	2,160	2,134	2,159	2,152	2,160	2,159	2,117	2,116	2,153	2,156	2,112	1,898	1,870	1,904	1,928	1,911	1,876	1,904	1,909	1,905	1,913	2,259	2,240	2,193	2,214	x	x	2,229	2,147	2,277	2,225
V <sub>p-axial</sub> (km/s) =	4,41	4,28	4,38	4,63	x	4,39	4,33	4,04	x	4,35	4,44	4,64	4,66	4,58	4,55	4,23	4,74	3,07	3,06	4,13	4,13	3,18	3,64	3,64	4,14	4,30	4,28	4,63	4,31	4,29	3,81	3,83	4,57	4,51	4,64	4,62	x	x	4,84	4,69	4,46	4,51
V <sub>p-radial: a-c</sub> (km/s) =	4,24	4,31	4,17	4,75	x	4,35	4,14	4,26	x	4,40	4,46	4,75	4,71	4,68	4,71	4,30	4,35	2,81	2,81	4,26	4,27	3,19	3,76	3,66	4,19	4,25	4,41	4,34	4,38	4,27	3,72	3,81	4,73	4,82	4,84	4,83	x	x	4,90	4,55	4,96	5,07
V <sub>p-radial: b-d</sub> (km/s) =	4,17	4,30	4,40	4,83	x	4,42	4,37	4,32	x	4,40	4,50	4,82	4,62	4,68	4,73	4,12	4,22	2,76	2,83	4,29	4,21	3,19	3,74	3,65	4,14	4,35	4,27	4,27	4,36	4,35	3,74	3,91	4,85	4,78	4,74	4,73	x	x	4,92	4,72	4,91	4,90
V <sub>s-axial</sub> (km/s) =	2,45	2,44	2,43	2,73	x	2,46	2,40	2,36	x	2,45	2,59	2,74	2,75	2,69	2,67	2,40	2,41	1,76	1,67	2,40	2,38	1,78	2,08	2,09	2,38	2,50	2,47	2,36	2,51	2,43	2,15	2,18	2,91	2,86	2,65	2,63	x	x	2,94	2,82	2,89	2,87
Elast. Konstanten (GPa) - axiale Richtung -																																										
E <sub>d</sub> =	29,89	28,65	29,10	39,81	x	29,82	28,50	26,85	x	31,94	35,17	40,00	39,85	38,60	37,98	31,47	33,12	16,47	15,23	30,84	30,58	17,00	20,68	20,43	26,96	29,97	29,17	27,73	29,86	28,40	22,34	22,94	44,39	42,72	38,66	38,69	x	x	46,48	41,59	43,32	42,55
K <sub>d</sub> =	22,14	19,67	21,86	24,69	x	21,69	21,27	17,30	x	22,76	22,74	24,82	24,70	24,59	24,02	21,93	31,78	11,26	11,87	20,30	20,46	12,39	14,22	13,91	18,34	19,59	19,50	26,27	19,33	20,11	15,88	15,94	21,69	21,14	26,84	26,86	x	x	26,44	24,41	19,96	20,78
G <sub>d</sub> =	11,72	11,39	11,38	16,16	x	11,73	11,16	10,81	x	12,61	14,16	16,24	16,19	15,58	15,36	12,48	12,49	6,56	5,92	12,37	12,22	6,69	8,22	8,14	10,74	12,03	11,66	10,47	12,01	11,23	8,83	9,10	19,15	18,37	15,34	15,35	x	x	19,25	17,10	19,03	18,36
ν <sub>d</sub> =	0,275	0,257	0,278	0,231	x	0,271	0,277	0,241	x	0,266	0,242	0,231	0,231	0,238	0,236	0,261	0,326	0,256	0,286	0,247	0,251	0,271	0,258	0,255	0,255	0,245	0,251	0,324	0,243	0,265	0,265	0,260	0,159	0,163	0,260	0,260	x	x	0,207	0,216	0,138	0,159

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 51 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

Die P-Wellengeschwindigkeiten  $v_P$  wurden in Abbildung 9 in Abhängigkeit der Dichte der Sorelbaustoffe dargestellt (ANHANG 1).

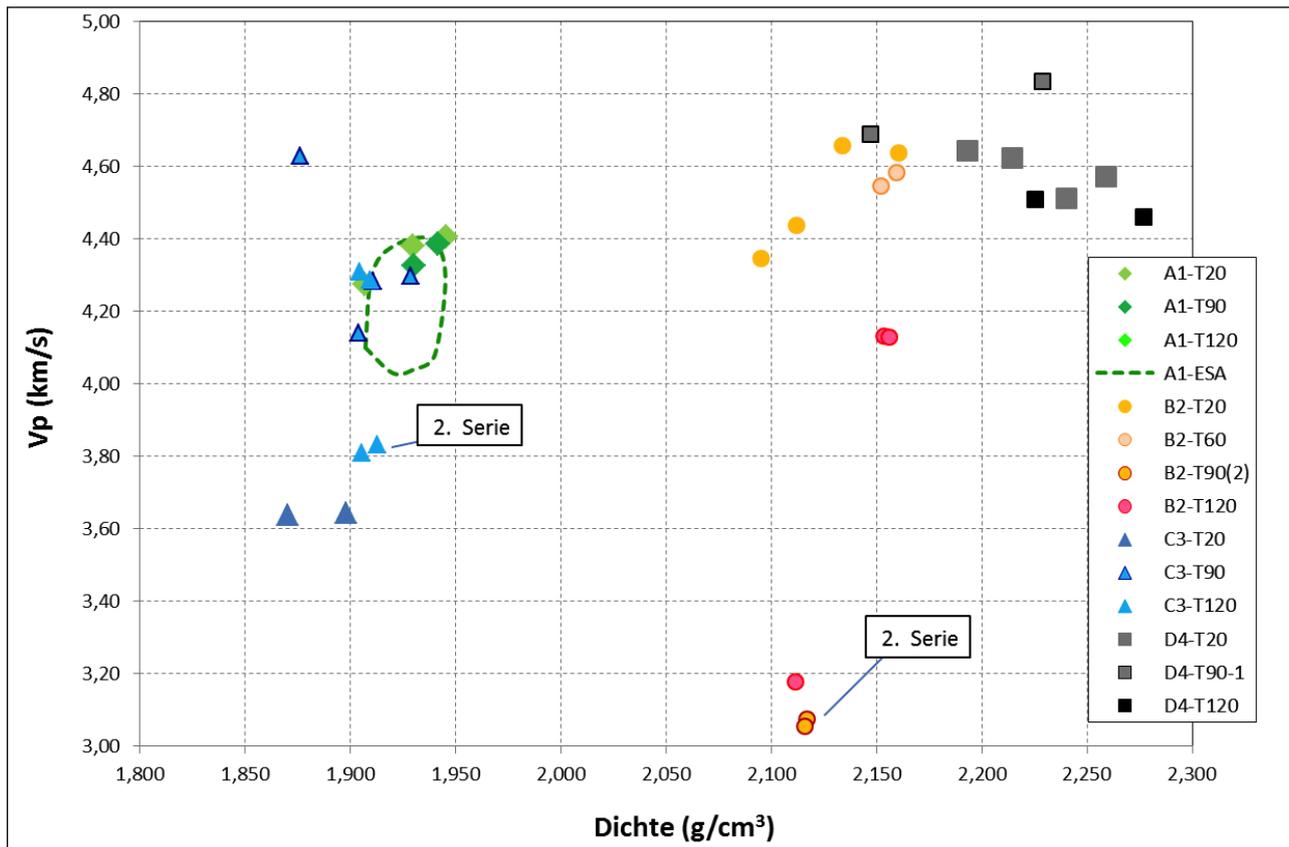


Abbildung 9: Darstellung der P-Wellengeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Dichte der Sorelbaustoffe inkl. Variationsfeld des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben

Die Messergebnisse der gesteinsphysikalischen Charakterisierung der Sorelbaustoffe lassen sich gemäß ANHANG 1 wie folgt zusammenfassen:

- Die an den A1-Prüfkörpern ermittelten Einzelkennwerte wiesen nur eine geringe Streuung hinsichtlich der Dichte auf ( $1,90 \text{ g/cm}^3$  bis  $1,95 \text{ g/cm}^3$ ) und auch die P-Wellengeschwindigkeiten variierten nur gering zwischen  $4,0 \text{ km/s}$  und  $4,4 \text{ km/s}$ , ohne erkennbaren Bezug zur Temperaturvorgeschichte. Die Reproduzierbarkeit der A1-Ansätze bzgl. der dynamischen elastischen Eigenschaften wurde auch unter Einbeziehung des Variationsfeldes der im ESA-Vorhaben gemessenen Daten bestätigt.
- Die B2-Prüfkörper besaßen infolge der Zuschlagstoffe in der Rezeptur eine deutlich höhere Dichte, die in einem kleinen Intervall zwischen  $2,09 \text{ g/cm}^3$  bis  $2,17 \text{ g/cm}^3$  variierte. Auffällig war die extrem große Variabilität für die P-Wellengeschwindigkeiten zwischen  $3,0 \text{ km/s}$  und  $4,7 \text{ km/s}$ , die weniger aus stofflichen Unterschieden, als vielmehr aus den elastischen Mat-

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 52 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

rixeigenschaften resultierte. Als Trend zeichnete sich ab, dass Prüfkörper mit einer Temperaturvorgeschichte  $\geq 90^\circ\text{C}$  eher niedrigere Geschwindigkeiten aufwiesen.

- Die Prüfkörper des C3-Baustoffs lagen, bei Variation der Dichte zwischen  $1,85\text{ g/cm}^3$  und  $1,95\text{ g/cm}^3$ , in einem zum A1-Baustoff ähnlichen Dichteintervall, während die P-Wellengeschwindigkeiten zwischen  $3,6\text{ km/s}$  und  $4,6\text{ km/s}$  deutlich stärker variierten, wobei kein signifikanter Bezug zur Temperaturvorgeschichte erkennbar war.
- Die Prüfkörper des D4-Baustoffs wiesen mit Dichten zwischen  $2,14\text{ g/cm}^3$  und  $2,30\text{ g/cm}^3$  die größte Dichtevariation auf, was aus den unterschiedlichen Eigenschaften der Silikat-zuschläge sowie möglichen Luftporen im Baustoff resultierte. Die P-Wellengeschwindigkeiten variierten vergleichsweise gering und schwankten um  $4,6\text{ km/s} \pm 0,2\text{ km/s}$ , ebenfalls ohne erkennbaren Bezug zur Temperaturvorgeschichte.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 53 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### 7.4.2 Triaxiale isotrope Druckversuche

Die Ergebnisse der Kompaktionsversuche bei „schneller“ und „langsamer“ Belastung sind in Abbildung 10 bzw. in Abbildung 11 dargestellt, wobei hierin grundsätzlich die über ein Variationsfeld dargestellten Ergebnisse von mehr als 10 Proben des ESA-Vorhabens für einen reproduzierbar hochwertigen A1-Baustoff als Referenz dienen (ANHANG 1)<sup>18</sup>.

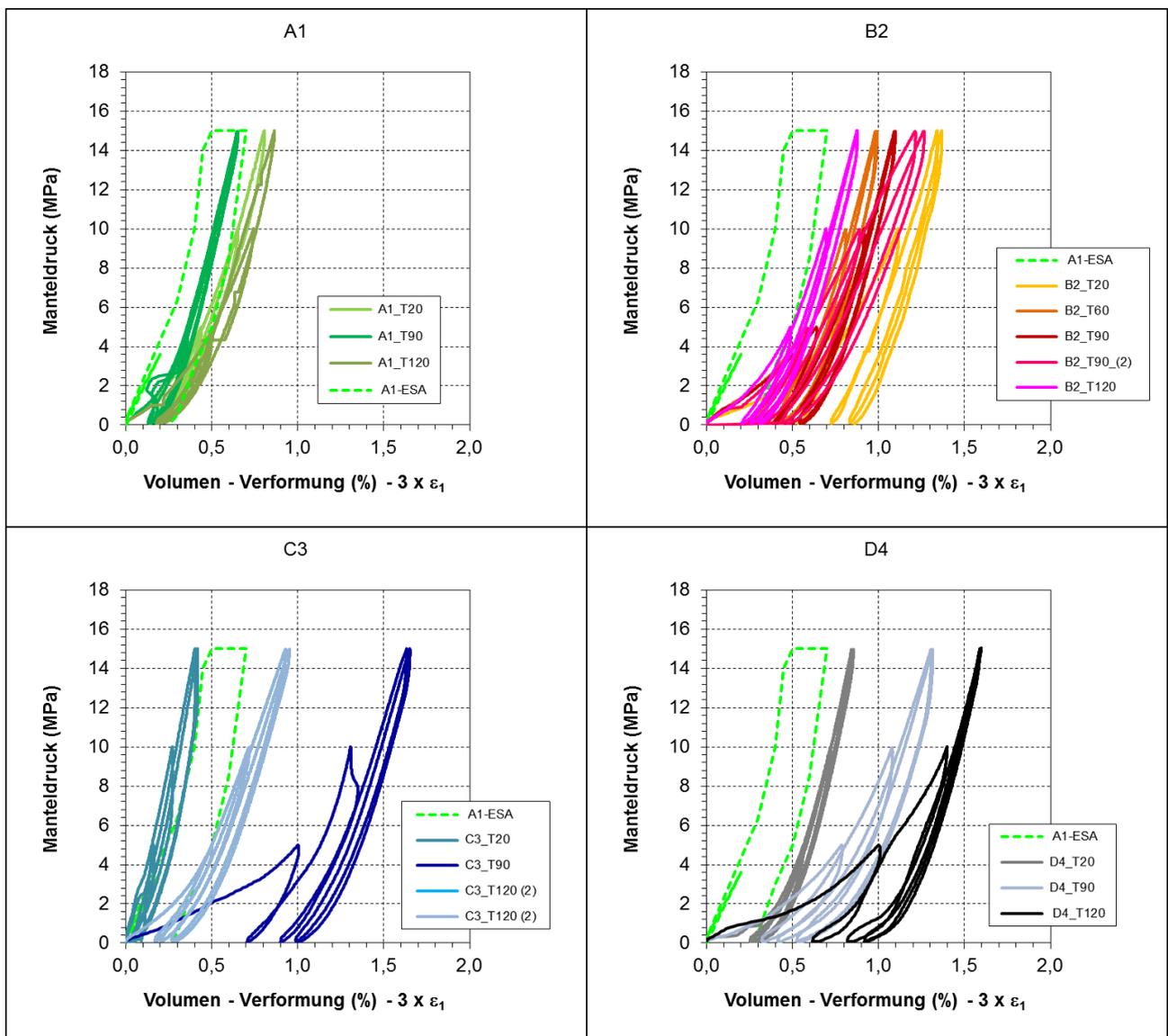


Abbildung 10: Spannungs-Verformungskurven für die A1-, B2-, C3- und D4-Prüfkörper bei „schneller“ Belastung ( $\dot{p} = 0,1 \text{ MPa/s}$ ) inkl. Variationsfeld des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 54 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

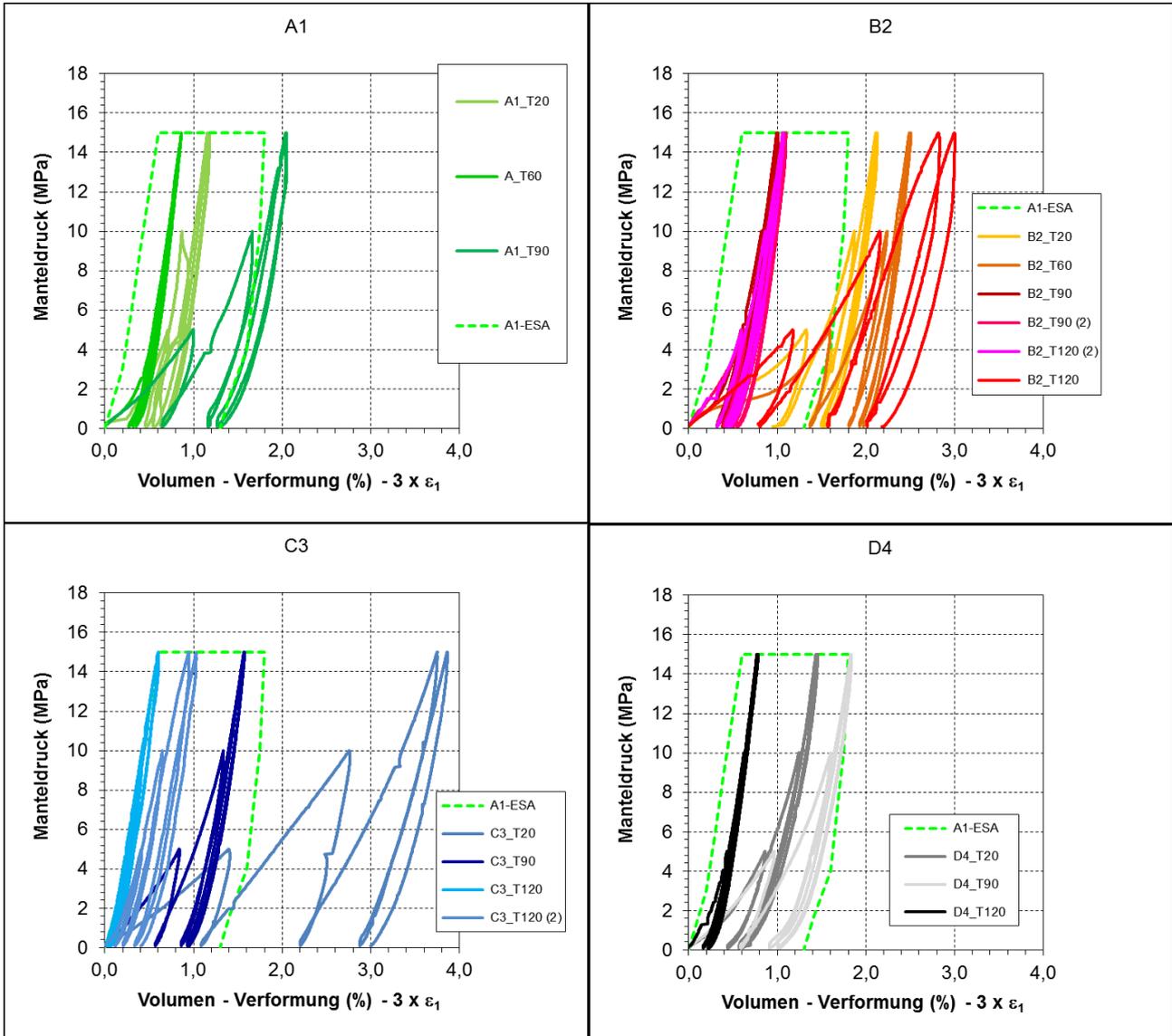


Abbildung 11: Spannungs-Verformungskurven für die A1-, B2-, C3- und D4-Prüfkörper bei „langsamer“ Belastung ( $\dot{p} = 0,005 \text{ MPa/s}$ ) inkl. Variationsfeld des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben

Im Ergebnis der Kompaktionsversuche wurde gemäß ANHANG 1 festgestellt:

- Grundsätzlich zeigten die Versuche an den A1-Prüfkörpern, wie nahezu an allen anderen Prüfkörpern auch, dass sich das Material bei „schneller“ Belastung steifer verhält, d.h. die Volumenkompaktion geringer ist. Der Anteil der plastischen Deformation war nach der 3. Belastungsschleife mit ca. 0,25 Vol.% nur gering. Unter „langsamer“ Belastung wurden die Belastungsschleifen gedehnt und die Anteile der plastischen Verformung nahmen bis auf 1,2 Vol.% zu. Unabhängig davon wiesen die Kompaktionskurven unter gleichen Randbedingungen nur eine geringe Variabilität auf, d.h. der Temperatureffekt war relativ gering einzuschätzen, was auch durch die Ergebnisse des ESA-Vorhabens belegt wird.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 55 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

- Die B2-Prüfkörper wiesen gegenüber den A1-Prüfkörpern, sowohl bei „langsamer“ als auch bei „schneller“ Belastung, im Mittel eine deutlich höhere Kompressibilität auf (bis zu 0,8 Vol.% bei „schneller“ Belastung bzw. 2,2 Vol.% bei „langsamer“ Belastung), d.h. das Material war deutlich „weicher“, wobei vereinzelt Ausreißer, z.B. beim Prüfkörper B2\_T120 (2) – „langsame“ Belastung – auftraten. Ein systematischer Einfluss der Höhe der Abbinde-temperatur auf das Kompaktionsverhalten des Baustoffs war nicht erkennbar.
- Die C3-Prüfkörper verhielten sich prinzipiell ähnlich zu den B2-Prüfkörpern.
- Die D4-Prüfkörper waren in ihrem Belastungsverhalten insofern uneinheitlich, dass bei „schneller“ Belastung eine gegenüber den A1-Prüfkörpern deutlich höhere Kompaktion beobachtet wurde, während bei „langsamer“ Belastung die Kompaktion gering war. Diese Diskrepanz wird auf Luftporen zurückgeführt, die sich bevorzugt plastisch schließen, aber unabhängig von der Belastungsrate in ihrer Wirkung begrenzt sind. Ein systematischer Einfluss der Höhe der Abbinde-temperatur auf das Kompaktionsverhalten des Baustoffs war auch bei diesem Baustoff nicht erkennbar.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 56 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### 7.4.3 Triaxiales Festigkeitsverhalten

Die Messergebnisse aus dem triaxialen Mehrstufenversuch sind in Abbildung 12 dargestellt (ANHANG 1)<sup>18</sup>.

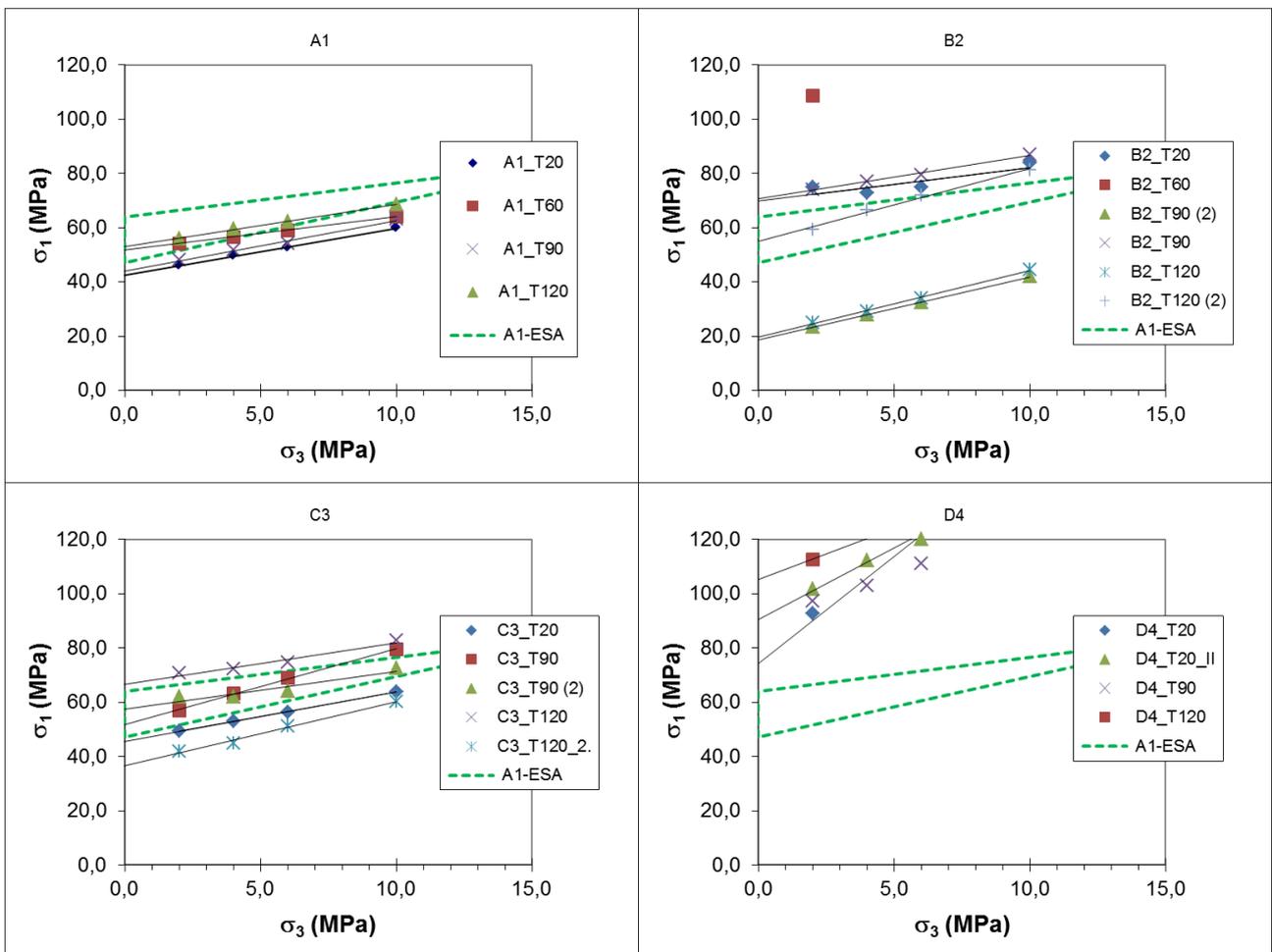


Abbildung 12: MOHR-COULOMB-Diagramme der A1-, B2-, C3- und D4-Prüfkörper inkl. Variationsfeldes des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben

Die ermittelten Kenndaten zeigten deutliche Unterschiede. Folgende Aussagen konnten gemäß ANHANG 1 getroffen werden:

- Die Materialcharge der A1-Prüfkörper zeigte, unabhängig von der Temperaturvorgeschichte der Einzelproben, ein sehr einheitliches Festigkeitsverhalten, d.h. die MOHR-COULOMB-Geraden lagen in einer sehr engen Bandbreite, knapp unterhalb des im ESA-Vorhaben beobachteten Variationsfeldes. Die Unterschiede spiegeln eine akzeptable und mutmaßlich unvermeidliche Materialvariabilität eines qualitativ hochwertigen Baustoffs wider.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 57 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

- Die Materialcharge der B2-Prüfkörper zeigte ein sehr uneinheitliches Materialverhalten, das von extrem spröden Verhalten mit (abgeschätzten) einaxialen Festigkeiten in der Größenordnung  $\sigma_1 > 100$  MPa bis zu vergleichsweise geringen Festigkeiten in der Größenordnung von  $\sigma_1 \approx 20$  MPa reichte. Die geringsten Festigkeiten traten bei Prüfkörpern auf, die Temperaturen  $T_{\max} \geq 90^\circ\text{C}$  ausgesetzt waren (mit Ausnahme des Prüfkörpers B2\_T120 (2) mit „normal“ hohen Festigkeiten). Die B2-Prüfkörper mit maximalen Abbinde Temperaturen  $T_{\max} \leq 60^\circ\text{C}$  besaßen Festigkeiten, die gering über dem Variationsfeld des A1-Baustoffs aus dem ESA-Vorhaben lagen.
- Die Festigkeitswerte der C3-Prüfkörper waren im Mittel vergleichbar zu denen des A1-Baustoffs, wobei die einaxialen Festigkeiten  $\sigma_1$  zwischen  $> 35$  MPa und  $< 65$  MPa lagen und damit eine höhere Streuung aufwiesen, ohne erkennbaren Temperaturtrend.
- Die Festigkeitswerte der D4-Prüfkörper waren, erwartungsgemäß aufgrund der Befunde aus dem CARLA-Vorhaben, extrem hoch, d.h.  $\sigma_1 > 75$  MPa, ebenfalls ohne erkennbaren Temperaturtrend. Das Material verhielt sich extrem spröde. Die Reibungswinkel der D4-Materialcharge waren als Folge des Kieszuschlages in der Rezeptur gegenüber denen der anderen Sorelbaustoffe deutlich größer.

