

Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke im Steinsalz und deren flüssigkeitsgestützte Abdichtung

Phase I (Konzeption von Funktionsnachweis und Abdichtungsmethoden, Testung und Auswahl von Behandlungsfluiden)

Förderkennzeichen: 02E11253

Jonas Weber, TU Clausthal – Institut für Bergbau

Dr.-Ing. Thomas Wilsnack, IBeWa

Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld, TU Clausthal – Institut für Bergbau

Schlussbericht

Der vorliegende Schlussbericht entstand unter Mitarbeit von:

Wilhelm Bollingerfehr, DBETEC

Dr. rer. nat. Friedemann Grafe, IBeWa

Antje Hesse, K-UTEC

Dittmar Lack, K-UTEC

Dr.-Ing. Nina Müller-Hoeppe, DBETEC

Dr.-Ing Thomas Wilsnack, IBeWa

Beteiligte Institutionen:

Technische Universität Clausthal -
Institut für Bergbau
Abteilung für Maschinelle
Betriebsmittel und Verfahren im
Bergbau unter Tage



DBE Technology GmbH



IBeWa – Ingenieurpartnerschaft für
Bergbau, Wasser- und
Deponietechnik



K-UTEC Salt Technologies



Durchgeführt unter der Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)



Und betreut vom:



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS:.....	11
ZUSAMMENFASSUNG.....	13
ABSTRACT	15
ZIELSTELLUNG DES VORHABENS	17
TEILBERICHT A	19
LITERATURRECHERCHE – VERFÜGBARE INJEKTIONSMATERIALIEN	19
1 EINLEITUNG	20
1.1 AUSGEWÄHLTE GRUNDLAGEN – INJEKTIONEN, RISSE	20
1.2 AUSGANGSBEDINGUNGEN UND PRÄMISSEN	23
1.2.1 <i>Prinzipieller Aufbau von Verschlussbauwerken</i>	23
1.2.2 <i>Standort / Gebirge – Prämissen</i>	25
1.3 KONSTRUKTIVE VORGABEN FÜR STRECKENVERSCHLÜSSE	27
1.4 KONTAKTFUGENBILDUNG.....	29
1.5 ANFORDERUNGEN INJEKTIONSMATERIALIEN	32
2 BESCHREIBUNG DER GESTEINE.....	42
2.1 LÖSUNGSVERHALTEN DER GESTEINE	42
2.2 CARNALLIT	43
2.3 KIESERIT	45
2.4 SYLVIN	46
2.5 ANHYDRIT	46
2.6 HALIT	47
2.7 ÜBERSICHT ÜBER DIE LÖSLICHKEIT DER SALZE	47
3 INJEKTIONSMATERIALIEN	49
3.1 PARTIKELGESTÜTZTE INJEKTIONSMATERIALIEN	49
3.1.1 <i>Mörtel</i>	49
3.1.2 <i>Stöckerbeton</i>	49
3.1.3 <i>Zementpasten</i>	54
3.1.4 <i>Zementsuspensionen</i>	54
3.1.5 <i>MgO-Mörtel</i>	54
3.1.6 <i>Tonsuspensionen</i>	55
3.1.7 <i>Tonzementsuspensionen</i>	57
3.1.8 <i>Feinstmagnesiabinder</i>	58
3.1.8.1 <i>Magnesiumoxid-Feinstbindemittel</i>	58
3.1.8.2 <i>Brucit (Magnesiumhydroxid)</i>	62
3.1.9 <i>Feinstzement</i>	63
3.1.10 <i>Zweikomponenten Bitumen (2K-Bitumen)</i>	70
3.2 PARTIKELFREIE INJEKTIONSMATERIALIEN	75
3.2.1 <i>Wasserglas</i>	75
3.2.2 <i>Kunstharze</i>	82
3.2.2.1 <i>Denepox 40</i>	83
3.3 SONSTIGE INJEKTIONSMITTEL.....	86
3.3.1 <i>Mineralsynthese</i>	86
3.3.2 <i>Salzhydratschmelzen</i>	88
4 VERTRÄGLICHKEITEN	90

4.1 BAUSTOFF-GEBIRGE	90
4.1.1 MgO-Baustoffe	91
4.1.2 Salzbeton	92
4.2 INJEKTIONSMATERIALIEN-BAUSTOFFE	93
4.2.1 MgO-Binder-Baustoffe	93
4.2.2 Feinstzement-Baustoffe	94
4.2.3 Zweikomponenten Bitumen-Baustoffe	94
4.2.4 Kunstharze-Baustoffe	94
4.2.5 Wasserglas-Baustoffe	94
5 ANWENDUNGSGRENZEN	95
5.1 UNTERE ANWENDUNGSGRENZEN	95
5.2 OBERE ANWENDUNGSGRENZEN	95
6 INJEKTIONSTECHNIK	97
6.1 INJEKTIONSPUMPEN	97
6.2 INJEKTIONSVERFAHREN	99
TEILBERICHT B	110
LABORATIVE CHARAKTERISIERUNG	110
1 VORSTELLUNG DER INJEKTIONSMATERIALIEN	111
1.1 FEINSTMAGNESIABINDER	112
1.2 FEINSTZEMENT	112
1.3 2K-BITUMEN	113
1.4 WASSERGLAS	115
1.5 KUNSTHARZ – DENEPOX 40	115
2 MESSMETHODEN UND AUFBAU DER MESSUNGEN	116
2.1 VISKOSITÄTSMESSUNGEN	116
2.2 RHEOLOGIE – MARSHTRICHTER	118
2.3 DICHTEMESSUNGEN	119
2.4 GRENZFLÄCHENSPANNUNG	120
2.5 KONTAKTWINKEL	121
3 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN	122
3.1 VISKOSITÄTSBESTIMMUNG	122
3.2 RHEOLOGIE – MARSHTRICHTER	123
3.3 DICHTEMESSUNG	123
3.4 GRENZFLÄCHENSPANNUNG	123
3.5 KONTAKTWINKEL	124
4 VORSTELLUNG DER ERGEBNISSE UND DISKUSSION	126
4.1 VISKOSITÄTSBESTIMMUNG	126
4.1.1 IM 4+	126
4.1.2 Ultrafin 12	127
4.1.3 2K-Bitumen	129
4.1.4 Wasserglas	130
4.1.5 Denepox 40	131
<u>Zusammenfassung</u>	132
4.2 RHEOLOGIE – MARSHTRICHTER	134
4.3 DICHTEMESSUNG	135
4.4 GRENZFLÄCHENSPANNUNG	135
4.5 KONTAKTWINKEL	137
5 INJEKTIONSVERSUCHE SANDSTEIN	140
5.1 MOTIVATION/ ZIELSTELLUNG	140

5.2 AUFBAU DES VERSUCHES	140
5.2.1 Sandstein	140
5.2.2 Injektionsmaterialien	141
5.2.3 Injektionstechnik	141
5.3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	143
5.3.1 Herstellung der Injektionsmaterialien	143
5.3.2 Ablauf der Injektion	143
5.3.3 Auswertung	143
5.4 VORSTELLUNG DER ERGEBNISSE	145
5.4.1 Injiziertes Volumen	145
5.4.2 Optische Auswertung	146
5.4.3 Hg-Porosimetrie	146
5.5 INTERPRETATION	148
6 PROBENKÖRPER SALZ	150
6.1 HERSTELLUNG DER PROBENKÖRPER	150
6.2 SPALTZUGVERSUCHE	152
7 BEWERTUNG DER INJEKTIONSMATERIALIEN	159
7.1 GEWICHTUNG DER ANFORDERUNGEN UND DARSTELLUNG DES BEWERTUNGSSYSTEMS	159
7.2 BEWERTUNG	173
TEILBERICHT C	204
STRÖMUNGSTECHNISCHER FUNKTIONSNACHWEIS	204
1 AUFGABENSTELLUNG	205
2 ERLÄUTERUNGEN ZUM STRÖMUNGSPROZESS BEI IN-SITU-BAUWERKSTESTS	208
2.1 PROZESSE UND EINFLÜSSE	208
2.2 INTEGRALE PERMEABILITÄT DES BAUWERKES	210
2.3 ERMITTLUNG DER INTEGRALEN PERMEABILITÄT VON VERSCHLUSSBAUWERKEN	211
3 TESTUNG BAUWERK	214
3.1 GRUNDKONZEPT	214
3.2 INSTALLATIONSKONZEPT	216
3.2.1 Prüf- und Kontrollkammern	217
3.2.2 Bohrungen und Testinstallation	220
3.2.3 Datenerfassung und Übertragung	221
3.3 TESTDURCHFÜHRUNG	221
3.3.1 Grundprinzip	221
3.3.2 Pneumatische Tests (Tests mit Gas)	222
3.4 AUSWERTUNGSMETHODIK DER STRÖMUNGSTECHNISCHEN IN-SITU-BAUWERKSTESTS	222
3.5 BEISPIELHAFTE TESTKONFIGURATION UND AUSWERTUNG	224
4 VERGÜTUNG	229
4.1 STRÖMUNGSTECHNISCHE ASPEKTE	229
4.2 VERGÜTUNGS-/ INJEKTIONSREGIME	232
ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	241
5 VERZEICHNISSE	243
5.1 VARIABLEN	243
5.2 INDIZES	243
5.3 ABKÜRZUNGEN	243
5.4 GLOSSAR	243
LITERATURANGABEN	246

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Links ist eine idealisierte Darstellung der flächenmäßigen Erstreckung eines Risses dargestellt. Rechts erfolgt die grafische Darstellung der Risslänge und Spaltöffnungsweite eines idealisierten Risses.....	22
Abb. 2: Filterkuchenbildung beim Injizieren von Klüften/Rissen	23
Abb. 3: Schwindmaße des Salzbetons M2 in Abhängigkeit der Abbindezeit der Prüfkörper. Die Proben Klima 20/40 wurden bei 20°C und 40 % relative Luftfeuchtigkeit gelagert und die Proben Klima 20/65 bei 20° C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit.....	30
Abb. 4: Anwendungsgrenzen verschiedener Injektionsmaterialien im Boden	33
Abb. 5: Das System Na-K-MgSO ₄ -Cl-H ₂ O bei 25° und 1 bar. a) stabile Gleichgewichte, b) metastabile Gleichgewichte.....	44
Abb. 6: Sättigungsfeuchte von Carnallit.....	45
Abb. 7: Verarbeitungsdauer von Stöckerbeton in Abhängigkeit von der Temperatur. Die 1 Kurve ist die minimale Verarbeitungsdauer. Die 2 Kurve ist die maximale Verarbeitungsdauer	52
Abb. 8: a) Zweischichttonmineral. b) Dreischichttonmineral	55
Abb. 9: Viskosität von Tonsuspensionen in Abhängigkeit des Tonanteils der Suspension.....	57
Abb. 10: Korngrößenverteilung des Feinstbindemittels MIKRODUR.....	63
Abb. 11: Zementarten und Zusammensetzung nach DIN EN 197-1:2000 1) Die Werte (in Massen %) der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile	64
Abb. 12: Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften von Zementsuspension	68
Abb. 13: Viskosität des 2K-Bitumens in Abhängigkeit von der Zeit	72
Abb. 14: Ergebnisse des Versuchs zum Verpressen einer Betonierfuge zwischen zwei MgO-Beton Schichten mit Zweikomponenten Bitumen	73
Abb. 15: Abgabe von Wasser durch die Silanolgruppen nach der Gelierung des Wasserglases.	77
Abb. 16: Schematische Darstellung der Synärese sowie die mit der Abgabe des Wassers einhergehende Volumenverringerng des Wasserglases.....	77
Abb. 17: In Halit fixierte Lösung, die vom Erhärtungsprozess des Silicatgels herrührt.....	78
Abb. 18: Modell der Ausbreitung von Wasserglas und CaCl ₂ im Porenraum und Gelbildungsreaktion....	79
Abb. 19: Links: Temperaturabhängige Viskosität von Wasserglas 37/40 Rechts: Gelierzeiten von Wasserglas bei 8°C nach der Mischung mit NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen80	
Abb. 20: Gipskristalle in den Porenräumen eines Sandsteins. Die Gipskristalle blockieren die Porenräume nicht komplett, aber führen zu einer Reduktion der Permeabilität	86
Abb. 21: Löslichkeiten von Baustoff und Salzgebirge im Kontakt mit aus dem jeweilig anderen Medium zutretenden Lösungen	91

Abb. 22: Löslichkeiten von Salzbeton und Salzgebirge im Kontakt mit aus dem jeweilig anderen Medium zutretenden Lösungen	93
Abb. 23: Anwendungsgrenzen der einzelnen Injektionsmaterialien. Die gestrichelten Bereiche sind vermutete Reichweiten, die sich mit der vorhandenen Literatur nicht genau nachweisen lassen.	96
Abb. 24: Bauwerksentwurf zur Errichtung von Streckenverschlüssen und zur Abdichtung der Kontaktfuge mittels Injektionen in Morsleben.....	99
Abb. 25: Streckenverschlussbauwerk mit Befahrungs- und Injektionsrohr von dem aus die Befüllung der einzelnen Injektionsringe erfolgt	101
Abb. 26: Abdichtung der Kontaktfuge zwischen Bauwerk und Gebirge mittels Bohrungen von der Stirnseite des Bauwerks mit einem Winkel zur Streckenachse	102
Abb. 27: Skizze des Injektionssystems mit der Versorgungsbohrung im Salz und den Injektionsringleitungen in der entlang der Streckenkontur des Verschlussbauwerks	104
Abb. 28: Detailskizze der Verbindung zwischen den in der Versorgungsbohrung verlaufenden Versorgungsleitungen und den Injektionsleitungen. Die Verbindungsbohrlöcher werden mit Beton verfüllt	105
Abb. 29: Aus der Literatur entnommene Anwendungsbereiche der verschiedenen Injektionsmaterialien	111
Abb. 30: Siebdurchgangslinie des Hartbitumens	114
Abb. 31: Platte-Platte Rheometer	116
Abb. 32: Links: Rheometer Haake Mars III der Firma Thermo Scientific. Rechts: Detailaufnahme der Temperier Einheit sowie des Probenbechers und des Titandrehkörpers.	118
Abb. 33: Dichtebestimmungsset YDK 01 der Firma Sartorius	119
Abb. 34: Aufbau einer Wilhelmywaage.....	120
Abb. 35: Links: Benetzte Wilhelmyplatte. Rechts: Wilhelmyplatte der Länge b und Breite a die mit der Kraft P in der ursprünglichen Lage gehalten wird.....	121
Abb. 36: Kontaktwinkelmessgerät des Typs OCA 15.....	121
Abb. 37: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit IM 4+ bei 30 und 40° C.	126
Abb. 38: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement und Beton	127
Abb. 39: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Ultrafin 12 bei 30 und 40° C. Die grüne und die violette Kurve stellen die Mittelwerte der Messungen der mit NaCl-haltiger Lösung angemischten Suspension dar.	128
Abb. 40: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit dem 2K-Bitumen bei 30 und 40° C.	129
Abb. 41: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Wasserglas 37/40 bei 30 und 40° C.....	130
Abb. 42: Anhaftungen von vergeltem Wasserglas am Drehkörper des Rheometers	130
Abb. 43: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Denepox 40 bei 30 und 40° C.	131

Abb. 44: Zusammenstellung der Mittelwerte der Viskositätsmessungen aller Injektionsmaterialien	132
Abb. 45: Zusammenstellung der Mittelwerte der Viskositätsmessungen der partikelfreien Injektionsmaterialien	133
Abb. 46: Viskosität von Wassergläsern in Abhängigkeit von der Temperatur sowie ihrem Wasseranteil (W_{WG}). Untenstehend ist die Dichteänderung von Wassergläsern mit unterschiedlichen Wasseranteilen dargestellt	133
Abb. 47: Darstellung der Oberflächenspannung der untersuchten Injektionsmaterialien bei 30 und 40° C in Abhängigkeit der Zeit nach dem Anmischen	136
Abb. 48: Häufigkeit der gemessenen Kontaktwinkel von Wasserglas bei 30 und 40° C	137
Abb. 49: Häufigkeit der gemessenen Kontaktwinkel von Ultrafin 12 bei 30 und 40° C	138
Abb. 50: Gelierzeiten von Wasserglas bei 8°C nach der Mischung mit NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen	141
Abb. 51: Links: Aufbau der Injektionstechnik. Von links nach rechts: Injektionsleitung Intec Cem N, Schraubpacker, Anschlussstück für die Pumpe mit Schieber zum Verschließen. Rechts: Handhebelkolbenpumpe HP-60ZD der Firma Desoi	142
Abb. 52: Lage sowie Entfernung der Dünnschliffe zur Injektionsleitung zur Auswertung der Injektionsversuche	144
Abb. 53: Austritte des Injektionsmaterials IM 4+ (rote Kreise) auf der Stirnseite des Sandsteins während der Injektion. Die Kantenlänge der Abbildung sind 10 cm.	145
Abb. 54: Porengrößenverteilungen der drei Messungen entlang der Injektionsleitung des mit IM 4+ injizierten Sandsteinblocks (7,5_1 / 7,5_2 /15) sowie die Kontrollmessungen der nicht injizierten Bereiche der drei Sandsteinblöcke.	147
Abb. 55: Durchströmungsversuche von Glasperlen mit einer gefärbten Flüssigkeit. Selbst bei der gleichmäßigen Anströmung der oberen Schicht kommt es lediglich zur Ausbildung eines diskreten Fließpfades.....	148
Abb. 56: Links: Halbierter Salzkern mit gesägtem Kanal. Mitte: In der Verschalung fixierte Injektionsleitung. Rechts: Halbierter Salzkern mit der im Kanal verlegten Injektionsleitung während des Gießens des Betons.....	150
Abb. 57: Anbindung der Injektionsleitung an den Kontaktbereich zwischen Beton und Salzkern	151
Abb. 58: Schematische Darstellung des Spaltzugversuchs nach DIN EN 12390-6	152
Abb. 59: Rissentwicklung im Spaltzugversuch nach Castro-Montero.....	153
Abb. 60: Links: Einaxiale Druckfestigkeit des Salzbetons M2 in Abhängigkeit des wirksamen Betonalters. Rechts: Schwinden des Salzbetons M2 in mm/m in Abhängigkeit der Abbindezeit des Betons.	153
Abb. 61: Auflichtmikroskopie des im Spaltzugversuch geschädigten Kontaktbereich zwischen Salzbeton M2 und Steinsalz.....	154
Abb. 62: Verformung und Axialdruck abgetragen gegen die Zeit beim Spaltzugversuch des Magnesiabetons MB10 nach 14 Tagen Abbindedauer	155

Abb. 63: Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung über die gesamte Messdauer des Spaltzugversuchs mit dem Magnesiabeton MB10 nach 14 Tagen Abbindedauer	155
Abb. 64: Verformung und Axialdruck abgetragen gegen die Zeit beim Spaltzugversuch des bGZ-Salzbeton nach 14 Tagen Abbindedauer	156
Abb. 65: Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung über die gesamte Messdauer des Spaltzugversuchs mit dem bGZ-Salzbeton nach 14 Tagen Abbindedauer.	156
Abb. 66: Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung über die gesamte Messdauer des Spaltzugversuchs mit dem Magnesiabeton MB10 nach 5 Tagen Abbindedauer	157
Abb. 67: Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung über die gesamte Messdauer des zweiten Spaltzugversuchs mit dem Magnesiabinder MB10.....	158
Abb. 68: Säulendiagramm der von den fünf ausgewählten Injektionsmaterialien hinsichtlich der unterschiedlichen Anforderungen erreichten Punkte.	175
Abb. 69: Schematische Darstellung Streckenverschlussbauwerk mit Details zum Kontakt Baustoff/Gebirge.....	205
Abb. 70: Aufnahmen von offenen Kontaktbereichen zwischen Baustoff/Gebirge	206
Abb. 71: Grundkonzept der Installation des Nachweiskonzeptes – Längsschnitt	217
Abb. 72: Grundkonzept der Installation des Nachweiskonzeptes – Querschnitt	217
Abb. 73: Schematische Darstellung der Rahmenkammern.....	218
Abb. 74: Beispiel der Auswertung eines Bauwerkstests	224
Abb. 75: Beispiel 3d-Modellausschnitt für die Auswertung eines Bauwerkstests über eine einseitig positionierte Druckkammer	225
Abb. 76: Vereinfachtes 2d-Modell – Beispiel der Testauswertung für das im Abschnitt 0 vorgestellte Installationskonzept.....	226
Abb. 77: Prognostizierte Druckganglinien PK, KK1 und KK2 für pneumatische Tests (Druckluft) und Permeabilitäten im KB von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$	227
Abb. 78: Prognostizierte Druckganglinien PK, KR1 und KR2 für hydraulische Tests (Salzlösung) und Permeabilitäten im KB von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$	227
Abb. 79: Porengrößenverteilung Salzbeton M2, Wesersandstein, Steinsalz, kleines Dilatometer	230
Abb. 80: Porengrößenverteilung Roter Wesersandstein. Volumenanteil in Abhängigkeit von den Porenradien.	234
Abb. 81: Porengrößenverteilung Roter Wesersandstein. Porosität in Abhängigkeit von den Porenradien	235
Abb. 82: Permeabilität in Abhängigkeit der Makroporosität, die x-Fehlerbalken kennzeichnen den Wertebereich der ermittelten Makroporosität	237
Abb. 84: Gegenüberstellung der Kapillardruckkurven für Wasser, Wasserglas, Denepox 40 und 2k-Bitumen links: in Abhängigkeit von der Fluidsättigung im Porenraum; rechts: in Abhängigkeit vom Porenradius	239

Abb. 85: Dynamische Viskosität der Injektionsmaterialien 30 Minuten nach Herstellung des jeweiligen Materials für 30°C und 40°C	239
Abb. 86: Grenzflächenspannung der Injektionsmaterialien 30 Minuten nach Herstellung des jeweiligen Materials für 30°C und 40°C	240
Abb. 87: Relative Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit ..	245

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Einsatzmöglichkeiten von Injektionsmaterialien in Lockergestein	21
Tab. 2: Einsatzmöglichkeiten von Injektionsmaterialien im Fels	21
Tab. 3: Haftzugfestigkeit (Mittelwerte (n=Anzahl der Einzelmessungen aus denen die Mittelwerte gebildet wurden)) zwischen Salzbeton der Rezeptur M2 und Steinsalz in Abhängigkeit vom Abbindealter des Salzbetons.....	31
Tab. 4: Zusammenstellung der in den Literaturstellen angeführten Anforderungen an Baustoffe und Injektionsmaterialien für den Einsatz im Salinar.	34
Tab. 5: Zusammenstellung der Anforderungen an Injektionsmaterialien für die Kontaktfugeninjektion im Salz	38
Tab. 6: Gehalte der gelösten Stoffe in IP21 Lösung (Bei 17° C) und gesättigter NaCl-Lösung (Bei 20°C) ..	42
Tab. 7: Einzelne Evaporitminerale des Carnallit.....	43
Tab. 8: Zusammensetzung an Halit, Halit und Anhydrit sowie Halit und Gips gesättigten Lösungen nach EQ3/6-Berechnungen (25°C).....	47
Tab. 9: Ausgewählte Evaporitminerale und deren Lösungsverhalten im Kontakt mit gesättigter IP21- und NaCl-Lösung	48
Tab. 10: Druck- und Zugfestigkeiten des Stöckerbetons beim Abbinden an Luft und im Wasser.....	53
Tab. 11: Festigkeiten des Stöckerbetons, ermittelt nach DIN 1048 und 1164.....	53
Tab. 12: Korngrößenverteilung des Injektionsmörtels IM4 und IM 4+ der Firma K-UTEC.....	59
Tab. 13: Korngrößenverteilung eines handelsüblichen Magnesiabinders vor und nach dem Aufmahlprozess	60
Tab. 14: Ergebnisse der Auslaufzeiten des Spaltmodellversuchs	61
Tab. 15: Druckfestigkeiten von Prismen in Anlehnung an DIN EN 196 aus dem Injektionsmaterial Ultrafin zu unterschiedlichen Zeiten nach dem Abbindevorgang und bei verschiedenen W/Z-Werten der Rezeptur	69
Tab. 16: Zusammensetzungen von Wasserglas Hart- und Weichgelen	75
Tab. 17: Viskositäten und Dichten verschiedener Wassergläser	80
Tab. 18: Festigkeiten von Denepox 40	85
Tab. 19: Permeabilitäten vor und nach den Oberflächenpackertests des Injektionsharzes Denepox 40 .	86
Tab. 20: Klassifikation der Fällungsverzögerer	88
Tab. 21: Verträglichkeit zwischen den beiden Baustoffen Magnesiabeton und Salzbeton mit den verschiedenen Injektionsmaterialien.....	94
Tab. 22: Anwendungsgrenzen ausgewählter Injektionsmaterialien.....	96
Tab. 23: Auflistung verschiedener Ein- und Zweikomponenten Injektionspumpen unterschiedlicher Hersteller mit unterschiedlichen Injektionsdrücken und Injektionsraten	98

Tab. 24: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Vergütungsmethoden.....	106
Tab. 25: Zusammenfassung der Injektionsverfahren zur Kontaktfugeninjektion	109
Tab. 26: Informationen zur Zusammensetzung und zum Mischungsverhältnis von IM 4+	112
Tab. 27: Rheologische Daten von Ultrafin 12 bei unterschiedlichen Suspensionsdichten. Die dargestellten Werte beziehen sich auf Suspensionen die mit Leitungswasser hergestellt wurden.	112
Tab. 28: Analysenergebnis der Trockensiebung des Bitumens.....	114
Tab. 29: Marshzeiten (in Sekunden) der untersuchten Injektionsmaterialien (Auslaufdüse 8 mm)	134
Tab. 30: Dichte der verschiedenen Injektionsmaterialien bei 30 und 40° C	135
Tab. 31: Mittelwerte und Einzelmesswerte der Kontaktwinkelmessungen	139
Tab. 32: Wasserglas: Kontaktwinkel, Einzelmessungen und Mittelwerte	139
Tab. 33: Materialkennwerte des roten Wesersandsteins.....	140
Tab. 34: Volumen des in die Sandsteinblöcke injizierten Injektionsmaterials.....	145
Tab. 35: Rezeptur für 1 m ³ des bGZ-Salzbetons	152
Tab. 36: Rezeptur des Magnesiabinders MB10.....	152
Tab. 37: Übersicht über die Wichtigkeit die den einzelnen Anforderungen und Unterzielen als Basis für die Berechnung der Zielgewichte der Nutzwertanalyse herangezogen wird.	161
Tab. 38: Halbmatrix zur Bestimmung der Zielgewichte der einzelnen Unterziele an die Injektionsmaterialien	162
Tab. 39: Übersicht der Wertebereiche für die Intervallskalen.....	164
Tab. 40: Übersicht über die Messwerte/Materialkennwerte und die jeweils für die Anforderungen vergeben Punkte.	173
Tab. 41: Übersicht über die vergebenen Punkte sowie die Ergebnisse für die einzelnen Injektionsmaterialien in den verschiedenen Kategorien sowie in der Gesamtwertung.	174
Tab. 42: Übersicht der im Vorfeld laborativ oder In-Situ ermittelten Informationen und Parameter	209
Tab. 43: Eigenschaften der Testkonfiguration (vorgestelltes Installationskonzept).....	226
Tab. 44: Ausgewählte Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie	230
Tab. 45: Ergebnisse Permeabilität und Quecksilberporosimetrie.....	235

Zusammenfassung

Bei der Errichtung von Streckenverschlussbauwerken wird ein hohes Maß an Anstrengungen unternommen um, durch die Materialauswahl, die Einbautechnologie sowie die gezielte Vergütung des Kontaktbereichs die Herstellung eines Bauwerks ohne lokale Wegsamkeiten zu erreichen. Trotz umfangreicher Anstrengungen weisen großtechnisch hergestellte Bauwerke immer wieder lokal permeable Bereiche im Kontakt zwischen Dichtbaustoff und Gebirge auf. Dies gilt im Besonderen für Bauwerke aus hydraulisch abbindenden, kohäsiven Dichtmaterialien, in denen sich das Abbindeverhalten, die thermisch bedingte Volumenänderung und die Wechselwirkungen des Baustoffes mit der Salinarkontur überlagern. Verbleibende, höher permeable Bauwerksbereiche stellen Angriffspunkte für Korrosionsprozesse des Baustoffes durch zutretende Lösungen dar. Daher müssen Streckenverschlussbauwerke nach der Errichtung hinsichtlich der erreichten integralen Permeabilität untersucht werden, was durch den Strömungstechnischen Funktionsnachweis technisch umgesetzt werden soll. Durch den Strömungstechnischen Funktionsnachweis ist es zum einen möglich sicherzustellen dass keine höher permeablen Bereiche im Bauwerk verbleiben und zum anderen können permeablere Bereiche lokalisiert werden. Für den Fall dass der Strömungstechnische Funktionsnachweis aufzeigt, dass, die für ein Streckenverschlussbauwerk geforderten Permeabilitäten nicht erreicht wurden, sind weitere technische Maßnahmen notwendig um den Kontaktbereich gezielt zu injizieren und somit vorhandene Wegsamkeiten abzudichten.

