

# Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

## Verfahrensunterlage

**Titel:** Salzbeton  
Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte (Referenzmaterial  
M3)

**Autor:** DBE


**Erscheinungsjahr:** 2006

**Unterlagen-Nr.:** P 221

**Revision:** 01

**Unterlagenteil:**



	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	


Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 3

**Inhaltsverzeichnis**

**Blatt**

	Verzeichnis der Abbildungen	5
	Verzeichnis der Tabellen	7
	Zusammenfassung	10
1	Einleitung	12
2	Ausgangsstoffe und Rezeptur	14
3	Bergbauhygienische Beurteilung gemäß § 4 Abs. 1 und 2 der Gesundheitsschutz-Bergverordnung	16
4	Rheologische Untersuchungen	17
4.1	Versuche im Rotationsviskosimeter	17
4.2	Versuche im Rohrviskosimeter	18
4.3	Ausbreitmaß	22
4.4	Fließwinkel	23
5	Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten	24
6	Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung	25
7	Übertragung von Untersuchungsergebnissen des Salzbetons M2	28
8	Physikalische Untersuchungen	33
8.1	Festmaterialdichte	33
8.2	Statischer E-Modul	34
8.3	Querkontraktionszahl	35
8.4	Einaxiale Druckfestigkeit	36
8.4.1	Zylinderdruckfestigkeit	36
8.4.2	Würfeldruckfestigkeit	37
8.4.3	Vergleich der Versuchsergebnisse zur einaxialen Druckfestigkeit	38
8.5	Zugfestigkeit	39


	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNN	NNNNNN	NNA AANN	AANNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 4

		<b>Blatt</b>
9	Thermodynamische Untersuchungen	40
9.1	Adiabatische Temperaturentwicklung beim Abbinden	40
9.2	Spezifische Wärmekapazität	41
9.3	Wärmeleitfähigkeit	41
9.4	Wärmeausdehnungskoeffizient	41
9.5	Temperaturstabilität	42
10	Zusammenstellung der Materialkennwerte	43
11	Materialkennwerte für die Sicherheitsnachweisführung	51
11.1	Nicht gekoppelte Materialkennwerte	51
11.2	Gekoppelte Materialkennwerte	52
11.2.1	Hydratationsgradiententwicklung	52
11.2.2	Hydratationsgradabhängige Werkstoffeigenschaften	54
11.3	Identifikation der hydratationsgradabhängigen Werkstoffeigenschaften aus Versuchen	56
12	Verwendete Unterlagen	59
13	Glossar	61

Gesamte Blattzahl der Unterlage: 64

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	


Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 5

**Verzeichnis der Abbildungen**

**Blatt**

Abbildung 2-1:	Siebanalysen des Zementes, der Flugasche und des Salzzuschlages der Kornverteilung 1 (enges Körnungsband).	15
Abbildung 2-2:	Bandbreite der Kornverteilung 2 (breites Körnungsband).	15
Abbildung 4.2-1:	Druckverluste bezogen auf eine Förderleistung von 45 m <sup>3</sup> /h in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Suspensionen mit Flotations- und Heißlöserückständen als Salzzuschlag (Kornverteilung 2).	20
Abbildung 4.4-1:	Füllstände des Frischbetons in Abhängigkeit des Abstandes der Messpunkte zur Einfüllmarke am linken und rechten Rand sowie in der Mitte der Fließrinne.	23
Abbildung 5-1:	Schnittflächen der Salzbetonproben aus 1000-ml-Standzylindern mit Heißlöse- und Flotationsrückstand als Salzzuschlag (Kornverteilung 2).	24
Abbildung 6-1:	Höhe der Flüssigkeitsschichten (Überstandslösung) nach Messungen in 1000-ml-Standzylindern in Abhängigkeit des Wasseranteiles der Salzbetonrezeptur in Massen-% (Standzeit 24 Stunden).	26
Abbildung 7-1:	Abhängigkeit der maximalen sedimentationsstabilen Korngröße von der Fließgrenze ( $\tau_0$ ) der Suspension (vgl. Abbildungen 2-1 und 2-2, Kapitel 2).	30
Abbildung 8.2-1:	Statische Elastizitätsmoduli des Salzbetons nach Abbindezeiten von 7 bis 530 Tagen in N/mm <sup>2</sup> . Mittelwerte der Versuchsreihen.	34
Abbildung 8.4-1:	Einaxiale Zylinderdruckfestigkeiten des Salzbetons nach Abbindezeiten der Probekörper von 7 bis 530 Tagen. Mittelwerte der Versuchsreihen.	37
Abbildung 9.1-1:	Adiabatische Temperaturerhöhung (Messtemperaturen in Grad Celsius) des Salzbetons im Verlauf des Abbindeprozesses.	40
Abbildung 11.2-1:	Vergleich des Hydratationsgrades aus adiabatischen Messungen mit der funktionalen Anpassung.	54

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	


Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 6

**Blatt**

Abbildung 11.3-1: Messwerte der Zylinderdruckfestigkeit und Rechenwerte der  
Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter  $t_e$ . 57

Abbildung 11.3-2: Messwerte des statischen Elastizitätsmodules und Rechenwerte der  
Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter  $t_e$ . 58

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	


Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 7

**Verzeichnis der Tabellen**

**Blatt**

Tabelle 2-1:	Mengenverhältnisse der Salzbetonbestandteile in kg/m <sup>3</sup> und Massenanteile in % ohne Berücksichtigung des Luftporenanteils.	14
Tabelle 4.1-1:	Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste bei Transport der Salzbetonsuspension in Rohrleitungen der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150 nach Messungen im Rotationsviskosimeter.	18
Tabelle 4.2-1:	Wasseranteile der untersuchten Salzbetonsuspensionen sowie berechnete W/(F+Z)-Verhältnisse.	19
Tabelle 4.2-2:	Temperatur und Dichte der Salzbetonsuspensionen.	19
Tabelle 4.2-3:	Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste in Abhängigkeit des Wasseranteiles der Suspension bei Transport in Rohren der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150 (Rohrviskosimeter).	20
Tabelle 4.2-4:	Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste in Abhängigkeit der Stationierungszeit bei Transport in Rohren der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150 (Rohrviskosimeter).	21
Tabelle 4.2-5:	Mindestdruckverluste in Folge der Fließgrenze sowie in Abhängigkeit der Stationierungszeit.	22
Tabelle 4.3-1:	Ausbreitmaß des Frischbetons nach Abbindezeiten von 0 bis 90 Minuten sowie Frischbetontemperatur zu Versuchsbeginn.	22
Tabelle 6-1:	Schichtdicke der Überstandslösung nach Messungen in 1.000-ml-Standzylindern in Abhängigkeit des Wasseranteiles der Salzbetonrezeptur bzw. der prozentualen Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert (Standzeit 24 Stunden).	26
Tabelle 6-2:	Höhe der Flüssigkeitsschichten (Überstandslösung) in Millimeter nach Messungen in 1.000-ml-Standzylindern in Abhängigkeit der Mischzeit im Labormischer.	27
Tabelle 8.1-1:	Festmaterialdichten und Lagerungsbedingungen von Salzbetonproben nach Abbindezeiten von 7 bis 245 Tagen in kg/m <sup>3</sup> .	33


Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 8

**Blatt**

Tabelle 8.2-1: Statische Elastizitätsmoduli und Lagerungstemperaturen von Proben nach 7 bis 530 Tagen Abbindezeit.	34
Tabelle 8.2-2: Statischer Elastizitätsmodul des Salzbetons nach 14, 28 und 177 Tagen Abbindezeit in Abhängigkeit der Abweichung des Wassergehaltes der Suspension vom Sollwert.	35
Tabelle 8.3-1: Querkontraktionszahlen des Salzbetons nach Abbindezeiten von 7 bis 177 Tagen.	36
Tabelle 8.4-1: Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit und Lagerungstemperatur 7 bis 530 Tage alter Prüfkörper.	37
Tabelle 8.4-2: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit des Salzbetons nach 3 bis 177 Tagen Abbindezeit in Abhängigkeit der Abweichung des Wassergehaltes der Suspension vom Sollwert.	38
Tabelle 8.4-3: Zusammenstellung der Messresultate zur einaxialen Zylinderdruckfestigkeit. Mittelwerte der Versuchsreihen.	39
Tabelle 8.5-1: Zugfestigkeit und Lagerungsbedingungen der 56 und 90 Tage alten Prüfkörper.	39
Tabelle 10-1: Zusammenstellung der Materialparameter. Rezepturzusammensetzung und Resultate der rheologischen Untersuchungen im Rotationsviskosimeter.	44
Tabelle 10-2: Zusammenstellung der Materialparameter. Resultate der rheologischen Untersuchungen im Rohrviskosimeter.	45
Tabelle 10-3: Zusammenstellung der Materialparameter. Untersuchungen zur Rheologie (Ausbreitmaß, Fließwinkel) zum Sedimentationsverhalten und zur Bildung von Überstandslösung.	46
Tabelle 10-4: Zusammenstellung der Materialparameter. Übertragbare Versuchsergebnisse des Salzbetons M2.	47

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNA AANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 9

**Blatt**


Tabelle 10-5: Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen (Festmaterialdichte, statischer Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl). 48

Tabelle 10-6: Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen (Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit, Zugfestigkeit). 49

Tabelle 10-7: Zusammenstellung der Materialparameter. Thermodynamische Untersuchungen. 50

Tabelle 11.1-1: Für die numerischen Berechnungen als Eingangsdaten verwendete Materialkennwerte der Festmaterialdichte, spezifischen Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und des Wärmeausdehnungskoeffizienten. 51



Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Stichwörter: Hydratationsmodell, physikalisch/thermodynamische Materialeigenschaften, Rheologie, Sedimentationsverhalten, Stilllegung, Überschusslösung


**Zusammenfassung**

Im Auftrage des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) wird derzeit die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) geplant. Nach dem Stilllegungskonzept setzt der langzeitsichere Abschluss des Grubengebäudes eine Verfüllung der unterirdischen Hohlräume voraus. Im Rahmen des Verfüllkonzeptes ist vorgesehen, hydraulisch abbindenden Versatz als Massenbeton einzubringen, der über Tage aus Zement, Betonzusatzstoff, Salzschlamm sowie Wasser oder Salzlösung zu einer pumpfähigen Suspension angemischt wird. Die Suspension ist über Rohrleitungen in die einzelnen Feldesteile des ERAM zu verpumpen.

Als ein Referenzmaterial zur Verfüllung wurde die Rezeptur - Salzbeton M3 - gewählt, für den eine allgemeine Zulassung gemäß § 4 der Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV) vorliegt.

Der vorliegende Bericht fasst den Kenntnisstand von Materialparametern des Baustoffes zusammen. Zuerst werden die Rezepturzusammensetzung, das Verhalten der Suspension während der Verarbeitung und die Frischbetoneigenschaften behandelt. Im Anschluss werden die Resultate von Messungen der physikalischen und thermodynamischen Materialeigenschaften beschrieben. Abschließend wird dargestellt, wie aus den Ergebnissen der Laboruntersuchungen Materialkennwerte ermittelt werden, die in die Sicherheitsnachweisführung eingehen und welche Materialmodelle in den numerischen Berechnungen zur Anwendung kommen. Die Zahlenwerte der Materialkennwerte werden angegeben.

Die Förderversuche zeigten, dass ein hydraulischer Suspensionstransport auch bei erhöhtem oder verringertem Wassergehalt möglich ist. Nach Stationierungszeiten bis 5 Stunden war nur eine für den praktischen Betrieb unkritische Erhöhung der Druckverluste festzustellen. Untersuchungen der ruhenden Suspension erlauben Aussagen bezüglich des Absetzverhaltens und der Bildung von Überstandslösung, die sich auf der frischen Baustoffoberfläche absetzt. Laborversuche ergaben, dass die Menge an Überstandslösung mit zunehmender Mischzeit und dem Anteil an Zugabewasser ansteigt, wobei die Abhängigkeit vom Wasseranteil nahezu proportional ist. Des Weiteren ergab die Messreihe, bei der die Mischzeiten variiert wurden, dass die Überstandslösung im Verlauf der Hydratation vom Salzbeton vollständig gebunden wird. Die visuelle Beurteilung abgebundener Prüfkörper ergab unabhängig vom Anteil des Zugabewassers ein einheitliches Korngefüge des Salzbetons und damit keine Anzeichen für Kornsedimentation bzw. Absetzerscheinungen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	


Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 11

Weitere Untersuchungen zu den Frischbetoneigenschaften der Rezeptur M3 unterblieben, da eine Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen des Referenzmaterials – Salzbeton M2 – gegeben ist. Die Förderversuche der Salzbetonsuspension Rezeptur M2 ergaben, dass der Einfluss der Korngröße des Salzzuschlages auf das rheologische Verhalten des Frischbetons von untergeordneter Bedeutung ist. Ein Freifallversuch im ERAM, bei dem Salzbeton über eine Höhe von 37 m in eine Schalung verstürzt wurde, belegte darüber hinaus, dass Entmischungen der Salzbetonkomponenten im Rahmen der geplanten Verfüllmaßnahmen auszuschließen sind. Auf Grund der Sättigungsverhältnisse der Überstandslösung sind im Rahmen der Verfüllung Anlöseerscheinungen der Hohlraumkonturen vernachlässigbar.

Die Untersuchungen physikalischer Materialeigenschaften umfassten Bestimmungen der Salzbetondichte, des statischen Elastizitätsmoduls, der Querkontraktionszahl sowie der Druck- und Zugfestigkeit. Die Messungen ergaben, dass abgebundene Proben des gefördertten Materials im Vergleich zu Prüfkörpern, deren Herstellung im direkten Anschluss des Mischprozesses erfolgte, im Durchschnitt höhere Elastizitätsmoduli sowie vergleichbare Druckfestigkeiten aufweisen. Im Falle der Querkontraktionszahl wurden identische Messergebnisse erzielt. Hinsichtlich der thermodynamischen Materialparameter liegen Ergebnisse vor für die adiabatische Temperaturentwicklung beim Abbinden, die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit, den Wärmeausdehnungskoeffizienten und zur Temperaturstabilität.

Die physikalischen und thermodynamischen Materialkennwerte gehen in die numerischen Berechnungen zur Sicherheitsnachweisführung ein; die Festmaterialdichte, die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeausdehnungskoeffizient als nicht gekoppelte Einzelwerte. Die funktionalen, hydrationsgradabhängigen Zusammenhänge des statischen Elastizitätsmoduls sowie der Druck- und Zugfestigkeit werden an Hand des Hydrationsmodells erläutert und die den Beziehungen zu Grunde liegenden betonspezifischen Parameter genannt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 12


## 1 Einleitung

Im Rahmen des Stilllegungskonzeptes sollen Teile des Grubengebäudes, z.B. Abbaukammern und Strecken, im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben, die teilweise nur bedingt zugänglich sind, mit hydraulisch abbindenden Baustoffen als Massenbeton /1/ verfüllt werden. Das Anmischen des Baustoffes soll über Tage erfolgen. Die Suspension soll in Druckleitungen, d.h. Fall- und horizontalen Förderleitungen, über den Schacht (Teufe 425 m) und Strecken, deren Gesamtlänge bis 5 km beträgt, verpumpt werden. Es ist vorgesehen die Grubenbaue durch Bohrungen von höheren Niveaus aus zu erschließen. Dabei ist angestrebt, die Bohrungen bis in die firsthöchsten Bereiche zu führen. Zur Verfüllung der 1. Sohle ist es notwendig, aufwärts gerichtete Bohrungen bis in den Firstbereich der Grubenbaue zu stoßen. Vereinzelt werden Abbaue auch über Streckenzugänge, die abgedichtet werden, bzw. über seitliche Bohrungen verfüllt. Falls erforderlich gelangt die Suspension über mehrere Bohrungen in die Grubenbaue. Die Dauer der Förderung, zu der Förder- und Stationierungszeiten zählen, soll nicht mehr als drei bis vier Stunden betragen. Das Verfüllmaterial wird entsprechend einer Verfüllplanung eingebracht.

Durch die Verfüllung werden Lasten abgetragen, die aus dem Gebirgsdruck resultieren, das Gebirge gestützt, Senkungen der Tagesoberfläche und Umlösungen potenziell zutretender Salzlösungen mit dem Gebirge begrenzt sowie die Standsicherheit der offenen Grubenbaue und die Unversehrtheit der geologischen Barriere erhalten.

Unter Berücksichtigung der Einbringtechnologie, der aus konstruktiven Erfordernissen abgeleiteten Anforderungen sowie des Arbeits- und Gesundheitsschutzes wurde die Baustoffrezeptur - Salzbeton M3 - entwickelt. Als Bindemittel dienen sulfatbeständiger hydraulisch abbindender Hochofenzement sowie Steinkohlenflugasche, die über latent hydraulische bzw. puzzolanische Eigenschaften verfügt. Steinkohlenflugaschen wird darüber hinaus eine Verbesserung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons zugeschrieben sowie eine Steigerung der Sulfatbeständigkeit und eine Erhöhung der Endfestigkeit des Festbetons. Als Zuschlag findet Salzgrus Verwendung, um Umlösungen des Gebirges durch potenziell zutretende Lösungen zu begrenzen.


Aus der Aufgabenstellung leiten sich definierte Anforderungen an das Verfüllmaterial ab, z.B. im Hinblick auf die Einbringtechnologie und die Beherrschung der Bauzustände. Von besonderer Bedeutung sind dabei die rheologischen Eigenschaften, die Steifigkeit und die Druckfestigkeit des Verfüllmaterials. Die Daten zum thermischen Verhalten sind erforderlich, da Temperaturerhöhungen des hydratisierenden Versatzes in Abhängigkeit der Einbringmenge thermomechanisch bedingte Zwangsbeanspruchungen im Versatzkörper und im Gebirge erzeugen. Die im Verlauf der Hydratation freiwerdende Wärme ist damit eine nicht zu vernachlässigende Größe.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Der vorliegende Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Ausgangsstoffe sowie der Rezeptur M3 und verschafft einen Überblick über die Durchführung und die Resultate von rheologischen, physikalischen und thermodynamischen Untersuchungen. Die Arbeiten erfolgten im Wesentlichen an der Materialprüfanstalt für das Bauwesen des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der TU Braunschweig sowie bei der Deutschen Montan Technologie GmbH (DMT). Zum Nachweis der Anforderungen, die aus dem Arbeits- und Gesundheitsschutz resultieren, waren Prüfungen zur Erlangung einer allgemeinen Zulassung gemäß § 4 der Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV) erforderlich.

Des Weiteren wird dargestellt, welche Ergebnisse der Laboruntersuchungen zur Ermittlung von Materialkennwerten für die Sicherheitsnachweisführung Verwendung finden und welche Materialmodelle in den numerischen Berechnungen zur Anwendung kommen. Abschließend werden die Materialkennwerte für die Sicherheitsnachweisführung quantitativ angegeben.