Die abgeleiteten MOHR-COULOMB-Parameter (Reibungswinkel  $\phi$  und Kohäsion  $c$ ) sind in Tabelle 12 enthalten (ANHANG 1)<sup>18</sup>.

Tabelle 12: MOHR-COULOMB-Parameter der ausgehärteten Probekörper der Expansionsdruckversuche

		Sorelbaustoff A1 (Asse-Baustoff)	Sorelbaustoff B2 (DBM2)	Sorelbaustoff C3 (R3a-Mörtelvariante)	Sorelbaustoff D4 (Sorelbeton MB10)
Reibungswinkel $\phi$ in ° / Kohäsion $c$ in MPa	TZF RT	15,5° / 16,2 MPa	6,2° / 31,4 MPa	17,0° / 16,9 MPa	Sprödebruch 43,0° / 19,7 MPa
	TZF 60°C	5,6° / 23,5 MPa	Sprödebruch	n.b. <sup>19</sup>	n.b. <sup>19</sup>
	TZF 90°C	17,5° / 16,2 MPa	23,6° / 6,1 MPa 13,3° / 27,9 MPa	28,4°/15,4 MPa 9,5° / 24,3 MPa	50,8° / 13,2 MPa
	TZF 120°C	12,7° / 21,2 MPa	24,9° / 6,3 MPa 27,3° / 16,7 MPa	12,0°/27,0 MPa 24,0° / 11,8 MPa	35,5° / 27,0 MPa

### 7.4.4 Relaxationsverhalten

Die Messergebnisse zum Relaxationsverhalten der A1-, B2-, C3- und D4-Prüfkörper sind in Abbildung 13 dargestellt (ANHANG 1).

<sup>19</sup> Es lag kein Prüfkörper vor.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 58 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

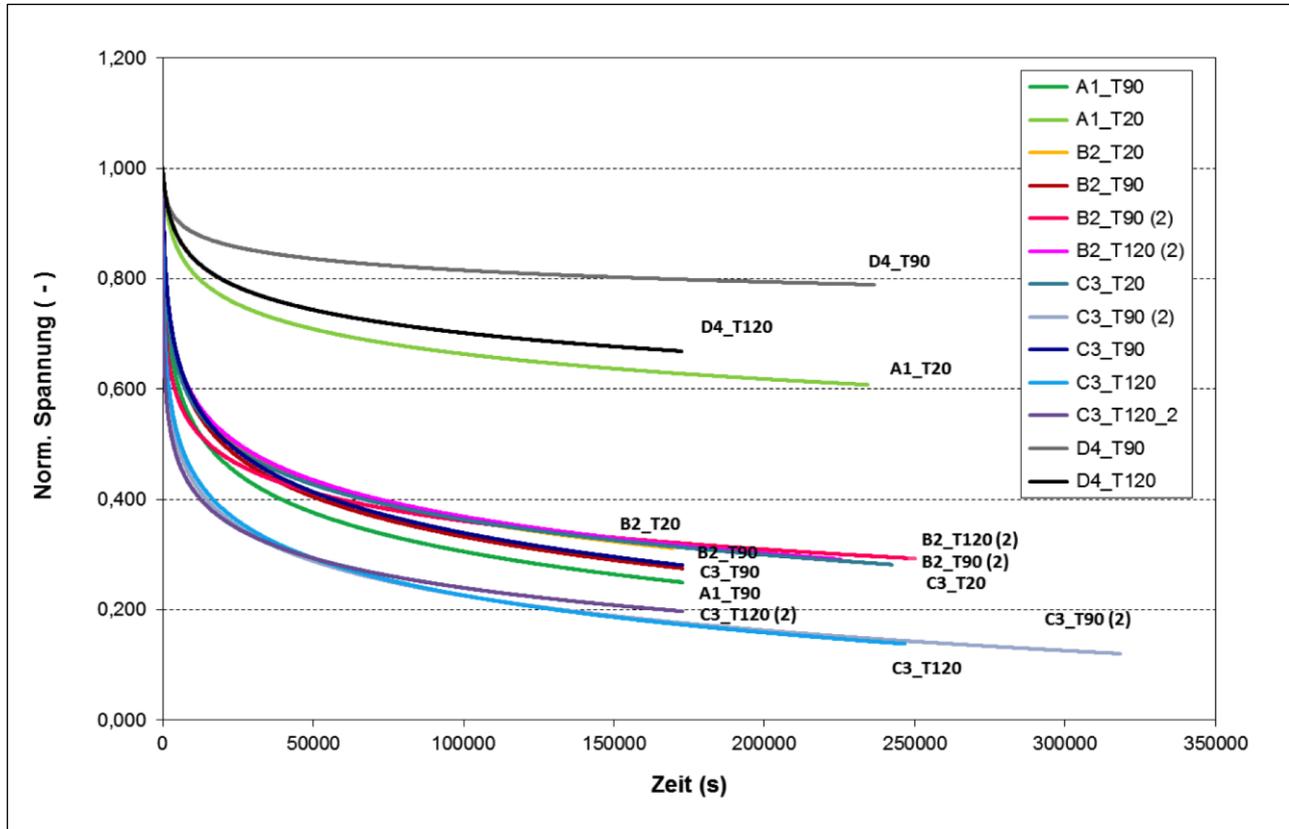


Abbildung 13: Vergleich des Relaxationsverhaltens der untersuchten Prüfkörper (Normierte Axialspannung vs. Zeit)

Beim Vergleich der normierten Relaxationskurven wurde deutlich, dass ausgehend vom Spannungswert bei einer Verformungsrate von  $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/s}$  nur die Prüfkörper des D4-Baustoffs (unabhängig von der Temperaturvorgeschichte) sowie des A1-Baustoffs (TZF RT) ein signifikantes Resttragfähigkeitsniveau von ca. 60% aufwiesen, sogar bei vergleichsweise hohen Differenzspannungen, wie sie für die Probekörpercharakterisierung zu Beginn der Relaxationsphase gewählt wurden (ANHANG 1).

### 7.5 PHASENBESTAND DER AUSGEHÄRTETEN PROBEKÖRPER

Bereits bei der Pulverisierung der Probestücke wurde gemäß ANHANG 2 festgestellt, dass die B2- und die C3-Proben anteilig noch Porenlösung enthielten, was ein Hinweis darauf war, dass die Bindemittelphasenbildung nach Monaten der Herstellung noch nicht abgeschlossen war. Beide Rezepturen sind auf die ausschließliche Bildung der 3-1-8 Phase stöchiometrisch eingestellt, was mit einer vollständigen Umsetzung der Anmischflüssigkeit verbunden ist, sobald die Abbindereaktion im Baustoffkörper zu 100% abgelaufen ist.

Für jeden untersuchten Sorelbaustoff wurde ein vergleichender Ausschnitt aus den jeweiligen Pulverdiffraktogrammen erstellt. Die Messergebnisse der einzelnen Temperatur-Zeitfenster wurden in Abbildung 14 bis Abbildung 17 für jeden Baustoff separat überlagert (ANHANG 2).

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 59 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

CPS

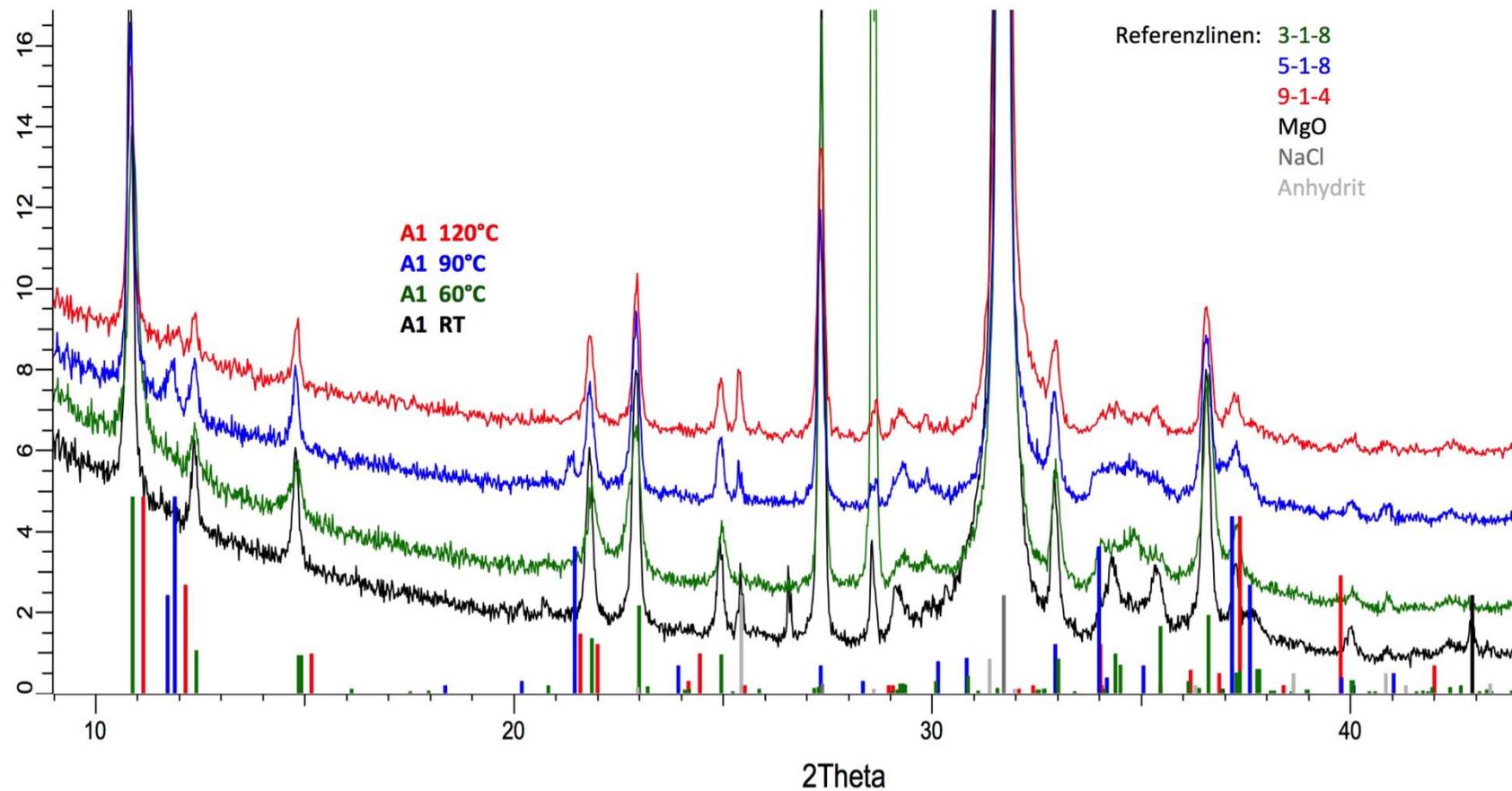


Abbildung 14: Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdiffraktogrammen der A1-Probekörper

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 60 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

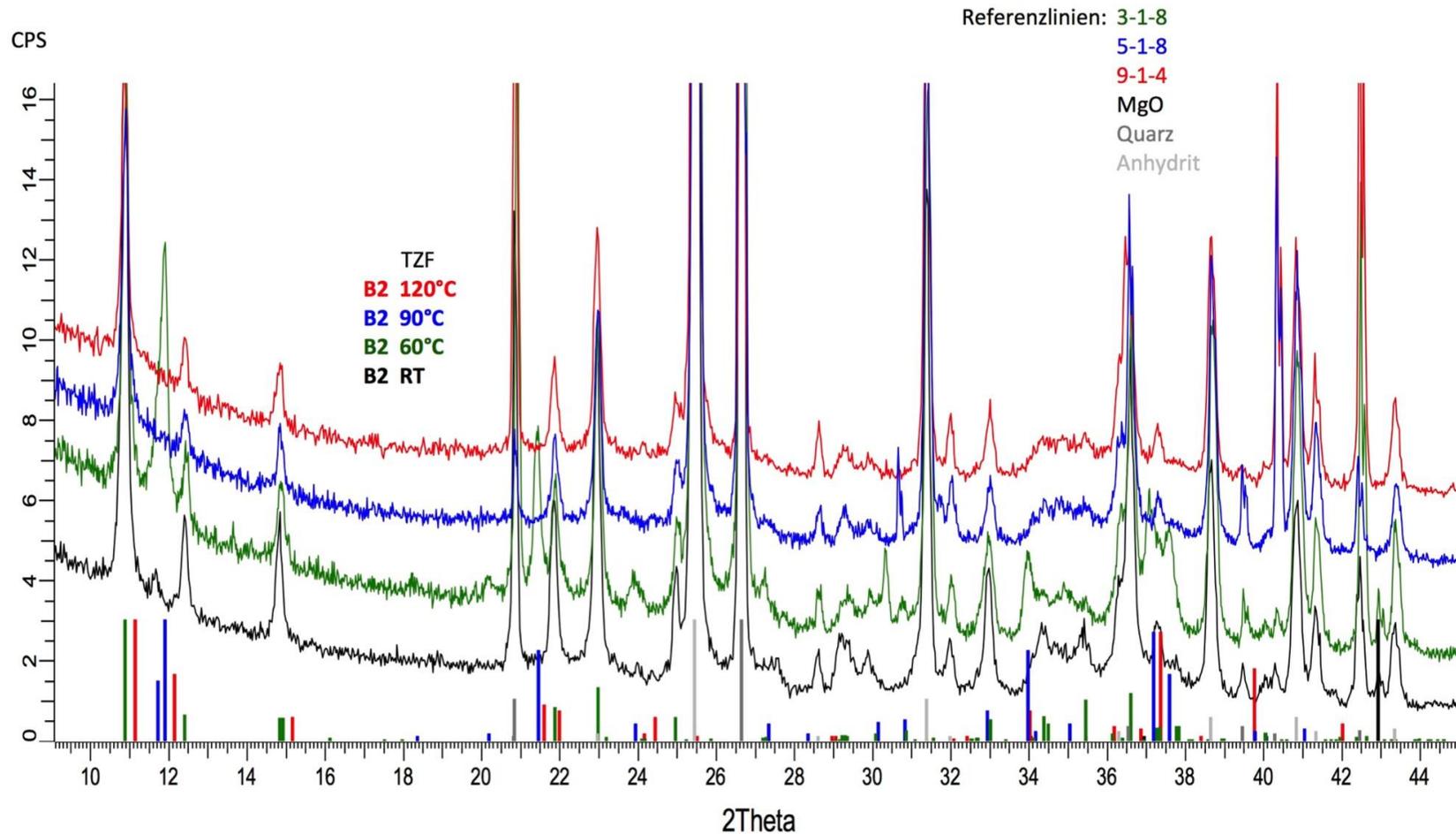


Abbildung 15: Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdiffraktogrammen der B2-Probekörper

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 61 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

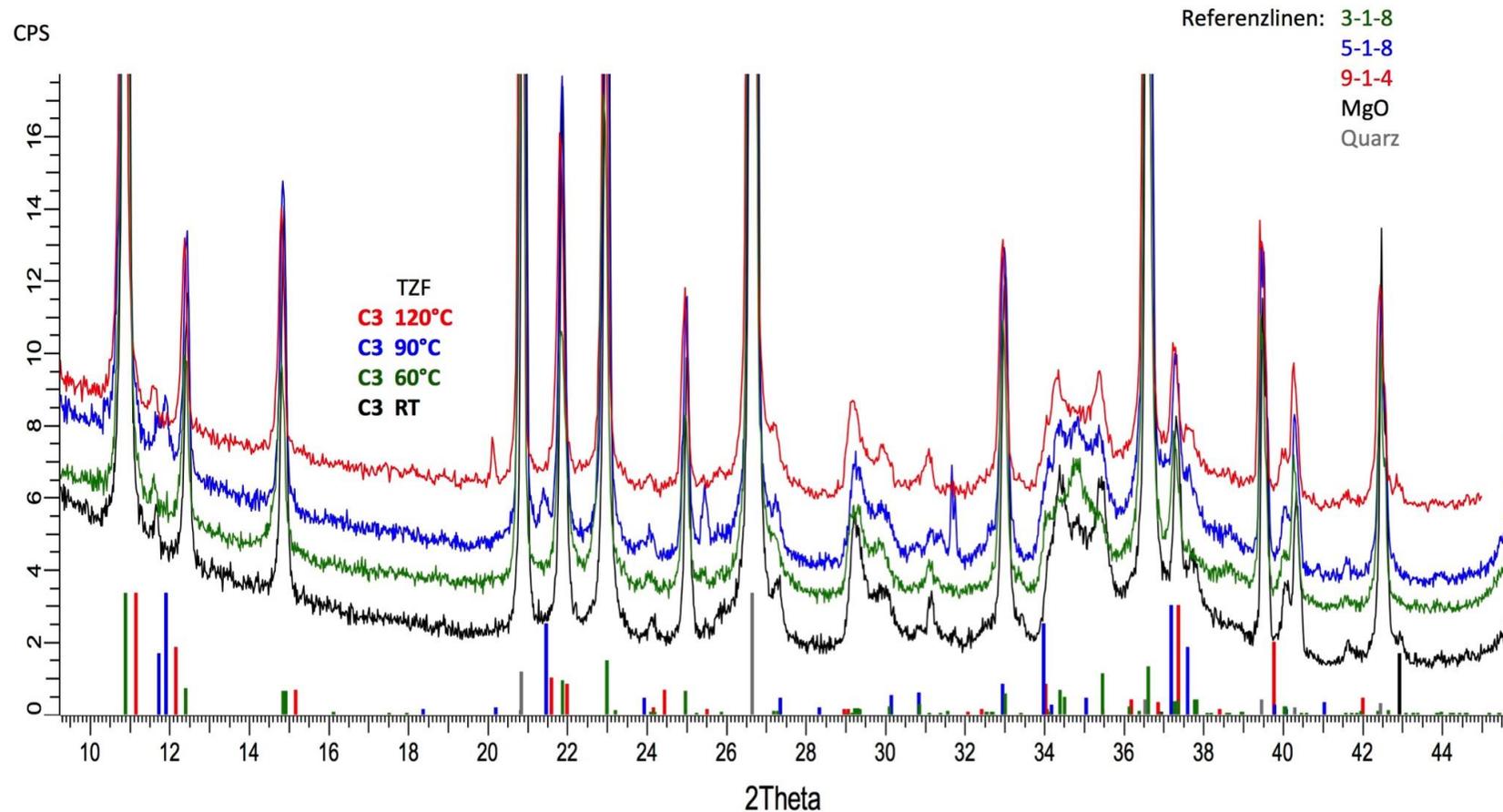


Abbildung 16: Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdiffraktogrammen der C3-Probekörper

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 62 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

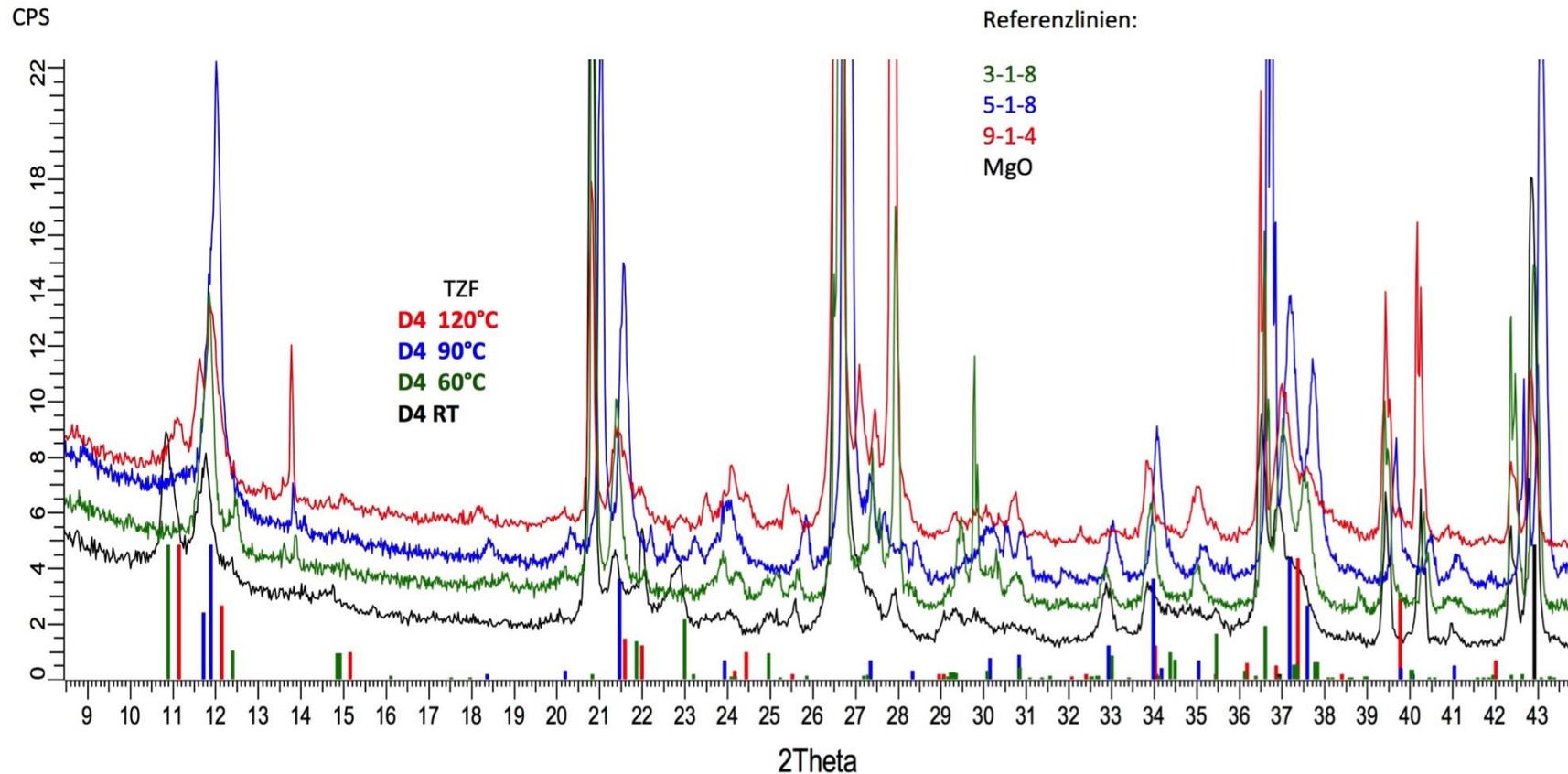


Abbildung 17: Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdiffraktogrammen der D4-Probekörper

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 63 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Die aus den Pulverdiffraktogrammen ermittelten Phasenbestandteile der Proben sowie das jeweilige Probenalter zum Zeitpunkt der Messungen sind in Tabelle 13 zusammengefasst (ANHANG 2).