Eine Möglichkeit, die Permeabilität im Kontaktbereich zu reduzieren ist das Verpressen von niedrig viskosen Injektionsmitteln, die in die Wegsamkeiten hineinfließen, dort aushärten und somit die Wegsamkeiten verschließen. Um Injektionsmaterialien für die Kontaktfugeninjektion auszuwählen wurden zuerst Anforderungen an die Injektionsmaterialien gestellt auf Grundlage derer nachfolgend Injektionsmittel ausgewählt wurden.

Nachfolgend wurden fünf als besonders vielversprechend erachtete Injektionsmaterialien für weitergehende Untersuchungen ausgewählt. Hierbei wurden für die Injektionsmaterialien zuerst im Labor einige rheologische Eigenschaften für bergbautypische Temperaturen von 30 und 40° C erfasst. Die hierbei ermittelten Materialkennwerte waren: Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung, die Benetzungswinkel der Flüssigkeiten im Kontakt mit Steinsalz sowie Marshzeiten. Des Weiteren wurden Versuche zur Erzeugung und Injektion einer künstlichen Kontaktfuge durchgeführt. Hierfür wurden Probenkörper hergestellt, die zur Hälfte aus Steinsalz und zur anderen Hälfte aus Salzbeton oder Magnesiabeton bestehen. Entlang der Kontaktfuge wurde eine Injektionsleitung verlegt und die Erzeugung der Kontaktfuge im Kontaktbereich erfolgte mittels Spaltzugversuch. Hierbei gelang es Kontaktfugen mit definierten Öffnungsweiten zu erzeugen und zu injizieren. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass sowohl die Spaltzugfestigkeit des Kontaktbereichs als auch das Deformationsverhalten stark durch den verwendeten Salzbeton oder Magnesiabeton als auch die Abbindedauer beeinflusst werden.

Neben den Versuchen zu den Injektionsmaterialien und zur künstlichen Kontaktfuge war ein wesentlicher Teil des Vorhabens die Konzeption des Strömungstechnischen Funktionsnachweises. Um ein Konzept für den Funktionsnachweis zu erarbeiten wurden anhand von bereits erstellten Streckenverschlussbauwerken Rahmenbedingungen und die kritischen Bereiche des Bauwerks abgeleitet. Als kritisch für ein Versagen von Streckenverschlussbauwerken wird der Kontaktbereich zwischen dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks und dem Salzgebirge, ins besonders im Bereich

der Firste gesehen. Da der Baustoff des Streckenverschlussbauwerks bei einer qualitätsgesicherten Einbringung die geforderten Dichtigkeiten aufweist reicht für den Strömungstechnischen Funktionsnachweis ein Konzept aus, mit dem das errichtete Streckenverschlussbauwerk hinsichtlich seiner Dichtigkeit gegenüber Gasen und Lösungen im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge geprüft wird. Um diesen Funktionsnachweis zu erbringen wurde ein technisches Konzept erarbeitet, bei dem vor der Errichtung des Streckenverschlusses Rahmenkammern entlang der Streckenkontur installiert werden, die zu späteren Zeitpunkten mit Gas oder Lösung beaufschlagt werden können. Hierbei wird der Druckabfall beziehungsweise Druckanstieg in den Kammern mittels kabelloser Sensoren überwacht und aus den gemessenen Druckdaten kann für den Kontaktbereich eine Permeabilität ermittelt werden. Durch Modellierungen mit unterschiedlichen Permeabilitäten entlang des Kontaktbereiches konnten sowohl für Gase und Lösungen die Druckverläufe innerhalb der Rahmenkammern modelliert werden, die im späteren Einsatz benötigt werden um aus den gemessenen Druckverläufen Rückschlüsse auf die Permeabilität des Bauwerks zu ziehen. Somit lässt sich mit dem in diesen Vorhaben erarbeiteten Konzept des Funktionsnachweises zerstörungsfrei die Überprüfung der Erreichung der technischen Dichtheit eines Streckenverschlussbauwerkes realisieren.

Abstract

During the planning and construction of drift seals a great amount of effort goes into the finalization of a seal without localized, higher permeable zones. Despite the selection of specialized building materials and building methods in combination with the subsequent grouting of the contact zone between salt and seal full-scale seals often have localized zones with higher permeability's along the contact zone between salt and seal. This effect is especially common with hydrating and cohesive building materials due to the overlapping of thermal contraction processes and interactions between the material of the seal and the surrounding salt. Remaining, higher permeable zones present areas where corrosion processes can be initiated in contact with fluids. Therefore drift seals have to be tested regarding their averaged cross-section-permeability after construction, which can be accomplished by the hydraulic performance test. On the one hand the hydraulic performance test offers the possibility to verify that no permeable zones remain within the contact zone between salt and material of the seal after the termination of the construction phase. On the other hand it is also a possibility to locate and minimize remaining higher permeable zones and thereby reduce the permeability in the contract zone.

One possibility to reduce the permeability in the contact zone is the use of low viscosity grouts that are able to flow into permeable zones, where they harden and thereby seal them. Before the selection of materials with which the contact zone can be grouted can take place it is necessary, to formulate requirements that have to be meet by the grouts in order to fulfill the highly specific task of lowering the permeability in the contact zone. Based on the requirements it is then possible to select a range of applicable grouting materials.

Afterwards five grouting materials, which are viewed as promising for the grouting of permeable zones with small apertures, were chosen based on the requirements mentioned above. For these materials rheological as well as other material properties were determined in the laboratory for typical mining temperatures of 30 and 40 °C. The measured properties were the density, viscosity, surface tension, wetting angle in contact with rocksalt and the marsh time. Furthermore tests were performed to create and grout an artificially produced contact zone between material of the seal and salt on a laboratory scale. For the test samples were made, where one half is made of rocksalt and the other half is made either out of saltconcrete or sorelconcrete. Before the concrete was poured a grouting tube was placed alongside the contact zone and after the hardening of the concrete the contact zone was deliberately damaged via dynamic tension fatigue testing. These experiments showed that it is possible to create a contact zone with apertures of a specific width and seal them by grouting on a laboratory scale. The dynamic tension fatigue testing showed that the yield strength of the samples is strongly determined by the type of concrete used as well as the hydration time of the concrete.

Apart from the tests with the artificial contact zone developing a concept for the hydraulic performance test was an essential part of this research project. Part of developing the concept is determining the general framework as well as critical factors from existing drifts seals. A critical point for the failure of drift seals is the contact zone between material of the seal and the surrounding salt, especially in the roof. Assuming a quality assured pouring of the material of the seal very low permeability's are reached in this area and a concept for the hydraulic performance test that focuses on the contact zone is sufficient to test the drift seal towards its permeability towards gas and fluids. In order to perform the proof of function a technical concepts was developed, that uses several frame like chambers with wireless sensors that are built into the outline of the drift before the drift seal is built. Afterwards it is

possible to apply a gas or fluid pressure to the chambers. By measuring the pressure decrease in the pressurized chamber and pressure increases over time in the surrounding chambers it is possible to gain information regarding the permeability in the contact zone. Sofar pressure developments over time in the frame like chambers have been modelled for a range of permeability's using either fluids or gas in the chambers. In a later in-situ test these modelled pressure developments can then be used to determine the permeability of the drift seal using the in-situ measured pressure curves. The hydraulic pressure test offers the possibility of a nondestructive proof of function for drift seals hence their permeability towards gasses and fluids.

Zielstellung des Vorhabens

Während des Betriebs und der Vorbereitung der Nachbetriebsphase von untertägigen Deponien sowie der Endlagerung von wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfällen kommen Strecken- und Schachtverschlussbauwerke zum Einsatz, um einen sicheren Abschluss der Einlagerungsbereiche von der Hydro- und Geosphäre zu gewährleisten. Daher werden die eingesetzten Baustoffe einem sorgfältigen Auswahlverfahren unterzogen, sowie unter Einhaltung eines Qualitätssicherungskonzepts eingebracht. Allerdings können trotzdem im Kontaktbereich zwischen dem Dichtmaterial und dem Gebirge Bereiche mit erhöhten Permeabilitäten vorkommen.

Insbesondere für Dichtmaterialien auf der Basis hydraulisch abbindender Baustoffe (u.a. Zemente, Betone) ergibt sich vielfach im Kontakt zum Gebirge lokal eine höhere Permeabilität. Mögliche Ursachen für eine solche unzureichende vollständige Anbindung an die Gebirgskontur, eine daraus resultierende erhöhte Systempermeabilität und ggf. auch eingeschränkter mechanischer Verbund können sein:

- unzureichende Einbauqualität im Kontaktbereich und daraus resultierend eine reduzierte Anbindung an die Gebirgskontur und eine erhöhte Permeabilität im Kontaktbereich,
- Schwinden des Dichtbaustoffes (z. B. im Ergebnis des Abbindevorgangs),
- thermisch bedingte Ausdehnung und Kontraktion (z. B. im Ergebnis eines Hydratations und Abbindevorgangs),
- Setzungsprozesse des gesamten Dichtbauwerkes,
- geomechanische Baustoffcharakteristik und –verhalten des Dammkörpers (Rissbildung),
- Wechselwirkungen des Dichtmaterials mit der Salinarkontur und/oder der angreifenden Lösung, die zu einer Erhöhung der Permeabilität an der Kontur führen kann (z.B. Korrosion),
- chemische und mechanische Vorbehandlung des Gebirges und der ALZ vor dem Einbau des Dichtungssystems.

Die genannten Ursachen können auch in beliebiger Kombination auftreten.

Bei der Konzeptionierung und der Errichtung von Streckenverschlusswerken werden durch die Auswahl der Baustoffe, der Einbautechnologie sowie der nachträglichen Vergütung des Kontaktbereichs große Anstrengungen unternommen, um ein Bauwerk ohne lokale Wegsamkeiten und mit einer möglichst niedrigen integralen (querschnittsgemittelten) Permeabilität zu errichten. Hierbei kommt gerade der gezielten nachträglichen Vergütung des Kontaktbereichs zwischen Bauwerk und Gebirge eine entscheidende Rolle zu.

Besonders bei der Verwendung von hydraulisch abbindenden kohäsiven Baustoffen kann es durch thermisch und chemisch bedingte Volumenänderungen zur Ausbildung eines Bereichs erhöhter Permeabilität insbesondere im Firstbereich des Bauwerks kommen. Solche Bereiche

stellen Schwachzonen des Bauwerks dar und bieten einen Angriffspunkt für zutretende Lösungen, wodurch es zu Korrosionsprozessen im Bauwerk kommen kann. Daher ist es von hoher Bedeutung eine Auswahl an Materialien zusammenzustellen, die geeignet sind, im Rahmen einer gezielten Nachvergütung eine Abdichtung dieser höher permeablen Bereiche zu erzielen.

Um eine erfolgreiche Nachvergütung des Kontaktbereiches zwischen Bauwerk und Gebirge bei Streckenverschlussbauwerken im Salinar durchführen zu können, wurden in diesem Vorhaben Injektionsmaterialien ausgewählt, die eine Reihe von Anforderungen erfüllen und für die Nachvergütung der Kontaktfuge prinzipiell geeignet sind. Im Verlauf des Vorhabens wurden diese Injektionsmaterialien einer laborativen Charakterisierung unterzogen, um die Eignung der ausgewählten Injektionsmaterialien detaillierter betrachten zu können. Mit den gewonnenen Informationen soll die Auswahl eines für den jeweiligen Einsatzzweck geeigneten Injektionsmaterials erleichtert werden.

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Arbeiten werden in drei inhaltlich eng verwandten, jedoch separaten Teilberichten vorgestellt. Im ersten Teilbericht, Teilbericht A, werden Anforderungen an mögliche flüssigkeitsgestützte Injektionsmaterialien zur Abdichtung des Kontaktbereichs zwischen Streckenverschlussbauwerk und Gebirge gestellt und zahlreiche in Frage kommende Injektionsmaterialien näher beschrieben. Anschließend wird im Teilbericht B eine Auswahl an besonders geeigneten Injektionsmaterialien getroffen, für die laborativ unterschiedliche Materialeigenschaften ermittelt sowie Injektionsversuche durchgeführt wurden. Abschließend wurden die Injektionsmaterialien hinsichtlich der Eingangs formulierten Anforderungen einer Bewertung unterzogen. Im Teilbericht C wird ein Konzept vorgestellt, dass es ermöglicht das fertige Streckenverschlussbauwerk hinsichtlich seiner Dichtheit zu überprüfen. Dieses Nachweiskonzept für die strömungstechnische Funktion des Bauwerks basiert auf drei im Streckenverschlussbauwerk installierten Druckkammern, die entweder mit Gas oder Lösung druckbeaufschlagt werden können. Über kabellose Sensoren wird der Druckabfall in einer Kammer sowie der Druckanstieg in den beiden anderen Kammern erfasst und hieraus kann die querschnittsgemittelte Permeabilität des Bauwerksabschnittes ermittelt und bewertet werden.

Teilbericht A

Literaturrecherche – Verfügbare Injektionsmaterialien

1 Einleitung

Um geeignete Injektionsmaterialien zur Abdichtung der Kontaktfuge zwischen Bauwerk und Salzgebirge zu ermitteln mussten zuerst die zu erwartenden Bedingungen hinsichtlich des zu erwartenden geochemischen Milieus, der vorkommenden Salzminerale und verwendeten Baustoffe charakterisiert werden. Hierauf aufbauend wurden anschließend Kriterien/Anforderungen an Injektionsmaterialien zur Abdichtung feinsten Wegsamkeiten (unter 150 μm) im Bereich der Kontaktfuge erarbeitet. Nachfolgend wurde zu einer Vielzahl an verfügbaren Injektionsmaterialien eine Charakterisierung und Zusammenstellung unterschiedlicher Materialkennwerte erarbeitet, bevor abschließend auf verschiedene Verfahren zur Injektion des Kontaktbereichs zwischen dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks und dem Salzgebirge eingegangen wird.

1.1 Ausgewählte Grundlagen – Injektionen, Risse

Erfahrungen mit Injektionen in Salzgestein gibt es schon seit Ende des 19. Jahrhunderts. Allerdings werden Injektionen im Salz in der klassischen Literatur über Injektionen im Baugrund nicht berücksichtigt, was an mehreren Unterschieden zwischen den beiden zu injizierenden Medien liegt. Den Hauptunterschied stellen die wesentlich kleineren Wegsamkeiten im dichten Salzgebirge dar. Allerdings kann es im Kontaktbereich zwischen dem Streckenverschlussbauwerk und dem Salzgebirge insbesondere im Firstbereich z.B. aufgrund von Setzungsprozessen, von Kontraktions- und Schwindprozessen beim Abbinden hydraulisch abbindender Baustoffe sowie durch Bluten und Bildung von Betonschlämpe zu Problemen mit der Anbindung des Baustoffes an das Salzgebirge kommen. Im Fall einer unvollständigen Anbindung sind die Permeabilitäten um mehrere Größenordnungen höher als im ungestörten Salzgestein und im Dichtbaustoff des Streckenverschlussbauwerks. und liegen teilweise im Bereich, der durch die „normalen“ Baugrundinjektionen erreicht werden kann. An dieser Stelle ist auf die Injektions DIN 4093 hinzuweisen, die zwar nicht mehr gültig ist, jedoch klassische Erfahrungswerte für die Anwendungsgrenzen und Einsatzmöglichkeiten verschiedener Injektionsmaterialien festhält (**Tab. 1** und **Tab. 2**). Des Weiteren sind die für Injektionen im Fels ausreichend erforschten und genehmigten Injektionsmaterialien aufgelistet.

Tab. 1: Einsatzmöglichkeiten von Injektionsmaterialien in Lockergestein[1]

		1	2	3	4
	Hohlräume in	Bodenarten nach DIN 4022 Teil 1	Durchlässigkeitsbeiwert k_f m/s	Einpreßgut	Einpreßzweck (Abdichtung A Verfestigung V)
1	Kies Grobsand Kies sandig	G gS Gs	$> 5 \cdot 10^{-3}$	Zementsuspension	V
				Tonzementsuspension	A, V
				Tonsuspension	A
				Tonzementsuspension und Silikatgel	A, V
2	Sand Sand schluffig	S Su	$5 \cdot 10^{-3}$ bis $5 \cdot 10^{-6}$	Tonsuspension	A
				Silikatgel	A, V
				Kunstharz	A, V
3	Feinsand Grobschluff	fs gU	$5 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-7}$	Silikatgel	A, V
				Kunstharz	A, V

Tab. 2: Einsatzmöglichkeiten von Injektionsmaterialien im Fels[1]

	Öffnungsweiten s der Hohlräume	Einpreßgut	Einpreßzweck (Abdichtung A Verfestigung V)
1	kavernöse Strukturen, Klüfte und Störungszonen $s > 10$ mm	Zementmörtel, Zementpaste, Zementsuspension, Tonzementsuspension, Kunstharz	A, V
2	Klüfte und Risse 100 mm $> s > 0,1$ mm	Zementsuspension, Tonzementsuspension, Tonzementsuspension und Silikatgel, Kunstharz	A, V
3	Klüfte und Risse $s < 0,1$ mm	Silikatgel, Kunstharz	A, V

Die oben genannten höher permeablen Bereiche im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge werden im weiteren Verlauf als Kontaktfuge bezeichnet. Im zusammenfassenden Abschlussbericht zum Vorhaben CARLA[2] findet sich folgende Definition der Kontaktfuge: „Als Kontaktfuge wird die Fläche bezeichnet, die durch die stoffliche Inhomogenität an der Grenze zwischen Bauwerk (Dammkörper) und Gebirge (in der Regel ALZ) gebildet wird. Sie kann sich als teilweise oder vollständig offener Spalt darstellen, sie kann durch teilweisen oder vollständigen adhäsiven Kontakt oder im Extremfall durch Reibungskontakt zwischen Gebirge und Baustoff gebildet werden. Sie kann auch durch einen injizierten oder anderweitig zwischen Bauwerk und Gebirge aufgetragenen weiteren Stoff ausgefüllt sein.“

Als Risse werden im weiteren Verlauf dreidimensionale Strukturen im Bauwerk bezeichnet, deren einzelne Richtungen ein Längenverhältnis von 100:10:1 (Länge:Tiefe:Breite (x:y:z)) haben. Die Rissweite wird im Folgenden auch als Spaltöffnungsweite bezeichnet. Folglich ist ein Riss nach dieser Definition eine Struktur, deren Länge mehr als zehnmal so groß ist wie deren Tiefe, wobei die Tiefe die Spaltbreite/Öffnungsweite um das zehnfache übersteigt[3]. Wie in **Abb. 1** dargestellt wird die Risslänge vom sichtbaren Beginn des offenen Risses aus gemessen. Die Spaltöffnungsweite wird an der breitesten Stelle des Risses gemessen. In dieser Abbildung erstreckt sich die Ristiefe in die Bildebene.

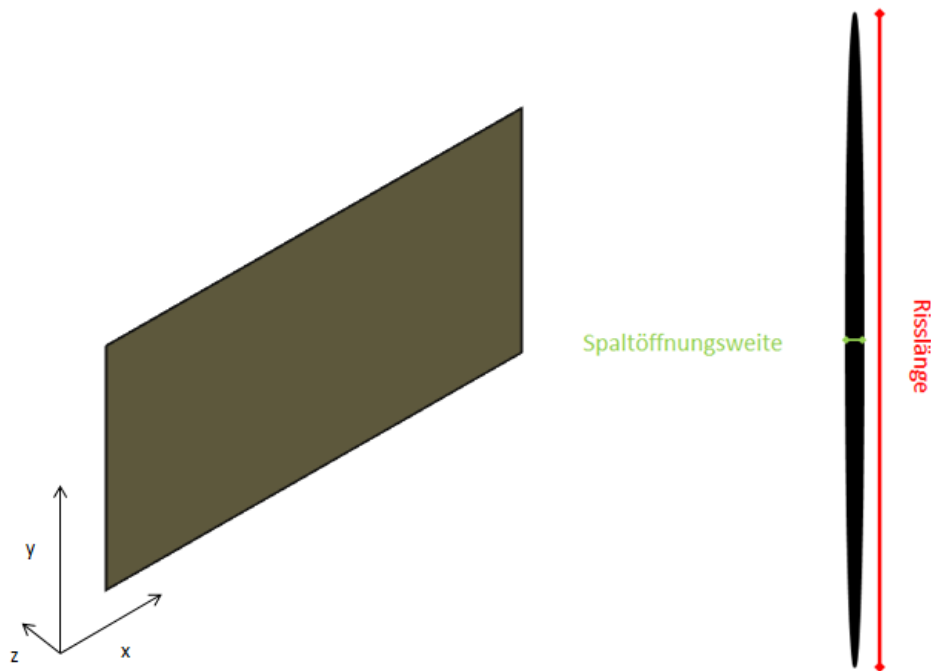


Abb. 1: Links ist eine idealisierte Darstellung der flächenmäßigen Erstreckung eines Risses dargestellt. Rechts erfolgt die grafische Darstellung der Risslänge und Spaltöffnungsweite eines idealisierten Risses

Laut DIN EN 12715 kann von einer Injizierbarkeit im Festgestein ab einem Verhältnis von Rissweite zu größter Partikelabmessung von mindestens 3:1 ausgegangen werden. Klüfte stellen feine Trennflächen in Gesteinen dar, die eine wesentlich größere Länge als Öffnungsweite besitzen und hinsichtlich einer Injektion Rissen als ähnlich zu betrachten sind. Bei Feinstzementen kommt es, aufgrund der kleinen Partikelgröße durch steigende Anziehungskräfte zu chemischen Filtrationseffekten. Dadurch verändert sich das Verhältnis zwischen Kluftöffnung und Partikelgröße, das zur Abschätzung der Injizierbarkeit verwendet wird, hin zu größeren Werten[4]. Filtereffekte sind, bei vernachlässigbarer Sedimentation, ab einem Verhältnis der Rissweite zum d_{95} Wert von 9 bis 10 zu erwarten[5].

Die kleinste injizierbare Kluftweite wird durch die größten in der Suspension vorhandenen Partikel begrenzt. Beim Injektionsvorgang bleiben die zu großen Partikel vor der zu injizierenden Kluft hängen, wodurch sich vor der Kluft eine Schicht aus großen Partikeln bildet. Diese Schicht (Filterkuchen) wirkt wie ein Filter und nur die Anmachflüssigkeit kann durch den Filterkuchen in die Kluft eindringen. Die völlige Abdichtung einer Kluft ist nicht möglich. Zumindest die Zwickel einer Kluft können nicht durch partikelhaltige Injektionsmaterialien erreicht werden. Die nicht verfüllten Zwickelräume müssen nicht zwingend strömungswirksam sein (**Abb. 2**).

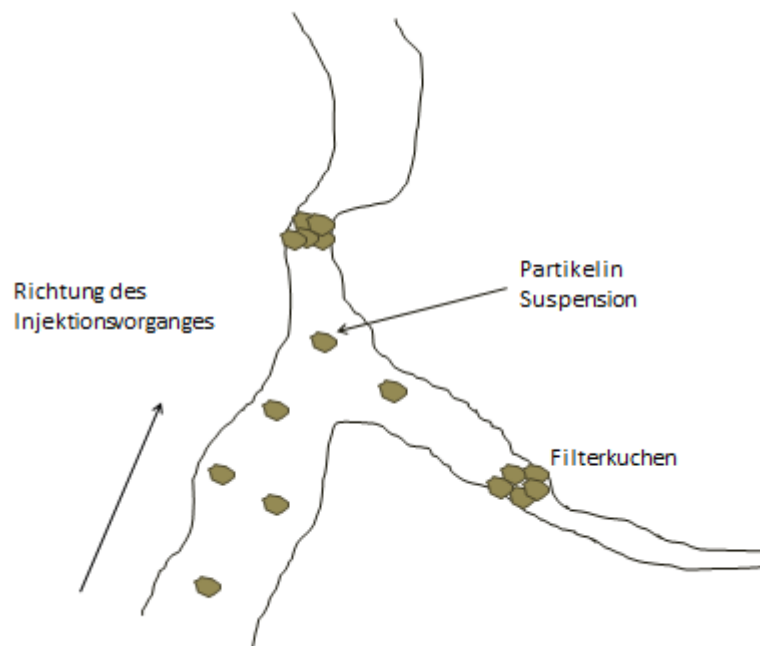


Abb. 2: Filterkuchenbildung beim Injizieren von Klüften/Rissen

1.2 Ausgangsbedingungen und Prämissen

1.2.1 Prinzipieller Aufbau von Verschlussbauwerken

Prinzipiell besteht der betrachtete Strömungsraum bei den Streckenverschlussbauwerken aus den folgenden einzelnen, sich in Ihren Eigenschaften unterscheidenden Strömungsräumen. Sie bestehen aus einem geringpermeablen Dichtelement, sind umgeben von Gebirge (einschließlich Auflockerungszone (ALZ)), mit heterogenen, anisotropen strömungstechnischen sowie gebirgsmechanischen Eigenschaften und weisen einen Kontaktbereich zwischen Dichtbaustoff und Gebirge auf.

Dichtelement (DE)

Die Dichtelemente sind bezüglich ihres Aufbaus und der Eigenschaftsverteilung als homogene, isotrope Bauwerke herzustellen. Die für die Dichtwirkung relevanten strömungstechnischen und geotechnischen Eigenschaften der Dichtmaterialien können für diese Bedingungen in der Regel durch Laborversuche und In-Situ-Versuche repräsentativ ermittelt werden. Unsicherheiten bezüglich der im Labor bestimmten Eigenschaften des Dichtmaterials ergeben sich aus dem Maßstabseinfluss (z.B. Betonierfugen, Temperaturgradienten, Wechselwirkungen zur Gebirgskontur) und z.T. aus Probengewinnung und -lagerung. In der Regel liegen jedoch auch Untersuchungsverfahren und technologische Konzepte für einen homogenen Einbau eines Dichtelementes und der Eigenschaftscharakterisierung vor.

Umgebendes Gebirge

Ohne an dieser Stelle auf die Ursachen des differenzierten Aufbaus einer Gebirgskontur einzugehen, wird das Gebirge hinsichtlich seiner strömungstechnischen und gebirgsmechanischen Eigenschaften in einen gestörten Gebirgsbereich (ALZ) und das ungestörte Gebirge unterschieden. In Abhängigkeit von der geologischen Situation und dem gebirgsmechanischen Spannungszustand kann die Auflockerungszone hinsichtlich ihrer Mächtigkeit und der strömungstechnischen Eigenschaften variieren. Vorliegende Erfahrungen zur Charakterisierung der strömungstechnisch relevanten Eigenschaften an Kernproben aus der Gebirgskontur haben eine unzureichende Repräsentanz von Laborergebnissen für die Beurteilung der In-Situ bestehenden Eigenschaftsverteilung ergeben. Es stehen jedoch Untersuchungsmethoden zur In-Situ Ermittlung der Parameter zur Verfügung (z.B. strömungstechnische In-Situ-Versuche, wie Bohrlochpacker, Oberflächenpacker, Kombipacker, Hydrofracversuche, geophysikalische Methoden). Diese stellen in der Regel für ein Messintervall Informationen zur Eigenschaftsverteilung in Abhängigkeit vom Konturabstand zur Verfügung. In Abhängigkeit von den Standortgegebenheiten und dem Untersuchungsprogramm können aus den In-Situ Untersuchungen Kenntnisse zur Mächtigkeit der aufgelockerten Zone und der Parameterverteilung abgeleitet werden. Ausgehend von der Permeabilitätsverteilung in der ALZ gibt es Konzepte zur Ableitung der integralen Permeabilität für diesen konturnahen Gebirgsbereich. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Standortauswahl, den vielfach erforderlichen Nachschnitt der Gebirgskontur und die Dimensionierung des Dichtbauwerkes.

