

Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage

Titel: Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Autor: DBE

Erscheinungsjahr: 2004

Unterlagen-Nr.: P 192

Revision: 00

Unterlagenteil:



Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 3

Stichwörter: Abdichtungen, Materialeigenschaften, Rezeptur M2, Rheologie, Salzbeton, Streckenverfüllungen

Zusammenfassung

Nach dem Stilllegungskonzept des Endlagers für radioaktive Abfälle (ERAM) sind zur Gewährleistung des radiologischen Schutzzieles die Einlagerungsfelder von der zutrittsgefährdeten Restgrube durch qualifizierte Streckenverfüllungen bzw. Strecken mit hohen Anforderungen abzudichten. Als Baustoff für die Errichtung der Streckenverfüllungen ist der Salzbeton M2 vorgesehen.

Der vorliegende Bericht fasst den Kenntnisstand zu Materialparametern zusammen, soweit diese im Hinblick auf die Einbringung als Pumpversatz, die Beherrschung der Bauzustände sowie zur Beurteilung der mechanischen Integrität der Streckenverfüllungen erforderlich sind. Zuerst werden die Materialzusammensetzung, das Verhalten des Salzbetons während der Verarbeitung und die Frischbetoneigenschaften behandelt. Im Anschluss werden Resultate von Messungen physikalischer und thermodynamischer Materialeigenschaften beschrieben.

Der Salzbeton M2 besteht aus Zement, Steinkohlenflugasche und Salzzuschlag. Das Anmischen erfolgt mit Wasser. Für die Rezeptur liegt eine allgemeine Zulassung gemäß § 4 der Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV) vor. Die rheologischen Untersuchungen zeigten, dass ein Suspensionstransport durch Rohrleitungen auch bei erhöhtem oder verringertem Wassergehalt über mehrere Stunden möglich ist. Die Korngröße des Salzzuschlages beeinflusst nur untergeordnet das Fließverhalten des Frischbetons. Kornsedimentations- bzw. -absetzerscheinungen waren nicht nachweisbar. So ergab beispielsweise ein Freifallversuch im ERAM, bei dem Suspension über eine Höhe von 37 m in eine Schalung verstürzt wurde, dass der Frischbeton zu einem homogenen Baustoffkörper abbindet.

Untersuchungen physikalischer Festbetoneigenschaften umfassten die Ermittlung der Betondichte, der Salzbetonsteifigkeit und -festigkeit, des Schwind- und Kriechverhaltens sowie Bestimmungen von Parametern, die zur Charakterisierung der hydraulischen Durchlässigkeit des Salzbetons erforderlich sind, wie die Porosität, die Porenradienverteilung und die Permeabilität. Es wurden einaxiale Druckfestigkeiten von mehr als 30 MPa und statische Elastizitätsmoduli von über 20.000 MPa erzielt. Die Messungen ergaben, dass abgebundene Proben des geförderten Materials im Vergleich zu Prüfkörpern, deren Herstellung unmittelbar nach dem Anmischen erfolgte, vergleichbare Festigkeiten aufweisen. Triaxiale Druckversuche ergaben,

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 4

dass die Dilatanzgrenze nahe der Bruchgrenze liegt. Beide Parameter steigen mit wachsendem Manteldruck.

Das Schwinden des Baustoffes ist bereits nach einer Abbindezeit von etwa 50 Tagen weitgehend abgeklungen. Für das Normalklimat 20/65 kann ein Endschwindmaß von 1,1 mm/m angegeben werden. Die Laboruntersuchungen zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit ergaben, dass der Salzbeton ein Porensystem aufweist, das nur für Gase geringfügig durchlässig ist. So reduzierte sich die Gaspermeabilität einer getrockneten Probe bei einer Zunahme des Manteldruckes von 1 MPa auf 10 MPa von $5,4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ auf $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$, während im Normalklimat 20/65 gelagerte Prüfkörper auf Werte von $6,1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bis $5,3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ kamen. Eine Durchströmung mit Salzlösungen war dagegen nicht nachweisbar. Auf Grund der Sättigungsverhältnisse der Poren- und Überschusslösung sind im Rahmen der Verfüllung Anlöseerscheinungen der Hohlraumkonturen vernachlässigbar.

Bestimmungen thermodynamischer Eigenschaften des Salzbetons sind erforderlich, da die im Verlauf des Abbindeprozesses freigesetzte Wärme thermomechanisch bedingte Zwangsbeanspruchungen in den Streckenverfüllungen sowie im angrenzenden Salzgebirge erzeugen kann. Die Hydratationswärme ist damit eine nicht zu vernachlässigende Größe. Die zum Nachweis der Beherrschung der Bauzustände notwendigen Daten, wie die unter adiabatischen Bedingungen bestimmte Temperaturentwicklung beim Abbinden, die spezifische Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeausdehnungskoeffizient werden beschrieben. Zusätzlich sind Untersuchungsergebnisse zur Temperaturstabilität des Salzbetons angegeben.

Abschließend wird dargestellt, wie aus den Ergebnissen der Laboruntersuchungen thermodynamischer und physikalischer Baustoffeigenschaften Materialkennwerte ermittelt werden, die in die Sicherheitsnachweisführung eingehen und welche Materialmodelle in den numerischen Berechnungen zur Anwendung kommen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 5

Inhaltsverzeichnis

	Blatt
Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	11
1 Einleitung	13
2 Ausgangsstoffe und Rezeptur	15
3 Bergbauhygienische Beurteilung gemäß Gesundheitsschutz-Bergverordnung	17
4 Rheologische Untersuchungen	18
4.1 Versuche im Rohrviskosimeter	18
4.2 Konsistenzmessungen	23
4.2.1 V-Trichter-Prüfung	23
4.2.2 Ausbreitmaß	24
4.2.3 Setzfließmaß	25
4.3 Fließwinkel	25
5 Untersuchungen zur Kornsedimentation und zur Überschusslösung	27
5.1 Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten	27
5.1.1 Sedimentationsversuch in einer vertikalen Rohrleitung	27
5.1.2 Sedimentationsversuch bei veränderten Wassergehalten	27
5.1.3 Begutachtung von Bohrkernen des in-situ Freifallversuches	28
5.1.4 Bestimmung der sedimentationsstabilen Korngröße	29
5.2 Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung	31
5.2.1 Untersuchungen in Abhängigkeit der Betonoberfläche (konstante Füllhöhe)	31
5.2.2 Untersuchungen in Abhängigkeit der Füllhöhe (konstante Betonoberfläche)	32
5.2.3 Untersuchungen in Abhängigkeit der Füllhöhe (konstantes Füllvolumen)	33
5.3 Zusammenfassung der Resultate zur Bildung von Überschusslösung	35
5.4 Chemischer Stoffbestand der Poren- und Überschusslösung	35
6 Physikalische Untersuchungen	37
6.1 Festmaterialdichte	38
6.2 Statischer E-Modul	39
6.3 Querkontraktionszahl	42
6.4 Einaxiale Druckfestigkeit	43
6.5 Dilatanzverhalten und triaxiale Druckfestigkeit	45
6.6 Einaxiale Zugfestigkeit	50
6.7 Kriechverhalten	51
6.8 Schwinden	53
6.9 Porosität	55
6.10 Porenradienverteilung	56
6.11 Permeabilität	58
7 Thermodynamische Untersuchungen	64

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
	9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 6

7.1	Adiabatische Temperaturentwicklung beim Abbinden	64
7.2	Spezifische Wärmekapazität	65
7.3	Wärmeleitfähigkeit	65
7.4	Wärmeausdehnungskoeffizient	66
7.5	Temperaturstabilität	66
8	Zusammenstellung der Materialkennwerte	67
9	Materialkennwerte für die Sicherheitsnachweisführung	77
9.1	Nicht gekoppelte Materialkennwerte	77
9.2	Gekoppelte Materialkennwerte	78
9.2.1	Hydratationsgradiententwicklung	78
9.2.2	Hydratationsgradabhängige Werkstoffeigenschaften	80
9.3	Identifikation der hydratationsgradabhängigen Werkstoffeigenschaften aus Versuchen	82
10	Verwendete Unterlagen	85
11	Glossar	88

Gesamte Blattzahl der Unterlage: 90

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 7

Tabellenverzeichnis

	Blatt
Tabelle 2-1: Mengenverhältnisse der Salzbetonbestandteile in kg/m ³ und Massen-%.	15
Tabelle 4.1-1: Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste bei Transport der Salzbetonsuspension in Rohrleitungen der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150. τ_0 : Fließgrenze, K: Konsistenz, n: Struktorexponent.	19
Tabelle 4.1-2: Fließgrenze und Mindestdruckverluste nach Stationierungszeiten der Suspension von 30, 60 und 90 Minuten sowie ohne Stationierung.	20
Tabelle 4.1-3: Wasseranteile der untersuchten Salzbetonsuspensionen sowie berechnete W/(F+Z)-Verhältnisse.	21
Tabelle 4.1-4: Temperatur und Dichte der Salzbetonsuspensionen.	21
Tabelle 4.1-5: Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste bei Transport der Suspension in Rohren der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150. τ_0 : Fließgrenze nach Herschel-Bulkley, K: Konsistenz, n: Struktorexponent.	22
Tabelle 4.2-1: Resultate der Fließversuche im V-Trichter. In Klammern sind die Abweichungen des Wasseranteiles der Salzbetonsuspension vom Sollwert angegeben.	24
Tabelle 4.2-2: Ausbreitmaß der Salzbetonsuspension nach Abbindezeiten von 0 bis 90 Minuten sowie Frischbetontemperatur zu Versuchsbeginn.	25
Tabelle 4.2-3: Setzfließmaß in Abhängigkeit vom Wasseranteil der Salzbetonsuspension.	25
Tabelle 5.2-1: Menge der Überschusslösung in Abhängigkeit der Betonoberfläche (Zylinderdurchmesser) bei konstanter Füllhöhe (2 m), aber variierender Füllmenge. Maximalwerte sind durch Fettschrift hervorgehoben. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.	32
Tabelle 5.2-2: Menge der Überschusslösung in Abhängigkeit der Füllhöhe des Salzbetons bei einer konstanten Betonoberfläche von 122 cm ² (Zylinderdurchmesser 125 mm), aber variierender Füllmenge. Maximalwerte sind durch Fettschrift hervorgehoben. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.	33
Tabelle 5.2-3: Menge der Überschusslösung in Abhängigkeit der Füllhöhe des Salzbetons bei konstantem Füllvolumen (12 Liter), aber variierender Betonoberfläche (Zylinderdurchmesser). Maximalwerte sind durch Fettschrift hervorgehoben. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.	34

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 8

Tabelle 5.4-1:	Chemischer Stoffbestand der Poren- und Überschusslösung des Salzbetons. Für die Porenlösung des Salzbetons M2 ergab sich ein pH-Wert von 10,9 und für die Überschusslösung ein pH-Wert von 11,3.	36
Tabelle 6.2-1:	Statische Elastizitätsmoduli und Lagerungstemperaturen von Proben nach 3 bis 530 Tagen Abbindezeit; R.T.: Raumtemperatur, k.A.: keine Angabe.	39
Tabelle 6.2-2:	Elastizitätsmoduli nach 28 Tagen Abbindezeit (in-situ Freifallversuch). Im Anschluss des Bohrvorganges erfolgte die Lagerung der Bohrkern bei Raumtemperatur. Der Mittelwert sämtlicher Messresultate beträgt 25.680 MPa.	40
Tabelle 6.2-3:	Statische Elastizitätsmoduli des Salzbetons in Abhängigkeit der Abweichung des Wassergehaltes der Suspension vom Sollwert. Die Prüfkörperherstellung erfolgte im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter (Kapitel 4.1); n.b.: nicht bestimmt.	41
Tabelle 6.2-4:	Vergleich der Messresultate zum statischen Elastizitätsmodul von Prüfkörpern, die im direkten Anschluss des Mischprozesses hergestellt wurden, von Bohrkernen des in-situ Freifallversuches sowie von Prüfkörpern, die nach den Förderversuchen im Rohrviskosimeter angefertigt wurden.	41
Tabelle 6.3-1:	Querkontraktionszahlen des Salzbetons in Abhängigkeit der Abbindezeit.	42
Tabelle 6.4-1:	Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit und Lagerungstemperatur 3 bis 530 Tage alter Prüfkörper; R.T.: Raumtemperatur, k.A.: keine Angabe. Prüfkörper, die bei 40°C gelagert wurden, zeigen in Folge eines höheren Hydratationsgrades höhere Festigkeiten.	44
Tabelle 6.4-2:	Einaxiale Druckfestigkeit (Zylinderdruckfestigkeit) des Salzbetons nach 28 Tagen Abbindezeit (in-situ Freifallversuch). Die Lagerung der Bohrkern bzw. der Prüfkörper erfolgte bei Raumtemperatur. Die höchste und niedrigste Druckfestigkeit ist durch Fettschrift gekennzeichnet.	45
Tabelle: 6.5.1:	Messresultate zum Festigkeits- und Dilatanzverhalten.	47
Tabelle 6.5-2:	Axialspannung im Bruchzustand (Bruchfestigkeit) und im Volumenminimum (Dilatanzfestigkeit), Manteldruck sowie berechnete Oktaederspannungen und mittlere Spannungen von Prüfkörpern der triaxialen Druckversuche.	48
Tabelle 6.6-1:	Einaxiale Zugfestigkeit und Lagerungstemperatur der 56 und 90 Tage alten Prüfkörper.	50
Tabelle 6.8-1:	Resultate der Schwindmessungen. Sämtliche Messdaten sind angegeben in der Einheit mm/m bzw. ‰.	54

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Tabelle 6.11-1:	Gaspermeabilität bei 105 °C getrockneter Prüfkörper in Abhängigkeit vom Manteldruck und des Gasströmungsdruckes zu Messbeginn. Die Permeabilitäten wurden jeweils nach 24stündiger und 36stündiger Haltezeit des Manteldruckes bestimmt.	60
Tabelle 6.11-2:	Gaspermeabilität klimatisiert gelagerten Salzbetons bei Variation des Mantel- und Strömungsdruckes.	61
Tabelle 6.11-3:	Chemischer Stoffbestand der Strömungsfluide.	62
Tabelle 8-1:	Zusammenstellung der Materialparameter. Rezepturzusammensetzung und Resultate der rheologischen Untersuchungen im Rohrviskosimeter	68
Tabelle 8-2:	Zusammenstellung der Materialparameter. Resultate der Konsistenzmessungen (V-Trichter-Prüfung, Ausbreitmaß, Setzfließmaß, Fließwinkel) sowie Ergebnisse der Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten; * nach 60minütiger Scherbeanspruchung in einem modifizierten Betonmischer; ** nach 180minütiger Scherbeanspruchung in einem modifizierten Betonmischer.	69
Tabelle 8-3:	Zusammenstellung der Materialparameter. Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.	70
Tabelle 8-4:	Zusammenstellung der Materialparameter. Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung sowie zum chemischen Stoffbestand der Poren- und Überschusslösung. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.	71
Tabelle 8-5:	Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen. Resultate zur Festmaterialdichte und zum statischen Elastizitätsmodul; R.T.: Raumtemperatur; n.b.: nicht bestimmt; k.A.: keine Angabe.	72
Tabelle 8-6:	Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen. Resultate zur Querkontraktionszahl und zur einaxialen Druckfestigkeit; R.T.: Raumtemperatur; n.b.: nicht bestimmt; k.A.: keine Angabe.	73

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 10

Tabelle 8-7:	Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen. Dilatanzverhalten und triaxiale Druckfestigkeit, einaxiale Zugfestigkeit und Kriechverhalten. Axialspannung im Volumenminimum ($\sigma_{1,Dil}$), Axialverformung ($\epsilon_{1,Dil}$), Volumenverformung ($\epsilon_{V,Dil}$); bei mittlerer Spannung (σ_{Dil}) aufnehmbare Oktaederspannung (τ_{Dil}). Axialspannung ($\sigma_{1,max}$) und -verformung ($\epsilon_{1,max}$) im Bruchzustand; bei mittlerer Spannung (σ_{max}) aufnehmbare Oktaederspannung (τ_{max}); $\sigma_{1,Rest}$: Restfestigkeit bei $\epsilon_{1,Rest}$ (Axialverformung im Restfestigkeitsbereich); Entf.-Mod.: Entfestigungsmodul; ν : Querkontraktionszahl; ψ : Dilatanzwinkel	74
Tabelle 8-8:	Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen. Schwinden, Porosität, Porenradienverteilung, Permeabilität.	75
Tabelle 8-9:	Zusammenstellung der Materialparameter. Thermodynamische Untersuchungen. Adiabatische Temperaturentwicklung beim Abbinden, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, Temperaturstabilität; n.b.: nicht bestimmt.	76
Tabelle 9.1-1:	Für die numerischen Berechnungen als Eingangsdaten verwendete Materialkennwerte der Festmaterialdichte, isobaren spezifischen Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und des Wärmeausdehnungskoeffizienten.	77

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 11

Abbildungsverzeichnis

		Blatt
Abbildung 2-1:	Siebanalysen des Zementes, der Steinkohlenflugasche und des Flotationsrückstandes vom Kaliwerk Zielitz.	16
Abbildung 2-2:	Siebanalysen der Aufbereitungsrückstände des Kaliwerks Zielitz. Flotationsrückstand sowie Bandbreite des Gemisches Flotations-/Heißlöserückstand im Verhältnis 70:30.	16
Abbildung 4.2-1:	V-Trichter zur Ermittlung der Ausfließzeit von Beton (Volumen 9.577 cm ³).	23
Abbildung 5.1-1:	Schnittflächen der Salzbetonproben aus 1.000-ml-Standzylindern mit Heißlöse- und Flotationsrückstand als Salzzuschlag. 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.	28
Abbildung 5.1-2:	Bohrschema des Versatzkörpers (in-situ Freifallversuch) mit einer rechteckigen Grundfläche von ca. 3,0 m · 3,2 m und einer Höhe von etwa 1,5 m.	29
Abbildung 5.1-3:	Abhängigkeit der maximalen sedimentationsstabilen Korngröße von der Fließgrenze (τ_0) der Suspension.	30
Abbildung 6-1:	Kernbohrungen zur Gewinnung von Prüfkörpern des Versatzkörpers im IB-Gesenk 1B des ERAM (in-situ Freifallversuch). Der Versatzkörper hat eine rechteckige Grundfläche mit Kantenlängen von ca. 3,0 m und 3,2 m sowie eine Höhe von ca. 1,5 m. D: Prüfkörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit. E: Proben zur Messung des statischen Elastizitätsmoduls.	38
Abbildung 6.5-1:	Abhängigkeit der Oktaederspannung im Bruchzustand von der mittleren Spannung.	49
Abbildung 6.5-2:	Abhängigkeit der Oktaederspannung im Volumenminimum (Dilatanzgrenze) von der mittleren Spannung. Bei Manteldrücken > 2,5 MPa war kein Volumenminimum bestimmbar. Die Prüfkörper wurden bis in den Nachbruchbereich kompaktiert.	50
Abbildung 6.7-1:	Messresultate zum Kriechverhalten des Salzbetons. Die Abbindezeit der Prüfkörper, die mit Kriechspannungen von 9,9 MPa und 10,9 MPa belastet wurden, betrug zu Versuchsbeginn 420 Tage und der Prüfzylinder, die mit 9,0 MPa, 11,8 MPa und 13,4 MPa belastet wurden 56 Tage.	52
Abbildung 6.8-1:	Schwindmaße in Abhängigkeit der Abbindezeit der Prüfkörper.	55
Abbildung 6.10-1:	Porenradienverteilung des Salzbetons dargestellt als Volumensummenkurve und in Prozent des gesamten Porenvolumens (V_{max}).	57

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 12

Abbildung 6.11-1: Schematische Darstellung der Zwei-Kammer-Methode. In Folge der Prüfkörperpermeabilität sinkt der Druck in der Eingangskammer V1, während in der Ausgangskammer V2 ein Druckanstieg zu registrieren ist.	59
Abbildung 6.11-2: Gaspermeabilität eines getrockneten Prüfkörpers sowie im Normalklimat 20/65 gelagerter Proben in Abhängigkeit vom Manteldruck.	62
Abbildung 7.1-1: Adiabatische Temperaturentwicklung (Messtemperaturen in Grad Celsius) des Salzbetons im Verlauf des Abbindeprozesses.	65
Abbildung 9.2-1: Vergleich des Hydratationsgrades aus adiabatischen Messungen mit der funktionalen Anpassung (Näherung α).	80
Abbildung 9.3-1: Messwerte der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit und Rechenwerte der Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter t_e .	83
Abbildung 9.3-2: Messwerte der einaxialen Zugfestigkeit und Rechenwerte der Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter t_e .	84
Abbildung 9.3-3: Statische Elastizitätsmoduli und Rechenwerte der Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter t_e .	84

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

1 Einleitung

Im Rahmen der Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) sollen Teile des Grubengebäudes, z.B. Abbaukammern und Strecken, mit Baustoffen im Sinne eines Massenbetons stabilisierend verfüllt werden. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Stilllegungskonzeptes ist die Errichtung qualifizierter Streckenverfüllungen, die auch als Strecken mit hohen Anforderungen oder Abdichtungen bezeichnet werden. Ihre Aufgabe ist es, definierte Strömungswiderstände im Grubengebäude darzustellen.

Die Abdichtungen sollen als hydraulisches Dichtelement und gleichzeitig als Widerlager fungieren. Sie sollen aus monolithischen Segmenten hergestellt werden. Zur Reduktion von Zwangsbeanspruchungen, die z.B. aus geologischen Bewegungen und Temperaturzwang resultieren, dienen plastische Trennfugen. Der Baustoff zur Erstellung der einzelnen Segmente soll als Suspension durch Rohrleitungen vor Ort transportiert werden. An den Baustoff resultieren somit Anforderungen an die rheologischen, thermodynamischen und physikalischen Materialeigenschaften, wie ausreichende Festigkeit und geringe Durchlässigkeit sowie Anforderungen, die aus dem Umwelt- und Arbeitsschutz resultieren.

Unter Berücksichtigung der aus konstruktiven Erfordernissen abgeleiteten Anforderungen wurde zur Erstellung der Abdichtsegmente die Baustoffrezeptur - Salzbeton M2 - ausgewählt. Als Bindemittel dienen sulfatbeständiger Hochofenzement sowie Steinkohlenflugasche, die über latent hydraulische bzw. puzzolanische Eigenschaften verfügt. Steinkohlenflugaschen wird darüber hinaus eine Steigerung der Sulfatbeständigkeit zugeschrieben, eine Erhöhung der Endfestigkeit sowie auf Grund des Auftretens von SiO₂-Cenosphären eine Verbesserung der rheologischen Eigenschaften. Als Zuschlag findet Steinsalzgrus Verwendung, so dass nach dem Anmischen der Salzbetonkomponenten eine gesättigte NaCl-Lösung entsteht. Hierdurch werden Anlösungserscheinungen des anstehenden Gebirges (Steinsalz) ausgeschlossen und die Anbindung des Bauwerks an das Gebirge gewährleistet.

Der vorliegende Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Ausgangsstoffe sowie der Rezeptur - Salzbeton M2 - 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, bei der Deutschen Montan Technologie GmbH (DMT), bei der Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik, Wilsnack & Partner (IBeWa) sowie am Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG). Weitere Untersuchungen waren erforderlich zur Erlangung einer allgemeinen Zulassung gemäß § 4 der Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV).

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 14

Des Weiteren wird dargestellt, welche Ergebnisse der Laboruntersuchungen thermodynamischer und physikalischer Baustoffeigenschaften 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.

ERA
Morsleben

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	0054	00	

2 Ausgangsstoffe und Rezeptur

Die Bestandteile der Rezeptur - Salzbeton M2 - sind Zement CEM III/B 32,5 - NW/HS/NA gemäß DIN EN 197, Teil 1 /1/ und DIN 1164 /2/, Steinkohlenflugasche (Filterasche) HKV mit dem Prüfzeichen PA-VII/21 (vgl. DIN EN 450 /3/), Steinsalzzuschlag und Wasser. Die Zusammensetzung des Salzbetons beschreibt Tabelle 2-1.

Als Steinsalzzuschlag fanden Aufbereitungsrückstände des Kaliwerks Zielitz Verwendung. Der Salzbeton wurde hergestellt mit Flotationsrückstand, der eine Kornverteilung zwischen 0 und 2 mm aufweist oder mit einer Mischung von Flotations- und Heißlöserückstand, im Verhältnis 70:30. Der Heißlöserückstand hat ein Größtkorn von 20 mm. Die Resultate von Siebanalysen der Steinsalzzuschläge sind dargestellt in den Abbildungen 2-1 und 2-2. Abbildung 2-1 zeigt zusätzlich Korngrößenspektren des Zementes und der Steinkohlenflugasche. Da die Aufbereitungsrückstände Feuchtigkeiten von 2 bis 9 Massen-% aufwiesen, war es erforderlich den Wasseranteil der Rezeptur entsprechend zu korrigieren.

Bei der Herstellung der Salzbetonsuspension wurde stets der Steinsalzzuschlag mit dem Zugabewasser vermengt, bevor der Zement und die Steinkohlenflugasche zugegeben wurde.