Tabelle 13: Röntgenographisch ermittelter Phasenbestand der Proben

		Sorelbaustoff A1 (Asse-Baustoff)		Sorelbaustoff B2 (DBM2)		Sorelbaustoff C3 (R3a-Mörtelvariante)		Sorelbaustoff D4 (Sorelbeton MB10)	
Bindemittelphasen (w: geringer Anteil)	TZF RT	3-1-8 Phase MgO <sub>w</sub>	Probenalter: 9 Monate	3-1-8 Phase 5-1-8 <sub>w</sub> Phase MgO <sub>w</sub>	Probenalter: 9 Monate	3-1-8 Phase 5-1-8 Phase	Probenalter: 10 Monate	5-1-8 Phase 3-1-8 Phase MgO	Probenalter: 10 Monate
		amorpher Anteil		amorpher Anteil		amorpher Anteil		amorpher Anteil	
	TZF 60°C	3-1-8 Phase	Probenalter: 6 Monate	3-1-8 Phase 5-1-8 Phase MgO <sub>w</sub>	Probenalter: 6 Monate	3-1-8 Phase	Probenalter: 5 Monate	5-1-8 Phase MgO	Probenalter: 5 Monate
		amorpher Anteil		amorpher Anteil		amorpher Anteil		amorpher Anteil	
	TZF 90°C	3-1-8 Phase 5-1-8 Phase	Probenalter: 8 Monate	3-1-8 Phase	Probenalter: 8 Monate	3-1-8 Phase 5-1-8 <sub>w</sub> Phase	Probenalter: 4 Monate	5-1-8 Phase	Probenalter: 4 Monate
		amorpher Anteil		amorpher Anteil		amorpher Anteil		amorpher Anteil	
	TZF 120°C	3-1-8 Phase 5-1-8 <sub>w</sub> Phase 9-1-4 <sub>w</sub> Phase	Probenalter: 9 Monate	3-1-8 Phase	Probenalter: 9 Monate	3-1-8 Phase 5-1-8 <sub>w</sub> Phase	Probenalter: 10 Monate	5-1-8 Phase 9-1-4 Phase MgO	Probenalter: 10 Monate
		amorpher Anteil		amorpher Anteil		amorpher Anteil		amorpher Anteil	
Zuschlagphasen		Steinsalz, Anhydrit		Quarz, Anhydrit		Quarz		Quarz, Silikat	

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 64 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Die Messergebnisse wurden gemäß ANHANG 2 wie folgt interpretiert:

- Bedingt durch die Rezeptureinstellung lag erwartungsgemäß in den Proben der Sorelbaustoffe A1, B2 und C3 die 3-1-8 Bindemittelphase vor. Geringe Anteile an MgO wurden noch nach dem Aushärten bei Raumtemperatur sowie bei durchlaufener Maximaltemperatur von 60°C (TZF 60°C) vorgefunden. Ein Anteil der metastabilen 5-1-8 Phase war, zu mehr oder geringerem Anteil, in nahezu allen Proben dieser 3 Baustoffe enthalten. Diese Phase tritt in Abhängigkeit von der Temperatur und MgO-Reaktivität als Zwischenphase auf dem Reaktionsweg (kinetisch kontrollierte Abbindereaktion) zur Bildung der 3-1-8 Phase auf. Je nachdem, in welchem zeitlichen Umfang Temperaturen über 80°C während des Abbindens erreicht werden, kommt es zur Bildung der Hochtemperaturphase 9-1-4, welche sich nach Unterschreiten von 80°C und mit der Zeit in die 3-1-8 Phase umwandelt. Generell kommt es bei der Abbindereaktion von MgO und MgCl<sub>2</sub>-Lösung immer auch zur Ausbildung amorpher Bindemittelphasenanteile<sup>20</sup>, welche sich durch einen erhöhten Untergrund der Pulverdiffraktogramme bemerkbar machen. Die Proben der Sorelbaustoffe A1, B2 und C3 waren generell noch nicht vollständig ausreagiert.
- In den Proben des Sorelbaustoffs D4 wurde entsprechend der Rezeptureinstellung die 5-1-8 Phase als Bindemittelphase vorgefunden. Daneben war ein Anteil nicht umsetzbaren Magnesiumoxids in den Proben verblieben. Verläuft die Abbindereaktion bei niedrigen Temperaturen (TZF RT), kann es auch zur anteiligen Bildung der 3-1-8 Phase kommen. Ist dies der Fall, verbleibt ein anteilig höherer MgO-Gehalt in der Probe, da für die Bildung der 3-1-8 Phase mehr der begrenzten Anmischflüssigkeitsmenge benötigt wird, als für die Bildung der 5-1-8 Phase. In den D4-Proben lag jeweils der erreichbare Endzustand der Abbindereaktion vor.
- In allen Baustoffproben wurden die beigemischten Zuschlagstoffe röntgenographisch wiedergefunden. Der dem A1-Baustoff zugesetzte Steinsalzzuschlag enthielt anteilig Anhydrit (CaSO<sub>4</sub>).

<sup>20</sup> Amorphe Phasenanteile sind nichtkristalline Phasenanteile in festem Aggregatzustand ohne periodische Anordnung der Atome in einem Gitter.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 65 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

## 8 ERGEBNISSE AKTUELLER FORSCHUNGSVORHABEN

Inhalt und Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs (Kurztitel: MgO-Projekt)“ wurden in der Reihe Freiburger Forschungshefte, E 15 Naturwissenschaften, 2015 (Freyer et al. 2015) veröffentlicht.

Wesentliche Forschungsergebnisse lauten wie folgt:

- 1) „Mit der Verarbeitung großer Baustoffmengen entwickeln sich aufgrund der exothermen Abbindereaktion Temperaturen bis in die Größenordnung von 100°C. Obwohl die Abbindereaktion ein kinetisch kontrollierter Prozess ist, folgt die Phasenbildung zeitverzögert auch der temperaturabhängigen Gleichgewichtseinstellung im Lösungs-Feststoff-System. Daher bildet sich auch die Hochtemperaturphase 9-1-4 im Baustoffgefüge als Bindemittelphase aus, wenn ein hinreichend langer Abbindereaktionszeitraum oberhalb von 80°C erreicht wird. Ebenso entsteht primär die 5-1-8 Phase, da die Bildung der 3-1-8 Phase kinetisch gehemmt ist. Erst mit der Zeit (und abhängig von der Abkühlrate) folgt das System der Gleichgewichtseinstellung unter Bildung der 3-1-8 Phase. Dieser Vorgang ist möglich, da entsprechend der Rezeptureinstellung das Primärgefüge noch einen entsprechenden Lösungsanteil (Porenlösung) enthält. Die Bildung der 3-1-8 Bindemittelphase ist zudem mit der anteiligen Bildung eines amorphen Phasenanteils verbunden (Freyer et al. 2015, Seite 141).“
- 2) „Rezepturen mit MgO-Anteilen oberhalb des stöchiometrischen Ansatzes zur Bildung der 3-1-8 Phase enthalten zunehmend die 5-1-8 Phase. Die Rezeptur kann so eingestellt werden, dass die 5-1-8 Phase ausnahmslos gebildet wird und auch überstöchiometrisches, nicht umsetzbares MgO noch im Gefüge verbleibt. Mit der dann entsprechend geringeren Anmischlösungsmenge entsteht mit dem Abbinden ein Primärgefüge, was auch gleichzeitig dem Endzustand des Baustoffgefüges entspricht, da keine Porenlösung für eine Sekundärreaktion zur Verfügung steht (Freyer et al. 2015, Seite 141).“
- 3) „Für Baustoffrezepturen des Types „3-1-8“ (am Beispiel der C3-Rezeptur) und „5-1-8“ (am Beispiel der D4-Rezeptur) wurden über kalorimetrische Messungen Parameter zur Bestimmung der frei werdenden molaren Reaktionswärme abgeleitet. Daraus ermittelte Temperaturerhöhungen korrelieren mit in-situ-Daten, die bei der Errichtung großvolumiger Bauwerkskörper gemessen wurden (Freyer et al. 2015, Seite 141).“
- 4) „Einfluss auf den Weg der Bindemittelphasenbildung und demzufolge auf den zeitlichen Verlauf der Freisetzung der Reaktionswärme hat die Reaktivität des eingesetzten Magnesiumoxids. Zum Beispiel führt die Verwendung von zu reaktivem MgO zu einem früheren Ansteifen der Baustoffrezeptur, was sich auf die Verarbeitbarkeit ungünstig auswirkt. Da kausale Zusammenhänge zwischen MgO-Reaktivität, Verarbeitbarkeit, Wärmefreisetzung und Gefügeentwicklung bestehen, ist der MgO-Reaktivitäts-Parameter auch immer für den Einzelfall der Rezeptierung zu betrachten. Magnesiumoxide im Reaktivitätsbereich von 150 s bis 300 s (nach Zitronensäuretestwert, ZTW) erwiesen sich als generell geeignet (optimale Reaktivität) (Freyer et al. 2015, Seite 141).“
- 5) „Über die rezepturabhängige Bindemittelphasen-Gefüge-Entwicklung bildet der Magnesia-Baustoff prinzipiell unterschiedliche geomechanische Eigenschaften aus. D.h. die Eigen-

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 66 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

schaftsentwicklung des Magnesiabaustoffs ist von ausgeprägt chemo-mechanischer Natur (Freyer et al. 2015, Seite 141 und 142).“

- 6) „Generell sind für den Baustoff sehr hohe Festigkeiten zu verzeichnen, wobei die der 3-1-8 Rezepturtypen vergleichsweise niedriger sind als des 5-1-8 Rezepturtyps. Letztere können Werte im Bereich von ultrahochfesten Betonen erreichen (Freyer et al. 2015, Seite 142).“
- 7) „Die relativ geringen Festigkeiten von 3-1-8 Rezepturen resultieren aus dem zweiphasigen Weg der Gefügebildung. Die Sekundärkristallisation der 3-1-8 Phase ist dabei mit einer Expansionsdruckentwicklung verbunden, wenn sich der Baustoff im eingespannten Zustand befindet. Über den dabei gebildeten Porenraum kann der Baustoff dem selbst aufgebauten Druck wieder ausweichen. Die Kristallisationsdruckentwicklung wird so von einer Gefüge- bzw. Spannungsrelaxation überlagert und der nach außen hin wirksame Druckaufbau zeigt sich rückläufig (temporärer Effekt). Ein Schrumpfen des Baustoffs findet dabei nicht statt, es bleibt generell ein kraftschlüssiger Verbund zur einspannenden Umgebung erhalten (Freyer et al. 2015, Seite 142).“
- 8) „Derartige Effekte treten bei 5-1-8 Rezepturen mit einer einphasigen Gefügebildung unter direkter Kristallisation der 5-1-8 Phase nicht auf. Der Baustoff verhält sich druck- und volumenkonstant im Anschluss an die Verfestigung. Ein abweichendes Verhalten wäre denkbar, wenn unter langanhaltend hoher Temperatur (für Wochen > 80°C) die Hochtemperaturphase 9-1-4 als alleinige Bindemittelphase das Primärgefüge mit Porenlösung ausbilden würde (Freyer et al. 2015, Seite 142).“
- 9) „Die nach abgeschlossener Gefügebildung geomechanische Baustoffcharakterisierung umfasste im Detail Untersuchungen zum Festigkeits-, Kompaktions- und Relaxationsverhalten sowie des isostatischen Kriechverhaltens. Letzteres erfolgte nur für die 5-1-8 Rezeptur, dem D4-Beton (Freyer et al. 2015, Seite 142).“
- 10) „Entsprechend dem Festigkeitsverhalten weist im ursächlichen Zusammenhang eine 3-1-8 Rezeptur im Vergleich zu einer 5-1-8 Rezeptur ein deutlich höheres Kompaktionsverhalten auf. Enthält die 3-1-8 Rezeptur ein Stützkornzuschlag (Sand/Kies) fällt das Kompaktionsverhalten niedriger aus. Unterschiede aufgrund unterschiedlicher Maximaltemperaturen im Abbindeprofil konnten nicht festgestellt werden (Freyer et al. 2015, Seite 142).“
- 11) „Die Festigkeiten einer 3-1-8 Rezeptur sind unabhängig von der Zuschlagsart geringer als die einer 5-1-8 Rezeptur. Im Rahmen unterschiedlicher Abbinde-Zeitfenster liegen alle bestimmten Werte für eine 3-1-8 Rezeptur im Bereich von  $\sigma_{1\text{-uniaxial}} = 30 - 38$  MPa. Im oberen Wertebereich lagen Proben mit höheren Abbinde-temperaturen (Temp.-Maximum bei 90°C). Für die 5-1-8 Rezeptur liegen dagegen Werte bis hin zu  $\sigma_{1\text{-uniaxial}} > 80$  MPa vor (Freyer et al. 2015, Seite 142).“
- 12) „Bezüglich des Relaxationsverhaltens (Messung der axialen Spannungskomponente nach deviatorischer Verformung bis auf ca. 80% der Festigkeit) zeigt eine 3-1-8 Rezeptur eine relativ große Spannungsrelaxation. Für in-situ relevante Belastungsraten weist der Baustoff nur eine geringe Deviatorspannung auf bzw. der Wert tendiert gegen geringfügig > 0, womit sich der Baustoff eher als „weicher Einschluss“ im Gebirge verhalten wird (Freyer et al. 2015, Seite 142 und 143).“

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Seite: 67 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

- 13) „Eine 5-1-8 Rezeptur zeichnet sich durch ein generell geringes Relaxationsverhalten (unter Last bei insgesamt hohen Festigkeiten) aus und wirkt daher in Verschlussystemen als „steifer“ Einschluss (Freyer et al. 2015, Seite 143).“
- 14) „Bei der Bewertung der Ergebnisse der Relaxationsuntersuchungen ist zu berücksichtigen, dass diese noch keine abschließende Quantifizierung des Kriechverhaltens der verschiedenen Rezepturen des Magnesiabaustoffs in einem Absperrbauwerk erlauben, da die als Referenz gewählte Belastung von ca. 80% des Bruchzustandes nicht den in-situ-Bedingungen entspricht. Hierfür sind zusätzliche Messungen erforderlich (Freyer et al. 2015, Seite 143).“
- 15) „Die für die 5-1-8 Rezeptur (am Bsp. des D4-Spritzbeton) bei Belastungen von  $\sigma_{iso} = 1,5 \text{ MPa}$  und  $10 \text{ MPa}$  bis zu einer Versuchszeit von 80 Tagen durchgeführten isostatischen Kriechversuche dokumentieren ein sehr geringes Kompaktionskriechen, das sich offenbar asymptotisch einem Grenzwert nähert (Freyer et al. 2015, Seite 143).“
- 16) „Dieses Eigenschaftsbild der Magnesiabaustoffrezepturen bleibt auch bei bzw. nach sekundärem Lösungszutritt zum vollständig abge bundenen Baustoff erhalten (Freyer et al. 2015, Seite 143).“

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 68 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

## 9 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN ZUR WEITEREN VORGEHENSWEISE

Im Rahmen dieses Untersuchungsprogramms wurden vergleichende Untersuchungen an vier Sorelbaustoffen unterschiedlicher Rezeptur zur Bewertung ihrer Expansionsdruckentwicklung durchgeführt. Die Maximaltemperaturen des Abbindeprozesses wurden dabei variiert. Die Abbindereaktionen verliefen unter drei verschiedenen Temperatur-Zeit-Regimen, jeweils mit einer 2-tägigen Aufheizphase, einer 2-tägigen Haltephase der Maximaltemperatur sowie einer einheitlichen Abkühlrate von 0,42 K/h. Die gewählten Maximaltemperaturen in Höhe von 60°C, 90°C und 120°C wurden aus messtechnisch erfassten Abbinde-temperaturen von bisher errichteten massigen, untertägigen Bauwerken aus Sorelbaustoff abgeleitet. Begleitend zu diesen drei Temperatur-Zeit-Regimen lief jeweils eine zusätzliche Abbinde-reaktion bei Raumtemperatur ab, um ggf. einen spezifischen Temperaturbereich identifizieren zu können, bei dem der erfasste Druck dauerhaft erhalten bleibt.

Grundlage für dieses Untersuchungsprogramm bildete u.a. die Reproduzierbarkeit der Baustoffe, weil die Versuchsführung aus Kapazitätsgründen mehrere Anmischtermine für den jeweiligen Baustoff erforderte. Zu diesem Zweck wurden die Qualitätsparameter der Ausgangsstoffe, als auch die Qualitätsparameter der frisch angemischten Baustoffe bestimmt und baustoffbezogen miteinander verglichen. Auf diese Weise konnte die Herstellung von Baustoffen mit nahezu gleichbleibender Qualität abgesichert werden, wobei die Ergebnisse gezeigt haben, dass auch bei guter Reproduzierbarkeit der Baustoffe, jeweils eine geringfügige, natürliche Materialvariabilität vorlag.

Die Dauer der Versuche zur Bestimmung der Expansionsdruckermittlung betrug durchschnittlich ca. 3 Wochen. Zum Ende dieser Versuche wurden mehrheitlich Expansionsdrücke gemessen. Sehr geringe Expansionsdrücke (bis gar kein Druck) wurden für den A1-Baustoff im TZF 60°C, den C3- und den D4-Baustoff im TZF 90°C sowie für den B2- und den D4-Baustoff im TZF 120°C ermittelt.

Das IfAC der TU BAF stellte nach röntgenographischen Untersuchungen zum Phasenbestand an den ausgehärteten Probekörpern der Versuche zur Expansionsdruckentwicklung fest, dass diese, mit Ausnahme des D4-Baustoffs, noch nicht vollständig ausreagiert waren. Die Beobachtungsdauer zur Erfassung der Expansionsdruckentwicklung über maximal 25 Tage war demnach zu kurz, um eine umfassende und vergleichende Bewertung der vier Sorelbaustoffe hinsichtlich eines sich entwickelnden oder verbleibenden Expansionsdruckes vornehmen zu können. Im Fall von 3-1-8 Rezepturen entwickeln sich Expansionsdrücke infolge Kristallisation neuer Phasen (Sekundärkristallisation 1) in Abhängigkeit der Abkühlrate erst nach Wochen. In der Konsequenz wäre eine längerfristige Messwerterfassung, die mit der Phasenbestandsentwicklung des Baustoffgefüges korreliert, notwendig gewesen. Die erfassten Drücke resultierten im Wesentlichen aus einer Behinderung der thermischen Dehnung der Baustoffe. Dieser Sachverhalt war zum Zeitpunkt der Versuchsplanung noch nicht bekannt, sondern wurde aus zwischenzeitlich erhobenen Messdaten anderer, z.T. noch laufender Forschungsprojekte (ESA-Vorhaben bzw. MgO-Projekt<sup>21</sup> der TU BAF) zu den Sorelbaustoffen A1 (Asse-Baustoff) und C3 (R3a-Varianten) sowie im Zusammenhang mit Daten zum Sorelbaustoff B2 (DBM2) aus dem in-situ-Versuchsbauwerk Bleicherode abgeleitet.

<sup>21</sup> zwischenzeitlich abgeschlossen; (Ein Auszug der Forschungsergebnisse ist in Kapitel 8 enthalten.)

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 69 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

Wesentliche Aussagen dieser Forschungsvorhaben, u.a. in (Freyer et al. 2015) sowie in (IfAC TU BAF 2015) veröffentlicht, sind:

1. Für MgO-Baustoffe ist bei Abbindetemperaturen ab bzw. oberhalb 60°C kein dauerhaft auftretender Expansionsdruck nachweisbar.
2. Im eingespannten Zustand ist ein messbarer Druckaufbau aufgrund von Phasenumwandlungen innerhalb des Bindemittelgefüges (Kristallisationsdruck) in Abhängigkeit von der Abbindetemperatur und -zeit im Folgezeitraum aufgrund von Spannungsrelaxation rückläufig.

Diese Aussagen sind das Ergebnis aus bis zu 3-jährigen Datenerfassungszeiten zur Expansionsdruckentwicklung unter isochoren Bedingungen in definierten Temperatur-Zeitfenstern mit Maximaltemperaturen von 60°C, 90°C und 120°C für die Sorelbaustoffe A1 (ESA-Vorhaben) und C3 (MgO-Projekt der TU BAF).

Negative Druckwerte, wie sie innerhalb der TZF 90°C und TZF 120°C beim Sorelbaustoff A1 erfasst wurden, sind vermutlich auf eine Überlagerung der durch die Gefügebildung verursachten Volumenänderung<sup>22</sup> sowie der durch Abkühlung bedingten thermischen Kontraktion zurückzuführen. Die zeitliche Überlagerung der Einzelbeträge hängt vom Temperatur-Zeit-Regime sowie der Baustoffrezeptur, d.h. dem Anteil des Bindemittels gegenüber dem Anteil der Zuschlagstoffe, ab. Die kinetisch kontrollierte Bindemittelphasenbildung wird auch durch die Art der Zuschlagstoffe beeinflusst. Je höher und schneller die Maximaltemperatur erreicht wird, umso eher beginnt die Gefügebildung. Im Zeitraum einer konstant gehaltenen hohen Maximaltemperatur wird mit einem Druckabfall die Volumenabnahme aufgrund der Gefügebildung sichtbar (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7). Setzt dann eine Abkühlung ein, kommt es aufgrund thermischer Kontraktion zu einer weiteren Volumenreduktion. Je nachdem, ob die Gefügebildung bereits abgeschlossen ist oder nicht, was vom Bindemittelanteil und der MgO-Reaktivität und wiederum von der Temperatur abhängt, überlagern sich diese Vorgänge unterschiedlich stark. Mit dem Fortgang der Gefügebildung oder -umwandlung nach Abkühlung, wie dem Einsetzen der Kristallisation der 3-1-8 Phase durch Reaktion des primär gebildeten Gefüges aus 5-1-8 Phase mit darin befindlicher Porenlösung, kann es zu einem Druckanstieg aufgrund nachgelagerter Kristallisationsvorgänge (Sekundärkristallisation 1) kommen. Im Vergleich zu den Baustoffrezepturen B2, C3 und D4 scheint im Fall des Sorelbaustoffs A1 die Primärgefügebildung und die thermische Kontraktion am stärksten zu überlagern. Ob und inwieweit sich dieser Effekt auf bautechnische Anwendungen auswirkt, kann anhand der bislang vorliegenden Daten nicht abgeschätzt werden<sup>23</sup>.

<sup>22</sup> Die Abbindereaktion von Sorelbaustoffen verläuft exotherm, d.h. die Suspension aus MgO-Bindemittel und MgCl<sub>2</sub>-Lösung erwärmt sich mit der Bildung der Reaktionsprodukte – den basischen Magnesiumhydroxidchlorid-Hydraten (5-1-8 Phase und / oder 3-1-8 Phase, ggf. 9-1-4 Phase). Dabei werden Bestandteile der Anmischflüssigkeit, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup> und H<sub>2</sub>O, zur Kristallstrukturbildung der Bindemittelphasen verbraucht, wodurch es zu Dichte- und damit zu Volumenänderungen kommt. Generell weist gebundenes Wasser ein kleineres Volumen als ungebundenes Wasser auf. Mit der Bildung der Hydratphasen kommt es zu einer Volumenabnahme, was sich im Gefüge auch durch Porenbildung äußert.

<sup>23</sup> Die messtechnisch erfassten negativen Drücke (bis -2000 kPa) - Abbildung 6 bzw. Abbildung 7 - sind vermutlich in dieser Höhe nicht real, weil die vorhandene Haftzugfestigkeit zwischen Baustoff und Stahlwandung viel kleiner ist, sondern resultieren möglicherweise aus einer thermisch bedingten Nullpunktverschiebung des Messsystems, wobei eine Korrektur möglicher Temperatureffekte der DMS nicht möglich war.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 70 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Für alle 4 Sorelbaustoffe wurde versuchstechnisch die adiabatische Temperaturerhöhung bestimmt. Dieser baustoffspezifische, thermische Kennwert wurde zur Abschätzung der auftretenden Kerntemperaturen in einem massigen Bauwerk ermittelt. Für die Baustoffe A1, B2 und D4 wurden Werte zwischen 82 K und 85 K ermittelt und für den C3-Baustoff, aufgrund des hohen Bindemittelanteils dieser R3a-Mörtelvariante, ein Wert von 110 K. Die adiabatische Temperaturerhöhung hängt stark von der Rezeptur des MgO-Betons sowie der eingesetzten MgO-Reaktivität ab. Ein Berechnungsansatz zur Bestimmung der freiwerdenden Reaktionswärme beim Abbinden von MgO-Baustoffen ist in (Freyer et al. 2015) enthalten.

Anhand der Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie konnten keine Rückschlüsse auf einen Zusammenhang zwischen der Höhe der Temperatur während des Aushärtens und der sich einstellenden Porosität in den Sorelbaustoffen gezogen werden (MPA Braunschweig 2013b).

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften können für die Beurteilung der Eignung der untersuchten Sorelbaustoffe im Hinblick auf einen Einsatz in massigen, geotechnischen Barrieren (Verschlussbauwerken), bei denen keine speziellen Anforderungen an einen dauerhaften Expansionsdruck bestehen, herangezogen werden. Die hierzu im Rahmen dieses Versuchsprogramms durchgeführten triaxialen Druckversuche liefern keine unmittelbar in-situ relevanten Berechnungsparameter, wie sie als Eingangsgrößen für numerische Modellierungen von untertägigen massigen Bauwerken benötigt werden. Das gewählte Versuchsprogramm erlaubt jedoch, dem Versuchsziel entsprechend, die zuverlässige Charakterisierung der Sorelbaustoffe im Vergleich der Baustoffe bzw. ihrer Temperaturvorgeschichte untereinander, bei vertretbarem Versuchsaufwand und -dauer. Da es sich um Indexversuche handelt, sind die Ergebnisse nicht statistisch abgesichert. Dennoch spiegeln sie tendenziell das Materialverhalten der Baustoffe wider. Eine konsistente Bewertung der erzielten Indexergebnisse wurde unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus dem ESA-Vorhaben möglich, weil dadurch als Referenz belastbare Vergleichsergebnisse von A1-Probenserien vorlagen. Auf Basis der am IfG Leipzig durchgeführten Arbeiten konnten die verschiedenen Sorelbaustoffe wie folgt charakterisiert werden:

- Der A1-Baustoff zeigte eine gute Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften, wie z.B. eine geringe Variation der Dichten und P-Wellengeschwindigkeiten. Eine signifikante Beeinflussung der Materialeigenschaften infolge der durchlaufenen Temperatur-Zeit-Regime war nicht erkennbar. Für den A1-Baustoff wurden mittlere Steifigkeiten<sup>24</sup> und Festigkeiten<sup>25</sup> ermittelt. Es wurde eine starke Relaxation der A1-Prüfkörper bei  $T_{\max} \geq 90^\circ\text{C}$  festgestellt.
- An den Prüfkörpern des B2-Baustoffs wurde eine moderate Dichtevariabilität und bzgl. der P-Wellengeschwindigkeiten eine deutliche Materialvariabilität festgestellt. Die Messergebnisse ließen auf eine Beeinflussung dieser Materialeigenschaften infolge der durchlaufenen Temperatur-Zeit-Regime schließen. Für die Prüfkörper mit Abbinde Temperaturen bis  $90^\circ\text{C}$  wurden: a) eine mittlere Kompaktierfähigkeit, b) mittlere Steifigkeiten sowie c) mittlere bis sehr hohe Festigkeiten ermittelt. Prüfkörper aus dem TZF  $120^\circ\text{C}$  variierten in ihren Festig-

<sup>24</sup> charakterisiert durch den Elastizitätsmodul ( $E_d$ ) sowie die Poissonzahl ( $\nu_d$ ), woraus sich die anderen elastischen Konstanten Kompressionsmodul ( $K_d$ ) und Schubmodul ( $G_d$ ) ableiten lassen; (Die Ermittlung dieser Kennwerte erfolgte im Zuge der gesteinsphysikalischen Charakterisierung der ausgehärteten Probekörper, so dass es sich hier um dynamische elastische Konstanten handelt, gekennzeichnet durch den Index d.)

<sup>25</sup> charakterisiert durch einaxiale bzw., bei  $\sigma_3 > 0$ , durch triaxiale Druckfestigkeiten ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) sowie die MOHR-COULOMB-Parameter: Reibungswinkel ( $\varphi$ ) und Kohäsion ( $c$ )

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	Seite: 71 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

keiten von gering bis sehr hoch, wobei die Ursachen für diese Unterschiede noch nicht eindeutig geklärt werden konnten. Das Relaxationsverhalten war vergleichbar zum A1-Baustoff.