Kontaktbereich Dichtbaustoff/Gebirge (KB)

In Abhängigkeit von der Wirkungsweise des Dichtmaterials, den Wechselwirkungen mit der Gebirgskontur, den geomechanischen und strömungstechnischen Eigenschaften sowie der gebirgsmechanischen Spannung ergibt sich die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes und des Kontaktbereiches zwischen Dichtmaterial und Gebirge. Die Parametrisierung dieses Bereiches hinsichtlich der strömungstechnisch relevanten Eigenschaften stellt eine besondere Herausforderung dar. Dies resultiert im Wesentlichen aus den Schwierigkeiten bei der Präparation von entsprechenden Laborproben und aus den bereits zum Dichtelement erläuterten Maßstabeffekten. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung des Kontaktbereiches zwischen Baustoff und Gebirge durch Materialoberflächenpacker im Technikumsmaßstab bedingt möglich ist. Diese können sowohl im Technikum als auch In-Situ untersucht werden. Entsprechende Materialoberflächenpacker bieten gleichzeitig die Möglichkeit, ggf. erforderliche Vergütungsmaßnahmen zu testen. Die Einschränkungen für die Aussagekraft der Materialoberflächenpacker ergeben sich wiederum aus den Maßstabseinflüssen, wie z.B. das Temperaturverhalten eines Bauwerkes, die Spannungsverhältnisse, die Abbindedauer und die Volumenzunahme oder das Schwinden des Dichtmaterials.

Die für die Beurteilung erforderliche strömungstechnische Parametrisierung der unmittelbaren Gebirgskontur kann durch Oberflächenpacker- und/oder Kombipackermessungen erfolgen (siehe umgebendes Gebirge). Die Parametrisierung des Dichtmaterials stützt sich in der Regel auf Untersuchungen an repräsentativen Kernproben (siehe Dichtelement (DE)).

Die vorangegangenen Erläuterungen zu den differenziert zu beurteilenden Strömungsräumen in einem Verschlussbauwerk machen deutlich, dass die größte Unsicherheit hinsichtlich der strömungstechnischen Beurteilung des Kontaktes Dichtbaustoff/Gebirge und den großmaßstäblichen Einflussbedingungen verbleibt. Aussagen zu diesen Schwerpunkten können aus strömungstechnischen, großmaßstäblichen, In-Situ durchgeführten Bauwerkstests abgeleitet werden.

1.2.2 Standort / Gebirge – Prämissen

Für die Errichtung von Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle werden international drei verschiedene Gesteinsformationen als geeignet angesehen: Kristallin, Ton/Tonstein und Steinsalz. Jedes der genannten Gesteine hat unterschiedliche positive aber auch negative Eigenschaften, die zum Teil auch von den jeweiligen Standortbedingungen beeinflusst werden. Wenn am Standort jedoch die Anforderungen hinsichtlich räumlicher Ausbreitung, Teufenlage und Permeabilität des Gebirges erreicht werden, kann jedes der genannten Gesteine als geeignet für die Errichtung eines Endlagerbergwerks angesehen werden. In Deutschland werden bisher nur Steinsalz- oder Tonsteinformationen für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle diskutiert. Infolge des seit über einem Jahrhundert andauernden Salzabbaus in Deutschland liegen im besonderen Maße zum Wirtsgestein Steinsalz umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungswerte vor.

Daher werden im Rahmen des Vorhabens ausschließlich Standorte für Dichtbauwerke in Steinsalzformationen betrachtet. Generell kann davon ausgegangen werden, dass in Salinarformationen, neben Steinsalz, auch Kalisalze (z.B. Carnallit, Sylvinit, Kieserit) und/oder schwerlösliche Gesteine, wie calciumsulfathaltige Salze (z.B. Anhydrit, Gips) und/oder unlösliche Gesteine, wie Siliziklastika (z.B. Mergel-, Tonstein) aufgeföhren wurden. Im Vorhaben ISIBEL zur Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW wird die Festlegung der Position von Streckenverschlüssen im Grubengebäude nach der vorgefundenen geologischen Situation empfohlen[6]. Ohne darauf an dieser Stelle näher einzugehen, ist nicht absehbar, ob, mit welcher Zielstellung, mit welchem Wirkungskonzept und mit welchen Funktionsmechanismen in einem Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle Dichtbauwerke aus hydraulisch abbindenden Materialien in diesen Gesteinsformationen angeordnet werden. Daher wird für diese Gesteine die Betrachtung eines zu entwickelnden Nachweiskonzeptes vorerst zurückgestellt.

Ausgehend von dem Wirtsgestein Steinsalz ergeben sich folgende, generelle Randbedingungen für das Dichtbauwerk:

- Das Wirtsgestein ist in Abhängigkeit von Druck und Temperatur löslich gegenüber chemisch nicht gesättigten, wässrigen Lösungen.
- Für den Standort des Versuchsbauwerkes wird von einer Umgebungstemperatur von 30 °C bis 40 °C ausgegangen.
- Steinsalz besitzt eine Gleichgewichtsfeuchte von ca. 75,2 % (30 °C)^[109]. Die Gleichgewichtsfeuchte von MgCl₂-haltigen Salzen ist in der Regel noch deutlich geringer – z.B. MgCl₂ * 6 H₂O – Bischofit: 32,4 % (30°C)[7]. Auf Grund der erfahrungsgemäß im Grubengebäude immer angefahrenen MgCl₂-haltigen Salzformationen ist, im Jahresgang und abhängig vom Standort in der jeweiligen Grube, von einer geringeren, relativen Luftfeuchte in den Grubenwettern auszugehen. Für die Betrachtungen im Rahmen des Vorhabens wird von einer relativen Luftfeuchte von 35 % bei 30 °C ausgegangen. Damit wird für das initial als flüssigkeitsgesättigt anzunehmende, hydraulisch abbindende Dichtmaterial im Kontakt zu den Grubenwettern ein Trocknungspotential unterstellt.
- Das Steinsalzgebirge unterliegt in Abhängigkeit von der geologischen Situation und dem Gebirgsspannungszustand einem Kriechverhalten. Dies kann zeitabhängig zu einer Reduzierung des Hohlraumquerschnittes und in der Folge zur Veränderung der gebirgsmechanischen Einspannung des Dichtbauwerkes führen. Neben diesen gebirgsmechanisch begründeten Vorgängen ist in Abhängigkeit von der lithologischen und mineralogischen Zusammensetzung das Auftreten von Reaktionsprozessen mit Volumenzunahme sowohl in Folge von Umkristallisationen, wie z. B. Hydratation von Anhydrit zu Gips, Hydratation von Kieserit zu Epsomit als auch in Folge von Hydratation und Quellung von Tonmineralen bei Lösungs- bzw. Feuchteangriff nicht auszuschließen. Für die Betrachtungen im Rahmen dieses Vorhabens werden die genannten oder vergleichbare Reaktionen und die daraus möglicherweise resultierende Erhöhung des Spannungszustands nicht berücksichtigt. Das Dichtbauwerk muss seine Dichtwirkung ohne Berücksichtigung entsprechender Prozesse nachweisen.
- Steinsalz besitzt mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1,4 W/(m*K) bis 7,2 W/(m*K) (Mittelwert bei ca. 4 W/(m•K))[8] eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als andere Gesteine. In Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des abbindenden Baustoffes resultiert daraus eine Ableitung der durch die Hydratation entstehenden Wärmemenge in das Gebirge. Dies führt zeitabhängig zu einer Abkühlung des Bauwerkes und in der Folge zu einer Volumenreduzierung in Abhängigkeit vom thermischen Ausdehnungskoeffizienten des abbindenden Baustoffes. Für die Betrachtungen im Vorhaben wird davon ausgegangen, dass der beschriebene Abkühlungsprozess und die daraus resultierenden Veränderungen im Dichtelement weitgehend abgeklungen und die Temperaturdifferenz zum Gebirge auf 2 K bis 3 K reduziert ist. Es wird angenommen, dass für diese Bedingungen die thermisch bedingte Verformung eines Dichtelementes auf ein vernachlässigbares Maß reduziert ist. Für thermische Ausdehnungskoeffizienten

von $2,0 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ für Salzbeton M2 und $4,0 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ für Steinsalz[9] ergeben sich keine Veränderungen des Ausgangsvolumens in Folge thermischer Ausdehnung.

1.3 Konstruktive Vorgaben für Streckenverschlüsse

Bezüglich der für die Errichtung des Streckenverschlussbauwerks einzusetzenden Baustoffe liegen Erkenntnisse über eine Reihe unterschiedlicher Baustoffe vor. Prinzipiell können für die Errichtung von Streckenverschlussbauwerken im Salinar 11 verschiedene Baustoffe eingesetzt werden[10]. Von diesen 11 Baustoffen eignen sich lediglich Salzbetone und Sorelbeton für die Errichtung von eigentragfähigen Streckenverschlussbauwerken, die bereits kurz nach der Fertigstellung fluiddicht sind[10].

In Abhängigkeit von der Einbautechnologie des Dichtmaterials (z.B. Ortbeton oder Spritzbeton) entsteht das Dichtelement in einem Arbeitsgang oder in mehreren Betonierabschnitten. Die angewendete Einbautechnologie und die materialspezifischen Abbindeigenschaften bestimmen die Feuchteverteilung in dem Betonkörper und in Abhängigkeit von der exothermen Hydratationsreaktion bei der Bildung der Bindemittelmatrix stellt sich die Temperaturverteilung und der Wärmeabstrom ins Gebirge ein. Für die Prozessbetrachtungen im Rahmen dieses Vorhabens wird von annähernder Sättigung des Porenraumes im Baustoff mit Flüssigkeit ausgegangen. Erfahrungen aus Dichtbauwerken zeigen, dass es langfristig unter dem Einfluss der fortschreitenden Hydratation und unter den thermodynamischen Bedingungen der Grubenwetter, bestimmt durch die Hygroskopizität des Salinargebirges, zu einer Trocknung kommen wird (siehe Abschnitt 1.2.2 Standort / Gebirge – Prämissen).

Verschlussbauwerke werden in der Regel axial durch einen Fluiddruck beaufschlagt. Die Lagestabilität des Abdichtkörpers wird bestimmt vom Lastabtrag in die Gebirgskontur. In Abhängigkeit von den Standortbedingungen und der Dimensionierung des Bauwerkes ist zur Gewährleistung der Lagestabilität gegebenenfalls eine Verzahnung des Abdichtbauwerkes mit der Kontur oder eine gleitfähige Kegelstumpf-Geometrie erforderlich. Dies hätte gegebenenfalls Auswirkungen auf das Konzept der Nachweisführung zur Dichtheit des Bauwerkes. Im Rahmen des Vorhabens werden für die Entwicklung des Nachweiskonzeptes entsprechende konstruktive Besonderheiten nicht berücksichtigt.

Die Stirnseiten bzw. Endabschnitte von Dichtbauwerken sind in der Regel separat zu betrachten. Dies resultiert u. a. aus:

- einbautechnologisch bedingten Abweichungen im Vergleich zum zentralen Bereich des Bauwerkes, wie z. B. Schalungseinbauten, abweichende Abkühlungsbedingungen und daraus resultierende Spannungen im Bauwerk,
- abweichenden Einspannungsbedingungen in Folge des Verformungsverhaltens des Gebirges,
- abweichenden, strömungstechnischen und mechanischen Eigenschaften in Folge schnellerer Abkühlung und der stärkeren Austrocknung, z. B. reduzierte Porenraumsättigung, eher einsetzende Karbonatisierungsprozesse, Gefügeveränderungen in Folge Kontakt zur Beaufschlagungslösung.

Die Quantifizierung der genannten Einflussgrößen ist abhängig vom Standort, dem eingesetzten Dichtbaustoff sowie den thermodynamischen und gebirgsmechanischen Randbedingungen. Die Auswirkungen auf die Dichtwirkung sind daher bauwerksbezogen zu beurteilen. Im Rahmen des Vorhabens werden 80 % der Bauwerkslänge als strömungstechnisch wirksame Länge betrachtet. Jeweils 10 % der Bauwerkslänge von jeder Stirnseite des Bauwerkes werden nicht berücksichtigt („Opferschicht“)[11].

Die Form der Streckenkontur, z. B. quadratisch oder rund, hat Auswirkungen auf die strömungstechnische und gebirgsmechanische Situation im Gebirge bzw. der Auflockerungszone, auf die Einbautechnologie des Baustoffes und die Installationen für die strömungstechnische Testung. Für die Entwicklung der Testkonfiguration für die Nachweisführung werden die genannten Querschnittsformen hinsichtlich der Besonderheiten beim Einbau der Testinstallation beurteilt.

Da die für die Errichtung von Streckenverschlussbauwerken aufgrund Ihrer geringen Permeabilität und den hohen mechanischen Festigkeiten vorgesehen hydraulisch abbindenden Baustoffe nicht quellfähig sind kann es im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge während des Abbindevorganges infolge von Schwindprozessen zur Ausbildung von Bereichen mit erhöhter Permeabilität kommen. Zusätzlich ist auch noch die Gefahr von Korrosionsprozessen im Kontaktbereich gegeben, die sich infolge von Wechselwirkungen zwischen Dichtmaterial und Salinarkontur sowie möglicherweise angreifenden Lösungen ergeben. Bei einer sorgfältigen Auswahl und Abstimmung des Baustoffs auf das umgebende Salzgebirge lässt sich die Gefahr von Wechselwirkungen auf ein Minimum beschränken. Jedoch lassen sich die bei allen hydraulisch abbindenden Baustoffen während des Abbindevorganges stattfindenden Expansions- und Kontraktions- sowie Quell- und Schwindprozesse, die zu Zwangsspannungen führen allenfalls minimieren aber nicht vermeiden. Falls es zur Ausbildung von Wegsamkeiten im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge kommt, können diese zu einer Umläufigkeit des Bauwerks führen und bieten zudem einen Angriffspunkt für Korrosionsprozesse. Daher ist es als vorteilhaft zu erachten, Streckenverschlussbauwerke die zum sicheren Einschluss radioaktiver Abfälle errichtet wurden, nach Ihrer Fertigstellung zerstörungsfrei hinsichtlich der Dichtheit zu überprüfen, um somit Wegsamkeiten in einzelnen Bauwerkssegmenten zu lokalisieren und gezielt nachvergüten zu können.

Um im Rahmen der langzeitsicheren Verwahrung eines Grubengebäudes für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle nachzuweisen, dass ein Abdichtbauwerk seine strömungstechnische Dichtwirkung erfüllt, sind technische Verfahren notwendig, die in der Lage sind, den technischen Funktionsnachweis In-Situ zu erbringen. Die Funktionsnachweise für realisierte Dichtbauwerke beruhen aktuell in der Regel auf Untersuchungen von Probenmaterial aus den einzelnen Strömungsbereichen des Bauwerkes (Dichtelement, Kontakt Dichtmaterial/Gebirge und ALZ/Gebirge) und lokaler In-Situ Messungen für ausgewählte Parameter (z.B. Permeabilität Kontaktbereich Baustoff/Gebirge). Diese Untersuchungen an Probenkörpern liefern stichprobenartige Messwerte mit einer lokal begrenzten Aussagekraft, wohingegen beim strömungstechnischen Funktionsnachweis mittels Druckkammern Aussagen gemittelt über den gesamten Strömungsraum getroffen werden können.

Beim strömungstechnischen Funktionsnachweis sollen im Bauwerk mehrere Druckkammern errichtet werden, die nach der Fertigstellung mit Lösung oder Luft beaufschlagt werden können. Über den in einer Druckkammer gemessenen Druckabfall sowie den Druckanstieg in den anderen Kammern kann eine Aussage über die integrale Permeabilität des getesteten Bauwerksabschnittes getroffen werden. Ein weiterer Vorteil des strömungstechnischen Funktionsnachweises ist, dass nach der Errichtung des Bauwerks keine Bohrungen zur Entnahme von Probenköpern aus dem Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge hergestellt werden müssen. Aufgrund der segmentweisen Testung des Strömungsraumes und der Minimierung der Anzahl an Bohrungen, die im Bauwerk nach der Fertigstellung gebohrt werden, liefert der strömungstechnische Funktionsnachweis mittels Druckkammern einen gegenüber derzeitigen Verfahren, sichereren sowie zuverlässigen Nachweis der Funktionstüchtigkeit des getesteten Streckenverschlussbauwerks und bietet zudem die Möglichkeit einer gezielten Nachvergütung einzelner Segmente.

1.4 Kontaktfugenbildung

Wenn die strömungstechnische Funktion des Streckenverschlussbauwerks getestet wird, erfolgt dies für die drei oben beschriebenen Strömungsräume mit unterschiedlichen Eigenschaften (siehe Abschnitt 1.2.1 Prinzipieller Aufbau von Verschlussbauwerken). Von diesen drei Abschnitten hat sich bei bisher errichteten Bauwerken insbesondere der Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge als kritischer Bereich hinsichtlich einer Umströmung des Bauwerks herausgestellt. Dies lässt sich insbesondere auf die Bildung einer Kontaktfuge im Firstbereich des Bauwerks zurückführen.

Wenn eine qualitätsgesicherte Einbringung des Baustoffes erfolgt ist, sind die thermischen Expansions- und Kontraktionsprozesse sowie Schwindprozesse des hydraulisch abbindenden Baustoffes als wahrscheinliche Ursachen für die Bildung großflächiger Risse/Wegsamkeiten im Bereich der Kontaktfugen zu sehen. Zudem ist bei der qualitätsgesicherten Einbringung des Baustoffes davon auszugehen, dass dieser rissfrei ist.

Als autogenes Schwinden wird der Volumenverlust des Baustoffs beim Abbindevorgang bezeichnet. Das autogene Schwinden ist bei Salzbeton stärker ausgeprägt als bei normalen Beton und kann bis zu 1 mm pro Meter Salzbeton betragen[9]. Für den sehr detailliert im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers in Morsleben untersuchten Salzbeton M2 liegen die in **Abb. 3** dargestellten Informationen zum Schwinden des Betons über die Abbindezeit vor. Hier lässt sich deutlich erkennen, dass das Schwinden im Wesentlichen in den ersten 50 bis 100 Tagen nach der Herstellung des Betons stattfindet. Dies ist von Bedeutung, da hydraulisch abbindende Baustoffe infolge des Abbindeprozesses ihre maximale Druckfestigkeit nicht sofort aufweisen sondern erst nach einigen Wochen erreichen. Entscheidend für die Entstehung von Trennflächen ist jedoch der Aufbau von Zugspannungen. Diese Zugspannungen greifen sowohl im Baukörper als auch im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge an.

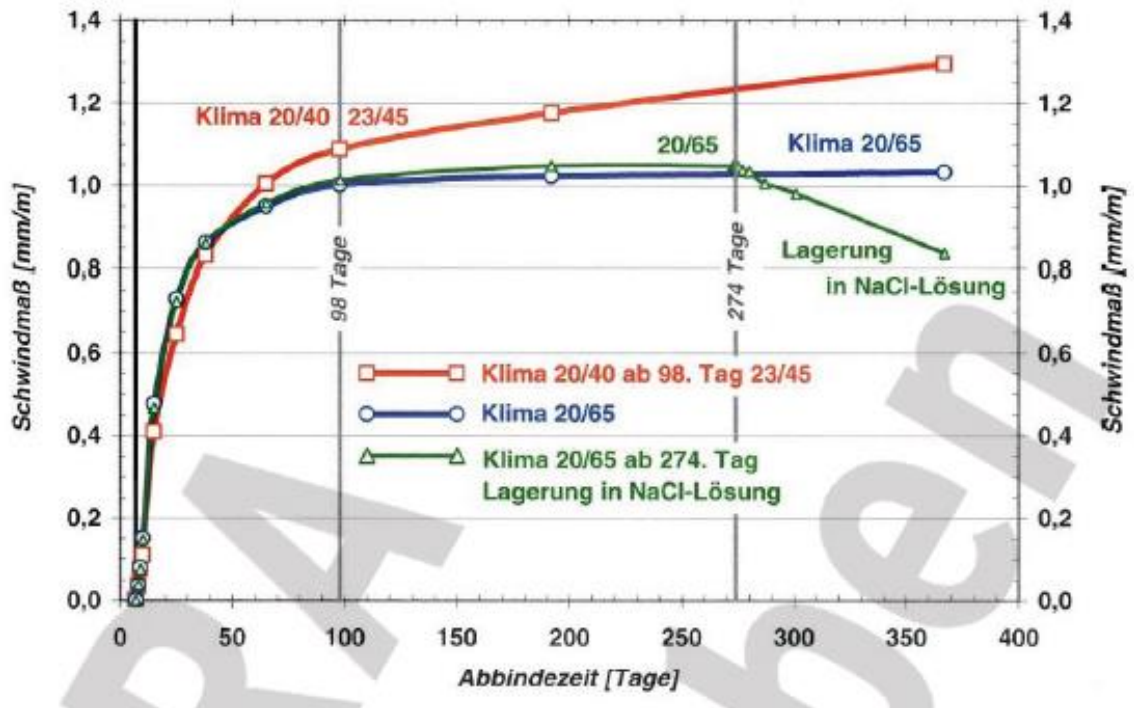


Abb. 3: Schwindmaße des Salzbetons M2 in Abhängigkeit der Abbindezeit der Prüfkörper. Die Proben Klima 20/40 wurden bei 20°C und 40 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert und die Proben Klima 20/65 bei 20° C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit[12].

Neben der Abbindezeit wird das Autogene Schwinden (bei normalem Beton) maßgeblich durch folgende Parameter beeinflusst[13]:

- dem Verhältnis von Bindemittel und Anmischwasser,
- sowie von den Anteilen an Zementleim und der chemisch inerten Gesteinskörnung.

Das autogene Schwinden verändert sich in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Zements und nimmt bei einem Anstieg des Wasser-/Zementwertes $> 0,3$ und mit einem steigendem Anteil an inerter Gesteinskörnung ab.

Neben dem autogenen Schwinden kommt es auch zu thermischen Expansions- und Kontraktionsvorgängen im Baustoff. Beim Abbindevorgang wird Energie in Form von Wärme frei, was zu einer Aufheizung und Ausdehnung des Bauwerkes führt. Allerdings kehrt sich dieser Prozess nach dem Abbindevorgang um und mit dem Abkühlen des Bauwerks kommt es zu einer Volumenabnahme.

Bei beiden Vorgängen spielt die Anbindung des Baustoffes an das Gebirge eine wichtige Rolle. Wenn sich während der Abbindephase eine gute und stabile Verbindung zwischen Baustoff und Gebirge ausbilden kann, z.B. durch Anlösen des Salzes durch die Feuchtigkeit im Baustoff und anschließende Bildung von kristallinen Verwachsungen zwischen Baustoff und Gebirge, kann die Gefahr von Umläufigkeiten durch Schwindvorgänge reduziert werden. Je höher die Haftzugfestigkeit des Kontaktes zwischen Baustoff und Gebirge ist, desto größere Kontraktions-

und Schwindvorgänge im Bauwerk können ohne ein Abreißen des Bauwerkes vom Gebirge überstanden werden.

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle wurden Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit des Salzbetons M2 mit unterschiedlichen Abbindealtern durchgeführt, deren Ergebnisse in **Tab. 3** dargestellt sind.

Tab. 3: Haftzugfestigkeit (Mittelwerte (n=Anzahl der Einzelmessungen aus denen die Mittelwerte gebildet wurden)) zwischen Salzbeton der Rezeptur M2 und Steinsalz in Abhängigkeit vom Abbindealter des Salzbetons[9].

Abbindealter [Tage]	7 (n=14)	10 (n=15)	14 (n=17)	21 (n=17)	28 (n=14)	51 (n=15)
Haftzugfestigkeit [MPa]	0,121	0,165	0,245	0,438	0,582	0,701

Im gleichen Dokument wird zudem die Annahme getroffen, dass es zur Ausbildung von Wegsamkeiten im Beton infolge von Zugspannungen nur im Zeitraum zwischen 7 und 28 Tagen nach der Herstellung des Betons kommt. Die untere Grenze wird dadurch begründet, dass es in der Frühphase durch die Hydratationsenergie zur thermischen Ausdehnung und Überdrückung des Baustoffes kommt, wodurch sich keine Zugspannungen bilden können. Nach 28 Tagen wird davon ausgegangen, dass aufgrund der hohen Betonfestigkeit mit einer hohen Wahrscheinlichkeit die Kontaktfuge versagt[9]. Ab einem Alter von 21 bis 28 Tagen kommt es zu einem Übersteigen der Haftzugfestigkeit der Verbindung zwischen Salzbeton und Salz durch die Zugbelastung des Betons, was auch wieder für die Bildung eines Risses im Bereich der Kontaktfuge spricht, wenn durch die Kontraktions- und Schwindprozesse ausreichend hohe Zugspannungen aufgebaut werden.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Kontaktfugenbildung beim Einsatz von Salzbeton wahrscheinlich während der ersten 100 Tage nach der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks als Folge einer Überschreitung der Haftfestigkeit im Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge durch die Kontraktions- und Schwindprozesse des Baukörpers kommt. Bedingt durch die Schwerkraft ist die Bildung der Kontaktfuge im Firstbereich als wahrscheinlich zu erachten, da es zu einer guten Anbindung zwischen Baustoff und Gebirge entlang der Sohle des Bauwerks durch die Auflast des eingebrachten Baustoffes kommt. Falls es zur Überschreitung der Haftspannung zwischen Bauwerk und Gebirge kommt ist anzunehmen, dass sich ein Riss ausbildet der, eine Öffnungsweite besitzt, die im Bereich der Volumenabnahme des Baustoffes infolge der Schwindprozesse liegt. Risse mit Öffnungsweiten im Bereich von Millimetern lassen sich mit Feinstzementen oder Feinstmagnesiabindern injizieren, wobei nach einer Injektion im schlimmsten Fall von einer Spaltöffnungsweite von 0,1 mm ausgegangen wird, jedoch Trennrisse mit einer größeren Öffnungsweite ausgeschlossen werden[12].

1.5 Anforderungen Injektionsmaterialien

Um im Folgenden Anforderungen an die Injektionsmaterialien zur Kontaktfugeninjektion aufzustellen, soll zuerst der Einsatzbereich näher definiert werden. Es werden Injektionsmaterialien zur Injektion der Kontaktfuge zwischen dem hydraulisch abbindenden Dichtbaustoff eines Streckenverschlussbauwerks und dem umgebenden Salzgebirge betrachtet. Aufgrund der niedrigen geforderten integralen Permeabilität und einer möglichen Bandbreite der Öffnungsweiten von Wagsamkeiten im Kontaktbereich von mehreren Millimetern bis zu wenigen μm ist zur erfolgreichen Injektion der aufeinander folgende Einsatz unterschiedlicher Injektionsmaterialien nötig. Das Ziel der in diesem Vorhaben betrachteten Injektionsmaterialien ist es Wagsamkeiten mit Spaltöffnungsweiten unter $150\ \mu\text{m}$ im Bereich der Kontaktfuge zu verschließen. Hierbei ist der Einsatz sowohl von partikelgestützten als auch von partikelfreien Injektionsmaterialien möglich.