Betonkomponenten	kg / m ³	Massen-%
Zement	328	16,4
Steinkohlenflugasche	328	16,4
Wasser	267	13,4
Steinsalzzuschlag	1.072	53,8
Summe	1.995	100,0

Tabelle 2-1: Mengengerhältnisse der Salzbetonbestandteile in kg/m³ und Massen-%.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

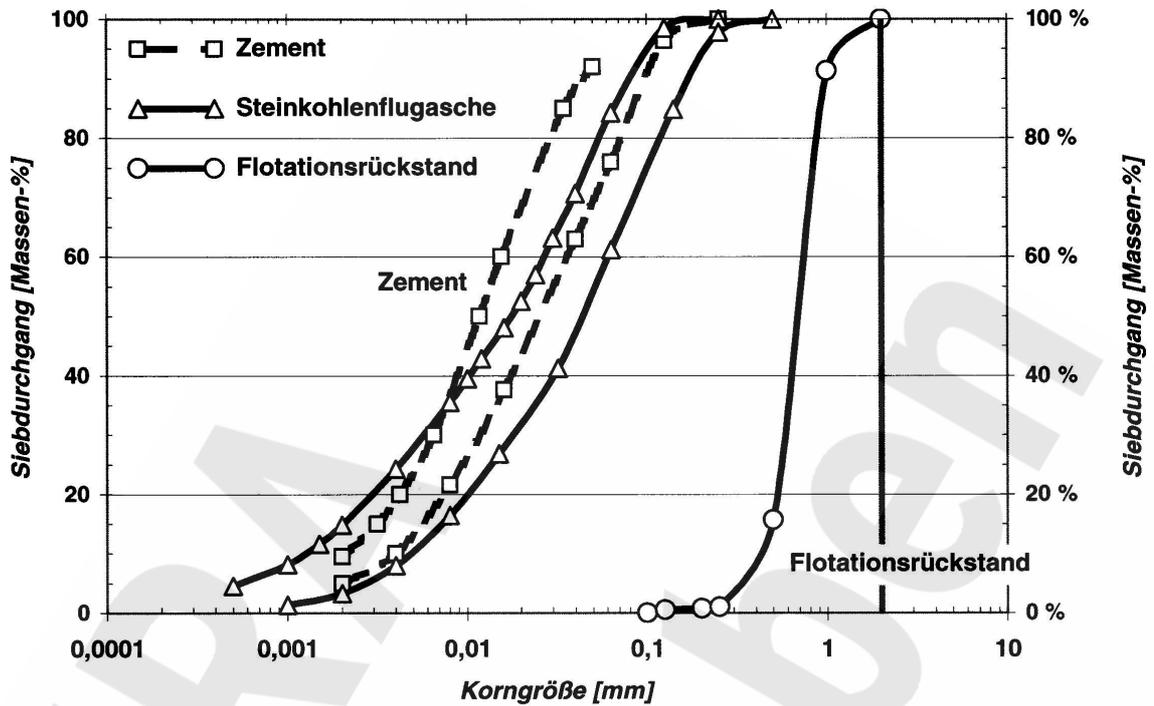


Abbildung 2-1: Siebanalysen des Zementes, der Steinkohlenflugasche und des Flotationsrückstandes vom Kaliwerk Zielitz.

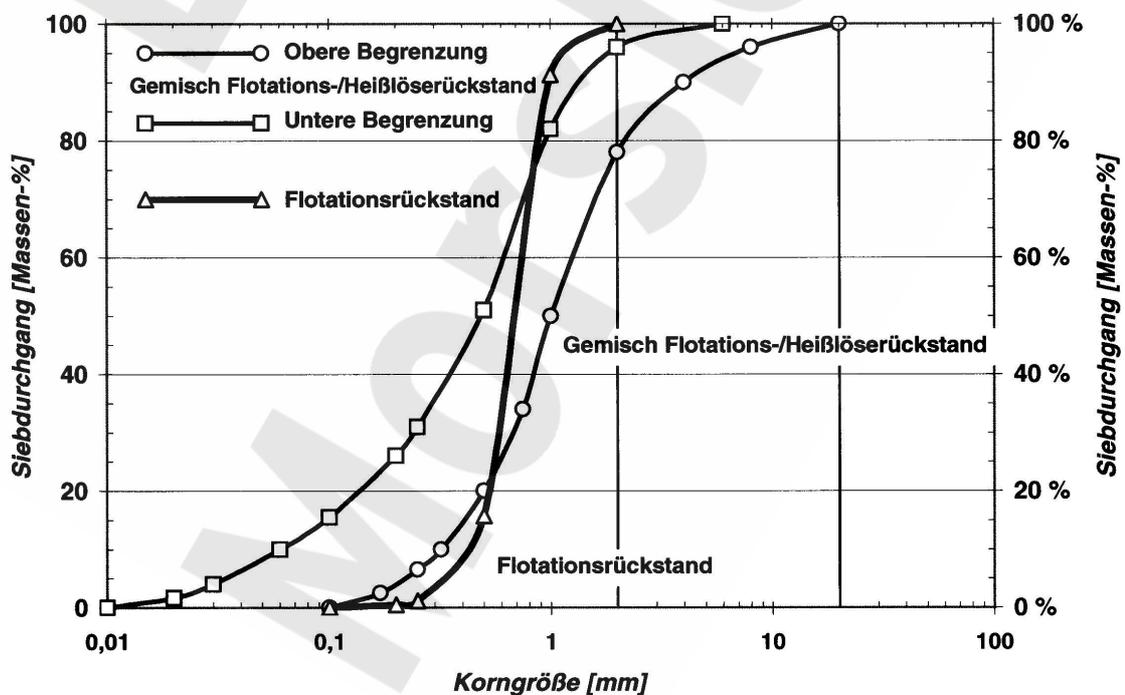


Abbildung 2-2: Siebanalysen der Aufbereitungsrückstände des Kaliwerks Zielitz. Flotationsrückstand sowie Bandbreite des Gemisches Flotations-/Heißlöserückstand im Verhältnis 70:30.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

3 Bergbauhygienische Beurteilung gemäß Gesundheitsschutz-Bergverordnung

Der Umgang mit Salzbeton und seinen Ausgangsstoffen erfordert eine allgemeine Zulassung gemäß § 4 (Absatz 1 und 2) der Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung, GesBergV). Zur Beurteilung der Ausgangsstoffe dienen die in den Prüfbestimmungen des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen aufgeführten 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 Abfällen 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.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

4 Rheologische Untersuchungen

Zur Untersuchung des Fließ- und Förderverhaltens des Salzbetons wurden Messungen in einem Rohrviskosimeter sowie mit Konsistenzprüfverfahren (V-Trichter, Ausbreit- und Setzfließmaß) durchgeführt. Zusätzlich wurde der Fließwinkel ermittelt, da er Aussagen zum Ausbreitverhalten des Frischbetons im Verlauf der Verfüllung von Grubenhohlräumen erlaubt.

4.1 Versuche im Rohrviskosimeter

Für einen Rohrleitungstransport von Betonsuspensionen ist eine Mindest- oder Anfangsschubspannung, die sog. Fließgrenze (τ_0) erforderlich. Die während des Förderprozesses auftretende Schubspannung (τ) steigt mit der Viskosität oder Konsistenz (K) des Frischbetons und mit dem Schergefälle (γ) in der fließenden Suspension. Mathematisch ist das Fließverhalten beschreibbar durch das Fließgesetz nach Herschel-Bulkley (Gl. 4.3):

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n, \quad (4.3)$$

wobei n als Strukturexponent, -ziffer oder Fließindex bezeichnet wird und die Abhängigkeit der Viskosität vom Schergefälle beschreibt.

Die bei der Förderung in einer Rohrleitung auftretenden Druckverluste ergeben sich in Abhängigkeit von der Rohrleitungslänge (Δl), der Schubspannung und dem Rohrdurchmesser (D) nach Gl. (4.4):

$$\Delta p / \Delta l = 4 / D \cdot (\tau_0 + K \cdot \gamma^n) \quad (4.4)$$

Der bei reduzierter Förderleistung bzw. Schergefälle auftretende Mindestdruckverlust $(\Delta p / \Delta l)_{\min}$ berechnet sich in Analogie zu Gl. (4.4) nach Gl. (4.5), wobei die Schubspannung (τ) durch die Fließgrenze (τ_0) ersetzt wird:

$$\Delta p_{\min} / \Delta l = 4 \cdot \tau_0 / D. \quad (4.5)$$

Bei Rohrviskosimetern wird das zu untersuchende Medium durch eine Rohrschleife gepumpt. Gemessen wird die Fließgeschwindigkeit und der Druck an verschiedenen Messpunkten des Rohres (Druckverlustmessstrecken), woraus die Berechnung der Fließgesetzparameter und des Druckverlustes möglich ist. Darüber hinaus ermöglicht ein Rohrviskosimeter die Bestimmung von Anfahrdruckspitzen, die bei Wiederbeginn einer Förderung im Anschluss einer Stationierungsphase auftreten können.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Die Konditionierung des Salzbetons zu einer homogenen Suspension erfolgte in einem Pflug-schartrommelmischer. Zur Bestimmung der Druckverluste diente ein DMT On-line Suspensionsviskosimeter DN 40. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte PC gestützt. Die Förderversuche dienten zur Charakterisierung des Fließverhaltens der Suspension in Abhängigkeit der Förder- bzw. Stationierungszeit in der Rohrleitung sowie des Wasseranteils des Salzbetons.

Zu Beginn von Förderversuchen sinken die Druckverluste um ca. 25 bis 30 %. Um den Einfluss „des Nachmischeffekts“ auszuschließen, beziehen sich sämtliche Angaben zu den Fließgesetzparametern und den Druckverlusten auf die anschließende sog. stationäre Fließphase, in der die Druckverluste nahezu konstant sind.

Fließverhalten in Abhängigkeit der Stationierungszeit

Zur Bestimmung des Fließverhaltens der Salzbetonsuspension in Abhängigkeit der Stationierungszeit in Rohrleitungen dienten Messungen sofort nach dem Einfüllen des Frischbetons in den Pumpkreislauf des Viskosimeters sowie nach Stationierungszeiten von 30, 60 und 90 Minuten. Die Suspension enthielt als Salzzuschlag das Gemisch aus Heißlöse- und Flotationsrückständen.

Die Förderversuche ergaben, dass das rheologische Verhalten der Suspension dem Fließgesetz von Herschel-Bulkley folgt. Tabelle 4.1-1 fasst die Werte der Fließgesetzparameter sowie die prognostizierten Druckverluste bei einer Förderleistung von 55 m³/h für die Rohrquerschnitte DN 100, DN 125 und DN 150 zusammen. Die Werte belegen das pseudoplastische (strukturviskose) Fließverhalten.

				Rohrinnenweite		
				DN 100	DN 125	DN 150
Versuchsdauer	τ_0	K	n	prognostizierte Druckverluste		
[Minuten]	[Pa]	[Pa s ⁿ]	—	[bar / 100 m bei 55 m ³ / h]		
0	29,2	20,1	0,42	9,1	5,7	4,0
30	22,9	17,3	0,44	8,0	5,0	3,5
60	24,5	23,4	0,40	9,0	5,8	4,0
90	29,5	43,6	0,31	10,6	7,2	5,2

Tabelle 4.1-1: Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste bei Transport der Salzbetonsuspension in Rohrleitungen der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150. τ_0 : Fließgrenze, K: Konsistenz, n: Strukturexponent.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Die beim Anfahren der Suspension bei einer Förderleistung von 55 m³/h gemessene maximale Anfahrdruckspitze lag nach 60 Minuten bei einer Wandschubspannung von 326 Pa. Der daraus berechnete Druckverlust liegt in Abhängigkeit der Rohrleitungsnennweite zwischen 8,7 und 13,0 bar/100 m. Für die Beurteilung der Stationierbarkeit ist jedoch nicht der Druckverlust bei Nennvolumenstrom, sondern der aufzuwendende Mindestdruckverlust bei reduzierter Förderleistung maßgeblich. Die Ergebnisse zu den Mindestdruckverlusten ($\Delta p_{\min}/\Delta l$) sind zusammengestellt in Tabelle 4.1-2.

		Rohrennweite		
		DN 100	DN 125	DN 150
Stationierungszeit	Fließgrenze (τ_0)	Mindestdruckverluste ($\Delta p_{\min}/\Delta l$)		
[Minuten]	[Pa]	[bar / 100 m]		
0	29,2	1,2	0,9	0,8
30	22,9	0,9	0,7	0,6
60	24,5	1,0	0,8	0,7
90	29,5	1,2	0,9	0,8

Tabelle 4.1-2: Fließgrenze und Mindestdruckverluste nach Stationierungszeiten der Suspension von 30, 60 und 90 Minuten sowie ohne Stationierung.

Fließverhalten in Abhängigkeit des Wasseranteiles

Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Fließeigenschaften des Salzbetons in Abhängigkeit der zugegebenen Wassermenge bei einer Förderleistung von 45 m³/h. Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Kornverteilungen des Salzzuschlages auf das Förderverhalten der Suspension bestimmt. Verwendung fand feinkörniger Flotationsrückstand sowie das Gemisch von Flotations- und Heißlöserückständen. Angaben zu den Mischungen enthält Tabelle 4.1-3.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Salzzuschlag Gemisch Flotations-/Heißlöserückstand						Flotationsrückstand	
Wasseranteil der Salzbetonrezeptur [Massen-%]							
12,9	13,2	13,4	13,9	14,1	14,5	12,9	13,4
Wasseranteil der Salzbetonrezeptur [kg/m³]							
259	263	267	275	279	286	259	267
Abweichung des Wassergehalts [Massen-%] bezogen auf die vorgegebene Rezeptur							
-4	-2	0	+4	+6	+10	-4	0
W/(F+Z)-Wert (Verhältnis Wasser/(Steinkohlenflugasche+Zement))							
0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,45	0,39	0,41

Tabelle 4.1-3: Wasseranteile der untersuchten Salzbetonsuspensionen sowie berechnete W/(F+Z)-Verhältnisse.

Neben den Parametern zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften wurde die Temperatur und die Dichte der Suspensionen gemessen. Die Messdaten sind aufgeführt in Tabelle 4.1-4. Tabelle 4.1-5 fasst die Werte der Fließgesetzparameter sowie der prognostizierten Druckverluste für die Rohrennweiten DN 100, DN 125 und DN 150 zusammen.

Salzzuschlag Gemisch Flotations-/Heißlöserückstand						Flotationsrückstand	
Wasseranteil der Salzbetonrezeptur [kg/m³]							
259	263	267	275	279	286	259	267
Abweichung des Wassergehalts [Massen-%] bezogen auf die vorgegebene Rezeptur							
-4	-2	0	+4	+6	+10	-4	0
Suspensionstemperatur [°C]							
18,3	19,1	19,4	18,5	19,7	17,8	21,5	20,9
Suspensionsdichte [kg/m³]							
2.013	1.939	1.918	1.920	1.892	1.899	1.978	1.972

Tabelle 4.1-4: Temperatur und Dichte der Salzbetonsuspensionen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

				Rohrinnenweite		
				DN 100	DN 125	DN 150
Wasseranteil	τ_0	K	n	prognostizierte Druckverluste		
[Massen-%]	[Pa]	[Pa s ⁿ]	—	[bar/100 m bei 45 m ³ /h]		
Salzzuschlag Gemisch Flotations- und Heißlöserückstand (Korngröße < 20 mm)						
12,9 (-4 %)	14,6	3,0	0,75	5,6	2,9	1,8
13,2 (-2 %)	10,1	3,0	0,74	5,0	2,6	1,6
13,4 (0 %)	9,0	2,1	0,83	4,9	2,4	1,4
13,9 (+4 %)	8,5	1,5	0,83	3,9	1,9	1,1
14,1 (+6 %)	11,7	1,6	0,79	3,6	1,9	1,2
14,5 (+10 %)	7,4	1,3	0,80	3,0	1,6	0,9
Salzzuschlag Flotationsrückstand (Korngröße < 2 mm)						
12,9 (-4 %)	20,9	3,5	0,75	6,7	3,6	2,2
13,4 (0 %)	10,7	3,6	0,70	5,2	2,8	2,0

Tabelle 4.1-5: Fließeigenschaften und prognostizierte Druckverluste bei Transport der Suspension in Rohren der Nennweite DN 100, DN 125 und DN 150. τ_0 : Fließgrenze nach Herschel-Bulkley, K: Konsistenz, n: Strukturexponent.

Die Verwendung von Flotationsrückstand an Stelle des Gemisches Heißlöse-/Flotationsrückstand bewirkt eine Zunahme der Fließgrenze und der Viskosität. Ein signifikanter Unterschied der Strukturexponenten konnte dagegen nicht ermittelt werden. Die Struktureigenschaften der Suspensionen, die das pseudoplastische Verhalten verursachen, scheinen demnach unabhängig von der Korngrößenverteilung (Kornzusammensetzung) des Salzzuschlages ähnlich ausgeprägt zu sein.

Die Abhängigkeit der prognostizierten Druckverluste vom Wassergehalt der Rezeptur ist nahezu linear. Geringfügige Abweichungen vom Sollwert bei der Dosierung des Wasseranteils sind im praktischen Betrieb risikolos. Bei Versuchen mit Suspensionen, die ausschließlich Flotationsrückstand enthielten, wurden tendenziell etwas höhere Druckverluste ermittelt. So entspricht beispielsweise das Verhalten einer Rezeptur ohne Abweichung des Wasseranteiles vom Sollwert (0 %) mit Flotationsrückstand einer Suspension, der das Gemisch aus Heißlöse- und Flotationsrückständen zugegeben wurde, bei einer Reduzierung des Wasseranteiles um 2,3 %. Diese Differenz ist auf einen höheren Wasseranspruch des feinkörnigen Flotationsrückstandes zurückzuführen.

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	0054	00

4.2 Konsistenzmessungen

Zur Bestimmung des Fließverhaltens des Frischbetons erfolgten Messungen der Ausfließzeit aus einem V-Trichter sowie Bestimmungen des Ausbreit- und Setzfließmaßes. Bei sogenannten Ausfließverfahren, wie der V-Trichter-Prüfung, werden die Fließzeiten vor allem von der Viskosität des fluiden Mediums bestimmt, während bei Ausbreitverfahren (Ausbreit- und Setzfließmaß) die Fließgrenze einen größeren Einfluss auf die Messresultate hat.

4.2.1 V-Trichter-Prüfung

Die Bestimmung der Ausfließzeit aus dem V-Trichter (Abbildung 4.2-1) basiert auf keiner Norm oder Richtlinie, wird jedoch häufig angewendet zur Untersuchung des Fließverhaltens selbstverdichtender Betone. Vor der Prüfung werden die Innenwände des Trichters befeuchtet. Nach dem Befüllen wird die Suspension entlang der Trichteroberkante bündig abgezogen, die Verschlussklappe geöffnet und die Fließzeit gemessen.

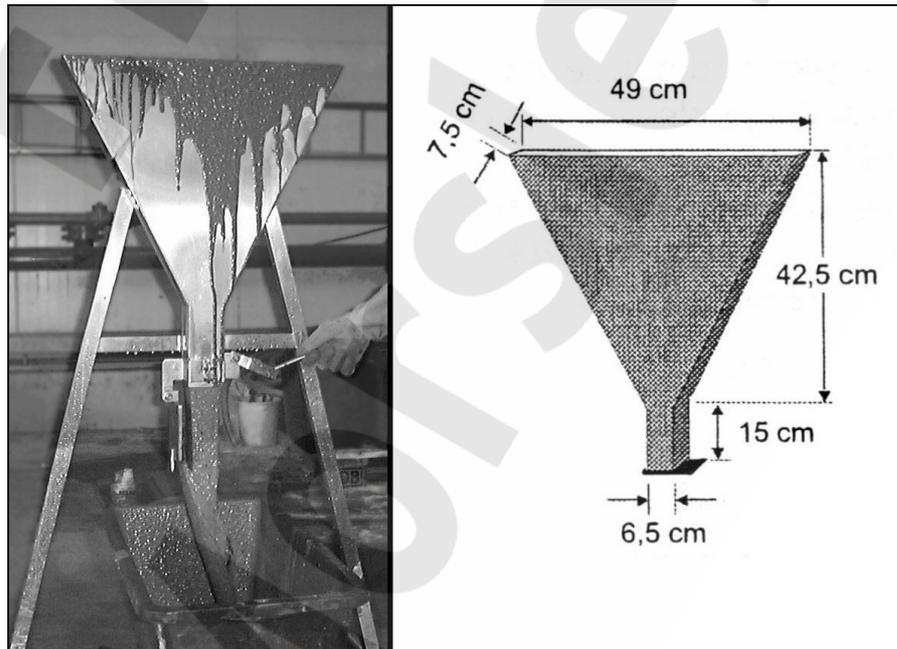


Abbildung 4.2-1: V-Trichter zur Ermittlung der Ausfließzeit von Beton (Volumen 9.577 cm³).

Prüfungen erfolgten mit Salzbeton, der ein Gemisch aus Heißlöse- und Flotationsrückständen enthielt. Bei einer Messreihe, die im Anschluss von Förderversuchen im Rohrviskosimeter erfolgte, wurde die Größe der Trichteröffnung durch kreisförmige Blenden reduziert. In Tabelle 4.2-1 sind die Mittelwerte der Messdaten angegeben. Im Original-Trichter (ohne Blende) erfolgten 6 Messungen, bei der Verwendung von Blenden jeweils 3 Prüfungen. Zusätzlich

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

wurden auf der Basis des V-Trichter-Volumens, der Messzeiten und der Fläche der Auslauföffnungen die Strömungsgeschwindigkeiten der Salzbetonsuspension berechnet.

Größe Trichteröffnung	6,5-7,5 cm	Ø 4,4 cm	Ø 3,5 cm	Ø 2,6 cm
Fläche Trichteröffnung	48,8 cm ²	15,2 cm ²	9,6 cm ²	5,3 cm ²
Ausfließzeit aus dem V-Trichter (+10 %)				
	1,33 s	4,37 s	7,43 s	13,40 s
Ausfließzeit aus dem V-Trichter (-6 %)				
	1,63 s	nicht bestimmt	8,03 s	nicht bestimmt
Strömungsgeschwindigkeit der Salzbetonsuspension				
Suspension +10 %	147 cm/s	144 cm/s	134 cm/s	135 cm/s
Suspension -6 %	120 cm/s	nicht bestimmt	124 cm/s	nicht bestimmt

Tabelle 4.2-1: Resultate der Fließversuche im V-Trichter. In Klammern sind die Abweichungen des Wasseranteiles der Salzbetonsuspension vom Sollwert angegeben.

Die niedrigen Ausfließzeiten weisen auf geringe Viskositäten der Salzbetonsuspensionen hin. Die Strömungsgeschwindigkeiten des Frischbetons sind nahezu unabhängig von der Größe der Auslauföffnung. Eine Behinderung des Strömungsprozesses durch den im Salzbeton dispergierten körnigen Salzzuschlag konnte nicht nachgewiesen werden.

4.2.2 Ausbreitmaß

Die Bestimmung des Ausbreitmaßes gibt Aufschluss über das Fließverhalten eines Frischbetons. Das Ausbreitmaß wurde nach DIN 1048, Teil 1 /5/ bestimmt. Es erfolgten jeweils eine Versuchsreihe bei Raumklima, eine bei 40 °C und 30 % relative Luftfeuchtigkeit sowie eine bei 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit (Normalklima 20/65, /6/). Zusätzlich wurde bei den Versuchen die Frischbetontemperatur aufgezeichnet. Resultate liegen vor für Abbindezeiten von 0, 30, 45, 60 und 90 Minuten.

Die Messresultate des Ausbreitmaßes sowie der Temperaturen des Frischbetons sind zusammengestellt in Tabelle 4.2-2. Das Ausbreitmaß der Salzbetonsuspension variiert demnach bei Abbindezeiten von maximal 90 Minuten zwischen 65 und 70 cm. Nach DIN 1045-2 sind Suspensionen mit einem Ausbreitmaß von ≥ 63 cm der Ausbreitmaßklasse F6 (sehr fließfähig) zuzuordnen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

	Raumklima			Klima 40/30		Normalklimat 20/65	
Abbindezeit	0 min	30 min	60 min	60 min	90 min	0 min	45 min
Ausbreitmaß	70 cm	67 cm	65 cm	70 cm	66 cm	69 cm	66 cm
Betontemperatur	28 °C	24 °C	22 °C	28 °C	28 °C	20,8 °C	20,8 °C

Tabelle 4.2-2: Ausbreitmaß der Salzbetonsuspension nach Abbindezeiten von 0 bis 90 Minuten sowie Frischbetontemperatur zu Versuchsbeginn.

4.2.3 Setzfließmaß

Das Setzfließmaß dient, wie das Ausbreitmaß (vgl. Kapitel 4.2.2), zur Charakterisierung des Fließverhaltens eines Frischbetons. Es wurde nach der DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ /9/ bestimmt, jedoch floss die Suspension, abweichend von der Richtlinie, auf eine trockene Ausbreitplatte. Als Salzzuschlag des Salzbetons diente das Gemisch aus Heißlöse- und Flotationsrückstand (Größtkorn 20 mm).

Eine Messreihe zur Ermittlung des Setzfließmaßes in Abhängigkeit des Wasseranteiles der Suspension erfolgte unter Normalbedingungen ca. 10 bis 30 Minuten nach dem Anmischprozess. Die Mittelwerte von jeweils drei Prüfungen sind zusammengestellt in Tabelle 4.2-3.

Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert (Wasseranteil in kg/m³)					
-6 % (255)	-3 % (261)	0 % (267)	+3 % (272)	+6 % (278)	+10 % (286)
Setzfließmaß in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“					
49 cm	51 cm	55 cm	58 cm	64 cm	68 cm

Tabelle 4.2-3: Setzfließmaß in Abhängigkeit vom Wasseranteil der Salzbetonsuspension.

Die Messwerte belegen, dass das Setzfließmaß gut mit dem Wasseranteil des Salzbetons korreliert. Eine weitere Doppelbestimmung des Setzfließmaßes, die 10 Minuten nach dem Anmischen der Suspension (ohne Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert) durchgeführt wurde, kam ebenso im Mittel auf 55 cm.

4.3 Fließwinkel

Die Bestimmung des Fließwinkels ist in keiner Norm oder Richtlinie beschrieben, liefert jedoch wesentliche Aussagen zum Ausbreitverhalten des Frischbetons, zum Verfüllvorgang der Gruben Hohlräume sowie zur Firstanbindung.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 26

Bestimmungen des Fließwinkels erfolgten in einer 2 m langen Plexiglasrinne, mit einer Breite von 277 mm und einer Höhe von 291 mm. Die Rinne wurde von einer Endseite über einen DN 40-Schlauch mit ca. 35 Liter Suspension befüllt, die zuvor 20 Minuten in einem Rohrviskosimeter gepumpt wurde (Simulation der Förderung, vgl. Kapitel 4.1). Die Suspension floss frei, d.h. ohne die Aufbringung zusätzlicher Energie, aus. Füllstandsmessungen erfolgten im Abstand von 10 cm, an der linken und rechten Wandung sowie in der Mitte der Fließrinne.

Der mittlere Fließwinkel betrug 1,25 %, entsprechend 0,7 Grad.

ERA
Morsleben

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

5 Untersuchungen zur Kornsedimentation und zur Überschusslösung

5.1 Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten

Zur Ermittlung möglicher Entmischungerscheinungen der Salzbetonkomponenten in Folge von Förderunterbrechungen, veränderten Wassergehalten sowie des Verstärkens der Suspension erfolgten Untersuchungen an frischen und abgebundenen Salzbetonproben.

5.1.1 Sedimentationsversuch in einer vertikalen Rohrleitung

Zur Untersuchung des Materialverhaltens der Suspension in vertikalen Rohrleitungen wurde ein 6 m hohes Stahlrohr (Innendurchmesser 125 mm) vollständig mit Salzbetonsuspension befüllt, die das Gemisch Flotations-/Heißlöserückstand enthielt. Das Füllvolumen betrug 73,6 Liter (ca. 147 kg). Das Standrohr besaß, von der Standfläche aus gesehen, 6 Probenahmemöglichkeiten in jeweils 250 mm Abstand. Die oberste Probenahmestelle befand sich demnach in einer Höhe von 1,5 m.