- An den Prüfkörpern des C3-Baustoffs wurden eine mittlere Dichtevariabilität und eine deutliche Streuung der P-Wellengeschwindigkeiten ermittelt. Ein Abbinde temperatureinfluss war anhand der Messergebnisse erkennbar, jedoch nicht systematisch. Für eine eingehendere Bewertung reichte die Datenbasis nicht aus. Für Prüfkörper aus dem TZF 120°C wurden uneinheitliche Festigkeiten ermittelt. Das Relaxationsverhalten war vergleichbar zum A1- und B2-Baustoff.
- Die petrophysikalischen Materialeigenschaften des D4-Baustoffs waren, abgesehen vom Zuschlageffekt (Dichtevariabilität infolge unterschiedlich hohen Anteils des Zuschlagstoffs), gut reproduzierbar. Anhand der Messergebnisse konnte kein signifikanter Einfluss der Abbinde temperature festgestellt werden. Der Sorelbaustoff D4 wies eine hohe Steifigkeit und sehr hohe Festigkeiten auf. Bei schneller Belastung trat eine relativ hohe Kompaktion ein, mutmaßlich infolge von Luftporen im Baustoff. Es wurde an den D4-Prüfkörpern eine sehr geringe Relaxation festgestellt.

Unterschiede in den Messergebnissen waren in der Konsequenz der unterschiedlichen Baustoffansätze, aber auch als Folge der unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Regime während der Abbinde reaktion zum Teil deutlich ersichtlich. Es gab jedoch keine Hinweise auf Eigenschaften, z.B. zu geringe Festigkeiten oder zu hohe Porositäten, die eine Nutzung der Baustoffe grundsätzlich ausschließen. Allgemein gilt, dass für Verschlussbauwerke Baustoffe mit geringerer Materialvariabilität zu bevorzugen sind, was offensichtlich für den A1- und D4-Baustoff vorliegt. Eine abschließende, allgemeingültige Einschätzung zur Eignung der untersuchten Baustoffe im Hinblick auf einen Einsatz in massigen, untertägigen Bauwerken kann an dieser Stelle nicht abgegeben werden, da die Entscheidung über die Eignung eines Baustoffs im Wesentlichen von den jeweiligen Anforderungen (u.a. Dichtigkeitsanforderungen, Anforderungen an mechanische Festigkeiten, Nachweiszeitraum) abhängt, die an den Baustoff gestellt werden.

Die hier vorgelegten Ergebnisse entsprechen dem aktuellen und neuen Stand der Wissenschaft. Weitere vergleichende Untersuchungen zum temperaturabhängigen Expansionsdruckverhalten der vier untersuchten Sorelbaustoffe werden im Hinblick auf das formulierte Versuchsziel als nicht erforderlich angesehen, so dass eine Stufe 2 im Rahmen dieses Untersuchungsprogrammes entfallen kann. Die durchgeführten Indexversuche decken zwar nicht den vollständigen Abbindezeitraum ab, liefern aber ein konsistentes Ergebnisbild zu den noch laufenden Untersuchungen am Sorelbaustoff A1 (ESA-Vorhaben) sowie den zwischenzeitlich abgeschlossenen Untersuchungen am Sorelbaustoff C3 (MgO-Projekt der TU BAF) im Hinblick auf die Fragestellung „langzeitige Entwicklung eines Expansionsdruckes“. Bei Abbinde temperaturen ab bzw. oberhalb 60°C ist für MgO-Baustoffe ein dauerhafter Erhalt eines Expansionsdruckes nicht nachweisbar. Die Untersuchungen am A1-Baustoff im Rahmen des ESA-Vorhabens dauern noch ca. 1 Jahr an. Dennoch sind oben genannte Aussagen hierzu bereits zuverlässig zu treffen.

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 72 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

**LITERATURVERZEICHNIS**

DBE TEC (2007): Zwischenbericht Baustoffprüfungen und geotechnische Parameter PSB A1. – Unterlage A/-/AJ/-/GC/BZ/0002/00, DBE Technology GmbH, Peine, 04.07.2007.

DEUSA (2010): Spezifikation Magnesiumchloridlösung EES 30%, 15.04.2010, [http://www.deusa.de/phocadownload/Produkte/Magnesiumchloridsole/spezifikation\\_magnesiumchloridloesung-ees\\_30.pdf](http://www.deusa.de/phocadownload/Produkte/Magnesiumchloridsole/spezifikation_magnesiumchloridloesung-ees_30.pdf).

Dinnebier, R.E.; Freyer, D.; Bette, S.; Oestreich, M. (2010): 9 Mg(OH)<sub>2</sub> · MgCl<sub>2</sub> · 4 H<sub>2</sub>O – a High Temperature Phase of the Magnesia Binder System. – Fachzeitschrift der American Geological Society: Inorg. Chem., 2010.

ERCOSPLAN und IfG Leipzig (2009): Untersuchungsprogramm Blindschacht 4, 800-m-Sohle bis 850-m-Sohle vom 04.02.2009. – Abschlussbericht der ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH und der Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Erfurt, Februar 2009. [PKZ 16/-/ERV/GH/LF/0002/00], erstellt im Auftrag der Asse-GmbH

EUROQUARZ (2012): MICROSIL® M 300, 2. Halbjahr 2012 (Online), [http://datenblatt.euroquarz.de/cgi-bin/qmt-v3/db\\_pdf\\_files/3722.pdf](http://datenblatt.euroquarz.de/cgi-bin/qmt-v3/db_pdf_files/3722.pdf). - Internetseite besucht am 19.05.2014.

Freyer, D. (2011): Sorel cement as geotechnical barrier in salt formations. – Proceedings of the international workshops ABC-Salt(II) and HiTAC 2011, S. 27, KIT Scientific Reports 7625, ISSN 1869-9669, ISBN 978-3-86644-912-1.

GSF (2007): Verfüll- und Verschlusskonzept für die Schließung der Tagesschächte 2 und 4 des Bergwerkes Asse. – Bericht, PKZ 16/-/ERV/GH/BZ/0001/01, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Schachtanlage Asse, Remlingen, 26.10.2007.

GTS (2006): Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV (Projekt „CARLA“), Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. – Bericht zum 1. Meilenstein, FuE Vorhaben (FKZ 02C1204), GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG, Teutschenthal, 31.07.2006.

IfAC TU BAF (2015): Verschlussysteme – In-situ-Bauwerke aus Magnesiabaustoff und dessen chemisch-mechanische Eigenschaften im Hinblick auf HAW-Endlager. – Materialienband zum Fachgespräch vom 28.04 – 29.04.2015, Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg und der Projektträger Karlsruhe (im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie), Freiberg, 2015.

Freyer et al. (2015): Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs. – FuE-Vorhaben (FKZ 02E10880), Institut für Anorganische Chemie in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg sowie der Institut für Gebirgsmechanik GmbH, veröffentlicht in Freiburger Forschungshefte, E 15 Naturwissenschaften, Freiberg, 2015.

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 73 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

IfBuS TU BAF (2015): Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II); Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen. – FuE Vorhaben (FKZ 02E11193A), Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg sowie DBE Technology GmbH in Zusammenarbeit u.a. mit dem Institut für Anorganische Chemie, Freiberg, 2015.

K-UTEC (2010): Ursachenanalyse zum Nichterreichen der Quelldruckwerte des Dammbaumörtels DBM2 im Versuchsbauwerk im Anhydrit der Grube Bleicherode. – Bericht, K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen, 04.10.2010, (unveröffentlichter Bericht).

K-UTEC (2008): Verbundprojekt: Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar - Hauptprojekt. - FuE Vorhaben (FKZ 02C1214), Kali-Umweltechnik GmbH (K-UTEC), Sondershausen, 2008.

MPA Braunschweig (2013a): Untersuchungsbericht (1318/650/11-a) - Wth: ERA Morsleben – Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Quellverhalten auf DBM2 vom 19.06.2013. - Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig, Braunschweig. [KZL 9M/22343031/GH/RB/0319], erstellt im Auftrag des BfS

MPA Braunschweig (2013b): Untersuchungsbericht (1080/032/12) - Wth: ERA Morsleben – Ermittlung des Kristallisationsdrucks bei hohen Temperaturen an vier unterschiedlichen Magnesiabinderrezepturen vom 22.10.2013. - Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig, Braunschweig, Oktober 2013. [KZL 9M/22343031/GH/RB/0349], erstellt im Auftrag des BfS

Pannach, M. (2014): Zur Phasenbildung und -stabilität basischer Magnesiumchlorid- und Magnesiumsulfat-Hydrate im Temperaturbereich von 25°C bis 120°C. – Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2014.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 74 von 115
NAAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Stand: 09.03.2016
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		

### GLOSSAR

Begriff	Definition
Abbindereaktion	Reaktion zwischen einer Festphase (Bindemittel, meist in feinverteilter Form) und einer Anmischflüssigkeit, bei welcher es durch Phasenneubildung zur Verfestigung der Ausgangssuspension (Gemisch aus Bindemittel und Anmischflüssigkeit) kommt.
Bindemittelphase	Im entsprechenden Molverhältnis reagiert reaktionsfähiges, kaustisches Magnesiumoxid (MgO) mit konzentrierter Magnesiumchloridlösung (MgCl <sub>2</sub> -Lösung) unter Ausbildung basischer Magnesiumhydroxidchlorid-Hydrate „x y z“ [x Mg(OH) <sub>2</sub> · y MgCl <sub>2</sub> · z H <sub>2</sub> O], welche die Bindemittelphasen des Sorelbaustoffs darstellen. In Abhängigkeit vom Verhältnis des MgO zur MgCl <sub>2</sub> -Lösung mit entsprechender Konzentration, bildet sich die 3-1-8 Phase, die 5-1-8 Phase oder ein Gemisch aus beiden Phasen aus. Auch kann noch unumgesetztes MgO nach dem Abbinden enthalten sein, wenn dessen Reaktivität niedrig oder der Lösungsanteil für dessen vollständige Umsetzung zu gering eingestellt ist. Wenn ein hinreichend langer Abbindereaktionszeitraum oberhalb von 80°C erreicht wird, bildet sich die Hochtemperaturphase 9-1-4 im Baustoffgefüge als Bindemittelphase aus.
Expansionsdruck	Ein Expansionsdruck baut sich auf, wenn die Volumenzunahme eines Stoffes durch die mechanischen Randbedingungen teilweise oder vollständig behindert wird.
Kristallisationsdruck	Der Kristallisationsdruck ist eine Art des Expansionsdruckes, der sich speziell aufbaut, wenn die Volumenzunahme infolge Kristallisation neuer Phasen (Sekundärkristallisation 1 und / oder Sekundärkristallisation 2) behindert wird.
Quelldruck	Der Quelldruck ist eine Art des Expansionsdruckes, der sich speziell aufbaut, wenn ein Festkörper in seiner durch eine Wasseraufnahme verursachten Volumenzunahme teilweise oder vollständig behindert wird.
Sekundärkristallisation 1	Die Sekundärkristallisation 1 beschreibt die Umwandlung der kinetisch kontrolliert kristallisierten Primärphasen oder auch Hochtemperaturphasen des Primärgefüges in die thermodynamische Gleichgewichtsphase bei entsprechender Temperatur zu einem späteren Zeitpunkt.
Sekundärkristallisation 2	Die Sekundärkristallisation 2 beschreibt die infolge sekundären Lösungszutritts einsetzende Umwandlung der in der Gefügematrix vorliegenden metastabilen Bindemittelphase (z.B. 5-1-8 Phase) in die thermodynamisch stabile Phase.
Sorelbaustoff	Baustoff, welcher in abgebundener Form als Bindemittelphase ein basisches Magnesiumsalzhydrat enthält, welches aufgrund der Reaktion von kaustischem Magnesiumoxid und konzentrierter Salzlösung (in der Regel MgCl <sub>2</sub> -Lösung) entsteht (Abbindereaktion).
thermischer Druck	Der thermische Druck ist eine Art des Expansionsdruckes, der sich speziell aufbaut, wenn ein Festkörper in seiner durch Wärmezufuhr verursachten Volumenzunahme teilweise oder vollständig behindert wird.
thermische Expansion	Die thermische Expansion ist die Volumenzunahme infolge Wärmeausdehnung eines Festkörpers.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Seite: 75 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

# ANHANG 1 - UNTERSUCHUNGSBERICHT DER INSTITUT FÜR GEBIRGSMECHANIK GMBH: VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN AN 4 SORELBTONREZEPTUREN ZUM TEMPERATURABHÄNGIGEN QUELLDRUCKVERHALTEN

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Seite: 76 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

**IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH**  
*Untersuchung - Prüfung - Beratung - Begutachtung*



### Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen zum temperaturabhängigen Quelldruckverhalten

Auftraggeber: Ercosplan Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH  
Arnstädter Str. 28  
99096 Erfurt

Bestellnummer AG: EGB 11-014. No1  
Auftragsnummer AN: B IfG 31/2011

Projektbearbeiter:



Leipzig, 05.08.2013



Geschäftsführer



Projektleiter

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 77 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011 Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen 2

### INHALTSVERZEICHNIS

1	VERANLASSUNG / PROBENMATERIAL .....	3
2	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM / UNTERSUCHUNGSMETHODIK .....	4
2.1	Untersuchungsprogramm .....	4
2.2	Versuchstechnik zur Gewinnung der Materialparameter .....	6
2.2.1	<i>Prüfkörpervorbereitung / Gesteinsphysikalische Probencharakterisierung</i> .....	6
2.2.2	<i>Prüfsystem SHM 250</i> .....	7
3	ERGEBNISSE / DISKUSSION .....	8
3.1	Probencharakterisierung .....	8
3.2	Triaxiale isotrope Druckversuche .....	11
3.3	Triaxiales Festigkeitsverhalten .....	15
3.4	Relaxationsverhalten .....	20
4	ZUSAMMENFASSUNG .....	23
	LITERATUR .....	26

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 78 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011 Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen 3

### 1 VERANLASSUNG / PROBENMATERIAL

Mit Schreiben vom 28.09.2012 beauftragte ERCOSPLAN Geotechnik und Bergbau, Erfurt, das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) mit der Durchführung von vergleichenden Untersuchungen von Sorelbetonvarianten zur Charakterisierung des Quellverhaltens sowie der Festigkeit bei unterschiedlichen Abbindetemperaturen. ERCOSPLAN war im Nachgang einer Beratung am 29.02.2012 in Leipzig vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in Salzgitter mit der Koordination dieser Arbeiten beauftragt worden.

Bei den zu untersuchenden Materialien handelt es sich um vier verschiedene Sorelbetonvarianten (MgO + Zuschlag), die als mögliche Baustoffe für die Herstellung von Schacht- und Streckenverschlüssen genutzt werden können (Tab. 1-1). Zur Simulation des Abbindeverhaltens der Baustoffe unter Einspannung und mit Temperaturentwicklung wurden diese Sorelbetonvarianten an der Materialprüfanstalt (MPA) in Braunschweig angemischt und danach zum Abbinden in stählerne, gasdicht verschlossene Drucktöpfe eingebracht. Dabei wurde über einen Zeitraum von mindestens 14 Tagen ein spezielles Temperatur-Zeit-Regime (Abb. 1-1) durch eine Lagerung in Klimaschränken aufgebracht, wobei gleichzeitig mit Dehnmessstreifen die Entwicklung des Quelldruckes aufgezeichnet wurde. Die realisierten Maximaltemperaturen betragen 60°C, 90°C und 120°C. Zusätzlich lief jeweils ein Ansatz bei Raumtemperatur. Insgesamt liegen damit 16 verschiedene Probenchargen vor.

Tab. 1-1. Sorelbeton-Varianten: 4 Sorelbaustoff-Rezepturen

MgO-Baustoff	A1 (= Asse-Baustoff)	B2 (= DBM2, Fa. KUTEC)	C3 (= R3a-Mörtelvariante, MgO-Projekt, TUBAF)	D4 (= MB10, CARLA)
MgO-Typ	Fa. L&V, F4-200 Charge 105733A (pH 7: 220 ± 20 s, pH 8,6: 240 ± 20 s)		Fa. L&V, F4-200 Charge 105760B (pH 7: 270 ± 20 s, pH 8,6: 320 ± 20 s)	Fa. L&V, F4-200 Charge 105733A (pH 7: 220 ± 20 s, pH 8,6: 240 ± 20 s)
Zuschläge	Salz (NaCl), Bandbreite mit Größtkorn 4 mm Asse-geprüft, Fa. ESCO	Anhydritmehl, Quarzsand, Mikrosilikat, Fließmittel	Quarzmehl, Fa. Euroquarz	Kies-Zuschlag, Fa. Quickmix
Anmischlösung	Deusa-Lösung, S30			
Anmischen/ Verarbeitung	MPA	Trockenmischung durch KUTEC bereitgestellt MPA	Trockenmischung durch TUBAF bereitgestellt MPA	

Nach der Durchführung dieser Versuche wurden die Zellen aufgetrennt und aus den gewonnenen Sorelbetonproben zylindrische Bohrkern (d = 40 mm) mit unterschiedlicher Länge (je

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 79 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

4

nach Bohrgewinn) unter Luftspülung erbohrt. Nach Lieferung der Proben an das IfG wurden aus dem Rohmaterial geeignete Prüfkörper hergestellt und diese sowohl bezüglich ihres Bestandes an Sorelphasen als auch bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Die Ermittlung des Phasenbestandes führte das Institut für Anorganische Chemie (IfAC) der TU Bergakademie in Freiberg durch, während die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften durch das Institut für Gebirgsmechanik GmbH in Leipzig erfolgte.

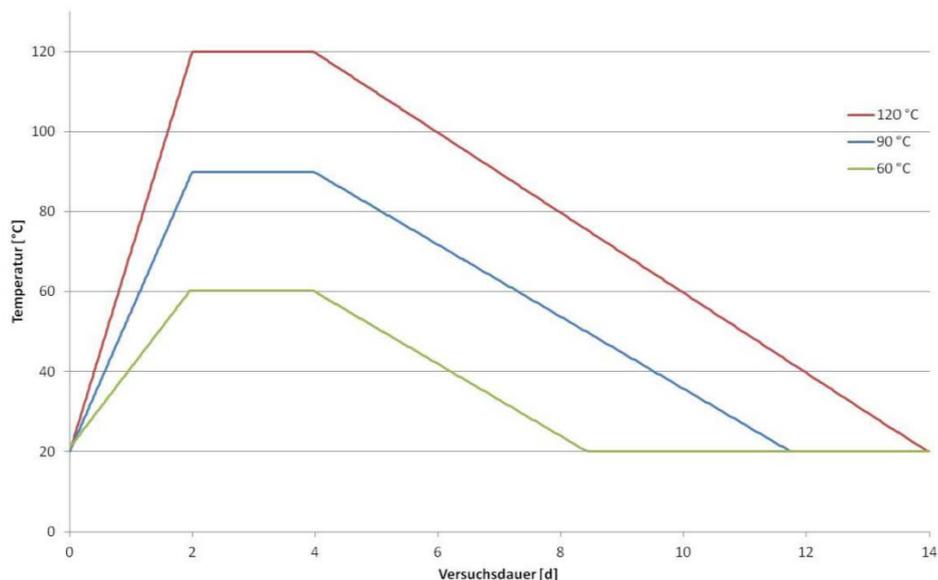


Abb. 1-1. Die von der MPA realisierten 3 unterschiedlichen Temperatur-Zeitregime.

## 2 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM / UNTERSUCHUNGSMETHODIK

### 2.1 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm des IfG zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften umfasste die Durchführung von folgenden Leistungen (bezogen auf jeweils eine Probencharge):

- Herstellung von jeweils 2 zylindrischen Prüfkörpern ( $l = 80 \text{ mm}$ ,  $d = 40 \text{ mm}$ ) mit Ablängen und Feinschleifen der Endflächen der von der MPA bereitgestellten Probekörper,
- Dichtebestimmung und Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten  $V_p$ ,  $V_s$  sowie Bestimmung der dynamischen elastischen Kenngrößen, fotografische Dokumentation der Probekörper vor und nach Versuchsdurchführung,
- Untersuchung Prüfkörper 1
  - Isostatischer Kompaktionsversuch (schnelle Belastung:  $\dot{p} = 0,1 \text{ MPa/s}$ ) mit 3 zwischengeschalteten axialen und/oder lateralen Zwischenentlastungen bei

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 80 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

5

- $p = 5, 10$  und  $15$  MPa → Untersuchung des Kompaktionsverhaltens („schnelle“ Belastung)
- Triaxialer Mehrstufendruckversuch (MSV) bei  $\sigma_3 = 2, 4, 6$  und  $10$  MPa in Kompression mit konstanter Axialverformungsrate ( $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5}$  1/s) zur Bestimmung der Bruchspannung in den verschiedenen Manteldruckstufen → Ableitung der Festigkeitskurve mit den MOHR-COULOMB-Parametern,
  - Untersuchung Prüfkörper 2
    - Isostatischer Kompaktionsversuch (langsame Belastung:  $\dot{p} = 0,005$  MPa/s) mit 3 zwischengeschalteten axialen und/oder lateralen Zwischenentlastungen bei  $p = 5, 10$  und  $15$  MPa → Untersuchung des Kompaktionsverhaltens („langsame“ Belastung)
    - Triaxialer Druckversuch bei  $\sigma_3 = 2$  MPa in Kompression mit konstanter Axialverformungsrate ( $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5}$  1/s) bis ca. 80% der für diese Manteldruckstufe im vorhergehenden Mehrstufenversuch bestimmten Bruchfestigkeit
    - Wechsel in Relaxationsversuch (Verformung wird konstant gehalten:  $\dot{\epsilon} = 0$ ; Dauer 2 Tage) – Aufnahme der zeitabhängigen Spannungsrelaxation
    - Fortsetzung des triaxialen Druckversuchs zur Bestimmung der Bruchfestigkeit mit Verformung bis in das Restfestigkeitsniveau → Überprüfung der Ergebnisse des Mehrstufenversuchs,
  - Berichterstellung (Kurzdarstellung Versuchsmethodik und -ergebnisse)

Tab. 2-1. Versuchsmatrix

A1-T20	MGO-Beton ERAM A1-20 QD10	B2-T20	514B2-20QD13
	A1-T20 QD27		MGO-Beton ERAM B2-20 QD12
	MgO ERAM 514A1_20QD18		B2-T20 QD25
A1-T60	A1-2-60 QD28	B2-T60	B2-T20 QD26
	x		B2-2-60 QD23
A1-T90	MGO-Beton ERAM A1-90 QD14	B2-T90	B2-2-60 QD24
	MgO ERAM 514A1_90QD15		MGO-Beton ERAM B2-90 QD16
A1-T120	MGO-Beton ERAM 514A1-120QD9	B2-T90(2)	MgO ERAM 514B2_90QD17
	x		MGO-Beton 526B2-90QD5
		B2-T120	MgO ERAM 526B2-90QD6
			MGO-Beton 526B2-120QD7
			MgO ERAM 526B2-120QD8
			MgO ERAM 514B2_120QD11
C3-T20	MGO-Beton ERAM C3-20 QD1	D4-T20	MGO-Beton ERAM D4-20 QD6
	MgO ERAM 514C3_20QD2		MGO-Beton ERAM 514D4-20QD5
C3-T90(2)	C3-T90 QD30	D4-T20-2	MGO-Beton ERAM D4-20QD19
	C3-T90 QD29		MgO ERAM 514D4-20QD20
C3-T90	C3-T90 QD29	D4-T60	x
	C3-T90 QD30		x
C3-T120	MGO-Beton ERAM C3-120 QD3	D4-T90-1	D4-1-90 QD 21
	MgO ERAM 514C3_120QD4		D4-1-90 QD 22
	MGO-Beton 526C3-120QD11	D4-T120	MGO-Beton ERAM D4-120 QD7
	MgO ERAM 526C3-120QD12		MgO ERAM 514D4_120QD8

x : Probenchargen, bei denen entweder aufgrund zu kleiner Bohrkerne nur ein Probenzylinder hergestellt werden konnte, bzw. deren Untersuchung zugunsten anderer Vergleichsuntersuchungen zurückgestellt wurde.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 81 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011 Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen 6

Die ursprüngliche Versuchsmatrix umfasste die Untersuchung von 32 Proben, ausgehend von 4 Sorelbetonchargen als Serie mit vier Temperaturstufen (RT, 60°C, 90°C und 120°C). Letztlich wurden 39 Proben untersucht (Tab. 2-1), weil während des Bearbeitungsfortschritts z.T. innerhalb einer Serie erhebliche Streuungen der Versuchsergebnisse auftraten, die durch Doppeluntersuchungen überprüft werden mussten.

Die Untersuchungen wurden im Zeitraum Mitte 2012 bis Mitte 2013 durchgeführt. Der vorliegende Laborbericht fasst alle Ergebnisse zusammen.

### 2.2 Versuchstechnik zur Gewinnung der Materialparameter

#### 2.2.1 Prüfkörpervorbereitung / Gesteinsphysikalische Probencharakterisierung

Dreiaxiale Druckversuche werden an geraden kreiszylindrischen Probekörpern durchgeführt. Hierfür wurden die angelieferten Bohrkerns zunächst mittels einer konventionellen Hartgesteinssäge (Fa. CLIPPER) grob auf Länge gebracht. Da die erbohrten Mantelflächen der Probekörper ausreichend glatt und frei von Unregelmäßigkeiten waren, wurden sie anschließend nur materialabhängig entweder in einer Drehbank (A1, C3) oder einer Gesteinsschleifmaschine (B2, D4) an den Endflächen geplant. Die Endflächen der Probekörper waren danach eben und rechtwinklig zur Prüfkörperachse, wobei die Maßhaltigkeit  $\pm 0,02$  bis  $\pm 0,05$  mm betrug.

Unmittelbar vor Versuchsbeginn erfolgte die Vermessung der Prüfkörper. Die Höhe sowie der Durchmesser der Prüfkörper werden mit einer digitalen Schublehre auf  $\pm 0,02$  mm gemessen. Die Masse der Prüfkörper wird mit einem Fehler von  $\pm 0,2$  g bestimmt. Davon ausgehend wird die Dichte  $\rho$  der zylindrischen Prüfkörper berechnet. Die daraus resultierende Dichte  $\rho$  weist einen Fehler von ca.  $0,002$  g/cm<sup>3</sup> auf.