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

**2 Ausgangsstoffe und Rezeptur**

Die Bestandteile der Rezeptur – Salzbeton M3 – sind Zement CEM III/B 32,5 - NW/HS/NA (vgl. DIN EN 197, Teil 1 /2/), Steinkohlenflugasche (Elektrofilterasche) HKV (vgl. DIN EN 450 /3/) sowie Salzgrus (Salzzuschlag) und Leitungswasser. Die Rezepturzusammensetzung beschreibt Tabelle 2-1.

Korrekturen der Menge an Zugabewasser waren erforderlich in Folge variierender Wassergehalte des Salzzuschlages im angelieferten Zustand sowie auf Grund eines schwankenden Wasseranspruches des Zementes und des Salzgruses.

Die Veränderung des Wasseranspruches des Salzzuschlages ist darauf zurückzuführen, dass Material unterschiedlicher Kornverteilung verwendet wurde. Der Salzzuschlag stammt aus dem laufenden Aufbereitungsbetrieb des Kaliwerkes Zielitz. Material mit einem Größtkorn von 2 mm ist Rückstand der Flotation (Kornverteilung 1). Nach der Erweiterung der Aufbereitung mit einem Heißlösebetrieb kann auf eine Mischung von Flotations- und Heißlösebetriebsrückständen mit einem Größtkorn von 5 bis 16 mm zurückgegriffen werden (Kornverteilung 2). Der Anteil des Heißlöserückstands beträgt etwa 30 %. Daten von Siebanalysen des verwendeten Salzgruses sind dargestellt in den Abbildungen 2-1 (Kornverteilung 1) und 2-2 (Kornverteilung 2). Abbildung 2-1 zeigt zusätzlich Resultate von Korngrößenbestimmungen des Zementes und der Steinkohlenflugasche.

	Salzbeton Rezeptur M3	
Betonkomponenten	kg/m <sup>3</sup>	Massen-%
Zement (Z)	197	9,9
Flugasche (F)	459	23,0
Wasser (W)	252	12,6
Salzzuschlag	1.087	54,5
Summe	1.995	100,0

Tabelle 2-1: Mengenverhältnisse der Salzbetonbestandteile in kg/m<sup>3</sup> und Massenanteile in % ohne Berücksichtigung des Luftporenanteils.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

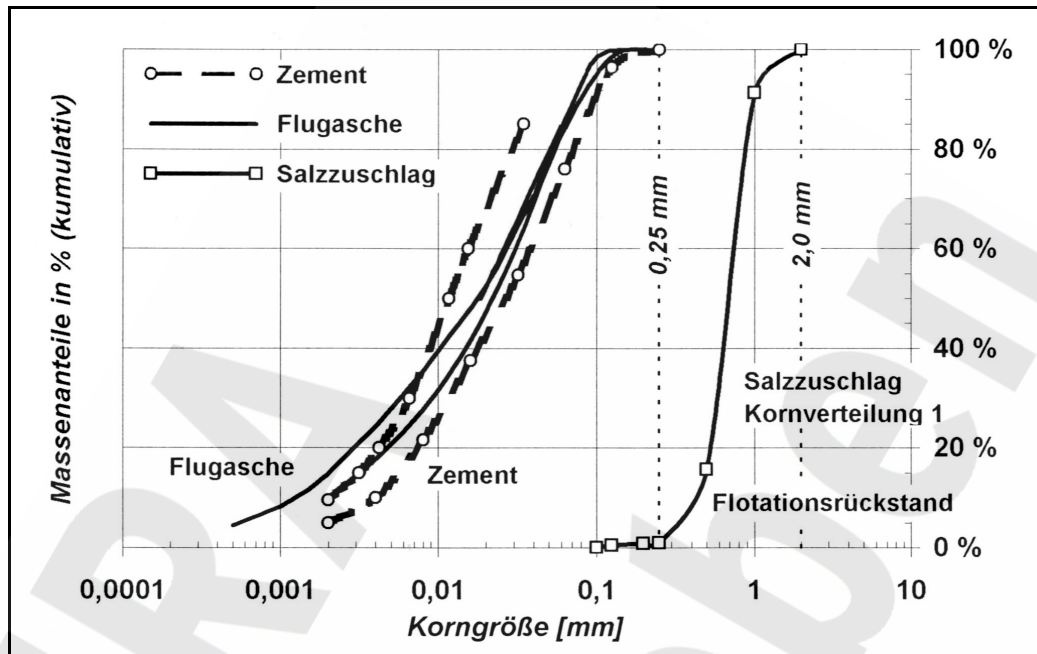


Abbildung 2-1: Siebanalysen des Zementes, der Flugasche und des Salzzuschlages der Kornverteilung 1 (enges Körnungsband).

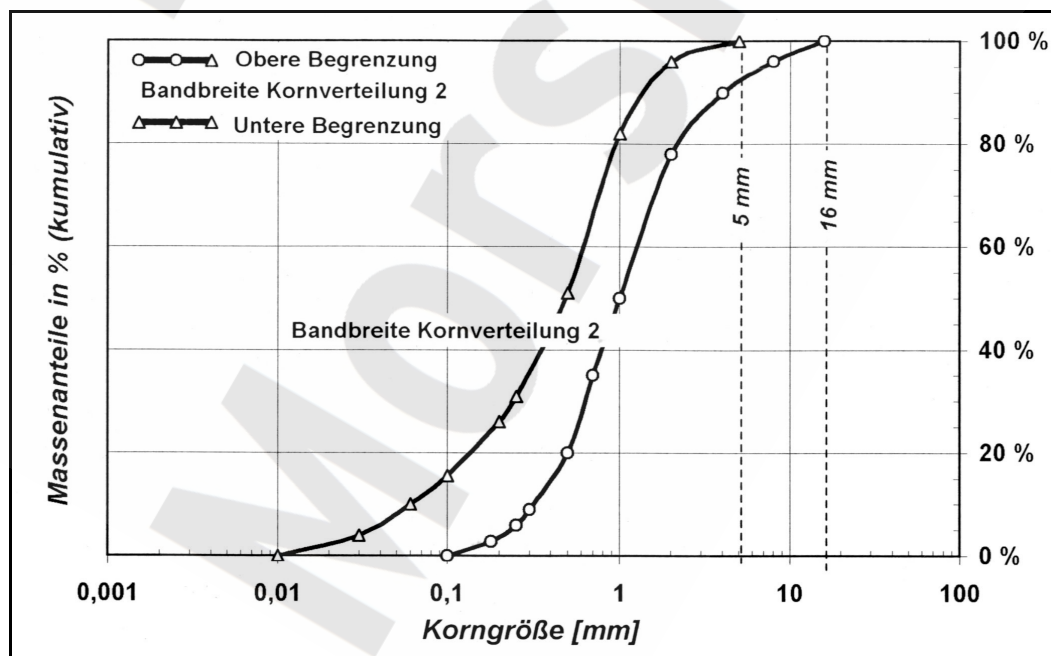




Abbildung 2-2: Bandbreite der Kornverteilung 2 (breites Körnungsband).

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

**3 Bergbauhygienische Beurteilung gemäß § 4 Abs. 1 und 2 der Gesundheitsschutz-Bergverordnung**

Der Umgang mit Salzbeton erfordert eine allgemeine Zulassung gemäß § 4 Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung, GesBergV). Zur Beurteilung der Ausgangsstoffe dienen in den Prüfbestimmungen des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen aufgeführte Grenzwerte. Die Prüfungen der Ausgangsstoffe und der Salzbetonrezeptur erfolgten am Hygiene-Institut des Ruhrgebietes, Gelsenkirchen und am Institut für Gefahrstoff-Forschung der Bergbau-Berufsgenossenschaft (IGF), Bochum. Der Salzbeton erfüllt als Trockenmischung und unter Zusatz von Wasser die Vorgaben der Prüfbestimmungen. Die Zulassung wurde daher auf der Grundlage der Prüfungen unter Berücksichtigung der „Technischen Regeln für den Einsatz von bergbaufremden Reststoffen als Versatz“ vom Bergamt Staßfurt erteilt /4/ (Zulassungsnummer: 34004-4841-GesBergV-M5300).

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

#### 4 Rheologische Untersuchungen

Zur Untersuchung des Fließ- und Förderverhaltens des Salzbetons wurden Messungen in einem Rotations- und Rohrviskosimeter sowie mit Konsistenzprüfverfahren durchgeführt. Sämtliche Messungen erfolgten an Frischbeton mit einem Gemisch aus Flotations- und Heißlöserückständen als Salzzuschlag (Kornverteilung 2).

Ziel der Messungen im Rotations- und Rohrviskosimeter war Aussagen zum Druckverlust bei einem Rohrleitungstransport des Salzbetons zu erhalten. Hierzu wurden die Parameter des Fließgesetzes nach Herschel/Bulkley gemäß Gl. (4.1) bestimmt:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n, \quad (4.1)$$

wobei  $\tau$  die beim Förderprozess auftretende Schubspannung,  $\tau_0$  die Anfangsschubspannung oder Fließgrenze,  $K$  die Konsistenz oder Steifigkeitszahl ist und  $n$  als Strukturexponent, -ziffer oder Fließindex bezeichnet wird. Die Schubspannung ist damit die Folge des Schergefälles  $\gamma$  im fließenden Salzbeton. Die bei der Förderung in einer Rohrleitung auftretenden Druckverluste ( $\Delta p$ ) ergeben sich dann in Abhängigkeit von der Rohrleitungslänge ( $\Delta l$ ), der Schubspannung und dem Rohrdurchmesser ( $D$ ) nach Gl. (4.2):

$$(\Delta p / \Delta l) = 4 \cdot \tau / D = 4 \cdot (\tau_0 + K \cdot \gamma^n) / D. \quad (4.2)$$

##### 4.1 Versuche im Rotationsviskosimeter

Mit einem Rotationsviskosimeter wird die Viskosität bzw. das Fließverhalten von Flüssigkeiten bestimmt. Als Messwerte erhält man das Drehmoment in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des sich drehenden Messkörpers. Die Schubspannung ( $\tau$ ) wird aus dem Drehmoment an der Mantelfläche des rotierenden Messkörpers berechnet.

Für die Versuche wurden die Ausgangsstoffe in einem Labor-Mörtelmischer zu einer homogenen Suspension konditioniert. Anschließend wurde die Suspension unverzüglich in den Messzylinder des Viskosimeters gefüllt. Die Drehzahl des Zylinders betrug 0 bis 800 Umdrehungen pro Minute. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte PC gestützt.

Tabelle 4.1-1 zeigt die Mittelwerte für die Konsistenz, den Strukturexponenten und die prognostizierten Druckverluste bei Transport der Suspension in Rohrleitungen unterschiedlichen Durchmessers. Eine Fließgrenze wurde im Versuch nicht ermittelt. Nach visuellem Befund wird das Material jedoch innerhalb einer halben Stunde „stichfest“ und zeigt eine unebene Oberfläche. Eine Fließgrenze ist demnach vorhanden. Die Werte für den Strukturexponenten von  $< 1$  belegen ein strukturviskoses bzw. pseudoplastischen Fließverhalten der Suspension.



Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Die Druckverluste, bezogen auf 100 m Förderweg und eine Fördermenge von 55 m<sup>3</sup>/h, variieren zwischen 13 bis 16 bar (DN 100), 8 bis 9 bar (DN 125) und 5 bis 6 bar (DN 150). Sie sinken mit zunehmendem Leitungsdurchmesser. Die Förderung der Suspension ist nach einer Stationierungsdauer von 90 Minuten noch möglich.

Stationierungszeit [Minuten]	K [Pa s <sup>n</sup> ]	n	DN 100 bar / 100 m bei 55 m <sup>3</sup> / h	DN 125	DN 150
0	28,8	0,45	12,6	7,5	4,9
30	21,5	0,55	15,0	8,3	5,1
60	28,7	0,51	15,8	9,1	5,7
90	25,6	0,55	15,6	8,6	5,4

Tabelle 4.1-1: Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste bei Transport der Salzbetonsuspension in Rohrleitungen der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150 nach Messungen im Rotationsviskosimeter. K: Konsistenz, n: Strukturexponent.

#### 4.2 Versuche im Rohrviskosimeter

In Rohrviskosimetern wird das zu untersuchende Medium bei definiertem Durchfluss durch eine Rohrschleife gepumpt. Gemessen wird die Fließgeschwindigkeit und der Druck an verschiedenen Messpunkten des Rohres (Druckverlustmessstrecken), woraus die Berechnung des Druckverlustes möglich ist.

Ziel der rheologischen Untersuchungen war die Ermittlung der Fließeigenschaften des Salzbetons unter Berücksichtigung unterschiedlicher Stationierungszeiten und variierender Wassergehalte. Die Ausgangsstoffe wurden in einem Labor-Mischer zu einer homogenen Suspension konditioniert. Zur Bestimmung der Druckverluste diente ein DMT On-line Suspensionsviskosimeter DN 40. Das Abfahren der Druckverlustkurven erfolgte in einem Fließgeschwindigkeitsbereich von nahezu 0 bis ca. 1,5 m/s. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte PC gestützt. Die bestimmten Druckverluste dienen als Grundlage für die Auslegung und Rohrleitungsdimensionierung der hydraulischen Förderanlage.

##### *Untersuchungen in Abhängigkeit des Wasseranteiles der Suspension*

Die Messungen im Rohrviskosimeter erfolgten an Suspensionen, die einen Wasseranteil von 12,2 bis 13,7 Massen-% aufwiesen. Dies entspricht einer Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert von -4 bis +10 %. Angaben zu den verwendeten Mischungen sind zusammengestellt in Tabelle 4.2-1.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Wasseranteil der Salzbetonrezeptur [Massen-%]					
12,2	12,4	<b>12,6</b>	13,0	13,3	13,7
Wasseranteil der Salzbetonrezeptur [kg/m³]					
243	248	<b>252</b>	261	265	274
Abweichung des Wassergehalts [Massen-%] bezogen auf die Originalrezeptur					
-4	-2	<b>0</b>	+4	+6	+10
W/(F+Z)-Wert (Verhältnis Wasser/(Steinkohlenflugasche+Zement))					
0,37	0,38	<b>0,38</b>	0,40	0,41	0,42

Tabelle 4.2-1: Wasseranteile der untersuchten Salzbetonsuspensionen sowie berechnete W/(F+Z)-Verhältnisse.

Nach dem Einfüllen in den Pumpkreislauf wurden die Suspensionen mehrmals im Kreislauf gepumpt, entsprechend einer Zeitdauer von 20 bis 30 Minuten, um den Einfluss eines Nachmischeffektes auf die Messergebnisse auszuschließen. Anschließend erfolgte das Abfahren der Druckverlustkurven. Neben den rheologischen Parametern wurden die Temperaturen und die Dichten der Suspensionen gemessen. Die Daten sind, in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Salzbetonsuspension, aufgeführt in Tabelle 4.2-2. Die theoretische Dichte der Originalrezeptur (Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert 0 %) beträgt nach Tabelle 2-1 1.995 kg/m³. Nach Tabelle 4.2-2 wurde jedoch während des Förderversuches eine Suspensionsdichte von 1.899 kg/m³ ermittelt. Diese Abweichung beruht insbesondere auf den Luftporanteil der Suspension, der bei der Rezepturangabe gemäß Tabelle 2-1 nicht berücksichtigt ist.

Wasseranteil der Salzbetonrezeptur [kg/m³]					
243	248	252	261	265	274
Abweichung des Wassergehaltes [Massen-%] bezogen auf die vorgegebene Rezeptur					
-4	-2	0	+4	+6	+10
Suspensionstemperatur [°C]					
17,9	18,1	18,9	18,8	18,7	18,8
Suspensionsdichte [kg/m³]					
1.928	1.920	1.899	1.922	1.910	1.927

Tabelle 4.2-2: Temperatur und Dichte der Salzbetonsuspensionen.

Tabelle 4.2-3 fasst die berechneten Werte der Fließgesetzparameter ( $\tau_0$ , K, n) sowie der prognostizierten Druckverluste für die Rohnennweiten DN 100, DN 125 und DN 150 zusammen. Die Berechnungen basieren auf einer Förderleistung von 45 m³/h. In Abbildung 4.2-1 werden die berechneten Druckverluste in bar/100 m grafisch dargestellt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

				Rohrnenweite		
				DN 100	DN 125	DN 150
Wasseranteil	$\tau_0$	K	n	prognostizierte Druckverluste		
[Massen-%]	[Pa]	[Pa s <sup>n</sup> ]	—	[bar/100 m bei 45 m <sup>3</sup> /h]		
Im Anschluss des 20 bis 30minütigen Förderprozesses						
12,2 (-4 %)	12,7	3,8	0,77	7,5	3,8	2,2
12,4 (-2 %)	9,1	3,6	0,75	6,2	3,1	1,8
12,6 (0 %)	5,7	3,0	0,72	5,5	2,6	1,4
13,0 (+4 %)	5,5	1,6	0,86	4,5	2,1	1,2
13,3 (+6 %)	5,6	2,0	0,78	4,0	2,0	1,2
13,7(+10 %)	6,4	1,6	0,82	3,9	1,9	1,1

Tabelle 4.2-3: Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste in Abhängigkeit des Wasseranteiles der Suspension bei Transport in Rohren der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150 (Rohrviskosimeter).  $\tau_0$ : Fließgrenze nach Herschel-Bulkley, K: Konsistenz, n: Strukturexponent.

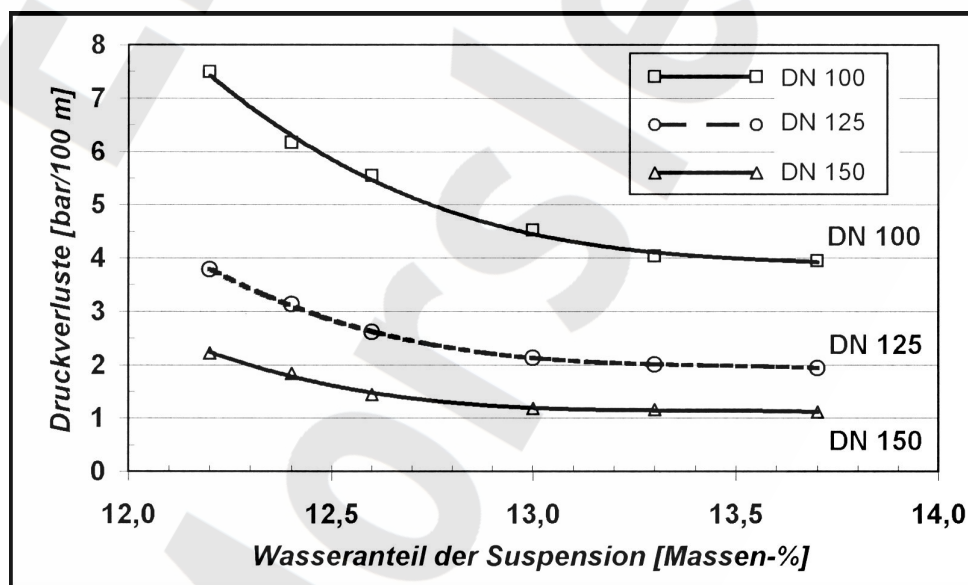



Abbildung 4.2-1: Druckverluste bezogen auf eine Förderleistung von 45 m<sup>3</sup>/h in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Suspensionen mit Flotations- und Heißlöse-rückständen als Salzzuschlag (Kornverteilung 2).