Die Abdichtung des Kontaktbereichs Bauwerk/Gebirge erfolgt bei Streckenverschlussbauwerken in mehreren Stufen, wobei sukzessive Injektionsmaterialien mit kleineren Korngrößen oder partikelfreie Materialien mit unterschiedlichen Fließeigenschaften verwendet werden. Durch eine Injektion mit Feinstbindemitteln lassen sich Risse mit Öffnungsweiten von 50 bis $100\ \mu\text{m}$ noch injizieren[1]. Das bedeutet, dass für den in diesem Projekt gewählten Anwendungsbereich der Injektionsmaterialien (Verfüllung von Rissen mit Öffnungsweiten unter $150\ \mu\text{m}$) sowohl partikelgestützte als auch partikelfreie Injektionsmaterialien zum Einsatz kommen können. In Versuchen zur Injektion der Auflockerungszone (disturbed rock zone) in der Sohle einer 10×47 Meter großen Kammer in der WIPP wurden mit zementgestützten Injektionsmaterialien Risse mit Öffnungsweiten von $3\ \mu\text{m}$ injiziert[14]. Aufgrund des fehlenden Feststoffanteils ist im Allgemeinen mit einem besseren Eindringen der partikelfreien Injektionsmaterialien in Risse mit geringen Spaltöffnungsweiten zu rechnen. Dies zeigt sich auch an den Anwendungsbereichen für Injektionsmaterialien im Böden (Abb. 4).

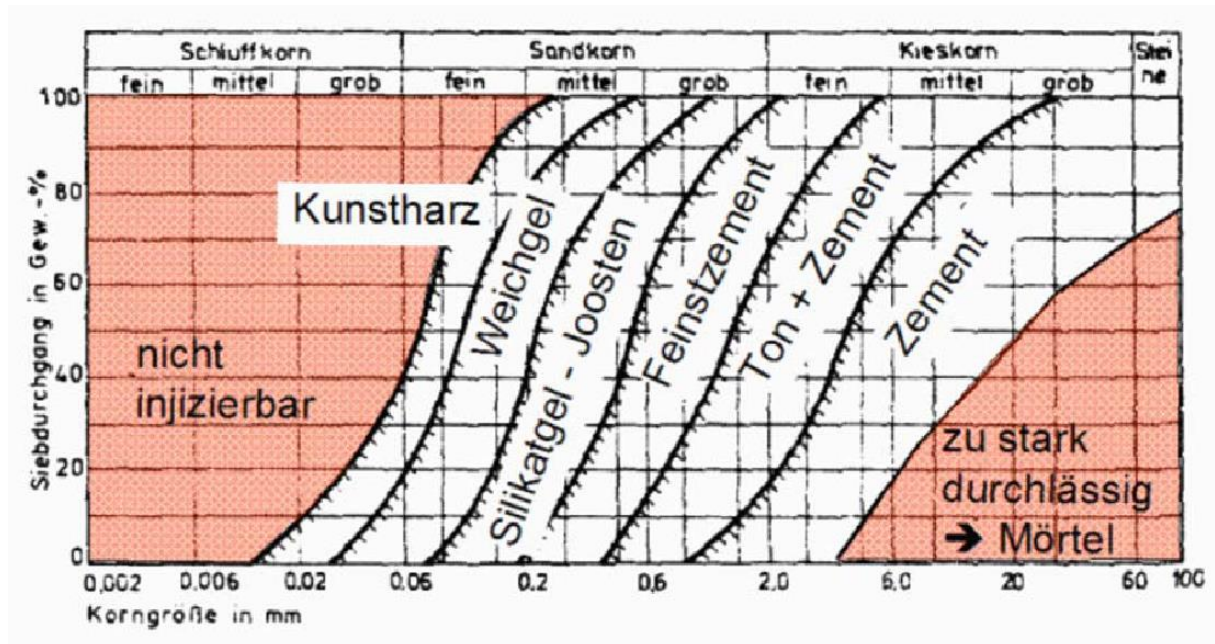


Abb. 4: Anwendungsgrenzen verschiedener Injektionsmaterialien im Boden[15]

Die Anforderungen an die Eigenschaften der zur Kontaktfugeninjektion einzusetzenden Injektionsmaterialien ergeben sich, genauso wie die Anforderungen an die Dichtbaustoffe der Streckenschlussbauwerke, aus dem geochemischen Milieu als auch den technischen Eigenschaften über die die Baustoffe verfügen müssen. Um aus Anforderungen an Baustoffe für den Einsatz im Salinar sowie Anforderungen an Injektionsmaterialien im Salinar die Anforderungen für die Kontaktfugeninjektion zusammenzustellen wurden Literaturstellen zusammengestellt, die hierzu bereits Anforderungen formuliert haben (Tab. 4).

Tab. 4: Zusammenstellung der in den Literaturstellen angeführten Anforderungen an Baustoffe und Injektionsmaterialien für den Einsatz im Salinar. Die einzelnen Anforderungen wurden für eine verbesserte Übersichtlichkeit 5 übergeordneten Gruppen zugeordnet.

	Baustoffe			Injektionsmaterialien		
Literatur	Krauke/ERAM P 174[16]	DBE/ERAM G 296[17]	Mischo[18]	Kaledin[19]	Ahrens, Onofrei[14]	Eyermann[20]
Zusätzliche Informationen (Art der Anforderung)	Verfüllung untertägiger Bohrungen mit Magnesiabinder	Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen - Salzbeton M2	Definition der Anforderungen an einen geeigneten Dammbaustoff für Dammbauwerke im Salinar	Kunstharze (Allgemeine Materialanforderungen für eine langzeitstabile Abdichtung gegenüber Salzlösungen)	Zementbasierte Injektionsmaterialien zur Abdichtung der Auflockerungszone im Salz	Injektionsmaterialien für den Einsatz im Salinar im allgemeinen
Rheologische Anforderungen						
Fließfähigkeit	Pumpfähigkeit über längere Strecken und sehr gute Fließeigenschaften	Der Fließwinkel beträgt $\leq 2,5$ Gon		Niedrige Viskosität	Muss in Mikrorisse mit Öffnungsweiten unter $100 \mu\text{m}$ eindringen können. 90 % der Partikel müssen kleiner als $10 \mu\text{m}$ sein.	Vorteilhafte rheologische Eigenschaften (Viskosität, Streckgrenze, annehmbare Topfzeit, annehmbare Aushärtezeit)
Verarbeitung		Salzbeton lässt Betonage „frisch-in-frisch“ zu	Eignung zum maschinellen Einbringen	Lange Topfzeit (über 1 Stunde)	Injizierbarkeit über 3 Stunden ohne Agglomeration	
Mechanische Anforderungen						
Festigkeit	Einaxiale Druckfestigkeit: 15 MPa (z.Z. keine Obergrenze)	Zugfestigkeit Beton > Haftzugfestigkeit Kontaktzone Beton-Salz	Druckfestigkeit geringer als die des umliegenden Gebirges		Hohe Druckfestigkeit	Eine Druckfestigkeit, die der des umgebenden Salzgebirges ähnlich ist
	Einaxiale zentrische Zugfestigkeit: >1 MPa	Druckfestigkeit > 18 MPa Zugfestigkeit > 1,25 MPa				
Verformungsverhalten	E-Modul: 5.000 MPa < 25.000 MPa		Funktionsbeständigkeit der Dichtelemente bei für das Salinar typischen Konvergenzraten			Möglichkeit der „Selbstheilung“ von Rissen
	Kriechverhalten: stationäre Kriechrate möglichst wie Steinsalz					
Schwinden		Autogenes Schwinden: unter $0,5 \text{ mm/m}$ Trocknungsschwinden (Zeitraum nach 56 Tagen) $\leq 0,2 \text{ mm/m}$		Kein oder sehr geringes Schwindmaß	Volumenstabil: Volumenabnahme von unter 1 % bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit	

Hydraulische Anforderungen						
Permeabilität	kf-Werte zwischen 10^{-8} bis 10^{-12} m/s (das entspricht ca. $1 \cdot 10^{-14}$ bis $1 \cdot 10^{-18}$ m ²)	Permeabilität geringer 10^{-19} m ²	Geringe Permeabilität ($< 10^{-16}$ m ²)			Niedrige Permeabilität
			Frühdichtigkeit ab Einbauzeitpunkt bei Gas- und Laugenandrang sowie Langzeitdichtigkeit gegen Gase und Laugen			
Porosität		Porosität zwischen 15 und 25 %		Keine Porosität des erhärteten Materials		
Chemische Anforderungen						
Funktionalität im Salinar		Keine Anlöse- oder Umlöseprozesse durch den Salzbeton	Abbindefähigkeit und Funktionstüchtigkeit im salinaren Milieu sowie Alterungsbeständigkeit (mehrere hundert Jahre)	Keine chemische Reaktionen zwischen dem Dichtmaterial und den salinaren Komponenten (insbesondere Salzlösungen);		
Beständigkeit gegenüber salinaren Lösungen		Das Feststoffvolumen des Salzbetons ohne Porosität, das durch einen Kubikmeter Mg-gesättigter Lösung bis zur vollständigen Zerstörung der CSH-Phasen umgesetzt werden kann sollte ≤ 3 m ³ betragen.	Laugenbeständigkeit (NaCl-gesättigt sowie stark MgCl ₂ und CaSO ₄ -haltig)		Unlöslich: (möglichst geringer Gehalt an Calciumhydroxid, welches die löslichste Komponente von Beton ist.	Hoher Widerstand gegenüber chemischen Reaktionen und Korrosion
Abgabe von Überschusslösung/Bluten		Abgabe von Überschusslösung nur im beschränkten Maße		Keine freien Lösungsmittel (Verflüchtigung der leichten Fraktionen der Lösungsmittel)	Niedriger Wassergehalt: Minimaler Wasser/Zement (W/Z) Wert und kein Bluten	Kein Bluten (Abgabe von Überschusslösung beim Abbinden)
Weitere			Anbindeverhalten an das umgebende Salzgebirge		Niedriger Anteil an Fließmitteln, da diese zu Volumenverringerungen beim Abbinden führen können.	
			Quelldruck und Quellvermögen			
			Gesundheitliche Eignung			
Thermische Anforderungen						
Einsatzbereich	Temperaturbeständigkeit $< 80^\circ\text{C}$		Funktionstüchtigkeit bei Temperaturen ($> 40^\circ\text{C}$)			
Temperaturentwicklung beim Abbinden		Obergrenze des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten bei $4,0 \cdot 10^{-5}$ 1/K (Entspricht dem Wert für Steinsalz)				
		Geringe adiabate Temperaturerhöhung				

Bevor auf die Anforderungen an die Materialeigenschaften der Injektionsmaterialien eingegangen wird, sollen zuerst allgemeine Anforderungen an Injektionsmaterialien zum untertägigen Einsatz im Salinar betrachtet werden. Wenn diese Anforderungen nicht erfüllt werden, ist es nicht möglich das jeweilige Injektionsmaterial einzusetzen, Die Anforderungen können als Ausschlusskriterium für eine weitere Berücksichtigung des jeweiligen Materials betrachtet werden. Zu diesen allgemeinen Anforderungen gehören:

- Transport + Lagerung: Ein einfacher Transport des Injektionsmaterials bis zur Verarbeitungsstelle unter Tage muss möglich sein, wofür sich Einzelbinde, wie z.B. Kanister oder Sackware, am besten eignen. Da eine Verarbeitung des Materials nicht sofort möglich ist, muss eine Lagerung über mehrere Wochen oder Monate hinweg am Einsatzort ohne chemische oder physikalische Veränderungen des Injektionsmaterials sowie andere die Eigenschaften verändernden Einflüsse möglich sein. Insbesondere ist hier auf eine Beeinflussung des Injektionsmaterials durch Temperatur oder Feuchtigkeitseinflüsse zu achten. Dies ist durch ein geeignetes Qualitätssicherungsprogramm zu überwachen.

Bei hydraulisch abbindenden Baustoffen oder bei Baustoffen die aus zwei Komponenten angemischt werden, steigt die Viskosität mit zunehmender Zeit. Zusammen mit der beengten räumlichen Situation unter Tage können sich hieraus Transportwege für das Injektionsmaterial bis zur Injektionsstelle ergeben, wobei gewährleistet werden muss, dass das Injektionsmaterial zum einen über längere Strecken verpumpbar ist und zum anderen die Eigenschaften nicht negativ beeinflusst werden.

- Arbeits + Gesundheitsschutz: Baustoffe, die untertage zum Einsatz kommen sollen, müssen gemäß der Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV) zugelassen werden. Hierbei wird unter anderem die Exposition der Beschäftigten mit zulassungspflichtigen Stoffen unter der Berücksichtigung der besonderen Situation unter Tage vorgenommen, wobei die Gefährdung durch physikalische oder chemische Vorgänge betrachtet wird[21]. Zulassungen von Baustoffen für den Einsatz unter Tage werden im Allgemeinen durch das Regierungspräsidium der Bezirksregierung Arnsberg erteilt, weswegen die Liste mit der Zusammenstellung aller für den untertägigen Einsatz zugelassenen Baustoffe auch „Arnsberger Liste“ genannt wird[22]. Diese Zulassung wird durch die lokalen Bergbehörden anerkannt und es bedarf keiner weiteren Genehmigung.
- Verarbeitbarkeit: Eine weitere Voraussetzung für den Einsatz eines Injektionsmaterials stellt die Verarbeitbarkeit dar. Hierbei wird darauf geachtet, dass das einzusetzende Injektionsmaterial mit Standardmaschinen verarbeitet werden kann, da sonst ein erheblicher Mehraufwand für eine Verarbeitung nötig ist.
- Partikelgröße unter 30 μm : Um ein Eindringen der partikelgestützten Injektionsmaterialien in Wegsamkeiten mit Öffnungsweiten unter 150 μm zu

ermöglichen darf die Partikelgröße der Injektionsmaterialien in Suspension 30 µm nicht überschreiten. Diese Partikelgröße ergibt sich aus dem in der DIN EN 12715[23] gegebenen Verhältnis von ungefähr 3:1 zwischen größter Partikelabmessung und der Rissweite in die die Partikel noch eindringen kann.

- Beständigkeit gegenüber salinaren Lösungen: Durch unterschiedliche Szenarien kann es zu Lösungszutritten in das Grubengebäude kommen. Unabhängig ihrer Herkunft fließen diese Lösungen vor dem Zutritt an das Streckenverschlussbauwerk durch das Grubengebäude und haben hierbei die Möglichkeit sich mit den anstehenden Salzen aufzusättigen. Aufgrund der Aufsättigung ist ein Zutreten NaCl-ungesättigter Lösungen ausgeschlossen[24]. Die exakten Zusammensetzungen von zutretenden Lösungen sind daher standortabhängig zu betrachten, jedoch lässt sich grundsätzlich eine Unterscheidung zwischen Lösungen die im Kontakt mit Steinsalz oder Kaliformalionen getreten sind durchführen. Daher müssen die einzusetzenden Injektionsmaterialien gegenüber diesen Lösungen stabil sein. Basierend auf den Stabilitäten der Dichtbaustoffe Magnesiabeton und Salzbeton wird hinsichtlich zwei verschiedener Lösungszusammensetzungen unterschieden. Dies sind zum einen NaCl-gesättigte Lösungen und zum anderen Lösungen die über 50 g/l $MgCl_2$ enthalten. Im Kontakt mit NaCl-gesättigten Lösungen sowie Lösungen, die nur wenig $MgCl_2$ enthalten, ist Salzbeton der geochemisch stabilere Baustoff. Gegenüber Lösungen mit einem höheren $MgCl_2$ Gehalt ist Magnesiabeton der stabilere Baustoff[25]. Für die Bewertung der Injektionsmaterialien werden nur solche herangezogen, die mindestens im Kontakt mit einer der beiden salinaren Lösungen geochemisch stabil sind.

Einen weiteren wichtigen Punkt im Umgang mit Injektionsmaterialien stellt die Handhabbarkeit dar, wobei sowohl die Prozedur des Anmischens des Baustoffes betrachtet wird als auch eine anschließende Reinigung der Apparaturen sowie der Möglichkeit der Entsorgung der anfallenden Reinigungsmittel.

Neben diesen Allgemeinen Anforderungen an Injektionsmaterialien für den Einsatz unter Tage ergeben sich aus der in diesem Vorhaben betrachteten besonderen Situation des Einsatzes von Injektionsmaterialien im Salinar weitere Anforderungen. Um diese ableiten zu können wurde in einem ersten Schritt eine Übersicht von Anforderungen an Injektionsmaterialien und Baustoffe für den Einsatz im Salinar aus anderen Vorhaben erstellt (**Tab. 4**)

Einige der Anforderungen an den Baustoff Salzbeton, wie z.B. ein Fließwinkel von $\leq 2,5$ Gon oder eine möglichst geringe Temperaturentwicklung beim Abbindevorgang, haben als Anforderungen für Injektionsmaterialien keine oder allenfalls eine untergeordnete Bedeutung. Dafür wurden die Anforderungen um einzelne, für Injektionsmaterialien spezifische Anforderungen ergänzt, wie z.B. die detaillierte Betrachtung der Fließfähigkeit sowie der Partikelgrößenverteilung, die indirekt eine Aussage über das Eindringverhalten der betrachteten Baustoffe in Risse mit geringer Öffnungsweite ermöglicht. Die Bedeutung

unterschiedlicher Anforderungen hängt direkt von der Aufgabenstellung des Baustoffes bzw. des Injektionsmaterials ab. Die hierbei betrachtete Aufgabenstellung ist die Abdichtung des Kontaktbereichs zwischen einem Streckenverschlussbauwerk aus einem hydraulisch abbindenden Baustoff und Steinsalz. Injiziert werden sollen Wegsamkeiten/Risse mit Öffnungsweiten unter 150 µm. Daher werden sowohl an die partikelgestützten als auch die partikelfreien Injektionsmaterialien die gleichen Anforderungen gestellt, auch wenn es leichte Unterschiede hinsichtlich der erreichbaren Wegsamkeiten gibt. Generell lassen sich mit den partikelfreien Injektionsmaterialien eher kleinere Öffnungsweiten injizieren, wobei es bei der Injektion der Auflockerungszone im Steinsalz in der WIPP gelungen ist Wegsamkeiten mit einer Öffnungsweite von 3 µm (einzelner (Ausreißer) Wert), jedoch war es routinemäßig möglich Risse bis zu 8 µm Öffnungsweite mit einem Feinstzement zu injizieren[14].

In Anlehnung an die Gruppierung in **Tab. 4**, die bei der Literaturrecherche zu Anforderungen an Injektionsmaterialien und Baustoffe für den Einsatz im Salinar vorgenommen wurde, werden die Anforderungen an die Injektionsmaterialien im weiteren Verlauf 4 Gruppen bzw. Kategorien zugeordnet. Diese sind: Rheologische Anforderungen, Mechanische Anforderungen, Hydraulische Anforderungen und Chemische Anforderungen. Die vier Kategorien sowie deren untergeordneten Anforderungen sind in **Tab. 5** dargestellt.

Tab. 5: Zusammenstellung der Anforderungen an Injektionsmaterialien für die Kontaktfugeninjektion im Salz

Anforderung	Unterziele
Rheologische Anforderungen	Dynamische Viskosität
	Kontaktwinkel
	Oberflächenspannung
	Topfzeit
	Partikelgrößenverteilung
Mechanische Anforderungen	Druckfestigkeit
	Schwindverhalten
	Haftzugfestigkeit
	Verformungsverhalten/ Plastizität
Hydraulische Anforderung	Permeabilität
Chemische Anforderungen	Alterungsbeständigkeit im salinaren Milieu
	Temperaturentwicklung
	Lösungsstabil gegenüber dem Salzgebirge
Handhabbarkeit	Reinigung

Rheologische Anforderungen

Die Rheologie beschreibt das Fließverhalten von Stoffen, in diesem Falle Suspensionen oder Flüssigkeiten. Die untersuchten Baustoffe sollen zur Injektion der Kontaktfuge zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge eingesetzt werden. Damit es den untersuchten Stoffen möglich ist in die Wegsamkeiten der Kontaktfuge einzudringen müssen diese aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Spaltöffnungsweiten von unter 150 µm sehr gut fließfähig

sein. Um die rheologischen Eigenschaften der untersuchten Materialien beurteilen zu können, wurden die Viskosität, die Kontaktwinkel für das System Injektionsmaterial-Luft im Kontakt mit Steinsalz sowie die Oberflächenspannung für das System Injektionsmaterial-Luft herangezogen werden.

Neben der Fließfähigkeit spielt auch die Verarbeitbarkeit eine bedeutende Rolle, wobei als Maß für die Verarbeitbarkeit die Topfzeit verwendet werden wird. Die Topfzeit gibt die Zeit nach dem Anmischen des Baustoffes an, in der dieser verarbeitet werden kann. Hierbei werden längere Topfzeiten der einzelnen Baustoffe als vorteilhaft angesehen. Für Feinstzementsuspensionen, die in der Waste Isolation Pilot Plant (Endlager für Transuranische radioaktive Abfälle im Bundesstaat New Mexico, USA) zur Injektion der Auflockerungszone im Bereich der Sohle einer im Steinsalz aufgefahrenen Kammer zum Einsatz kommen sollen, wird die Anforderung gestellt, dass diese über 3 Stunden nach dem Anmischen ohne Agglomeration noch injizierbar sein müssen[14].

Ein weiterer wichtiger Materialkennwert für Injektionsmaterialien ist die Partikelgröße der Feststoffe. Mit abnehmender Partikelgröße können diese in Risse mit geringeren Spaltöffnungsweiten eindringen, wobei in DIN EN 12715 ein Verhältnis von ungefähr 3:1 zwischen größter Partikelabmessung und der Rissweite in die die Partikel noch eindringen können. Für die Injektion von Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten eignen sich daher entweder partikelfreie Injektionsmaterialien oder Suspensionen mit möglichst kleinen Feststoffpartikeln.

Mechanische Anforderungen

Nach der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks wird dieses infolge des Gebirgsdrucks sowie durch Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrundwechselwirkungen (z.B. Verformungsbehinderungen oder Setzungen) mechanisch beansprucht[26]. Die Strecken vor und hinter dem Verschlussbauwerk werden nach dessen Errichtung z.B. mit Salzgrus verfüllt auf den das Salzgebirge aufläuft, wobei der Salzgrus kompaktiert wird. Das Bauwerk weist ein anderes Verformungsverhalten als der unkompaktierte Salzgrus auf, wodurch es bei der Kompaktion und Setzung des Salzgruses zur mechanischen Belastung des Streckenverschlussbauwerks kommen kann. Um die mechanische Beanspruchung durch die Konvergenz ohne Beeinträchtigung der abdichtenden Funktion des injizierten Baustoffes innerhalb der Kontaktfuge zu überdauern, ergeben sich Anforderungen an dessen mechanische Eigenschaften.

An erster Stelle sind hierbei die Druck- bzw. Zugfestigkeit der Injektionsmaterialien sowie die Haftzugfestigkeit zwischen Injektionsmaterial und Baustoff und Gebirge zu nennen, da es durch die Auflast des überlagernden Gebirges sowie der Zwangsverformungen sowohl zu einer Druckbeanspruchung, als auch lokal zur Ausbildung von Zugkräften zwischen Bauwerk und Gebirge kommen kann. Durch eine hohe Zug- und Druckfestigkeit der verwendeten

Injektionsmaterialien kann bei diesen Belastungen eine Beeinträchtigung der abdichtenden Funktion vermieden werden.

Falls es zu Bewegungen im Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge nach der Injektion der Kontaktfuge kommt, z.B. infolge der Konvergenz des auflaufenden Gebirges, ist es vorteilhaft, wenn das injizierte Material plastisch und ohne Rissbildung auf diese Bewegung reagiert. Daher ist ein plastisches Verformungsverhalten eines Injektionsmaterials als vorteilhaft anzusehen.

Zudem soll das Injektionsmaterial kein, oder allenfalls nur ein geringes Schwindverhalten aufweisen, da es durch Schwinden zur Ausbildung von Wegsamkeiten in bereits injizierten Bereichen der Kontaktfuge kommen kann.

Hydraulische Anforderungen

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers für Radioaktive Abfälle Morsleben[26] wurde die Anforderung an Baustoffe für Streckenverschlussbauwerke gestellt, dass diese eine Permeabilität von unter $k \leq 10^{-19} \text{ m}^2$ aufweisen. Um sicherstellen zu können, dass die ebenfalls im Planfeststellungsverfahren[11] geforderte integrale Permeabilität von $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$ für den Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge erreicht werden kann dürfen die Injektionsmaterialien keine höhere Permeabilität als der Baustoff des Streckenverschlussbauwerks aufweisen.

Chemische Anforderungen

Eine wichtige Anforderung an das einzusetzende Injektionsmaterial ist, dass dieses chemisch stabil ist im Kontakt mit den Baustoffen des Streckenverschlussbauwerks, den Salzen der Streckenkontur sowie zutretenden Lösungen.

Zu den weiteren Anforderungen zählt eine geringe Temperaturentwicklung beim Abbinden des Injektionsmaterials, da es somit im geringeren Maße zu thermischen Volumenänderungen kommt, und die Stabilität der Salze der Streckenkontur nicht beeinträchtigt wird. Bei erhöhten Temperaturen und geringem Druck ist Carnallit nicht stabil und zerfällt unter der Freisetzung von Kristallwasser bei Temperaturen von über 85°C[19, 27].

Ein wichtiger Punkt ist die Alterungsbeständigkeit des Injektionsmaterials im salinaren Milieu. Der Nachweis, dass es eine Alterungsbeständigkeit des Injektionsmaterials auch für lange Bemessungszeiträume von bis zu 50.000 Jahren[10] für die Streckenverschlussbauwerke ausgelegt werden, stabil sind, kann über natürliche Analoga erfolgen. Natürliche Analoga sind in natürlichen Systemen ablaufende Prozesse, die mit den zu erwartenden Prozessen in einem Endlager vergleichbar sind. Für die Injektionsmaterialien im Kontakt mit dem Salz der Streckenkontur bedeutet das, wenn Materialien der gleichen oder ähnlicher stofflicher Zusammensetzung natürlicherweise in Salzstöcken vorkommen, ist der Nachweis der Langzeitverträglichkeit des Injektionsmaterials mit den Salzen der Streckenkontur gegeben.

Handhabbarkeit

Zusätzlich sollten die Injektionsmaterialien über die Verarbeitbarkeit hinaus einfach in der Handhabung sein. Hierzu zählt insbesondere die Reinigung der verwendeten Apparaturen nach der Injektionsmaßnahme, wobei die folgenden Fragen eine zentrale Rolle spielen:

- Lassen sich die Apparaturen durch einfaches Spülen mit Wasser reinigen, oder müssen spezielle Lösungsmittel verwendet werden?
- Kann es durch die Lösungsmittel zu Beschädigungen an der Injektionstechnik kommen?
- Muss über ein Spülen mit Wasser oder Lösungsmittel hinaus mechanisch gereinigt werden?
- Mit welchem Aufwand ist es möglich, Anhaftungen oder ausgehärtetes Injektionsmaterial zu entfernen?
- Wie müssen die bei der Injektion anfallenden flüssigen und festen Reststoffe entsorgt werden?

2 Beschreibung der Gesteine

2.1 Lösungsverhalten der Gesteine

Bei der Betrachtung eines lösenden Angriffs durch zutretende Lösungen werden nur zwei verschiedene Lösungszusammensetzungen berücksichtigt. Dies ist zum einen eine NaCl-gesättigte Lösung und zum anderen eine IP21-Lösung (Q-Lösung). Die IP21-Lösung ist eine Lösung die im Lösungsgleichgewicht mit den Salzen Halit-Kieserit-Carnallit-Kainit steht (**Tab. 6**).