Die Messung der Ultraschall-Laufzeiten der P- und S-Wellen nach der Durchschallungsmethode dient der Bewertung der vorhandenen Probenintegrität bzgl. Auflockerung sowie der Bestimmung der dynamischen elastischen Konstanten.

Im IfG Leipzig wird für die Laufzeitmessung der Ultraschallgeschwindigkeit das Gerät USN 58L (GE Measurement & Control) in Verbindung mit den paarweise eingesetzten Krautkrämer p-Wellengebern und -empfängern B 0,5 y (Senkrechtprüfköpfe: Frequenz 0,5 MHz) eingesetzt. Die Ankopplung der Prüfkörper erfolgt für die Scherwellengeber mit einer dünnen Schicht Bienenhonig, der nach der Messung entfernt wird. Die Laufzeitanzeige erfolgt mit einer scheinbaren Genauigkeit von  $0,01$   $\mu$ s. Wegen der Ankopplungsschwierigkeiten an die Prüfkörper beträgt die Genauigkeit der Laufzeitmessung ca.  $0,1$   $\mu$ s und damit die Genauigkeit der Geschwindigkeit ca.  $10$  m/s. Aus den P- und S-Wellengeschwindigkeiten  $v_p$  und  $v_s$  sowie der Dichte werden die „dynamisch bestimmten“ elastischen Konstanten berechnet (GEBRANDE, H., 1982).

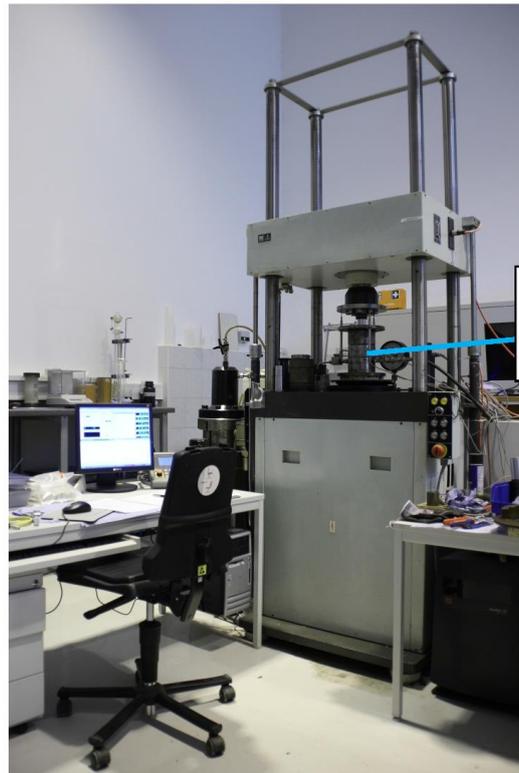
## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 82 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

7



Triaxialzelle mit drei  
Verformungsmess-  
gebern

Abb. 2-1. Servohydraulisches Prüfsystem SHM 250.

### 2.2.2 Prüfsystem SHM 250

Für die Durchführung von dreiaxialen Druckversuchen an kleinen Prüfkörpern ( $l = 80 \text{ mm}$ ,  $d = 40 \text{ mm}$ ) wird im IfG Leipzig das servohydraulische Prüfsystem SHM 250 (mit  $F_{\max} = 250 \text{ kN}$  - Hersteller: WPM LEIPZIG) eingesetzt. Mittels einer triaxialen Druckzelle können routinemäßig triaxiale Festigkeitsuntersuchungen nach dem KARMAN-Prinzip ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ) durchgeführt werden (vgl. Abb. 2-1). Die Axialbelastung bzw. -verformung und der Manteldruck werden jeweils über eine Servohydraulik unabhängig voneinander geregelt.

Der gewünschte Manteldruck ( $p_{c-\max} = 32 \text{ MPa}$ ) wird durch einen servo-hydraulisch betriebenen Druckübersetzer erzeugt. Die Manteldruckmessung erfolgt mit Druckaufnehmern der Genauigkeitsklasse 0.1. Die Axialverformung des Prüfkörpers wird als Verschiebung des Druckstempels, der die Axialbelastung vermittelt, außerhalb der Druckzelle, d.h. nicht am Prüfkörper, als Mittelwert von drei induktiven Wegaufnehmern, die im Winkel von  $120^\circ$  zueinander angeordnet sind, gemessen.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 83 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011 Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen 8

Die Kraftmessung erfolgt mit einer Kraftmessdose ebenfalls außerhalb der Druckzelle. Bei der Spannungsberechnung wird nach der Empfehlung Nr. 2 und Nr. 16 der DGEG (DGEG, 1979 und DGGT, 1994) bei Triaxialversuchen die Querschnittsänderung infolge der Prüfkörperstauchung berücksichtigt.

### 3 ERGEBNISSE / DISKUSSION

#### 3.1 Probencharakterisierung

Die unterschiedlichen Sorelbetonchargen unterscheiden sich als Folge ihrer unterschiedlichen Rezepturen mit verschiedenen Zuschlagstoffen (z.B. mittelkörniges Steinsalz, Schiefermehl, Kieszuschlag) bereits makroskopisch, wie aus Abb. 3-1 deutlich wird. Insbesondere der MgO-Beton mit seinem grobkörnigen Kieszuschlag hebt sich deutlich von den anderen Proben ab.

Die an den Laborproben gemessenen Dichten und Geschwindigkeitswerte sowie die daraus abgeleiteten elastischen Kennwerte sind als Einzelkennwerte in Tab. 3-1 zusammengefasst. Die Geschwindigkeiten elastischer Wellen können bereits unter Normalbedingungen (d. h. unabhängig von den physikalischen Einflussfaktoren Druck und Temperatur) sehr stark variieren. Sie hängen sowohl von der mineralogisch/chemischen Zusammensetzung des Matrixgefüges (einschließlich möglicher Textur- und Anisotropieeffekte der gesteinsbildenden Minerale) als auch vom Volumenanteil, der Größe und Orientierung von Poren und Rissen sowie der Art der Porenfüllung ab, was integral über die Dichte beschrieben werden kann.



Abb. 3-1. Prüfkörper der zu untersuchenden Sorelbetonchargen.

# Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 84 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011 Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen 9

Tab. 3-1. Probenliste / petrophysikal. Charakterisierung: Chargen A1 und B2

IfG - Labor.-Nr.	A1-T20		A1-T60		A1-T90		A1-T120		B2-T20				B2-T60		B2-T90		B2-T90(2)		B2-T120			
	MGO-Beton ERAM A1-20 QD10	A1-720 QDZ7	MGO ERAM 514A1_20QD18	A1-260 QD26	x	MGO-Beton ERAM A1-90 QD14	MGO ERAM 514A1_90QD15	MGO-Beton ERAM 514A1-120QD9	x	514B2-20QD13	MGO-Beton ERAM B2-20 QD12	B2-720 QD26	B2-720 QD26	B2-260 QD23	B2-260 QD24	MGO-Beton ERAM B2-90 QD16	MGO ERAM 514B2_90QD17	MGO-Beton 526B2-90QD5	MGO ERAM 526B2-90QD6	MGO-Beton 526B2-120QD7	MGO ERAM 526B2-120QD8	MGO ERAM 514B2_120QD11
Höhe h (mm) =	80,45	80,08	80,67	80,21	x	80,16	73,27	80,33	x	80,01	80,25	80,43	80,20	80,35	80,31	80,16	80,38	80,08	80,19	80,18	80,31	80,37
Durchmesser (mm) =	39,75	39,82	39,75	39,86	x	39,71	39,70	39,74	x	39,75	39,77	39,81	39,65	39,63	39,79	39,76	39,87	40,29	40,29	40,23	40,23	39,67
Masse M (g) =	194,2	190,2	193,1	216,3	x	192,8	175,0	193,9	x	208,0	210,6	216,3	211,3	214,1	214,9	216,7	216,1	216,3	219,5	220,1	209,7	209,7
Dichte ρ (g/cm³) =	1,946	1,907	1,929	2,161	x	1,942	1,830	1,946	x	2,095	2,112	2,160	2,134	2,159	2,152	2,160	2,159	2,117	2,116	2,153	2,156	2,112
V <sub>p-axial</sub> (km/s) =	4,41	4,28	4,38	4,63	x	4,39	4,33	4,04	x	4,35	4,44	4,64	4,66	4,58	4,55	4,23	4,74	3,07	3,06	4,13	4,13	3,18
V <sub>p-radial ac</sub> (km/s) =	4,24	4,31	4,17	4,75	x	4,35	4,14	4,26	x	4,40	4,46	4,75	4,71	4,68	4,71	4,30	4,35	2,81	2,81	4,26	4,27	3,19
V <sub>p-radial bd</sub> (km/s) =	4,17	4,30	4,40	4,83	x	4,42	4,37	4,32	x	4,40	4,50	4,82	4,82	4,68	4,73	4,12	4,22	2,76	2,83	4,29	4,21	3,19
V <sub>s-axial</sub> (km/s) =	2,45	2,44	2,43	2,73	x	2,46	2,40	2,36	x	2,45	2,59	2,74	2,75	2,69	2,67	2,40	2,41	1,76	1,67	2,40	2,38	1,78
<b>Elast. Konstanten (GPa) -</b> axiale Richtung -																						
E <sub>p</sub> =	29,89	28,65	29,10	39,81	x	29,82	28,50	26,85	x	31,94	35,17	40,00	39,85	38,60	37,98	31,47	33,12	16,47	15,23	30,84	30,58	17,00
K <sub>a</sub> =	22,14	19,67	21,86	24,69	x	21,69	21,27	17,30	x	22,76	22,74	24,82	24,70	24,59	24,02	21,93	31,78	11,26	11,87	20,30	20,46	12,39
G <sub>a</sub> =	11,72	11,39	11,38	16,16	x	11,73	11,16	10,81	x	12,61	14,16	16,24	16,19	15,58	15,36	12,48	12,49	6,56	5,92	12,37	12,22	6,69
ν <sub>a</sub> =	0,275	0,257	0,278	0,231	x	0,271	0,277	0,241	x	0,266	0,242	0,231	0,231	0,238	0,236	0,261	0,326	0,256	0,286	0,247	0,251	0,271

Fortsetzung Tab. 4-1. Probenliste / petrophysikal. Charakterisierung: Chargen C3 und D4

IfG - Labor.-Nr.	C3-T20		C3-T90(2)		C3-T90		C3-T120			D4-T20		D4-T20-2		D4-T60		D4-T90-1		D4-T120		
	MGO-Beton ERAM C3-20 QD1	MGO ERAM 514C3_20QD2	C3-T90 QD20	C3-T90 QD29	C3-T90 QD29	C3-T90 QD20	MGO-Beton ERAM C3-120 QD3	MGO ERAM 514C3_120QD4	MGO-Beton 526C3-120QD11	MGO ERAM 526C3-120QD12	MGO-Beton ERAM D4-20 QD6	MGO-Beton ERAM 514D4-20QD5	MGO-Beton ERAM D4-20QD19	MGO ERAM 514D4-20QD20	x	x	D4-190 QD 21	D4-190 QD 22	MGO-Beton ERAM D4-120 QD7	MGO ERAM 514D4_120QD8
Höhe h (mm) =	80,62	72,33	80,19	80,09	71,91	76,73	80,96	80,98	80,23	80,65	81,06	71,75	80,25	79,89	x	x	72,78	74,00	80,72	80,37
Durchmesser (mm) =	40,37	40,39	40,30	40,29	40,25	40,18	40,23	40,23	40,14	40,20	40,22	40,26	40,11	40,01	x	x	39,88	39,82	40,20	40,09
Masse M (g) =	195,9	173,3	194,7	196,9	174,8	182,6	196,0	196,6	193,4	195,8	232,6	204,6	222,4	222,4	x	x	202,6	197,9	233,2	225,7
Dichte ρ (g/cm³) =	1,896	1,870	1,904	1,928	1,911	1,876	1,904	1,909	1,905	1,913	2,259	2,240	2,193	2,214	x	x	2,229	2,147	2,277	2,225
V <sub>p-axial</sub> (km/s) =	3,64	3,64	4,14	4,30	4,28	4,63	4,31	4,29	3,81	3,83	4,57	4,51	4,64	4,62	x	x	4,84	4,69	4,46	4,51
V <sub>p-radial ac</sub> (km/s) =	3,76	3,66	4,19	4,25	4,41	4,34	4,38	4,27	3,72	3,81	4,73	4,82	4,84	4,83	x	x	4,90	4,55	4,96	5,07
V <sub>p-radial bd</sub> (km/s) =	3,74	3,65	4,14	4,35	4,27	4,27	4,36	4,35	3,74	3,91	4,85	4,78	4,74	4,73	x	x	4,92	4,72	4,91	4,90
V <sub>s-axial</sub> (km/s) =	2,08	2,09	2,38	2,50	2,47	2,36	2,51	2,43	2,15	2,18	2,91	2,86	2,65	2,63	x	x	2,94	2,82	2,89	2,87
<b>Elast. Konstanten (GPa) -</b> axiale Richtung -																				
E <sub>p</sub> =	20,68	20,43	26,96	29,97	29,17	27,73	29,86	28,40	22,34	22,94	44,39	42,72	38,66	38,69	x	x	46,48	41,59	43,32	42,55
K <sub>a</sub> =	14,22	13,91	18,34	19,59	19,50	26,27	19,33	20,11	15,88	15,94	21,69	21,14	26,84	26,86	x	x	26,44	24,41	19,96	20,78
G <sub>a</sub> =	8,22	8,14	10,74	12,03	11,66	10,47	12,01	11,23	8,83	9,10	19,15	18,37	15,34	15,35	x	x	19,25	17,10	19,03	18,36
ν <sub>a</sub> =	0,258	0,255	0,255	0,245	0,251	0,324	0,243	0,265	0,265	0,260	0,159	0,163	0,260	0,260	x	x	0,207	0,216	0,138	0,159

In der Konsequenz der unterschiedlichen Ansätze, aber auch als Folge der Temperaturbehandlung sind die lithologischen Unterschiede zwischen den 4 Sorelbetonchargen in der Geschwindigkeits-Dichtevariation, wie in Abb. 3-2 dargestellt, deutlich ersichtlich:

- Die Probenwerte für den A1 weisen nur eine geringe Streuung (1,9 bis 1,95 g/cm<sup>3</sup>) hinsichtlich der Dichte auf und auch V<sub>p</sub> variiert nur gering zwischen 4,0 und 4,4 km/s. Die Reproduzierbarkeit der A1-Ansätze bzgl. der Dichte und Ultraschallgeschwindigkeit

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 85 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

10

keiten (= dynamische elastische Eigenschaften) wird auch unter Einbeziehung des Variationsfeldes der im ESA-Vorhaben<sup>1</sup> gemessenen Daten bestätigt.

- Der B2 besitzt als Folge der Silikatzuschläge und von Anhydritmehl eine deutlich höhere Dichte, die in einem kleinen Dichteintervall zwischen 2,09 bis 2,17 g/cm<sup>3</sup> variiert. Auffällig ist die extrem große Variabilität für V<sub>p</sub> zwischen 3,0 und 4,7 km/s, die weniger aus stofflichen Unterschieden als vielmehr aus den elastischen Matrixeigenschaften resultiert. Als Trend zeichnet sich ab, dass Proben nach Maximaltemperaturen T ≥ 90°C eher niedrigere Geschwindigkeiten aufweisen.
- Die C3-Proben liegen mit einer Variation zwischen 1,85 bis 1,95 g/cm<sup>3</sup> in einem zum A1 ähnlichen Dichteintervall, während die p-Wellengeschwindigkeiten zwischen 3,6 und 4,6 km/s deutlich stärker variieren, wobei aber kein signifikanter Bezug zu den unterschiedlichen Temperaturen erkennbar ist.
- Die D4 Proben weisen mit Dichten zwischen 2,14 bis 2,38 g/cm<sup>3</sup> die relativ größte Dichteveriation auf, was aus den unterschiedlichen Eigenschaften der Silikatzuschläge sowie möglichen Luftporen im Baustoff resultiert. Die V<sub>p</sub>-Werte variieren demgegenüber vergleichsweise gering und schwanken um 4,6±0,2 km/s.

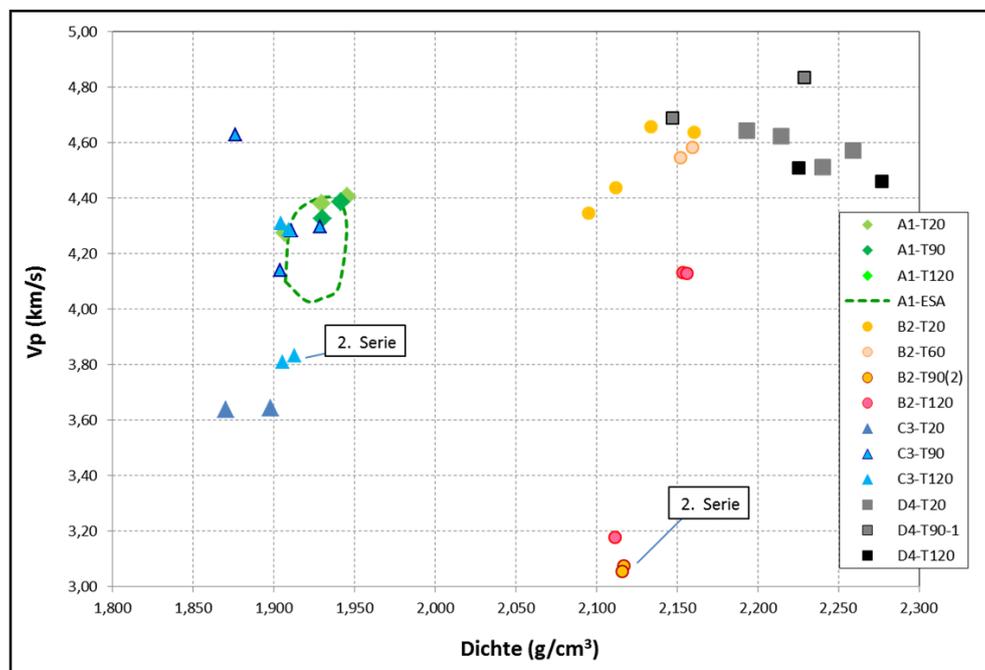


Abb. 3-2. Diagramm zur Abhängigkeit der P-Wellengeschwindigkeiten von der Gesteinsdichte.

<sup>1</sup> ESA: Akronym für die Arbeitsgruppe „Entwurfplanung der Schachtverschlussysteme für die Schachtanlage Asse“

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 86 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### 3.2 Triaxiale isotrope Druckversuche

Nach den Erfahrungen des IfG lassen sich u.a. Sorelbaustoffe relativ zuverlässig anhand ihres belastungsabhängigen Kompaktionsverhaltens charakterisieren. Die Bestimmung des Verformungsmoduls erfolgt in Anlehnung an die DIN 1048, wobei hier zwei verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten (schnell:  $\dot{p} = 0,1$  MPa/s bzw. langsam:  $\dot{p} = 0,005$  MPa/s) in einem Belastungsregime mit Manteldrücken zwischen 0,2 MPa und 15 MPa mit mehreren Hysteresen realisiert wurden<sup>2</sup>. Die Proben wurden in drei Belastungszyklen (mit Zwischenentlastung bei jeweils 5,0 MPa, 10,0 MPa und 15,0 MPa) schrittweise belastet und die Spannungs-Volumenverformungskurve aufgezeichnet. Da bei kleinen Proben keine exakte Querdehnungs- bzw. integrale Volumenmessung möglich ist, wird hier vereinfachend die Volumenverformung über die axiale Dehnungsmessung abgeschätzt:  $\Delta V = 3 \cdot \varepsilon_{Ax}$ .

Als prinzipielles Spannungs-Verformungsverhalten kompaktieren alle Sorelbaustoffe mit zunehmender hydrostatischer Einspannung, jedoch unterschiedlich stark, und die Volumenverformungen wachsen an. 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 setzen sich aus elastischen und plastischen, d.h. bleibenden Verformungen zusammen, wie durch die verbleibende Verformung bei der schrittweisen Entlastung belegt wird.

Zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Verformungsverhalten von Sorelbaustoffen, sind in Abb. 3-3b die entsprechenden Kompaktionskurven bei „schneller“ und „langsamer“ Belastung für eine Einzelprobe (A1\_T90) dargestellt. Prinzipiell ist der Ausbauwiderstand eines Sorelbetons gleicher Rezeptur bei hoher Belastungsgeschwindigkeit (z. B. bei dem hier realisierten kurzzeitigen Belastungsversuch im Labor) größer als bei geringer 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, d.h. der isostatische Kompaktionsversuch erlaubt eine Prognose der in situ zu erwartenden Eigenschaften.

<sup>2</sup> Es ist anzumerken, dass aus den so bestimmten Belastungskurven, keine unmittelbar in situ relevanten Verformungsmoduln, wie sie als Eingangsgrößen für numerische Modellberechnungen benötigt werden, bestimmt werden können, da bei den vergleichsweise schnellen Versuchen häufig zu hohe Steifigkeiten ermittelt werden. Deshalb führt das IfG in anderen Vorhaben (z.B. Charakterisierung der Eigenschaften von A1 für Strömungsbarrieren in der Asse) zusätzlich noch isostatische Kriechversuche durch, auf deren Basis ein sogenannter Ersatz-Kompaktionsmodul abgeleitet wird.

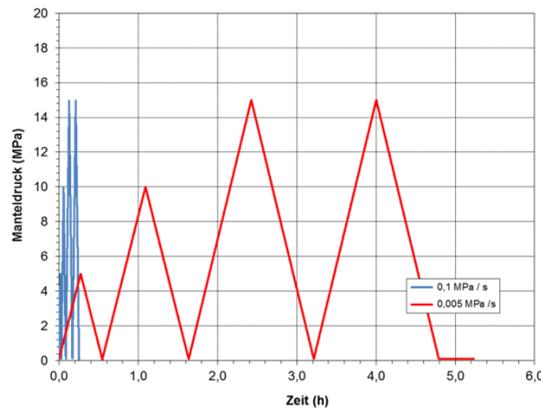
## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 87 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

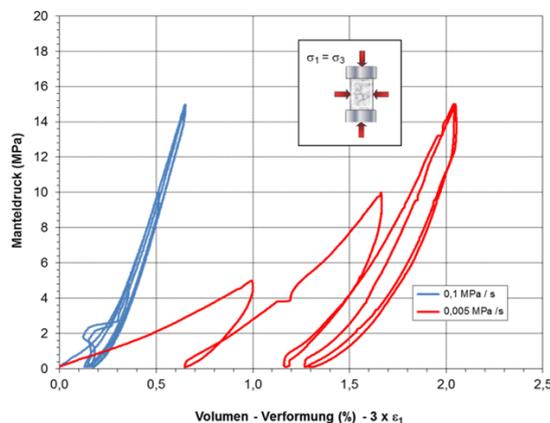
B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

12



a)



b)

**Abb. 3-3. Isostatische Kompaktionsversuche. a) Belastungszeitregime; b) Volumen-Druckbeziehung bei schneller und langsamer Kompaktion: Probe A1\_T90.**

In Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung und den thermo-mechanischen Randbedingungen (sowie den ablaufenden geochemischen Phasen- und Gefügeumwandlungen) 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. Als Konsequenz ist der Versatzwiderstand des Materials gering und der Spannungsaufbau in der Barriere infolge des aufkriechenden Gebirges würde nur langsam voranschreiten. Grundsätzlich wirkt sich ein schneller Spannungsaufbau in der Barriere günstig auf die Funktionsfähigkeit 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, d.h. die Baustoffe müssen möglichst steif sein.

Ausgehend von diesen Vorbemerkungen sind in Abb. 3-4 und Abb. 3-5 die Ergebnisse der Kompaktionsversuche bei „schneller“ und „langsamer“ Belastung für die 4 Sorelbetonchar-

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 88 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

13

gen dargestellt, wobei grundsätzlich die über ein Variationsfeld dargestellten Ergebnisse von mehr als 10 Proben des ESA-Vorhabens für einen reproduzierbar hochwertigen A1 als Referenz dienen:

- A1: Grundsätzlich zeigen die A1-Proben, wie nahezu allen anderen Proben auch, dass das Material sich mit schneller Belastung steifer verhält, d.h. die Volumenkompaktion geringer ist. Gleichzeitig ist der Anteil der plastischen Deformation nach der 3. Belastungsschleife mit ca. 0,25% Vol.-% nur gering. Unter langsamer Belastung werden die Belastungsschleifen gedehnt und die Anteile der plastischen Verformung nehmen bis auf 1,2 Vol.-% zu. Unabhängig davon weisen die Kompaktionskurven unter gleichen Randbedingungen nur eine geringe Variabilität auf, d.h. der Temperatureffekt ist relativ gering, was auch durch die ESA-Ergebnisse belegt wird.