Die Werte belegen das pseudoplastische (strukturviskose) Fließverhalten und die in den Vorversuchen (Rotationsviskosimeter) nicht messbare aber nach visuellem Befund vorhandene Fließgrenze der Suspension. Sie beträgt zwischen 5,5 bis 12,7 Pa. Die Druckverluste steigen bei abnehmendem Wassergehalt der Suspension überproportional an und scheinen sich bei

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

zunehmendem Wasseranteil einem Grenzwert anzunähern. Bei den vorgesehenen Rohrennweiten und Wassergehaltsabweichungen ist die hydraulische Förderung der Suspension unproblematisch.

*Untersuchungen in Abhängigkeit der Stationierungszeit*

Bestimmungen, die für eine Förderleistung von 55 m<sup>3</sup>/h Gültigkeit besitzen, wurden nach dem Einfüllen der Suspension in die Anlage sowie nach Stationierungszeiten von 30, 60 und 90 Minuten durchgeführt. Eine weitere Messkurve, die im Rahmen der Untersuchungen in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Suspension aufgezeichnet wurde (Wassergehalt entsprach dem Sollwert, Förderleistung 45 m<sup>3</sup>/h), erfolgte nach 5stündiger Stationierung. Diese Zeitdauer deckt die voraussichtlichen Förderzeiten ab. Tabelle 4.2-4 fasst die Fließgesetzparameter ( $\tau_0$ , K, n) sowie die prognostizierten Druckverluste für die Rohrquerschnitte DN 100, DN 125 und DN 150 zusammen.

Stationierungszeit	$\tau_0$	K	n	Rohrquerschnitt		
				DN 100	DN 125	DN 150
Minuten	Pa	Pa s <sup>n</sup>	—	bar / 100 m		
Förderleistung 45 m <sup>3</sup> /h						
20 – 30	5,7	3,0	0,72	5,5	2,6	1,4
300 (5 h)	keine Angabe			7,8	4,0	2,3
Förderleistung 55 m <sup>3</sup> /h						
0	30,6	20,6	0,52	14,1	8,3	5,5
30	27,5	37,6	0,37	13,5	8,6	6,0
60	29,9	29,9	0,40	12,5	7,9	5,4
90	31,0	37,3	0,37	12,6	8,1	5,7

Tabelle 4.2-4: Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste in Abhängigkeit der Stationierungszeit bei Transport in Rohren der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150 (Rohrviskosimeter).  $\tau_0$ : Fließgrenze, K: Konsistenz, n: Strukturexponent.

Im Falle der Messungen für eine Förderleistung von 55 m<sup>3</sup>/h ist keine Abhängigkeit der Fließgrenze und der Druckverluste von der Stationierungszeit nachweisbar. Nach 5stündiger Stationierung (Förderleistung 45 m<sup>3</sup>/h) ist im Vergleich zu der Messung nach 20 bis 30minütigem Förderprozess nur eine für den praktischen Betrieb unkritische Erhöhung der Druckverluste festzustellen. Für die Beurteilung der Stationierbarkeit sind jedoch auch die Mindestdruckverluste bei reduziertem Volumenstrom von Bedeutung. Der Mindestdruckverlust  $(\Delta p/\Delta l)_{\min}$  berechnet sich nach Gl. (4.3) aus der Fließgrenze ( $\tau_0$ ) und ist umgekehrt proportional zum Rohrdurchmesser (D):

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

$$(\Delta p / \Delta l)_{\min} = 4 \cdot \tau_0 / D. \quad (4.3)$$

Die höchsten Fließgrenzen wurden im Rahmen der Untersuchungen in Abhängigkeit der Stationierungszeit registriert (Förderleistung 55 m³/h). Die Ergebnisse sind zusammengestellt in Tabelle 4.2-5. Demnach beträgt der maximale Mindestdruckverlust 1,25 bar/100 m (DN 100).

Stationierungszeit Minuten	Fließgrenze ( $\tau_0$ ) Pa	Mindestdruckverluste bar / 100 m		
		DN 100	DN 125	DN 150
0	30,6	1,20	1,00	0,80
30	27,5	1,10	0,90	0,75
60	29,9	1,20	0,95	0,80
90	31,0	1,25	1,00	0,85

Tabelle 4.2-5: Mindestdruckverluste in Folge der Fließgrenze sowie in Abhängigkeit der Stationierungszeit.

### 4.3 Ausbreitmaß

Das Ausbreitmaß gibt Aufschluss über die Konsistenz eines Frischbetons. Die Messungen erfolgten nach DIN 1048, Teil 1 /5/. Drei Versuchsreihen unter Normalbedingungen, bei 40 °C und 30 % relative Luftfeuchtigkeit sowie bei 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit sind zu unterscheiden. Die Messresultate sind zusammengestellt in Tabelle 4.3-1.

	Normalbedingungen			Klima 40/30		Klima 20/65	
	0 min	30 min	60 min	60 min	90 min	0 min	45 min
Ausbreitmaß	66 cm	63 cm	58 cm	55 cm	52 cm	70 cm	67 cm
Ausbreitklasse nach DIN EN 206, Teil 1	F6	F6	F5	F4	F4	F6	F6
Frischbetontemperatur	30 °C	28 °C	26 °C	keine Angabe		20,2 °C	20,2 °C

Tabelle 4.3-1: Ausbreitmaß des Frischbetons nach Abbindezeiten von 0 bis 90 Minuten sowie Frischbetontemperatur zu Versuchsbeginn.

Das Ausbreitmaß der Suspension variiert bei Abbindezeiten von maximal 90 Minuten zwischen 52 und 70 cm. Die DIN EN 206, Teil 1 /6/ (vgl. DIN 1045, Teil 2, Abschnitt 4.2.1 /7/) ordnet die Ausbreitmaße von Betonen sog. Ausbreitklassen (F1 bis F6) zu. Die Bezeichnung der Ausbreitmaße von 49 bis 55 cm ist F4 sehr weich, von 56 bis 62 cm F5 fließfähig und bei

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Ausbreitmaßen von mindestens 63 cm F6 sehr fließfähig. Bis zu einer Abbindezeit von 45 Minuten entsprechen die Messresultate des Salzbetons der Ausbreitklasse F6, nach 60 Minuten der Ausbreitklasse F5 und F4 und nach 90minütiger Abbindezeit der Ausbreitklasse F4.

**4.4 Fließwinkel**

Der Fließwinkel erlaubt Aussagen zum Ausbreitverhalten des Frischbetons, zum Verfüllvorgang der Grubenbaue sowie zur Firstanbindung. Die Bestimmung erfolgte in einer 2 m langen Plexiglasrinne (Breite: 277 mm, Höhe: 291 mm), die von einer Endseite über einen Schlauch mit ca. 35 Liter Suspension befüllt wurde. Füllstandsmessungen erfolgten im Abstand von 10 cm, an den Wandungen sowie in der Mitte der Fließrinne. Die ermittelten Füllstände zeigt Abbildung 4.4-1. Der Fließwinkel beträgt 2,15 %, entsprechend 1,2 Grad.

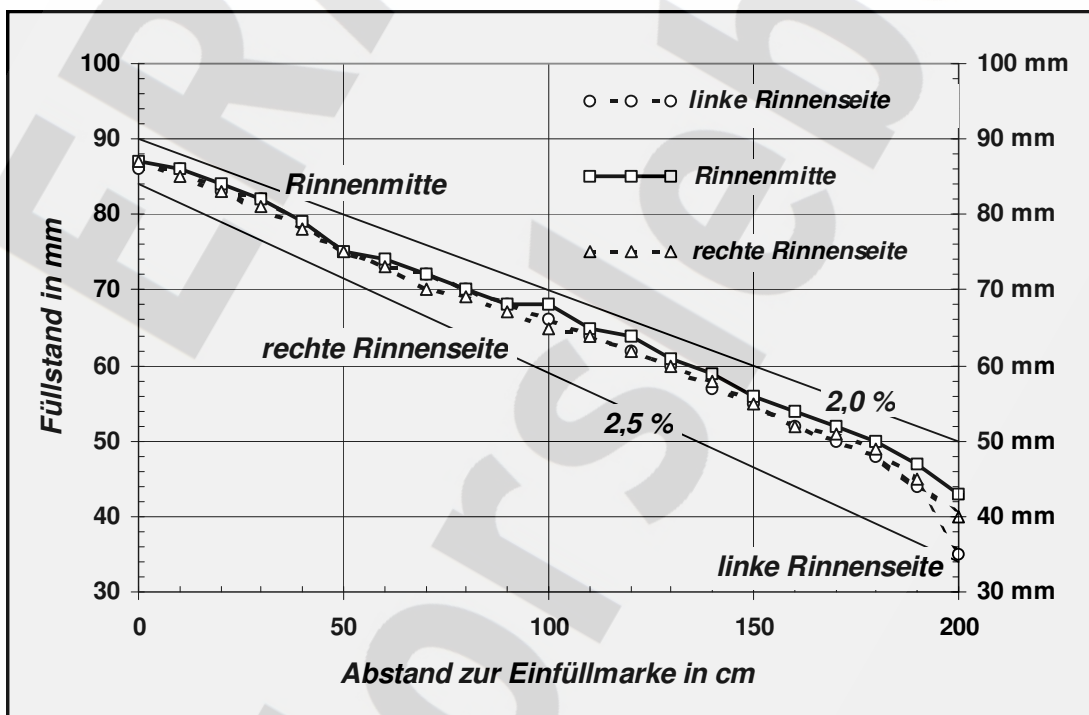


Abbildung 4.4-1: Füllstände des Frischbetons in Abhängigkeit des Abstandes der Messpunkte zur Einfüllmarke am linken und rechten Rand sowie in der Mitte der Fließrinne.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNA AANN	AANNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	


## 5 Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten

Im Rahmen der Förderversuche bei variierendem Wassergehalt (Wassergehaltsabweichungen von  $-4$  bis  $+10$  %, vgl. Kapitel 4.2) erfolgten Untersuchungen zur Kornsedimentation der Salzbetonsuspension mit Salzzuschlag der Kornverteilung 2 (breites Körnungsband). Hierzu wurden nach jedem Versuch Materialproben in 1000-ml-Standzylinder (hohe Form) eingefüllt und diese anschließend abgedeckt. Nach dem Abbinden des Salzbetons wurden die Proben den Standzylindern entnommen und entlang der Längsachse gesägt. Beispiele für Schnittflächen der Prüfkörper sind dargestellt in Abbildung 5-1.

Die visuelle Beurteilung der Probeoberflächen ergab, unabhängig vom Anteil des Zugabewassers der Salzbetonsuspension ein einheitliches Korngefüge der Materialproben und folglich keine Anzeichen für Kornsedimentation bzw. Absetzerscheinungen (vgl. Kapitel 7).



Abbildung 5-1: Schnittflächen der Salzbetonproben aus 1000-ml-Standzylindern mit Heißlöse- und Flotationsrückstand als Salzzuschlag (Kornverteilung 2). Von links nach rechts sind dargestellt Salzbetone mit einem Wasseranteil von (Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert in Klammern)  $12,9$  % ( $-4$  %),  $13,2$  % ( $-2$  %),  $13,4$  % ( $0$  %),  $13,8$  % ( $+4$  %),  $14,1$  % ( $+6$  %) und  $14,5$  % ( $+10$  %). Die Höhe der Proben beträgt  $36$  cm und die Breite etwa  $11$  cm.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

## 6 Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung

Die Gesamtmenge an Lösung, die ein Baustoff abgeben kann, wird als Überschusslösung bezeichnet. Die Überschusslösung tritt nur im frischen Zustand an den jeweiligen Grenzflächen des Baustoffs auf. Die Ursache zur Entstehung von Überschusslösung ist, wenn die der Betonmischung zugegebene Wassermenge vor dem Abbinden vom Baustoff nicht vollständig chemisch oder physikalisch gebunden werden kann.

Die Untersuchungen zur Überschusslösung erfolgten in geschlossenen Zylindern, so dass die Überschusslösung nur in Form von Überstandslösung auf der Baustoffoberfläche anfiel. In der Betontechnologie wird die Bildung von Überstandslösung auch als „Bluten“ bezeichnet. Die Untersuchungen erfolgten in Abhängigkeit

- des Wasseranteiles der Suspension und
- der Mischzeit in einem Labormischer.

Die Untersuchungen in Abhängigkeit der Mischzeit hatten des Weiteren das Ziel zu prüfen, ob der Salzbeton das Zugabewasser im Verlauf der Hydratation vollständig bindet. Eine Beurteilung dieses Sachverhalts ist bei Baustoffen, denen auch Flugaschen als Bindemittel zugefügt werden, mit Hilfe des  $W/(Z+F)$ -Wertes oder des Zementäquivalentwertes ( $W/(Z+0,4\cdot F)$ ) möglich. Der  $W/Z$ -Wert der Rezeptur M3 beträgt etwa 1,28 und der  $W/(Z+F)$ -Wert ca. 0,38 (vgl. Tabelle 2-1). Der Zementäquivalentwert ergibt sich zu 0,66, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass die angegebene Formel für Normalbetone mit einem Flugaschegehalt von höchstens 0,25·Z entwickelt wurde. Anhand der berechneten Werte ist davon auszugehen, dass die Rezeptur über eine ausreichende Kapazität verfügt die Menge an Zugabewasser im Verlauf der Hydratation vollständig chemisch und physikalisch zu binden. Steinkohlenflugaschen nehmen jedoch meist, auf Grund ihres latent hydraulischen Verhaltens, erst zu einem späteren Zeitpunkt am Hydratationsprozess teil.

Die Messungen der Überstandslösung erfolgten in 1.000-ml-Standzylindern, die nach dem Befüllen mit Salzbeton mit Folien abgedeckt wurden. Die Messgenauigkeit beträgt bei diesem Verfahren 1 mm.

Zur Bestimmung der Menge an Überstandslösung in Abhängigkeit des Wassergehalts der Suspension (von -4 bis +10 %) wurde der Frischbeton nach den Förderversuchen im Rohrviskosimeter in die Standzylinder gefüllt. Nach 24 Stunden wurde visuell die Höhe der überstehenden Flüssigkeitsschicht bestimmt. Die Messwerte sind zusammengestellt in Tabelle 6-1 und graphisch dargestellt in Abbildung 6-1.



Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Wasseranteil der Salzbetonrezeptur [kg/m <sup>3</sup> ]					
243	248	252	261	265	274
Prozentuale Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert (252 kg/m <sup>3</sup> )					
-4	-2	0	+4	+6	+10
Höhe Flüssigkeitsschicht [mm]					
0	1	5	8	7	13

Tabelle 6-1: Schichtdicke der Überstandslösung nach Messungen in 1.000-ml-Standzylindern in Abhängigkeit des Wasseranteiles des Salzbetons bzw. der prozentualen Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert (Standzeit 24 Stunden). Absetzversuche im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter.

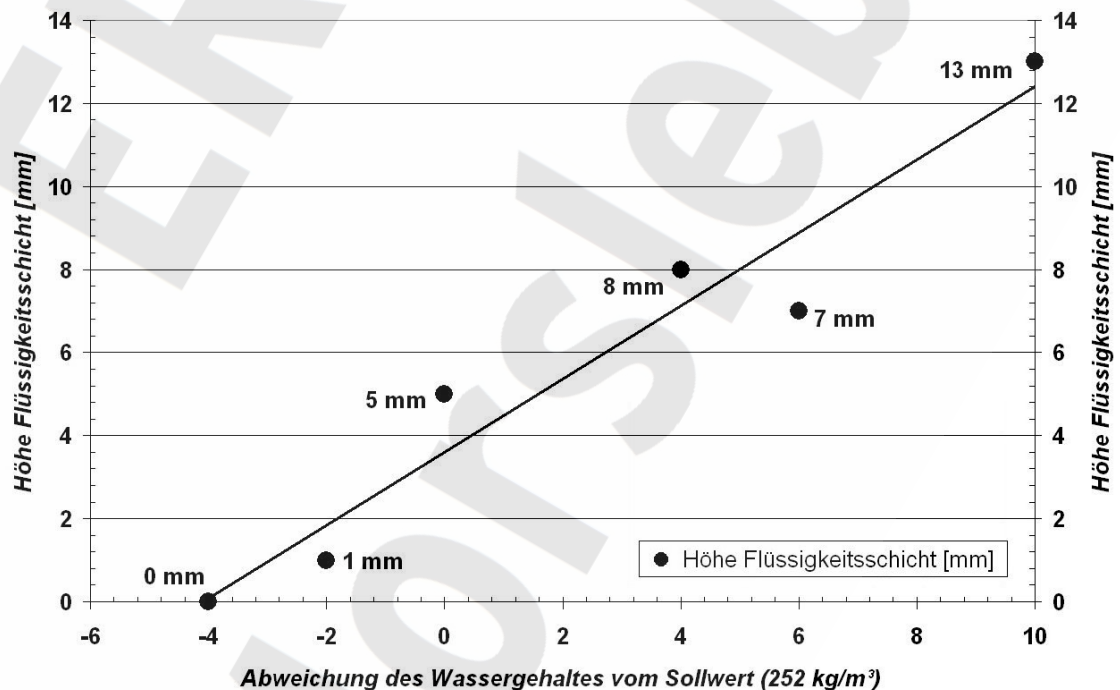


Abbildung 6-1: Höhe der Flüssigkeitsschichten (Überstandslösung) nach Messungen in 1.000-ml-Standzylindern in Abhängigkeit des Wasseranteiles der Salzbetonrezeptur in Massen-% (Standzeit 24 Stunden). Absetzversuche der Suspension im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Die Bestimmungen mit bereits im Rohrviskosimeter geförderter Suspension zeigen nach Tabelle 6-1, dass die Menge an Überstandslösung mit dem Anteil an Anmischflüssigkeit nahezu proportional zunimmt. Für den Wasseranteil der Originalrezeptur (Wassergehaltsabweichung 0 %) beträgt der Messwert 5 mm.

Messresultate der Überstandslösung in Abhängigkeit der Mischzeit im Labormischer fasst Tabelle 6-2 zusammen.

Mischzeit [Minuten]	Versuchsdauer (Abbindezeit) [Tage (d) / Stunden (h)]					
	0 d; 5 h	2 d; 5 h	3 d; 5 h	6 d; 5 h	7 d; 5 h	9 d; 5 h
2	0	0	0	0	0	0
4	2	2	2	1	1	0
8	3	3	2	2	1	0

Tabelle 6-2: Höhe der Flüssigkeitsschichten (Überstandslösung) in Millimeter nach Messungen in 1.000-ml-Standzylindern in Abhängigkeit der Mischzeit im Labormischer.

Die Messwerte nach Tabelle 6-2 belegen, dass

- die Menge an Überstandslösung mit zunehmender Mischzeit, d.h. Eintrag an Scherenergie ansteigt,
- die Bildung von Überstandslösung unabhängig von der Mischzeit spätestens nach 5 Stunden abgeschlossen ist und
- die Überstandslösung im weiteren Verlauf des Hydratationsprozesses vom Salzbeton vollständig gebunden wird.