Die Auswahl wurde im Planfeststellungsverfahren für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben getroffen und wie folgt begründet[24]: „Ungesättigte Lösungen werden sich am Steinsalz entlang der Wegsamkeiten in der Salzstruktur und im Grubengebäude sowie im Salzversatz aufsättigen. Dies wird überwiegend bereits am Salzspiegel geschehen,.... Das Eindringen untersättigter Lösungen bis in tiefere Sohlen ist deshalb sehr unwahrscheinlich und braucht in der Sicherheitsanalyse nicht unterstellt zu werden.“

„Beim Kontakt von NaCl-Lösung mit Kalilagern (Carnallit oder Hartsalz) finden weitere Löseprozesse statt. Dabei Lösen sich die Kalisalze auf, zugleich werden andere Mineralien ausgefällt („Umlösung“). Dieser Prozess läuft solange ab, bis die Lösung mit den verfügbaren Mineralien der Kalisalze im Gleichgewicht steht oder keine Kalisalze mehr zugänglich sind. Die Entwicklung der Lösung ist komplex und hängt stark von der Zusammensetzung des Salzgesteins und seiner räumlichen Verteilung ab. Im Hinblick auf die Neubildung von Hohlräumen wird die Umsetzung einer NaCl-gesättigten Lösung bis zum invariant Punkt IP21 betrachtet. Netto ist die Umlösung am Carnallit bis zum Punkt IP21 mit einer erheblichen Hohlraumvergrößerung verbunden. Im Hinblick auf mögliche Wechselwirkungen zwischen Versatzmaterial und Lösung wird die gesamte Bandbreite an Lösungszusammensetzungen zwischen reiner, an NaCl gesättigter Lösung und IP21-Lösung betrachtet.“

Tab. 6: Gehalte der gelösten Stoffe in IP21 Lösung (Bei 17° C) und gesättigter NaCl-Lösung (Bei 20°C)[28]

	Konzentration g/1000g H ₂ O					Stabile Bodenkörper
	MgSO ₄	MgCl ₂	KCl	NaCl	H ₂ O	
IP21-Lösung	38	354	45	24	1000	Carnallit – Kainit – Sylvin – Halit
Gesättigte NaCl-Lösung	0	0	0	359	1000	Halit
	Konzentration mol/1000 mol H ₂ O					
	Na	K	Ca	Mg	SO ₄	Cl
IP21-Lösung	8,3410	10,0165	0,0180	76,5646	5,6568	8,892

Im folgenden Abschnitt soll eine Charakterisierung der Evaporitminerale und eine qualitative Einschätzung der Löslichkeiten der einzelnen Salzkomponenten erfolgen. Die Beschränkung auf

eine qualitative Einschätzung erfolgt, da die Löslichkeiten der einzelnen Salzkomponenten von mehreren Faktoren abhängig sind. So lässt sich bei Lösungsversuchen im Labor feststellen, dass die Sättigungskonzentration der einzelnen Salze abhängig von der in dem lösenden Fluid vorhandenen, gelösten Salze ist.

Neben diesen im Labor ermittelbaren Eigenschaften haben weitere Eigenschaften, wie z.B. Schichtung, Schichtmächtigkeit, Korngröße des Salzes, Verwachsung des Salzes mit anderen Evaporitmineralen, Klüftigkeit des Salzes eine entscheidende Rolle für den Ablauf des lösenden Angriffs eines teilgesättigten Fluids auf das Salz im Gebirge[28].

Die ausgewählten Minerale stellen die am häufigsten auftretenden Minerale in Salzstöcken dar. Seltene, nur in untergeordneten Mengen oder nur in einzelnen Salzstöcken vorkommende Evaporitminerale wurden nicht berücksichtigt.

In **Tab. 9** ist eine Übersicht über die in diesem Kapitel näher betrachteten Salze und ihr Lösungsverhalten im Kontakt mit den beiden Fluiden aufgelistet.

2.2 Carnallitit

Carnallitit ist ein Gemenge verschiedener Evaporitminerale, und ist unter anderem aus den Mineralen Carnallit, Kieserit und Halit zusammengesetzt.

Tab. 7: Einzelne Evaporitminerale des Carnallitit[29]

Carnallit	$\text{KMgCl}_3 \times 6 \text{H}_2\text{O}$
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$
Kainit	$\text{KMg}(\text{ClSO}_4) \times 3 \text{H}_2\text{O}$
Halit	NaCl
Anhydrit	CaSO_4

Je nach Lagerstätte beziehungsweise auch innerhalb einer Lagerstätte in unterschiedlichen Evaporationsfolgen variieren die Verhältnisse der einzelnen Salzminerale des Carnallitits zueinander. Das Vorkommen der einzelnen Minerale ist abhängig von dem Grad der Eindunstung des Meerwassers. Bei fortschreitendem Eindunstungsgrad fallen zuerst die Carbonate aus, dann Gips und erst wenn 89 % des Meerwassers verdunstet sind fällt Halit aus. Nachfolgend fallen dann die Kalisalze aus. Die Ausfällung der Kalisalze kann näherungsweise im Modellsystem $\text{Na-K-Ca-Mg-SO}_4\text{-Cl-H}_2\text{O}$ modelliert werden[30]. Unter der Annahme, dass Ca-Sulfat sehr früh auskristallisiert, und NaCl stets im Überschuss vorhanden ist, lassen sich die Verhältnisse im Dreiecksdiagramm $\text{K}_2\text{-Mg-SO}_4$ darstellen. Der blau-schwarz gestrichelte Pfad in **Abb. 5a** stellt den Kristallisationspfad dar. Bei zunehmender Eindunstung kristallisiert zuerst Blödit aus, dann Kainit, Kieserit, Carnallit und zum Schluss Bischofit.

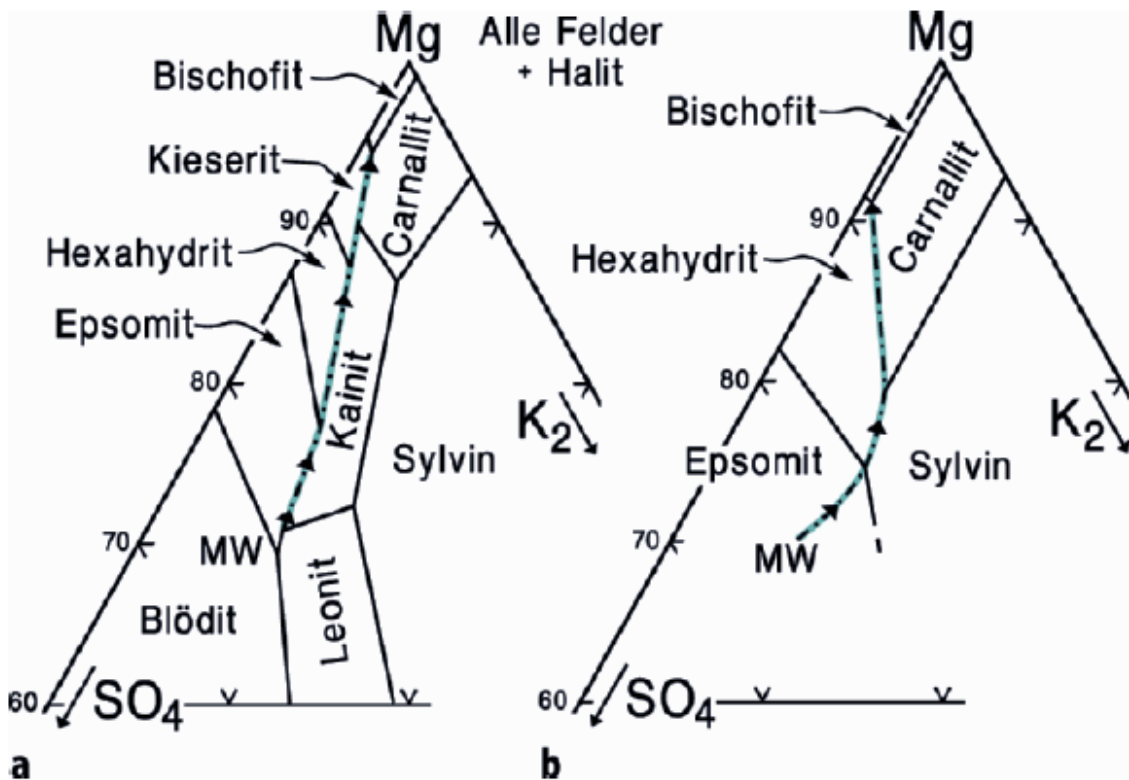


Abb. 5: Das System Na-K-MgSO₄-Cl-H₂O bei 25° und 1 bar. a) stabile Gleichgewichte, b) metastabile Gleichgewichte[31]

Beim Zutritt von NaCl-gesättigten Lösungen wird das Magnesiumchlorid aus dem Carnallit herausgelöst, bis die angreifende Lösung MgCl₂ gesättigt ist. Dies geschieht nach folgenden Reaktionen:



Der Sylvin reagiert dann mit folgender Reaktion mit dem Kieserit zu Kainit weiter:



Nach Gleichung 1 wird das gesamte, im Kristallgitter des Carnallit gebundene Kristallwasser freigesetzt (6 Mol Wasser pro Mol Carnallit). Gemäß Gleichung 2 werden 3 Mol H₂O wieder in das Kristallgitter des Kainit eingebaut. Es werden bei der Auflösung von 100 g Carnallit 26 g Wasser freigesetzt. Das freigesetzte Kristallwasser ist sowohl MgCl₂ als auch NaCl untersättigt und führt zur weiteren Auflösung der umgebenden Salze.

Neben der guten Löslichkeit und der Freisetzung des Kristallwassers bei der Auflösung hat der Carnallit eine weitere Eigenschaft, die den technischen Umgang mit diesem Mineral erschwert. Der Carnallit ist hygroskopisch und nimmt Feuchtigkeit aus den Grubenwettern auf. Infolge der Feuchtigkeitsaufnahme kommt es zur Verwitterung und Entfestigung des Carnallits. Die Stabilität des Carnallits ist sowohl von der Temperatur als auch von der Luftfeuchtigkeit

abhängig und in **Abb. 6** dargestellt. Unterhalb der blauen Linie ist der Carnallit stabil, und oberhalb der blauen Linie kommt es zur Lösung des Carnallits durch die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit.

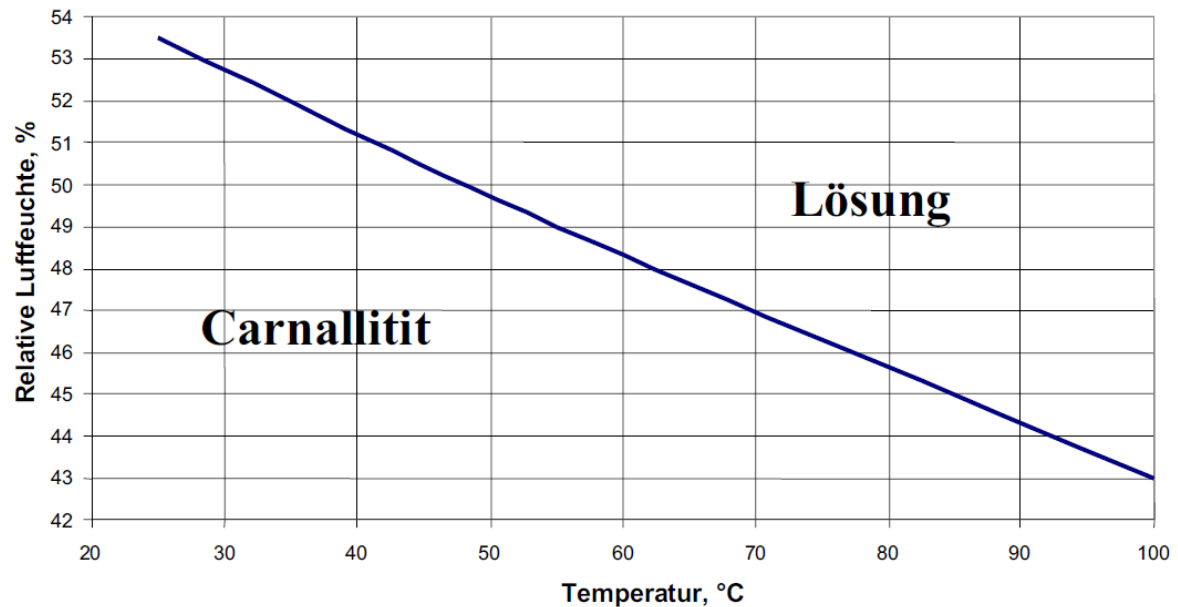


Abb. 6: Sättigungsfeuchte von Carnallit[32]

2.3 Kieserit

Kieserit ist ein kristallwasserhaltiges Magnesiumsulfat ($\text{MgSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$) und wird zu den Hartsalzen gezählt. Gemäß der Kristallisationsabfolge aus **Abb. 5** ist Kieserit zu den leichtlöslichen Evaporitmineralen zu zählen, geht jedoch langsamer in Lösung als Carnallit[33]. In NaCl-Lösungen kommt es zur Lösung von Kieserit. Hierbei kommt es zum Anstieg des Sulfatgehalts der angreifenden Lösung bis hin zur Sättigung[33]. Wenn die angreifende Lösung KCl enthält, reagiert der Kieserit nach dem Erreichen der Sulfatsättigung mit dem KCl der Lösung zu Kainit (Gleichung 2). In gesättigten MgCl_2 -Lösung hingegen ist Kieserit stabil.

Im Kontakt mit Grubenwettern ist Kieserit hygroskopisch und reagiert unter folgender Gleichung mit der in den Grubenwettern enthaltenen Luftfeuchtigkeit zu Epsomit:



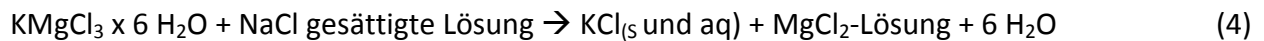
Bei der Umwandlung von Kieserit zum Epsomit ($\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$) wird kein Kristallwasser freigesetzt, es kommt aber zu einer Entfestigung des Salzgesteins infolge der Reaktion von Kieserit zu Epsomit[33]. In Abhängigkeit der Temperatur und Feuchte der Grubenwetter kann auch Hexahydrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) entstehen.

2.4 Sylvin

Sylvin hat die chemische Formel KCl, und wird zu der Gruppe der Hartsalze gezählt. Als Hartsalze werden Gesteine bezeichnet deren Mohshärte größer ist als die von Halit[29].

In der Kristallisationsabfolge der marinen Evaporite (**Abb. 5**) ist der Kristallisationspfad mit der blau-gestrichelten Linie eingezeichnet. Hierbei fällt auf, dass das Stabilitätsfeld von Sylvin nicht im Bereich des Kristallisationspfades liegt. Sylvin wird nicht während der Evaporationsabfolge sondern später durch Auflöse- und Umlöseprozesse gebildet[29].

Bei Auflösung von Carnallit in Anwesenheit von MgCl₂-Lösungen kommt es zur Ausfällung von Sylvin, da die Löslichkeit von Sylvin bei zunehmender MgCl₂ Konzentration sinkt[28]. In der folgenden Gleichung (Gleichung 4) ist die Auflösungsreaktion dargestellt.



Bei zunehmender Auflösung des Carnallit kommt es also zur Ausfällung von KCl. Durch diese Reaktion kommt es zur „Veredelung“ von carnallitischen Lagen in Salzstöcken. Durch die Auflösung und Ausfällungsprozesse wird der Kaliumgehalt der Lagerstätte im Bereich der zufließenden Lösungen erhöht.

Reine MgCl₂-Lösungen sind allerdings in Bezug auf KCl untersättigt und können Sylvin lösen, wohingegen eine IP21-Lösung im Lösungsgleichgewicht mit Sylvin ist.

2.5 Anhydrit

Anhydrit ist ein Calciumsulfat (CaSO₄). Im Marinen Milieu entsteht Anhydrit durch die Entwässerung von Calcium-Dihydrat (Gips), dass bei der Eindunstung von Meerwasser gebildet wird. Diese Bildung erfolgt aufgrund der geringen Löslichkeit der Calciumsulfate vor der Kristallisation der Chloride (Halit, Carnallit, etc.) und Magnesiumsulfate. Anhydrit kann bei geringen Umgebungstemperaturen und bei Anwesenheit wässriger Lösungen auch wieder in Gips umgewandelt werden. Dieser Prozess tritt häufig in den Randzonen von Evaporitformationen auf und führt an der oberen Begrenzung von Salzstöcken zur Bildung des Hutgesteins. Das Hutgestein dichtet den Salzstock zu den umliegenden, wasserführenden Schichten ab.

Die Löslichkeit von Anhydrit ist sowohl von der Temperatur als auch von dem Salzgehalt der zutretenden Lösung abhängig (**Tab. 8**). Mit zunehmender Temperatur verringert sich die Löslichkeit von Anhydrit und mit zunehmendem Salzgehalt in der Lösung steigt die Löslichkeit zunächst an, um dann wieder leicht zu sinken^[34].

Tab. 8: Zusammensetzung an Halit, Halit und Anhydrit sowie Halit und Gips gesättigten Lösungen nach EQ3/6-Berechnungen (25°C)

	Halit-gesättigt		Halit-Anhydrit-gesättigt		Halit-Gips-gesättigt	
	[Ma.-%]	[g/Liter]	[Ma.-%]	[g/Liter]	[Ma.-%]	[g/Liter]
Na ⁺	10,340	123,695	10,260	123,385	10,257	123,384
K ⁺	-	-	-	-	-	-
Mg ²⁺	-	-	-	-	-	-
Ca ²⁺	-	-	0,1287	1,548	0,133	1,600
Cl ⁻	15,945	190,752	15,822	190,274	15,818	190,272
SO ₄ ²⁻	-	-	0,307	3,711	0,319	3,836
NaCl	26,29	314,45	26,08	313,66	26,08	313,66
H ₂ O	73,715	881,853	73,481	883,682	73,473	883,808
Summe	100,000	1.196,3	100,000	1.202,6	100,000	1.202,9

Da sowohl NaCl- als auch IP21-Lösungen in Bezug auf Calcium untersättigt sind wird Anhydrit durch beide Lösungen gelöst, was jedoch, aufgrund der geringen Löslichkeit des Anhydrits, von geringer Bedeutung ist. Zudem nimmt der Anhydrit H₂O aus der Lösung auf, wodurch Gips gebildet wird, wie in Gleichung 5 dargestellt ist. Bei der Umwandlung von Anhydrit zu Gips kommt es zu einer Volumenzunahme.



2.6 Halit

Halit (NaCl), auch als Steinsalz bezeichnet ist das mengenmäßig am häufigsten vorkommende Mineral in Salzstöcken und kristallisiert aus, wenn ca. 89 % des Meerwassers verdunstet sind. Mit einer Löslichkeit von 358 g/l bei 20 °C zählt Halit zu den sehr gut löslichen Mineralen. Aufgrund der hohen Löslichkeit sind Zutritte von ungesättigten Lösungen in das Gestein Steinsalz sehr kritisch. Da in diesem Bericht jedoch nur der Zutritt von NaCl-gesättigter Lösung und IP21-Lösung (die in Bezug auf NaCl auch gesättigt ist) betrachtet werden sind Löseerscheinungen im/von Halit durch die beiden zufließenden Lösungen auszuschließen.

Mit einer Aufsättigung ins Grubengebäude zutretender ungesättigter Wässer ist aufgrund der hohen Salzlöslichkeiten in kurzer Zeit zu rechnen. Des Weiteren ist es durch sogenannte Vorschüttungen möglich, die Aufsättigung der Lösungen zu beeinflussen und eine Lösung mit einer gewünschten Zusammensetzung herzustellen.

2.7 Übersicht über die Löslichkeit der Salze

IP21 Lösung ist in Bezug auf Carnallit, Sylvit, Kainit Halit und Polyhalit gesättigt und die Mineralphasen bilden stabile Bodenkörper. Durch die Auflösung von Kieserit durch IP21 Lösung kommt es zur Erhöhung des MgSO₄ Gehalts der Lösung. Wenn ausreichend KCl in der Lösung vorhanden ist, dann reagiert das MgSO₄ mit dem KCl zu Kainit, welches in IP21 Lösung stabil ist[28]. Neben Kieserit ist auch Anhydrit in Q-Lösung lösbar.

In gesättigter NaCl-Lösung ist nur Halit stabil. Die Löslichkeiten der Salze Carnallit, Kieserit und Sylvin in gesättigter NaCl-Lösung sind abhängig von der Temperatur. Die Löslichkeit von Anhydrit in gesättigter NaCl-Lösung ist mit 7,09 g/l bei 20°C mehr als doppelt so hoch wie in reinem Wasser[35].

Tab. 9: Ausgewählte Evaporitminerale und deren Lösungsverhalten im Kontakt mit gesättigter IP21- und NaCl-Lösung

Mineralname	Lösbarkeit in IP21-Lösung	Quellenangabe	Lösbarkeit in gesättigter NaCl-Lösung	Quellenangabe
Carnallit		[8]	löslich	[8]
Kieserit	löslich	[8]	löslich	[8]
Sylvin		[8]	löslich	[8]
Anhydrit	(vernachlässigbar) löslich	[53]	löslich	[52]
Halit		[8]		[8]

3 Injektionsmaterialien

Zur Verfestigung von Böden im Tiefbau kommen verschiedene Injektionsmaterialien zum Einsatz. Die Auswahl des für das jeweilige Vorhaben passenden Injektionsmaterials erfolgt in der Regel über die Korngröße des Bodens, der injiziert werden soll. Näherungsweise lässt sich sagen, dass mit steigendem Korndurchmesser des Bodens auch die Porenräume zwischen den einzelnen Körnern größer werden. Somit werden für die Injektion des Bodens mit abnehmender Korngröße zunehmend Injektionsmaterialien mit kleineren Feststoffkorngrößen und besseren Fließeigenschaften benötigt. Hierbei besitzen alle Injektionsmaterialien eine untere sowie eine obere Anwendungsgrenze. Die untere Anwendungsgrenze gibt die kleinste Rissweite oder den Porenhalsdurchmesser an, in den das Injektionsmaterial eindringen kann, ohne dass es zu einer Filterkuchenbildung kommt. Wenn die Poren/Risse im Untergrund zu groß sind, fließt das Injektionsmaterial ab, ohne die Poren/Risse zu verfüllen. Die obere Anwendungsgrenze eines Injektionsmaterials gibt die Rissweite/ Porengröße an, ab der es nicht mehr möglich ist mit diesem Injektionsmaterial im Boden vorhandene Klüfte oder Porenräume zu verfüllen. In **Abb. 4**, werden die oberen und unteren Anwendungsgrenzen gängiger Injektionsmaterialien angegeben.

3.1 Partikelgestützte Injektionsmaterialien

3.1.1 Mörtel

Injektionsmörtel werden zum Injizieren von kavernen Strukturen, Klüften und Störungszonen mit Spaltöffnungsweiten von über 1 cm verwendet[1]. Injektionsmörtel kommen zum Einsatz, wenn das zu injizierende Medium für eine Zementinjektion zu hohe Permeabilitäten aufweist[15]. Injektionsmörtel eignen sich daher nicht für die Kontaktfugeninjektion.

3.1.2 Stöckerbeton

Beispielhaft für einen Mörtel auf Basis eines Magnesiabinders soll der Stöckerbeton vorgestellt werden. Seine ursprüngliche Verwendung fand der Stöckerbeton im Steinkohlenbergbau im Saargebiet. Dort wurde der Stöckerbeton als Injektionsmaterial verwendet, um den Streb-/Streckenübergang sowie das Strebhangende bei Störungszonen und Ausbrüchen zu verfestigen. Später wurde der Stöckerbeton auch im Steinkohlenbergbau im Ruhrgebiet eingesetzt.

Zusammensetzung:

Stöckerbeton hat folgende Zusammensetzung:

Zur Herstellung von 0,17 m³ Stöckerbeton dient folgende Mischung[36]:

60 Liter H₂O

100 kg MgCl₂

- Keine chemischen Beimischungen

75 kg MgO

- Kaustisch gebrannter Magnesit
- Keine chemische Beimischung

50 kg Bentonit

- Tonmineral Montmorillonit

Die Basis des Stöckerbetons ist eine Magnesiumchlorid-Lösung, die mit dem Magnesiumoxid schnell und hart abbindet und dabei Fremdstoffe einschließen kann. Das zugegebene Bentonitmehl stabilisiert die Trübe und verbessert beim Pumpen ihre Fließeigenschaften.

Zusätzlich kann der Mischung noch Borax (Na₂B₄O₇ x 10 H₂O) zugegeben werden, um die Verarbeitungsdauer, die Festigkeit und die abdichtende Wirkung zu verbessern[37].

Herstellung/ Handhabung:

Die einzelnen Komponenten werden in der folgenden Reihenfolge bei laufendem Rührwerk in den Mischer gefüllt und anschließend hoctourig gemischt:

Wasser, Magnesiumchlorid-Lösung, Magnesiumoxid, Bentonit

Der Stöckerbeton hat eine Zulassung nach GesBergV vom Landesoberbergamt Nordrhein-Westfalen am 22.09.1995 erhalten.

Besondere Hinweise zum Umgang gab es bei der Komponente „Magnesiumoxid“, da diese mit Feuchtigkeit stark alkalisch reagiert und als ätzend einzustufen ist. Daher erfolgten folgende Vorschriften für den Umgang mit der Komponente „Magnesiumoxid“:

- Wenn sich bei der Handhabung eine Staubentwicklung nicht vermeiden lässt, so sind partikelfiltrierende Atemschutzgeräte (Staubmasken) zu verwenden.
- Beim Umgang (z.B. während des Mischvorgangs) sind geeignete persönliche Schutzausrüstungen (Körperschutzkleidung, Gesichtsschutz und Schutzbrille und Schutzhandschuhe) zur Verfügung zu stellen.

- Hautverschmutzungen und Augenkontakte mit den Einzelkomponenten (Magnesiumchlorid, Magnesiumoxid, Bentonitmehl) oder mit dem fertig gestellten Gemisch (Stöckerbeton) sind zu vermeiden. Geeignete Augenspülmittel sowie Schutz- und Reinigungsmittel sind bereitzuhalten.

Weitere Informationen zu den Nebenbestimmungen zur Zulassung des Stöckerbetons sind dem allgemeinen Zulassungsbescheid des Landesoberbergamts Nordrhein-Westfalen zu entnehmen.

Viskosität:

In den vorhandenen Unterlagen fanden sich keine Informationen über die Viskosität des Stöckerbetons.

Dichte:

Die aus der oben genannten Zusammensetzung des Stöckerbetons errechnete Dichte beträgt $1,68 \text{ g/cm}^3$.

Topfzeit:

Die Verarbeitungszeit des Baustoffs wurde mit Penetrationstests ermittelt. Die Tests erfolgten durch die Bergbauforschungs GmbH[38]. Als Grenzwert für die Verarbeitungszeit wurde der Zeitpunkt festgelegt, ab dem der Baustoff nicht mehr pumpfähig ist. Die entsprechenden Penetrationswerte entstammen den Erfahrungen des Saarbergbaus mit dem Baustoff.

Die maximale Verarbeitungsdauer reicht von der Herstellung der Suspension bis zur Erreichung des Grenzwerts für die Pumpfähigkeit. Die minimale Verarbeitungsdauer gibt die Zeit an, innerhalb derer die Suspension mindestens noch verarbeitet werden kann. Diese reicht von der Herstellung der Suspension bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Penetration steil abfällt bzw. sich die Pumpfähigkeit signifikant ändert. Der Abfall der Penetration tritt infolge eines beginnenden Ansteifens ein.

Im Trockenofen wurden Versuche zur Verarbeitungsdauer bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt, die in **Abb. 7** dargestellt sind. Mit zunehmender Umgebungstemperatur sinkt die Verarbeitungsdauer des Baustoffes.