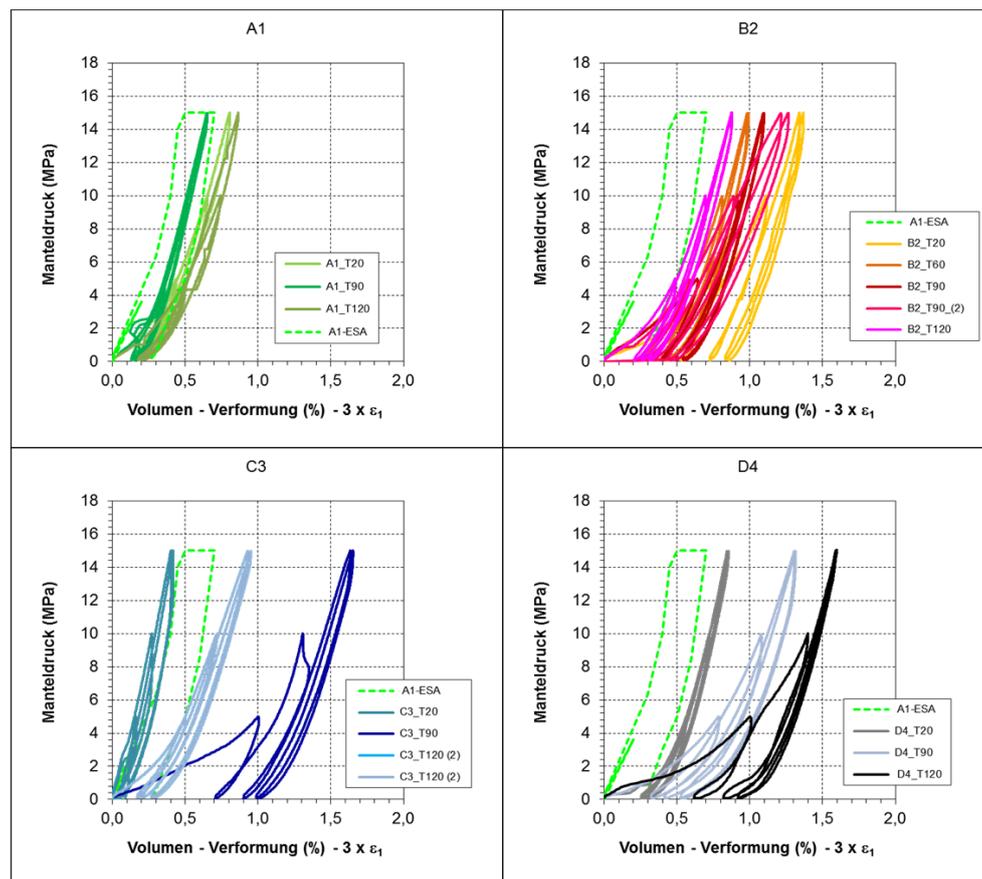


Abb. 3-4. Spannungs-Verformungskurven bei „schneller“ Belastung ( $\dot{p} = 0,1$  MPa/s für die 4 Sorelbetonchargen für Proben mit jeweils unterschiedlicher Temperaturvorgeschichte.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 89 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

14

- B2: Der DBM2 weist gegenüber dem A1, sowohl bei langsamer und schneller Belastung, im Mittel eine deutlich höhere Kompressibilität auf (bis zu 0,8 Vol.-% bei schneller Belastung bzw. 2,2 Vol.-% bei langsamer Belastung), d.h. das Material ist deutlich „weicher“, wobei vereinzelt Ausreißer, z.B. bei der Probe B2\_T120 (2) – langsame Belastung – auftreten.
- C3: Die C3-Proben verhalten sich prinzipiell ähnlich, wie die B2-Proben.
- D4: Der MgO-Beton ist in seinem Belastungsverhalten insofern uneinheitlich, dass bei „schneller“ Belastung eine gegenüber dem A1 deutlich höhere Kompaktion beobachtet wird, während bei „langsamer“ Belastung die Kompaktion sehr gering ist. Diese Diskrepanz wird in erster Linie auf vorhandene Luftporen zurückgeführt, die sich bevorzugt plastisch schließen, aber unabhängig von der Belastungsrate in ihrer Wirkung begrenzt sind.

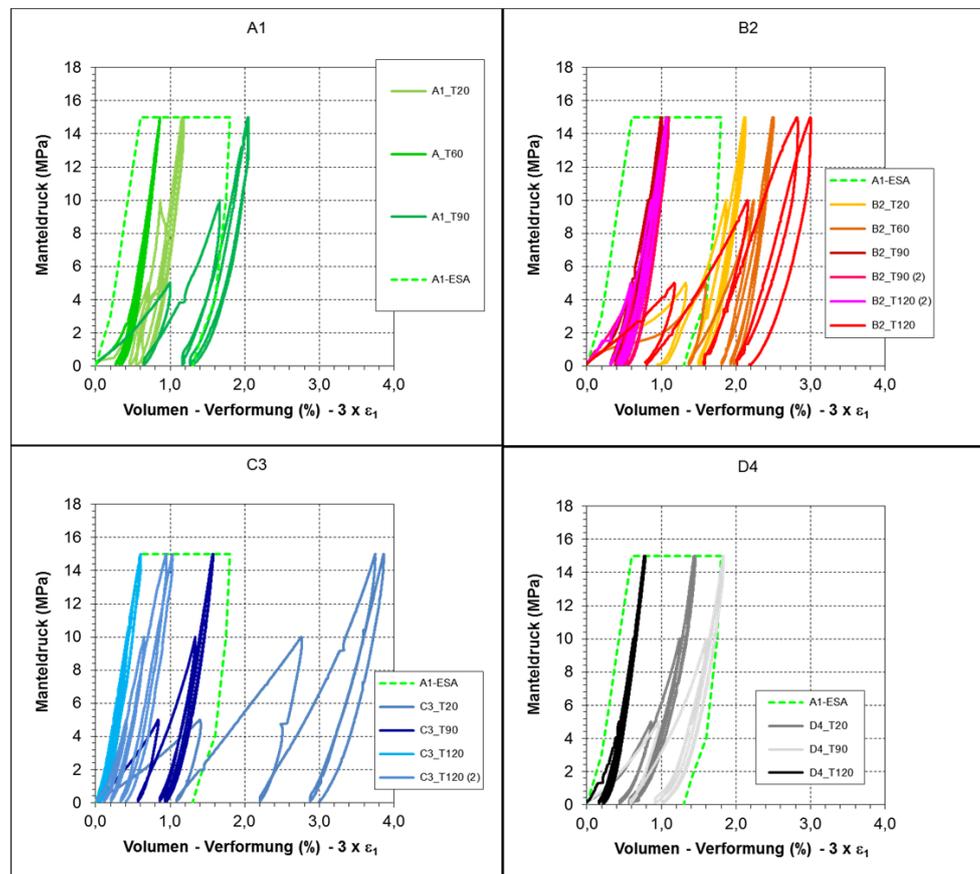


Abb. 3-5. Spannungs-Verformungskurven bei „langsamer“ Belastung ( $\dot{p} = 0,005 \text{ MPa/s}$  für die 4 Sorelbetonchargen für Proben mit jeweils unterschiedlicher Temperaturvorgeschichte.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 90 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

15

### 3.3 Triaxiales Festigkeitsverhalten

Die mechanische Festigkeit ist ein Grundparameter zur Charakterisierung von Baustoffeigenschaften. Wenn die Gesteinsfestigkeit in Abhängigkeit von der wirkenden kleinsten Hauptspannung bekannt ist, kann das Materialverhalten von Sorelbeton in numerischen Berechnungen näherungsweise mit dem elastisch/plastischen Stoffansatz nach MOHR-COULOMB nachgebildet werden.

Der zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften klassische triaxiale Kompressionsversuch bei einem definiertem Manteldruck wird am IfG (abweichend von den Qualitätsprüfungen in der Baustoffindustrie) bevorzugt verformungsgeregelt (z.B. mit einer konstanten Verformungsrate von  $9\%/h = 2,5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ ) durchgeführt, wobei mit der Verformung automatisch die dafür notwendige Axialkraft servo-hydraulisch nachgeregelt wird. Im Ergebnis erhält man eine Spannungsdehnungskurve, die abhängig vom Manteldruck zunächst eine zunehmende Verfestigung bis zum Probenbruch und danach den Übergang in ein Restfestigkeitsniveau zeigt. Gleichzeitig kann die Dilatanz bzw. die Volumendehnung mit gemessen werden, die dann eine Parametrisierung geeigneter Stoffansätze mit Beschreibung von Schädigungsprozessen ermöglicht.

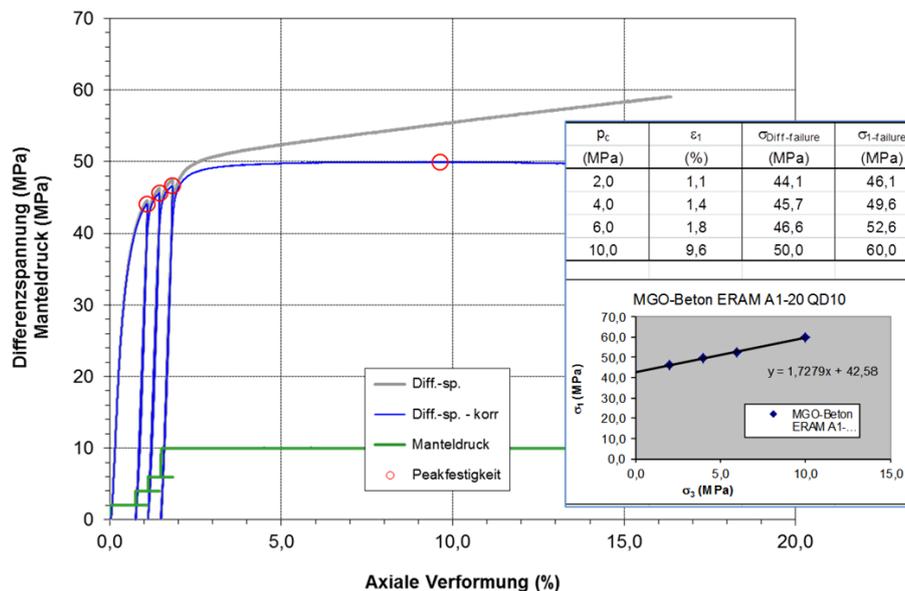


Abb. 3-6. Festigkeits- und Verformungsverhalten von A1\_T20 im Mehrstufenversuch: gr. Diagramm: Spannungs-Verformungskurve  $\sigma_{Diff}$  vs.  $\epsilon_{Ax}$ . Inset re.: Geomechanische Kennwerte aus den vier Belastungsstufen sowie das daraus abgeleitete MOHR-COULOMB-Diagramm.

Allerdings erfordert diese Versuchsführung eine ausreichende Zahl vergleichbarer und großer Proben (z.B.  $l = 100\text{ mm}$ ,  $d = 200\text{ mm}$ ). Deshalb wurde aufgrund des begrenzten Probenmaterials und der offensichtlichen Streuung der Materialeigenschaften der 4 Sorelbetone entschieden, jeweils nur triaxiale Druckversuche in Mehrstufenversuchstechnik ohne Dilatanzmessung durchzuführen, wie exemplarisch in Abb. 3-6 dargestellt.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 91 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

16

Dabei wird die Probe analog zu den konventionellen Einstufen-Druckversuchen bei konstantem Manteldruck axial unter Vorgabe einer definierten Verformungsrate verformt. Bei Erreichen charakteristischer Verschiebungen oder Spannungszustände nahe dem Bruchpunkt (Annäherung an ein Maximum) wird die Belastung der Probe durch schnelles Absenken der erreichten Axialspannung rapide abgebrochen, so dass im Idealfall keine signifikante Schädigung des Prüfkörpers eingetreten ist. Danach wird die nächste Belastungsstufe durch gleichzeitige Erhöhung der Axialkraft und des Manteldrucks angefahren und der Belastungsversuch analog zu vorher wiederholt.

Bei den Mehrstufentests wurden jeweils vier Stufen bei  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ ,  $4 \text{ MPa}$ ,  $6 \text{ MPa}$  und  $10 \text{ MPa}$  realisiert. Im Fall des MgO-Betons D4 erwies sich das Material als so fest und spröde, dass in Einzelfällen nur ein realer Spitzenfestigkeitswert bestimmt werden konnte (vgl. Darstellung der MOHR-COULOMB-Geraden in Abb. 3-7).

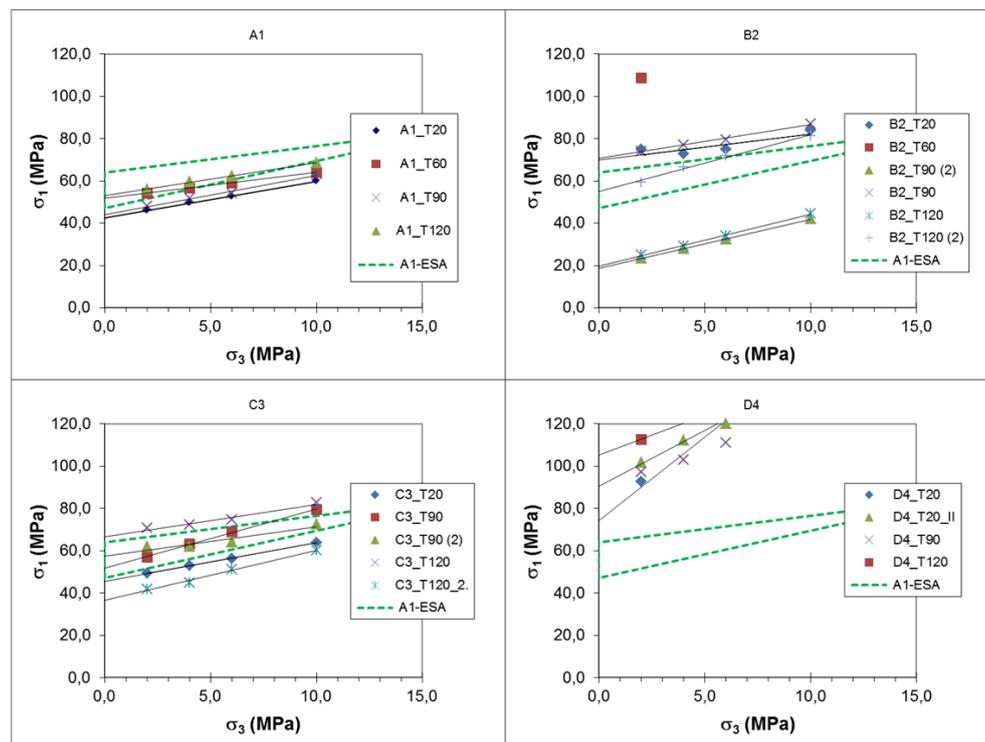


Abb. 3-7. MOHR-COULOMB-Diagramme der 4 untersuchten Sorelbetonchargen ( $\sigma_1$  vs. kleinste Hauptspannung  $\sigma_{\min}$  bzw. Manteldruck  $\sigma_3$ ). Als Referenz ist das Variationsfeld der Festigkeitsuntersuchungen an A1 aus dem ESA-Vorhaben dargestellt.

Die aus den Versuchen erhaltenen Materialparameter (z.B. Spitzenfestigkeit je Druckstufe) sind in Tab. 3-2 zusammengefasst bzw. in Abb. 3-7 als klassisches MOHR-COULOMB-Diagramm der vorliegenden Spitzenfestigkeitsmesswerte ( $\sigma_{\text{Peak}}$ ) dargestellt. Ausgehend von der allgemeinen Gradengleichung gilt:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + a \cdot \sigma_3$$

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 92 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

17

mit  $\sigma_1$  = triaxiale Druckfestigkeit für einen definierten Manteldruck  $\sigma_3$ ; a = Steigungsparameter

Damit lassen sich die MOHR-COULOMB-Parameter Kohäsion  $\phi$  und Reibungswinkel C (sowie die ein-axiale Druckfestigkeit) ableiten. Die experimentell bestimmten Festigkeitswerte sowie die entsprechenden Materialparameter sind in Tab. 3-2 für jede Charge probenspezifisch zusammengestellt.

**Tab. 3-2. Probenspezifische Festigkeitswerte aus Mehrstufen-Druckversuchen mit den daraus abgeleiteten Mohr-COULOMB-Parametern: Charge A1.**

	$p_c$	$\epsilon_1$	$\sigma_{Diff-fail}$	$\sigma_{1-fail}$		
	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)		
A1_T20	2,0	1,1	44,1	46,1		
	4,0	1,4	45,7	49,6		
	6,0	1,8	46,6	52,6		
	10,0	9,6	50,0	60,0		
	2,0	0,9	47,4	49,4		
	$\phi (^{\circ}) = 15,5$		$C (MPa) = 16,2$			
A1_T60	2,0	1,4	52,3	54,3		
	4,0	1,8	52,7	56,7		
	6,0	2,2	53,0	59,0		
	10,0	3,1	54,0	64,0		
	$\phi (^{\circ}) = 5,6$		$C (MPa) = 23,5$			
A1_T90	2,0	1,5	46,2	48,2		
	4,0	2,2	47,7	51,7		
	6,0	2,6	48,2	54,2		
	10,0	15,0	53,2	63,2		
	2,0	2,4	43,8	45,8		
	$\phi (^{\circ}) = 17,5$		$C (MPa) = 16,2$			
A1_T120	2,0	1,6	54,1	56,1		
	4,0	2,1	55,6	59,6		
	6,0	2,4	56,2	62,2		
	10,0	4,7	58,7	68,7		
	$\phi (^{\circ}) = 12,7$		$C (MPa) = 21,2$			

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 93 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

18

### Fortsetzung Tab. 3-2: Charge B2

B2_T20	2,0	0,9	72,9	74,9	
	4,0	1,1	69,0	73,0	
	6,0	1,3	68,8	74,8	
	10,0	1,5	73,9	83,9	
	2,0	1,0	61,5	63,5	
	$\phi (^{\circ}) = 6,2$		C (MPa) = 31,4		
B2_T60	2,0	0,8	106,7	108,7	
	Sprödbbruchversagen				
	$\phi (^{\circ}) = -$		C (MPa) = -		
B2_T90 (2)	2,0	1,1	21,3	23,3	
	4,0	2,0	24,1	28,1	
	6,0	2,9	26,4	32,4	
	10,0	6,6	32,0	42,0	
	2,0	2,1	19,5	21,5	
	$\phi (^{\circ}) = 23,6$		C (MPa) = 6,1		
B2_T90	2,0	0,9	72,0	74,0	
	4,0	1,1	73,1	77,1	
	6,0	1,3	73,5	79,5	
	10,0	1,6	76,9	86,9	
	2,0	1,3	64,3	66,3	
	$\phi (^{\circ}) = 13,3$		C (MPa) = 27,9		
B2_T120	2,0	1,0	23,0	25,1	
	4,0	1,4	25,1	29,1	
	6,0	2,3	27,9	33,9	
	10,0	6,3	34,5	44,5	
			0,0		
	$\phi (^{\circ}) = 24,9$		C (MPa) = 6,3		
B2_T120 (2)	2,0	0,8	57,2	59,2	
	4,0	1,0	62,6	66,6	
	6,0	1,3	65,9	71,9	
	10,0	1,9	71,3	81,3	
	2,0	1,3	55,3	57,3	
	$\phi (^{\circ}) = 27,3$		C (MPa) = 16,7		

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

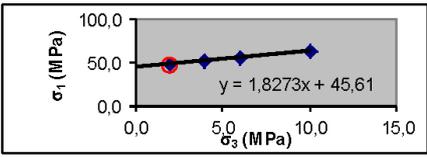
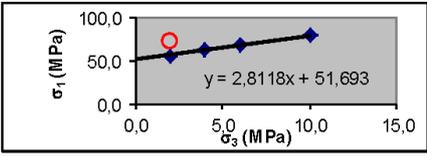
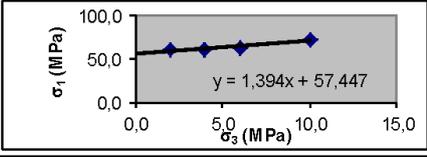
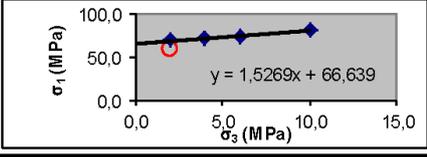
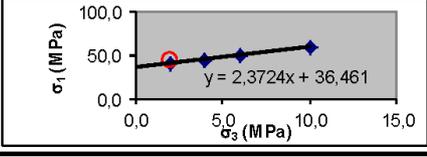
Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 94 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

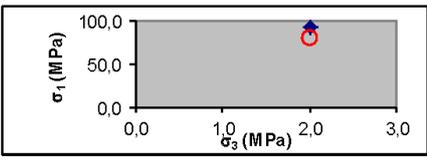
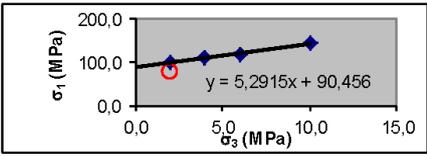
Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

19

### Fortsetzung Tab. 3-2: Charge C3

C3_T20	2,0	1,5	47,3	49,3	
	4,0	2,0	49,0	53,0	
	6,0	2,6	50,4	56,4	
	10,0	3,8	53,9	63,9	
	2,0	2,1	44,6	46,5	
	$\phi (^{\circ}) = 17,0$		C (MPa) = 16,9		
C3_T90	2,0	0,9	55,0	57,0	
	4,0	1,3	59,1	63,1	
	6,0	1,6	63,0	69,0	
	10,0	2,3	69,5	79,6	
	2,0	1,2	70,6	72,6	
	$\phi (^{\circ}) = 28,4$		C (MPa) = 15,4		
C3_T90 (2)	2,0	1,2	59,8	61,8	
	4,0	1,6	57,9	61,9	
	6,0	1,9	58,2	64,2	
	10,0	2,4	62,4	72,4	
	$\phi (^{\circ}) = 9,5$		C (MPa) = 24,3		
C3_T120	2,0	1,1	68,8	70,8	
	4,0	1,3	68,2	72,2	
	6,0	1,5	68,5	74,5	
	10,0	1,8	72,7	82,7	
	2,0	1,8	57,7	59,7	
	$\phi (^{\circ}) = 12,0$		C (MPa) = 27,0		
C3_T120_2	2,0	1,3	39,9	41,9	
	4,0	1,7	40,8	44,8	
	6,0	2,4	45,1	51,1	
	10,0	4,0	50,3	60,3	
	2,0	2,3	43,9	45,9	
	$\phi (^{\circ}) = 24,0$		C (MPa) = 11,8		

### Fortsetzung Tab. 3-2: Charge D4

D4_T20	2,0	0,6	90,8	92,8	
	Sprödbbruchversagen				
	2,0	0,7	78,4	80,4	
	$\phi (^{\circ}) = -$		C (MPa) = -		
D4_T20_II	2,0	0,7	99,8	101,8	
	4,0	0,8	108,2	112,2	
	6,0	0,9	113,9	119,9	
	10,0	1,0	134,4	144,4	
	2,0	0,7	78,4	80,4	
	$\phi (^{\circ}) = 43,0$		C (MPa) = 19,7		

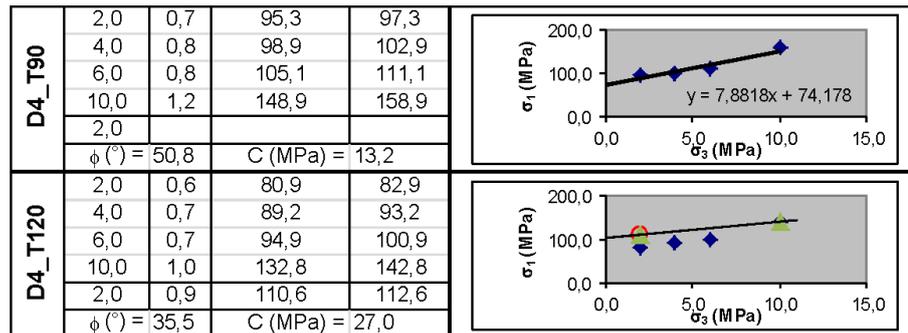
## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 95 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

20



Die Kenndaten zeigen deutliche Unterschiede, wobei ausgehend von Abb. 3-7 die folgenden Aussagen getroffen werden können:

- Die Materialcharge A1 zeigt, unabhängig von der Temperaturgeschichte der Einzelproben, ein sehr einheitliches Festigkeitsverhalten, d.h. die MOHR-COULOMB-Geraden liegen in einer sehr engen Bandbreite, knapp unterhalb des im ESA-Vorhaben beobachteten Variationsfeldes. Die Unterschiede spiegeln eine akzeptable und mutmaßlich unvermeidliche Materialvariabilität eines qualitativ hochwertigen Baustoffs wieder.
- Die B2 Proben zeigen ein sehr uneinheitliches Materialverhalten, das von extrem sprödem Verhalten mit (abgeschätzten) einaxialen Festigkeiten in der Größenordnung  $\sigma_1 > 100 \text{ MPa}$  bis zu vergleichsweise geringen Festigkeiten in der Größenordnung von  $\sigma_1 \approx 20 \text{ MPa}$  reicht. Die geringsten Festigkeiten treten bei Proben auf, die Temperaturen  $T_{\max} \geq 90^{\circ}\text{C}$  erlebt haben (mit Ausnahme der Probe B2\_T120 (2) mit „normal“ hohen Festigkeiten). B2-Proben mit maximalen Abbinde Temperaturen  $T_{\max} \leq 60^{\circ}\text{C}$  besitzen Festigkeiten, die gering über dem Variationsfeld des A1-ESA liegen.
- Die C3-Festigkeitswerte sind im Mittel vergleichbar zum A1, wobei die einaxialen Festigkeiten  $\sigma_1$  zwischen  $>35 \text{ MPa}$  und  $< 65 \text{ MPa}$  liegen und damit eine erheblich höhere Streuung aufweisen. Ein Temperaturtrend ist nicht erkennbar.
- Die D4-Festigkeitswerte sind erwartungsgemäß (aufgrund der Befunde aus dem Vorhaben CARLA, z.B. Salzer et al., 2010) extrem hoch, d.h.  $\sigma_1 > 75 \text{ MPa}$ . Gleichzeitig verhält sich das Material extrem spröde und gleichzeitig sind die Reibungswinkel als Folge des Kieszuschlages gegenüber den anderen Chargen (z.B. mit Schiefermehlzuschlägen) deutlich größer.

### 3.4 Relaxationsverhalten

Unter Relaxation versteht man den zeitabhängigen Spannungsabbau bei konstanter Dehnung. Die in einem Bauwerk (z.B. Strecken- oder Schachtverschlussbauwerk) unter äußerer Belastung erreichte Spannung wird im Laufe der Zeit durch Strukturänderungen innerhalb eines Baustoffs abgebaut. Damit stellen Relaxationsprozesse einen Sonderfall des Krie-

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 96 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

21

chens unter veränderlicher Spannung dar. Das „klassische“ Kriechen unter deviatorischer Belastung selbst setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

- aus der bleibenden inelastischen Verformung  $\varepsilon_C$  und
- einer elastischen Verformung  $\varepsilon_E$ .

Wird die Definition des Kriechens weiter gefasst, so können alle nichtdynamischen zeitabhängigen Verformungen unter Last als Kriechen bezeichnet werden. Der Relaxationsversuch kann in diesem Sinn als Kriechversuch mit abnehmender Effektivspannung betrachtet werden.

Zur vergleichenden Charakterisierung der Relaxationseigenschaften wurden die Proben nach der hydrostatischen Belastung („langsame Belastung, S. Kap. 3.2) einheitlich unter Vorgabe einer definierten Verformungsrate von  $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  bis in den Bereich von 80% der im Mehrstufenversuch für  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$  bestimmten maximalen Festigkeit belastet und im Anschluss eine Relaxationsphase ausgesetzt, d.h. die Verformung wurde gestoppt und dabei die zeitabhängige Entlastung beobachtet. Dies ist exemplarisch in Abb. 3-8a für die Probe A1\_T90 dargestellt. Im Prinzip zeigen, wie aus Abb. 3-9 hervorgeht, alle Sorelbeton-Chargen ein ähnliches Verhalten.