Der Einfluss der Scherenergie wird insbesondere bei einem Vergleich der Zahlenwerte von Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 deutlich. So ergaben die Messungen des im Labormischers konditionierten Materials eine maximale Höhe der Flüssigkeitsschicht (Überstandslösung) von 3 mm, während die Probe der Originalrezeptur nach Abschluss des Förderversuches im Rohrviskosimeter auf eine Höhe der Flüssigkeitsschicht von 5 mm kam.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 28

## 7 Übertragung von Untersuchungsergebnissen des Salzbetons M2


Im Vergleich zum Salzbeton M3 erfolgten mit dem Salzbeton M2 ergänzende Untersuchungen, die sich auf die Themenbereiche Rheologie, Sedimentationsverhalten sowie Bildung von Überstandslösung beziehen. Erläuterungen der Versuchsdurchführungen und -ergebnisse enthält der Bericht „Ergänzende Untersuchungen – Referenzmaterial Salzbeton M2“ /8/. Die bei den ergänzenden Untersuchungen gewonnenen Resultate besitzen auch für den Salzbeton M3 Gültigkeit, da eine Übertragbarkeit aus den folgenden Gründen gewährleistet ist:

- Zur Herstellung der Rezepturen M2 und M3 werden identische Ausgangsstoffe verwendet. Somit sind auch die Dichten, die Korngrößenverteilungen sowie die mineralogischen und chemischen Stoffbestände der Komponenten identisch.
- Die Herstellung und Konditionierung der Salzbetone erfolgen nach gleicher Vorgehensweise.
- Die Salzbetondichten (ohne Luftporenanteile) sind mit jeweils 1.995 kg/m<sup>3</sup> identisch.
- Der Bindemittelgehalt (Zement + Flugasche) beträgt in beiden Fällen 656 kg/m<sup>3</sup>.
- Hinsichtlich der Salzgrus- und Wasseranteile bestehen nur vernachlässigbare Unterschiede.
- Der W/(F+Z)-Wert der Rezepturen ist nahezu identisch (M2: 0,41; M3: 0,38).
- Die Salzbetone M2 und M3 weisen unter Berücksichtigung der Schwankungsbreiten ein vergleichbares rheologisches Verhalten auf.
- Im Rahmen der Förderversuche wurden für beide Salzbetone vergleichbare Fließgrenzen ermittelt.

Der Salzbeton M3 unterscheidet sich im Vergleich zum Salzbeton M2 lediglich im Verhältnis von Zement und Flugasche. Dieses beträgt beim Salzbeton M3 ein Drittel zu zwei Drittel und beim Salzbeton M2 jeweils die Hälfte.

Im Rahmen der bergbaulichen Gefahrenabwehrmaßnahme Zentralteil (bGZ) erfolgten während des Einsatzes von Salzbeton Messungen zur Quantifizierung der Menge an Überschusslösung. Befunde von Messungen sind im Folgenden aufgeführt und können zur Bewertung des Verhaltens von Salzbeton M3 herangezogen werden, da

- die Zusammensetzung des eingesetzten Salzbetons nahezu identisch mit der Rezeptur M2 ist und
- die an Stelle der Steinkohlenflugasche HKV verwendete Steinkohlenflugasche EFA Füller HM ebenso der DIN EN 450 /3/ entspricht.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 29

*Rheologische Untersuchungen im Rohrviskosimeter*

Förderversuche ergaben für die Rezepturen M2 und M3, dass im untersuchten Schwankungsbereich des Wassergehaltes (–4 % bis +10 %) der hydraulische Suspensionstransport unproblematisch ist (vgl. Kapitel 4.2 für Salzbeton M3). An Suspensionen der Rezeptur M2 erfolgten zusätzlich Förderversuche, die den Einfluss unterschiedlicher Korngrößenverteilungen des Salzzuschlages auf das rheologische Verhalten des Frischbetons zum Ziel hatten. Die Versuche zeigten, dass der Einfluss der Korngröße des Salzzuschlages von untergeordneter Bedeutung ist. Salzbetonsuspensionen, die ausschließlich Flotationsrückstand (< 2 mm) enthielten, wiesen tendenziell etwas höhere Druckverluste auf, die aber förder technisch ohne Relevanz sind. Suspension, zu dessen Herstellung ausschließlich grobkörniger Heißlöserückstand (< 20 mm) verwendet wurde, war nicht förderbar. Dies ist jedoch auf die versuchstechnischen Rahmenbedingungen, d.h. der Verwendung einer Rohrleitung der Nennweite DN 40 zurückzuführen.

*Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten*

Die Bewertung einer möglichen Sedimentation/Entmischung von Salzbetonkomponenten kann mit Hilfe der „Sedimentationsstabilen Korngröße“ erfolgen (Gl. 7.1). Die „Sedimentationsstabile Korngröße“ ist proportional zur Fließgrenze der Suspension und berechnet sich wie folgt:

$$d_{\max} = \sqrt[3]{\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \tau_0 / (\Delta\rho \cdot g)}. \quad (7.1)$$

mit

$d_{\max}$  maximale sedimentationsstabile Partikelgröße [m]

$g$  Gravitationsbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]

$\tau_0$  Fließgrenze [Pa]

$\Delta\rho$  Dichtedifferenz Suspension ( $\rho$ : 1.995  $\text{kg/m}^3$ ) zu Salzzuschlag (Halit: 2.168  $\text{kg/m}^3$ ), Steinkohlenflugasche (2.255 bis 2.271  $\text{kg/m}^3$ ) und Zement (2.974 bis 3.024  $\text{kg/m}^3$ ).

Abbildung 7-1 zeigt eine grafische Darstellung der nach Gl. (7.1) berechneten „Sedimentationsstabilen Korngröße“ in Abhängigkeit der Fließgrenze für die jeweiligen Salzbetonkomponenten.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 30

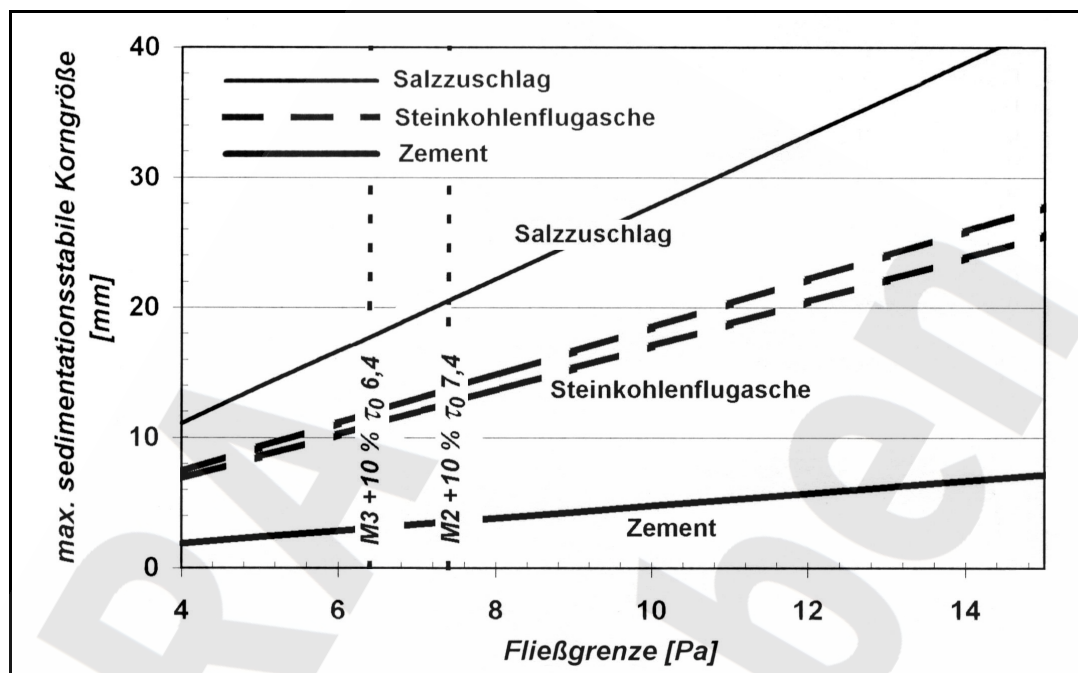



Abbildung 7-1: Abhängigkeit der maximalen sedimentationsstabilen Korngröße von der Fließgrenze ( $\tau_0$ ) der Suspension (vgl. Abbildungen 2-1 und 2-2, Kapitel 2).

Im Vergleich zu den in den Abbildungen 2-1 und 2-2 dargestellten Korngrößenverteilungen der Ausgangsstoffe sind ab einer Fließgrenze von etwa 5 Pa keine Effekte der Kornsedimentation zu erwarten. Die im Rahmen der Förderversuche ermittelten Fließgrenzen für die Salzbetone M3 und M2 lagen in Abhängigkeit der Versuchsrandbedingungen zwischen 6 und 30 Pa (vgl. Tabelle 4.2-4). Selbst bei einer Wassergehaltsabweichung von +10 % wurden für beide Salzbetone noch immer Fließgrenzen von 6 bis 7 Pa ermittelt (vgl. Tabelle 4.2-3), so dass eine Sedimentation von Salzbetonbestandteilen bzw. deren Entmischung ausgeschlossen werden kann.

Zusätzlich wurden mit den Salzbetonen M2 und M3 Versuche zur Kornsedimentation bei veränderten Wassergehalten in Zylindern durchgeführt. Die Untersuchungen zur Kornsedimentation (vgl. Kapitel 5 für Salzbeton M3) ergaben an abgebundenen Proben der Salzbetone M2 und M3 keine Anzeichen für Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen. Proben des Salzbetons M2, mit feinkörnigem Flotationsrückstand (< 2 mm, Kornverteilung 1) als Salzzuschlag zeigten ebenso ein einheitliches Korngefüge und bestätigen somit diesen Befund.

Zur Untersuchung möglicher Entmischungserscheinungen der Salzbetonkomponenten im Verlauf der Verfüllung untertägiger Hohlräume erfolgte mit der Rezeptur M2 im ERAM ein Freifallversuch. Hierbei wurden etwa 12,5 m<sup>3</sup> Suspension über eine Höhe von 37 m verstrützt und in einer Schalung aufgefangen (Grundfläche: ca. 3,0 m·3,2 m, Höhe ca. 1,5 m). Eine Seite der Schalung bestand aus Mauerwerk und eine zweite aus dem Steinsalzstoß. In den

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNA AANN	AANNNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 31

Versatzkörper wurden nach mindestens 21tägiger Abbindezeit 20 Horizontalbohrungen und zwei geneigte Bohrungen gestoßen. Schräg in die Stöße gestoßene Bohrungen zeigten eine formschlüssige Anbindung des Versatzkörpers am Steinsalzstoß bzw. am Mauerwerk. Die visuelle Begutachtung und eine digitale Bildanalyse der Bohrkernoberflächen sowie die Bestimmung physikalischer Baustoffeigenschaften (statischer Elastizitätsmodul, einaxiale Zylinderdruckfestigkeit) an 28 Tage abgebundenen Proben, die aus den Bohrkernen gewonnen wurden, ergaben, dass Entmischungen der Salzbetonkomponenten auszuschließen sind. Einzelne Brüche des Kernmaterials aus dem Versatzkörper waren auf den Bohrvorgang zurückzuführen. Der RQD-Index (Rock Quality Designation) betrug somit 100 %.


*Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung*

Die Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung in Abhängigkeit des Wassergehaltes (1.000 ml-Standzylinder) ergaben, dass sich nach einer Standzeit von 24 Stunden auf den Betonoberflächen der Rezepturen M2 und M3 vergleichbare Mengen an Überstandslösung bilden (vgl. Kapitel 6 für Salzbeton M3). Die Lösungsmenge steigt mit dem Anteil an Zugabewasser nahezu proportional an.

Weitere Versuchsreihen im Technikumsmaßstab hatten zum Ziel das Absetzverhalten der Rezeptur M2 (Wassergehalt entsprach dem Sollwert), zu deren Herstellung ein Gemisch aus Flotations- und Heißlöserückständen (Kornverteilung 2) verwendet wurde, in Prüfformen unterschiedlicher Höhe (170 mm bis 6.110 mm) und Durchmessers (50 mm bis 500 mm) zu bestimmen. Die Untersuchungen ergaben, dass sich auf der Betonoberfläche im frischen Zustand eine Flüssigkeitsschicht (Überstandslösung) bildet, deren Höhe unabhängig von der Oberfläche sowie der Einbauhöhe im Durchschnitt ca. 1 cm beträgt. Die maximalen Schichthöhen der Überstandslösung wurden nach Standzeiten von 8 bis 24 Stunden ermittelt. Nach 4 Tagen war unter den gegebenen Versuchsrandbedingungen in 9 von 12 Versuchen keine Lösungsschicht mehr nachweisbar.

Überstandslösung wurde im Rahmen der Technikumsversuche beprobt und chemisch analysiert. Die Lösung ist gesättigt an Halit (NaCl), Anhydrit (CaSO<sub>4</sub>), Gips (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) und übersättigt an Calcit (CaCO<sub>3</sub>). Auf Grund der Sättigungsverhältnisse sind Anlöseerscheinungen von Anhydrit- und Carbonatgesteinen sowie von Steinsalz im Rahmen der Verfüllung untertägiger Hohlräume vernachlässigbar.

Zur Bestimmung der Gesamtmenge an Überschusslösung wurden Proben des bei der bGZ zum Einsatz kommenden frischen Salzbetons in Rohre gefüllt, deren untere Öffnungen mit Kunststoffsiebgewebe (Maschenweite 30 µm) bespannt wurden. Die Rohre wurden während der Messung auf Abstandhalter gestellt, damit das Ausfließen der Porenlösung möglichst wenig behindert wird und die abseigernde bzw. drainierende Lösung in Auffanggefäße gesammelt werden kann. Die Messungen erfolgten bei Raumtemperatur.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 32

Bei einer Messreihe mit homogenisierten Ausgangsstoffen (identischer Wasseranspruch) begannen die Messungen unmittelbar nach dem Anmischen der Suspensionen. Es wurde keine zusätzliche Scherenergie in den Salzbeton eingebracht. Die Messungen ergaben, dass


- Überstandslösung nicht auftrat, d.h. die Menge an Drainagelösung der Gesamtmenge an Überschusslösung entsprach,
- der Anteil an Drainagelösung am Salzbeton von 0,7 Massen-% (Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert –6 %) auf etwa 1,4 Massen-% (Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert +10 %) anstieg und
- die Menge im Salzbeton verbleibender Lösung (Differenz der Gesamt- und Drainagelösung) von 16,8 Massen-% Salzbeton auf 18,6 Massen-% Salzbeton zunahm.

Weitere Untersuchungen ergaben, dass mit zunehmendem Eintrag an Scherenergie, z.B. in Folge eines Transportes der Suspension in Rohrleitungen (vgl. Kapitel 6), die Menge an Überschusslösung (Drainagelösung) ansteigt.

Mit dem Ziel bei vergleichbarem Druckverlust während des Rohrleitungstransportes die Menge an Überschusslösung signifikant zu reduzieren, erfolgten Modifikationen des Salzbetons. Umfangreiche Erfahrungen liegen zum Einsatz von Calciumchlorid-Lösung (etwa 15 bis 25 kg/m<sup>3</sup> 34 %ige CaCl<sub>2</sub>-Lösung) vor. Die Befunde belegen, dass bei Gewährleistung der Materialanforderungen an den Salzbeton

- mit zunehmender Menge an Calciumchlorid ein Trend zur Abnahme der Menge an Drainagelösung festzustellen ist und
- in Folge der Verwendung von Calciumchlorid-Lösung im Vergleich zum nicht modifizierten Salzbeton die Menge an Drainagelösung um mehr als die Hälfte reduziert werden kann.

Zusätzliche Indexuntersuchungen ergaben auch beim Einsatz weiterer Betonzusatzmittel und -stoffe vergleichbare Resultate.

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

**8 Physikalische Untersuchungen**

An Festbetonproben wurden neben der Dichte physikalische Materialeigenschaften ermittelt, die das elastische Verhalten des Salzbetons im einaxialen Spannungszustand charakterisieren, wie der statische Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl. Weitere Untersuchungen dienten zur Ermittlung der einaxialen Druck- und Zugfestigkeit.

**8.1 Festmaterialdichte**

Die Festmaterialdichte eines Baustoffes ergibt sich aus den Mengenverhältnissen und spezifischen Dichten seiner Komponenten unter Berücksichtigung des Porenvolumens (vgl. Tabelle 2-1, Tabelle 4.2-2).

Die Bestimmungen erfolgten nach DIN 1048, Teil 5 (Abschnitt 7.1 /9/) bei einem Prüfkörperalter von 7 bis 245 Tagen. Proben, deren Abbindezeit 7 bis 28 Tage betrug, lagerten bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 %. Prüfkörper, mit einem Betonalter von 28 bis 245 Tagen, lagerten bei 40 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30 %.

Die Mittelwerte der Messresultate sind zusammengestellt in Tabelle 8.1-1. Für die Proben, die bei 20 °C lagerten (Betonalter 7 bis 28 Tage) ergibt sich im Durchschnitt ein Wert von  $1.950 \pm 7 \text{ kg/m}^3$ . Bei 40 °C gelagerter Salzbeton (Betonalter 28 bis 245 Tage) kommt dagegen auf durchschnittlich  $1.953 \pm 4 \text{ kg/m}^3$ . Eine Beeinflussung der Betondichte in Abhängigkeit der Lagerungsbedingungen der Prüfkörper ist somit nicht erkennbar. Der Mittelwert sämtlicher Messwerte beträgt  $1.953 \pm 5 \text{ kg/m}^3$ .

Abbindezeit [Tage]	7	14	28				
Festmaterialdichte [ $\text{kg/m}^3$ ]	1.946	1.956	1.950				
Lagerung bei 20 °C, 65 % relative Luftfeuchtigkeit							
Abbindezeit [Tage]			28	42	56	90	245
Festmaterialdichte [ $\text{kg/m}^3$ ]			1.956	1.954	1.954	1.953	1.949
Lagerung bei 40 °C, 30 % relative Luftfeuchtigkeit							

Tabelle 8.1-1: Festmaterialdichten und Lagerungsbedingungen von Salzbetonproben nach Abbindezeiten von 7 bis 245 Tagen in  $\text{kg/m}^3$ .



Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

8.2 Statischer E-Modul

Der Elastizitätsmodul gibt das Verhältnis von Spannung zu elastischer Verformung an und erlaubt Aussagen zur Steifigkeit und Stützwirkung des Baustoffes. Die Bestimmungen erfolgten nach DIN 1048, Teil 5, Abschnitt 7.5 /9/. Das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser der Zylinder betrug 2,0 bis 2,3. Abweichend von DIN 1048 wurde bei den Versuchen der 7 bis 14 Tage alten Proben die Prüfspannung und die Belastungsgeschwindigkeit reduziert. Die Messresultate sind zusammengestellt in Tabelle 8.2-1 (vgl. Abbildung 8.2-1). Es handelt sich um Mittelwerte von jeweils drei Messungen mit Ausnahme der Bestimmungen nach Abbindezeiten von 270 Tagen (6 Prüfkörper) und 530 Tagen (5 Prüfkörper). Die Einzelwerte enthält Tabelle 10-5. Festzustellen ist eine deutliche Zunahme des Elastizitätsmodules von 500 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen Abbindezeit auf maximal 20.900 N/mm<sup>2</sup> bei einem Prüfalter von 530 Tagen.