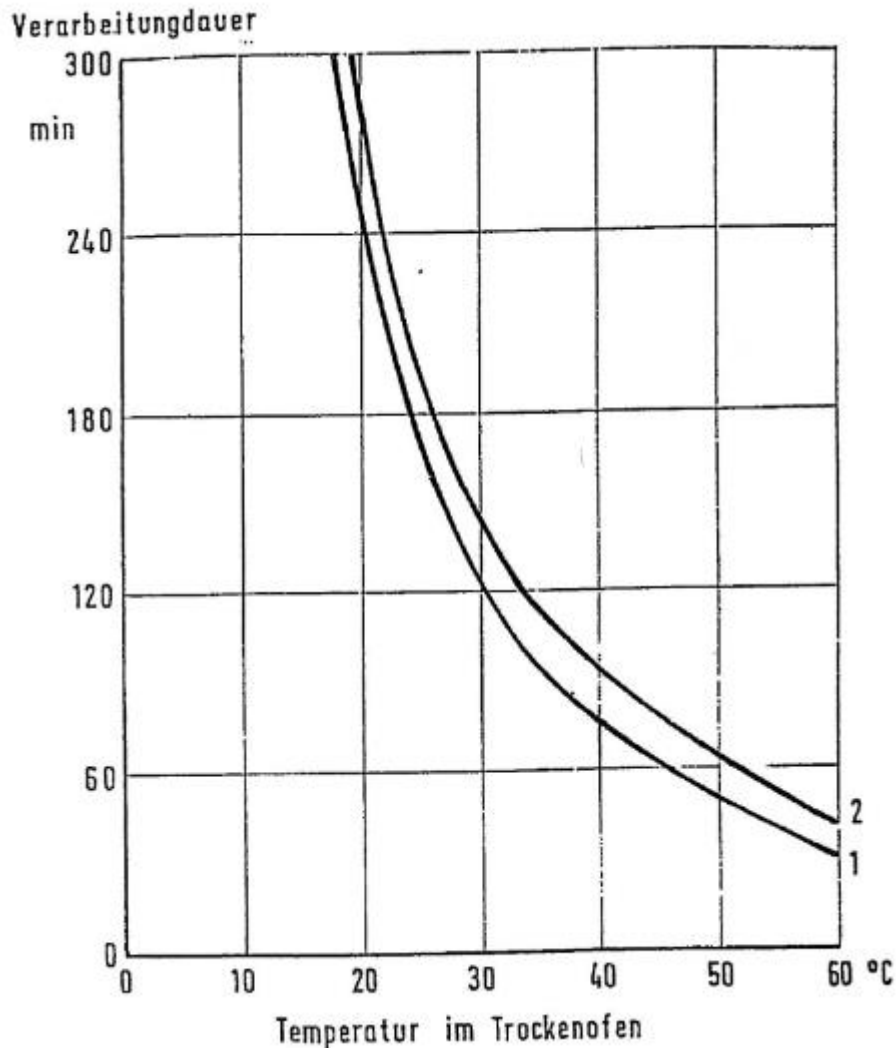


Abb. 7: Verarbeitungsdauer von Stöckerbeton in Abhängigkeit von der Temperatur. Die 1 Kurve ist die minimale Verarbeitungsdauer. Die 2 Kurve ist die maximale Verarbeitungsdauer[38]

In einer späteren Untersuchung[36] wurde herausgefunden, dass durch die Zugabe von Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10 \text{H}_2\text{O}$) die Verarbeitungsdauer des Stöckerbetons verlängert werden kann.

Druckfestigkeit:

Von der Bergbauforschungs GmbH wurden 1974 Untersuchungen[38] zur Druck- und Biegezugfestigkeit von Stöckerbeton durchgeführt. Für die Untersuchung wurden Prismen aus Stöckerbeton hergestellt, die dann in 3 unterschiedlichen Versuchen untersucht wurden.

Im ersten Versuch wurden die Druck- und Biegezugfestigkeit nach 24 Stunden Abbindezeit an der Luft gemessen. Im zweiten Versuch wurden die Proben nach einer Abbindezeit von 7 Stunden für 17 Stunden in Wasser gelegt, bevor die Festigkeiten ermittelt wurden. Im letzten Versuch waren die ersten 24 Stunden analog zum zweiten Versuch. Nach 17 Stunden im Wasser wurde die Probe dann zum Trocknen an die Luft gestellt (**Tab. 10**).

Hierbei wurde festgestellt, dass sich in den Proben, die im Wasser gelagert wurden, Längs- und Querrisse gebildet haben, und die Druck- und Zugfestigkeit geringer war als bei den trocken gelagerten Proben. Einzig die Druckfestigkeit ließ sich annähernd durch Trocknen nach der Wasserlagerung wieder auf das Niveau der trockenen Probe rückgängig machen.

Tab. 10: Druck- und Zugfestigkeiten des Stöckerbetons beim Abbinden an Luft und im Wasser[38]

Abbindezeit	Druckfestigkeit in MPa	Biegezugfestigkeit in MPa
24 Stunden an der Luft	24,53	13,83
7 Stunden an der Luft, 17 Stunden im Wasser	12,75 Längs- und Querrisse	0,77 Längs- und Querrisse
7 Stunden an der Luft, 17 Stunden im Wasser, 24 Stunden an der Luft	21,88 Längs- und Querrisse	0,98 Längs- und Querrisse

Da bei den gewässerten Proben Längs- und Querrisse zu beobachten waren ist bei der Verwendung des Stöckerbetons zu Injektionszwecken zu beachten, dass er nicht mit Standwasser oder frischer Betonschlämpe innerhalb des Bauwerks in Kontakt kommt.

In einer späteren Untersuchung[39] der Deutschen Montan Technologie (DMT) wurden die Druck- und Zugfestigkeiten erneut untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in **Tab. 11** dargestellt. Die Untersuchung der Proben erfolgte mit einer kraftgesteuerten Presse in Anlehnung an die DIN 1048 und DIN 1164.

Tab. 11: Festigkeiten des Stöckerbetons, ermittelt nach DIN 1048 und 1164[39]

	Abbindedauer	
	24 h	7 d
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	8,8	9,2
Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]	22,7	28,3
Zylinderdruckfestigkeit [N/mm ²]	24,0	27,0

Die Werte der Zylinderdruckfestigkeit sind vergleichbar mit denen der Untersuchung von 1974 [38] (**Tab. 10**). Bei der Biegezugfestigkeit gibt es zwar Abweichungen, die allerdings im üblichen Streubereich liegen.

Einsatzbereich:

Zum Eindringvermögen von Stöckerbeton in Spalten wurden 1992 von der DMT die nachfolgend beschriebene Untersuchung[40] durchgeführt. Hierbei wurde im Labor an einem Spaltmodell die Grenzspaltweite des Baustoffs untersucht. Die Grenzspaltweite ist die

Rissweite, in die der Baustoff gerade noch eindringen kann. Die GrenZRissweite des Stöckerbetons liegt zwischen 0,24 und 0,34 mm.

Nach den Anwendungsbereichen für Injektionsmaterialien im Fels, die in **Tab. 2** abgebildet sind, ist der Stöckerbeton in kavernen Strukturen, Klüften und Störungszonen mit einer Öffnungsweite von > 10 mm sowie in Klüften und Rissen, mit einer Öffnungsweite zwischen 100 mm und ca. 0,3 mm einzusetzen.

Beim nachträglichen Vergüten von Streckenverschlussbauwerken kann der Stöckerbeton als kostengünstige Variante gewählt werden, wenn größere Mengen Injektionsgut injiziert werden sollen, wie zum Beispiel zum Verfüllen von Injektionsbohrlöchern.

3.1.3 Zementpasten

Zementpasten sind wasserärmer als Zementsuspensionen und eignen sich zum Injizieren von größeren Kluftweiten oder Hohlräumen[41]. In der DIN 4093 werden kavernöse Strukturen, Klüfte und Störungszonen mit einer Öffnungsweite von über 1 cm als Anwendungsbereich angegeben. Zum Injizieren der Kontaktfuge sind Zementpasten ungeeignet, da sie nicht in feine Spalten und Risse im Bereich weniger μm oder 10er μm eindringen können[1].

3.1.4 Zementsuspensionen

Mit Zementsuspensionen können Spalten und Risse mit einer minimalen Öffnungsweite bis etwa 0,1 mm sowie Lockergesteine mit einem Kleinstkorn von bis zu 0,6 mm verpresst werden[1, 42 bis 45]. Um kleinere Rissöffnungsweiten zu erreichen, können Feinstzemente verwendet werden.

3.1.5 MgO-Mörtel

Im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) mussten ausgewählte Bohrlöcher mit einem Durchmesser zwischen 46 und 183 mm mit Magnesiabinder verfüllt werden. Der für die Arbeiten vorgesehene Trockenbaustoff hatte die folgende Rezeptur[46]:

10 Gew.% MgO

55 Gew.% Anhydritmehl

30 Gew.% feinkörniges Gewerbesalz (130 bis 400 μm)

5 Gew.% Schiefermehl

Zum Herstellen des Baustoffs werden pro Kilo Trockenbaustoff 260 bis 265 ml einer MgCl_2 -Lösung mit etwa 320 g/l MgCl_2 zugegeben.

Mit diesem Beispiel wird die Eignung von Magnesiabindern zum Verfüllen von Bohrlöchern aufgezeigt.

3.1.6 Tonsuspensionen

Aufbau Tonminerale:

Tonminerale entstehen bei der Verwitterung von anderen Mineralen, wie z.B. Feldspäten oder Glimmern, und weisen einen lagenweisen Aufbau auf. In Abhängigkeit der Anordnung der Lagen werden Zweischicht- und Dreischichttonminerale unterschieden. Zweischichtminerale bestehen pro Schicht jeweils aus einer SiO_4 -Tetraederlage und einer Oktaederlage (**Abb. 8a**). Dreischichttonminerale bestehen aus zwei Lagen SiO_4 -Tetraedern, zwischen denen eine Oktaederlage aus AlO_6 angeordnet ist (**Abb. 8b**). Zwischen den einzelnen aus Tetraeder- und Oktaederlagen bestehenden Schichten der Tonminerale können Kationen oder Wasser eingebaut werden.

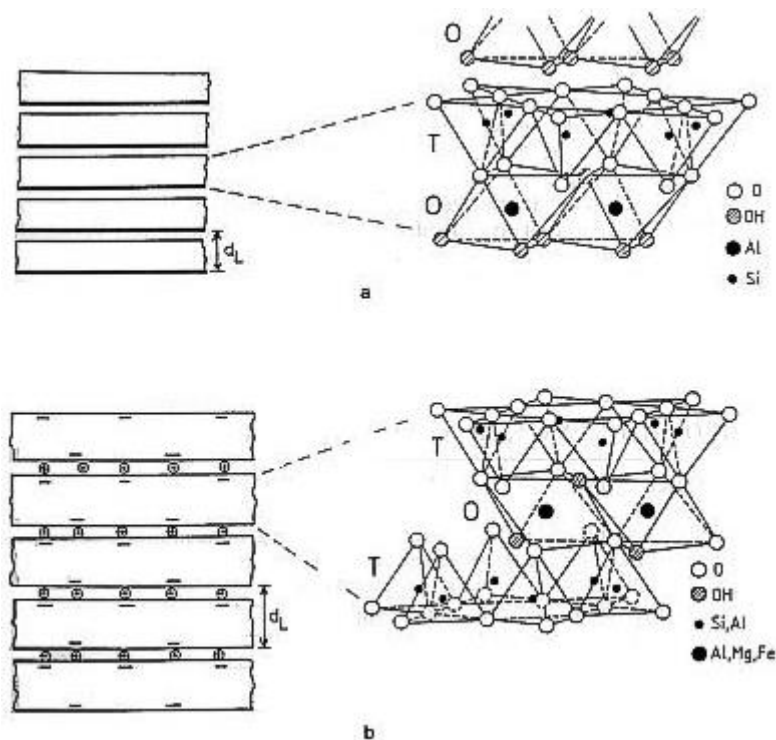


Abb. 8: a) Zweischichttonmineral. b) Dreischichttonmineral[47]

Für den Einsatz im Salinar müssen Tonsuspensionen neben den Anforderungen aus dem Tiefbau auch weiteren Anforderungen entsprechen. Zum einen müssen die für die Injektionen eingesetzten Tonminerale im salinaren Milieu stabil sein sowie ihre Eigenschaften beibehalten und zum anderen dürfen die eingesetzten Tonminerale nicht den für Verschlussbauwerke verwendeten Zement angreifen.

Beeinflussung der Tonminerale durch salinare Lösungen

Tonzementsuspensionen, die zur Injektion des Kontaktbereichs zwischen Streckenverschlussbauwerk und Gebirge verwendet werden, kommen in Kontakt mit gesättigten salinaren Lösungen. Salinare Lösungen haben einen hohen Gehalt an gelösten Ionen

und somit eine hohe Ionenstärke. In Tonmineralen wird durch die Erhöhung der Ionenstärke eine Verdichtung der Doppelschichten hervorgerufen. Dies hat zur Folge, dass die Tonminerale weniger Wasser aufnehmen können und somit weniger quellfähig sind.

Zudem kommt es bei der Verwendung von Montmorillonit oder Bentonit infolge von Austauschreaktionen mit den salinaren Lösungen zu Mineralum- und Mineralneubildungen, bei denen es durch freigesetzte Ionen zu Angriffen auf den Zement des Streckenverschlussbauwerks kommen kann. Um möglichen Umwandlungsreaktionen vorzubeugen, können Tonminerale für die Tonsuspension verwendet werden, die im salinaren Milieu stabil sind.

Als natürliches Analogon für stabile Tone im salinaren Milieu können der Braunrote Salztone aus dem Zechstein des Werra- Reviers oder der Graue und Rote Salztone der Aller Serie betrachtet werden[48]. Diese Salztone bestehen hauptsächlich aus Muskovit, Illit und Chlorit. Unabhängig von der Startzusammensetzung erreichen Tonminerale im salinaren Umfeld eine stabile Endzusammensetzung im Chlorit-Illit System[49].

In Drillingmuds/Bohrspülungen für Erdölbohrungen kommen Tonminerale zum Einsatz, um die Dichte des Fluids zu steuern und um ein thixotropes Fluid zu erzeugen mit dem das Bohrklein abtransportiert wird. In salinaren Bohrspülungen kommen die Minerale Attapulgit und Sepiolite zum Einsatz[50]. Als mögliche Tonminerale für Injektionen der Kontaktfüge kämen somit Tonminerale der Chlorit- und Illitgruppen sowie Attapulgit und Sepiolite in Frage.

Die Viskosität von Tonsuspensionen ist sowohl abhängig vom Salzgehalt als auch vom Feststoffanteil, wobei die Viskosität mit zunehmendem Feststoffanteil steigt (**Abb. 9**).

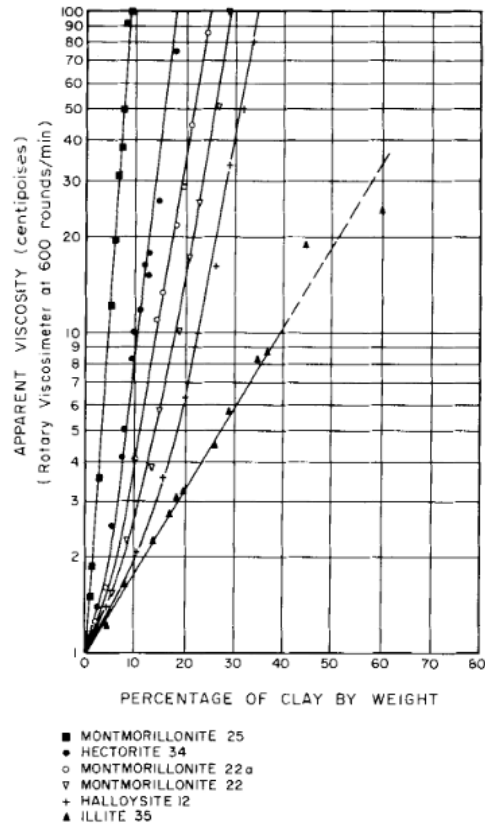


Abb. 9: Viskosität von Tonsuspensionen in Abhängigkeit des Tonanteils der Suspension[51]

Um eine niedrige Viskosität des Injektionsmaterials zu gewährleisten, müssten Tonsuspensionen mit einem hohen Lösungsgehalt verwendet werden. Während der Injektion dringt die Tonsuspension in Risse und Poren ein, bis sich ein Filterkuchen ausbildet. Aufgrund des im Vergleich zu den Feststoffen hohen Lösungsanteils in der Suspension kann es durch die bei der Injektion stattfindende Filterkuchenbildung zur teilweisen Aufsättigung des Bauwerks mit der abfiltrierten Lösung, insbesondere Kontaktzone und konturnahe Auflockerungszone, kommen, wodurch die Festigkeit des Streckenverschlusses beeinträchtigt werden kann. Dies kann durch Ionen passieren, die bei Mineralum- und Mineralneubildungen der Tonminerale im Kontakt mit salinaren Lösungen freigesetzt wurden, und den Zement des Streckenverschlussbauwerks angreifen. Daher sind Tonsuspensionen als Injektionsmaterialien für Streckenverschlussbauwerke nicht geeignet.

3.1.7 Tonzementsuspensionen

Im Tiefbau werden Tonzementsuspensionen zum Abdichten von Klüften und Rissen $> 0,1\text{mm}$ sowie Hohlräumen im sandigen Kies, Grobsand und Kies verwendet[1]. Tonzementsuspensionen können gemäß „DIN 4093 – Einpressen in den Untergrund“ für Injektionen bei Permeabilitäten von mehr als $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ verwendet werden.

Beim Einsatz von Tonzementsuspensionen kann es zu Schädigungen des Injektionsmaterials und des Baustoffes kommen.

Im stark alkalischen Milieu werden infolge von Mineralumbildungen und Mineralneubildungen Silicium- und Aluminiumionen aus den Tonmineralen herausgelöst und es kann zu einer Schädigung des injizierten Zements kommen[52]. Das im Ton enthaltene Aluminat hebt die Sulfatbeständigkeit des Zements auf und greift den Zement an. Dieser Angriff wird auch als „Zementbazillus“ bezeichnet[53, 54]. Daher ist bei der Verwendung von sulfatbeständigen Zementen der Zusatz von Ton unzulässig[54].

Aufgrund der dargestellten Schwierigkeiten mit der Sulfatbeständigkeit von Zement im Kontakt mit Tonmineralen und der Möglichkeit alternative Baustoffe, wie z.B. Feinstzemente, Zemente oder Magnesiabinder zum Verfüllen der Injektionsbohrlöcher zu verwenden, sollen Tonzementsuspensionen im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet werden.

3.1.8 Feinstmagnesiabinder

Von hoher Bedeutung bei der Auswahl von Feinstmagnesiabindern ist das Anwendungsgebiet, insbesondere die Spaltöffnungsweite des zu vergütenden Hohlraums. Aufgrund der Vielfalt an Magnesiabindemitteln und in Betrachtung einer Anwendung zur Kontaktfugeninjektion werden in der nachfolgenden Baustoffcharakterisierung nur Injektionsmaterialien aufgeführt, die in Rissweiten unter 150 µm injiziert werden können.

3.1.8.1 Magnesiumoxid-Feinstbindemittel

Zusammensetzung

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Magnesia-Injektionsmaterialien, die sich sowohl in der Zusammensetzung der einzelnen Komponenten als auch im Aufmahlungsgrad unterscheiden.

Bei allen Magnesiabindern besteht die Anmachlösung aus einer $MgCl_2$ -Lösung, die zu dem Magnesiumoxid zugegeben wird. Wichtig für die Abbindereaktion ist das Verhältnis von MgO und Mg^{2+} in der Baustoffsuspension. Bei Zement wird das Verhältnis zwischen dem Anmischwasser und dem eingesetzten Zement als W/Z-Wert (Wasser/Zement-Wert) zur Beschreibung des Mischungsverhältnisses einer eingesetzten Suspension angegeben. Für hydraulisch abbindende Bindemittel, die kein Zement enthalten wird analog dazu der W/F-Wert (Wasser/Feststoff) angewendet. Da bei Magnesiabindemitteln eine Lösung mit einem definierten Mg^{2+} -Gehalt als Anmischlösung verwendet wird, resultiert aus diesem Mg^{2+} -Gehalt der Lösung bei dem für die Reaktion erforderlichen Verhältnis MgO/Mg^{2+} immer ein entsprechendes Verhältnis Bindemittel zu Lösung. Daher erfolgt bei Bindemitteln auf MgO -Basis analog zum W/Z-Wert die Betrachtung des Verhältnisses zwischen Lösung (Mg^{2+}) und Bindemittel (MgO). Da Injektionsmaterialien im Vergleich zu Magnesiabeton einen höheren Lösungsanteil haben, liegt das Verhältnis von Mg^{2+} zu MgO an der unteren Grenze des erforderlichen MgO -Gehaltes[2].

Das Molverhältnis MgO/Mg^{2+} soll mindestens bei 5 liegen. Ist dieses Verhältnis kleiner (MgO Mangel bzw. $MgCl_2$ Überschuss) zeigt das Bindemittel ein instabiles Verhalten, das vor allem

durch Hygroskopie und Festigkeitsverlust gekennzeichnet ist. Deshalb ist ein MgO Überschuss mit Molverhältnissen MgO/Mg^{2+} von 6 bis 8,3 vorteilhaft[2]. Der Zuschlaganteil soll sich in den Grenzen zwischen 3 und 12 kg Zuschlag je kg MgO bewegen[2]. Als Gesteinskörnung wird Quarzsand favorisiert (Menge zwischen 3 und 12 kg Zuschlag je kg MgO). Durch den Quarzsandzuschlag wird eine höhere Festigkeit (Maßstab: einachsige Druckfestigkeit) des Magnesiabinders erreicht[2].

Durch die Zugabe von Zusätzen lassen sich sowohl das Temperaturniveau als auch die Verarbeitungsdauer in bestimmten Grenzen steuern[55].

Im Projekt CARLA wurde der Injektionsmörtel IM3-mod von der K-UTEC verwendet, dessen Basis der Injektionsmörtel IM3 ist, der dann speziell angepasst wurde[2]. Der Injektionsmörtel IM3 wurde auch im Forschungsbergwerk Asse eingesetzt[25]. Allerdings gab es Schwankungen im Quarzgehalt des Schiefermehls, das den Injektionsmörteln IM3 und IM3-mod zugesetzt wird. Aufgrund dieser Schwankungen werden die beiden Injektionsmörtel nicht mehr für Injektionsarbeiten unter Tage verwendet. Als Nachfolger dienen die Injektionsmörtel IM4 und IM 4+.

Herstellung/ Handhabung (im untertägigen Einsatz)

Um selbst kleine Wegsamkeiten bis 30 μm mit dem Injektionsmaterialien zu erreichen, darf die maximale Korngröße des Magnesiumoxids höchstens 10 μm betragen, bzw. 90 % des Magnesiumoxids sollte eine Korngröße von unter 6 μm haben[2].

Handelsübliche Magnesiabinder weisen keine solch feinen Korngrößen auf. Daher ist es erforderlich die Baustoffe vor der Verwendung als Injektionsmaterialien auf die gewünschte Korngröße aufzumahlen. Der Injektionsmörtel IM4 hat folgende Kornverteilung (**Tab. 12**):

Tab. 12: Korngrößenverteilung des Injektionsmörtels IM4 und IM 4+ der Firma K-UTEC[55]

Körnungsband	Messwertbereich	
	IM 4	IM 4+
D ₉₀	ca. 75 μm	15-20 μm
D ₅₀	ca. 25 μm	2-6 μm
D ₁₀	2 μm	0,5-2 μm

Um kleinere Wegsamkeiten abzudichten, ist es erforderlich das Injektionsmaterial weiter aufzumahlen, da die minimal erreichbare Spaltöffnungsweite durch die größten Körner im Baustoff bestimmt wird.

In Untersuchungen von Abuhress[56] wurde aus einem handelsüblichen Magnesiabinder ein hochfeines Injektionsmaterial hergestellt, mit dem es möglich war Risse von 80 μm zu

verpressen, ohne dass es zur Bildung eines Filterkuchens kam. Die Kornverteilungen des ursprünglichen und des aufgemahlten Magnesiabinders sind in **Tab. 13** aufgeführt.

Tab. 13: Korngrößenverteilung eines handelsüblichen Magnesiabinders vor und nach dem Aufmahlprozess[56]

Körnungsband	Messwertbereich	
	Vor dem Aufmahlen	Nach dem Aufmahlen
D ₉₀	ca. 60 µm	ca. 12 µm
D _{max}	88 µm	19 µm

Die Anlieferung der einzelnen Komponenten erfolgt in Einzelgebinden als Trockenmischung mit definierter Anmischflüssigkeitsmenge. Die Herstellung des Injektionsmaterials erfolgte Vorort in dafür vorgesehenen Baustoffmischanlagen. Nach dem Mischprozess sollte die Suspension entweder mit Schraubenspindelpumpen oder auch mit Kolbenpumpen verpumpt werden. Vor der Verarbeitung sollten die Verpumpleitungen mit Magnesiumchloridlösung benetzt werden[55].

Die in der Handhabung kritische Komponente des Magnesiabinders ist das MgO, da dieses beim Kontakt mit Feuchtigkeit stark alkalisch reagiert und als ätzend einzustufen ist. Daher erfolgten vom Landesoberbergamt Nordrhein-Westfalen für die Zulassung des Stöckerbetons nach GesBergV am 22.09.1995 Vorschriften für den Umgang mit der Komponente „Magnesiumoxid“, die auch für den Umgang mit anderen Magnesiabindern gelten.

Weitere Informationen zu den Nebenbestimmungen zur Zulassung der Injektionsmörtel IM 4 und IM 4+ gemäß GesBergV können den Arnsberger Listen, in denen die Injektionsmörtel als zugelassener Baustoff eingetragen sind, entnommen werden[22].

Viskosität:

Weder zum Injektionsmörtel IM 4 noch zum Injektionsmörtel IM 4+ sind Angaben zur Viskosität erhältlich.

Im Rahmen des Vorhabens CARLA[2] wurden Injektionsversuche mit dem Magnesiabinder 921 der Firma Lutz GmbH durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sollen hier beispielhaft dargestellt werden, um zu zeigen, wie sich das Fließverhalten von Magnesiabindern bei unterschiedlichen Lösungs- Feststoffverhältnissen verändern kann. Der Magnesiabinder 921 ist ein sehr fein aufgemahlener Magnesiabinder mit einem D₉₀-Wert von 8,17 µm. Die Untersuchungen zum Fließverhalten des Magnesiabinders wurden an einem Spaltmodell mit einem Spaltabstand von 30 µm durchgeführt. Untersucht wurde das Fließverhalten von zwei unterschiedlichen Anmischverhältnissen. Im ersten Mischungsverhältnis wurden pro Liter R-Lösung 2,0 kg MgO hinzugegeben und im zweiten waren es 2,6 Liter R-Lösung pro Kilo MgO. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in **Tab. 14** aufgeführt.

Tab. 14: Ergebnisse der Auslaufzeiten des Spaltmodellversuchs[2]

Versuch	Zeit nach Anrühren (h)	Auslaufzeit (s)	Injektionsdruck (bar)
2,0 Liter R-Lösung / kg MgO	0	76	3,3
	1	83	3,3
	2	88	3,3
	3	93	4,5
	4	112	4,5
2,6 Liter R-Lösung / kg MgO	0	66	2,5
	2	71	2,2
	3	74	2,3
	4	75	2,2
	5	84	2,6

Die Daten zeigen, dass mit zunehmender Zeit nach dem Anrühren die Auslaufzeit des Injektionsmaterials steigt. Zudem lässt sich erkennen, dass die Auslaufzeiten bei der zweiten Mischung trotz geringerer Injektionsdrücke kürzer sind. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die Viskosität des Injektionsmaterials vom Mg^{2+}/MgO Verhältnis abhängig ist, wobei sich die Fließfähigkeit der Suspension mit steigendem Mg^{2+} -Gehalt verbessert.

Dichte:

Keine Informationen zur Dichte erhältlich.

Topfzeit:

Die Topfzeit unterschiedlicher Magnesiainjektionsmaterialien variiert stark und kann durch Zusätze beeinflusst werden. Als Beispiele werden der Injektionsmörtel IM 4 der K-UTEC und der Magnesiabinder der Firma Lutz GmbH genannt.

Beim Injektionsmörtel IM 4 beträgt die Verarbeitungszeit bei Temperaturen bis $25^{\circ}C \leq 30$ Minuten und bei Temperaturen von über $45^{\circ}C$ sollte der Injektionsmörtel nicht mehr verarbeitet werden. Allerdings ist es möglich die Topfzeit durch die Zugabe von Zusätzen, wie z.B. Woerment, zu verlängern[55].