Suspensionsproben wurden nach 3, 4, 8, 14 und 24 Stunden entnommen. Die Beprobungen ergaben eine vergleichbare Konsistenz (Fließfähigkeit) der Suspension unabhängig von der Höhe der Probeentnahme. Bestimmungen mit einem Infrarottrockner bei 160 °C ergaben Wasseranteile von 12 bis 13 Massen-%, unabhängig von der Probenahmestelle sowie vom Zeitpunkt der Probeentnahme.

Der Versuch zeigt, dass eine Entmischung der Salzbetonsuspension, z.B. in vertikalen Rohrleitungen, auch nach längeren Standzeiten auszuschließen ist.

5.1.2 Sedimentationsversuch bei veränderten Wassergehalten

Im Rahmen der Förderversuche bei Wassergehaltsabweichungen von –4 bis +10 % erfolgten Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten der Salzbetonsuspension. Hierzu wurden nach jedem Förderversuch Materialproben in 1.000-ml-Standzylinder eingefüllt und diese anschließend abgedeckt. Nach dem Abbinden wurden die Proben aus den Standzylindern entnommen und entlang der Längsachse gesägt (vgl. /10/, Kapitel 6.4).

Die visuelle Beurteilung der Probeoberflächen ergab, unabhängig vom Anteil des Anmischwassers der Salzbetonsuspension, ein einheitliches Korngefüge der Materialproben und folglich keine Anzeichen für Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen (Abbildung 5.1-1).

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

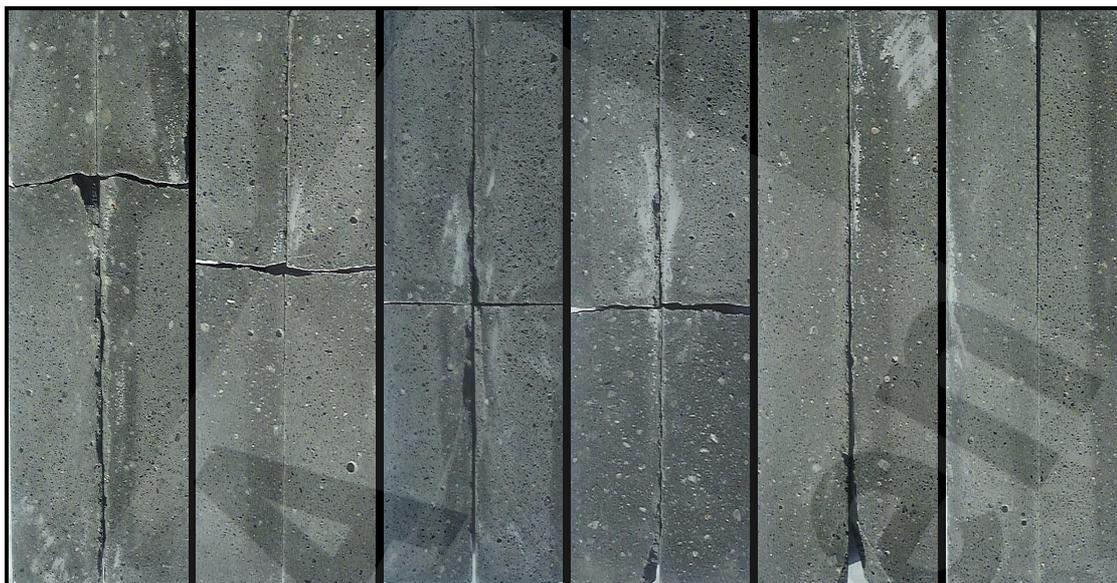


Abbildung 5.1-1: Schnittflächen der Salzbetonproben aus 1.000-ml-Standzylindern mit Heißlöse- und Flotationsrückstand als Salzzuschlag. Von links nach rechts sind dargestellt Salzbetone mit einem Wasseranteil von (Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert in Klammern) 12,9 % (–4 %), 13,2 % (–2 %), 13,4 % (0 %), 13,8 % (+4 %), 14,1 % (+6 %) und 14,5 % (+10 %). Die Höhe der Proben beträgt 36 cm.

5.1.3 Begutachtung von Bohrkernen des in-situ Freifallversuches

Zur Untersuchung möglicher Entmischungserscheinungen der Salzbetonkomponenten im Verlauf der Verfüllung untertägiger Hohlräume diente ein Freifallversuch von der 2. zur 3. Sohle im IB-Gesenk 1B des ERAM. Insgesamt wurden etwa 12,5 m³ Suspension über eine Fallhöhe von 37 m verstürzt 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. Nach dem Verstürzen des Salzbetons wurde der Versatzkörper mit Folie abgedeckt. Die Ausschalung erfolgte nach 3 Wochen. Anschließend wurden nach dem in Abbildung 5.1-2 dargestellten Schema Kernbohrungen in den Versatzkörper gestoßen. Mit Ausnahme der Bohrungen 21 und 22 handelt es sich um Horizontalbohrungen. Die Bohrungen 11 bis 20 verlaufen diagonal in die Stöße (Steinsalz und Mauerwerk).

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	0054	00

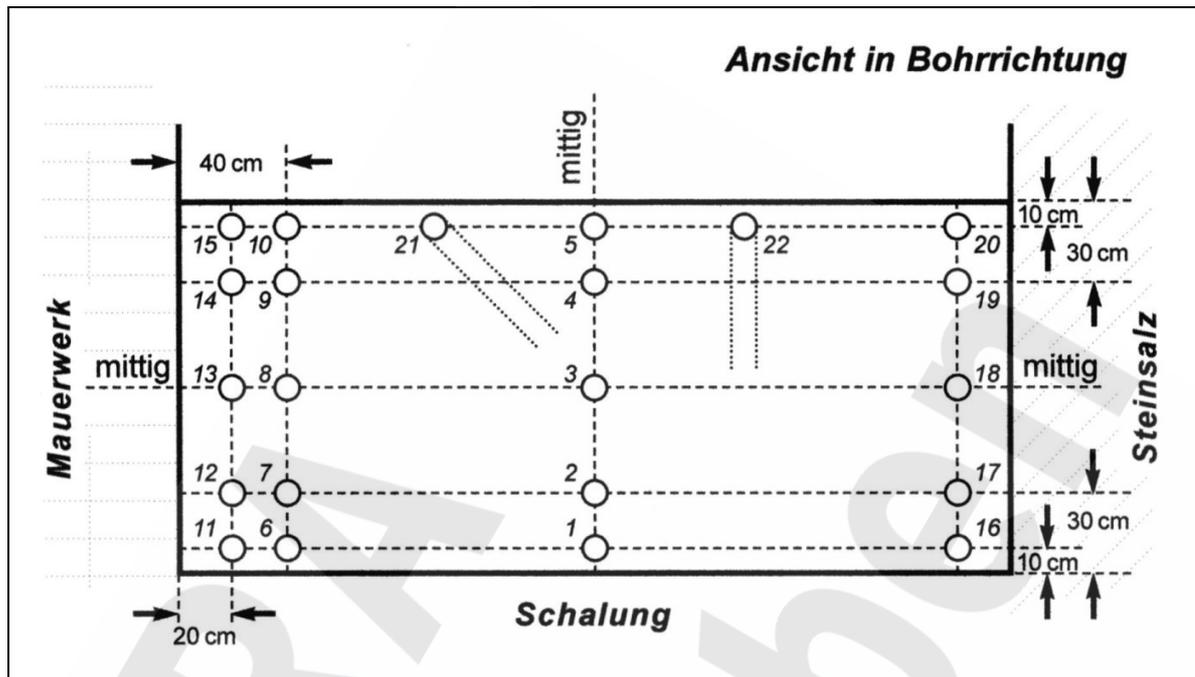


Abbildung 5.1-2: Bohrschema des Versatzkörpers (in-situ Freifallversuch) mit einer rechteckigen Grundfläche von ca. 3,0 m · 3,2 m und einer Höhe von etwa 1,5 m.

Die Oberflächen von Kernstücken mit einer Länge von ≥ 30 cm wurden gescannt. Darüber hinaus erfolgte PC gestützt eine Analyse der Kornverteilung. Die visuelle Beurteilung der Bohrkerne sowie die digitale Bildanalyse ergaben einen gleichmäßigen Kornaufbau des Versatzkörpers.

Die Kerne der schräg in die Stöße gestoßenen Bohrungen zeigen eine formschlüssige Anbindung des Versatzkörpers am Steinsalzstoß bzw. am Mauerwerk. Einzelne Brüche an den Kontaktflächen zum Steinsalzstoß und Mauerwerk sowie des Kernmaterials aus dem Versatzkörper sind auf den Bohrvorgang zurückzuführen. Der RQD-Index (Rock Quality Designation) beträgt 100 %, d.h., alle Kernstücke sind > 10 cm.

5.1.4 Bestimmung der sedimentationsstabilen Korngröße

Die Bewertung einer möglichen Sedimentation/Entmischung von Salzbetonkomponenten kann mit Hilfe der „Sedimentationsstabilen Korngröße“ erfolgen (Gl. 5.1). Die „Sedimentationsstabile Korngröße“ ist proportional der Fließgrenze der Suspension und berechnet sich wie folgt:

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00

$$d_{\max} = \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \tau_0 / (\Delta \rho \cdot g)} \quad (5.1)$$

mit

d_{\max} maximale sedimentationsstabile Partikelgröße [m]

g Gravitationsbeschleunigung [m/s²]

τ_0 Fließgrenze [Pa]

$\Delta \rho$ Dichtedifferenz Suspension (ρ : 1.995 kg/m³) zu Salzzuschlag (Halit: 2.168 kg/m³), Steinkohlenflugasche (2.255 bis 2.271 kg/m³) und Zement (2.974 bis 3.024 kg/m³).

Abbildung 5.1-3 zeigt nach Gl. (5.1) berechnete „Sedimentationsstabile Korngrößen“ der Salzbetonkomponenten für Fließgrenzen zwischen 0 und 10 Pa. Zusätzlich ist die niedrigste gemessene Fließgrenze von 7,4 Pa eingetragen, die eine Salzbetonsuspension mit einer Abweichung des Wassergehalts von +10 % vom Sollwert bei einem Förderversuch im Rohrviskosimeter aufwies (vgl. Tabelle 4.1-5). Aus der Abbildung geht hervor, dass die Korngrößen der Feststoffkomponenten des Salzbetons (vgl. Abbildungen 2-1 und 2-2) immer kleiner als die entsprechende sedimentationsstabile Korngröße sind. Selbst bei einer Wassergehaltsabweichung von +10 % ($\tau_0 = 7,4$ Pa) sind demnach Sedimentations- bzw. Entmischungserscheinungen auszuschließen. Die Befunde bestätigen damit auch die Ergebnisse der Sedimentationsversuche (vgl. Kap. 5.1.2).

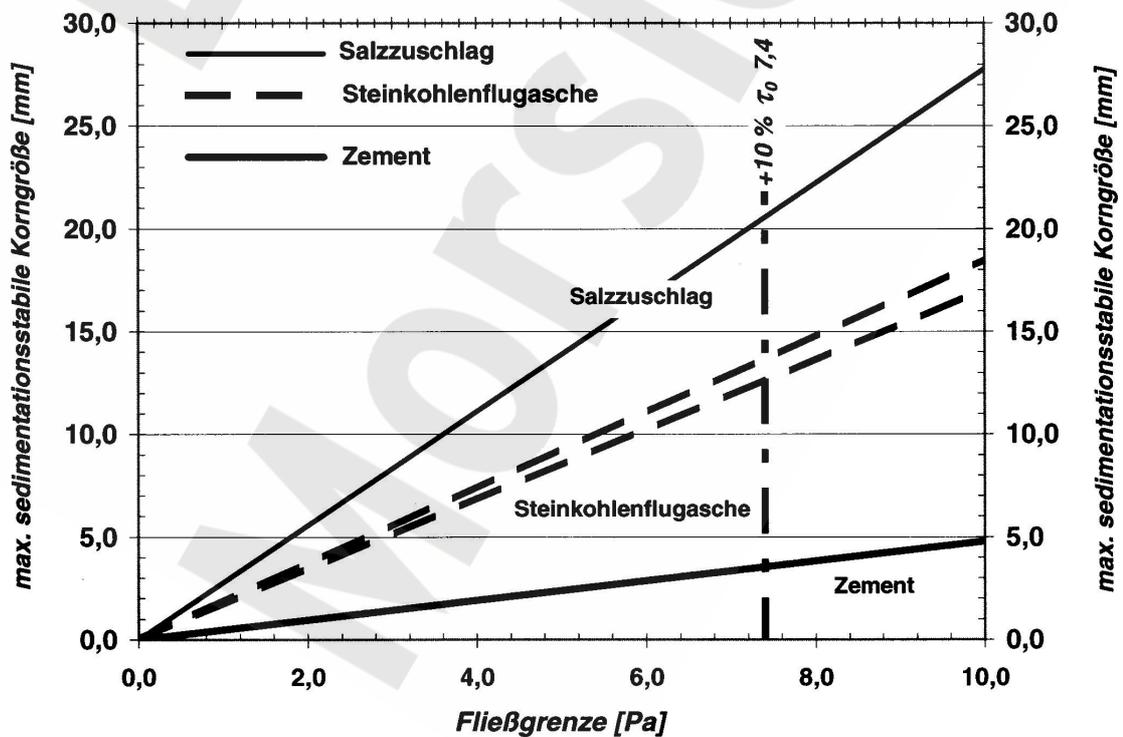


Abbildung 5.1-3: Abhängigkeit der maximalen sedimentationsstabilen Korngröße von der Fließgrenze (τ_0) der Suspension.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

5.2 Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung

Bei der Überschusslösung handelt es sich um eine Flüssigkeit, die sich während des Abbindens auf der Oberfläche des frischen Salzbetons bildet. Dieser Vorgang wird in der Baustofftechnologie auch als „Bluten“ bezeichnet. Eine Ursache zur Entstehung von Überschusslösung ist, wenn die der Betonmischung zugegebene Wassermenge vom Baustoff nicht vollständig chemisch oder physikalisch gebunden werden kann. 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 Salzbetonrezeptur M2 beträgt etwa 0,81 und der $W/(Z+F)$ -Wert ca. 0,41 (vgl. Tabelle 2-1). Der Zementäquivalentwert ergibt sich zu 0,58, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass die oben angegebene Formel für Normalbetone mit einem Flugaschegehalt von höchstens 0,25·Z entwickelt wurde. Anhand der berechneten Werte ist davon auszugehen, dass entsprechend der Zusammensetzung der Salzbetonrezeptur die zugefügte Wassermenge im Verlauf der Hydratation vollständig von den Bindemitteln aufgenommen werden kann, wobei ein Teil des Wassers in Kapillarporen physikalisch gebunden wird. Steinkohlenflugaschen nehmen jedoch meist, auf Grund ihres latent hydraulischen Verhaltens, erst zu einem späteren Zeitpunkt am Hydratationsprozess teil.

Zur Untersuchung der Bildung von Überschusslösung des frischen Salzbetons erfolgten in 1000-ml-Standzylindern Absetzversuche in Abhängigkeit des Wassergehalts der Suspension sowie der Korngrößenverteilung des Salzzuschlages. Weitere Versuchsreihen im Technikummaßstab hatten zum Ziel das Absetzverhalten der Originalrezeptur (Wassergehalt entspricht dem Sollwert), zu deren Herstellung ein Gemisch von Flotations- und Heißlöserückständen verwendet wurde, in Prüfformen unterschiedlicher Höhe und Durchmessers zu bestimmen.

5.2.1 Untersuchungen in Abhängigkeit der Betonoberfläche (konstante Füllhöhe)

Zur Bestimmung einer möglichen Abhängigkeit der Menge an Überschusslösung von der Größe der Betonoberfläche erfolgte eine Messreihe bei konstanter Füllhöhe (2 m) in Zylindern unterschiedlichen Durchmessers. Die Zylinder waren mit einer Folie abgedeckt. Die Messresultate (Eintauchtiefe eines Lineals) finden sich in Tabelle 5.2-1. Die Messgenauigkeit beträgt 1 mm.

Standzeit [Stunden]	Zylinderinnendurchmesser [mm]				
	50	100	200	300	500
	Betonoberfläche [cm ²]				
	20	79	314	707	1964
	Füllvolumen [Liter]				
	3,9	15,7	62,8	141,4	392,7
	Höhe Flüssigkeitsschicht [mm]				
1	1	1	1	1	1
3	2	2	2	2	3 – 4
6	3	3	3	3	4
8	6	6	6	6	6
15	6 – 7	6	8	9	10
24	8	6	7	10	10
48	7 – 8	6	6	10	9 – 10
96 (4 d)	—*	—*	—*	—*	—*
120 (5 d)	—*	—*	—*	—*	—*
144 (6 d)	—*	—*	—*	—*	—*

Tabelle 5.2-1: Menge der Überschusslösung in Abhängigkeit der Betonoberfläche (Zylinderdurchmesser) bei konstanter Füllhöhe (2 m), aber variierender Füllmenge. Maximalwerte sind durch Fettschrift hervorgehoben. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.

Nach Tabelle 5.2-1 ist keine Abhängigkeit der sich absetzenden Lösungsmenge von der Betonoberfläche bzw. dem Füllvolumen zu erkennen. Zwar ergeben sich auf der Basis der Maximalwerte (Standzeit 8 bis 48 Stunden) Unterschiede der Höhe der Flüssigkeitsschicht, eine eindeutige Tendenz ist jedoch nicht erkennbar. Nach einer Standzeit von 96 Stunden waren die Betonoberflächen in den Zylindern noch feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschichten jedoch nicht messbar.

5.2.2 Untersuchungen in Abhängigkeit der Füllhöhe (konstante Betonoberfläche)

Zur Bestimmung der Menge an Überschusslösung in Abhängigkeit der Füllhöhe erfolgten Messungen in 2, 4 und 6 m hohen Zylindern. Auf Grund des konstanten Zylinderdurchmessers (125 mm, Betonoberfläche 122 cm²) variierte das Salzbetonvolumen. Die Zylinder waren mit einer Folie abgedeckt. Die Messwerte sind dargestellt in Tabelle 5.2-2. Die Messgenauigkeit beträgt 1 mm.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Standzeit [Stunden]	Füllhöhe des Salzbetons [mm]		
	2.000	4.000	6.000
	Füllvolumen [Liter]		
	24,5	49,1	73,6
Höhe Flüssigkeitsschicht [mm]			
1,5	2	2	2
5	5	5	5
8	6	6	6
14	8	8	10
23	7 – 8	7 – 8	9
47	7	7	8 – 9
95	—*	—*	—*
119	—*	—*	—*
143	—*	—*	—*

Tabelle 5.2-2: Menge der Überschusslösung in Abhängigkeit der Füllhöhe des Salzbetons bei einer konstanten Betonoberfläche von 122 cm² (Zylinderdurchmesser 125 mm), aber variierender Füllmenge. Maximalwerte sind durch Fettschrift hervorgehoben. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.

Im Ergebnis der Untersuchungen zeigt sich, dass die maximale Höhe der Überschusslösung nach 14 Stunden erreicht wird. Die maximalen Höhen der Überschusslösung betragen 8 und 10 mm. Nach 95 Stunden war die Baustoffoberfläche nur noch feucht. Die Höhe der Flüssigkeitsschicht war nicht messbar.

5.2.3 Untersuchungen in Abhängigkeit der Füllhöhe (konstantes Füllvolumen)

In einer weiteren Messreihe wurde die Menge an Überschusslösung in Abhängigkeit der Füllhöhe und des Zylinderdurchmessers (Betonoberfläche) bestimmt. Das Füllvolumen war in sämtlichen Zylindern identisch (12 Liter, ca. 24 kg). Die Zylinder waren mit einer Folie abgedeckt. Die ermittelten Höhen der Flüssigkeitsschichten sind aufgeführt in Tabelle 5.2-3. Die Messgenauigkeit beträgt 1 mm.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 34

Standzeit [Stunden]	Füllhöhe [mm]			
	170	380	1.530	6.110
	Zylinderinnendurchmesser [mm]			
	300	200	100	50
	Betonoberfläche [cm ²]			
	707	314	79	20
	Höhe Flüssigkeitsschicht [mm]			
1,5	—*	1	2	2
5	3	3	3	4
8	6	5	6	5
14	6	8	8	12
23	5	9	8	9
47	4 – 5	9	8	—*
95	4	8	7	—*
119	3 – 4	7	6 – 7	—*
143	3	6 – 7	6	—*

Tabelle 5.2-3: Menge der Überschusslösung in Abhängigkeit der Füllhöhe des Salzbetons bei konstantem Füllvolumen (12 Liter), aber variierender Betonoberfläche (Zylinderdurchmesser). Maximalwerte sind durch Fettschrift hervorgehoben. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.

Nach Tabelle 5.2-3 variiert die maximale Höhe der Flüssigkeitsschicht bei Standzeiten von 8 bis 47 Stunden zwischen 6 und 12 mm. Eine eindeutige Tendenz in Bezug zur Betonoberfläche sowie zur Füllhöhe ist nicht erkennbar. Nach einer Standzeit von 47 Stunden war im 50 mm-Zylinder ($\varnothing = 50$ mm; Füllhöhe = 6.110 mm) nur noch eine feuchte Betonoberfläche festzustellen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

5.3 Zusammenfassung der Resultate zur Bildung von Überschusslösung

Auf Grund der Vielzahl von Analysenresultaten zur Bildung von Überschusslösung ist es erforderlich die Datenbasis nicht nur getrennt nach den Versuchsreihen, sondern auch in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Die Überschusslösung entsteht auf der Oberfläche der frischen Salzbetonsuspension.
- Die Flüssigkeitsmenge ist unabhängig von der Größe der Suspensionsoberfläche.
- Die Höhe der Flüssigkeitsschicht ist von der Füllhöhe des Salzbetons unabhängig. Die Überschusslösung stammt demnach ausschließlich aus einer oberflächennahen Schicht der Suspension.
- Die Bildung der Überschusslösung erfolgt in den ersten 8 bis 24 Stunden.
- Die nach Standzeiten von 8 bis 24 Stunden ermittelten maximalen Schichthöhen der Überschusslösung variieren im Falle der Technikumsversuche zwischen 6 und 12 mm. Bei darüber hinausgehenden Standzeiten nimmt die Menge an Überschusslösung deutlich ab.
- Nach 4 Tagen konnte unter den gegebenen Versuchsbedingungen in 9 von 12 Technikumsversuchen keine Lösungsschicht mehr nachgewiesen werden.
- Die Menge an Überschusslösung nimmt nahezu proportional mit dem Wasseranteil der Salzbetonrezeptur zu.

5.4 Chemischer Stoffbestand der Poren- und Überschusslösung

Im Rahmen der Untersuchungen zum Absetzverhalten des Salzbetons (Kapitel 5.1) erfolgten Beprobungen der Poren- und Überschusslösung. Bei der Überschusslösung handelt es sich um eine Flüssigkeit, die sich während des Abbindens auf der Oberfläche des frischen Salzbetons bildet. Die Überschusslösung ist demnach Porenlösung des Salzbetons, die in Folge des Absinkens der suspendierten Feststoffpartikel an der Oberfläche des ruhenden Frischbetons austritt.

Die Elementkonzentrationen wurden gemäß DIN 38404, Teil 5, DIN EN ISO 14911 und DIN EN ISO 10304, Teil 1 /11/12/13/ ermittelt. Der chemische Stoffbestand der Lösungsproben fasst Tabelle 5.4-1 zusammen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Gelöste Ionen	Konzentration		
	[g/kg H ₂ O]	[Massen-%]	[g/L]
Porenlösung des Salzbetons			
Na ⁺	121,70	8,64	105,35
K ⁺	44,73	3,18	38,72
Mg ²⁺	nicht nachweisbar		
Ca ²⁺	5,152	0,37	4,46
Cl ⁻	235,78	16,73	204,10
SO ₄ ²⁻	1,860	0,13	1,61
CO ₃ ²⁻	0,133	0,01	0,12
H ₂ O	1.000,0	70,96	865,65
Dichte	1,221 g/cm ³		
Überschusslösung des Salzbetons			
Na ⁺	128,27	8,99	110,23
K ⁺	46,55	3,26	40,00
Mg ²⁺	nicht nachweisbar		
Ca ²⁺	4,10	0,29	3,52
Cl ⁻	245,53	17,21	211,00
SO ₄ ²⁻	2,20	0,15	1,89
CO ₃ ²⁻	0,12	0,01	0,10
H ₂ O	1.000,00	70,09	859,26
Dichte	1,226 g/cm ³		

Tabelle 5.4-1: Chemischer Stoffbestand der Poren- und Überschusslösung des Salzbetons. Für die Porenlösung des Salzbetons M2 ergab sich ein pH-Wert von 10,9 und für die Überschusslösung ein pH-Wert von 11,3.

Die Analysenergebnisse belegen die Dominanz von gelöstem NaCl. Auffallend sind ferner relativ hohe KCl-Konzentrationen, die aus dem Entzug von Wasser aus der Salzlösung resultieren dürfte (Hydratationsreaktionen der Bindemittelanteile). Hierbei kristallisiert Halit, während KCl auf Grund der höheren Löslichkeit in der Lösung verbleibt. Die Salzlösung der Rezeptur Salzbeton M2 ist gesättigt an Halit (NaCl), Anhydrit (CaSO₄), Gips (CaSO₄·2H₂O) und übersättigt an Calcit (CaCO₃).

Auf Grund der Sättigungsverhältnisse sind Anlöseerscheinungen von Anhydrit- und Carbonatgesteinen sowie von Steinsalz im Rahmen der Verfüllung untertägiger Hohlräume vernachlässigbar.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

6 Physikalische Untersuchungen

Im Folgenden werden die Resultate physikalischer Untersuchungen des Salzbetons M2 beschrieben. Sie umfassten die Ermittlung von Parametern, die das Verformungs- und Festigkeitsverhalten im ein- und triaxialen Spannungszustand beschreiben sowie zur Beurteilung der hydraulischen Eigenschaften erforderlich sind.

Die Materialparameter wurden an Prüfkörpern ermittelt, die im Labor oder im Anschluss an die Förderversuche im Rohrviskosimeter hergestellt wurden. Im Rahmen des in-situ Freifallversuches wurden Prüfkörper aus Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm gewonnen (Abbildung 6-1).