Abbindezeit [Tage]	7	14	28			
Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]	500	3.100	5.400			
Lagerungstemperatur [°C]	20	20	20			
Abbindezeit [Tage]			28	90	270	530
Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]			7.800	10.200	18.700	20.900
Lagerungstemperatur [°C]			R.T.	40 °C	R.T.	k.A.

Tabelle 8.2-1: Statische Elastizitätsmoduli und Lagerungstemperaturen von Proben nach 7 bis 530 Tagen Abbindezeit; R.T.: Raumtemperatur, k.A.: keine Angabe.

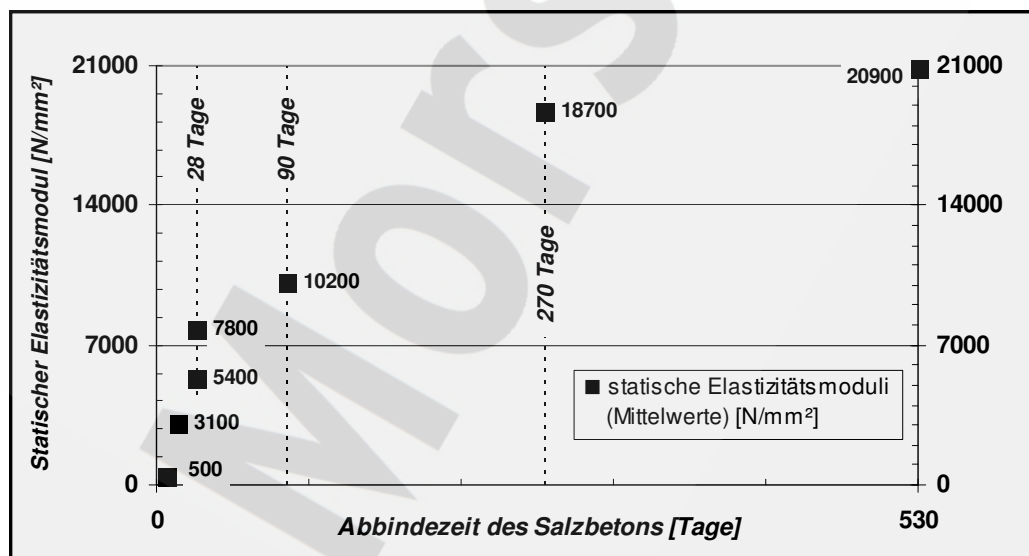



Abbildung 8.2-1: Statische Elastizitätsmoduli des Salzbetons nach Abbindezeiten von 7 bis 530 Tagen in N/mm<sup>2</sup>. Mittelwerte der Versuchsreihen.

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 35

Eine weitere Versuchsreihe erfolgte nach Abschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter. Eine Beschreibung der Versuchsdurchführung enthält Kapitel 4.2. Resultate liegen vor für Proben nach einer Abbindezeit von 14, 28 und 177 Tagen. Das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser der Zylinder betrug 2,0. Die Prüfkörper wurden bei 20 °C und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Eine Ausnahme sind jedoch die nach 177 Tagen geprüften Zylinder. Diese wurden nach 28 Tagen getrocknet und 7 Tage vor der Prüfung in gesättigter NaCl-Lösung gelagert. Die Messresultate sind, in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Salzbetonsuspension, zusammengestellt in Tabelle 8.2-2. Bei den 177 Tage alten Proben handelt es sich um Mittelwerte von drei Messungen. Das W/(F+Z)-Verhältnis beträgt bei einer Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert von -4 % 0,37 und bei einer Abweichung von +10 % 0,42 (vgl. Tabelle 4.2-1).


Abw. Wassergehalt vom Sollwert	Wassergehalt		Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]		
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Massen-%]	Abbindezeit des Salzbetons [Tage]		
			14	28	177
- 4 %	243	12,2	15.510	11.120	—
0 %	252	12,6	—	15.820	9.130
+ 4 %	261	13,0	—	8.910	—
+ 10 %	274	13,7	11.480	13.400	—
Mittelwert des Elastizitätsmodules [N/mm <sup>2</sup> ]			13.500	12.310	9.130
Lagerung bei 20 °C					

Tabelle 8.2-2: Statischer Elastizitätsmodul des Salzbetons nach 14, 28 und 177 Tagen Abbindezeit in Abhängigkeit der Abweichung des Wassergehaltes der Suspension vom Sollwert.

Nach Tabelle 8.2-2 ist keine Abhängigkeit des Elastizitätsmodules von der Menge an Anmachwasser festzustellen. Die Messwerte liegen im Bereich üblicher Streuungen von Normalbeton.

### 8.3 Querkontraktionszahl

Das Verhältnis der Querdehnung zur Längsverformung eines Baustoffkörpers wird durch die Querkontraktionszahl gekennzeichnet. Die Querkontraktionszahl hängt von der Betonzusammensetzung sowie vom Erhärtungs- und Feuchtigkeitszustand der Prüfkörper ab. Sie wurde im Rahmen der Untersuchungen des Elastizitätsmodules (vgl. Kapitel 8.2) nach DIN 1048, Teil 5 ermittelt /9/. Die Lagerungsbedingungen der Proben entsprachen 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit. Die Herstellung der Proben, die nach 177 Tagen geprüft wurden, erfolgte im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter, wobei die Menge des Zugabewassers der Originalrezeptur entsprach (12,6 Massen-%). Bei diesen Zylindern wurde die Luftfeuchtig-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

keit während der Lagerung variiert. Sie betrug in den ersten 28 Tage 100 % (relativ). Es erfolgte die Trocknung der Proben und 7 Tage vor der Prüfung eine Lagerung in gesättigter NaCl-Lösung. Die Messresultate sind aufgeführt in Tabelle 10-5. Mittelwerte von jeweils drei bzw. von zwei (Abbindezeit 177 Tage) Bestimmungen fasst Tabelle 8.3-1 zusammen.

Abbindezeit [Tage]	7	14	28	177
Querkontraktionszahl	0,21	0,25	0,26	0,26
Lagerungstemperatur	20 °C			

Tabelle 8.3-1: Querkontraktionszahlen des Salzbetons nach Abbindezeiten von 7 bis 177 Tagen.

**8.4 Einaxiale Druckfestigkeit**

Die Druckfestigkeit zählt zu den bautechnisch wichtigsten Materialeigenschaften. Sie wird von den Ausgangsstoffen und der Betonrezeptur bestimmt und ist von den Lagerungsbedingungen der Prüfkörper abhängig. Zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung und des Tragverhaltens des Materiales erfolgten Bestimmungen der Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit. Im Folgenden werden die Durchführung und die Resultate dieser Verfahren getrennt behandelt. Eine Vergleichbarkeit ist jedoch gegeben, da sich die Messergebnisse mit Hilfe von Formfaktoren überführen lassen (vgl. Kapitel 8.4.3).

**8.4.1 Zylinderdruckfestigkeit**

Geprüft wurden Proben mit einem Verhältnis der Höhe zum Durchmesser von 2,0 bis 2,2 nach Abbindezeiten von 7 bis 530 Tagen gemäß DIN 1048, Teil 5, Abschnitt 7.2 /9/. Bei der Versuchsserie, die 7 bis 28 Tage alte Proben umfasste, wurden jeweils vier Prüfkörper verwendet. Bei den restlichen Bestimmungen konnte, mit Ausnahme der 270 d- (6 Prüfkörper) und der 530 d-Druckfestigkeit (5 Prüfkörper) für jedes Betonalter ein Durchschnittswert auf der Basis von drei Einzelmessungen berechnet werden. Die Einzelwerte sind in Tabelle 10-6 aufgeführt. Die Mittelwerte der Messresultate enthält Tabelle 8.4-1 und sind graphisch dargestellt in Abbildung 8.4-1.

Die Prüfungen ergaben eine Zunahme der Druckfestigkeit von 1,46 N/mm<sup>2</sup> (7 Tage) auf maximal 32,3 N/mm<sup>2</sup> (245 Tage). Als Referenzwert für die Druckfestigkeit gilt wegen der Verwendung eines Zementes CEM III/B die 56 Tage-Festigkeit von 19,6 N/mm<sup>2</sup>.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Abbindezeit [Tage]	7	14	28	28	28	42
Einaxiale Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	1,46	5,88	10,3	16,4	12,2	18,0
Lagerungstemperatur [°C]	20	20	20	40	R.T.	40
Abbindezeit [Tage]	56	90	90	245	270	530
Einaxiale Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	19,6	22,2	21,6	32,3	26,9	30
Lagerungstemperatur [°C]	40	40	20	40	R.T.	k.A.

Tabelle 8.4-1: Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit und Lagerungstemperatur 7 bis 530 Tage alter Prüfkörper; k.A.: keine Angabe. R.T.: Raumtemperatur.

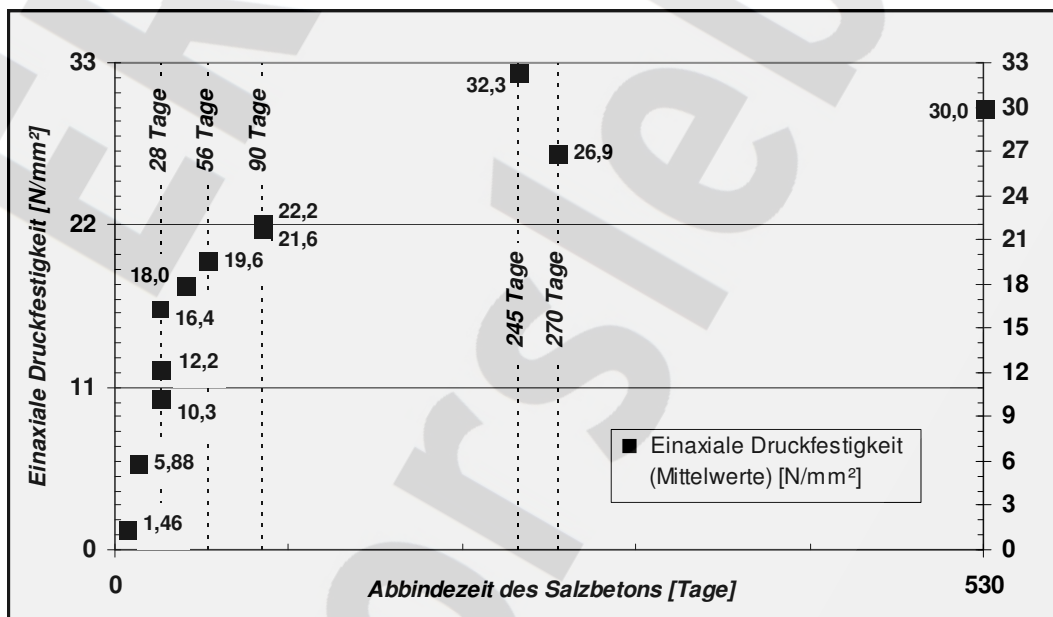



Abbildung 8.4-1: Einaxiale Zylinderdruckfestigkeiten des Salzbetons nach Abbindezeiten der Probekörper von 7 bis 530 Tagen. Mittelwerte der Versuchsreihen.

### 8.4.2 Würfeldruckfestigkeit

Zur Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit diente Material, das zuvor im Rohrviskosimeter gefördert wurde. Die Prüfung erfolgte, abweichend von DIN 1048, Teil 5 (Abschnitt 7.2) /9/, entsprechend DIN EN 206, Teil 1 (Abschnitt 5.5.1.1) /6/, an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm. Die Probenlagerung erfolgte bei einer Temperatur von 20 °C. Die Luftfechtig-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 38

keit wurde jedoch variiert. Sie betrug in den ersten 28 Tagen 100 % (relativ). Die nach 177 Tagen geprüften Würfel wurden danach getrocknet und 7 Tage vor der Prüfung in gesättigter NaCl-Lösung gelagert. Die Messresultate sind zusammengestellt in Tabelle 8.4-2. Bei der 177 Tage-Druckfestigkeit handelt es sich um einen Mittelwert von drei Messungen.

Abw. Wassergehalt vom Sollwert	Wassergehalt		Einaxiale Würfeldruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]				
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Massen-%]	Abbindezeit des Salzbetons [Tage]				
			3	7	14	28	177
- 4 %	243	12,2	0,39	1,49	6,66	14,5	—
0 %	252	12,6	—	2,20	4,43	15,2	16,3
+ 4 %	261	13,0	—	2,01	5,20	16,7	—
+ 10 %	274	13,7	—	1,17	4,41	10,6	—
Mittelwert der Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]			0,39	1,72	5,18	14,3	16,3
Lagerung bei 20 °C							

Tabelle 8.4-2: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit des Salzbetons nach 3 bis 177 Tagen Abbindezeit in Abhängigkeit der Abweichung des Wassergehaltes der Suspension vom Sollwert.

Nach Tabelle 8.4-2 ist eine Zunahme der Druckfestigkeit auf maximal 16,7 N/mm<sup>2</sup> (Abbindezeit 28 Tage) festzustellen. Eine eindeutige Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Wasseranteil der Salzbetonsuspension liegt nicht vor. Tendenziell weist der Salzbeton mit höheren Wassergehalten eine geringfügig niedrigere Druckfestigkeit auf. Allerdings variieren die Messwerte im Rahmen normaler Streuungen eines Normalbetons.

### 8.4.3 Vergleich der Versuchsergebnisse zur einaxialen Druckfestigkeit

Die folgenden Abschnitte enthalten einen Vergleich der Versuchsergebnisse zur einaxialen Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit. Da bei identischen Abbindezeiten die einaxiale Druckfestigkeit mit der Lagerungstemperatur zunimmt, wurden ausschließlich Messwerte von Prüfkörpern berücksichtigt, die bei 20 °C bzw. bei Raumtemperatur lagerten (vgl. Kapitel 11.2.1). Zur Umrechnung der Würfel- in die entsprechenden Zylinderdruckfestigkeiten diente die Gl. (8.1):


$$\beta_C = \beta_{w,20cm}/1,18 = \beta_{w,15cm} \cdot 0,95/1,18 = \beta_{w,15cm}/1,24 \quad (8.1)$$

mit

$\beta_C$  Einaxiale Druckfestigkeit eines Zylinders (Durchmesser 15 cm; Höhe 30 cm)

$\beta_{w,15cm}$  Einaxiale Druckfestigkeit eines Würfels (Kantenlänge 15 cm)

$\beta_{w,20cm}$  Einaxiale Druckfestigkeit eines Würfels (Kantenlänge 20 cm)

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Die Mittelwerte der Versuchsreihen sind in Abhängigkeit der Abbindezeit der Prüfkörper zusammengestellt in Tabelle 8.4-3.

Abbindezeit [Tage]	3	7	14	28	90	177	270
Mittelwerte der Messresultate nach Kapitel 8.4.1 [N/mm <sup>2</sup> ]	—	1,46	5,88	11,3	21,6	—	26,9
Berechnete Zylinderdruckfestigkeiten der im Anschluss der Förderversuche hergestellten Prüfkörper [N/mm <sup>2</sup> ]	0,31	1,39	4,17	11,5	—	13,2	—

Tabelle 8.4-3: Zusammenstellung der Messresultate zur einaxialen Zylinderdruckfestigkeit. Mittelwerte der Versuchsreihen. Die angegebenen Zylinderdruckfestigkeiten der im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter hergestellten Proben wurden aus den im Versuch ermittelten Würfeldruckfestigkeiten berechnet.

Die Messwerte variieren, nach den jeweiligen Abbindezeiten, im Rahmen normaler Streuungen eines Normalbetons. Im Falle des Wertes der 177 Tage-Druckfestigkeit sind jedoch neben dem Schwankungsbereich des Messverfahrens auch die abweichenden Lagerungsbedingungen der Prüfkörper zu berücksichtigen. Die Proben wurden nach 28 Tagen getrocknet und 7 Tage vor der Prüfung in gesättigter NaCl-Lösung gelagert.

**8.5 Zugfestigkeit**

Die Bestimmung der zentrischen Zugfestigkeit erfolgte nach DIN 1048, Teil 5 /9/. Die Zylinder hatten eine Höhe (h) von ca. 170 mm und einen Durchmesser (d) von 80 mm (h : d = ca. 2,1). Die Messgrößen wurden an jeweils drei Prüfkörpern nach einer Lagerungsdauer von 56 und 90 Tagen ermittelt. Einzelwerte sind in Tabelle 10-6 aufgeführt. Die berechneten Mittelwerte finden sich in Tabelle 8.5-1.

Abbindezeit	56 Tage	90 Tage
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	1,35	1,44
Lagerung bei 40 °C und 30 % relative Luftfeuchtigkeit		

Tabelle 8.5-1: Zugfestigkeit und Lagerungsbedingungen der 56 und 90 Tage alten Prüfkörper.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



## 9 Thermodynamische Untersuchungen

Zur Herstellung des Salzbetons findet ein Zement niedriger Hydratationswärmeentwicklung Verwendung (CEM III/B - NW/HS/NA) sowie eine Flugasche, die über latent hydraulische Eigenschaften verfügt. Zur Charakterisierung der thermodynamischen Eigenschaften des Baustoffes erfolgten Bestimmungen der adiabatischen Temperaturentwicklung beim Abbinden, der spezifischen Wärmekapazität, der Wärmeleitfähigkeit, des Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie Untersuchungen zur Temperaturstabilität.

### 9.1 Adiabatische Temperaturerhöhung beim Abbinden

Die im Verlauf der Hydratation des Bindemittelsystems (Zement, Flugasche) stattfindenden chemischen Reaktionen sind exotherm. Die Bestimmung der Hydratationstemperaturen erfolgte im Labor unter adiabatischen Bedingungen, bei denen die Temperatur der hydratisierenden Probe proportional zur Wärmemenge ansteigt. Der Aufbau des adiabatischen Kalorimeters entsprach im Wesentlichen dem vom Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, im Jahr 1970 herausgegebenen „Vorläufigen Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter“ /10/. Es erfolgten zwei Messungen des Temperaturverlaufes. In Abbildung 9.1-1 sind die Messresultate graphisch dargestellt.