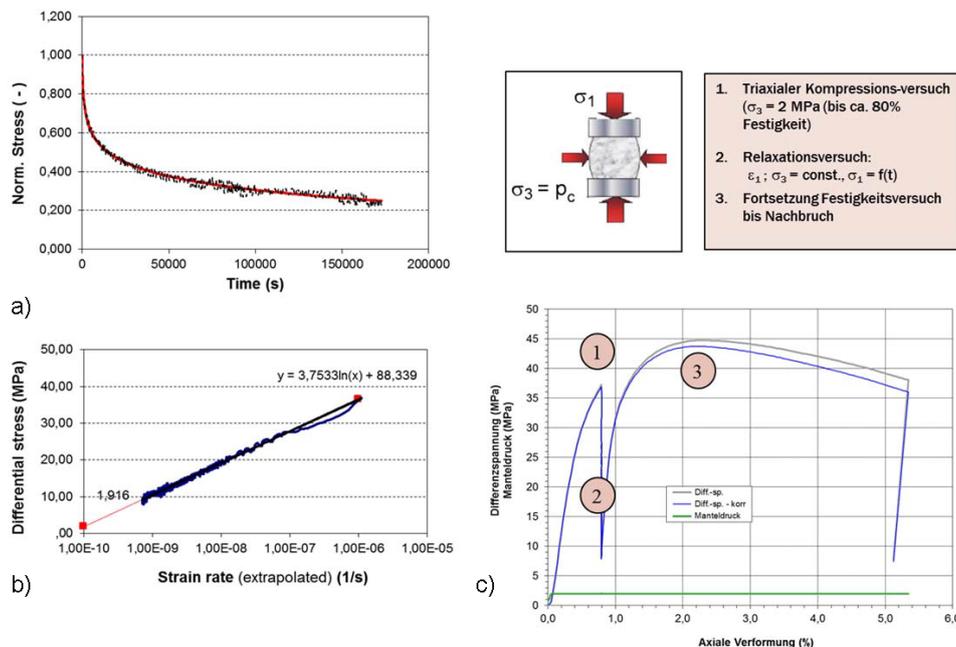


Abb. 3-8. Tragwiderstand von Sorelbeton A1\_T90 in Abhängigkeit von der Verformungsrate: Auswertung Relaxationsphase bei  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_{\text{Diff}} = 37,0 \text{ MPa}$ ;  $\varepsilon_1 = 0,87\%$ . a) Normierter Spannungsabfall vs. Zeit. b) Tragwiderstand als  $\sigma_{\text{Diff}}$  vs. Verformungsrate. c) 3stufiger triaxialer Verformungsversuch bei  $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$  mit zwischengeschalteter Relaxationsphase.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 97 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

22

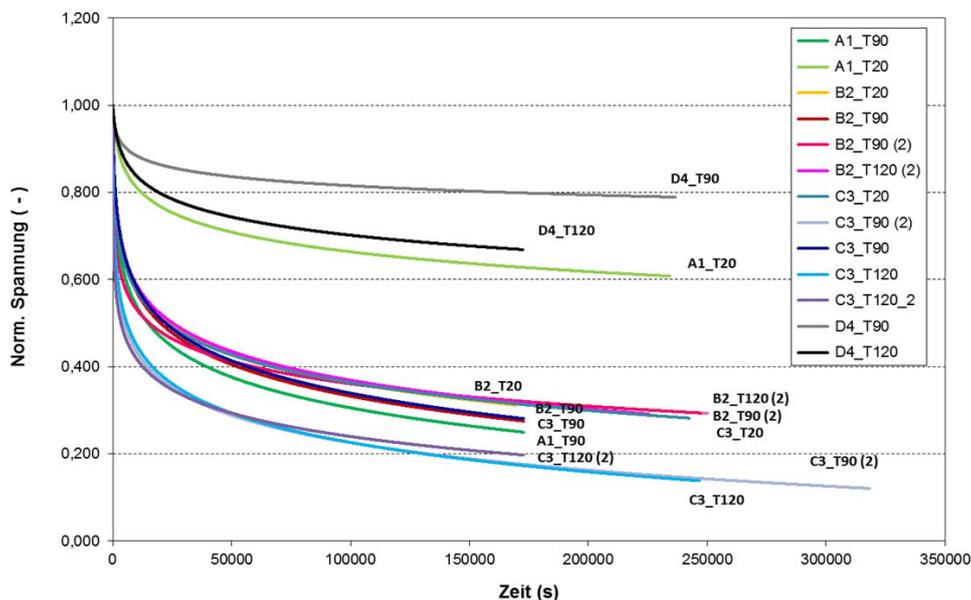
Mit Erreichen der Relaxationsphase gilt:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_c \quad (3-1)$$

und somit ist

$$\dot{\varepsilon} = 0 \rightarrow \frac{\dot{\sigma}}{E} = -\dot{\varepsilon}_c \quad (3-2)$$

Die Darstellung von zeitliche Abnahme der Spannung  $\sigma_t$  als Funktion von  $\dot{\varepsilon}_c$  in logarithmischer Form zeigt für die Relaxationsphasen einen annähernd linearen Zusammenhang für Kriechverformungsraten in der Form  $\sigma_t = \sigma_0 + a \cdot \ln \dot{\varepsilon}_c$  in dem durch die Relaxationsversuche belegten Bereich von  $\dot{\varepsilon}_c = 10^{-9} - 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$  (vgl. Abb. 3-8b). Durch Extrapolation, z.B. auf  $1 \cdot 10^{-10} \text{ 1/s}$ , kann danach auf Lastaufnahmevermögen bei geringen Verformungsraten geschlossen werden.



**Abb. 3-9. Vergleich des Relaxationsverhaltens der verschiedenen Sorelbetonvariationen: Normierte Axialspannung vs. Zeit.**

Zur Bewertung des von der Verformungsrate abhängigen Beanspruchungszustandes sind in Abb. 3-10 die entsprechend transformierten Messkurven dargestellt.

Als Vorbemerkung hinsichtlich der Relevanz der Untersuchungen zur Beschreibung des in situ-Verhaltens ist zu berücksichtigen, dass die für die vergleichende Charakterisierung ermittelten Relaxationskurven keine Quantifizierung des Kriechverhaltens der verschiedenen Sorelbeton-Varianten in einem Absperrbauwerk gestatten, insbesondere deshalb, weil die als

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 98 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

23

Referenz gewählte Belastung von ca. 80% des Bruchzustandes nicht den in situ-Bedingungen entspricht. Dazu müsste mit einer Serie von Kriechversuchen mit hydrostatischen und deviatorischen Belastungen die Stoffparameter ermittelt werden, die gesamten relevanten Spannungsraum das Kriechen beschreiben.

Beim Vergleich der normierten Relaxationskurven wird deutlich, dass ausgehend vom Spannungswert bei einer Verformungsrate  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  nur der D4 (unabhängig von der Temperatur) sowie der A1 bei Raumtemperatur ein signifikantes Resttragfähigkeitsniveau von ca. 60% aufweisen, sogar bei den hohen Differenzspannungen, die für die vergleichende Charakterisierung zu Beginn der Relaxationsphase gewählt wurden.

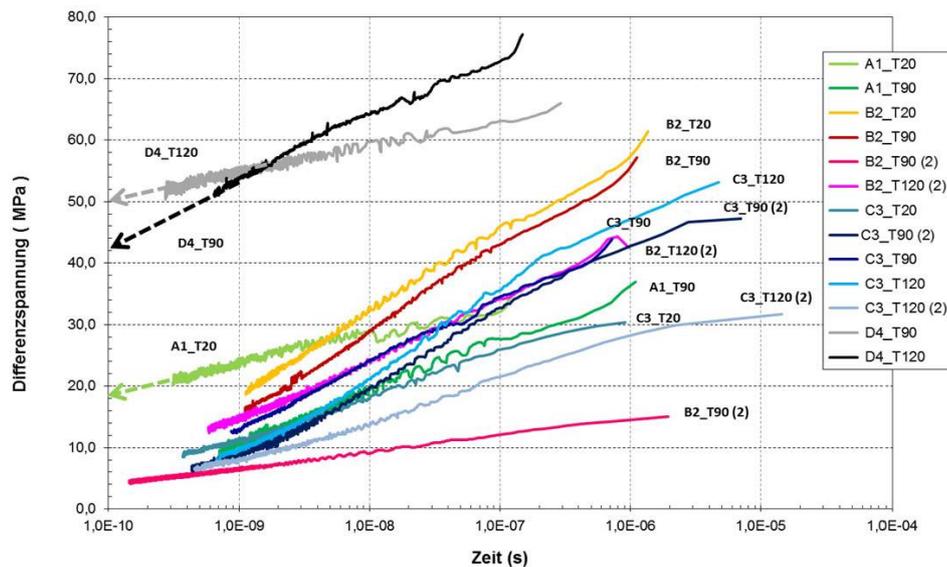


Abb. 3-10. Vergleich des Relaxationsverhaltens der verschiedenen Sorelbetonvariationen: Differenzspannung vs. Verformungsrate.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen von vergleichenden Untersuchungen von Sorelbetonvarianten zur Charakterisierung des Quellverhaltens bei unterschiedlichen Abbinde Temperaturen wurden die geomechanischen Eigenschaften von 4 verschiedenen Sorelbetonchargen untersucht:

- A1 – Asse-Baustoff (Salzzuschlag mit 4 mm Größtkorn)
- B2 – DBM2 (Fa. K-UTEC)
- C3 – R3a-Mörtelvariante MgO-Projekt, TUBAF
- D4 – MB10 (MgO-Binder mit Kieszuschlag, CARLA)

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 99 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

24

Die Proben wurden von der MPA bereitgestellt, die vorher die „Quelldruckversuche“ bei drei unterschiedlichen Temperatur-Zeitregimen durchgeführt hatten. Für jede Charge wurden Ofenheizversuche bei Maximaltemperaturen von  $T_{max} = 60^{\circ}C$ ,  $90^{\circ}C$  und  $120^{\circ}C$  und Raumtemperatur durchgeführt. Letztlich liegen damit 4 Materialchargen mit vier verschiedenen Temperaturen vor, die nach Beendigung der Quelldruckversuche zeitnah untersucht wurden.

Von jeder Charge wurden 2 zylindrische Prüfkörper ( $l = 80$  mm,  $d = 40$  mm) hergestellt. Die Reststücke wurden zur geochemischen Untersuchung an das IfAC gegeben. Das Untersuchungsprogramm umfasste:

- **Standardcharakterisierung:** Dichtebestimmung/ Durchschallung
- **TC 1 – Kurzzeitversuch**
  - 1.1. Hydrostatische Kompaktion ( $\sigma_{Hyd}$  bis 15 MPa): Belastungsrate 0,1 MPa/s
  - 1.2. Triaxialer Mehrstufenversuch: Eps-rate =  $2,5 \cdot 10^{-6}$  1/s ( $\sigma_3 = 2, 4, 6, 10$  MPa)
- **TC 2 – Langzeitversuch**
  - 2.1 Hydrostatische Kompaktion ( $\sigma_{Hyd}$  bis 15 MPa) : Belastungsrate 0,005 MPa/s
  - 2.2 Triaxialer Kompressionsversuch bei  $\sigma_3 = 2$  MPa (bis ca. 80% Festigkeit aus dem Mehrstufenversuch)
  - 2.3 Relaxationsversuch (2 Tage)
  - 2.4 Fortsetzung triaxialer Kompressionsversuch bei  $\sigma_3 = 2$  MPa (bis Nachbruchbereich)

Bzgl. der Ergebnisse sind folgende Vorbemerkungen zu berücksichtigen:

- Es handelt sich insgesamt jeweils nur um vergleichende Indexversuche zur Charakterisierung der verschiedenen Sorelbetonvarianten, die zwar tendenziell das Materialverhalten, insbesondere unter Berücksichtigung der Temperaturvorgeschichte, widerspiegeln, aber nicht statistisch abgesichert sind. Während der Untersuchungen wurden z.T. nicht mit den Erwartungen konsistente Ergebnisse, z.B. bzgl. der Festigkeitsentwicklung mit steigender Temperatur, beobachtet. Deshalb wurden abweichend von der geplanten Untersuchungsmatrix vereinzelt Wiederholungsmessungen durchgeführt, so dass insgesamt mehr Versuche als ursprünglich geplant, realisiert wurden.
- Die für die vergleichende Charakterisierung durchgeführten Relaxationsuntersuchungen gestatten keine Quantifizierung des Kriechverhaltens der verschiedenen Sorelbeton-Varianten in einem Absperrbauwerk, insbesondere deshalb, weil die als Referenz gewählte Belastung von ca. 80% des Bruchzustandes nicht den in situ-Bedingungen entspricht. Hierfür wären Kriechuntersuchungen notwendig.
- Eine konsistente Bewertung der hier für die verschiedenen Sorelbetonbaustoffe erzielten Indexergebnisse ist nur unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus dem ESA-Vorhaben möglich. Dort liegen als Referenz belastbare Vergleichsergebnisse von

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 100 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

25

Probenserien vor, u.a. mit einer definierten Temperaturvorgeschichte, die gleichzeitig an qualitätsgesicherten A1-Proben durchgeführt wurden. Weiterhin handelt es sich beim A1 um einen großmaßstäblich bewährten Baustoff, der auch bzgl. seiner in situ-Eigenschaften im Feldmaßstab als geeignet identifiziert worden ist.

Auf Basis der hier durchgeführten Arbeiten können die Ergebnisse bzgl. der geomechanischen Eigenschaften für die verschiedenen Materialchargen folgendermaßen zusammengefasst werden:

### A1 – Sorelbeton Asse:

- ☺ Gute Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften (z.B. geringe Variation von Dichte bzw.  $V_p$ )
- ☺ Kein signifikanter Einfluss der Abbinde­temperatur erkennbar
- ☺ Mittlere Steifigkeit
- ☺ Bei RT nur geringe Relaxation (geringes Kriechen), bei erhöhten Temperaturen  $T_{max} \geq 90^\circ\text{C}$  stärkere Relaxation
- ☺ Mittlere Festigkeit

### B2 – DBM2:

- ☺ Moderate Dichtevariabilität, aber bzgl. der Ultraschallgeschwindigkeiten deutliche Materialvariabilität
- ☺ Signifikanter Temperatureinfluss nachweisbar:
  - $T_{Abb}: 20^\circ\text{C} / 90^\circ\text{C}$ 
    - ☺ Mittlere Kompaktierfähigkeit und Steifigkeit
    - ☺ Im Mittel Festigkeiten geringfügig größer als beim A1, z.T. bei Einzelproben auch sehr hoch
  - $T_{Abb}: 120^\circ\text{C}$ 
    - ☺ Ungünstiges Kompaktionsverhalten (Kriechen)
    - ☺ Zumeist geringe Festigkeit, tw. auch sehr hoch (Ursachen für die Unterschiede noch nicht eindeutig geklärt)
- ☺ Starke Relaxation

### C3 – R3a-Mörtelvariante MgO-Projekt, TUBAF:

- ☺ Mittlere Dichtevariabilität (größer als beim A1), aber deutliche Streuung von  $V_p$
- ☺ Temperatureinfluss nachweisbar, aber nicht systematisch
  - $T_{Abb}: 20^\circ\text{C}$ 
    - ☺ Hohe Festigkeit / geringe Kompressibilität
  - $T_{Abb}: 90 / 120^\circ\text{C}$ 
    - ☺ z.T. ungünstiges Kompaktionsverhalten (Kriechen)
    - ☺ z.T. uneinheitliche Festigkeiten, z.B. bei  $120^\circ\text{C}$
- ☺ Starke Relaxation
- ➔ Datenbasis nicht ausreichend

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 101 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

B IfG 31/2011

Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbeton-Rezepturen

26

**D4 – MB10-Beton CARLA**

- ☉ Gute Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften (abgesehen vom Zuschlagefekt)
- ☉ Kein signifikanter Einfluss der Abbinde temperatur erkennbar
- ☉ Prinzipiell hohe Steifigkeit; bei schneller Belastung dennoch relativ hohe Kompaktion, mutmaßlich infolge von Luftporen
- ☉ Sehr geringe Relaxation (geringes Kriechen)
- ☉ Sehr hohe Festigkeiten (abgeschätzte uniaxiale Festigkeiten zwischen 70 und 110 MPa)

**LITERATUR**

- DGEG (1979): Empfehlung Nr. 2 des AK 19 „Versuchstechnik Fels“ der DGEG (Dreiaxiale Druckversuche).
- DGEG (1987): Empfehlung Nr. 12 des AK 19 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau (Mehrstuferentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen).
- GEBRANDE, E. H. (1982): LANDOLT-BÖRNSTEIN, Neue Serie, Gruppe V, Bd. 1, Physikalische Eigenschaften der Gesteine (Teilband b), Springer-Verlag.
- SALZER, K. u. a. (2010): Abschlussbericht AP3 "Entwicklung eines interdisziplinären Messkonzeptes zum Nachweis der geplanten Eigenschaften der Dammbaumaterialien und des Umgebungsgesteins sowie ihres Verhaltens im Zeitverlauf; Funktionssicherung des Bauwerkes". BMBF-F/E-Vorhaben: "Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV" IfG-Bericht, 12 S.

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Seite: 102 von 115
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

**ANHANG 2 - UNTERSUCHUNGSBERICHT DES INSTITUTES FÜR ANORGANISCHE CHEMIE DER TU BERGAKADEMIE FREIBERG: VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN AN 4 SORELBETONREZEPTUREN ZUM TEMPERATURABHÄNGIGEN QUELLDRUCKVERHALTEN**

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 103 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BERGAKADEMIE FREIBERG  
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

### Vergleichende Untersuchungen an 4 Sorelbaustoff-Rezepturen zum temperaturabhängigen Quelldruckverhalten

Im Auftrag der      ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft  
Geotechnik und Bergbau mbH  
Arnstädter Straße 28  
99096 Erfurt

Bearbeitet von



Bearbeitungszeitraum: 2012/2013

Berichtserstellung: Oktober 2013

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 104 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

Die Untersuchungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, anwendungs- bzw. verarbeitungsfähige Sorelbaustoffrezepturen bezüglich ihrer besagten und z.T. bekannten Quelldruckentwicklung im Anschluss bzw. einhergehend mit der Abbindereaktion zu untersuchen. Im sachlich richtigen Zusammenhang handelt es sich hierbei nicht um ein Quellen, sondern um eine Kristallisationsdruckentwicklung.

Im Ergebnis der Messungen wurde festgestellt, dass zum Zeitpunkt der Versuchsplanung der zeitliche Umfang für die Erfassung möglicher Druckentwicklungen (Aufbau eines dauerhaften Druckes im Anschluss an die primäre Abbindereaktion) innerhalb der gewählten Abbinde-Temperatur-Zeitfenster mit maximal 25 Tagen zu kurz gewählt war, um eine umfassende und vergleichende Bewertung der vier Baustoffrezepturen diesbezüglich vornehmen zu können.

Im Zeitraum dieser planmäßig durchgeführten Untersuchungen konnte anhand aufkommender Messdaten aus anderen, noch laufenden Untersuchungsprogrammen zu den Sorelbaustoffrezepturen A1 (ESA-Projekt) und C3 (MgO-Projekt) sowie im Zusammenhang mit in-situ Daten aus dem B2-Großversuch abgeleitet werden, dass für MgO-Baustoffrezepturen mit Abbinde-temperaturen ab bzw. oberhalb 60°C kein dauerhaft auftretender Kristallisationsdruck nachweisbar ist. Ein durchaus messbarer Druckaufbau aufgrund von Phasenumwandlungen innerhalb des Bindemittelgefüges in Abhängigkeit von der Abbinde-temperatur und -zeit ist im Folgezeitraum aufgrund von Spannungsrelaxation rückläufig. Diese Aussagen sind das Ergebnis aus aktuell bis zu 2-jährigen Datenerfassungszeiten der Druckentwicklung unter isochoren Bedingungen in definierten Abbinde-Temperatur-Zeitfenstern für die Baustoffrezepturen A1 und C3. Eine analoge Situation belegen die in-situ Daten für die Rezeptur B2.

### Inhalt

1. Sorelbaustoffrezepturen A1, B2, C3 und D4 .....	2
2. Phasenbestand der abgebundenen Proben .....	5
Anhang .....	8

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 105 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### 1. Sorelbaustoffrezepturen A1, B2, C3 und D4

Die Grundbestandteile aller Sorelbaustoffrezepturen sind reaktionsfähiges (kaustisches, reaktives) Magnesiumoxid und konzentrierte Magnesiumchloridlösung. Im entsprechenden Verhältnis reagieren beide Komponenten unter Ausbildung basischer Magnesiumchlorid-Hydrate „x-y-z“  $[x \text{ Mg(OH)}_2 \cdot y \text{ MgCl}_2 \cdot z \text{ H}_2\text{O}]$ , welche die Bindemittelphasen des Baustoffs darstellen. In Abhängigkeit vom Verhältnis des MgO zur  $\text{MgCl}_2$ -Lösung mit entsprechender Konzentration bildet sich die 3-1-8 oder 5-1-8 Phase oder ein Gemisch aus beiden Phasen aus. Auch kann noch unumgesetztes MgO nach dem Abbinden enthalten sein, wenn dessen Reaktivität niedrig ist oder der Lösungsanteil zu gering für dessen vollständige Umsetzung eingestellt ist. Zusätzlich können die Rezepturen noch Zuschlagstoffe enthalten.

Für die vergleichswisen Untersuchungen der ausgewählten Sorelbaustoffrezepturen konnte nach Prüfung der jeweils einzusetzenden MgO-Reaktivitäten ein für die Rezeptur des A1 (Asse-Baustoff), B2 (DBM2, Fa. KUTEC) und D4 (MB10 aus Projekt CARLA) identisches MgO verwendet werden. Für C3 (R3a-Mörtelvariante, MgO-Projekt, TUBAF) wird ein weniger reaktives MgO benötigt. Beide MgO-Reaktivitätstypen wurden von der Firma Lehmann & Voss (L&V) bezogen. Die seitens des Händlers (L&V) angegebenen Reaktivitäten in Form des Zitronensäurewertes (= Zeit in s für die Neutralisationsreaktion von MgO und Zitronensäure bis zum Erreichen des pH-Wertes 7 bzw. 8,6) wurden im Rahmen, wie dieser üblicherweise bei der Bestimmung in verschiedenen Laboren erhalten wird, von  $\pm 20$  s reproduziert. Die entsprechenden Daten sind in Tabelle 1 angegeben.

Die A1-Trockenmischung wurde vor Ort von der MPA Braunschweig aus den Einzelkomponenten hergestellt. Die B2-Trockenmischung wurde von der KUTEC (Sondershausen) und die C3- sowie D4-Trockenmischungen von der TUBA Freiberg hergestellt und als solche an die MPA geliefert. Alle vier Trockenmischungen wurden zum jeweiligen Anmischtermin für die anschließenden Messungen der Druckentwicklung in unterschiedlichen Abbinde-Temperatur-Zeitfenstern (Abb. 1 und Tabelle 3) mit einer jeder Rezeptur entsprechenden Menge an  $\text{MgCl}_2$ -Lösung (Deusa, S30) von der MPA angemischt und in Stahlzellen mit DMStreifen versehen gefüllt und verschlossen.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 106 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Die Temperatur-Zeit-Fenster wurden hinsichtlich Maximaltemperatur und Zeitverlauf für Aufheiz-, Abkühlrate in Absprache mit dem BfS, MPA Braunschweig, IfG Leipzig und ERCOSPLAN festgelegt (Projektbesprechung in Salzgitter am 23.02.2012 /1/). Kriterien waren dabei registrierte Abbinde-Maximaltemperaturen von bisher errichteten Bauwerken aus Sorelbaustoff /2/, /3/ und der verfügbare Zeitraum, in welchem die Untersuchungen entsprechend der Vorgehensweise bei der MPA Braunschweig stattfinden bzw. abgeschlossen werden sollten.

Tabelle 1: Zusammensetzungen der Sorelbaustoffrezepturen

MgO-Baustoff		A1 (= Asse-Baustoff)	B2 (= DBM2, Fa. KUTEC)	C3 (= R3a-Mörtelvariante, MgO-Projekt, TUBAF)	D4 (= MB10, CARLA- Projekt, Ortbeton sowie Spritzbeton)
Rezeptur	MgO-Typ	Fa. Lehmann&Voss, F4-200 Charge 105733A (pH 7: 220 ± 20 s, pH 8,6: 240 ± 20 s)		Fa. L&V, F4-200 Charge 105760B (pH 7: 270 ± 20 s, pH 8.6: 320 ± 20 s)	wie A1 und B2
	Zuschläge	Salz (NaCl), Bandbreite mit Größtkorn 4 mm Asse-geprüft, Fa. ESCO	Anhydritmehl, Quarzsand, Mikrosilikat, Fließmittel	Quarzmehl, Fa. Euroquarz	Sand/Kies-Zuschlag, Fa. Quickmix
	Anmisch- lösung	MgCl <sub>2</sub> -Lösung			

Tabelle 2: Komponentenanteile der Sorelbaustoffrezepturen

A1	B2	C3	D4
11.3 % MgO 63.7 % Steinsalz (NaCl) 25.0 % MgCl <sub>2</sub> -Lösung (ca. 400 g MgCl <sub>2</sub> /L, Dichte 1.32 g/cm <sup>3</sup> )	10.5 % MgO 34.3 % Quarzsand (SiO <sub>2</sub> ) 29.5 % Anhydrit (CaSO <sub>4</sub> ) 4.5 % Microsilica (amorphes SiO <sub>2</sub> ) 20,8 % MgCl <sub>2</sub> -Lösung (S-30 Deusa)	18.7 % MgO 37.4 % Quarzmehl (SiO <sub>2</sub> , kristallin) 43.9 % MgCl <sub>2</sub> -Lösung (5 molal)	15.0 % MgO 70.0 % Kies/Sand, 0-8 mm 15.0 % MgCl <sub>2</sub> -Lösung (R-Lösung)

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 107 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Bei einer Deusa-Lösung S-30 handelt es sich um eine nahe am Sättigungspunkt von Bischofit ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) liegende, konzentrierte  $\text{MgCl}_2$ -Lösung, welche noch geringe Anteile an  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  enthalten kann. Die durchschnittliche  $\text{MgCl}_2$ -Konzentration beträgt 375-400 g/L (Spezifikation Magnesiumchloridlösung EES 30 %, www.deusa.de). Mit der angegebenen Dichte von  $1.28 \text{ g/cm}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ) beträgt die molale  $\text{MgCl}_2$ -Konzentration zwischen 4.4 und 5 mol/kg  $\text{H}_2\text{O}$ . Entsprechend der Sorelbaustoffrezeptur-Angaben kann diese Lösung daher zum Anmischen aller 4 Rezepturen eingesetzt werden (eine R-Lösung weist  $\text{MgCl}_2$ -Konzentrationen im Bereich von 4.7 bis 5.1 molal auf).