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	0054	00

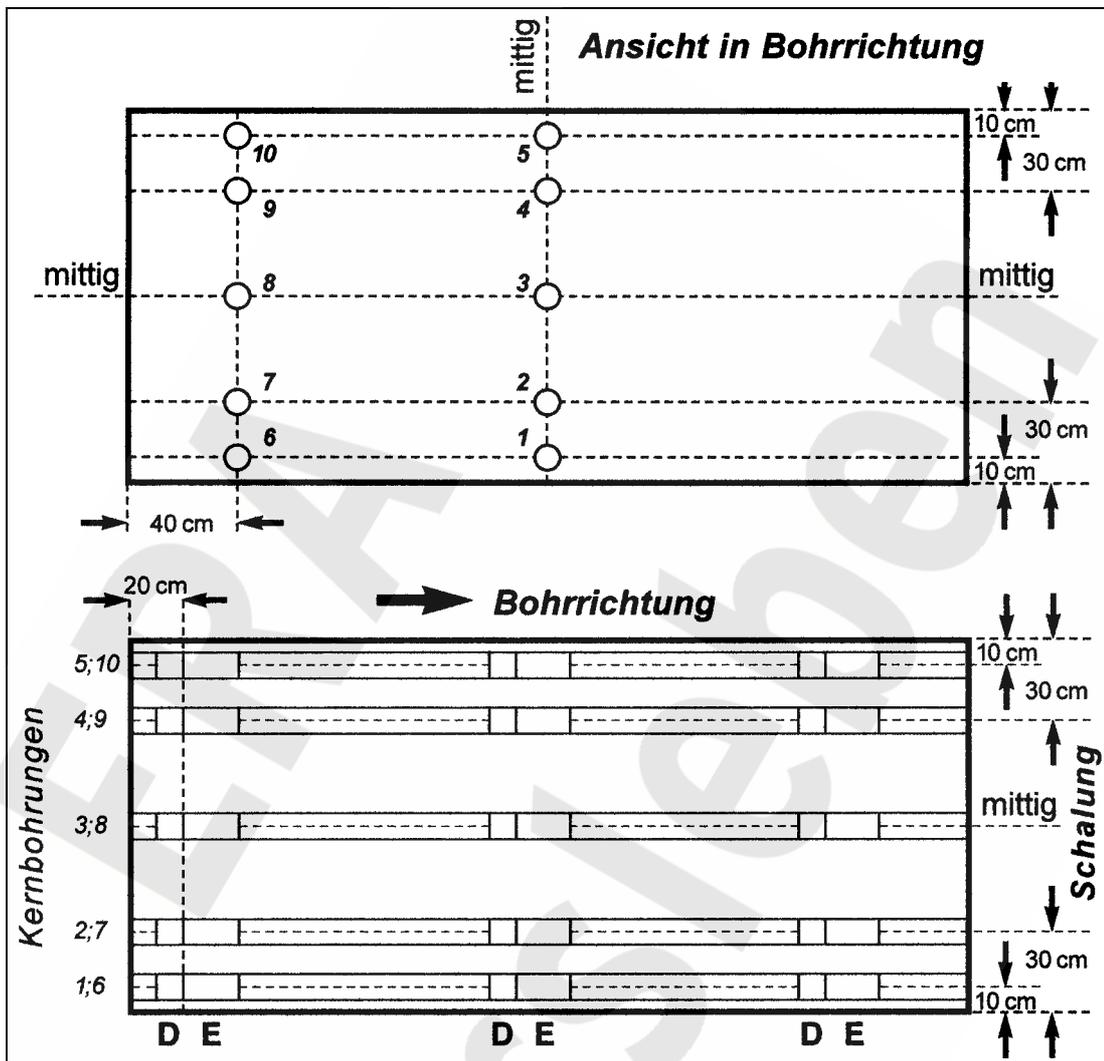


Abbildung 6-1: Kernbohrungen zur Gewinnung von Prüfkörpern des Versatzkörpers im IB-Gesenk 1B des ERAM (in-situ Freifallversuch). Der Versatzkörper hat eine rechteckige Grundfläche mit Kantenlängen von ca. 3,0 m und 3,2 m sowie eine Höhe von ca. 1,5 m. D: Prüfkörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit. E: Proben zur Messung des statischen Elastizitätsmoduls.

6.1 Festmaterialdichte

Die Festmaterialdichte eines Baustoffes ergibt sich aus den Mengenverhältnissen und spezifischen Dichten seiner Komponenten unter Berücksichtigung des Porenvolumens (vgl. Tabelle 2-1). Die Bestimmungen der Betondichte erfolgten nach DIN 1048, Teil 5 (Abschnitt 7.1 /14/) bei einem Prüfkörperalter von 3 bis 252 Tagen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Für 38 Proben, die bei 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit lagerten, ergab sich im Durchschnitt ein Wert von 1.965 kg/m³. Bei 40 °C und 30 % relative Luftfeuchtigkeit gelagerter Salzbeton (15 Prüfkörper) kommt dagegen auf durchschnittlich 1.970 kg/m³.

6.2 Statischer E-Modul

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) gibt das Verhältnis der Spannung σ zur zugehörigen Verzerung ε an. Der E-Modul erlaubt Aussagen zur Steifigkeit und Stützwirkung eines Baustoffes. Die Bestimmungen erfolgten nach DIN 1048, Teil 5 /14/, Abschnitt 7.5. Resultate liegen vor für Proben nach einer Abbindezeit von 3 bis 530 Tagen. Das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser der Zylinder betrug 2,0 bis 2,3.

Im Anschluss des Mischprozesses hergestellte Prüfkörper

Abweichend von DIN 1048 wurde bei den Versuchen der 3 und 7 Tage alten Proben die Unterlast und die Belastungsgeschwindigkeit reduziert. Die Messresultate sind in Tabelle 6.2-1 zusammengestellt. Dargestellt sind die Mittelwerte von jeweils drei Messungen mit Ausnahme der Bestimmungen nach einer Abbindezeit des Betons von 270 Tagen (6 Prüfkörper) und 530 Tagen (5 Prüfkörper).

Abbindezeit [Tage]	3	7	14	28
Einzelmesswerte [MPa, N/mm ²]	800	3.800	9.400	11.500
	800	3.900	9.700	11.600
	900	4.900	10.100	11.900
Mittelwert [MPa, N/mm ²]	800	4.200	9.700	11.700
Lagerungstemperatur [°C]	20	20	20	20
Abbindezeit [Tage]	28	90	270	530
Einzelmesswerte [MPa, N/mm ²]	11.500	14.400	17.000	20.200
	12.300	14.900	17.100	22.500
	13.500	15.300	18.600	22.700
Mittelwert [MPa, N/mm ²]	12.400	14.900	19.700	23.900
Lagerungstemperatur [°C]	R.T.	40	R.T.	k.A.

Tabelle 6.2-1: Statische Elastizitätsmoduli und Lagerungstemperaturen von Proben nach 3 bis 530 Tagen Abbindezeit; R.T.: Raumtemperatur, k.A.: keine Angabe.

Bohrkerne des in-situ Freifallversuches

Im Falle des Freifallversuches wurden jeder Kernbohrung Prüfkörper aus folgenden Bohrteufen entnommen (mittlere Bohrteufe in Klammern): 0,20 bis 0,40 m (0,30 m), 1,38 bis 1,58 m (1,48 m) und 2,38 bis 2,58 m (2,48 m). Die Messungen erfolgten nach einer Abbindezeit von

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

28 Tagen. Die Messergebnisse sind, geordnet nach der Bohrungsnummer und der mittleren Bohrteufe, zusammengestellt in Tabelle 6.2-2.

Bohrung Nr.	Statischer Elastizitätsmodul [MPa, N/mm ²]				Bohrung Nr.	Statischer Elastizitätsmodul [MPa, N/mm ²]			
	Mittlere Bohrteufe [m]			Mittel- wert		Mittlere Bohrteufe [m]			Mittel- wert
	0,30	1,48	2,48			0,30	1,48	2,48	
5	21.410	22.230	19.590	21.100	10	22.410	23.090	22.420	22.600
4	19.390	23.400	22.030	21.600	9	26.210	25.300	24.000	25.200
3	23.430	22.710	30.050	25.400	8	23.300	25.890	27.080	25.400
2	25.140	24.500	24.660	24.800	7	28.360	26.450	29.680	28.200
1	31.460	33.070	37.000	33.800	6	28.000	30.000	28.100	28.700
Mittelwert	24.170	25.180	26.670	25.340	Mittelwert	25.660	26.150	26.260	26.020

Tabelle 6.2-2: Elastizitätsmoduli nach 28 Tagen Abbindezeit (in-situ Freifallversuch). Im Anschluss des Bohrvorganges erfolgte die Lagerung der Bohrkern bei Raumtemperatur. Der Mittelwert sämtlicher Messresultate beträgt 25.680 MPa.

Die Elastizitätsmoduli betragen zwischen 19.390 MPa (siehe Bohrung Nr. 4) und 37.000 MPa (siehe Bohrung Nr. 1), bei einem Mittelwert sämtlicher Messresultate von 25.680 MPa. Die Prüfkörper von der Basis weisen im Vergleich zu Proben vom Top des Betonkörpers höhere Elastizitätsmoduli auf. Eine Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Bohrteufe der Prüfkörper ist, insbesondere vor dem Hintergrund der Messgenauigkeit des Messverfahrens, nicht gegeben.

Prüfkörper im Rohrviskosimeter geförderten Materials

Die nach Abschluss der rheologischen Untersuchungen hergestellten Prüfzylinder (vgl. Kapitel 4.1), mit einem Durchmesser von 70 mm und einer Höhe von 140 mm, wurden in Anlehnung an DIN 50014 /6/ bei 20 °C und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Eine Ausnahme sind die nach 156 bzw. 165 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 des Salzbetons, zusammengestellt in Tabelle 6.2-3. Bei den 156 bzw. 165 Tage alten Proben handelt es sich um Mittelwerte von drei Messungen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 41

		Elastizitätsmodul [MPa, N/mm ²]				
Salzzuschlag Gemisch Flotations- und Heißlöserückstand (Korngröße < 20 mm)						
Abw. Wassergehalt vom Sollwert	Wassergehalt		Abbindezeit des Salzbetons [Tage]			
	[kg/m ³]	[Massen-%]	7	14	28	165
- 4 %	259	12,9	8.950	8.040	25.080	n.b.
0 %	267	13,4	n.b.	10.460	19.260	17.600
+ 4 %	275	13,9	1.180	9.510	22.680	n.b.
+ 10 %	286	14,5	7.780	10.020	23.610	n.b.
Salzzuschlag Flotationsrückstand (Korngröße < 2 mm)						
Abw. Wassergehalt vom Sollwert	Wassergehalt		Abbindezeit des Salzbetons [Tage]			
	[kg/m ³]	[Massen-%]	7	14	28	156
0 %	267	13,4	1.870	7.120	20.850	15.370
Lagerung bei 20 °C						

Tabelle 6.2-3: Statische Elastizitätsmoduli des Salzbetons in Abhängigkeit der Abweichung des Wassergehaltes der Suspension vom Sollwert. Die Prüfkörperherstellung erfolgte im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter (Kapitel 4.1); n.b.: nicht bestimmt.

Eine Abhängigkeit des E-Moduls von der Menge an Anmachwasser und der Korngrößenverteilung des Salzzuschlages ist nicht erkennbar. Die E-Moduli der nach 156 bzw. 165 Tagen geprüften Proben sind im Vergleich zu den 28 Tage-Werten niedriger, liegen jedoch im Schwankungsbereich des Messverfahrens. Eventuell ist diese Tendenz auf die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen der Prüfkörper zurückzuführen.

Abbindezeit [Tage]	7	14	28
Im direkten Anschluss des Mischprozesses hergestellte Prüfkörper			
Elastizitätsmodul [MPa, N/mm ²]	4.200	9.700	11.700 / 12.400
Bohrkerne des in-situ Freifallversuches			
	n.b.	n.b.	25.680 (19.390–37.000)
Im Anschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter hergestellte Prüfkörper			
	4.950 (1.180–8.950)	9.030 (7.120–10.460)	22.300 (19.260–25.080)

Tabelle 6.2-4: Vergleich der Messresultate zum statischen Elastizitätsmodul von Prüfkörpern, die im direkten Anschluss des Mischprozesses hergestellt wurden, von Bohrkernen des in-situ Freifallversuches sowie von Prüfkörpern, die nach den Förderversuchen im Rohrviskosimeter angefertigt wurden.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Nach Tabelle 6.2-4 weisen die Prüfkörper nach Abbindezeiten von 7 und 14 Tagen vergleichbare Elastizitätsmoduli auf. Nach Abbindezeiten von 28 Tagen sind jedoch die Elastizitätsmoduli der Proben aus dem Versatzkörper (in-situ Freifallversuch) sowie des geförderten Materials im Vergleich zu den Prüfkörpern, die unmittelbar nach dem Anmischen hergestellt wurden, höher.

6.3 Querkontraktionszahl

Die bei Längsdehnung ϵ_1 auftretende Querdehnung ϵ_q wird durch die Querkontraktionszahl μ gekennzeichnet: $\mu = \epsilon_q / \epsilon_1$. Die Querkontraktionszahl (Querdehnzahl) wurde nach DIN 1048, Teil 5 (Prüfverfahren für Beton /14/) im Rahmen der Untersuchungen des E-Moduls (vgl. Kapitel 6.2) ermittelt.

Im Anschluss des Mischprozesses hergestellte Prüfkörper

Die Messresultate sind aufgeführt in Tabelle 6.3-1. Es handelt sich um Mittelwerte von jeweils drei Bestimmungen.

Abbindezeit [Tage]	3	7	14	28
Querkontraktionszahl μ	0,19	0,30	0,33	0,33
Lagerung im Normalklimat 20/65 (20 °C, 65 % relative Luftfeuchtigkeit)				

Tabelle 6.3-1: Querkontraktionszahlen des Salzbetons in Abhängigkeit der Abbindezeit.

Prüfkörper im Rohrviskosimeter geförderten Materials

Die nach Abschluss der Förderversuche hergestellten Prüfzylinder (Durchmesser 70 mm, Höhe 140 mm) wurden entsprechend der Ausgangsrezeptur ohne Abweichung vom Wassergehalt hergestellt. Die Probenlagerung erfolgte bei 20 °C; die Luftfeuchtigkeit wurde jedoch variiert. Sie betrug in den ersten 28 Tagen 100 % (relativ). Anschließend erfolgte die Trocknung der Proben und 7 Tagen vor der Prüfung eine Lagerung in gesättigter NaCl-Lösung.

Nach insgesamt 165tägiger Lagerung wurde an zwei Proben, zu deren Herstellung Salzzuschlag mit Heißlöse- und Flotationsrückstand (Korngröße < 20 mm) verwendet wurde im Mittel eine Querkontraktionszahl von 0,28 bestimmt. Für zwei weitere Proben, die ausschließlich mit Flotationsrückstand (Korngröße < 2 mm) hergestellt wurden, ergab sich im Durchschnitt eine Querkontraktionszahl von 0,30 (156tägige Lagerung).

Weitere Messwerte wurden im Verlauf von Untersuchungen der triaxialen Druckfestigkeit gewonnen und sind beschrieben in Kapitel 6.5 (vgl. Tabelle 6.5-1).

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	0054	00	

6.4 Einaxiale Druckfestigkeit

Die Untersuchungen zur einaxialen Druckfestigkeit erfolgten nach DIN 1048, Teil 5, Abschnitt 7.2 (Prüfverfahren für Beton /14/) an zylinderförmigen Proben. Resultate liegen vor von Prüfkörpern, die im direkten Anschluss des Mischprozess hergestellt wurden sowie von Bohrkernen des in-situ Freifallversuches.

Im Anschluss des Mischprozesses hergestellte Prüfkörper

Insgesamt liegen Messergebnisse nach Abbindezeiten des Salzbetons von 3 bis 530 Tagen vor. Das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser der Prüfzylinder betrug 2,0 bis 2,2. Bei der Versuchsserie, die 3, 7, 14 und 28 Tage alte Prüfkörper umfasste, erfolgten jeweils vier Messungen. Bei den restlichen Bestimmungen konnte, mit Ausnahme der 270 d-Druckfestigkeit (6 Prüfkörper) und der 530 d-Druckfestigkeit (5 Prüfkörper), für jedes Betonalter ein Mittelwert auf der Basis von drei Einzelmessungen berechnet werden.

Die Mittelwerte der Messresultate sind aufgeführt in Tabelle 6.4-1. Es ist demnach eine Zunahme der Druckfestigkeit von 1,48 MPa auf über 30 MPa festzustellen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 44

Abbindezeit [Tage]	3	7	14	28	28	28		
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa, N/mm ²]								
Einzelmesswerte [MPa, N/mm ²]	1,46	7,41	17,6	23,6	30,3	21,3		
	1,45	5,99	17,9	24,5	30,8	20,6		
	1,42	7,34	20,6	21,8	30,0	21,7		
	1,57	5,90	19,2	23,5	—	—		
Mittelwert [MPa, N/mm ²]	1,48	6,66	18,8	23,4	30,4	21,2		
Lagerungstemperatur [°C]								
	20	20	20	20	40	R.T.		
Abbindezeit [Tage]	42	56	90	90	252	270	530	
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa, N/mm ²]								
Einzelmesswerte [MPa, N/mm ²]	30,4	32,2	30,6	31,3	39,3	30,9	34,2	
	30,5	32,0	32,3	32,8	39,6	31,3	34,3	k.A.
	31,1	33,2	32,2	34,3	40,2	32,8	35,2	
Mittelwert [MPa, N/mm ²]	30,7	32,5	31,7	32,8	39,7	33,1	33	
Lagerungstemperatur [°C]								
	40	40	40	20	40	R.T.	k.A.	

Tabelle 6.4-1: Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit und Lagerungstemperatur 3 bis 530 Tage alter Prüfkörper; R.T.: Raumtemperatur, k.A.: keine Angabe. Prüfkörper, die bei 40°C gelagert wurden, zeigen in Folge eines höheren Hydratationsgrades höhere Festigkeiten.

Bohrkerne des in-situ Freifallversuches

Den Kernbohrungen des Versatzkörpers (in-situ Freifallversuch) wurden jeweils drei Prüfkörper aus folgenden Bohrteufen entnommen (mittlere Bohrteufe in Klammern): 0,10 bis 0,20 m (0,15 m), 1,28 bis 1,38 m (1,33 m) und 2,28 bis 2,38 m (2,33 m). Das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser der Zylinder betrug demnach nur 1,0 und weicht damit von den anderen Druckfestigkeitsuntersuchungen ab. Die Messungen erfolgten nach einer Abbindezeit von 28 Tagen. Die Messresultate sind, geordnet nach der Bohrungsnummer sowie der mittleren Bohrteufe, aufgeführt in Tabelle 6.4-2.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Bohrung Nr.	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa, N/mm ²]				Bohrung Nr.	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa, N/mm ²]			
	Mittlere Bohrteufe [m]			Mittelwert		Mittlere Bohrteufe [m]			Mittelwert
	0,15	1,33	2,33			0,15	1,33	2,33	
5	23,2	21,4	24,3	23,0	10	22,9	17,3	22,3	20,8
4	28,2	22,7	22,2	24,4	9	20,3	21,9	26,2	22,8
3	26,3	18,0	18,8	21,0	8	24,5	23,2	20,9	22,9
2	27,8	27,9	22,9	26,2	7	25,2	26,0	18,3	23,2
1	27,8	30,2	29,1	29,0	6	29,1	28,4	26,7	28,1
Mittelwert	26,7	24,0	23,5	24,7	Mittelwert	24,4	23,4	22,9	23,5

Tabelle 6.4-2: Einaxiale Druckfestigkeit (Zylinderdruckfestigkeit) des Salzbetons nach 28 Tagen Abbindezeit (in-situ Freifallversuch). Die Lagerung der Bohrkerne bzw. der Prüfkörper erfolgte bei Raumtemperatur. Die höchste und niedrigste Druckfestigkeit ist durch Fettschrift gekennzeichnet.

Nach Tabelle 6.4-2 variiert die Druckfestigkeit von 17,3 MPa (siehe Bohrung Nr. 10) bis 30,2 MPa (siehe Bohrung Nr. 1), bei einem gesamten Mittelwert von 24,1 MPa. Die Abweichungen der Festigkeitswerte vom Mittelwert liegen im Rahmen üblicher Streuungen der Messwerte von Normalbeton.

6.5 Dilatanzverhalten und triaxiale Druckfestigkeit

Im Folgenden werden triaxiale Druckversuche beschrieben, die das Ziel hatten das Spannungs-/Verformungs- und das Dilatanzverhalten des Salzbetons zu ermitteln. Die Untersuchungen erfolgten an zylindrischen Prüfkörpern mit einer Höhe von 200 mm und einem Durchmesser von 100 mm, deren Abbindezeit 28 Tage betrug. Die Zylinder lagerten bei Raumtemperatur (21°C) und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 63 % und wurden vor den Messungen mittels Ultraschall auf Vorschädigungen geprüft.

Der Versuchsdurchführung lag die DIN 18137, Teil 2 /15/ bzw. die Technische Prüfvorschrift Boden und Fels im Straßenbau, Teil C2 /16/ zugrunde. Bei Messungen mit einer Verformungsrate von 10^{-5} 1/s betrug der Manteldruck 2,5 MPa; eine ergänzende Untersuchung erfolgte ohne Manteldruckbelastung. Eine weitere Versuchsreihe umfasste Messungen bei einem Manteldruck von 2,5 MPa und einer Verformungsrate von $2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/s. Zusätzlich wurden Prüfkörper bei einer Verformungsrate von 10^{-6} 1/s bis zu einem Manteldruck von maximal 10 MPa belastet.

Die Zylinder wurden nach dem Einbau in die Triaxialzelle hydrostatisch, bis zur Höhe des jeweiligen Manteldrucks (σ_3) belastet (Kompaktions- oder Temperierphase). Die Druckzunahme betrug $2 \cdot 10^{-3}$ MPa·1/s. Ausgehend von diesem Spannungsniveau ($\sigma_1 = \sigma_3$) und der Ursprungs-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 46

verformung $\varepsilon_1=0$ wurden die Prüfkörper mit den angegebenen Raten verformt. Die Messresultate sind aufgeführt in Tabelle 6.5-1.

Die Bestimmung der Dilatanzfestigkeit erfolgt anhand der Deviatorspannung, bei der mit zunehmender Axialverformung die Volumenverformung ein Minimum aufweist, d.h. eine Volumenzunahme des Prüfkörpers einsetzt. Je größer die Volumendilatanz, desto größer ist die schädigungsbedingte Auflockerung des Materials. Anhand der Messdaten ist erkennbar, dass sich die Dilatanz- und Bruchfestigkeit des Salzbetons nicht signifikant unterscheiden. Beide Materialparameter steigen, wie die Restfestigkeit mit zunehmendem Manteldruck, während der Dilatanzwinkel abnimmt. Darüber hinaus belegen die Messwerte von Prüfkörpern, die mit einem Manteldruck von 2,5 MPa belastet wurden, eine Abnahme der Dilatanz- und Bruchfestigkeit, des Dilatanzwinkels und des Entfestigungsmoduls bei einer Senkung der Verformungsrate. Bei Manteldrücken über 2,5 MPa waren die Materialparameter, die das Dilatanzverhalten des Salzbetons beschreiben, nicht bestimmbar, da die Prüfkörper während des gesamten Verformungsprozess kompaktiert wurden.

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	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Manteldruck σ_3 [MPa]	$\sigma_{1,Dil}$ [MPa]	$\epsilon_{1,Dil}$ [%]	$\epsilon_{V,Dil}$ [%]	$\sigma_{1,max}$ [MPa]	$\epsilon_{1,max}$ [%]	$\sigma_{1,Rest}$ [MPa]	$\epsilon_{1,Rest}$ [%]	Entf.-Mod. [MPa]	v (-)	ψ (°)
Verformungsrate $2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/s										
2,5	33,0	1,45	-0,452	33,1	1,38	20,4	10,0	331	0,26	8,982
2,5	31,3	1,52	-0,499	31,3	1,39	20,6	10,0	284	0,25	7,712
2,5	31,9	0,81	-0,334	32,8	1,06	18,4	10,0	294	0,21	12,868
Verformungsrate $1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/s										
0,0	20,4	0,32	-0,089	24,1	0,61	3,0	3,0	2,900	0,25	57,935
2,5	26,4	1,41	-0,387	26,4	1,53	19,7	10,0	145	0,26	7,054
2,5	25,7	1,53	-0,451	25,8	2,01	19,6	10,0	134	0,27	6,379
2,5	25,9	1,58	-0,458	25,9	1,77	19,6	10,0	122	0,28	6,379
Verformungsrate $1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/s										
0,0	14,9	0,37	-0,130	16,7	0,60	2,2	3,0	1,086	0,22	48,289
1,0	20,9	0,98	-0,419	21,1	1,02	11,5	10,0	220	0,19	13,516
2,5	22,6	1,96	-0,574	22,7	2,00	19,0	10,0	77	0,25	2,468
3,5				27,2	3,03	25,0	10,0	48	0,21	In Folge des Kompaktions- verhaltens nicht bestimmbar*
5,0				29,3	3,88	27,3	10,0	32	0,21	
7,0				37,0	3,03	35,0	10,0	31	0,23	
10,0				43,2	6,69	41,0	10,0	79	0,13	
Verformungsrate $1,0 \cdot 10^{-7}$ 1/s										
0,0	11,7	0,31	-0,097	13,7	0,61	5,9	5,0	424	0,20	47,016
0,0	12,7	0,26	-0,074	16,8	0,62	4,9	5,0	643	0,26	47,696
2,5	22,5	0,90	-0,335	22,7	1,07	17,7	10,0	251	0,23	6,965
2,5	24,7	1,15	-0,343	24,8	1,02	18,5	10,0	280	0,21	6,943

Tabelle 6.5-1: Messresultate zum Festigkeits- und Dilatanzverhalten. Im Volumenminimum vorliegende Axialspannung ($\sigma_{1,Dil}$), Axialverformung ($\epsilon_{1,Dil}$) und Volumenverformung ($\epsilon_{V,Dil}$); Axialspannung ($\sigma_{1,max}$) und -verformung ($\epsilon_{1,max}$) im Bruch-/Versagenszustand; $\sigma_{1,Rest}$: Restfestigkeit bei $\epsilon_{1,Rest}$ (Axialverformung im Restfestigkeitsbereich); Entf.-Mod.: Entfestigungsmodul (bestimmt aus dem Abfall der Ausgleichsgeraden im Verformungsbereich zwischen $\sigma_{1,max}$ und $\sigma_{1,Rest}$); v: Querkontraktionszahl; ψ : Dilatanzwinkel. Index *: Die Dilatanzgrenze ($\sigma_{1,Dil}$, $\epsilon_{1,Dil}$, $\epsilon_{V,Dil}$) war bei Kompaktion der Prüfkörper in den Entfestigungs- bzw. Restfestigkeitsbereich nicht bestimmbar. Das Volumenminimum trat teilweise erst bei Verformungsauf. Der Dilatanzwinkel (ψ) ergibt sich aus dem Anstieg der volumetrischen Verformung nach dem Volumenminimum im ϵ_1 - ϵ_V -Diagramm (Axial- zu Volumenverformung) und war daher in diesen Fällen ebenso nicht ermittelbar.