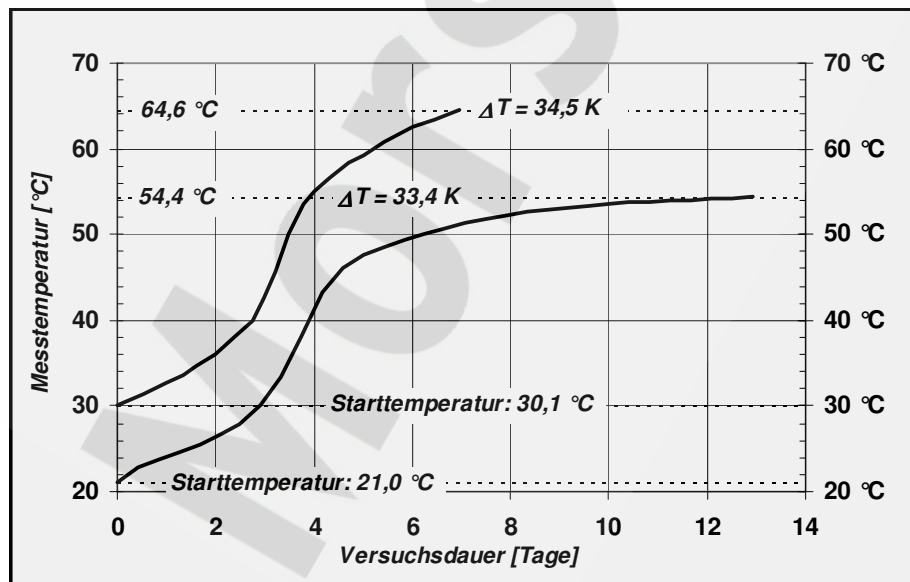



Abbildung 9.1-1: Adiabatische Temperaturerhöhung (Messtemperaturen in Grad Celsius) des Salzbetons im Verlauf des Abbindeprozesses.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Die ca. 7tägige (167 h) Bestimmung erreichte bei einer Starttemperatur von 30,1 °C eine adiabatische Temperaturerhöhung von 34,5 K. Bei einem weiteren Versuch, der bei einer Temperatur von 21,0 °C begonnen wurde, konnte nach ca. 13 Tagen eine Temperaturerhöhung von 33,4 K festgestellt werden.

## 9.2 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ist definiert als die Wärmemenge  $Q$ , die je Masseneinheit  $m$  bei einer Temperaturänderung von 1 K aufgenommen wird. Entsprechend den Rahmenbedingungen wird eine Wärmekapazität bei konstantem Volumen ( $c_V$ ) und konstantem Druck ( $c_P$ ) unterschieden.

Die Bestimmung der isobaren spezifischen Wärmekapazität ( $c_P$ ) wurden im Temperaturbereich von 20 bis 90 °C gemäß DIN 51007 mittels Differentialthermoanalyse (DTA) /11/ (vgl. /12/) durchgeführt. Die Einzelwerte sind in Tabelle 10-7 aufgeführt. Der Mittelwert der Messresultate beträgt 0,92 J/(g·K).

## 9.3 Wärmeleitfähigkeit


Die Wärmeleitfähigkeit gibt an, welche Wärmemenge in der Zeiteinheit  $t$  durch die Flächeneinheit  $A$  eines Materials von der Dicke  $d = 1$  m bei einer Temperaturdifferenz von 1 K hindurchgeht. Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit einem Heizplattengerät nach DIN 52612 (T01-79-B) ermittelt /13/. Als Probe diente eine Scheibe, die aus einem Zylinder (Länge 250 mm, Durchmesser 150 mm) mittig herausgeschnitten und anschließend bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurde. Als Mittelwert aus 4 Proben ergab sich eine Wärmeleitfähigkeit von 0,87 W/(m·K).

## 9.4 Wärmeausdehnungskoeffizient

Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient beschreibt die thermische, d.h. infolge Erhitzung bzw. Abkühlung, hervorgerufene Längenänderung eines Materiales in Bezug auf die Ursprungslänge.

Die Bestimmungen erfolgten nach DIN 51045, Teil 1 /14/ an 90 Tage alten Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm, die aus einem Zylinder mit dem Durchmesser von 150 mm (vgl. DIN EN 12390, Teil 1 /15/) trocken herausgesägt wurden. Die Prismen wurden während einer 2stündigen Aufheizphase von 40 auf 60 °C erwärmt und anschließend über eine Zeitdauer von 2 Stunden auf 0 °C gekühlt. Abschließend fand eine Messung bei 40 °C statt.




Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Die Einzelwerte sind in Tabelle 10-7 aufgeführt. Anhand der Messwerte ergibt sich für die Aufheizphase ein mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient von  $2,85 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ . Für das Temperaturintervall von 60 °C bis 0 °C (Abkühlungsphase) beträgt der durchschnittliche Wärmeausdehnungskoeffizient  $2,40 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ . Die bleibende Dehnung, d.h. der irreversible Anteil der Längenänderung, betrug nach 24 Stunden, bezogen auf eine Temperatur von 40 °C, 0,057 mm/m [‰].

**9.5 Temperaturstabilität**

Informationen zur Temperaturstabilität liefern drei Experimente. Im Rahmen der Versuche zur Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten wurden Salzbetonproben innerhalb von 2 Stunden von 40 auf 60 °C erwärmt und anschließend auf 0 °C gekühlt (vgl. Kapitel 9.4). Die zur Messung der Wärmeleitfähigkeit verwendeten Scheiben wurden bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und zur Abkühlung auf Raumtemperatur in einem geschlossenen Behälter gelagert (vgl. Kapitel 9.3). Der berechnete Massenverlust ergab sich zu 0,02 %. Mittels DTA/TG konnte bei Erhitzung von Proben auf 800 °C ein Massenverlust von  $10,5 \pm 0,7 \%$  nachgewiesen werden. Die aufgetretenen Massenverluste sind auf das Verdunsten bzw. Austreiben von Wasser zurückzuführen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

**10 Zusammenstellung der Materialkennwerte**

Der nachfolgende Überblick fasst die ermittelten Versuchsergebnisse für die einzelnen Parameter tabellarisch zusammen. Die Tabellen wurden entsprechend den Versuchsbeschreibungen im Bericht gegliedert.

In Tabelle 10-1 wird die Salzbetonrezeptur (Kapitel 2) beschrieben und auf die rheologischen Untersuchungen im Rotationsviskosimeter eingegangen (Kapitel 4), während Tabelle 10-2 Resultate der Messungen im Rohrviskosimeter zusammenfasst (Kapitel 4). Die Tabelle 10-3 enthält Untersuchungsergebnisse zum Ausbreitmaß (Kapitel 4.3), zum Fließwinkel (Kapitel 4.4) der Suspension sowie zum Sedimentationsverhalten (Kapitel 5) und zur Bildung von Überstandslösung (Kapitel 6). In Tabelle 10-4 sind Ergebnisse von Untersuchungen an Suspensionen der Rezeptur M2 zusammengestellt, die ebenso für das Referenzmaterial M3 Gültigkeit besitzen (Kapitel 7, vgl. /8/).

Die Tabellen 10-5 und 10-6 stellen die physikalischen Materialparameter dar (Kapitel 8). In Tabelle 10-5 sind die Daten zur Festmaterialdichte, zum statischen Elastizitätsmodul und zur Querkontraktionszahl aufgeführt, in Tabelle 10-6 zur Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit sowie zur Zugfestigkeit. In Tabelle 10-7 wurden die Messwerte der thermodynamischen Materialeigenschaften (adiabatische Temperaturerhöhung beim Abbinden, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, Temperaturstabilität) zusammengestellt (Kapitel 9).

Auf eine nähere Beschreibung der Versuchparameter wurde, mit Ausnahme von Angaben zu den Lagerungstemperaturen der Prüfkörper, die zur Ermittlung der physikalischen Materialparameter (Festmaterialdichte, Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, Druck- und Zugfestigkeit) dienen, verzichtet.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Ausgangsstoffe und Rezeptur (vgl. Kapitel 2)									
Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert									
	Massen-%	Massen-%	Massen-%	Massen-%	Massen-%	Massen-%	Massen-%	Massen-%	Massen-%
Zement	9,95	9,93	9,9	9,85	9,83	9,78			
Flugasche	23,12	23,06	23,0	22,88	22,83	22,71			
Wasser	12,16	12,38	12,6	13,04	13,26	13,69			
Salzzuschlag	54,78	54,64	54,5	54,23	54,09	53,82			
Summe	100,00	100,00	100,0	100,00	100,00	100,00			
<b>Rheologische Untersuchungen – Rotationsviskosimeter (<math>\tau = \tau_0 + K \cdot D^n</math>; <math>\tau_0</math>: Fließgrenze, K: Konsistenz, n: Strukturexponent, vgl. Kapitel 4.1)</b>									
<b>Fließparameter in Abhängigkeit der Abbindezeit (<math>\tau_0</math> messtechnisch nicht erfasst, K, n; Förderleistung 55 m<sup>3</sup>/h)</b>									
Abbindezeit	0 Minuten		30 Minuten		60 Minuten		90 Minuten		
Fließparameter $\tau_0, K, n$	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n
Messwerte	—	28,8	0,45	—	21,5	0,55	—	28,7	0,51
<b>Prognostizierte Druckverluste in Abhängigkeit der Abbindezeit (Förderleistung 55 m<sup>3</sup>/h)</b>									
Abbindezeit	0 Minuten		30 Minuten		60 Minuten		90 Minuten		
Rohrinnenweite	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150
Druckverlust [bar/100 m bei 55 m <sup>3</sup> /h]	12,6	7,5	4,9	15,0	8,3	5,1	15,8	9,1	5,7
							15,6	8,6	5,4

Tabelle 10-1: Zusammenstellung der Materialparameter. Rezepturzusammensetzung und Resultate der rheologischen Untersuchungen im Rotationsviskosimeter.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

<b>Rheologische Untersuchungen – Rohrviskosimeter (<math>\tau = \tau_0 + K \cdot D^n</math>; <math>\tau_0</math>: Fließgrenze, K: Konsistenz, n: Strukturexponent, vgl. Kapitel 4.2)</b>																		
<b>Fließparameter in Abhängigkeit der Stationierungszeit (<math>\tau_0</math> [Pa], K, n; Förderleistung 55 m<sup>3</sup>/h)</b>																		
Abbindezeit	0 Minuten			30 Minuten			60 Minuten			90 Minuten								
	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n						
Messwerte	30,6	20,6	0,52	27,5	37,6	0,37	29,9	29,9	0,40	31,0	37,3	0,37						
<b>Prognostizierte Druckverluste in Abhängigkeit der Stationierungszeit (Förderleistung 55 m<sup>3</sup>/h)</b>																		
Abbindezeit	0 Minuten			30 Minuten			60 Minuten			90 Minuten								
	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150						
Rohrinnenweite	14,1	8,3	5,5	13,5	8,6	6,0	12,5	7,9	5,4	12,6	8,1	5,7						
Druckverlust [bar/100 m bei 55 m <sup>3</sup> /h]																		
<b>Mindestdruckverluste in Abhängigkeit der Stationierungszeit (Förderleistung 55 m<sup>3</sup>/h)</b>																		
Abbindezeit	0 Minuten			30 Minuten			60 Minuten			90 Minuten								
	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150						
Rohrinnenweite	1,20	1,00	0,80	1,10	0,90	0,75	1,20	0,95	0,80	1,25	1,00	0,85						
Mindestdruck [bar/100 m bei 55 m <sup>3</sup> /h]																		
<b>Fließparameter in Abhängigkeit des Wasseranteiles (Förderleistung 45 m<sup>3</sup>/h)</b>																		
Wasseranteil [%]	12,2 (-4)			12,4 (-2)			12,6 (-0)			13,0 (+4)			13,3 (+6)			13,7 (+10)		
	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	K	n
Messwerte	12,7	3,8	0,77	9,1	3,6	0,75	5,7	3,0	0,72	5,5	1,6	0,86	5,6	2,0	0,78	6,4	1,6	0,82
<b>Prognostizierte Druckverluste in Abhängigkeit des Wasseranteiles (Förderleistung 45 m<sup>3</sup>/h)</b>																		
Wasseranteil [%]	12,2 (-4)			12,4 (-2)			12,6 (-0)			13,0 (+4)			13,3 (+6)			13,7 (+10)		
	DN ...	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125
Rohrinnenweite	7,5	3,8	2,2	6,2	3,1	1,8	5,5	2,6	1,4	4,5	2,1	1,2	4,0	2,0	1,2	3,9	1,9	1,1
Druckverlust [bar/100 m bei 45 m <sup>3</sup> /h]																		
<b>Prognostizierte Druckverluste nach 5stündiger Stationierung (Förderleistung 45 m<sup>3</sup>/h)</b>																		
Wasseranteil [%]	12,2 (-4)			12,4 (-2)			12,6 (-0)			13,0 (+4)			13,3 (+6)			13,7 (+10)		
	DN ...	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125	DN 150	DN 100	DN 125
Rohrinnenweite	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	7,8	4,0	2,3	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt
Druckverlust [bar/100 m bei 45 m <sup>3</sup> /h]																		

Tabelle 10-2: Zusammenstellung der Materialparameter. Resultate der rheologischen Untersuchungen im Rohrviskosimeter.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Ausbreitmaß nach DIN 1048, Teil 1 (vgl. Kapitel 4.3)									
Abbindezeit	0 Minuten	30 Minuten	45 Minuten	60 Minuten	90 Minuten				
Messwert	70 cm	66 cm	67 cm	58 cm	55 cm				
Ausbreitklasse DIN EN 206, Teil 1	F6	F6	F6	F5	F4				
Temperatur	20,2 °C	30 °C	20,2 °C	26 °C	keine Angabe	keine Angabe			
Fließwinkel (vgl. Kapitel 4.4) 2,15 % entsprechend 1,2°									
Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten (vgl. Kapitel 5) An Proben, die im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter hergestellt wurden, waren keine Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen erkennbar.									
Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung (1.000-ml-Standzylinder, vgl. Kapitel 6)									
Höhe der Flüssigkeitsschicht nach einer Standzeit von 24 Stunden									
Prozentuale Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert (0 % = 252 kg/m <sup>3</sup> = 12,6 Massen-%)									
- 4	- 2	0	+ 4	+ 6	+ 10				
Frisch angemischte Suspension / Versuche im Anschluss der Förderversuche (Höhe der Flüssigkeitsschicht [mm])									
0	1	5	8	7	13				
Höhe der Flüssigkeitsschicht in Abhängigkeit der Mischzeit (Grund-/Originalrezeptur, 0 %-Abweichung Wassergehalt)									
Mischzeit [Minuten]									
Versuchsdauer (Abbindezeit) [Tage (d) / Stunden (h)]									
2	0 d; 5 h (5 h)	2 d; 5 h (53 h)	3 d; 5 h (77 h)	6 d; 5 h (149 h)	7 d; 5 h (173 h)	9 d; 5 h (221 h)			
4	0	0	0	0	0	0			
8	2	2	2	1	1	0			
	3	3	2	2	1	0			
Unter den gegebenen Versuchsrandbedingungen wurde die Überstandslösung vom Salzbeton vollständig gebunden.									
Eine Voruntersuchung ergab bei 3minütiger Mischzeit nach 24stündiger Versuchsdauer eine Überstandslösung von 9 mm.									

Tabelle 10-3: Zusammenstellung der Materialparameter. Untersuchungen zur Rheologie (Ausbreitmaß, Fließwinkel), zum Sedimentationsverhalten und zur Bildung von Überstandslösung.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 47

<p><b>Übertragbare Versuchsergebnisse an Referenzmaterial M2 bzgl. der Rheologie, des Sedimentationsverhaltens und der Bildung von Überschusslösung (vgl. Kapitel 7).</b></p> <p><i>Rheologische Untersuchungen im Rohrviskosimeter</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Der Einfluss der Korngröße des Salzzuschlages auf das Fließverhalten der Suspension ist von untergeordneter Bedeutung.</li> </ul> <p><i>Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>An abgebundenen Proben, die mit feinkörnigem Flotationsrückstand (&lt; 2 mm, Kornverteilung 1) im Anschluss der Förderversuche hergestellt wurden, waren visuell keine Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen nachweisbar.</li> <li>Zur Untersuchung möglicher Entmischungserscheinungen der Salzbetonkomponenten während des Verstärzens der Suspension aus den Verfüllbohrungen in die untertägigen Hohlräume, diente ein im ERAM durchgeführter Freifallversuch. Es wurden etwa 12,5 m<sup>3</sup> Suspension (Salzzuschlag Gemisch Heißlöse- und Flotationsrückstand) über eine Höhe von 37 m in eine Schalung (Grundfläche: ca. 3,0 m·3,2 m) verstrützt. Die visuelle Begutachtung und digitale Bildanalyse von Bohrkernoberflächen sowie die Bestimmung physikalischer Materialeigenschaften an Bohrkernen ergab, dass Entmischungen der Salzbetonkomponenten auszuschließen sind.</li> </ul> <p><i>Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung</i></p> <p>Versuchsreihen mit Salzbeton (Salzzuschlag Gemisch Heißlöse- und Flotationsrückstand) in Prüfformen mit einer Höhe bis ca. 6,1 m und einem Durchmesser bis 0,5 m ergaben folgende Resultate:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Höhe der Lösungsschicht beträgt unabhängig von der Größe der Oberfläche und Einbauhöhe im Durchschnitt ca. 1 cm.</li> <li>Die maximalen Schichthöhen wurden nach Standzeiten von 8 bis 24 h ermittelt.</li> <li>Nach 4 Tagen war unter den gegebenen Versuchsrandbedingungen keine Lösungsschicht mehr nachweisbar.</li> <li>Auf Grund der Sättigungsverhältnisse der Lösung sind Anlöseerscheinungen von Anhydritgesteinen und Steinsalz vernachlässigbar.</li> </ul> <p><i>Untersuchungen zur Bildung von Drainagelösung</i></p> <p>Die Menge an Drainagelösung steigt mit zunehmender Fließfähigkeit (sinkendem Druckverlust bei einem Rohrleitungstransport), d.h. bei einem Eintrag von Scherenergie (Nachmischeffekt) und/oder einer Zunahme des Anteils an Zugabewasser.</p>
---

Tabelle 10-4: Zusammenstellung der Materialparameter. Übertragbare Versuchsergebnisse des Salzbetons M2.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Festmaterialdichte nach DIN 1048, Teil 5 (vgl. Kapitel 8.1)											
Abbindezeit [Tage]	7	14	28	42	56	90	245				
Messwert [kg/m <sup>3</sup> ]	1.946	1.956	1.950 / 1.956	1.954	1.954	1.953	1.949				
Lagerungstemperatur	20 °C	20 °C	20 °C / 40 °C	40 °C	40 °C	40 °C	40 °C				
Der Mittelwert beträgt 1.953 ± 5 kg/m <sup>3</sup>											
Statischer Elastizitätsmodul nach DIN 1048, Teil 5 (vgl. Kapitel 8.2)											
Abbindezeit [Tage]	7	14	28				270	530			
Messwerte [N/mm <sup>2</sup> ]	400	2.900	5.000 / 7.300				15.200	19.600	k.A.		
	600	2.900	5.300 / 7.600				16.000	20.500			
	600	3.500	5.900 / 8.400				17.200	23.600			
Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	500	3.100	5.400 / 7.800				18.700	20.900			
Lagerungstemperatur	20 °C	20 °C	20 °C / R.T.				R.T.	k.A.			
Prüfkörperherstellung im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter											
Abweichung Wassergehalt											
Wassergehalt											
Abbindezeit des Salzbetons											
vom Sollwert	[kg/m <sup>3</sup> ]		[Massen-%]		14 Tage		28 Tage		177 Tage		
- 4 %	243	243	12,2	12,2	15,510	11,120	15,820	11,120	—	—	
0 %	252	252	12,6	12,6	—	15,820	8,910	15,820	9,130	9,130	
+ 4 %	261	261	13,0	13,0	—	8,910	—	8,910	—	—	
+ 10 %	274	274	13,7	13,7	11,480	13,400	—	13,400	—	—	
Mittelwert des Elastizitätsmoduls					13,500	12,310			9,130		
Lagerungstemperatur 20 °C											
Querkontraktionszahl nach DIN 1048, Teil 5 (vgl. Kapitel 8.3)											
Abbindezeit [Tage]	7	14	28				177				
Messwerte	0,20	0,25	0,25				0,26*				
	0,22	0,25	0,26				0,26*				
Mittelwert	0,21	0,25	0,26				0,26*				
Lagerungstemperatur 20 °C											

Index \*: Prüfkörperherstellung im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter (vgl. Kapitel 4.2).