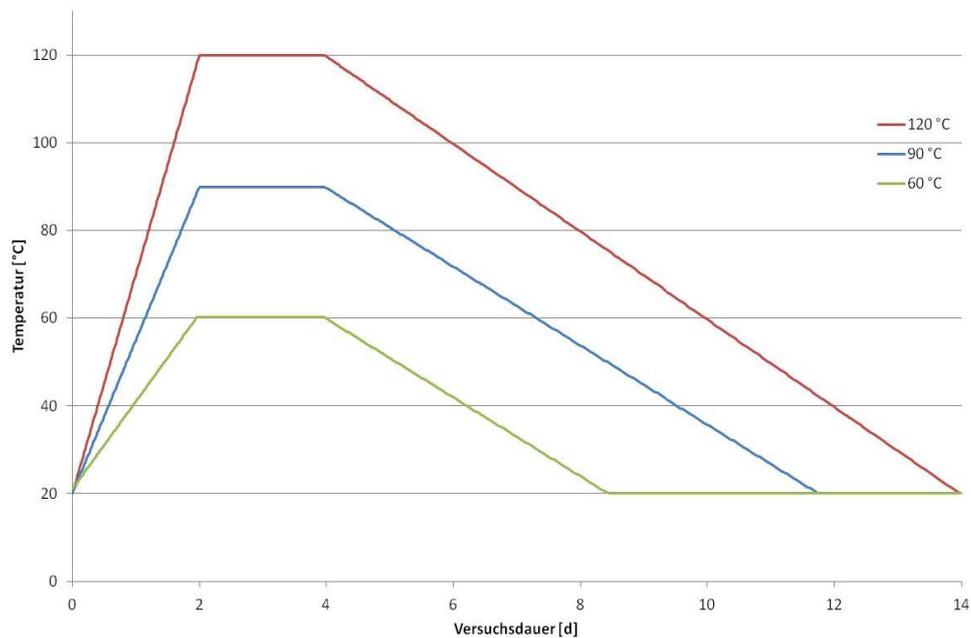


Abbildung 1: Temperatur-Zeit-Fenster (TZF) für die Abbindereaktionen der 4 Sorelbaustoffrezepturen (MPA Braunschweig)

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 108 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Tabelle 3: Rezepturansätze (MPA)

Maximaltemperatur	Rezeptur	Anzahl Probekörper	Anzahl Begleitproben bei 20°C	Ansatztermine
120°C (TZF 120°C)	A1	3 Stück	1 Stück	10.07.2012
	B2	3 Stück	1 Stück	
	C3	3 Stück	1 Stück	07.06.2012
	D4	3 Stück	1 Stück	
90°C (TZF 90°C)	A1	3 Stück	1 Stück	21.08.2012
	B2	3 Stück	1 Stück	
	C3	3 Stück	1 Stück	14.12.2012
	D4	3 Stück	1 Stück	
60°C (TZF 60°C)	A1	3 Stück	1 Stück	18.10.2012
	B2	3 Stück	1 Stück	
	C3	3 Stück	1 Stück	19.11.2012
	D4	3 Stück	1 Stück	

Nach Abschluss der Druckdaten-Registrierung in den entsprechenden Temperatur-Zeit-Fenstern (Abb.1) von maximal 25 Tagen wurde durch die MPA Probematerial aus den Stahlzellen gewonnen und zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften an das IfG (Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig) verschickt. Nach dortigen Messungen wurden entsprechende Probe-Reststücke an das IfAC (Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg) zur qualitativen Phasenanalyse mittel Pulver-Röntgendiffraktometrie weiter verschickt. Das Alter der Proben zum Zeitpunkt der Messungen ist in Tabelle 4 angegeben.

### 2. Phasenbestand der abge bundenen Proben

Zur Ermittlung des Phasenbestandes der abge bundenen Baustoffrezeptur-Proben wurden die kompakt erhaltenen Probestücke unmittelbar vor der Messung pulverisiert. Die Pulverproben wurden auf einem Flachprobeträger mit einem Röntgendiffraktometer D8 Discover der Firma Bruker mit Cu-K<sub>α</sub>-Strahlung (1,5406 Å) in Parallelstrahlgeometrie (Göbelspiegel, 0,6mm Blende) und einem Lineardetektor Vantec-1 mit einem Öffnungswinkel von 1° in einem 2-Theta Messbereich von 5-95° mit einer Schrittweite von 0,017° und einer Zählzeit von 1s vermessen. Die erhaltenen Pulverdiffraktogramme der 16 Proben (4 je Rezeptur) sind im Anhang abgebildet.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 109 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

Tabelle 4: Alter der Proben zum Zeitpunkt der qualitativen Phasenanalyse

	A1	B2	C3	D4
RT	9 Monate	9 Monate	10 Monate	10 Monate
TZF 60°C	6 Monate	6 Monate	5 Monate	5 Monate
TZF 90°C	8 Monate	8 Monate	4 Monate	4 Monate
TZF 120°C	9 Monate	9 Monate	10 Monate	10 Monate

Bei der Pulverisierung der Proben wurde festgestellt, dass die B2- und C3-Proben noch anteilig Porenlösung enthalten. Das ist ein Hinweis darauf, dass die Bindemittelphasenbildung auch nach Monaten der Herstellung noch nicht abgeschlossen ist. Beide Rezepturen sind auf die ausschließliche Bildung der 3-1-8 Phase stöchiometrisch eingestellt (aus Daten Tab. 2 errechenbar), was mit einer vollständigen Umsetzung der Anmischlösung verbunden ist, sobald die Abbindereaktion im Baustoffkörper zu 100% abgelaufen ist. Die A1-Rezeptur weist ein molares Ansatzverhältnis von >3:1:11 auf. Damit liegt dies oberhalb des stöchiometrischen Ansatzes von 3:1:11 für eine reine 3-1-8 Phase. Formal entsteht so anteilig noch 5-1-8 Phase. Die ermittelten Phasenbestandteile der Proben zu den in Tabelle 4 angegebenen Zeitpunkten nach der Herstellung sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Bedingt durch die Rezeptureinstellung liegt in den Proben von A1, B2 und C3 erwartungsgemäß die 3-1-8 Bindemittelphase vor. Geringe Anteile an MgO werden noch nach Abbinden bei Raumtemperatur sowie bei durchlaufener Maximaltemperatur von 60°C (TZF 60°C) vorgefunden. Ein Anteil der in Gegenwart von Lösung metastabilen 5-1-8 Phase ist zu mehr oder geringerem Anteil in nahezu allen Proben der 3 Rezepturen enthalten. Diese Phase tritt in Abhängigkeit von der Temperatur und MgO-Reaktivität als Zwischenphase auf dem Reaktionsweg (kinetisch kontrollierte Abbindereaktion) zur Bildung der 3-1-8 Phase auf. Je nachdem, in welchem zeitlichen Umfang Temperaturen über 80°C während des Abbindens erreicht werden, kommt es zur Bildung der Hochtemperaturphase 9-1-4, welche sich nach Unterschreiten von 80°C und mit der Zeit in die 3-1-8 Phase umwandelt. Generell wird auch die Bildung eines amorphen Bindemittelphasen-Anteils, welcher sich durch einen erhöhten Untergrund der Pulverdiffraktogramme bemerkbar macht, beobachtet.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 110 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Stand: 09.03.2016
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		

Die generelle Situation der Baustoffproben A1, B2 und C3 ist, dass diese noch nicht vollständig ausreagiert sind.

In den D4-Proben wird entsprechend der Rezeptureinstellung die 5-1-8 Phase als Bindemittelphase vorgefunden. Daneben verbleibt ein Anteil nicht umsetzbaren Magnesiumoxids. Verläuft die Abbindereaktion bei niedrigen Temperaturen (RT), kann es auch zur anteiligen Bildung der 3-1-8 Phase kommen. Ist das der Fall, verbleibt ein anteilig höherer MgO-Gehalt in der Probe, da für die Bildung der 3-1-8 Phase mehr der begrenzten Amischlösungsmenge benötigt wird als für die Bildung der 5-1-8 Phase. In den D4-Proben liegt jeweils der erreichbare Endzustand der Abbindereaktion vor.

In allen Baustoffrezeptur-Proben wurden die beigemischten Zuschlagstoffe röntgenographisch wiedergefunden. Der dem A1 zugesetzte Steinsalzzuschlag enthielt anteilig Anhydrit (CaSO<sub>4</sub>).

Tabelle 5: Röntgenographisch ermittelter Phasenbestand der Proben

		A1	B2	C3	D4
	Zuschlag-phasen	NaCl, Anhydrit	Quarz, Anhydrit	Quarz	Quarz / Silikat
RT	Bindemittelphase	3-1-8 amorpher Anteil MgO <sub>w</sub>	3-1-8 5-1-8 <sub>w</sub> amorpher Anteil MgO <sub>w</sub>	3-1-8 5-1-8 amorpher Anteil	5-1-8 3-1-8 amorpher Anteil MgO
TZF 60°C		3-1-8 amorpher Anteil	3-1-8 5-1-8 amorpher Anteil MgO <sub>w</sub>	3-1-8 amorpher Anteil	5-1-8 amorpher Anteil MgO
TZF 90°C		3-1-8 5-1-8 amorpher Anteil	3-1-8 amorpher Anteil	3-1-8 5-1-8 <sub>w</sub> amorpher Anteil	5-1-8 amorpher Anteil
TZF 120°C		3-1-8 5-1-8 <sub>w</sub> 9-1-4 <sub>w</sub> amorpher Anteil	3-1-8 amorpher Anteil	3-1-8 5-1-8 <sub>w</sub> amorpher Anteil	5-1-8 9-1-4 amorpher Anteil MgO

w: geringer Anteil

**Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen**

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 111 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	33510000	GHS	TY	0001	00		Stand: 09.03.2016

Für vergleichende Aussagen zu Druckentwicklungen der 4 Sorelbaustoffrezepturen wäre eine längerfristige Druckerfassung, welche mit der Phasenbestandsentwicklung des Baustoffgefüges korreliert, notwendig gewesen. Zum Zeitpunkt der Versuchsplanung war dieser Sachverhalt jedoch noch nicht Stand der Kenntnisse zum Stoffsystem.

**Referenzen**

- /1/ BFS (2012): Sorelbetone - vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten. - Protokoll zum Projektgespräch vom 23.02.2012, Dok-ID 9A/3351/GHS/CA/0003/00, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Stand vom 08.03.2012.
- /2/ ERCOSPLAN und IfG Leipzig (2009): Untersuchungsprogramm Blindschacht 4, 800-m-Sohle bis 850-m-Sohle vom 04.02.2009. – Abschlussbericht der ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH und der Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Erfurt, Februar 2009. [PKZ 16/-/ERV/GH/LF/0002/00], erstellt im Auftrag der Asse-GmbH
- /3/ GTS (2006): Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV (Projekt „CARLA“), Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. – Bericht zum 1. Meilenstein, FuE Vorhaben (FKZ 02C1204), GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co KG, Teutschenthal, 31.07.2006.

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 112 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### Anhang - Pulverdiffraktogramme

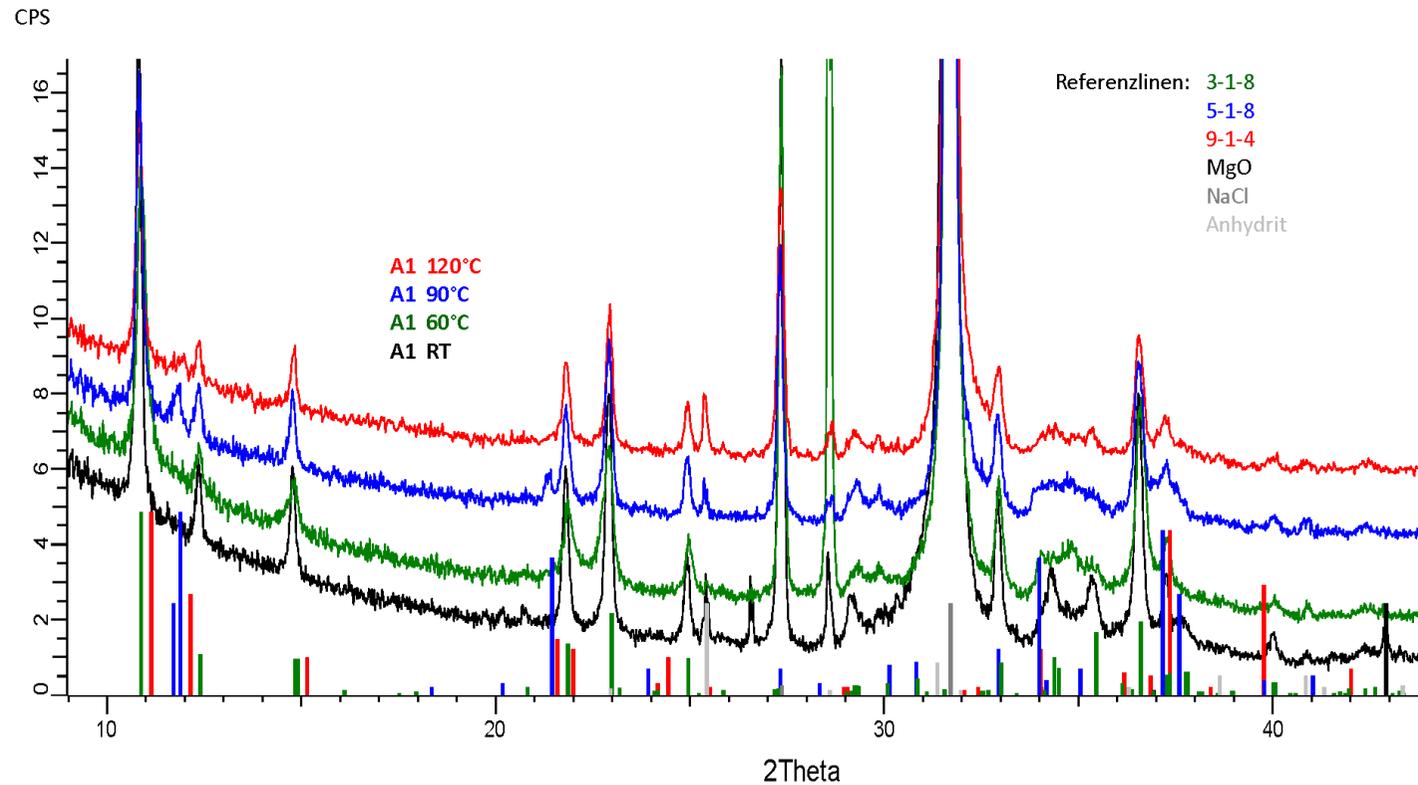


Abbildung A1: Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdiffraktogrammen der A1-Proben

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 113 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### Anhang - Pulverdiffraktogramme

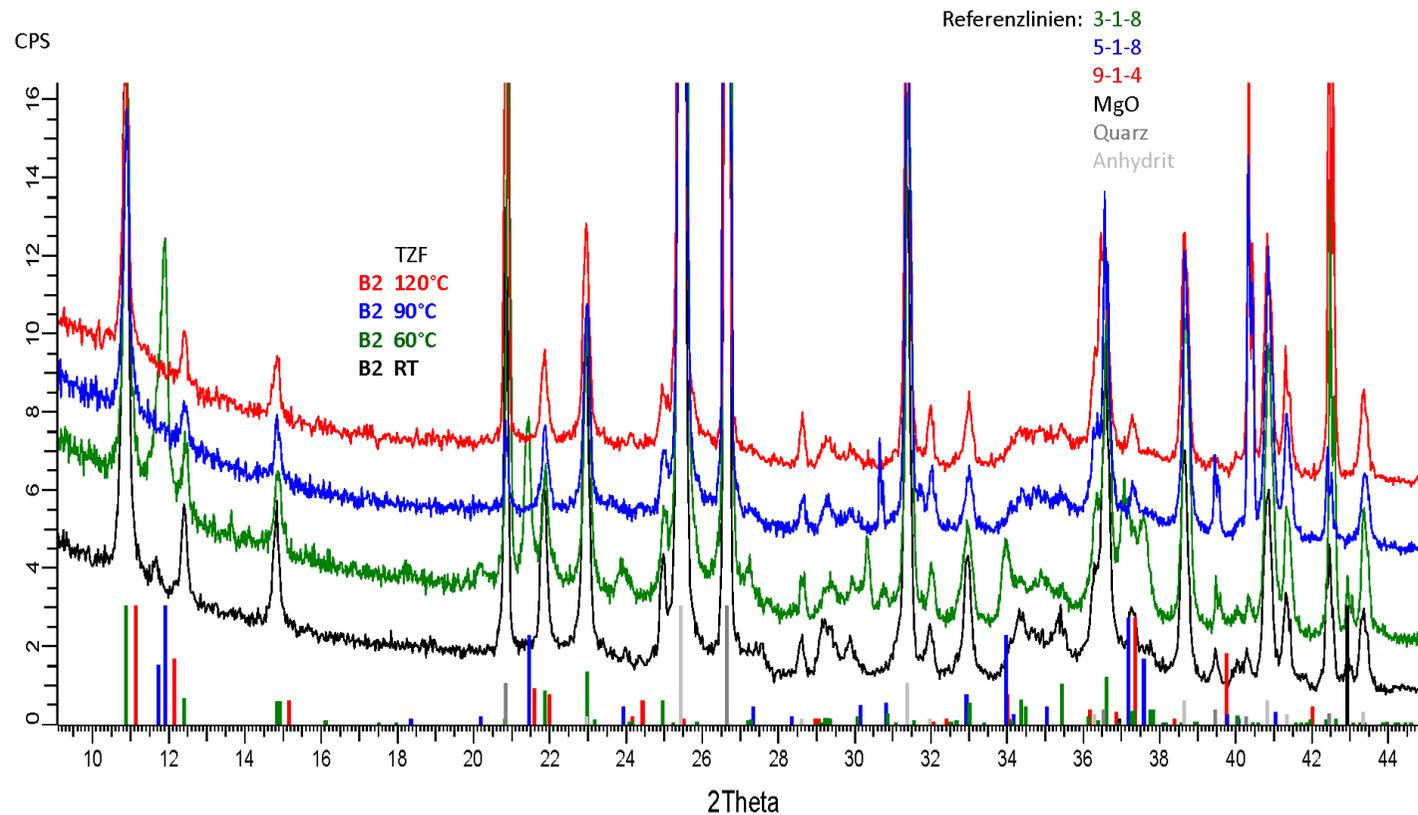


Abbildung A2: Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdiffraktogrammen der B2-Proben

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 114 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### Anhang - Pulverdiffraktogramme

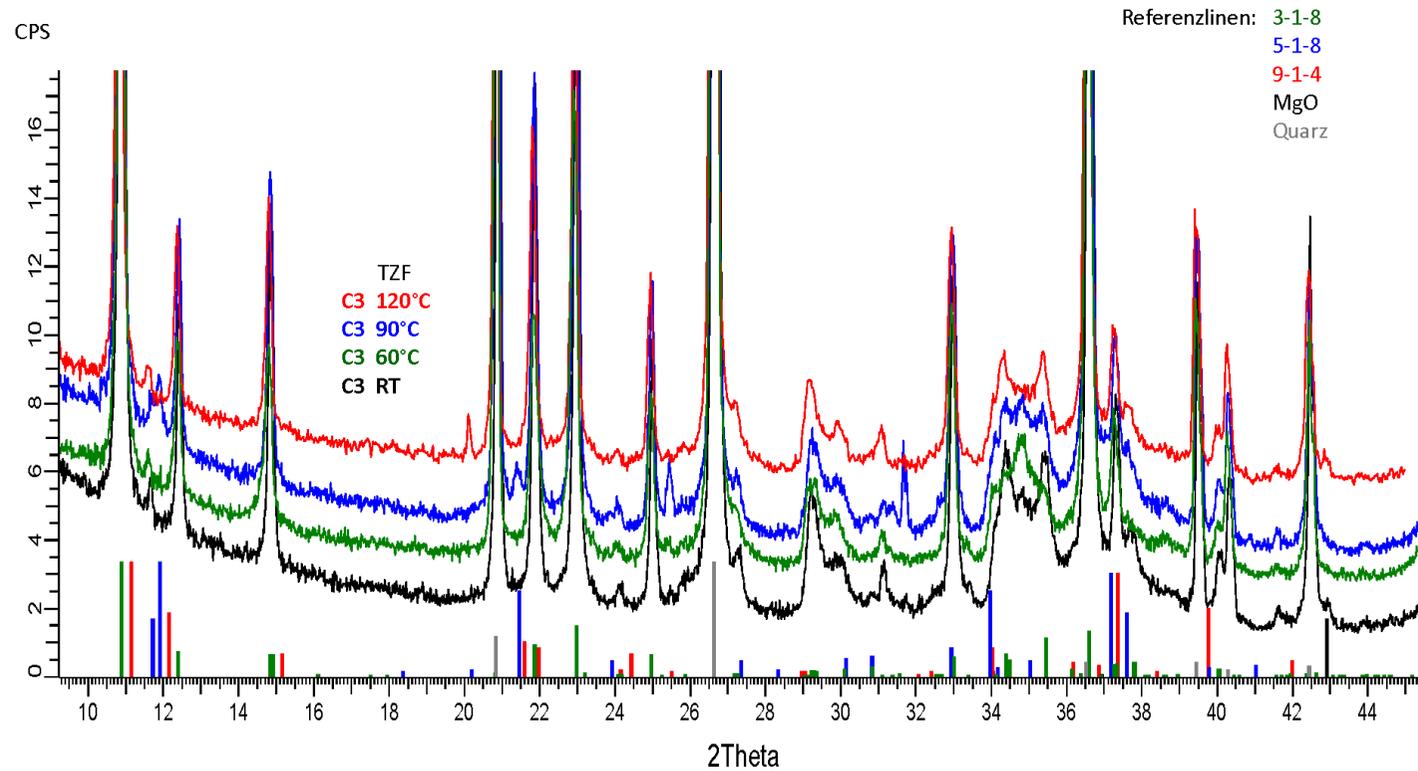


Abbildung A3: Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdiffraktogrammen der C3-Proben

## Schachtanlage Asse II: Vergleichende Untersuchungen zum Materialverhalten von Sorelbetonen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 115 von 115
NAAN	NNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	33510000	GHS	TY	0001	00	Stand: 09.03.2016

### Anhang - Pulverdiffraktogramme

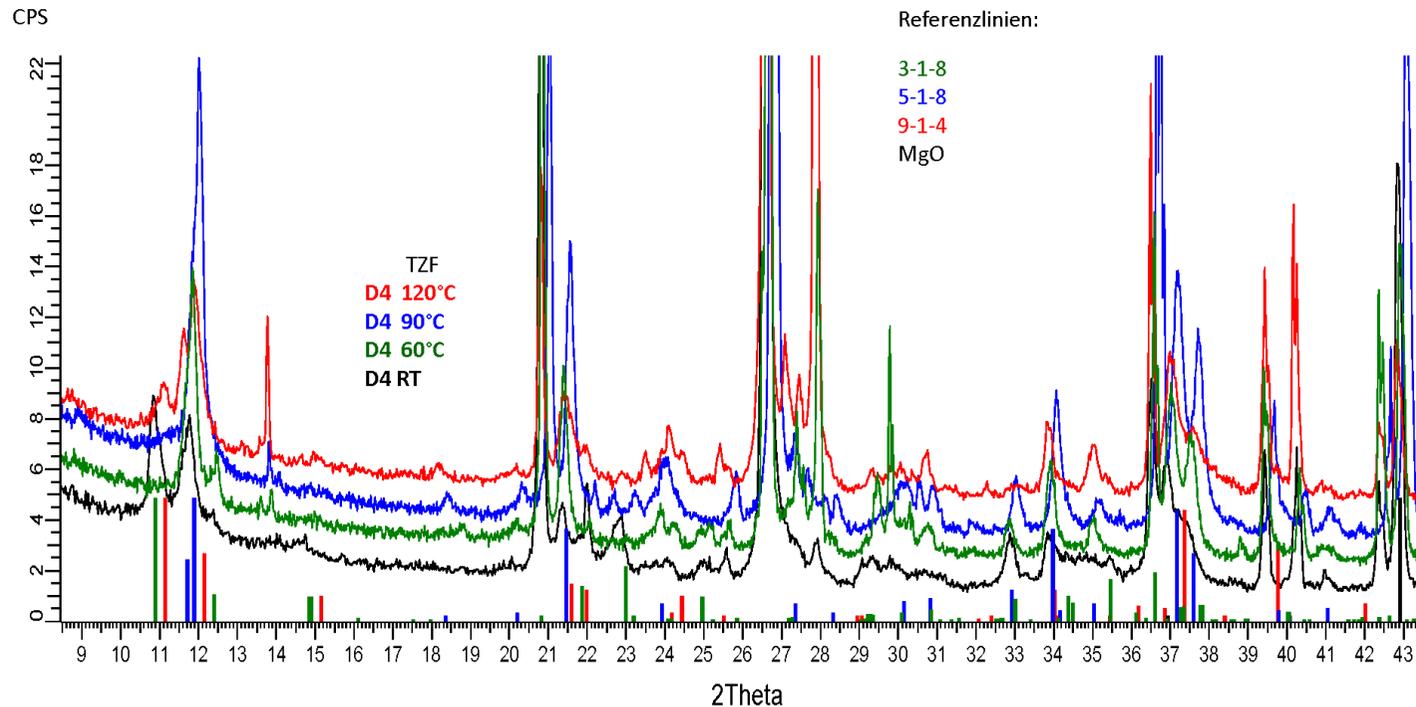


Abbildung A4: Vergleichender Ausschnitt aus den Pulverdiffraktogrammen der D4-Proben