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Basierend auf den Angaben zum Manteldruck und der Axialspannungen wurden die entsprechenden Oktaederspannungen (τ) und die mittlere Spannungen (σ) nach Gl. (6.1) und Gl. (6.2) für die Bruchfestigkeit (triaxiale Druckfestigkeit) und die Dilatanzfestigkeit (Dilatanzgrenze) berechnet. Die Resultate enthält Tabelle 6.5-2; ihre graphische Darstellung die Abbildungen 6.5-1 und 6.5-2.

$$\tau = \frac{1}{3} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0,5} = \left(\frac{2}{9}\right)^{0,5} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (6.1)$$

$$\sigma = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3 \cdot 2) = (\sigma_1 - \sigma_3) / 3 + \sigma_3 \quad (6.2)$$

σ_3	Triaxiale Bruchfestigkeit			Dilatanzfestigkeit		
	$\sigma_{1,max}$	τ_{max}	σ_{max}	$\sigma_{1,Dil}$	τ_{Dil}	σ_{Dil}
[MPa, N/mm ²]						
Verformungsrate 2,5 · 10 ⁻⁵ 1/s						
2,5	33,1	14,42	12,70	33,0	14,38	12,67
2,5	31,3	13,58	12,10	31,3	13,58	12,10
2,5	32,8	14,28	12,60	31,9	13,86	12,30
Verformungsrate 1,0 · 10 ⁻⁵ 1/s						
0,0	24,1	11,36	8,03	20,4	9,62	6,80
2,5	26,4	11,27	10,47	26,4	11,27	10,47
2,5	25,8	10,98	10,27	25,7	10,94	10,23
2,5	25,9	11,03	10,30	25,9	11,03	10,30
Verformungsrate 1,0 · 10 ⁻⁶ 1/s						
0,0	16,7	7,87	5,57	14,9	7,02	4,97
1,0	21,1	9,48	7,70	20,9	9,38	7,63
2,5	22,7	9,52	9,23	22,6	9,48	9,20
3,5	27,2	11,17	11,40	In Folge des Kompaktionsverhaltens nicht bestimmbar.		
5,0	29,3	11,46	13,10			
7,0	37,0	14,14	17,00			
10,0	43,2	15,65	21,07			
Verformungsrate 1,0 · 10 ⁻⁷ 1/s						
0,0	13,7	6,46	4,57	11,7	5,52	3,90
0,0	16,8	7,92	5,60	12,7	5,99	4,23
2,5	22,7	9,52	9,23	22,5	9,43	9,17
2,5	24,8	10,51	9,93	24,7	10,47	9,90

Tabelle 6.5-2: Axialspannung im Bruchzustand (Bruchfestigkeit) und im Volumenminimum (Dilatanzfestigkeit), Manteldruck sowie berechnete Oktaederspannungen und mittlere Spannungen von Prüfkörpern der triaxialen Druckversuche.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00

Es zeigt sich, dass bei einer Zunahme der Verformungsrate und bei einem konstanten Manteldruck ($\sigma_3 = 2,5 \text{ MPa}$) sowie bei konstanter Verformungsrate ($1,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/s}$) und ansteigendem Manteldruck und damit wachsender mittlerer Spannung die aufnehmbare Oktaederspannung zunimmt. Für Manteldrücke $> 2,5 \text{ MPa}$ war es jedoch nicht möglich Dilatanzfestigkeiten zu bestimmen, da die Prüfkörper bis in den Nachbruchbereich kompaktiert wurden.

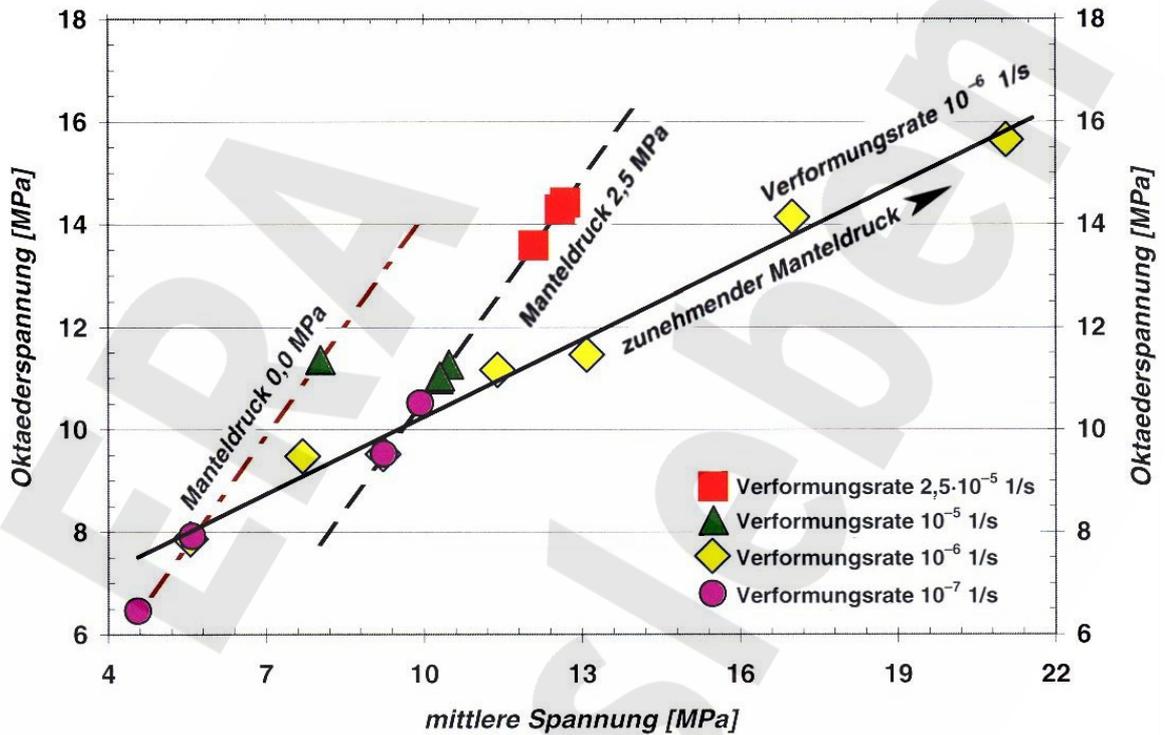


Abbildung 6.5-1: Abhängigkeit der Oktaederspannung im Bruchzustand von der mittleren Spannung.

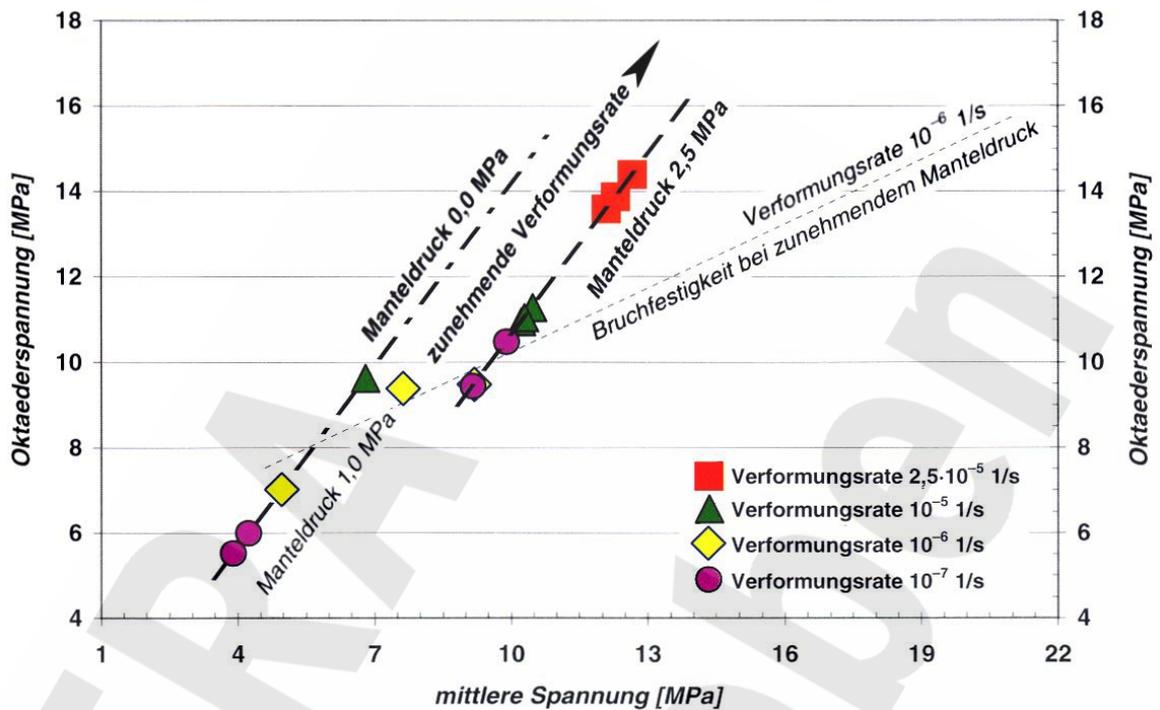


Abbildung 6.5-2: Abhängigkeit der Oktaederspannung im Volumenminimum (Dilatanzgrenze) von der mittleren Spannung. Bei Manteldrücken > 2,5 MPa war kein Volumenminimum bestimmbar. Die Prüfkörper wurden bis in den Nachbruchbereich kompaktiert.

6.6 Einaxiale Zugfestigkeit

Die Bestimmung der zentrischen Zugfestigkeit erfolgte nach DIN 1048, Teil 5 /14/ (vgl. /17/, Abschnitt 3.3). 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. Die berechneten Mittelwerte finden sich in Tabelle 6.6-1.

Abbindezeit	56 Tage	90 Tage
Einzelmesswerte [MPa, N/mm ²]	1,97	2,89
	2,06	2,98
	2,08	3,23
Mittelwert [MPa, N/mm ²]	2,04	3,03
Lagerungstemperatur [°C]	40	40

Tabelle 6.6-1: Einaxiale Zugfestigkeit und Lagerungstemperatur der 56 und 90 Tage alten Prüfkörper.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

6.7 Kriechverhalten

Kriechen ist die zeitabhängige Verformungszunahme eines Materiales unter konstanter Spannung. Das Kriechmaß steigt mit der Höhe der kriecherzeugenden Spannung, mit zunehmender Dauer der Lasteinwirkung sowie mit sinkendem Belastungsalter, d.h. je jünger der Beton zum Zeitpunkt der Belastung ist desto größer wird das Kriechmaß. Bei konventionellen Betonen, die nicht kriechfähige Zuschläge enthalten, steigt das Kriechvermögen bei zunehmendem Wassergehalt und steigender Geschwindigkeit des Wasserverlustes. Es sinkt dagegen mit abnehmender Zementsteinporosität, mit sinkendem W/Z-Wert und steigendem Hydratationsgrad (Betonalter). Das Kriechen ist insbesondere zurückzuführen auf Drucklösungerscheinungen der Hydratphasen sowie auf die Verdrängung bzw. Umlagerung von Porenlösung zwischen den Bindemittelteilchen. Im Gegensatz zu konventionellen Betonen weist der Salzzuschlag des Salzbetons selbst ein Kriechvermögen auf. Als Messwerte von Kriechversuchen (Kriechmaße) werden die Längenänderungen des Prüfkörpers ($\epsilon = \Delta l/l_0$) in Abhängigkeit von der Axialkraft bzw. Kriechspannung (σ_K) sowie der Messdauer erhalten. Zu berücksichtigen ist, dass Kriechmaße vom Schwindverhalten des Baustoffes beeinflusst werden (vgl. Kapitel 6.8).

Die Bestimmungen erfolgten nach DIN 1048, Teil 5 /10/ sowie gemäß Heft 422 des DAfStb (Abschnitt 2.7) /16/. Der Salzzuschlag des Salzbetons bestand aus Flotationsrückstand. Folienstreifen schützten den Salzbeton vor Austrocknen. Bei einer Messreihe betrug die Ursprungshöhe der Prüfkörper 176 mm (l_0) und der Durchmesser (d) 80 mm ($l_0:d=2,2$). Die Messungen begannen nach einer Abbindezeit der Zylinder von 56 Tagen. Es wurde jeweils ein Prüfkörper mit Kriechspannungen von 9,0 MPa, 11,8 MPa und 13,4 MPa belastet. Die Versuche erfolgten bei 40 °C und 30 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Bei einer weiteren Messreihe wurden 170 mm hohe Prüfkörper mit einem Durchmesser von 80 mm ($l_0:d=2,125$) nach 420tägiger Abbindezeit mit Kriechspannungen von 9,9 MPa und 10,9 MPa belastet. Die Versuche erfolgten bei etwa 24 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit.

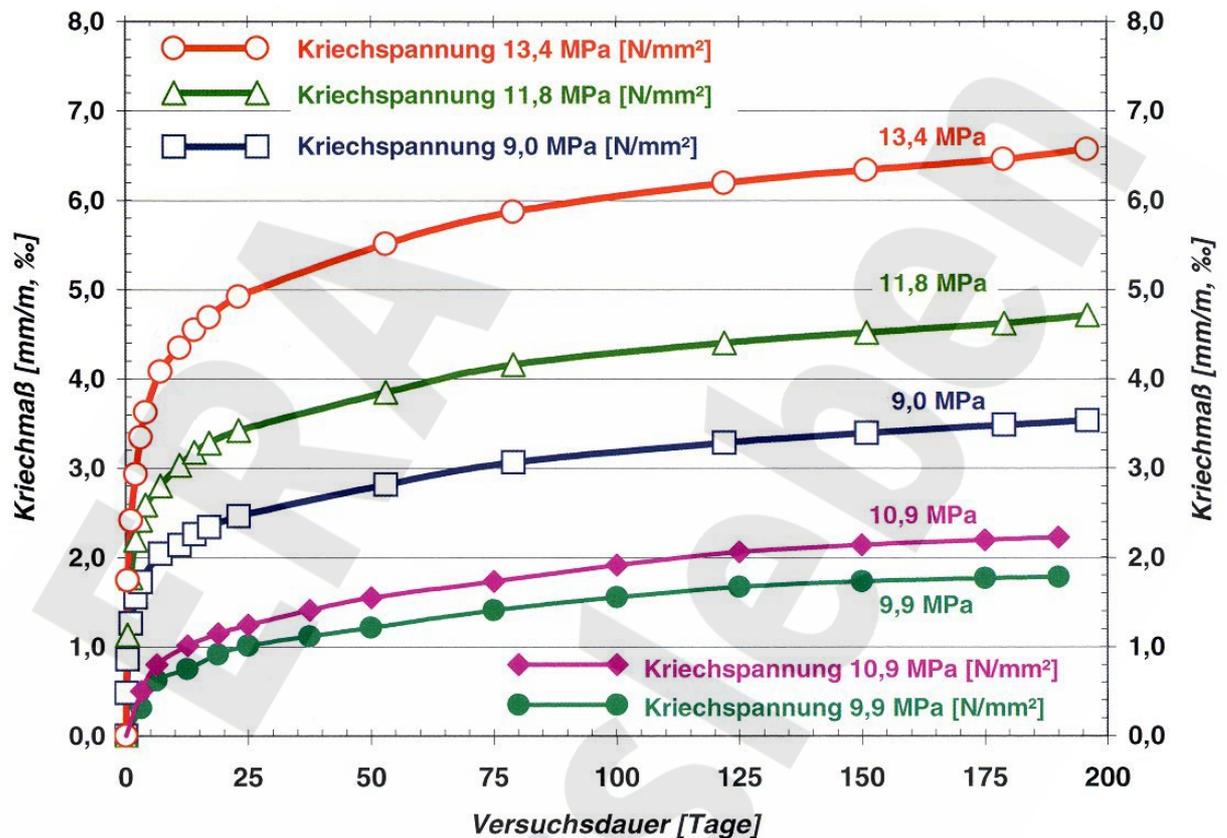


Abbildung 6.7-1: Messresultate zum Kriechverhalten des Salzbetons. Die Abbindezeit der Prüfkörper, die mit Kriechspannungen von 9,9 MPa und 10,9 MPa belastet wurden, betrug zu Versuchsbeginn 420 Tage und der Prüfzylinder, die mit 9,0 MPa, 11,8 MPa und 13,4 MPa belastet wurden 56 Tage.

Die zu Messbeginn 56 Tage abgebundenen Prüfzylinder weisen nach 196tägiger Versuchsdauer, entsprechend einer Abbindezeit des Salzbetons von 252 Tagen Verformungen von 3,5 mm/m (σ_K 9,0 MPa), 4,7 mm/m (σ_K 11,8 MPa) sowie 6,6 mm/m (σ_K 13,4 MPa) auf. Die Kriechmaße der vor Messbeginn 420 Tage abgebundenen Prüfzylinder betragen nach den 190tägigen Messungen, d.h. einer Abbindezeit von 610 Tagen 1,8 mm/m (σ_K 9,9 MPa) sowie 2,2 mm/m (σ_K 10,9 MPa).

Nach Abbildung 6.7-1 nehmen die Verformungen von Prüfzylindern, die identische Abbindezeiten aufweisen bei einem Anstieg der Kriechspannung zu. Prüfzylinder höheren Betonalters kommen bei vergleichbaren Kriechspannungen auf geringere Kriechmaße.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

6.8 Schwinden

Das Schwinden ist die Volumenabnahme eines erhärteten Baustoffes, welche bei Beton mit dichtem Zuschlag auf eine Reduzierung der Feuchte im Zementstein, d.h. eine Evaporation an Porenflüssigkeit, zurückzuführen ist („Trocknungsschwinden“). Der Prozess wird demnach ausschließlich durch eine Veränderung des Wasserhaushaltes des Betons verursacht und nicht durch Last- oder Temperatureinwirkung. Das Schwinden ist zu betrachten, da es Eigen- spannungen im Bauwerk, Bauteilverkürzungen und -verkrümmungen bzw. einen Verlust an Vorspannkraft verursachen kann. Das Ausmaß des Schwindens, das Schwindmaß, nimmt ab mit der Material-Permeabilität, steigt mit der Temperatur und bei einer Abnahme der Luft- feuchtigkeit.

Hinsichtlich der Beurteilung von Schwindmaßen ist zu berücksichtigen, dass Laborproben auf Grund der geringen Abmessungen und des ungünstigen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen oft stärker schwinden als ein aus dem Baustoff erstelltes Bauwerk.

Die Ermittlung des Schwindverhaltens erfolgte nach Heft 422 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), Abschnitt 2.6 /17/. Es wurden 3 Serien bestehend aus jeweils 3 Prüfcylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm hergestellt. Die Suspensionen wurden nach dem Einfüllen in die Formen verdichtet und mit einer Folie abgedeckt. Nach einer Abbindezeit von 7 Tagen wurden die Prüfkörper entformt, die Stirnflächen versiegelt und die Nullmessungen durchgeführt.

Eine Prüfkörperserie lagerte bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit (Normalklimat 20/65); eine weitere wurde nach 266 Tagen im Normalklimat 20/65 anschließend in gesättigter NaCl-Lösung gelagert. Die dritte Serie lagerte 65 Tage, d.h. bis zu einem Prüfalter von 58 Tagen, bei 20 °C und 40 % relative Luftfeuchtigkeit (Klima 20/40), danach bei 23 °C und 45 % relativer Luftfeuchtigkeit (Klima 23/45).

Die Schwindmaße ϵ_S der Prüfkörper berechnen sich nach Gl. (6.3) aus der Länge der Messstrecke zum Messzeitpunkt (l_t) und der Ursprungslänge der Messstrecke ($l_0 = 200$ mm):

$$\epsilon_S = (l_t - l_0) / l_0 \tag{6.3}$$

Die berechneten Schwindmaße sind in Abhängigkeit der Abbindezeit und des Prüfalters in Tabelle 6.8-1 zusammengestellt bzw. in Abbildung 6.8-1 grafisch dargestellt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Abbindezeit [Tage]	Prüfalter [Tage]	Klima 20/40	Normalklima 20/65	Prüfalter [Tage]	Normalklima 20/65
7	0	0,000	0,000		0,000
8	1	0,034	0,035		0,038
9	2	0,076	0,083		0,074
10	3	0,110	0,153		0,147
15	8	0,408	0,485		0,466
25	18	0,644	0,735		0,723
38	31	0,831	0,862		0,861
65	58	1,004	0,942		0,957
Klima 23/45					
98	91	1,088	1,001		1,013
192	185	1,175	1,023		1,048
273	266	Nicht bestimmt			1,048
Lagerung in NaCl-Lösung					
274	267	Nicht bestimmt		1	1,049
275	268			2	1,045
277	270			4	1,037
280	273			7	1,033
287	280			14	1,005
301	294			28	0,980
367	360	1,296	1,032	94	0,836

Tabelle 6.8-1: Resultate der Schwindmessungen. Sämtliche Messdaten sind angegeben in der Einheit mm/m bzw. ‰.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00

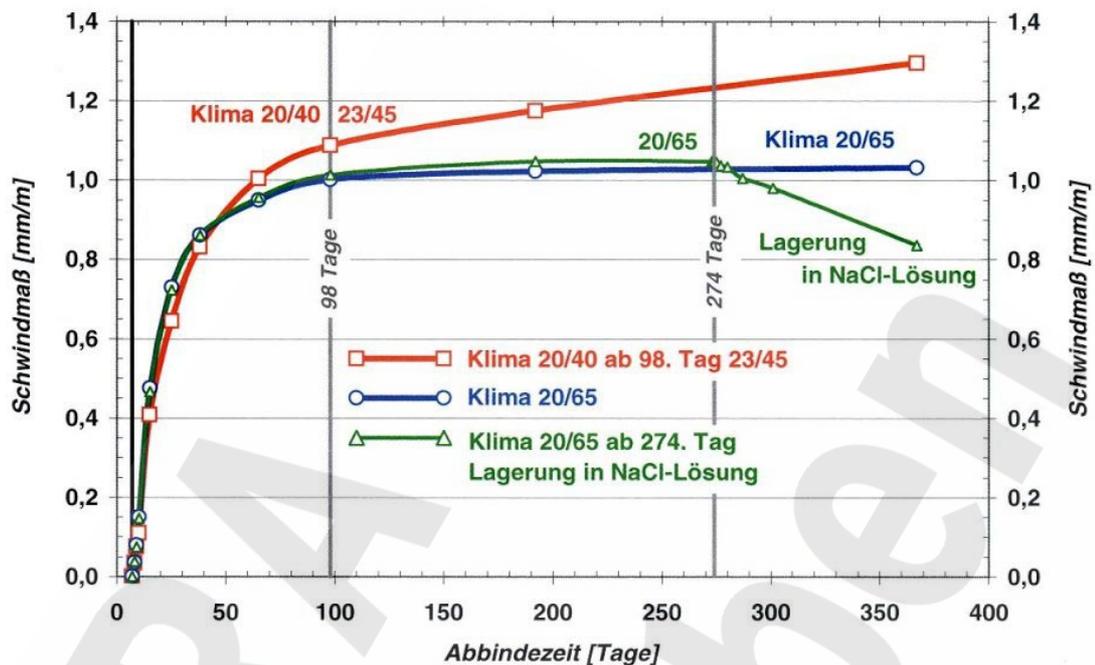


Abbildung 6.8-1: Schwindmaße in Abhängigkeit der Abbindezeit der Prüfkörper.

Die Untersuchungen belegen, dass im Klima 20/45 bzw. 23/45 gelagerte Prüfkörper die höchsten Schwindmaße aufweisen. Im Normklima 20/65 ist der Schwindprozess bereits nach einer Abbindezeit von etwa 50 Tagen weitgehend abgeschlossen und bei einem Kontakt mit Salzlösung ist eine Volumenzunahme („Quellen“) der Prüfkörper festzustellen. Für das Normklima 20/65 kann ein Endschwindmaß von 1,1 mm/m angegeben werden.

6.9 Porosität

Festbetone verfügen über ein Porensystem. Die Ursache ist die Beimengung von Luft, z.B. während des Anmischens, die Fixierung von Wasser in die Kristallstruktur der Hydratationsprodukte, die eine Volumenabnahme („Schrumpfen“) bewirkt sowie das Auftreten von Wasser („Gel- und Kapillarwasser“), das nicht in die Struktur der Reaktionsprodukte fixiert werden kann.

Der Anteil des Porensystems am gesamten Volumen des Salzbetons, d.h. die totale Porosität, wurde an Proben ermittelt, zu deren Herstellung das Gemisch aus Heißlöse- und Flotationsrückstand Verwendung fand. Die Anfertigung der verdichteten Probekörper mit einer Höhe und einem Durchmesser von 5 cm erfolgte nach DIN 1048, Teil 5 /14/ (vgl. /17/). Nach dem Ausschalen wurden die Proben 6 Wochen bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Die Bestimmung der totalen Porosität erfolgte nach folgendem Arbeitsschema:

- 3stündige Entgasung der gewogenen Proben unter Vakuum
- Einströmen des Sättigungsfluids (gesättigte NaCl-Lösung oder Gleichgewichtslösung Q des Quinären Systems ozeaner Evaporite) bei Unterdruck

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

- 2stündige Lagerung der Proben bei Unterdruck
- Wägung der Proben
- Trocknung der Proben bei 105 °C bis zur Massekonstanz.
- Berechnung der totalen Porosität nach Gleichung (6.4):

$$\text{Totale Porosität} = m_{\text{ges}} - (m_t - m_k) / (\rho_F \cdot V), \quad (6.4)$$

wobei m_{ges} die Masse der mit dem Sättigungsfluid gesättigten Probe, m_t die Trockenmasse der Probe, m_k die Masse der im Fluid gelösten Komponenten, ρ_F die Fluidichte und V das Probevolumen ist. Ausfällungseffekte durch die Vermischung der Porenflüssigkeit mit dem Sättigungsfluid wurden berücksichtigt.

Bei einer weiteren Messung wurde konzentrierte NaCl-Lösung mit 0,5 mol/L NaOH bei einem Druck von 6 MPa bis zur vollständigen Sättigung in eine Probe gepresst.

Bei Verwendung einer NaCl-Lösung als Sättigungsfluid ergab sich als Mittelwert von 4 Proben eine totale Porosität von 17,8 %, bei Aufsättigung mit einer Gleichgewichtslösung Q 19,0 % (2 Proben). Die bei einem Druck von 6 MPa aufgesättigte Probe wies eine totale Porosität von 19,0 % auf. Sämtliche Proben zeigen demnach vergleichbare Messresultate. Als Mittelwert ergibt sich für die totale Porosität 18,2 %.