Tabelle 10-5: Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen (Festmaterialdichte, statischer Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl); R. T.: Raumtemperatur, k.A.: keine Angabe.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

<b>Zylinderdruckfestigkeit nach DIN 1048, Teil 5 (vgl. Kapitel 8.4.1)</b>												
Abbindezeit [Tage]	7	14	28	42	56	90	245	270	530			
Messwerte [N/mm <sup>2</sup> ]	1,13	5,45	9,84	16,2	17,7	18,9	21,8	25,5	27,4			
	1,54	5,47	9,94	16,2	18,1	19,7	k.A.	25,9	27,4			
	1,55	5,98	10,5	16,8	18,2	20,1	22,6	26,0	29,2			
	1,61	6,60	11,0	16,4	18,0	19,6	21,6	22,2	26,9			
Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	1,46	5,88	10,3	16,4	18,0	19,6	21,6	22,2	26,9			
Lagerungstemperatur	20 °C		20 °C	40 °C	40 °C	40 °C	20 °C	40 °C	40 °C	R.T.		
<b>Würfeldruckfestigkeit <math>\beta_{w,15cm}</math> [N/mm<sup>2</sup>] nach DIN EN 206 (vgl. Kapitel 8.4.2, Tabelle 8.4-2) <math>\beta_{w,20cm} = 0,95 \cdot \beta_{w,15cm}</math></b>												
Prüfkörperherstellung im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter												
Abweichung Wasser- Gehalt vom Sollwert												
	Wassergehalt		Abbindezeit des Salzbetons									
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Massen-%]	3 Tage	7 Tage	14 Tage	28 Tage	177 Tage					
- 4 %	243	12,2	0,39	1,49	6,66	14,5	—					
0 %	252	12,6	—	2,20	4,43	15,2	16,3					
+ 4 %	261	13,0	—	2,01	5,20	16,7	—					
+ 10 %	274	13,7	—	1,17	4,41	10,6	—					
Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit			0,39	1,72	5,18	14,3	16,3					
Berechnete Zylinderdruckfestigkeit			0,31	1,39	4,17	11,5	13,2					
$\beta_c = b_{w,15cm}/1,24$												
Lagerungstemperatur 20 °C												
<b>Zugfestigkeit nach DIN 1048, Teil 5 (vgl. Kapitel 8.5, Tabelle 8.5-1)</b>												
Abbindezeit [Tage]			56	90								
Messwerte [N/mm <sup>2</sup> ]			1,31	1,42								
			1,35	1,43								
			1,40	1,47								
			1,35	1,44								
Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]			40 °C	40 °C								
Lagerungstemperatur			40 °C	40 °C								

Tabelle 10-6: Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen (Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit, Zugfestigkeit);  
R.T.: Raumtemperatur, n.b.: nicht bestimmt, k.A.: keine Angabe.



Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02




Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 50

Adiabatische Temperaturentwicklung beim Abbinden (vgl. Kapitel 9.1, Abbildung 9.1-1)													
Versuchsdauer [Tage]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Temperaturerhöhung in Bezug zur Starttemperatur (30,1 °C). Versuchsabbruch bei 64,6 °C.													
Temperaturdifferenz [K]	2,7	5,9	12,6	25,0	29,2	32,4	34,5	nicht bestimmt					
Temperaturerhöhung in Bezug zur Starttemperatur (21,0 °C). Versuchsabbruch bei 54,4 °C.													
Temperaturdifferenz [K]	3,1	5,3	9,8	20,3	26,5	28,7	30,2	31,3	32,0	32,6	32,9	33,2	33,4
Spezifische Wärmekapazität nach DIN 51007 (vgl. Kapitel 9.2)													
Messtemperatur [°C]	20	30	40	50	60	70	80	90					
Messwert [J/(g·K)]	0,89	0,89	0,89	0,90	0,91	0,92	0,95	0,99					
Für den Temperaturintervall von 20 °C bis 90 °C beträgt der Mittelwert ( $c_p$ ) 0,92 J/(g·K).													
Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612 (vgl. Kapitel 9.3) 0,87 W/(m·K).													
Wärmeausdehnungskoeffizient nach DIN 51045, Teil 1 (vgl. Kapitel 9.4)													
Messwerte	2stündige Aufheizphase von 40 °C auf 60 °C		2stündige Abkühlung von 60 °C auf 0 °C		bleibende Dehnung bezogen auf 40 °C								
	2,73 · 10 <sup>-5</sup> 1/K	2,90 · 10 <sup>-5</sup> 1/K	2,39 · 10 <sup>-5</sup> 1/K	2,40 · 10 <sup>-5</sup> 1/K	0,057 mm/m								
Mittelwerte	2,93 · 10 <sup>-5</sup> 1/K	2,85 · 10 <sup>-5</sup> 1/K	2,41 · 10 <sup>-5</sup> 1/K	2,40 · 10 <sup>-5</sup> 1/K	0,057 mm/m								
Temperaturstabilität (vgl. Kapitel 9.5)													
Masseverlust 0,02 %	Temperaturerhöhung auf 105 °C		Temperaturerhöhung auf 800 °C		Gesamtwasseranteil des Salzbetons								
			Masseverlust 10,5 ± 0,7 %		ca. 12,6 Massen-% (vgl. Tabelle 10-1)								

Tabelle 10-7: Zusammenstellung der Materialparameter. Thermodynamische Untersuchungen.

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNA AANN	AANNA	AANN	X A A X X	AA	NNNN	NN	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

**11 Materialkennwerte für die Sicherheitsnachweisführung**

Für die Berechnungen zur Sicherheitsnachweisführung benötigt man Zahlenwerte zur Beschreibung der in Kapitel 8 und 9 aufgeführten physikalischen und thermodynamischen Materialeigenschaften. Die Materialkennwerte gehen zum Teil als unabhängige, nicht gekoppelte Einzelwerte in die Berechnungen ein, zum Teil besteht ein funktionaler Zusammenhang bzw. eine Kopplung zwischen den Kennwerten.

Bei nicht gekoppelten Einzelwerten werden die Zahlenwerte, die als Eingangsgrößen für die Berechnung dienen, durch Bildung von Mittelwerten bestimmt. Im Falle funktionaler Zusammenhänge erfolgt eine Parameteridentifikation nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Im Folgenden werden die den Berechnungen zu Grunde liegenden funktionalen Zusammenhänge beschrieben sowie die Zahlenwerte der Materialparameter und -kennwerte angegeben.

**11.1 Nicht gekoppelte Materialkennwerte**


Für die numerischen Berechnungen sind die Materialkennwerte Festmaterialdichte, Querkontraktionszahl, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient voneinander unabhängig. Als Eingangswerte für die Berechnungen dienen die in Tabelle 11.1-1 aufgeführten Mittelwerte, wobei eine sinnvolle Anzahl signifikanter Stellen berücksichtigt wurde. Der Wärmeausdehnungskoeffizient wurde als Mittelwert der Messwerte bei Aufheizung und Abkühlung gewählt (vgl. Kapitel 9.4).

Festmaterialdichte	Isobare spezifische Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeausdehnungskoeffizient
[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/(g·K)]	[W/(m·K)]	[1/K]
1.950	0,92	0,87	2,6 · 10 <sup>-5</sup>

Tabelle 11.1-1: Für die numerischen Berechnungen als Eingangsdaten verwendete Materialkennwerte der Festmaterialdichte, spezifischen Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und des Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Für die Querkontraktionszahl wurde als Referenzwert der 28-Tage-Wert gewählt, da in den numerischen Berechnungen der Einfluss des Abbindevorganges auf die Querkontraktionszahl  $\mu$  vernachlässigt wird. Damit gilt

$\mu = 0,255 [-]$

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

## 11.2 Gekoppelte Materialkennwerte

Der Elastizitätsmodul sowie die Druck- und Zugfestigkeit zeigen eine starke Abhängigkeit vom Abbindeprozess des Baustoffes, d.h. sie sind über den Hydratationsprozess gekoppelt. Der Hydratationsfortschritt lässt sich, aufgrund der entstehenden Reaktionswärme, aus den adiabatischen Temperaturmessungen (Kapitel 9.1) bestimmen. Grundlage hierfür ist das im Folgenden beschriebene Hydratationsmodell gemäß /16/.

### 11.2.1 Hydratationsgradientwicklung

Die Hydratationswärme  $Q(t)$  ist die Ursache für die Erwärmung des Betons während der Erhärtungsphase. Sie wird primär vom Zementgehalt  $C$  und von der Hydratationswärmeentwicklung  $Q_{ce}(t)$  beeinflusst, aber auch andere Phasenanteile des Bindemittelsystems (Steinkohlenflugasche) tragen zur Wärmeentwicklung bei:

$$Q(t) = C \cdot Q_{ce}(t) \quad (11.1)$$

Die maximal generierbare Wärmemenge  $Q_c^{max}$  des Betons, die bis zur vollständigen Hydratation des Zementes freigesetzt wird, lässt sich theoretisch aus den Phasenanteilen des Bindemittelsystems bestimmen:

$$Q_c^{max} = C \cdot Q_{ce}^{max} \quad (11.2)$$

Unter adiabatischen Verhältnissen führt die Hydratationswärmeentwicklung im Beton zu der Temperaturerhöhung  $\Delta T_a(t)$  ( $\rho$ : Dichte):

$$\Delta T_a(t) = \frac{C \cdot Q_{ce}(t)}{c_p \cdot \rho} \quad (11.3)$$

Die zur vollständigen Hydratation des Betons gehörende Temperaturerhöhung max.  $\Delta T_a$  lässt sich analog ausdrücken:

$$\Delta T_a^{max} = \frac{C \cdot Q_{ce}^{max}}{c_p \cdot \rho} \quad (11.4)$$

Eine wesentliche innere Zustandsvariable des Hydratationsmodells ist der Hydratationsgrad  $\alpha$ , der als das Verhältnis der Masse der hydratisierten Bestandteile zur Ausgangsmasse der hydratisierbaren Bestandteile definiert wird. Normiert man die bis zu einem bestimmten wirkungsvollen Alter ( $t_e$ ) eingetretene Hydratationswärme  $Q_{ce}(t_e)$  auf den theoretischen Endwert  $Q_{ce}^{max}$ , so ergibt sich der Hydratationsgrad nach Gl. (11.5):

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 53

$$\alpha(t_e) = \frac{Q_{ce}(t_e)}{Q_{ce}^{max}} = \frac{Q_c(t_e)}{Q_c^{max}} = \frac{\Delta T_a(t_e)}{\Delta T_a^{max}} \quad (11.5)$$

Das Betonalter  $t$  des adiabatischen Prozesses wird dabei mit Hilfe der Reifefunktion von Arrhenius/Freiesleben /16/ durch Integration der Reaktionsgeschwindigkeit auf das wirksame Alter  $t_e$  transformiert:

$$t_e = \int_0^t e^{\frac{E_A}{R} \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{T} \right]} dt \quad (11.6)$$

mit

$E_A$  Aktivierungsenergie:  $\approx 33,5$  [kJ/mol] für  $T \geq 293$  K

$R$  universelle Gaskonstante: 8,314 [J/mol·K]

$T$  Betontemperatur [K]

Die Beschreibung der nichtlinearen Entwicklung des Hydratationsgrades  $\alpha$  als Funktion des wirksamen Betonalters  $t_e$  basiert auf dem nachstehenden Ansatz /16/:

$$\alpha(t_e) = e^{-\left( \ln \left( 1 + \frac{t_e}{t_1} \right) \right)^b} \quad (11.7)$$

Der betonspezifische Faktor  $t_1$  und der Exponent  $b$  ergaben sich nach den Versuchen zur adiabatischen Temperaturentwicklung zu  $t_1 = 4,2101$  [d] und  $b = -1,1255$ . Hieraus berechnet sich nach unendlich langer Zeit eine fiktive adiabatische Temperaturerhöhung von 53,1 K (vgl. Abbildung 11.2-1). Das auf die Zementmenge von  $197 \text{ kg/m}^3$  bezogene  $Q_{ce}^{max}$  wurde nach Gl. (11.4) mit  $4,825 \cdot 10^5$  J/kg ermittelt. Da als Basis für die Parameteridentifikation die adiabatischen Temperaturversuche dienen, ist das latent hydraulische Verhalten der Filterasche mit erfasst.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02

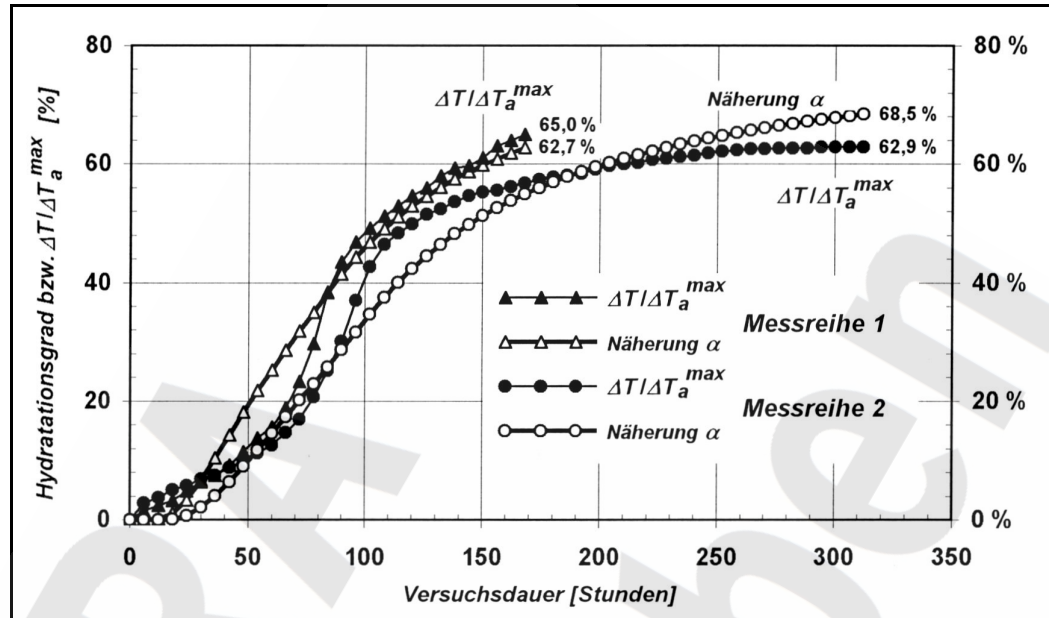


Abbildung 11.2-1: Vergleich des Hydrationsgrades aus adiabatischen Messungen mit der funktionalen Anpassung (vgl. Abbildung 9.1-1).

### 11.2.2 Hydrationsgradabhängige Werkstoffeigenschaften


Die Beziehungen für die hydrationsgradabhängigen Materialeigenschaften lassen sich mit Hilfe des Hydrationsmodells zeit- und temperaturvariant ausdrücken. Die in Folge der erhöhten Temperatur entstehende Zeitverzerrung wird mit Hilfe der Beziehungen in Kapitel 11.2.1 erfasst.

#### Zugfestigkeitsentwicklung

Die einaxiale Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Hydrationsgrad wird durch einen linearen Ansatz beschrieben:

$$f_{ct}(\alpha) = \bar{a} \cdot \alpha(t_e) + \bar{b} \quad (11.8)$$

Die Parameter  $\bar{a}$  und  $\bar{b}$  werden aus zentrischen Zugversuchen ermittelt. Der Gültigkeitsbereich für  $\alpha$  ist gemäß /16/ zwischen 0,17 und 1,0 abgesteckt. Die untere Schranke  $\alpha_0$  kennzeichnet das Ende der Ruhephase der Erhärtung. Ab diesem Zeitpunkt werden erste Festkörpereigenschaften wirksam. Der Abszissenwert  $\alpha_0$ , als Mindesthydrationsgrad bezeichnet, ist betonspezifisch. Durch Umformung der Gl. (11.8) mit Hilfe des Nulldurchgangs  $\alpha_0$  lassen sich

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 55

die Parameter  $\bar{a}$  und  $\bar{b}$  eliminieren. Der Ansatz für die Zugfestigkeit wird damit in eine dimensionslose bezogene Form überführt:

$$\hat{f}_{ct}(\alpha) = \frac{f_{ct}(\alpha)}{f_{cte}} = \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \quad (11.9)$$

Als frei variierbare Parameter in Gl. (11.9) verbleiben  $f_{cte}$  und  $\alpha_0$ . Die Endzugfestigkeit  $f_{cte}$  für  $\alpha = 1$  wird durch Extrapolation der Versuchswerte ermittelt und ist ein rein theoretischer Wert.

*Druckfestigkeitsentwicklung*

Für die Beschreibung der Druckfestigkeitsentwicklung des Betons ist die Zylinderdruckfestigkeit entscheidend. Auch dieser Materialparameter lässt sich, analog zur Zugfestigkeit, in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad formulieren. Dabei wird auf den nachstehenden Ansatz /16/ zurückgegriffen:

$$f_{ct} = c \cdot f_{c,cube}^{2/3} \quad (11.10)$$

Ersetzt man in Gl. (11.10) die Zugfestigkeit  $f_{ct}$  durch die Beziehung  $f_{ct}(\alpha)$  aus Gl. (11.9) und die Würfeldruckfestigkeit  $f_{c,cube}$  durch die Zylinderdruckfestigkeit  $f_c$ , so erhält man folgenden Zusammenhang:


$$f_c(\alpha) = 0,85 \left[ f_{cte} \cdot \frac{(\alpha - \alpha_0)/(1 - \alpha_0)}{c} \right]^{3/2} \quad (11.11)$$

Für den Hydratationsgrad  $\alpha = 1$  gilt:

$$f_{ce} = 0,85 \left[ \frac{f_{cte}}{c} \right]^{3/2} \quad (11.12)$$

Aus den Gl. (11.11) und (11.12) ergibt sich die Funktion für die bezogene Zylinderdruckfestigkeit:

$$\hat{f}_c(\alpha) = \frac{f_c(\alpha)}{f_{ce}} = \left[ \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right]^{3/2} \quad (11.13)$$

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 56

Im Gegensatz zu der Beziehung für die Druckfestigkeit nach Gl. (11.11) ist die Funktion in Gl. (11.13) unabhängig von der Endzugfestigkeit  $f_{cte}$  und enthält keine dimensionsgebundenen Parameter. Die Anzahl der Freiwerte bleibt auf den theoretischen Endwert für die Druckfestigkeit  $f_{ce}$  beschränkt. Die Enddruckfestigkeit  $f_{ce}$  für  $\alpha = 1$  wird wiederum durch Extrapolation der Versuchswerte ermittelt und ist ein rein theoretischer Wert. Die Druck- und die Zugfestigkeit sind über den Mindesthydratationsgrad  $\alpha_0$  miteinander verknüpft.