Im Gegensatz dazu hat die im Vorhaben CARLA[2] verwendete Mischung mit dem MgO der Firma Lutz GmbH sehr lange Topfzeiten. Der Erstarrungsbeginn setzte nach 8 bis 10 Stunden ein und das Erstarrungsende lag ca. 2 Stunden nach Erstarrungsbeginn.

Druckfestigkeit:

Der Injektionsmörtel IM 4 hat eine einaxiale Druckfestigkeit von 25 bis 50 MPa und eine Biegezugfestigkeit zwischen 4 und 7 MPa[55]. Die Druckfestigkeit des im Vorhaben CARLA

untersuchten Magnesiainjektionsmaterials auf Basis des MgO der Firma Lutz GmbH erreichte eine Druckfestigkeit von 42 MPa[2].

Einsatzbereich:

Durch die feinen Aufmahlungsgrade sind die beiden oben aufgeführten MgO-Injektionsmaterialien für die Injektion von Rissen und Klüften geeignet. Der Spaltversuch aus dem Projekt CARLA zeigt, dass unter Laborbedingungen selbst Rissweiten von 30 µm injiziert werden können. Im Vorhaben CARLA wurde versucht, die sichtbaren Öffnungen zwischen einem Oberflächenpacker und Gebirge abzudichten, was jedoch nicht gelang, da die Suspension zu gering viskos war und durch den Spalt floss ohne ihn zu verstopfen (Obere Anwendungsgrenze). Feinstbindemittelsuspensionen auf MgO-Basis sind dafür vorgesehen, dünne Spalten mit einer Öffnungsweite von unter einem Millimeter zu injizieren [2].

Magnesiainjektionsmaterialien sind zudem für Bereiche geeignet, in denen Zutritte von MgCl₂-haltigen Lösungen zu erwarten sind. Da Magnesiabinder nicht durch Lösungen angegriffen werden, die im Lösungsgleichgewicht mit Kalisalzen stehen, eignen sich Magnesiabinder für Injektionen im Kontakt mit Kalisalzen.

Erfahrungswerte:

Im Kalibergwerk Bischofferode (Unterbreizbach) kam es 1914 zum Lösungseinbruch während des Streckenvortriebs auf der 582 m Sohle. Im Jahre 1916 wurde der Lösungseinbruch durch einen 72 Meter langen Damm aus Zement- und Magnesiamauerwerk abgedämmt. 1923 traten geringe Undichtigkeiten am Damm auf. Um diese abzudichten, wurden zwei jeweils 5 Meter lange, durch eine Luftfuge voneinander getrennte Mauerabschnitte vor den Damm gebaut. Durch Einpressen von Magnesiabeton in die Luftfuge wurden die Undichtigkeiten erfolgreich beseitigt. Seitdem ist der Damm bei einem Lösungsdruck von 4,3 MPa dicht[57].

Zudem wurde der Injektionsmörtel IM3 im Jahr 2003 im damaligen Forschungsbergwerk Asse eingesetzt, um die Kernzone einer Fluidbarriere nachzuinjizieren. Die Fluidbarriere ist 40 Meter lang und besteht aus 2 Widerlagern und einer Kernzone und wurde mit 810 m³ Magnesiabinder der Rezeptur 29.6 A2 erstellt. Diese Barriere wurde mit einem Lösungsdruck beaufschlagt und war bis zur Berichtslegung im Jahr 2008 im Bereich der Kernzone dicht[25]. Allerdings traten später Umläufigkeiten auf.

3.1.8.2 Brucit (Magnesiumhydroxid)

Keine Informationen erhältlich.

3.1.9 Feinstzement

„Feinstbindemittel sind mikrofeine hydraulisch abbindende Bindemittel, die eine steile, gleichförmige Kornverteilung aufweisen. Das Größtkorn d_{95} darf 20 μm nicht überschreiten.“ (Auszug aus DIN EN 12715 Injektionen, 2000). In **Abb. 10** ist beispielhaft die Korngrößenverteilung des Feinstbindemittels MIKRODUR der Firma Dyckerhoff abgebildet. Neben MIKRODUR gibt es weitere Feinstzemente, wie z.B Ultrafin der Firma HeidelbergZement AG mit ($d_{95} < 12 \mu\text{m}$)[58].

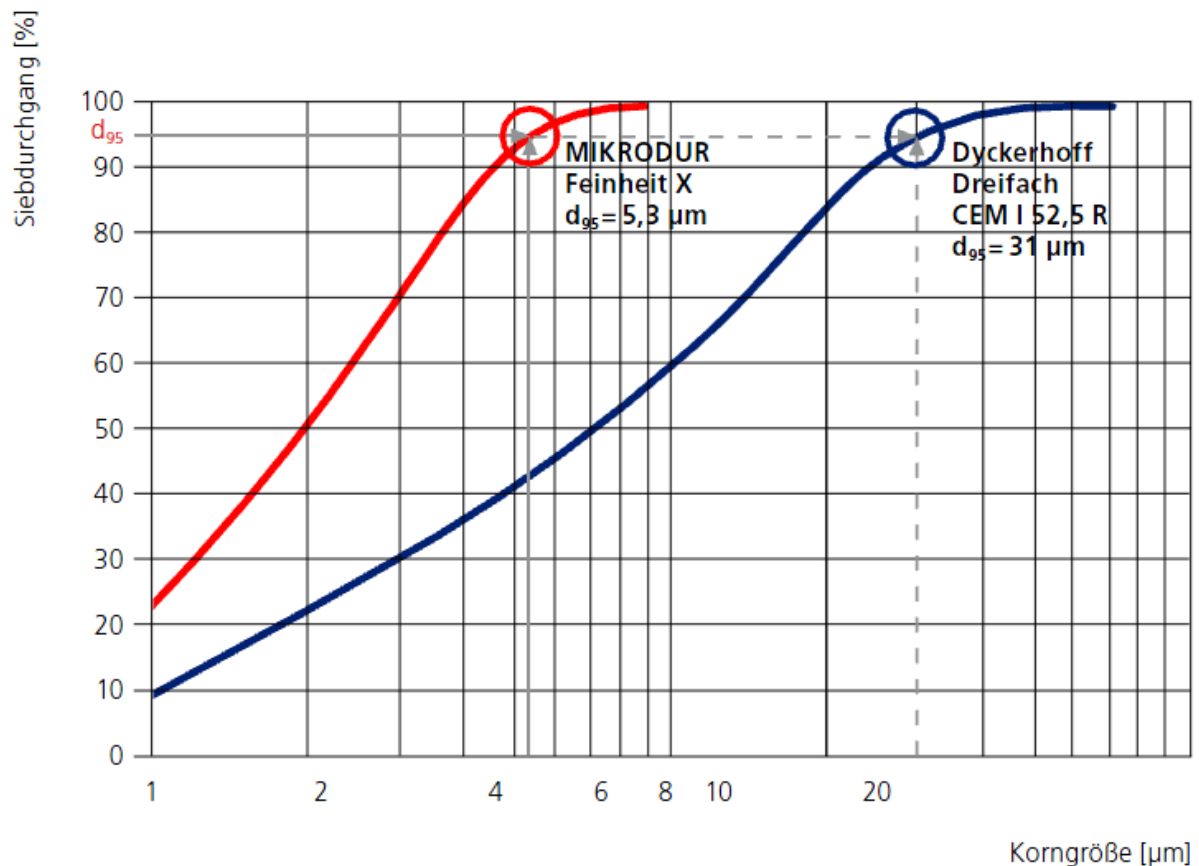


Abb. 10: Korngrößenverteilung des Feinstbindemittels MIKRODUR[59]

Feinstzemente bestehen fast ausschließlich aus den in **Abb. 11** dargestellten Zementrohstoffen und unterscheiden sich von Normalzementen nur durch den besonders feinen Aufmahlungsgrad.

Hauptzementarten	Benennung	Kurzbezeichnung	Hauptbestandteile ¹⁾										Nebenbestandteile ^{1) 4)}		
			Portlandzementklinker	Hütten sand	Silicastaub	Puzzolane natürlich	Puzzolane natürlich getempert	Flugasche kieselreicher	Flugasche kalkreich	Gebraunnter Schiefer	Kalkstein				
			K	S	D ²⁾	P	Q	V	W	T	L	LL			
CEM I	Portlandzement	CEM I	95-100												0-5
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80-94	6-20											0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35											0-5
	Portlandsilicastaubzement	CEM II/A-D	90-94		6-10										0-5
	Portlandpuzzolan-zement	CEM II/A-P	80-94			6-20									0-5
		CEM II/B-P	65-79			21-35									0-5
		CEM II/A-Q	80-94				6-20								0-5
		CEM II/B-Q	65-79				21-35								0-5
	Portland-flugasche-zement	CEM II/A-V	80-94					6-20							0-5
		CEM II/B-V	65-79					21-35							0-5
		CEM II/A-W	80-94						6-20						0-5
		CEM II/B-W	65-79						21-35						0-5
	Portland-schieferzement	CEM II/A-T	80-94							6-20					0-5
		CEM II/B-T	65-79							21-35					0-5
	Portland-kalkstein-zement	CEM II/A-L	80-94									6-20			0-5
		CEM II/B-L	65-79									21-35			0-5
		CEM II/A-LL	80-94										6-20		0-5
CEM II/B-LL		65-79										21-35		0-5	
Portlandkompositzement ³⁾	CEM II/A-M	80-94						6-20						0-5	
	CEM II/B-M	65-79						21-35						0-5	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35-64	36-65										0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80										0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95										0-5	
CEM IV	Puzzolan-zement ³⁾	CEM IV/A	65-89				11-35							0-5	
		CEM IV/B	45-64				36-55							0-5	
CEM V	Kompositzement ³⁾	CEM V/A	40-64	18-30			18-30							0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50			31-50							0-5	

Abb. 11: Zementarten und Zusammensetzung nach DIN EN 197-1:2000

1) Die Werte (in Massen %) der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile, d.h. ohne Calciumsulfat oder Zementzusatzmittel. 2) Der Anteil an Silica Staub ist auf 10% begrenzt. 3) In den Portlandkompositzementen CEM II/A-M und CEM II/B-M, in den Puzzolanzementen CEM IV/A und CEM IV/B und in den Kompositzementen CEM V/A und CEM V/B müssen die Hauptbestandteile neben dem Portlandzementklinker des Zementes angegeben werden. 4) Stoffe, die als Nebenbestandteile dem Zement zugegeben werden, dürfen nicht gleichzeitig im Zement als Hauptbestandteil vorhanden sein.

Durch die größere spezifische Oberfläche und die kleine Korngröße haben Feinstzemente gegenüber Normalzementen folgende Vorteile:

- Penetration engerer Klüfte, somit bessere Abdichtwirkung,
- geringere Verpressdrücke nötig,
- kürzere Verpresszeiten aufgrund des besseren Fließverhaltens,
- größere Injektionsbohrlochabstände aufgrund größerer Reichweiten.

Im Folgenden werden die beiden Feinstzemente Mikrodur (Firma Dyckerhoff AG) und Ultrafin der Firma HeidelbergCementAG näher betrachtet.

Zusammensetzung:

Neben den in **Abb. 11** dargestellten Hauptbestandteilen können Feinstzemente Nebenbestandteile enthalten, die beigemischt wurden, um die Eigenschaften des Feinstzements zu modifizieren.

In Abhängigkeit vom Wasser- Zementverhältnis (W/Z) kann feststoffarmen Suspensionen Na-Bentonit zur Stabilisierung zugegeben werden. In den meisten Fällen wird jedoch auf die Zugabe von Bentonit verzichtet, da die Feinstzemente aufgrund der Kornverteilung ausreichend stabil sind. Zudem kann es in Verbindung mit bestimmten Feinstzementen, wie z.B. Mikrodur R oder Tixoton, bei Bentonitzugabe zu Ausflockungen kommen[60]. Des Weiteren können die rheologischen Eigenschaften der Suspension durch Quellen der Tonminerale negativ beeinflusst werden. Falls eine Stabilisierung der Suspension notwendig ist und auf Bentonit verzichtet werden muss, können auch Mischungsstabilisatoren mit thixotropierenden Eigenschaften verwendet werden.

Feinstzementsuspensionen neigen zur Agglomeration und schnell einsetzender Hydrathüllenbildung. Dies führt dazu, dass mit abnehmendem W/Z-Wert die Kornverteilung in der Suspension zunehmend gröber wird, wodurch die guten Fließeigenschaften, die durch den feinen Mahlgrad gewonnen wurden, verloren gehen. Um dies zu verhindern, können der Suspension Fließhilfen zugegeben werden. Somit wird die Agglomeration verhindert bzw. verzögert und die Partikelgrößenverteilung der Frischsuspension ist nahe der des trockenen Zustands. Somit können feststoffreiche Suspensionen auch enge Klüfte penetrieren[61].

In den schmalen Rissen/Klüften in die Feinstzementsuspensionen injiziert werden, besitzt das Injektionsgut aufgrund der geringen Materialstärke eine im Vergleich zum Volumen große Oberfläche. Beim Zutritt von angreifenden Lösungen, ist daher mit ausgeprägten Umwandlungsreaktionen zu rechnen. Falls mit dem Zutritt von angreifenden Lösungen gerechnet werden muss, kann der Zement durch die Zugabe von hohen Anteilen an fein aufgemahltem Hüttensand widerstandsfähiger gegen den lösenden Angriff von $MgCl_2$ -Lösungen gemacht werden[62].

Herstellung/Handhabung

Wenn Zement mit Wasser in Kontakt kommt oder Zement feucht wird, entsteht eine stark alkalische Lösung. Aufgrund der hohen Alkalität kann feuchter Zement Haut- und Augenreizungen hervorrufen. Daher werden folgende Sicherheitshinweise von der Firma Dyckerhoff zum Injektionsbindemittel MIKRODUR R gegeben[63]:

- Reizt die Atmungsorgane und die Haut
- Gefahr ernster Augenschäden
- Staub nicht einatmen.
- Berührung mit der Haut und Augen vermeiden.
- Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren.
- Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung, Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen.

Diese Sicherheitshinweise sind für alle Feinstzemente zutreffend und sind gegebenenfalls um zusätzliche Sicherheitshinweise, die sich auf Additive beziehen, zu ergänzen.

Die Anlieferung der Feinstzemente kann als Sackware, in Big Bags oder in Silo LKW's erfolgen. Bei sachgemäßer Lagerung sind sowohl MIKRODUR R als auch Ultrafin mindestens 6 Monate haltbar. Bei der Lagerung ist zu beachten, dass beide Feinstzemente hygroskopisch sind und trocken gelagert werden müssen[58, 59].

Im Technischen Datenblatt[58] werden folgende Hinweise zur Verarbeitung von Ultrafin gegeben:

- Die Aufbereitung von Ultrafin 12 sollte mit einem hochenergetischen Kolloidmischer oder Turbomischer erfolgen.
- Empfohlene Mischungsverhältnisse zur Herstellung der Baustoffsuspension:
 $W/Z = 0,8 - 3,0$
- Die Mischdauer ist geräteabhängig und muss ausreichend bemessen sein.
- Nach der Aufbereitung ist Ultrafin 12 sofort verarbeitbar.

Viskosität:

Die Viskosität wird hauptsächlich durch den W/Z-Wert bestimmt, kann jedoch durch Additive (Stabilisatoren, Erstarrer, Verflüssiger u.ä.) beeinflusst werden[62, 64].

Niedrige W/Z-Werte ($< 2,0$) werden für normal gekörnte Injektionszemente empfohlen[65]. Aus dem niedrigen W/Z-Wert ergeben sich folgende Vorteile:

- geringere Durchlässigkeit und somit bessere Abdichtwirkung,
- höhere Festigkeit des Zementsteins durch schnellere Hydratation,
- größere Dauerbeständigkeit und Erosionsstabilität.

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

- schnelleres Ansteifen,
- Zunahme der Viskosität und Fließgrenze,
- Verschiebung der Partikelverteilungskurve in den groben Bereich.

Das vom Hersteller empfohlene Mischverhältnis (W/Z-Wert) für Ultrafin liegt zwischen 0,8 und 3,0. Das zu verwendende Mischverhältnis hängt vom geplanten Einsatzzweck ab. Die in **Abb. 12** dargestellten Ergebnisse rheologischer Untersuchungen an Injektionszementen zeigen, dass mit steigendem W/Z-Wert der Baustoffsuspension die Fließfähigkeit verbessert wird. Allerdings neigen Suspensionen mit höheren W/Z-Werten zum Bluten oder zur Bildung von Überstandslösung. Für Injektionszemente ist es einerseits wichtig besonders fließfähig zu sein, also einen hohen W/Z-Wert zu besitzen. Andererseits neigen Zemente mit hohen W/Z-Werten dazu viel Überstandslösung abzugeben. Wenn die Überstandslösung aufgrund zu geringer Permeabilitäten des Gebirges nicht abfließen kann, kommt es zur Aufsättigung der Porenräume mit Lösung im Nahbereich der Injektion. Besitzt der Injektionszement allerdings einen zu hohen Bindemittelanteil, sind die Viskositäten der Baustoffsuspension hoch und eine Injektion feinsten Wegsamkeiten wird erschwert. Daher ist es gerade für die Injektion von sehr schmalen Wegsamkeiten von besonderer Bedeutung einen geeigneten Wasser-Zementwert für den Injektionszement auszuwählen.

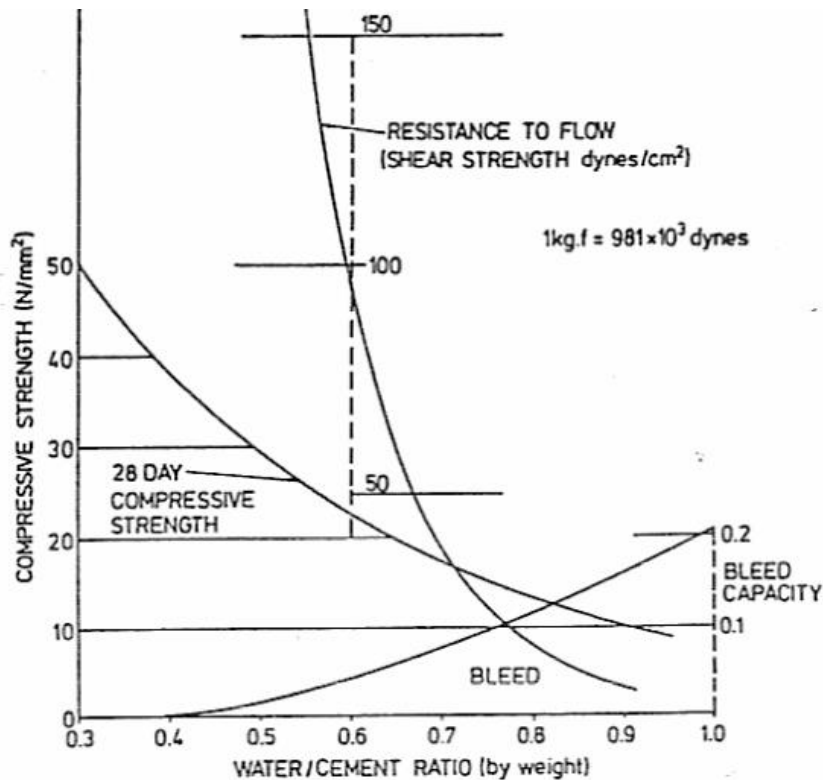


Abb. 12: Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften von Zementsuspensionen[66]

Dichte:

Eine Baustoff suspension mit dem Feinstzement Ultrafin 12 mit einem W/Z-Wert von 2,0 hat eine Suspensionsdichte von $1,281 \text{ g/cm}^3$. Je größer der W/Z-Wert, desto geringer ist die Suspensionsdichte[58]. Eine Baustoff suspension mit einem W/Z-Wert von 2,0 die mit dem Feinstbindemitteln MICRODUR R hergestellt wurde, hat bei 20° C eine Suspensionsdichte von ca. $1,29 \text{ g/cm}^3$ [67].

Topfzeit:

Die Topfzeit des Feinstzementes lässt sich durch Additive beeinflussen und auf in der Anwendung erforderliche Zeiten abstimmen. Ohne Erstarrungsregler werden vom Hersteller folgende Angaben zu den Erstarrungszeiten von Ultrafin 12 (Baustoff suspension mit einer Normsteife von 38 % H_2O) gemacht. Die Messung der Erstarrungszeiten erfolgte gemäß DIN EN 196-1. Der Erstarrungsbeginn setzte nach 95 Minuten ein und das Ende der Erstarrung wurde nach 145 Minuten erreicht[58].

Druckfestigkeit:

Die Druckfestigkeit wird sowohl durch die zwischen dem Abbindevorgang und der Messung verstrichene Zeit beeinflusst als auch durch den W/Z-Wert des Injektionsmaterials. Mit zunehmender Abbindezeit erreicht der Baustoff höhere Festigkeiten (**Tab. 15**).

Tab. 15: Druckfestigkeiten von Prismen in Anlehnung an DIN EN 196 aus dem Injektionsmaterial Ultrafin zu unterschiedlichen Zeiten nach dem Abbindevorgang und bei verschiedenen W/Z-Werten der Rezeptur[58]

	Prüfung an reiner Baustoffsuspension mit W/Z = 2,0 [MPa]	Prüfung am Mörtel (CEN-Normsand, EN 196-1) mit W/Z = 0,5 [MPa]
2 d	> 0,7	> 40
7 d	> 1,5	> 45
28 d	> 4,0	> 60

Die Proben mit dem höheren Feststoffanteil weisen höhere Druckfestigkeiten auf. Die Werte in **Tab. 15** zeigen sehr eindrücklich, dass die Druckfestigkeiten der Baustoffsuspension mit dem hohen W/Z-Wert deutlich geringer sind als die des Injektionsmaterials mit dem W/Z-Wert von 0,5. Durch die Bildung von Filterkuchen beim Injektionsvorgang werden die Feststoffe aus der Baustoffsuspension abfiltriert und die abfiltrierte Lösung weist höhere W/B-Werte auf. Das bedeutet, dass Risse oder Porenräume im Bereich der Kontaktfuge, die mit abfiltrierter Lösung injiziert wurden, niedrigere Festigkeiten aufweisen als die Porenräume, die mit der unveränderten Baustoffsuspension injiziert wurden.

Einsatzbereich:

Aufgrund der sehr kleinen Korngröße (d_{95} beim Ultrafin = 12 μm) eignen sich diese Injektionsmaterialien besonders zur Injektion kleiner Risse und Klüfte. Bedingt durch die niedrige Viskosität ist es nicht möglich mit den Feinstzementen größere Spalten und Risse abzudichten, da das Injektionsmaterial ausläuft ohne abzubinden. Untersuchungen von Pusch[68] zu Eindringverhalten von Feinzementsuspensionen in schmale Klüfte zeigten, dass es zwar gelang Klüfte mit einer Öffnungsweite von unter 50 μm zu injizieren, allerdings wiesen diese engen Klüfte in der Regel eine schlechte und inhomogene Füllung mit porösen Zementstein auf. Aufgrund der unvollständigen Abdichtung wird eine Spaltöffnungsweite von 50 μm als untere Grenze der Injizierbarkeit für Feinzementsuspensionen angesehen.

Im ERAM war MICRODUR vorgesehen, um Risse zwischen Gebirge und Bauwerk bis 0.1 mm abzudichten[9].

Beim Bau des In-Situ-Versuchs im ERAM 2010 wurde allerdings Ultrafin 12 zur Injektion der Kontaktfuge verwendet[69].

Erfahrungswerte:

Beim Bau des Streckendamms im Steinkohlenbergwerk „Heinrich Robert“ in Königsborn 1995 wurden umfangreiche Injektionsarbeiten gemacht, um den Damm gegen einen Flüssigkeitsdruck von 10 MPa abzudichten. Der Damm hat einen luftseitigen Durchmesser von

7,9 Meter (Querschnitt 35 m²) und eine Länge von 25 Metern. Um Umläufigkeiten des Dammes zu verhindern, wurden 4200 Injektionsbohrungen erstellt und insgesamt 31 Tonnen Injektionsmaterial in das Gebirge injiziert. Als Injektionsmaterial kam ein Hochofenzement CEM III/B 32,5 NWHS mit einem W/Z-Wert von 1,0 zum Einsatz[70].

Die Injektion erfolgte in 2 Phasen. Zuerst wurden die äußeren Bohrkränze injiziert, um dann bei der Injektion in die inneren Bohrkränze, das vergütete Gebirge als Widerlager nutzen zu können. Bei der ersten Injektionskampagne wurde mit Drücken unter 20 bar injiziert und bei der zweiten Injektionskampagne mit Drücken unter 30 bar[70].

3.1.10 Zweikomponenten Bitumen (2K-Bitumen)

Bitumen eignet sich aufgrund mehrerer positiver Eigenschaften für den Einsatz als Injektionsmaterial im Salzgebirge. Bitumen ist in salinaren Lösungen unlöslich und ist plastisch deformierbar. Aufgrund der plastischen Eigenschaften kann das Bitumen Spalten und Klüfte verschließen, die sich möglicherweise infolge von Konvergenzen an der offenen Streckenkontur vor der Erstellung des Bauwerks bilden. Zudem ist Bitumen ein natürlicherweise in Salzlagerstätten vorkommender Stoff und ist daher im Salzgebirge auch über lange Zeiträume als chemisch stabil anzusehen[19]. Ein weiterer Vorteil des Bitumens ist, dass es gegenüber trockenem Gebirge benetzend ist.

Aus Ölfeldern ist der Vorgang der mikrobiellen Degradation bekannt. Hierbei wird die Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe durch aerobe und anaerobe Bakterien verändert. Die aeroben Bakterien bauen bevorzugt n-Alkane und im geringeren Anteil auch kurzkettige Cykloalkane sowie Aromate ab. Die optimalen Bedingungen für die aeroben Bakterien herrschen bei Temperaturen zwischen 20° und 50°C, einem Gehalt von über 8 mg/l gelösten Sauerstoff im Wasser und fast H₂S freiem Öl, da dieses für die aeroben Bakterien giftig ist[71].

Auch unter Sauerstoffmangel findet mikrobielle Degradation statt, wobei die anaeroben Bakterien bevorzugt auf Paraffinen wachsen[71].

Die mikrobielle Degradation von Asphalt und Bitumen findet sowohl unter aeroben sowie anaeroben Bedingungen statt. Versuche zeigen, dass pro Jahr zwischen 20 und 50 g Bitumen pro m² durch Mikroorganismen unter aeroben Bedingungen abgebaut werden können und etwa 0,2 bis 0,5 g Bitumen pro Jahr unter anaeroben Bedingungen abgebaut werden. Diese Untersuchungen zeigen auch, dass die Mikroorganismen bei Temperaturen von 30°C eine höhere Aktivität als bei 10°C haben, und relativ unempfindlich gegenüber Veränderungen des pH-Werts sind[72]. Untersucht wurden die folgenden Mikroorganismen: Pseudomonas aeruginosa sowie zwei unbekannte Arten der Gattung Streptomyces und Alcaligenes.

Unter aeroben Bedingungen können die Mikroorganismen eine Bitumenschicht mit einer Mächtigkeit von etwa 27-55 µm Bitumen pro Jahr abbauen[73]. Während der Injektion kommt es zu einer Ausbreitung des Bitumens entlang von schmalen Wegsamkeiten in der Kontaktfuge,

wodurch das Bitumen eine im Vergleich zum Volumen relativ große Oberfläche hat. Dies ermöglicht es den Bakterien (falls diese am Standort vorkommen), das injizierte Bitumen unter optimalen Lebensbedingungen innerhalb kurzer Zeit abzubauen.

Um ein für die Injektion ausreichend viskoses Bitumen zu erhalten muss dieses entweder über 100°C erhitzt werden oder die Viskosität wird durch die Zugabe von Lösungsmitteln reduziert. Heißes Injektionsbitumen führt speziell im Kontakt mit Kalisalzen zu ungewollten Reaktionen. Bei Temperaturen über 160°C kommt es im Kontakt mit Carnallitit zur Freisetzung von HCl Dämpfen und bei Temperaturen von über 85°C setzt der Carnallitit abhängig von den Druckbedingungen Kristallwasser frei[19, 27]. Daher sind konventionelle Bitumensorten für Injektionen im Kontakt mit Kalisalzen ungeeignet.