6.10 Porenradienverteilung

Betone können in Abhängigkeit ihres Wasser-/Bindemittel-Verhältnisses mehrere Porenarten enthalten, die auf Grund ihrer Größe und Entstehung unterscheidbar sind. So haben beispielsweise Gelporen, die in den Zwischenräumen des Bindemittelgels eingeschlossen sind Radien von weniger als ca. 0,1 µm. Die Ursache ihrer Bildung ist das im Verlauf des Hydrationsprozesses auftretende Schrumpfen des Baustoffes. Darüber hinaus vorhandenes Wasser oder die bei Salzbetonen auftretende Salzlösung kann dagegen in Kapillarporen vorliegen, die Radien von ca. 0,1 µm bis etwa 100 µm aufweisen. Kapillarporen sind häufig vernetzt. Sie können daher als bevorzugte Fließwege für Lösungen und Gase fungieren.

Im Gegensatz von Angaben zur Gesamtporosität bzw. totalen Porosität erlaubt die Porenradienverteilung eine nähere Charakterisierung des Porengefüges eines Baustoffes und eine Identifizierung der Porenarten. Die Bestimmungen ermöglichen damit auch Rückschlüsse auf die Durchlässigkeit eines Betons sowie Aussagen zum kapillaren Saugvermögen.

Die Untersuchungen erfolgten mittels der Quecksilberdruckporosimetrie in Anlehnung an DIN 66133 /18/ (vgl. /17/). Quecksilber hat eine hohe Oberflächenspannung (484 mN/nm) und ist bei Raumtemperatur eine nicht benetzende Flüssigkeit. Aus diesem Grund dringt es nur unter Druck in poröse Festkörper ein. Die Quecksilberdruckporosimetrie nutzt diese Eigenschaften, wobei die druckabhängige Quecksilberintrusion, d.h. die Abhängigkeit des Queck-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00

silbervolumens vom Druck registriert wird. Der aufgewendete Druck ist ein Maß für den Porenradius. Poren mit Radien von weniger als 0,0037 μm , d.h. sog. Mikroporen des Gelporenbereiches, sind mit dieser Methode nicht nachweisbar, ebenso Porenradien $> 55 \mu\text{m}$.

Verwendet wurden verdichtete und getrocknete Prüfkörper mit einer Abmessung von 10·10·10 mm, die aus Zylindern trocken herausgesägt wurden. Die Abbindezeit des Salzbetons betrug mindestens 42 Tage. Abbildung 6.10-1 zeigt die Prozentanteile des injizierten Quecksilbervolumens in Abhängigkeit des Porenradius (Volumensummenkurve) sowie die differentielle Form der Volumensummenkurve, die den Anteil der Porenradien am Gesamtporenvolumen wiedergibt. Es handelt sich um Durchschnittsverteilungen von 6 Prüfkörpern.

Gelporen im Bereich 0,01 μm dominieren das Porensystem des Salzbetons. Der Anteil von Porenradien $> 0,02 \mu\text{m}$ ist gering. Der Salzbeton weist praktisch keine Kapillarporosität auf. Die mit der Quecksilberdruckporosimetrie messbare Porosität betrug im Durchschnitt $14,2 \pm 0,3 \%$. Sie ist im Vergleich zu den im Kapitel 6.9 beschriebenen Werten geringer, dies dürfte jedoch auf den eingeschränkten Messbereich des Porosimeters zurückzuführen sein.

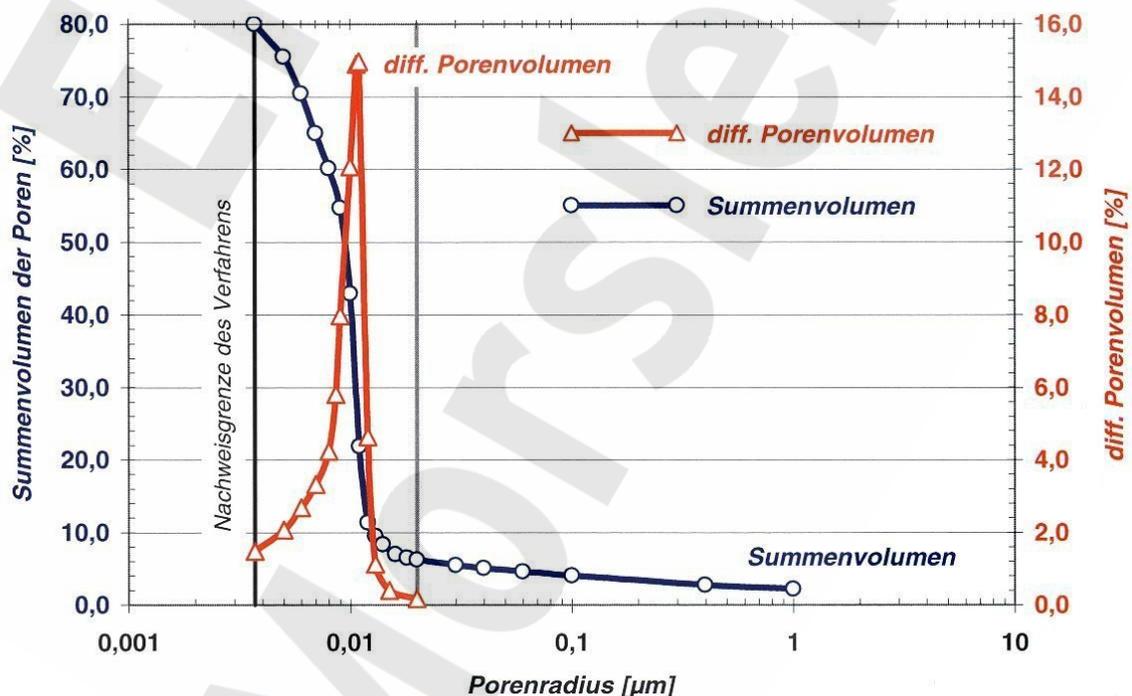


Abbildung 6.10-1: Porenradienverteilung des Salzbetons dargestellt als Volumensummenkurve und in Prozent des gesamten Porenvolumens (V_{max}).

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

6.11 Permeabilität

Die Permeabilität beschreibt den hydraulischen Widerstand eines Festkörpers gegenüber Fluiden. Untersucht wurde die Lösungspermeabilität sowie die Gaspermeabilität an getrockneten Salzbetonproben und an Prüfkörpern, die bei definierter Luftfeuchtigkeit und Temperatur lagerten. Zusätzlich erfolgten Untersuchungen zur Ermittlung des Gaseindringdruckes.

Die Herstellung der zylindrischen Prüfkörper mit einer Höhe und einem Durchmesser von 5 cm erfolgte nach DIN 1048 /14/. Als Salzzuschlag fand das Gemisch aus Flotations- und Heißlöserückständen Verwendung (Größtkorn < 20 mm). Das Ausschalen der verdichteten Prüfkörper erfolgte nach 5 Tagen.

Zum Einsatz kam die Zwei-Kammer-Methode für die instationäre Durchströmung poröser Medien. Bei diesem Verfahren wird der Prüfkörper in eine Druckzelle eingebaut (Abbildung 6.11-1). Die Endflächen des Zylinders sind mit Druckbehältern definierten Volumens verbunden (V1, V2), die mit einem Gas, das nicht sorbiert wird, oder einer entgasten Flüssigkeit befüllt sind. Der Druck des Strömungsfluids in der sog. Eingangskammer (Startdruck p_E) ist höher als der Druck in der Ausgangskammer (Startdruck p_A). Nach dem Öffnen der Kammern liegt somit an den Endflächen des Zylinders ein Druckgefälle an. Ist der Prüfkörper hydraulisch durchlässig, erfolgt ein Druckausgleich, dessen zeitlicher Verlauf ein Maß für die Probenpermeabilität ist. Ein Manteldruck auf die den Prüfkörper umhüllende Gummimanschette verhindert ein Umströmen und ermöglicht Untersuchungen der Probe in Abhängigkeit der Druckeinspannung. Das Verfahren ist insbesondere zur Permeabilitätsbestimmung geringdurchlässiger Festkörper prädestiniert, da eine Volumenstrommessung entfällt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00

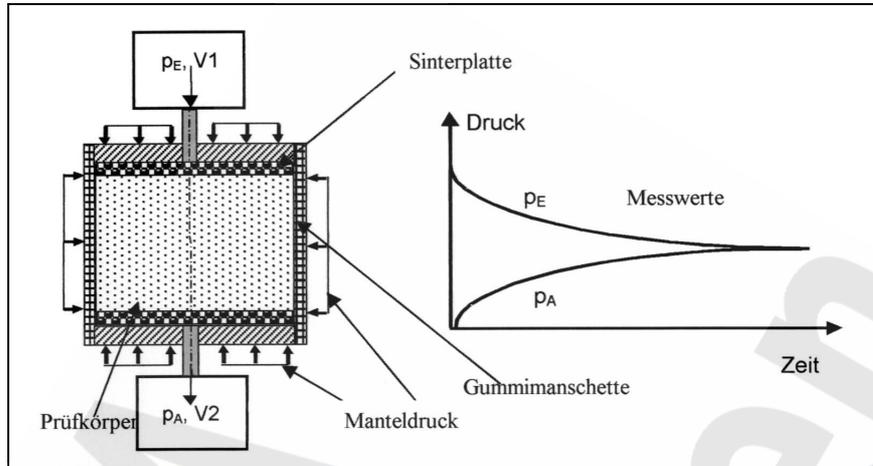


Abbildung 6.11-1: Schematische Darstellung der Zwei-Kammer-Methode. In Folge der Prüfkörperpermeabilität sinkt der Druck in der Eingangskammer V1, während in der Ausgangskammer V2 ein Druckanstieg zu registrieren ist.

Gaspermeabilität

Verwendet wurden Prüfkörper nach einer Abbindezeit von 92 Tagen, die bei 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit (klimatisiert) lagerten sowie ein Prüfkörper, der zur Ermittlung der maximal möglichen Gaspermeabilität bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet wurde. Als Strömungsfluid diente Stickstoff. Bei der Auswertung der Rohmessdaten wurde eine totale Porosität der verwendeten Prüfkörper von 18,1 % berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.9).

Da der Einfluss einer Druckeinspannung auf die Permeabilität des Salzbetons am besten am getrockneten Material nachweisbar ist, wurde der Manteldruck und der Strömungsdruck zu Messbeginn im Verlauf der Messreihe stufenweise erhöht. Die Gaspermeabilität wurde jeweils nach 24stündiger und 36stündiger Haltezeit des Manteldruckes ermittelt. Die Resultate fasst Tabelle 6.11-1 zusammen.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 60

Manteldruck [MPa]	Strömungsdruck [MPa]	Gaspermeabilität [m^2]
1,0	0,56	$5,4 \cdot 10^{-18}$ (24 h) – $5,3 \cdot 10^{-18}$ (36 h)
2,5	1,5	$2,8 \cdot 10^{-18}$ (24 h) – $2,8 \cdot 10^{-18}$ (36 h)
4,5	3,5	$2,3 \cdot 10^{-18}$ (24 h) – $2,9 \cdot 10^{-18}$ (36 h)
6,5	5,5	$1,5 \cdot 10^{-18}$ (24 h) – $1,5 \cdot 10^{-18}$ (36 h)
8,5	7,5	$1,3 \cdot 10^{-18}$ (24 h) – $1,1 \cdot 10^{-18}$ (36 h)
10,0	9,0	$1,1 \cdot 10^{-18}$ (24 h) – $1,0 \cdot 10^{-18}$ (36 h)

Tabelle 6.11-1: Gaspermeabilität bei 105 °C getrockneter Prüfkörper in Abhängigkeit vom Manteldruck und des Gasströmungsdruckes zu Messbeginn. Die Permeabilitäten wurden jeweils nach 24stündiger und 36stündiger Haltezeit des Manteldruckes bestimmt.

Festzustellen ist, dass bei einer Zunahme des Manteldruckes die Gaspermeabilität von etwa $5,4 \cdot 10^{-18} m^2$ auf $1,0 \cdot 10^{-18} m^2$ sinkt.

Zur Ermittlung der Gaspermeabilität klimatisiert gelagerten Salzbetons (Normalklimat 20/65) erfolgten Untersuchungen in Abhängigkeit des Mantel- und Strömungsdruckes sowie eine Messreihe (6 Prüfkörper) bei einem Manteldruck von 2,5 MPa und einem Strömungsdruck (Startdruck zu Versuchsbeginn) von 1,8 MPa. Bei den Messresultaten handelt es sich um effektive Permeabilitäten (k_{eff}), die gültig sind für den Sättigungszustand der Prüfkörper. Berechnet wurden zusätzlich die relativen Gaspermeabilitäten (k_{rel}) nach Gleichung (6.5), die das Verhältnis der Permeabilitäten der klimatisiert gelagerten zu den getrockneten Prüfkörpern wiedergibt. Würde die Aufsättigung des Porenraumes mit Lösung keine Veränderung der Permeabilität verursachen, so wäre die relative Gaspermeabilität = 1.

$$k_{rel} = k_{eff} / k_{abs} \tag{6.5}$$

Als absolute Gaspermeabilitäten wurden die am getrockneten Salzbeton bei vergleichbaren Manteldrücken ermittelten Gaspermeabilitäten verwendet.

Die Resultate der Messungen, bei denen der Mantel- und Strömungsdruck variiert wurde, sind dargestellt in Tabelle 6.11-2. Bestimmungen des Sättigungsgrades des Porenraumes wurden an diesen Prüfkörpern nicht durchgeführt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 61

Manteldruck	Strömungsdruck	Gaspermeabilität		Abbindezeit
		effektiv (k_{eff})	relativ (k_{rel})	
[MPa]	[MPa]	[m ²]	[m ²]	[Tage]
Prüfkörper 1				
2,5	1,3	$5,8 \cdot 10^{-20}$	0,021	48
2,5	1,4	$5,5 \cdot 10^{-20}$	0,020	51
4,7	1,8	$1,4 \cdot 10^{-20}$	0,005	56
Prüfkörper 2				
2,5	1,5	$2,1 \cdot 10^{-20}$	0,008	54
10,0	5,6	$5,3 \cdot 10^{-21}$	0,005	55
2,5	1,5	$9,2 \cdot 10^{-21}$	0,003	56
Untersuchung der Gaspermeabilität bei konstantem Manteldruck				
2,5	1,8	$2,1 \cdot 10^{-20}$	0,008	54
2,5	1,8	$1,6 \cdot 10^{-20}$	0,006	96
2,5	1,8	$1,5 \cdot 10^{-20}$	0,005	96
2,5	1,8	$3,3 \cdot 10^{-20}$	0,012	97
2,5	1,8	$6,1 \cdot 10^{-20}$	0,022	137
2,5	1,8	$4,9 \cdot 10^{-20}$	0,018	138

Tabelle 6.11-2: Gaspermeabilität klimatisiert gelagerten Salzbetons bei Variation des Mantel- und Strömungsdruckes.

Bei einer Erstbelastung der Prüfkörper mit einem Manteldruck von 2,5 MPa variiert die Gaspermeabilität zwischen $1,5 \cdot 10^{-20}$ m² und $6,1 \cdot 10^{-20}$ m² (Mittelwert $3,7 \cdot 10^{-20}$ m²). Bei einer Erhöhung des Manteldruckes sinkt die Gaspermeabilität in Analogie zu den Befunden des getrockneten Prüfkörpers. Darüber hinaus belegen die am Prüfkörper 2 durchgeführten Messungen, dass die Permeabilitätszunahme bei einer Absenkung des Manteldruckes nur zu einem geringen Umfang reversibel ist. Zur Veranschaulichung der Befunde zur Gaspermeabilität fasst Abbildung 6.11-2 sämtliche Messresultate graphisch zusammen.

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

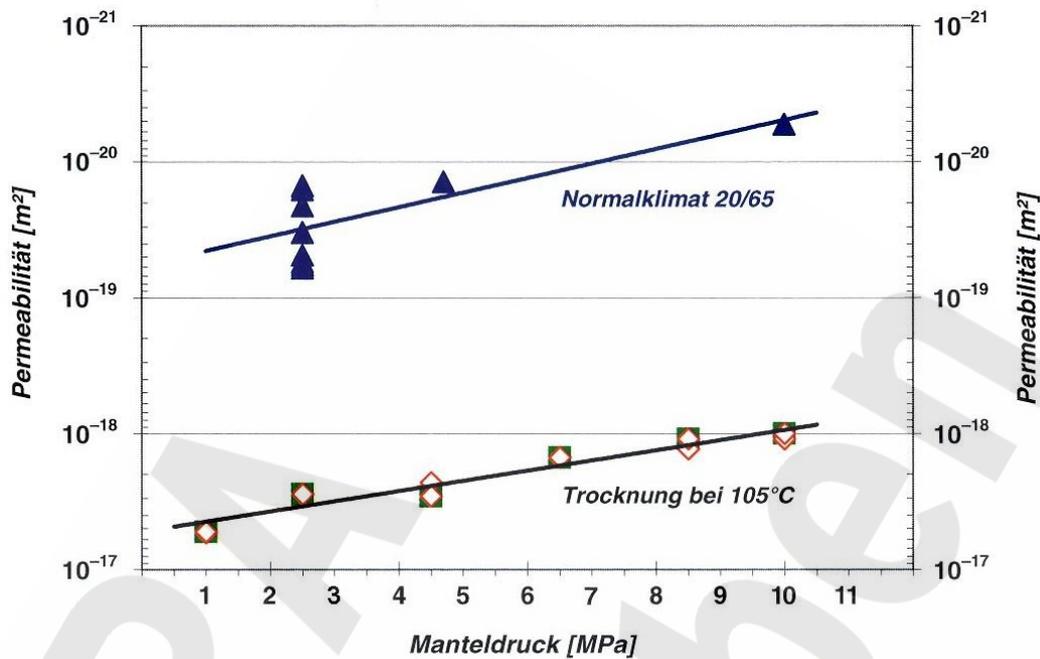


Abbildung 6.11-2: Gaspermeabilität eines getrockneten Prüfkörpers sowie im Normalklimat 20/65 gelagerter Proben in Abhängigkeit vom Manteldruck.

Lösungspermeabilität

In einem Salzbergwerk können bei einem Lösungszufluss NaCl-dominierte Lösungen sowie bei einem Aufschluss von Carnallit oder kieseritischem Hartsalz MgCl₂-reiche Lösungen wie die Gleichgewichtslösung IP21 des Hexären-Systems ozeaner Evaporite oder die Q-Lösung des Quinären-Systems auftreten. Bei der Verwendung einer IP21-Lösung als Strömungsfluid ist im Porenraum von Salzbeton eine Ausfällung von Calciumsulfat-haltigen Mineralen zu erwarten. Aus diesem Grund wurde eine Gleichgewichtslösung Q des Quinären Systems ozeaner Evaporite verwendet, die keine CaSO₄-Komponente enthält. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Lösungen ist dokumentiert in Tabelle 6.11-3.

	NaCl-Lösung			Gleichgewichtslösung Q		
	[g/kg H ₂ O]	[mol/ kmol H ₂ O]	[Massen-%]	[g/kg H ₂ O]	[mol/ kmol H ₂ O]	[Massen-%]
Na ⁺	140,34	110,0	10,344	10,64	8,34	0,728
K ⁺	0,00	0,0	0,00	21,75	10,02	1,489
Mg ²⁺	0,00	0,0	0,00	103,27	76,55	7,069
Cl ⁻	216,43	110,0	15,952	315,25	160,19	21,578
SO ₄ ²⁻	0,00	0,00	0,00	10,05	1,88	0,688
H ₂ O	1.000	1.000	73,704	1.000	1.000	68,448

Tabelle 6.11-3. Chemischer Stoffbestand der Strömungsfluide.

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	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 63

Die Vorbereitung der Prüfkörper bestand aus einer 3stündigen Entgasung unter Vakuum, der Zugabe der jeweiligen Salzlösung sowie einer 2stündigen Lagerung der Prüfkörper bei Unterdruck. Die Messungen erfolgten bei einem Manteldruck von 2,5 MPa und einem Lösungsdruck von 1,8 MPa. Die Abbindezeit der Prüfkörper, die mit NaCl-Lösung beaufschlagt wurden (5 Stück) betrug zwischen 108 und 113 Tage. Die Messungen mit der Gleichgewichtslösung Q erfolgten an 4 Prüfkörpern, die 117 bzw. 118 Tage lagerten.

Eine Permeabilität des Salzbetons gegenüber NaCl- und Q-Lösung war nicht nachweisbar. Für das angewendete Druckregime ist der Salzbeton hydraulisch dicht.

Auf der Basis der Nachweisgrenze des Messverfahrens, die bei einem Druckabfall von 0,025 MPa in 12 Stunden liegt und den Viskositäten der Lösungen, die $1,5 \cdot 10^{-3}$ Pa·s (NaCl-Lösung) bzw. $6,3 \cdot 10^{-3}$ Pa·s (Q-Lösung) betragen, konnten jedoch Obergrenzen für die Lösungspermeabilität von $6 \cdot 10^{-24}$ m² (NaCl-Lösung) bzw. $3 \cdot 10^{-23}$ m² (Q-Lösung) ermittelt werden.

Gaseindringdruck

Der Gaseindringdruck ist der zur Verdrängung der Porenflüssigkeit im Prüfkörper erforderliche Mindestdruck eines Gases. Er entspricht dem Kapillardruck der größten Poren im Material (vgl. Kapitel 6.9).

Die Untersuchungen erfolgten an gesättigten Proben (Q-Lösung), deren Abbindezeit 113 bzw. 118 Tage betrug. Im Verlauf der Bestimmungen wurde der Gasdruck bei einem Manteldruck von 2,5 MPa beginnend bei 0,2 MPa in Stufen von 0,05 bis 0,075 MPa bis zu einem Maximaldruck von 2,1 MPa erhöht. Abschließend wurde der Manteldruck auf 8 MPa und der Gasdruck auf 7 MPa angehoben.

Es war keine Gasdurchströmung bzw. ein Austritt von Lösung aus den Prüfkörpern feststellbar.

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	0054	00	

7 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 Baustoffs erfolgten Bestimmungen der adiabatischen Temperaturentwicklung beim Abbinden, der spezifischen Wärmekapazität, der Wärmeleitfähigkeit, des Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie Untersuchungen zur Temperaturstabilität.

7.1 Adiabatische Temperaturentwicklung beim Abbinden

Die im Verlauf der Hydratation des Bindemittelsystems (Zement, Flugasche) stattfindenden chemischen Reaktionen sind exotherm. Die entstehende Bildungs- bzw. Reaktionswärme kann zu thermomechanischen Zwangsbeanspruchungen im Versatzkörper und im Gebirge führen. Die Bestimmung der Hydratationstemperaturen erfolgte im Labor unter adiabatischen Bedingungen, bei denen die Temperatur der hydratisierenden Probe proportional zur Wärmemenge ansteigt.

Die Bestimmungen erfolgten in einem adiabatischen Kalorimeter. Der Aufbau des Kalorimeters entsprach im Wesentlichen dem vom Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, im Jahre 1970 herausgegebenen „Vorläufigen Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter“ /19/.

Es erfolgten zwei Messungen des Temperaturverlaufs. Eine 7tägige Bestimmung erreichte bei einer Starttemperatur von 28,4 °C eine adiabatische Temperaturerhöhung von 47,7 K. Bei einem weiteren Versuch, der bei einer Temperatur von 20,0 °C begonnen wurde, konnte nach 14 Tagen eine Temperaturerhöhung von 41,1 K festgestellt werden. In Abbildung 7.1-1 sind die Messresultate graphisch dargestellt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00

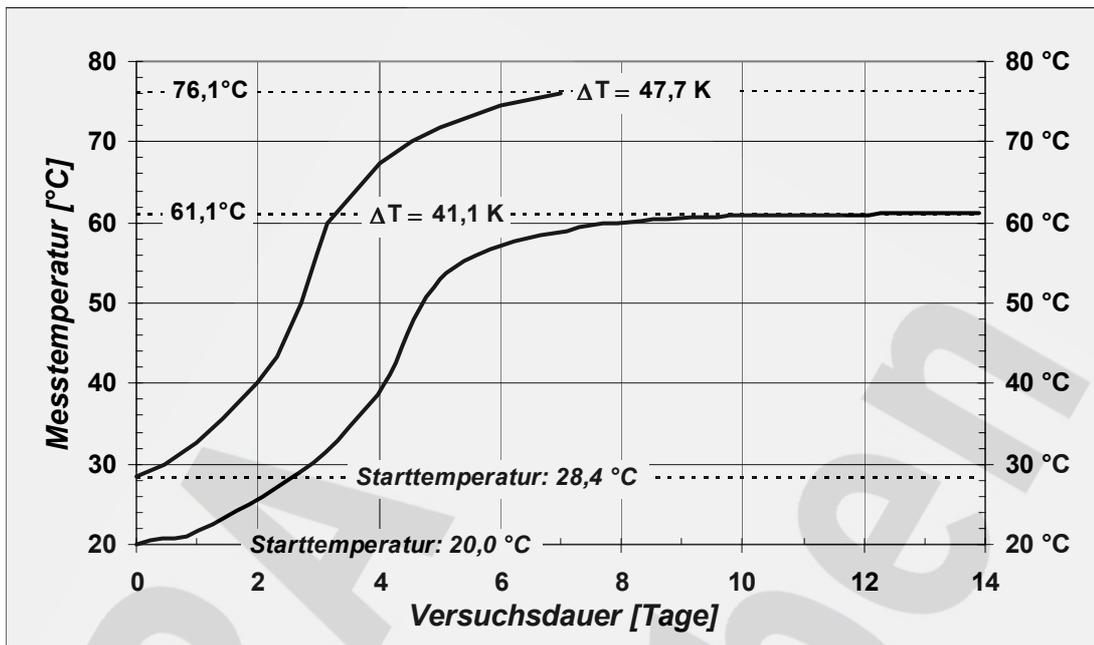


Abbildung 7.1-1: Adiabatische Temperaturentwicklung (Messtemperaturen in Grad Celsius) des Salzbetons im Verlauf des Abbindeprozesses.

7.2 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ist definiert als die Wärmemenge, die je Masseneinheit m bei einer Temperaturzunahme um 1 K aufgenommen wird. Entsprechend den Versuchsbedingungen wird eine Wärmekapazität bei konstantem Volumen (c_V) und konstantem Druck (c_P) unterschieden. Bestimmungen der isobaren spezifischen Wärmekapazität (c_P) des Salzbetons erfolgten im Temperaturbereich von 20 bis 90 °C gemäß DIN 51007 mittels Differentialthermoanalyse (DTA) /20/21/ (vgl. /8/). Als Mittelwert resultiert für den Temperaturbereich von 20 bis 90°C ein Wert von 0,93 J/(g·K).