*Elastizitätsmodul*

Aus dehngeregelten Zugversuchen zu verschiedenen Altersstufen wurde eine hydratationsgradabhängige Funktion für den Zugelastizitätsmodul abgeleitet /16/. Vorausgesetzt, dass Zug- und Druckelastizitätsmodul sich zeitlich vergleichbar entwickeln und Unterschiede zwischen Zug- und Druckelastizitätsmodul für praktische Zwecke vernachlässigbar sind, gilt

$$\hat{E}_{ct}(\alpha) = \frac{E_{ct}(\alpha)}{E_{cte}} = \left[ \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right]^a \quad (11.14)$$

Der Exponent für die Potenzfunktion wurde in /16/ zu  $a \cong 2/3$  bestimmt. Auch Gl. (11.14) enthält keine dimensionsgebundenen Größen. Der einzige Freiwert ist der theoretische Endwert für den E-Modul  $E_{cte}$ . Über den Mindesthydratationsgrad  $\alpha_0$  ist die Entwicklung des Elastizitätsmodules mit der Entwicklung von Zug- und Druckfestigkeit gekoppelt.

**11.3 Identifikation der hydratationsgradabhängigen Werkstoffeigenschaften aus Versuchen**

Auf Grundlage der Versuche zum statischen Elastizitätsmodul (Kapitel 8.2), zur Zylinderdruckfestigkeit (Kapitel 8.4.1) und zur Zugfestigkeit (Kapitel 8.5) wurden die Parameter wie folgt identifiziert

- Mindesthydratationsgrad:  $\alpha_0 = 0,385$  [-]
- Elastizitätsmodul bei  $\alpha = 1$ :  $E_{cte} = 10.700$  [MPa]
- Zugfestigkeit bei  $\alpha = 1$ :  $f_{cte} = 2,09$  [MPa]
- Druckfestigkeit bei  $\alpha = 1$ :  $f_{ce} = 42,1$  [MPa]

Durch die in Gl. (11.12) gegebene Beziehung lässt sich daraus der betonspezifische Parameter  $c = 0,155$  ermitteln, der formal die Einheit [MPa<sup>1/3</sup>] trägt. Der Exponent  $a$  nach Gl. (11.14) wurde analog zu /16/ zu  $2/3$  gesetzt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Die Resultate der Identifikation und die Mittelwerte der Versuchsreihen zur Bestimmung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmodules sind dargestellt in den Abbildungen 11.3-1 und 11.3-2. Auf eine Darstellung der Daten zur Zugfestigkeit wurde verzichtet, da die Rechenergebnisse der Parameteridentifikation identisch mit den Versuchsergebnissen sind. Einige der in den Tabellen aufgeführten Werte wurden bei der Identifikation nicht berücksichtigt, da die Randbedingungen der Versuchsreihen geringfügig modifiziert waren. Sie sind zur Kontrolle ebenfalls in die Abbildungen eingetragen und bestätigen die Güte der Identifikation.

Beim Vergleich der Abbildungen 11.3-1 und 11.3-2 mit den Datenwerten, die in Kapitel 8.4-1 und 8.2 beschrieben sind, ist zu beachten, dass in den o.g. Abbildungen die Versuchsdaten gemäß Gl. (11.6) entsprechend ihren Lagerungstemperaturen, die in den Tabellen 8.4-1 und 8.2-1 (vgl. Tabelle 10-4, 10-5) angegeben sind, vom realen in das wirksame Betonalter transformiert wurden.

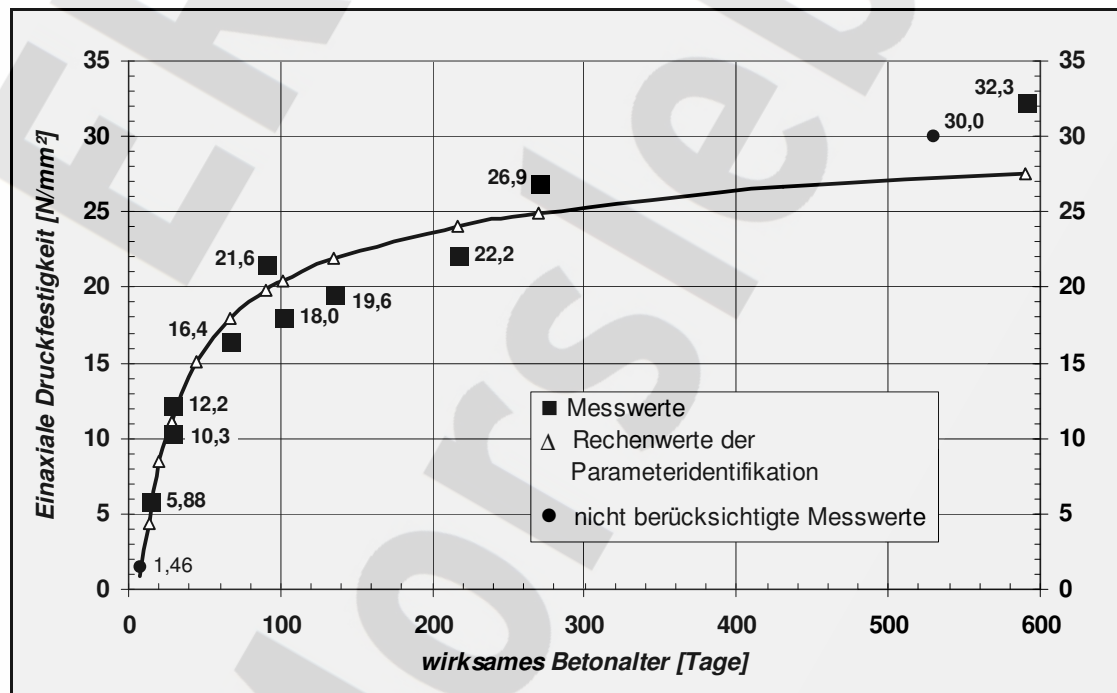


Abbildung 11.3-1: Messwerte der Zylinderdruckfestigkeit und Rechenwerte der Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter  $t_e$ .



Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02



Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

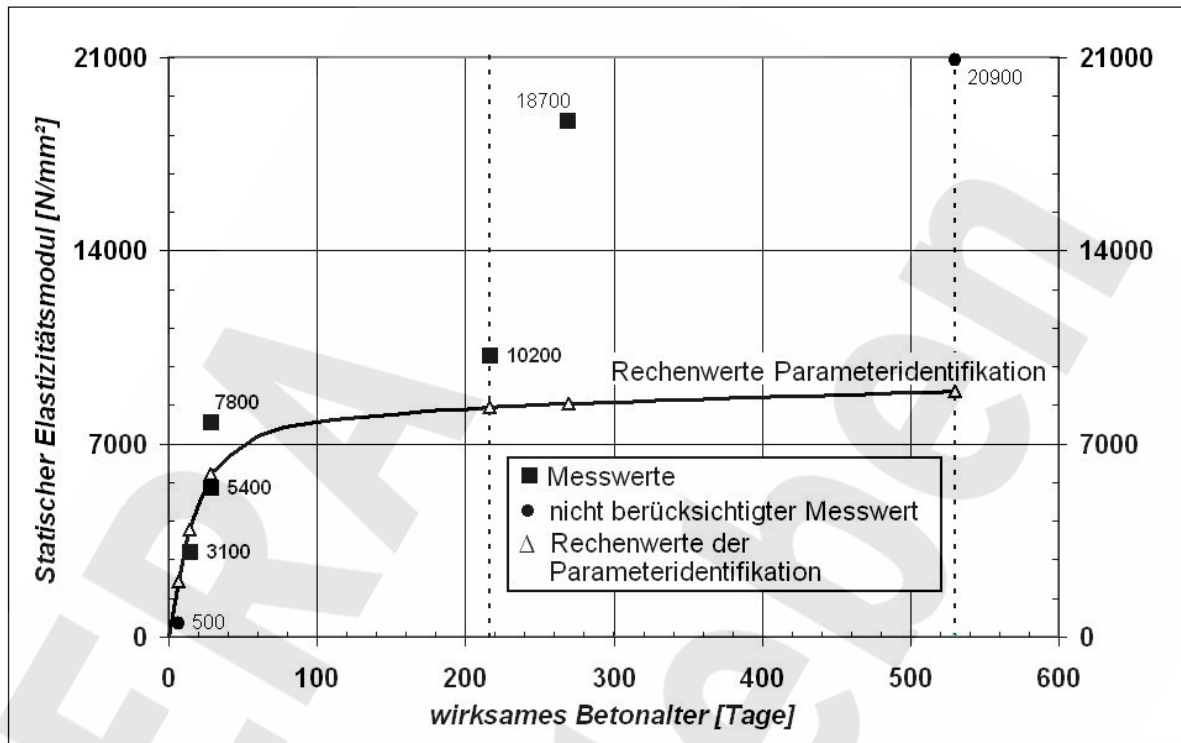



Abbildung 11.3-2: Messwerte des statischen Elastizitätsmodules und Rechenwerte der Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter  $t_e$ .


Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 59

**12      **Verwendete Unterlagen****


- /1/      DBV  
Merkblatt: Beton für massige Bauteile. Fassung Oktober 1996
  
- /2/      DIN EN 197, Teil 1  
Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. August 2004, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /3/      DIN EN 450  
Flugasche für Beton. Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung. Deutsche Fassung EN 450: 1994. Januar 1994, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /4/      Bergamt Staßfurt  
Allgemeine Zulassung „Salzbeton - Dickstoffmischung 2, „Salzbeton – Dickstoffmischung 3“ gemäß § 4 GesBergV. Staßfurt, Stand: 11.09.2000, in Verbindung mit der Aufhebung der Befristung, Stand 02.12.2003
  
- /5/      DIN 1048, Teil 1  
Prüfverfahren für Beton. Frischbeton. Juni 1991, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /6/      DIN EN 206, Teil 1  
Beton. Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Juli 2001, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /7/      DIN 1045, Teil 2  
Beton. Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zur DIN EN 206, Teil 1, Juli 2001
  
- /8/      DBE  
Ergänzende Untersuchungen – Referenzmaterial Salzbeton M2, Stand: 14.09.2001
  
- /9/      DIN 1048, Teil 5  
Prüfverfahren für Beton. Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Juni 1991, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 60

- /10/ Verein Deutscher Zementwerke e.V.  
Vorläufiges Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter, Fassung Dezember, Düsseldorf. beton 20 (1970) H. 12, S. 545/549; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 179/192
  
- /11/ DIN 51007  
Thermische Analyse (TA). Differenzthermoanalyse (DTA). Grundlagen. Juni 1994, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /12/ DIN 51006  
Thermische Analyse (TA). Thermogravimetrie (TG). Grundlagen. Oktober 1990, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /13/ DIN 52612, Teil 1  
Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Durchführung und Auswertung. September 1979, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /14/ DIN 51045, Teil 1  
Bestimmung der thermischen Längenänderung fester Körper. Grundlagen. September 1989, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /15/ DIN EN 12390, Teil 1  
Prüfung von Festbeton. Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen. Februar 2001, Beuth Verlag GmbH, Berlin
  
- /16/ Onken, Rostásy  
Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 449, 1995


Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 61

**13 Glossar**


Abbau	Bezeichnung für einen durch bergmännische Tätigkeiten bei der Gewinnung von Kali- und Steinsalz hergestellten Hohlraum.
adiabatisch	Ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung.
Aktivierungsenergie	Mindestenergie zur Erzielung einer chemischen Reaktion.
Bauzustand	Zustand, der während der Baumaßnahme temporär auftritt.
Beanspruchung	Beanspruchung ist die Unterwerfung eines Bauteils unter eine Belastung beliebiger Art als auch der Zustand eines Bauteils, das unter dem Einfluss von Spannungen steht. Ursache einer Beanspruchung können äußere Kräfte oder Belastungen, Eigengewichtskräfte, Auflagerverschiebungen oder Temperaturdehnungen sein.
Druckfestigkeit	Festigkeit eines Materials unter Druckbeanspruchung.
Elastizität	Eigenschaft eines Stoffes nach einer Belastung und anschließender Entlastung wieder seine ursprüngliche Form anzunehmen. Die Geschwindigkeit der Lastaufbringung kann gering (statisch) oder hoch (dynamisch) sein.
elastoplastisch	Materialverhalten mit reversiblen, elastischen und irreversiblen, plastischen Anteilen.
Festbeton	Abgebundener Beton, der die Eigenschaften eines Festkörpers besitzt.
Flotation	Aufbereitungsverfahren. Die Mineraltrennung erfolgt in wässrigen Lösungen mit Hilfe von sog. Sammler-Reagenzien, die die Benetzbarkeit einzelner Mineralphasen durch Wasser reduzieren.
Flugasche	(Filterasche) Feinkörniges Material, das hauptsächlich aus kugelförmigen, glasigen Partikeln besteht und bei der Verbrennung von Kohle anfällt.
Frischbeton	Beton, der fertig gemischt ist und sich in einem verarbeitbaren Zustand befindet.
Grubenbau	Planmäßig bergmännisch hergestellter Hohlraum unter Tage.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 62


Heißlöseverfahren	Aufbereitungsverfahren zur Gewinnung von KCl, basierend auf den unterschiedlichen Temperaturabhängigkeiten der Löslichkeit von Salzen.
Hydratationsgrad	Verhältnis von hydratisierten zu hydratisierbaren Bindemittelanteilen.
Hydratationsmodell	Mathematische Beschreibung des Abbindevorganges von Bindemittelsystemen im Hinblick auf die Materialeigenschaften E-Modul, Druckfestigkeit und Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperaturentwicklung.
Hydratationswärme	Wärme, die als Folge exothermer Mineralreaktionen der Bindemittel (z.B. Zement, Flugasche) mit der Anmischflüssigkeit freigesetzt wird.
Konvergenz	Mathematische Beschreibung, bei der die Volumenreduzierung eines Hohlraumes infolge Verformung der Kontur als bezogene Größe beschrieben wird.
Latent hydraulische Stoffe	Anorganische Betonzusatzstoffe, die versteckte (latente) hydraulische Eigenschaften besitzen und die erst nach Anregung wirksam werden. Sie enthalten neben $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ und $\text{Fe}_2\text{O}_3$ auch CaO und werden im alkalischen Milieu oder durch gelöste Sulfat-Ionen zur Bildung von Calciumsilicat- oder Calciumaluminatverbindungen angeregt.
Normalbeton	Baustoff, erzeugt durch Mischen von Zement und Wasser, mit oder ohne Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen, mit einer Rohdichte (ofentrocken) über 2.000, höchstens aber 2.600 $\text{kg/m}^3$ .
Puzzolane	Natürliche oder künstliche kieselensäurehaltige Betonzusatzstoffe (z.B. Steinkohlenflugasche, Trass), die im Wesentlichen aus $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ und $\text{Fe}_2\text{O}_3$ bestehen und mit gelöstem Calciumhydroxid zu Calciumsilicat- und Calciumaluminatverbindungen reagieren.
Querkontraktion	Verformung normal zur Längsdeformation bzw. -dehnung bei elastisch festen Körpern. Die Querkontraktionszahl $\mu$ ist das negative Verhältnis der Quer- zur Längsverformung.
Rheologie	Wissenschaft, die sich mit dem Verformungsverhalten (Fließeigenschaften) von Fluiden unter der Einwirkung äußerer Kräfte befasst.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	XAAAX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 63

RQD-Index	Rock Quality Designation-Index. Maß der Klüftigkeit bzw. der Felsqualität eines Gesteinskörpers. Summe der Kernstücklängen > 10 cm bezogen auf die Gesamtbohr- bzw. -kernstrecke.
Salzbeton	Baustoff bestehend aus den Grundbestandteilen Zement, Betonzusatzstoff, Salzzuschlag sowie Wasser oder Salzlösungen als Anmachflüssigkeit.
Spezifische Wärmekapazität	Zum Erwärmen von 1 g Substanz um 1 Kelvin erforderliche Wärmemenge [J/(g·K)]. Entsprechend den Messbedingungen wird eine Wärmekapazität bei konstantem Volumen und konstantem Druck unterschieden.
Steifigkeit	Ein aus Materialverhalten und Formgebung entwickeltes Maß, das den Verformungswiderstand eines Baustoffes oder -werkes gegenüber Beanspruchungen kennzeichnet.
Stilllegung	Alle Maßnahmen zum Sichern des Bergwerkes nach Einstellung des Betriebes.
Stoß	Seitliche Begrenzung eines Grubenbaus (z.B. Strecken-Stoß, Schacht-Stoß), auch jede Angriffsfläche für die Gewinnung (Abbau-Stoß).
Suspension	2phasige Fluide. Verteilung von festen Partikeln in einer Flüssigkeit.
Überschusslösung	Gesamtmenge an Lösung, die im frischen Zustand weder chemisch noch physikalisch vom Baustoff gebunden und deshalb abgegeben werden kann.
universelle Gaskonstante	physikalische Konstante: 8,314 [J/(mol·K)].
Versatz	Material für die Verfüllung oder Stützung von Grubenhohlräumen.
Wärmeausdehnungskoeffizient	Maß der Volumen- bzw. Längenänderung eines Körpers infolge Temperaturerhöhung bzw. -erniedrigung. Im Allgemeinen ist der mittlere Längenausdehnungskoeffizient $\alpha$ für ein Temperaturintervall angegeben ( $\alpha = \Delta l / (l_0 \cdot \Delta T)$ , $l_0$ : Länge bei Bezugstemperatur, $\Delta T$ : Temperaturänderung, $\Delta l$ : Längenänderung infolge $\Delta T$ ).

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAXXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0046	02	

Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte  
(Referenzmaterial M3)

Blatt 64

- Wärmeleitfähigkeit** Stoffeigenschaft, die bestimmt, wie groß in einem Temperaturfeld der Wärmestrom ist, der die Messfläche unter der Wirkung des in Richtung der Flächennormale genommenen Temperaturgefälles durchströmt.
- Zement** Hydraulisches Bindemittel. Anorganischer, fein aufbereiteter Stoff, der infolge chemisch-mineralogischer Reaktionen mit der Anmachflüssigkeit dauerhaft erhärtet.
- Zugfestigkeit** Festigkeit eines Materials unter Zugbeanspruchung.
- Zwang, thermo-mechanischer** Beanspruchung, die nicht aus einem Lasteintrag sondern aus der Behinderung von Deformationen (Temperaturdehnungen) entsteht.