7.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit gibt an, welche Wärmemenge je Zeiteinheit durch die Flächeneinheit eines Materials von der Dicke $d = 1$ m bei einer Temperaturdifferenz von 1 K hindurchgeht. Sie wurde mit einem Heizplattengerät nach DIN 52612 ermittelt /22/. Als Probe diente eine Scheibe (Durchmesser 150 mm, Höhe 27,9 mm), die aus einem Zylinder (Durchmesser 150 mm, Höhe 250 mm) mittig herausgeschnitten und anschließend bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet wurde. Als Mittelwert aus 4 Proben ergab sich eine Wärmeleitfähigkeit von 1,14 W/(m·K).

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

7.4 Wärmeausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient beschreibt die thermische, d.h. in Folge Erhitzung bzw. Abkühlung, hervorgerufene Längenänderung eines Materials in Bezug auf die Ursprungslänge. Die Bestimmungen erfolgten nach DIN 51045, Teil 1 /23/ an 90 Tage alten Prismen mit den Abmessungen 40·40·160 mm, die aus einem Zylinder (Durchmesser 150 mm, Höhe 300 mm) 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 abgekühlt. Abschließend fand eine Messung bei 40 °C statt.

Die Aufheizung erbrachte einen mittleren Wärmeausdehnungskoeffizienten von $4,8 \cdot 10^{-5}$ 1/K. Für das Temperaturintervall von 60 °C bis 0 °C (Abkühlungsphase) beträgt der durchschnittliche Wärmeausdehnungskoeffizient $3,2 \cdot 10^{-5}$ 1/K. Die bleibende Dehnung, d.h. der irreversible Anteil der Längenänderung, betrug nach 24 Stunden, bezogen auf eine Temperatur von 40 °C, 0,367 mm/m [%].

7.5 Temperaturstabilität

Informationen zur Stabilität des Salzbetons in Abhängigkeit der Temperatur können aus zwei Untersuchungen abgeleitet werden.

- Die zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit verwendeten Prüfkörper wurden bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und zur Abkühlung auf Raumtemperatur in einem geschlossenen Behälter (Exsikkator) gelagert. Der aufgetretene Massenverlust betrug 0,02 %.
- Bei der Durchführung einer DTA/TG-Analyse (Differentialthermoanalyse/-gravimetrie) wird die Probe bei vorgegebenem Temperaturgradienten aufgeheizt und dabei der Massenverlust in Abhängigkeit der Temperatur registriert. Bei der Aufheizung des Salzbetons auf 800 °C wurde ein gesamter Massenverlust von $11,3 \pm 0,2$ Massen-% gemessen. Der gesamte Wassergehalt des Salzbetons beträgt ca. 13,4 Massen-%.

Es ist davon auszugehen, dass für den Massenverlust in erster Linie Wasser verantwortlich ist, welches chemisch oder physikalisch gebunden ist und thermisch ausgetrieben wird.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

8 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:

Ausgangsstoffe und Rezeptur sowie rheologische Untersuchungen

- Rezepturzusammensetzung und Resultate der rheologischen Untersuchungen im Rohrviskosimeter.
- Resultate der Konsistenzuntersuchungen (V-Trichter-Prüfung, Ausbreitmaß, Setzfließmaß, Fließwinkel) sowie Ergebnisse der Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten.

Physikalische Untersuchungen

- Resultate zur Festmaterialdichte und zum statischen Elastizitätsmodul.
- Resultate zur Querkontraktionszahl und zur einaxialen Druckfestigkeit.
- Dilatanzverhalten und triaxiale Druckfestigkeit, einaxiale Zugfestigkeit und Kriechverhalten.
- Schwinden, Porosität, Porenradienverteilung, chemischer Stoffbestand der Porenlösung, Permeabilität.

Thermodynamische Untersuchungen

- Adiabatische Temperaturerhöhung beim Abbinden, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, Temperaturstabilität.

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	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Ausgangsstoffe und Rezeptur										
Die Berechnung der Rezepturzusammensetzungen in kg/m ³ basiert auf einer Dichte der Porenlösung von 1,0 g/cm ³ .										
	-6	-4	-3	-2	0	+3	+4	+6	+10	
	[kg/m ³]									
Zement	333,3	331,5	330,7	329,7	328	325,4	324,5	322,8	319,5	
Flugasche	333,3	331,5	330,7	329,7	328	325,4	324,5	322,8	319,5	
Wasser	255,1	259,1	261,1	263,1	267	272,8	274,7	278,5	286,1	
Salzzuschlag	1.089,4	1.083,5	1.080,7	1.077,7	1.072	1.063,5	1.060,6	1.055,1	1.044,1	
	[Massen-%]									
Zement	16,57	16,53	16,51	16,49	16,4	16,38	16,35	16,31	16,22	
Flugasche	16,57	16,53	16,51	16,49	16,4	16,38	16,35	16,31	16,22	
Wasser	12,68	12,92	13,03	13,15	13,4	13,73	13,85	14,07	14,53	
Salzzuschlag	54,17	54,02	53,95	53,87	53,8	53,52	53,45	53,31	53,03	

Rheologische Untersuchungen im Rohrviskosimeter (vgl. Kapitel 4.1)										
Fließverhalten bei einer Förderleistung von 55 m³/h										
Salzzuschlag Gemisch Heißlöse-/Flotationsrückstand (< 20 mm)										
Versuchsdauer	0 Minuten		30 Minuten		60 Minuten		90 Minuten			
	τ_0	K	τ_0	K	τ_0	K	τ_0	K	τ_0	K
Fließparameter	29,9	20,1	22,9	17,3	24,5	23,4	24,5	29,5	43,6	0,31
Prognostizierte Druckförderverluste und Mindestdruckverluste in Abhängigkeit der Rohrenweite [bar/100 m]										
DN ...	100	125	150	100	125	150	100	125	150	150
Druckverlust	9,1	5,7	4,0	5,0	9,0	5,8	4,0	10,6	7,2	5,2
Mindestdruck	1,2	1,0	0,8	0,8	1,0	0,8	0,7	0,9	0,7	0,6

Fließverhalten bei einer Förderleistung von 45 m³/h																								
Salzzuschlag Gemisch Heißlöse-/Flotationsrückstand (< 20 mm)																								
Wassergehalt in Massen-% (Prozentuale Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert)																								
Fließparameter	13,2 (-2)		13,4 (0)		13,9 (+4)		14,1 (+6)		14,5 (+10)															
	τ_0	K	τ_0	K	τ_0	K	τ_0	K	τ_0	K														
Fließparameter	14,6	3,0	0,75	10,1	3,0	0,74	9,0	2,1	0,83	8,5	1,5	0,83	11,7	1,6	0,79	7,4	1,3	0,80	20,9	3,5	0,75	10,7	3,6	0,70
Prognostizierte Druckförderverluste [bar/100 m]																								
DN ...	100	125	150	100	125	150	100	125	150	100	125	150	100	125	150	100	125	150	100	125	150	100	125	150
Druckverlust	5,6	2,9	1,8	5,0	2,6	1,6	4,9	2,4	1,4	3,9	1,9	1,1	3,6	1,9	1,2	3,0	1,6	0,9	6,7	3,6	2,2	5,2	2,8	2,0

Tabelle 8-1: Zusammenstellung der Materialparameter, Rezepturzusammensetzung und 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	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

V-Trichter-Prüfung (vgl. Kapitel 4.2.1, Tabelle 4.2-1)									
Prozentuale Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert									
-6					+10				
Größe (Fläche) der V-Trichter-Öffnung									
6,5,7,5 cm (48,8 cm ²)	Ø 3,5 (9,6 cm ²)	6,5,7,5 cm (48,8 cm ²)	Ø 4,4 (15,2 cm ²)	Ø 3,5 (9,6 cm ²)	Ø 2,6 (5,3 cm ²)				
Ausfließzeit	1,63 s	8,03 s	1,33 s	4,37 s	7,43 s	13,40 s			
Ausbreitmaß nach DIN 1048, Teil 1 (vgl. Kapitel 4.2.2, Tabelle 4.2-2)									
Abbindezeit									
0 Minuten	30 Minuten	45 Minuten	60 Minuten	90 Minuten					
Ausbreitmaß	70 cm	69 cm	67 cm	66 cm	70 cm	65 cm			
Temperatur	28 °C	20,8 °C	24 °C	20,8 °C	28 °C	22 °C			
Setzfließmaß nach SVB-Richtlinie (vgl. Kapitel 4.2.3, Tabelle 4.2-3)									
Wassergehalt in Massen-% (Prozentuale Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert)									
-6	-3	0	+3	+6	+10	0			
49 cm	51 cm	55 cm	58 cm	64 cm	68 cm	57 cm (60*)	59 cm (180**)		
Fließwinkel (vgl. Kapitel 4.3) 1,25 % entsprechend 0,7°									
Untersuchungen zur Kornsedimentation und zur Überschlüsselung (vgl. Kapitel 5)									
Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten (vgl. Kapitel 5.1)									
Sedimentationsversuch in einer vertikalen Rohreitung (vgl. Kapitel 5.1.1)									
Die Proben einer Salzbetonsäule wiesen vergleichbare Konsistenzen und Lösungsanteile auf. Sedimentations- bzw. Entmischungserscheinungen sind demnach auszuschließen.									
Sedimentationsversuch bei veränderten Wassergehalten (vgl. Kapitel 5.1.2)									
An Prüfkörpern von Suspensionen mit einer Wassergehaltsabweichung von -4 bis +10 % vom Sollwert waren visuell keine Sedimentations- bzw. Entmischungserscheinungen nachweisbar.									
Begutachtung von Bohrkernen des in-situ Freifallversuches (vgl. Kapitel 5.1.3)									
Salzbeton, der über eine Höhe von 37 m in eine Schalung verstürzt wurde, zeigte nach dem Abbinden eine homogene Kornverteilung.									
Bestimmung der sedimentationsstabilen Korngröße (vgl. Kapitel 5.1.4)									
Die Berechnungen ergaben, dass bei den gemessenen Fließgrenzen der Suspension Sedimentations- und Absetzerscheinungen im Bereich einer Wassergehaltsabweichung vom Sollwert von -6 % bis +10 % nicht zu erwarten sind.									

Tabelle 8-2: Zusammenstellung der Materialparameter. Resultate der Konsistenzmessungen (V-Trichter-Prüfung, Ausbreitmaß, Setzfließmaß, Fließwinkel) sowie Ergebnisse der Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten; * nach 60minütiger Scherbeanspruchung in einem modifizierten Betonmischer; ** nach 180minütiger Scherbeanspruchung in einem modifizierten Betonmischer.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung

Höhe der Überschusslösung in Abhängigkeit der Betonoberfläche bzw. des Zylinderdurchmessers (konstante Füllhöhe, 2000 mm) (vgl. Kapitel 5.2.1)									
Zylinderdurchmesser	50 mm	100 mm	200 mm	300 mm	500 mm				
Betonoberfläche	20 cm ²	79 cm ²	314 cm ²	707 cm ²	1964 cm ²				
Füllvolumen	3,9 Liter	15,7 Liter	62,8 Liter	141,4 Liter	392,7 Liter				
Standzeit [Stunden]	Höhe der Flüssigkeitsschicht [mm]								
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	2	2	2	2	2	2	2	2	3-4
6	3	3	3	3	3	3	3	3	4
8	6	6	6	6	6	6	6	6	6
15	6-7	6	8	9	10	9	9	9	10
24	8	6	7	10	10	10	10	10	10
48	7-8	6	6	10	9-10	10	10	10	9-10
96 (4 d)	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*
Höhe der Überschusslösung in Abhängigkeit der Füllhöhe (konstante Betonoberfläche, 122 cm ² ; Zylinderdurchmesser 125 mm) (vgl. Kap. 5.2.2)									
Füllhöhe (-volumen)	2.000 mm (24,5 Liter)	4.000 mm (49,1 Liter)	6.000 mm (73,6 Liter)						
Standzeit [Stunden]	Höhe der Flüssigkeitsschicht [mm]								
1,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
8	6	6	6	6	6	6	6	6	6
14	8	8	8	8	8	8	8	8	10
23	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	9
47	7	7	7	7	7	7	7	7	8-9
95	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*

Tabelle 8-3: Zusammenstellung der Materialparameter. Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.

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	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Höhe der Überschusslösung in Abhängigkeit der Füllhöhe (konstantes Füllvolumen, 12 Liter) (vgl. Kapitel 5.2.3)									
Zylinderdurchmesser	300 mm	200 mm	100 mm	50 mm					
Füllhöhe	170 mm	380 mm	1.530 mm	6.110 mm					
Standzeit [Stunden]	Höhe der Flüssigkeitsschicht [mm]								
1,5	< 1	1	2	2					
5	3	3	3	4					
8	6	5	6	5					
14	6	8	8	12					
23	5	9	8	9					
47	4 - 5	9	8	*					
95	4	8	7	*					
119	3 - 4	7	6 - 7	*					
143	3	6 - 7	6	*					

Chemischer Stoffbestand der Poren- und Überschusslösung (vgl. Kapitel 5.4)									
Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻				
[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]
[Massen-%]	[Massen-%]	[Massen-%]	[Massen-%]	[Massen-%]	[Massen-%]	[Massen-%]	[Massen-%]	[Massen-%]	[Massen-%]
Porenlösung des Salzbetons	38,72	4,46	204,10	1,61	0,13	0,12	0,01		
Überschusslösung des Salzbetons	40,00	3,52	211,00	1,89	0,15	0,10	0,01		

Tabelle 8-4: Zusammenstellung der Materialparameter. Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung sowie zum chemischen Stoffbestand der Poren- und Überschusslösung. Index *: Die Baustoffoberfläche ist feucht, die Höhe der Flüssigkeitsschicht jedoch nicht messbar.

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	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Festmaterialdichte nach DIN 1048, Teil 5, Abschnitt 7.1 (vgl. Kapitel 6.1)										
Bei Normalklima 20/65 im Mittel 1.965 kg/m ³ , bei 40 °C und 30 % relative Luftfeuchtigkeit gelagerte Prüfkörper 1.970 kg/m ³ .										
Statischer Elastizitätsmodul nach DIN 1048, Teil 5 (vgl. Kapitel 6.2)										
Im Anschluss des Mischprozesses hergestellte Prüfkörper										
Abbindezeit [Tage]	3	7	14	28	42	56	90	252	270	530
Messwert [MPa, N/mm ²]	800	4.200	9.700	11.700/12.400	n.b.	n.b.	14.900	n.b.	19.700	23.900
Lagerungstemperatur	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C/R.T.	—	—	40 °C	—	R.T.	k.A.
<i>Bohrkerne aus dem Versatzkörper des in-situ Freilagerversuches (Lagerung bei Raumtemperatur, Abbindezeit 28 Tage, Angaben in MPa, N/mm²)</i>										
Mittlere Bohrtiefe der Prüfkörper [m]										
Bohrung Nr.	0,30	1,48	2,48	Mittelwert	Bohrung Nr.	0,30	1,48	2,48	Mittelwert	
5	21.410	22.230	19.590	21.100	10	22.410	23.090	22.420	22.600	
4	19.390	23.400	22.030	21.600	9	26.210	25.300	24.000	25.200	
3	23.430	22.710	30.050	25.400	8	23.300	25.890	27.080	25.400	
2	25.140	24.500	24.660	24.800	7	28.360	26.450	29.680	28.200	
1	31.460	33.070	37.000	33.800	6	28.000	30.000	28.100	28.700	
Mittelwert	24.170	25.180	26.670	25.340	Mittelwert	25.660	26.150	26.260	26.020	
<i>Nach den Förderversuchen im Rohviskosimeter hergestellte Prüfkörper (Lagerung bei 20 °C, Angaben in MPa, N/mm²)</i>										
Prozentuale Abweichung										
Wassergehalt										
Wassergehalt vom Sollwert										
	[kg/m ³]	[Massen-%]	7 Tage	14 Tage	28 Tage	165 Tage				
			7 Tage	14 Tage	28 Tage	165 Tage				
Salzzuschlag Gemisch Flotations- und Heißlöserückstand (Korngröße < 20 mm)										
-4	258	12,9	8.950	8.040	25.080	nicht bestimmt				
0	267	13,4	nicht bestimmt	10.460	19.260	17.700				
+4	276	13,9	1.180	9.510	22.680	nicht bestimmt				
+10	290	14,5	7.780	10.020	23.610	nicht bestimmt				
Salzzuschlag Flotationsrückstand (Korngröße < 2 mm)										
			7 Tage	14 Tage	28 Tage	156 Tage				
0	267	13,4	1.870	7.120	20.850	15.370				

Tabelle 8-5: Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen. Resultate zur Festmaterialdichte und zum statischen Elastizitätsmodul; 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	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Querkontraktionszahl (vgl. Kapitel 6.2)		Im Anschluss des Mischprozesses hergestellte Prüfkörper				Nach den Förderversuchen im Rohrviskosimeter hergestellte Prüfkörper			
Abbindezeit [Tage]	3	7	14	28	156	165			
Messwert [-]	0,19*	0,30*	0,33*	0,33*	0,30**	0,28*			
Lagerung bei 20 °C									
* Salzzuschlag Gemisch Flotations- und Heißlöserückstand (Korngröße < 20 mm). ** Salzzuschlag Flotationsrückstand (Korngröße < 2 mm)									
Resultate triaxialer Druckversuche (vgl. Kapitel 6.5), Abbindezeit der Prüfkörper 28 Tage									
Vorförderungsrate [1/s]	2,5·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁶					
Manteldruck σ_3 [MPa]	2,5	0,0	2,5	0,0	1,0	2,5	3,5	5,0	7,0
Messwert [-]	0,26	0,25	0,26	0,27	0,28	0,22	0,19	0,21	0,23
Einaxiale Druckfestigkeit (zylindrisch) nach DIN 1048, Teil 5 (vgl. Kapitel 6.3)									
Im Anschluss des Mischprozesses hergestellte Prüfkörper									
Abbindezeit [Tage]	3	7	14	28	42	56	90	252	270
Messwert [MPa, N/mm ²]	1,48	6,66	18,8	23,4/30,4/21,2	30,7	32,5	32,9/31,7	39,7	33,1
Lagerungstemperatur [°C]	20	20	20	20/40/R.T.	40	40	20/40	40	R.T.
Bohrkerne aus dem Versatzkörper des in-situ Freifallversuches (Lagerung bei Raumtemperatur, Abbindezeit 28 Tage, Angaben in MPa, N/mm ²)									
Bohrung Nr.	0,15	1,33	2,33	Mittelwert	Bohrung Nr.	0,15	1,33	2,33	Mittelwert
5	23,2	21,4	24,3	23,0	10	22,9	17,3	22,3	20,8
4	28,2	22,7	22,2	24,4	9	20,3	21,9	26,2	22,8
3	26,3	18,0	18,8	21,0	8	24,5	23,2	20,9	22,9
2	27,8	27,9	22,9	26,2	7	25,2	26,0	18,3	23,2
1	27,8	30,2	29,1	29,0	6	29,1	28,4	26,7	28,1
Mittelwert	26,7	24,0	23,5	24,7	Mittelwert	24,4	23,4	22,9	23,5

Tabelle 8-6: Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen. Resultate zur Querkontraktionszahl und zur einaxialen Druckfestigkeit; 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	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Dilatanzverhalten und triaxiale Druckfestigkeit (vgl. Kapitel 6.5)													
σ_3 [MPa]	$\sigma_{1,Dil}$ [MPa]	$\varepsilon_{1,Dil}$ [%]	$\varepsilon_{V,Dil}$ [%]	σ_{Dil} [MPa]	τ_{Dil} [MPa]	$\sigma_{1,max}$ [MPa]	$\varepsilon_{1,max}$ [%]	σ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]	$\sigma_{1,Rest}$ [MPa]	$\varepsilon_{1,Rest}$ [%]	Entf.-Mod. [MPa]	ψ [°]
Verformungsrate $2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/s													
2,5	33,0	1,45	-0,452	12,67	14,38	33,1	1,38	12,70	14,42	20,4	10,0	331	8,982
2,5	31,3	1,52	-0,499	12,10	13,58	31,3	1,39	12,10	13,58	20,6	10,0	284	7,712
2,5	31,9	0,81	-0,334	12,30	13,86	32,8	1,06	12,60	14,28	18,4	10,0	294	12,868
Verformungsrate $1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/s													
0,0	20,4	0,32	-0,089	6,80	9,62	24,1	0,61	8,03	11,36	3,0	3,0	2900	57,935
2,5	26,4	1,41	-0,387	10,47	11,27	26,4	1,53	10,47	11,27	19,7	10,0	145	7,054
2,5	25,7	1,53	-0,451	10,23	10,94	25,8	2,01	10,27	10,98	19,6	10,0	134	6,379
2,5	25,9	1,58	-0,458	10,30	11,03	25,9	1,77	10,30	11,03	19,6	10,0	122	6,379
Verformungsrate $1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/s													
0,0	14,9	0,37	-0,130	4,97	7,02	16,7	0,60	5,57	7,87	2,2	3,0	1086	48,289
1,0	20,9	0,98	-0,419	7,63	9,38	21,1	1,02	7,70	9,48	11,5	10,0	220	13,516
2,5	22,6	1,96	-0,574	9,20	9,48	22,7	2,00	9,23	9,52	19,0	10,0	77	2,468
3,5						27,2	3,03	11,40	11,17	25,0	10,0	11,40	
5,0						29,3	3,88	13,10	11,46	27,3	10,0	13,10	*
7,0						37,0	3,03	17,00	14,14	35,0	10,0	17,00	
10,0						43,2	6,69	21,07	15,65	41,0	10,0	21,07	
Verformungsrate $1,0 \cdot 10^{-7}$ 1/s													
0,0	11,7	0,31	-0,097	3,90	5,52	13,7	0,61	4,57	6,46	5,9	5,0	424	47,016
0,0	12,7	0,26	-0,074	4,23	5,99	16,8	0,62	5,60	7,92	4,9	5,0	643	47,696
2,5	22,5	0,90	-0,335	9,17	9,43	22,7	1,07	9,23	9,52	17,7	10,0	251	6,965
2,5	24,7	1,15	-0,343	9,90	10,47	24,8	1,02	9,93	10,51	18,5	10,0	280	6,943
Einaxiale Zugfestigkeit (vgl. Kapitel 6.6)													
2,04 MPa [N/mm ²] Abbindezeit 56 Tage, Lagerungstemperatur 40 °C													
3,03 MPa [N/mm ²] Abbindezeit 90 Tage, Lagerungstemperatur 40 °C													
Kriechverhalten (vgl. Kapitel 6.7)													
Nach 196 Tagen (Abbindezeit 252 Tage)													
Nach 420 Tagen (Abbindezeit 610 Tage)													
Kriechmaß [mm/m] (Kriechspannung [MPa])	3,5 (9,0)		4,7 (11,8)		6,6 (13,4)		1,8 (9,9)		2,2 (10,9)				

Tabelle 8-7: Zusammenstellung der Materialparameter. Physikalische Untersuchungen. Dilatanzverhalten und triaxiale Druckfestigkeit, einaxiale Zugfestigkeit und Kriechverhalten. Axialspannung im Volumenminimum ($\sigma_{1,Dil}$), Axialverformung ($\varepsilon_{1,Dil}$), Volumenverformung ($\varepsilon_{V,Dil}$); bei mittlerer Spannung (σ_{Dil}) aufnehmbare Oktaederspannung (τ_{Dil}). Axialspannung ($\sigma_{1,max}$) und -verformung ($\varepsilon_{1,max}$) im Bruchzustand; bei mittlerer Spannung (σ_{max}) aufnehmbare Oktaederspannung (τ_{max}); $\sigma_{1,Rest}$: Restfestigkeit bei $\varepsilon_{1,Rest}$ (Axialverformung im Restfestigkeitsbereich); Entf.-Mod.: Entfestigungsmodul; ψ : Dilatanzwinkel

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	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Adiabatische Temperaturentwicklung beim Abbinden (vgl. Kapitel 7.1)														
Versuchsdauer [Tage]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Temperaturerhöhung in Abhängigkeit zur Starttemperatur (28,4 °C)														
Temperaturdifferenz [K]	4,2	11,7	27,9	38,9	43,4	46,1	47,7	n.b.						
Temperaturerhöhung in Abhängigkeit zur Starttemperatur (20,0 °C)														
Temperaturdifferenz [K]	1,6	5,6	10,8	19,3	33,0	37,2	38,9	40,1	40,6	40,8	40,9	41,0	41,1	41,1
Spezifische Wärmekapazität (vgl. Kapitel 7.2)														
Für den Temperaturintervall von 20 bis 90 °C beträgt der Mittelwert (c _p) 0,93 J/(g·K).														
Wärmeleitfähigkeit (vgl. Kapitel 7.3) 1,14 W/(m·K).														
Wärmeausdehnungskoeffizient (vgl. Kapitel 7.4)														
2stündige Aufheizphase von 40 °C auf 60 °C														
4,8 · 10 ⁻⁵ 1/K														
2stündige Abkühlung von 60 °C auf 0 °C														
bleibende Dehnung bezogen auf 40 °C														
3,2 · 10 ⁻⁵ 1/K														
0,367 mm/m [‰]														
Temperaturstabilität (vgl. Kapitel 7.5)														
Temperaturerhöhung auf 105 °C														
Masseverlust 0,02 %, 3,6 %														
Temperaturerhöhung auf 800 °C														
Masseverlust 11,3 ± 0,2 %														
Gesamtwasseranteil des Betons														
ca. 13,4 Massen-%														

Tabelle 8-9: Zusammenstellung der Materialparameter. Thermodynamische Untersuchungen. Adiabatische Temperaturentwicklung beim Abbinden, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, Temperaturstabilität; n.b.: nicht bestimmt.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

9 Materialkennwerte für die Sicherheitsnachweisführung

Für die Berechnungen zur Sicherheitsnachweisführung benötigt man Zahlenwerte zur Beschreibung der in Kapitel 6 und 7 aufgeführten physikalischen und thermodynamischen Materialeigenschaften. Die Materialkennwerte gehen teilweise 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.

9.1 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 9.1-1 aufgeführten Mittelwerte, wobei eine sinnvolle Anzahl signifikanter Stellen berücksichtigt wurde. Der Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht dem Mittelwert der Messwerte bei Aufheizung und Abkühlung der Probekörper.

Festmaterialdichte	isobare spezifische Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeausdehnungskoeffizient
[kg/m ³]	[J/(g·K)]	[W/(m·K)]	[1/K]
1.980	0,93	1,14	4,0 · 10 ⁻⁵

Tabelle 9.1-1: Für die numerischen Berechnungen als Eingangsdaten verwendete Materialkennwerte der Festmaterialdichte, isobaren spezifischen Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und des Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Für die Querkontraktionszahl wurde als Referenzwert der 28-Tage-Wert gewählt (vgl. Tabelle 6.3-1). In den numerischen Berechnungen wird der Einfluss des Abbindeprozesses auf die Querkontraktionszahl vernachlässigt. Damit gilt

$$\mu = 0,33 \text{ [-]}$$

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

9.2 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 7.1) bestimmen. Grundlage ist das im Folgenden beschriebene Hydratationsmodell gemäß /24/.

9.2.1 Hydratationsgradiententwicklung

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:

$$Q(t) = C \cdot Q_{ce}(t) \quad (9.1)$$

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:

$$Q_c^{max} = C \cdot Q_{ce}^{max} \quad (9.2)$$

Unter adiabatischen Verhältnissen führt die Hydratationswärmeentwicklung im Beton zu der Temperaturerhöhung ΔT_a (mit: ρ = Salzbetondichte, c_p = isobare spez. Wärmekapazität):

$$\Delta T_a(t) = \frac{C \cdot Q_{ce}(t)}{c_p \cdot \rho} \quad (9.3)$$

Die zur vollständigen Hydratation des Betons gehörende Temperaturerhöhung max. ΔT_a lässt sich analog ausdrücken:

$$\Delta T_a^{max} = \frac{C \cdot Q_{ce}^{max}}{c_p \cdot \rho} \quad (9.4)$$

Eine wesentliche innere Zustandsvariable des Hydratationsmodells ist der Hydratationsgrad α , der als das Verhältnis der Masse der hydratisierten Bestandteile zur Ausgangsmasse der hydratisierbaren Bestandteile definiert wird.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Normiert man die bis zu einem bestimmten wirksamen Alter (t_e) eingetretene Hydratationswärme $Q_{ce}(t_e)$ auf den theoretischen Endwert Q_{ce}^{max} , so ergibt sich der Hydratationsgrad nach Gl. (9.5):

$$\alpha(t_e) = \frac{Q_{ce}(t_e)}{Q_{ce}^{max}} = \frac{Q_c(t_e)}{Q_c^{max}} = \frac{\Delta T_a(t_e)}{\Delta T_a^{max}} \quad (9.5)$$

Das Betonalter t des adiabatischen Prozesses wird dabei mit Hilfe der Reifefunktion von Arrhenius/Freiesleben /24/ durch Integration der Reaktionsgeschwindigkeit auf das wirksame Alter t_e transformiert:

$$t_e = \int_0^t e^{\frac{E_A}{R} \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{T} \right]} dt \quad (9.6)$$

mit

E_A Aktivierungsenergie des Zementes:

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

$\approx 33,5 + 1,47 \cdot (293-T)$ [kJ/mol] für $T < 293$ K /24/

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

T Betontemperatur [K]

Zur Beschreibung der nichtlinearen Entwicklung des Hydratationsgrades α als Funktion des wirksamen Betonalters t_e wird nachstehender Ansatz gewählt /24/:

$$\alpha(t_e) = e^{-\left(\ln \left(1 + \frac{t_e}{t_1} \right) \right)^b} \quad (9.7)$$

Die betonspezifischen Faktoren t_1 und b ergaben sich nach den Versuchen zur adiabatischen Temperaturentwicklung zu $t_1 = 3,287$ [d] und $b = -1,3425$. Hieraus berechnet sich eine fiktive adiabatische Temperaturerhöhung von 58,7 K (ΔT_a^{max}) nach unendlich langer Zeit. Für die numerischen Berechnungen ist es erforderlich Q_{ce}^{max} zu bestimmen, jedoch nicht auf die Gesamtmasse der Phasenteile des Bindemittelsystems (Zement, Steinkohlenflugasche) bezogen, sondern ausschließlich auf die Zementmenge C von 328 kg/m³. Nach Gl. (9.4) wurde ein Q_{ce}^{max} von $3,295 \cdot 10^5$ J/kg ermittelt. Da als Basis für die Parameteridentifikation die adiabatischen Temperaturversuche dienen, ist das latent hydraulische Verhalten, d.h. die Wärmeentwicklung in Folge der Abbindereaktionen der Steinkohlenflugasche mit erfasst (vgl. Abbildung 9.2-1).

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	DBE
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

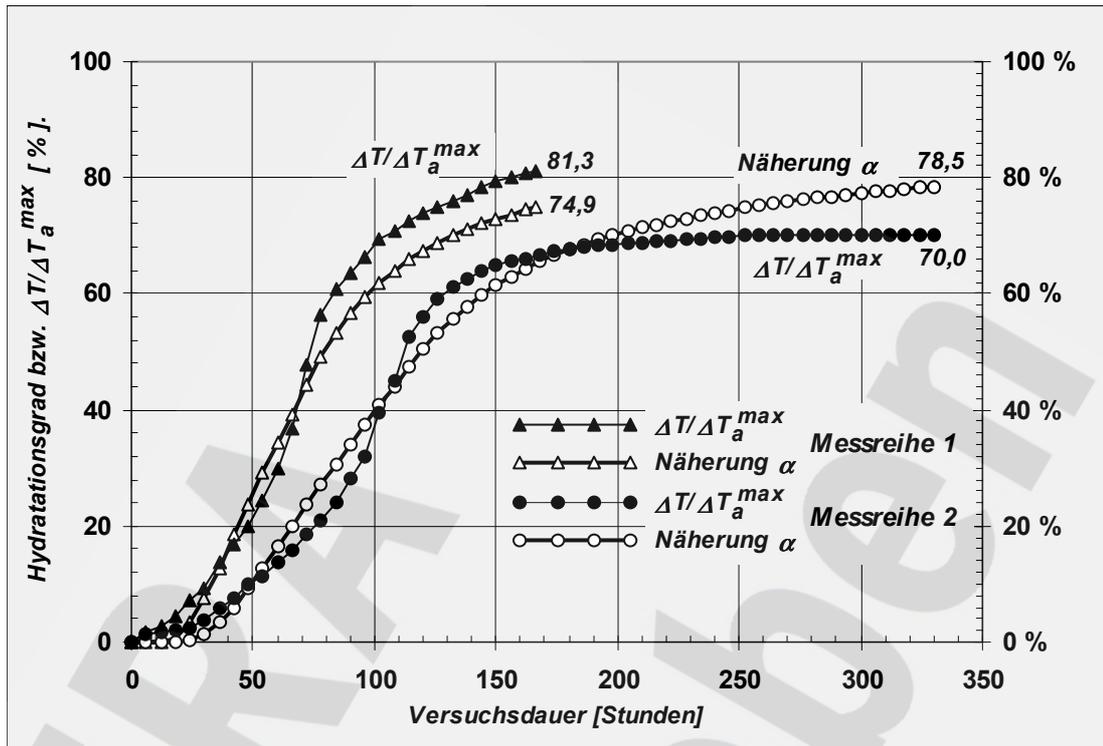


Abbildung 9.2-1: Vergleich des Hydrationsgrades aus adiabatischen Messungen mit der funktionalen Anpassung (Näherung α).

9.2.2 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 9.2.1 erfasst.

Zugfestigkeitsentwicklung

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

$$f_{ct}(\alpha) = \bar{a} \cdot \alpha(t_e) + \bar{b} \quad (9.8)$$

Die Parameter \bar{a} und \bar{b} werden aus zentrischen Zugversuchen ermittelt. Der Gültigkeitsbereich für α ist gemäß /24/ zwischen 0,17 und 1,00 abgesteckt. Die untere Schranke α_0 kennzeichnet das Ende der Ruhephase der Erhärtung. Ab diesem Zeitpunkt werden erste Festkörpereigenschaften wirksam. Der Abszissenwert α_0 , als Mindesthydrationsgrad bezeichnet, ist betonspezifisch. Durch Umformung der Gleichung (9.8) mit Hilfe des Nulldurchgangs α_0 las-

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 81

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

$$\hat{f}_{ct}(\alpha) = \frac{f_{ct}(\alpha)}{f_{cte}} = \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \quad (9.9)$$

Als frei variierbare Parameter in Gl. (9.9) verbleiben f_{cte} und α_0 . Die Endzugfestigkeit f_{cte} für $\alpha = 1$ ist ein rein theoretischer Wert und wird durch Extrapolation der Versuchswerte ermittelt.

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 /24/ zurückgegriffen, wobei c ein betonspezifischer Parameter ist:

$$f_{ct} = c \cdot f_{c,cube}^{2/3} \quad (9.10)$$

Ersetzt man in Gl. (9.10) die Zugfestigkeit f_{ct} durch die Beziehung $f_{ct}(\alpha)$ aus Gl. (9.9) und die Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ durch die Zylinderdruckfestigkeit f_c , so erhält man folgenden Zusammenhang:

$$f_c(\alpha) = 0,85 \left[f_{cte} \cdot \frac{(\alpha - \alpha_0)/(1 - \alpha_0)}{c} \right]^{3/2} \quad (9.11)$$

Für den Hydratationsgrad $\alpha = 1$ gilt:

$$f_{ce} = 0,85 \left[\frac{f_{cte}}{c} \right]^{3/2} \quad (9.12)$$

Aus den Gl. (9.11) und (9.12) ergibt sich die Funktion für die bezogene Zylinderdruckfestigkeit:

$$\hat{f}_c(\alpha) = \frac{f_c(\alpha)}{f_{ce}} = \left[\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right]^{3/2} \quad (9.13)$$

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Im Gegensatz zu der Beziehung für die Druckfestigkeit nach Gl. (9.11) ist die Funktion in Gl. (9.13) 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 Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit sind über den Mindesthydratationsgrad α_0 miteinander verknüpft.

Elastizitätsmodul

Aus dehngeregelten Zugversuchen zu verschiedenen Altersstufen wurde eine hydratationsgradabhängige Funktion für den Zugelastizitätsmodul abgeleitet /24/. Es wird vorausgesetzt, dass Zug- und Druckelastizitätsmodul sich zeitlich vergleichbar entwickeln und Unterschiede zwischen Zug- und Druckelastizitätsmodul für praktische Zwecke vernachlässigbar sind. Damit gilt

$$\hat{E}_{ct}(\alpha) = \frac{E_{ct}(\alpha)}{E_{cte}} = \left[\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right]^a \quad (9.14)$$

Der Exponent für die Potenzfunktion wurde in /24/ zu $a \cong 2/3$ bestimmt. Auch Gl. (9.14) enthält keine dimensionsgebundenen Größen. Der einzige Freiwert ist der theoretische Endwert für den E-Modul E_{cte} . Über den Mindesthydratationsgrad α_0 ist die Entwicklung des E-Moduls mit der Entwicklung von Zug- und Druckfestigkeit gekoppelt.

9.3 Identifikation der hydratationsgradabhängigen Werkstoffeigenschaften aus Versuchen

Auf Grundlage der Versuche zum statischen E-Modul (Kapitel 6.2), zur einaxialen Druckfestigkeit (Kapitel 6.4) und zur einaxialen Zugfestigkeit (Kapitel 6.6) wurden die Parameter wie folgt identifiziert

- Mindesthydratationsgrad: $\alpha_0 = 0,263$ [-]
- Elastizitätsmodul bei $\alpha = 1$: $E_{cte} = 15.350$ [MPa]
- Zugfestigkeit bei $\alpha = 1$: $f_{cte} = 2,95$ [MPa]
- Druckfestigkeit bei $\alpha = 1$: $f_{ce} = 46,8$ [MPa]

Durch die in Gl. (9.12) gegebene Beziehung lässt sich der betonspezifische Parameter $c = 0,2037$ ermitteln, der formal die Einheit [MPa^{1/3}] trägt. Der Exponent a nach Gl. (9.14) wurde analog zu /24/ 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	0054	00



Die Ergebnisse der Identifikation und die Mittelwerte der Versuchsreihen sind in den Abbildungen 9.3-1 bis 9.3-3 dargestellt. Einige der in den Tabellen aufgeführten Versuchsreihen wurden bei der Identifikation nicht berücksichtigt. Sie sind zur Kontrolle ebenfalls in die Abbildungen eingetragen. Beim Vergleich der Abbildungen 9.3-1 bis 9.3-3 mit den in Kapitel 6.2, 6.4 und 6.6 beschriebenen Datenwerten ist zu beachten, dass in den o.g. Abbildungen die Versuchsdaten gemäß Gl. (9.6) entsprechend ihren Lagerungsbedingungen, die in den Tabellen 6.2-1, 6.4-1 und 6.6-1 (vgl. Tabelle 8-3, 8-4, 8-5) angegeben sind, vom realen in das wirk-same Betonalter transformiert wurden.

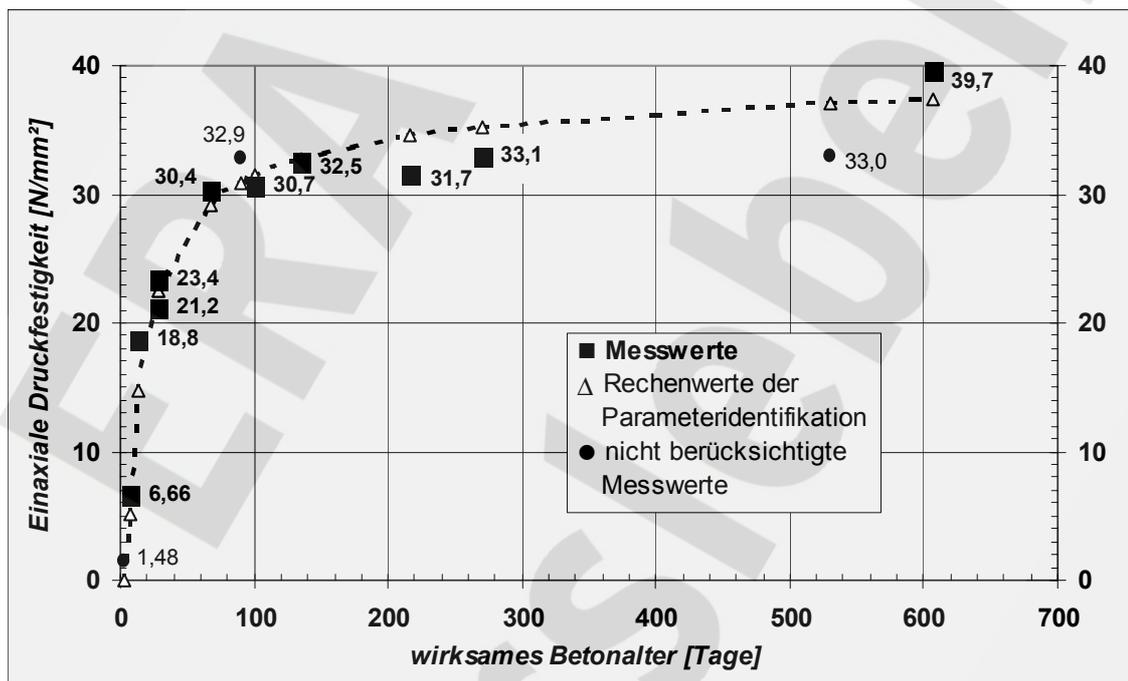


Abbildung 9.3-1: Messwerte der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit und Rechenwerte der Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter t_e .

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00



Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

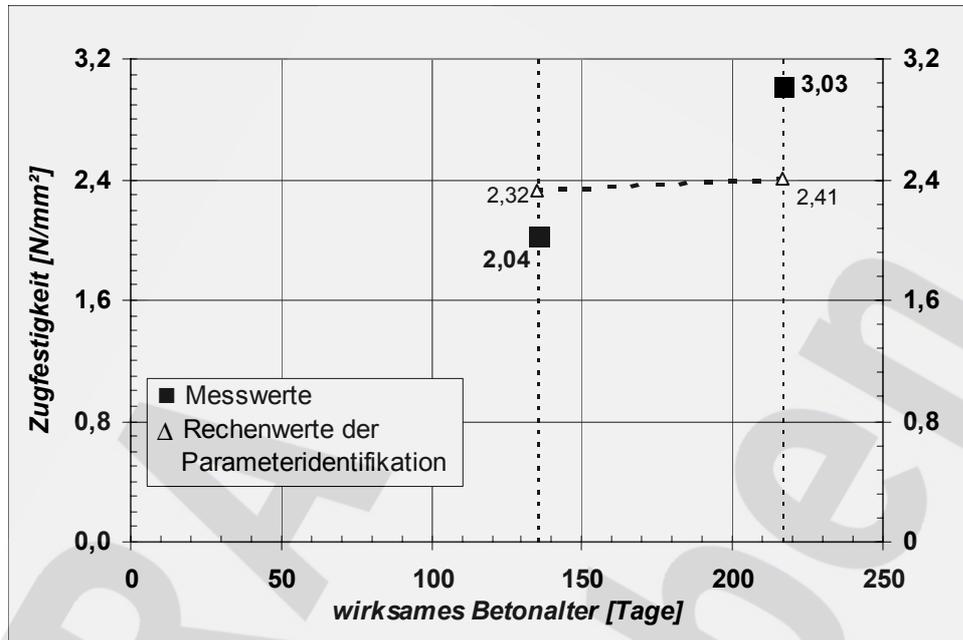


Abbildung 9.3-2: Messwerte der einaxialen Zugfestigkeit und Rechenwerte der Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter t_e .

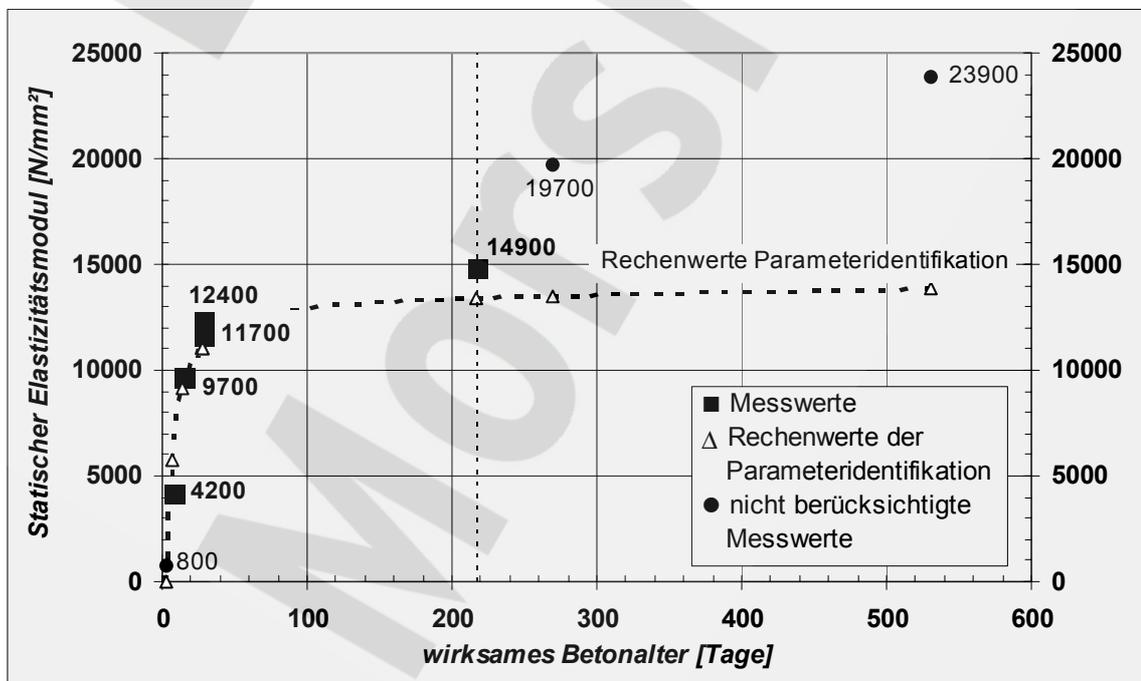


Abbildung 9.3-3: Statische Elastizitätsmoduli und Rechenwerte der Parameteridentifikation in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter t_e .

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

10 Verwendete Unterlagen

- /1/ DIN EN 197, Teil 1
Zement. Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Deutsche Fassung EN 197: 2000. Februar 2001, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 17 Seiten.
- /2/ DIN 1164
Zement mit besonderen Eigenschaften. Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis. November 2000, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 7 Seiten.
- /3/ DIN EN 450
Flugasche für Beton. Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung. Deutsche Fassung EN 450: 1994. Januar 1995, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 6 Seiten.
- /4/ Bergamt Staßfurt
Allgemeine Zulassung „Salzbeton - Dickstoffmischung 2“, „Salzbeton - Dickstoffmischung 3“ gemäß § 4 GesBergV. Staßfurt, 11.09.2000, 9M/WMB/DB/EV/0007/01.
- /5/ DIN 1048, Teil 1
Prüfverfahren für Beton. Frischbeton. Juni 1991, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 5 Seiten.
- /6/ DIN 50014
Klimate und ihre technische Anwendung. Normalklimate. Juli 1985, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2 Seiten.
- /7/ DIN 1045. Teil 2
Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Beton – Festlegung, Eigenschaften Herstellung und Konformität. Juli 2001, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 48 Seiten.
- /8/ DIN EN 206, Teil 1
Beton. Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1: 2000. Juli 2001, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 77 Seiten.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 86

- /9/ DAFStB
 Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Ergänzung zu DIN 1045: 1988-7.
- /10/ DBV e.V.
 DBV-Merkblatt Vergussmörtel. Merkblatt für die Anwendung von werkgemischtem Vergussmörtel. Fassung September 1990, redaktionell überarbeitet 1996. Deutscher Beton-Verein e.V.
- /11/ DIN 38404, Teil 5
 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C). Bestimmung des pH-Wertes (C5). Januar 1984, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 7 Seiten.
- /12/ DIN EN ISO 14911
 Wasserbeschaffenheit. Bestimmung der gelösten Kationen Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} und Ba^{2+} mittels Ionenchromatographie. Verfahren für Wasser und Abwasser. Dezember 1999, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 27 Seiten.
- /13/ DIN EN ISO 10304, Teil 1
 Bestimmung der gelösten Anionen, Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie. Verfahren für gering belastete Wasser. April 1995, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 21 Seiten.
- /14/ DIN 1048, Teil 5
 Prüfverfahren für Beton. Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Juni 1991, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 8 Seiten.
- /15/ DIN 18137, Teil 2
 Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte. Bestimmung der Scherfestigkeit. Triaxialversuch. Dezember 1990, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 20 Seiten.
- /16/ DGEG
 Technische Prüfvorschrift Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB), Teil C 2, Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben. 1986, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.
- /17/ DAFStb
 Prüfung von Beton. Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048 erarbeitet vom Arbeitsausschuss DIN 1048. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAFStb), Heft 422, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1991.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAAANN	AANNNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
 Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 87

- /18/ DIN 66133
 Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion. Juni 1993, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 3 Seiten.
- /19/ 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.
- /20/ DIN 51007
 Thermische Analyse (TA). Differenzthermoanalyse (DTA). Grundlagen. Juni 1994, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 11 Seiten.
- /21/ DIN 51006
 Thermische Analyse (TA). Thermogravimetrie (TG). Grundlagen. Oktober 1990, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 4 Seiten.
- /22/ DIN 52612, Teil 1
 Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Durchführung und Auswertung. September 1979, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 6 Seiten.
- /23/ DIN 51045, Teil 1
 Bestimmung der thermischen Längenänderung fester Körper. Grundlagen. September 1989, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 8 Seiten.
- /24/ 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	NNAAAANN	AANNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

11 Glossar

adiabatisch	Ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung.
Aktivierungsenergie	Mindestenergie zur Erzielung einer chemischen Reaktion.
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.
Festbeton	Abgebundener Beton, der eine bestimmte Festigkeit entwickelt hat.
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 noch im verarbeitbaren Zustand ist.
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.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 89

- Normalbeton** Baustoff, erzeugt durch Mischen von Zement, Zuschlag und Wasser, mit oder ohne Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen, mit einer Rohdichte (ofentrocken) über 2.000 kg/m³, höchstens aber 2.600 kg/m³.
- Querkontraktion** Verformung normal zur Längsdeformation bzw. -dehnung bei elastisch festen Körpern. Die Querkontraktionszahl μ ist das negative Verhältnis der Quer- zur Längsverformung.
- Salzbeton** Baustoff mit Salzzuschlag, der durch Abbinden eines Bindemittelsystems entsteht. Als Grundbestandteile können neben Bruchstücken von Evaporitgesteinen, insbesondere Steinsalz, Zemente und Steinkohlenflugaschen dienen sowie Wasser oder Salzlösungen als Anmachflüssigkeit.
- Rheologie** Wissenschaft, die sich mit dem Verformungsverhalten (Fließeigenschaften) von Fluiden unter der Einwirkung äußerer Kräfte befasst.
- 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.
- Schergefälle** Geschwindigkeitsgefälle innerhalb einer Probe, beispielsweise einer Flüssigkeit oder Suspension [1/s, s⁻¹].
- Schubspannung** Scherwiderstand, den eine Substanz einer Bewegung entgegensetzt. Sie bezieht sich auf die bewegte Fläche und hat daher die Einheit des Drucks [Pa].
- Sedimentation** Absinken von Feststoffteilchen in einer Flüssigkeit unter der Wirkung der Schwerkraft.
- 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 (c_v) und konstantem Druck (c_p) unterschieden.

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	N N A A A N N	A A N N N A	A A N N	X A A X X	A A	N N N N	N N	
9M	22343021		AJ			GH	BY	0054	00	

Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen –
Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2

Blatt 90

- 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.
- Suspension** 2phasige Fluide. Verteilung von festen Partikeln in einer Flüssigkeit.
- universelle Gaskonstante** physikalische Konstante: 8,314 [J/(mol · K)].
- Verdichten** Verkleinern der Hohlräume oder Verdrängen der Luft in einer Suspension durch manuelles oder maschinelles Rütteln, Stampfen oder Rühren.
- Versatz** Verfüllgut für die Verfüllung von untertägigen Hohlräumen.
- Wärmeausdehnungskoeffizient** Maß der Volumen- bzw. Längenänderung eines Körpers in Folge Temperaturerhöhung bzw. -erniedrigung [1/K, K⁻¹]. Im Allgemeinen ist der mittlere Längenausdehnungskoeffizient α für ein Temperaturintervall angegeben ($\alpha = \Delta l / (l_0 \cdot \Delta T)$, l_0 : Länge bei Bezugstemperatur, ΔT : Temperaturänderung, Δl : Längenänderung infolge ΔT).
- 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-mechanisch** Beanspruchung, die nicht aus einem Lasteintrag sondern aus der Behinderung von Deformationen (Temperaturdehnungen) entsteht.