Die Zugabe von Lösungsmitteln ist für die geplante Anwendung nicht erwünscht, da durch die Lösungsmittel das chemisch inerte Verhalten des Bitumens aufgehoben werden kann und in vielen Fällen den Forderungen des Brandschutzes unter Tage widerspricht[27].

Aus diesem Grund hat die TU Freiberg ein spezielles Zweikomponenten Bitumen entwickelt, das ohne Zugabe von Lösungsmitteln auch bei Temperaturen von unter 30°C fließfähig ist.

Zusammensetzung:

Das Zweikomponenten Injektionsbitumen besteht aus zwei verschiedenen Komponenten. Die erste Komponente ist ein speziell aufgemahlenes Hartbitumen (H 165/175), und die zweite Komponente ist ein entaromatisierter Kohlenwasserstoff. Das Hartbitumen wird so aufgemahlen, dass die maximale Korngröße zwischen 500 µm und 300 µm und in einem Massenverhältnis von 0,79 bis 1,00 (vorzugsweise 0,85 bis 0,93) mit dem entaromatisierten Kohlenwasserstoff intensiv gemischt[27]. In der Patentschrift[27] des Hartbitumens ist ein Beispiel für eine erfolgreiche Injektion eines Spalts mit einer Öffnungsweite von 30 µm angegeben. Hierbei wurde eine Mischung des Zweikomponenten Bitumens verwendet, die aus 48 Massenteilen Hartbitumen und 52 Massenteilen entaromatisierten Kohlenwasserstoff besteht.

Herstellung/Handhabung

Erst kurz vor der Verarbeitung werden die beiden Komponenten (Hartbitumen und entaromatisierter Kohlenwasserstoff) miteinander vermischt. Im Gegensatz zu konventionellen Bitumensorten erfolgt die Verarbeitung unter Umgebungstemperatur. Die Injektion erfolgt mittels herkömmlicher Injektionstechnik[19].

Viskosität:

Die Viskosität des Zweikomponenten Bitumens ist zeitabhängig. Mit zunehmender Zeit nach dem Mischen der beiden Komponenten kommt es zur Ausbildung einer Schubfestigkeit und das Material verfestigt sich. Vorteilhaft zum Injizieren ist die relativ geringe Anfangsviskosität. Der

Anstieg der Viskosität lässt sich durch die Kornverteilung des Hartbitumenpulvers steuern[2]. In **Abb. 13** ist beispielhaft der zeitabhängige Viskositätsanstieg von Zweikomponenten Bitumen abgebildet. Durch den Anstieg der Viskosität verfestigt sich das Zweikomponenten Bitumen in den injizierten Rissen und kann weder durch zutretende Flüssigkeiten oder durch den Gebirgsdruck wieder verdrängt werden[27]. In der Patentschrift[27] „Verfahren und Zusammensetzung zum Abdichten von Strecken im Bergbau und/oder eines Baukörpers“ werden Anfangsviskositäten zwischen 1 bis 50 Pas ohne Angabe der Messtemperatur angegeben. Temperaturabhängige Viskositäten sowie Grenzflächenspannungen und Kontaktwinkel sind für das Zweikomponenten Bitumen nicht veröffentlicht.

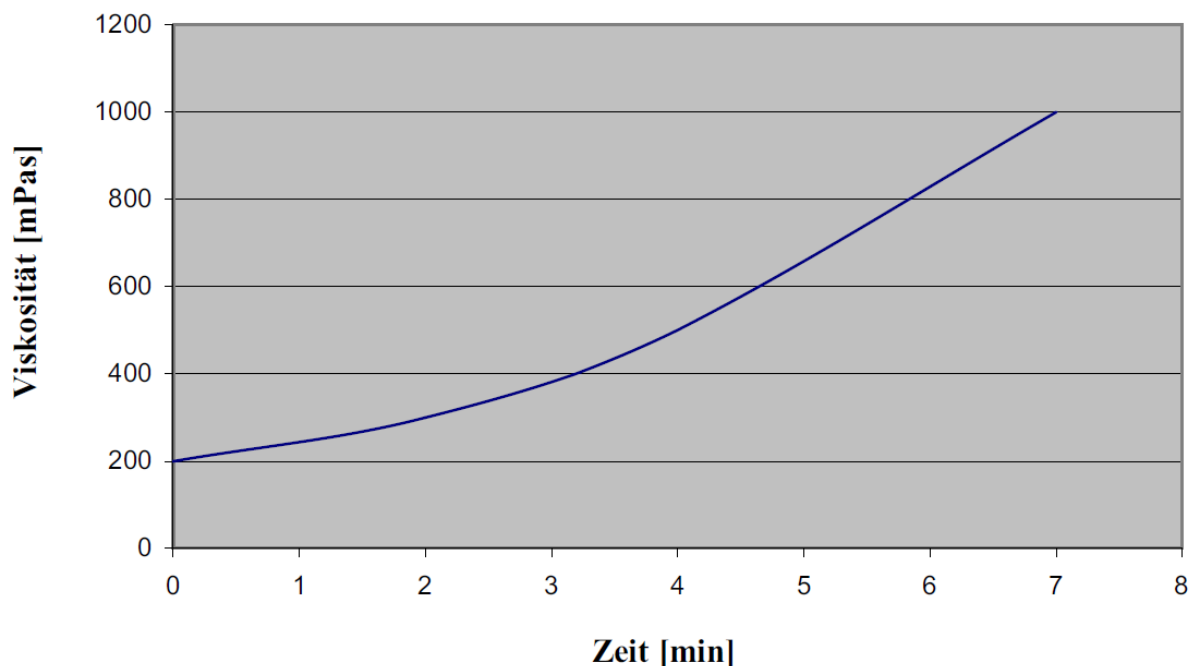


Abb. 13: Viskosität des 2K-Bitumens in Abhängigkeit von der Zeit[19]

Dichte:

Keine Angaben.

Topfzeit:

Nach dem Mischen ist das Injektionsbitumen etwa 15 Minuten lang gut pumpbar und verpressbar[27]. Anschließend erfolgt eine zunehmende Verfestigung des Bitumens. Die Geschwindigkeit der Verfestigung kann mit der Mischung eingestellt werden[27]. Generell lässt sich sagen, dass die Topfzeit sich mit abnehmender Korngröße des Hartbitumens verkürzt.

Druckfestigkeit:

Im Vorhaben CARLA wurden Druckfestigkeitsuntersuchungen an ausgehärteten Zweikomponenten-Bitumen Proben durchgeführt. Die Proben waren mit bis zu 0,12 MPa belastbar[2].

Einsatzbereich:

Durch die geringe Anfangsviskosität eignet sich Zweikomponenten Bitumen besonders zum Injizieren von schmalen Wegsamkeiten (z.B. Rissweiten $< 0,1 \text{ mm}$)[27]. In Spaltversuchen im Labor konnten Rissweiten von $30 \mu\text{m}$ injiziert werden[2].

Das Bitumen eignet sich besonders für die Injektionen, bei denen das Injektionsmaterial in Kontakt mit leichtlöslichen Kalisalzen kommt, da es die Salze nicht lösend angreift.

Erfahrungswerte:

In der Dissertation von Kaledin[19] wird die Injektion einer Betonierfuge mit Zweikomponenten Bitumen beschrieben. Die Betonierfuge wurde absichtlich zwischen zwei $4,5 \text{ cm}$ mächtigen MgO-Lagen erstellt. Die MgO-Lagen wurden im Labor in einer $105 \times 100 \text{ cm}$ großen Holzverschalung gegossen. Nachdem die erste Lage MgO in der Schalung ausgehärtet war wurden drei Injektionsschläuche mit einem Abstand von $32,50 \text{ cm}$ zueinander verlegt. Anschließend wurde die zweite, $4,5 \text{ cm}$ mächtige MgO-Lage über den Injektionsschläuchen in die Schalung eingebracht[19]. Um ein Ablösen der oberen MgO-Lage im Laufe der Injektion zu verhindern wurde diese mit einem Gewicht von 1200 Kg beschwert.

Während des Injektionsversuchs wurde zuerst in die beiden äußeren Schläuche injiziert, und der mittlere Schlauch wurde nicht verpresst. Die Injektion dauerte 3 Minuten und wurde unter einem Druck von 15 bar durchgeführt. Die Ausbreitung des Injektionsmaterials betrug zwischen 10 und 18 cm in der Ebene der Kontaktfuge um den Injektionsschlauch herum. Das 2K-Bitumen breitete sich nicht nur entlang der Betonierfuge aus, sondern durchströmte teilweise auch den MgO-Beton (**Abb. 14**)[2].

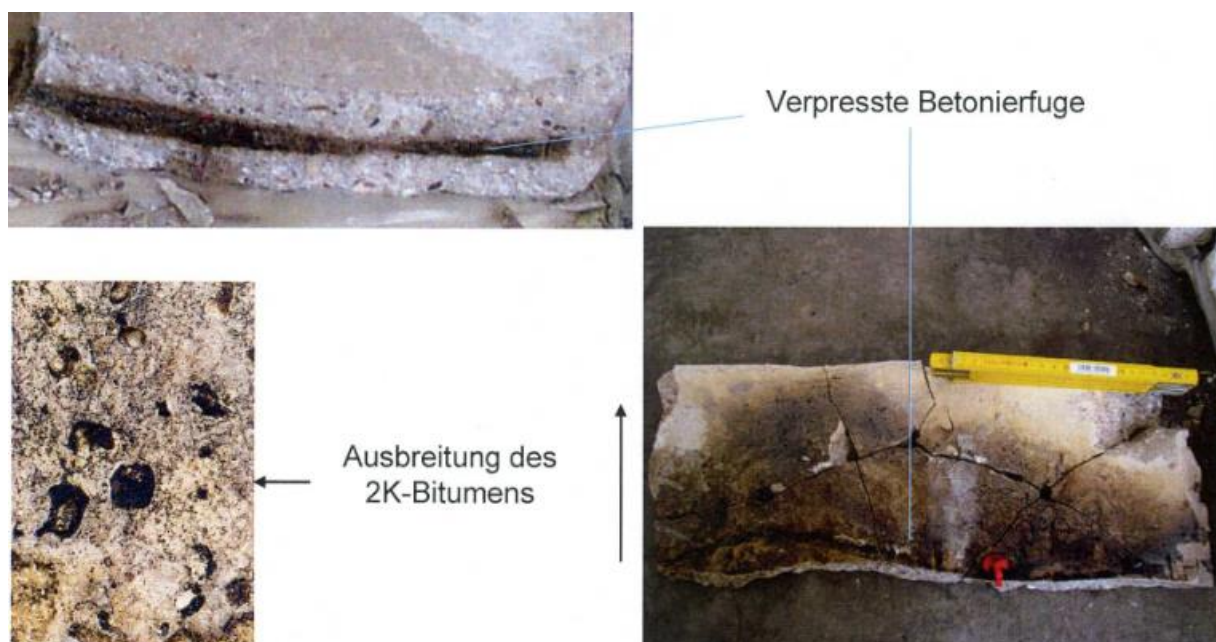


Abb. 14: Ergebnisse des Versuchs zum Verpressen einer Betonierfuge zwischen zwei MgO-Beton Schichten mit Zweikomponenten Bitumen[2]

Im Zentralfeld der Grube Teutschenthal wurden im Rahmen des Vorhabens CARLA Oberflächenpackerversuche durchgeführt, bei denen die Kontaktfuge zwischen einem MgO-Beton Packer und dem Gebirge untersucht wurde.

Am Versuchsstandort besteht der Stoß aus Tachydit durchsetztem Carnallit mit Kieseritbändern. Vor der Installation der Permeabilitätsmess- und Injektionsschläuche am Stoß wurde das verwitterte Salz der Auflockerungszone entfernt. Die Versuchsfläche betrug 3,5 x 2,7 Meter. Mit 9 Injektionsankern wurde der Ortbetonpacker am Stoß befestigt. Über die Injektionsschläuche wurden mit einem Druck von 6 - 8 MPa ca. drei Liter Zweikomponenten Bitumen in die Fuge zwischen MgO-Betonpacker und Gebirge injiziert.

Durch den Injektionsvorgang wurde die Fuge zwischen Bauwerk und Gebirge erfolgreich vergütet, und die Permeabilitäten konnten um 1 bis 4 Größenordnungen verringert werden. Vor der Vergütung wurden Permeabilitäten von $> 10^{-14} \text{ m}^2$ bis $5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ gemessen, die durch die Injektion auf Werte zwischen 10^{-17} m^2 und 10^{-18} m^2 reduziert wurden[2].

3.2 Partikelfreie Injektionsmaterialien

Bei der Injektion partikelhaltiger Medien verbleiben in den Fließwegen mit Lösung gefüllte Zwickel und Risspitzen sowie unausgefüllte Risse, sofern Rissweiten auftreten, die unterhalb der Anwendungsgrenze der Suspension liegen. Um diese zu verfüllen, sind partikelfreie Injektionsmaterialien, wie z.B. Wasserglas, erforderlich.

3.2.1 Wasserglas

Wasserglas ist eine Bezeichnung für glasig erstarrte Schmelzen von Alkalimetallsilikaten, sowie deren wässrigen Lösungen, wobei Natrium, Kalium und Lithium als Alkalimetalle zum Einsatz kommen können.

Tab. 16: Zusammensetzungen von Wasserglas Hart- und Weichgelen[74]

Zusammensetzung	Hartgele (Vol.-%)	Weichgele (Vol.-%)
Wasserglas	64-50	20-30
Wasser	20-30	70-66
Härter	16-20	3-4

Die Wasserglaslösungen, die für Injektionszwecke verwendet werden, können in Hart- und Weichgele unterschieden werden. Hartgele haben im Gegensatz zu den Weichgelen einen deutlich höheren Anteil an Wasserglas und Härtemittel sowie einen wesentlich geringeren Wassergehalt (**Tab. 16**). Daher eignen sich für den Einsatz im Salzgebirge vorzugsweise Hartgele, da Weichgele einen hohen Wassergehalt besitzen, und es somit bei der Injektion zu Löseprozessen im Kontaktbereich zum Salz kommen kann.

Zusammensetzung

Als Wasserglas werden glasartige (amorphe), aus der Schmelze erstarrte wasserlösliche Silikate bezeichnet. Unterschieden wird zwischen festem und flüssigem Wasserglas. Festes Wasserglas wird durch das Schmelzen von SiO_2 mit Alkalimetallhydroxiden hergestellt. Wenn Na_2O oder K_2O als Alkalimetallhydroxide verwendet werden, kommt es zur Bildung von Natronwasserglas (Na_4SiO_4 oder Na_2SiO_3) oder Kaliwasserglas (K_4SiO_4 oder K_2SiO_3). Wasserglas wird durch das Schmelzen von SiO_2 mit Alkalimetallhydroxiden hergestellt (Gleichung 6 und 7). Wobei gemäß Gleichung 6 die allgemeine Reaktion darstellt und gemäß Gleichung 7 die Bildung von Natriumwasserglas gezeigt wird[75].



Welche Silikate (Na_4SiO_4 oder Na_2SiO_3) entstehen hängt vom eingesetzten Molverhältnis ab. Hartgele haben hohe Silikat- und niedrige Wassergehalte. Bei Weichgelen ist es genau umgekehrt.

Durch die Auflösung des festen Wasserglases in Wasser wird flüssiges Wasserglas hergestellt. Die Löslichkeit von Kaliwasserglas ist besser als die des Natriumwasserglases. Zudem sind Wassergläser mit hohem SiO₂-Wert schlechter löslich.

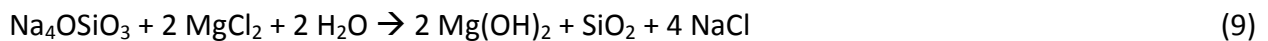
Flüssiges Wasserglas erhärtet unter der Zugabe von Verfestigern. Im Folgenden sind einige Beispiele für Verfestiger aufgeführt:

- organische oder anorganische Säuren (z.B. Essigsäure, Salzsäure)
- Esterverbindungen aus anorganischen Säuren mit Alkohol
- Dicarbonsäureester und Formamid
- Kohlendioxid
- Natronaluminat (Weichgele), DynagROUT,

Im Folgenden ist die generalisierte Abbindereaktion für eine Verfestigung mit CO₂ dargestellt (Gleichung 8)[75].



Wasserglaslösungen verfestigen sich zudem im Kontakt mit Alkali- oder Erdalkalichloriden, wie Calcium- oder Magnesiumchlorid. Gleichung 9 stellt die Erhärtungsreaktion von Natriumwasserglas im Kontakt mit MgCl₂-Lösung dar. Bei der Verwendung von Salzlösungen steigt die Erhärtungsgeschwindigkeit unter anderem mit der Lösungskonzentration.



Bei der Abbindereaktion, die auch als Gelierung bezeichnet wird, bilden sich, neben dem Magnesiumhydroxid, molekulare Strukturen auf der Basis von SiO₄-Tetraedern, die als Silanolgruppen bezeichnet werden. Die Silanolgruppen kondensieren um Kristallisationskeime und bilden mit zunehmender Zeit immer größere Aggregate. Wenn die Menge der Aggregate in der Lösung ausreichend hoch ist, kommt es zur Vernetzung und zur Bildung von Makrostrukturen.

Die Silanolgruppen, aus denen sich das abgegebene Wasserglas zusammensetzt, haben, wie in **Abb. 15** dargestellt, die Möglichkeit gebundenes Wasser nach dem Aushärten abzugeben. Dieser Effekt wird als Synärese bezeichnet und führt dazu, dass sich das Volumen des Wasserglases beim Aushärten reduziert, wie in **Abb. 16** gezeigt wird.

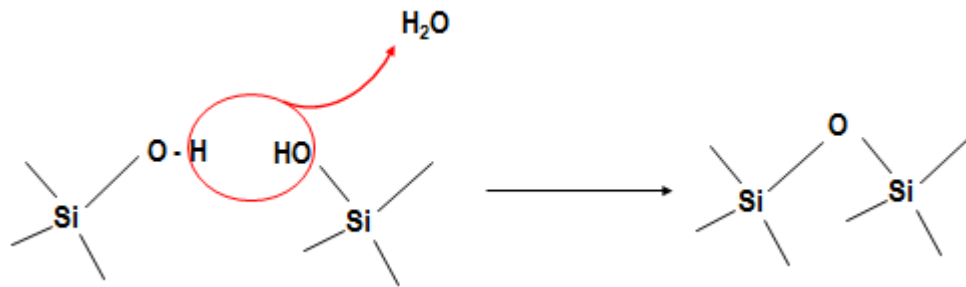


Abb. 15: Abgabe von Wasser durch die Silanolgruppen nach der Gelierung des Wasserglases[76].

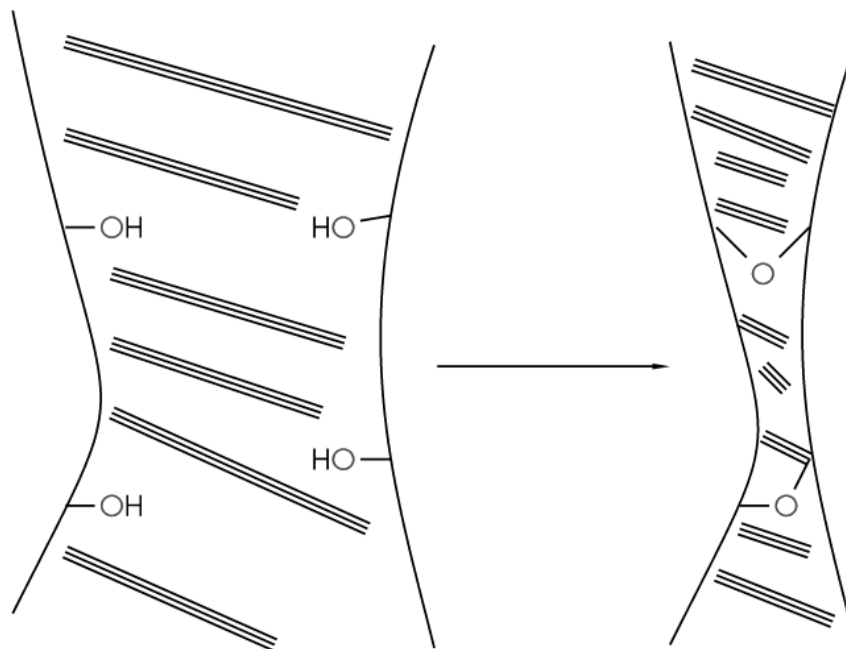


Abb. 16: Schematische Darstellung der Synärese sowie die mit der Abgabe des Wassers einhergehende Volumenverringerng des Wasserglases[77]

Durch die Wasserabgabe bei der Synärese kommt es zu einer Volumenverringerng des Wasserglases. Das bedeutet, dass sofern es trocknen kann, dass Wasserglas in den Wegsamkeiten der Kontaktfuge schrumpft und somit nach dem Trocknen des Wasserglases die injizierten Hohlräume nicht mehr vollständig ausgefüllt sind. Versuche zeigen, dass im Bereich der Kontaktfuge die freigesetzte Synäreselösung entlang der Korngrenzen migriert und als Lösungseinschlüsse im Salz fixiert wird (Abb. 17). [78]

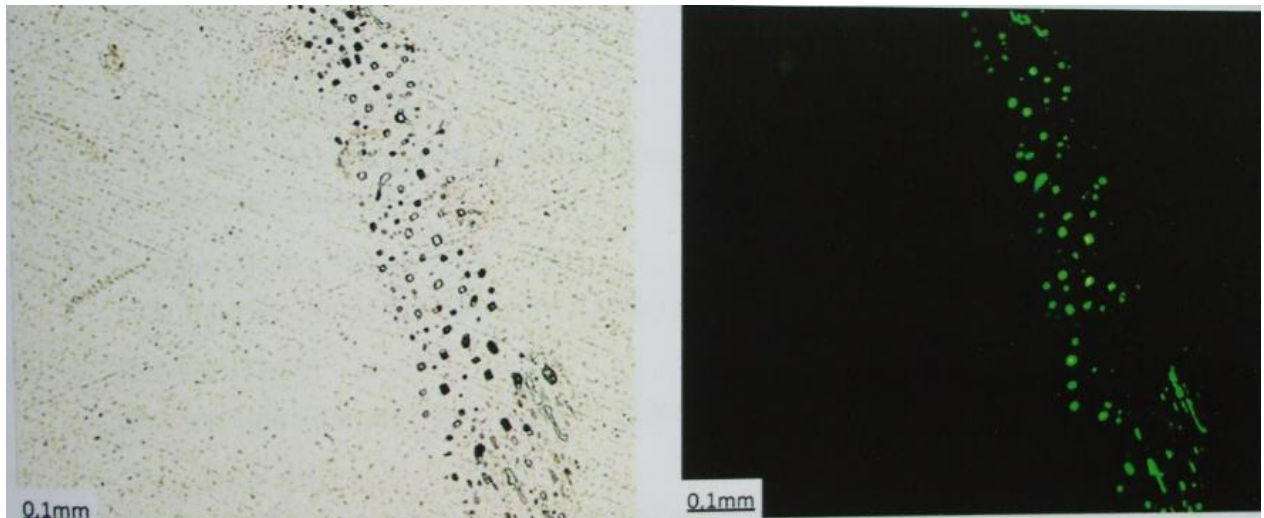


Abb. 17: In Halit fixierte Lösung, die vom Erhärtungsprozess des Silicatgels herrührt. Mit Uranin getracertes Natron-Wasserglas wurde in Steinsalz injiziert, daher die grüne Färbung der Lösungen. Links: parallele Polarisatoren. Rechts: gekreuzte Polarisatoren und Aufnahme unter UV-Licht.

Herstellung/ Handhabung

Wasserglas kann entweder durch eine Ein- oder Zweikomponenteninjektion injiziert werden. Bei der Zweikomponenteninjektion, die auch als Joosten-Verfahren bezeichnet wird, werden das Härtemittel und das Wasserglas nacheinander injiziert und es kommt beim Kontakt der beiden zur Erstarrung des Wasserglases. Beim ursprünglichen Joosten-Verfahren wird zunächst die Wasserglaslösung in das zu verfestigende Medium injiziert und in einem zweiten Schritt wird dann nachfolgend CaCl_2 oder MgCl_2 Lösung injiziert. Beim Zusammentreffen der beiden Lösungen kommt es zur Gelbildung, Verfestigung und Abdichtung (**Abb. 18**)[79].

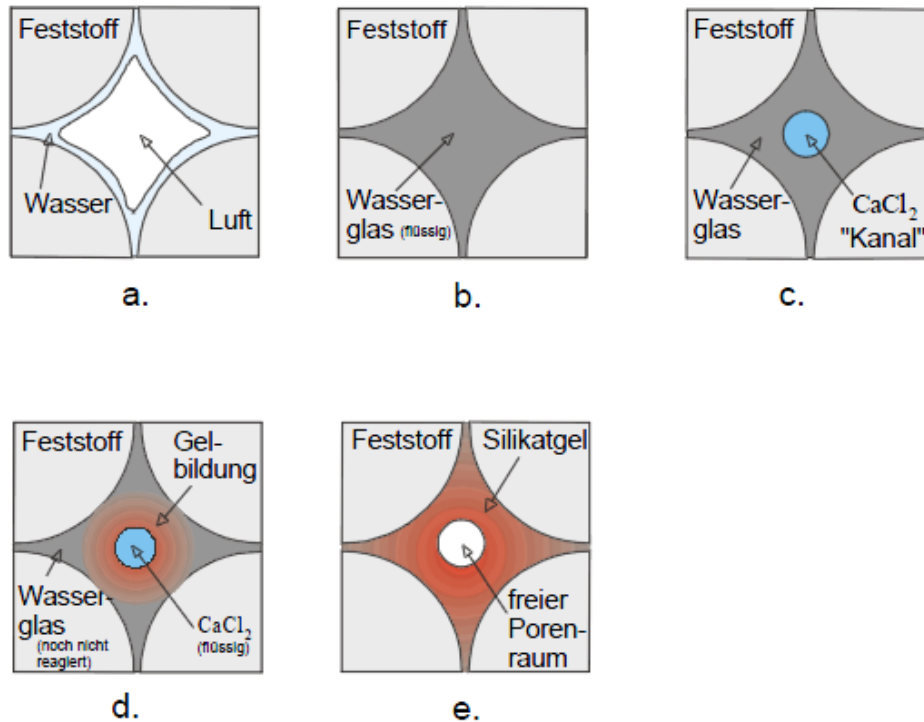


Abb. 18: Modell der Ausbreitung von Wasserglas und CaCl₂ im Porenraum und Gelbildungsreaktion
a) Ausgangszustand in der ungesättigten Bodenzone. b) 1. Injektionsschritt: Einpressen von Wasserglas. c) 2. Injektionsschritt: sofortiges Nachpressen von CaCl₂. d) sofortiger Beginn der Gelbildungsreaktion. e) Endzustand nach Reaktionsende[79].

Bei den Einkomponenten Injektionen werden Wasserglas und Erhärter vor der Injektion vermischt und härten dann langsam nach dem Verpressen aus[80]. Durch die Konzentration des Härtemittels sowie durch das ausgewählte Härtemittel selbst kann die Zeit bis zum Abbinden des Gemisches eingestellt werden. Die Abbindezeiten können zwischen wenigen Sekunden bis hin zu mehreren Stunden betragen.

Aufgrund des guten Eindringverhaltens auch in feinkörnige Boden sowie die vielseitigen Möglichkeiten bei der Regulierung des Abbindeverhaltens wird Wasserglas im Tiefbau häufig verwendet und nach DIN EN 12715 ist Natron-Wasserglas ein zulässiges Injektionsmedium. Wasserglas wird gemäß Verordnung (EG) Nr. 272/2008 wie folgt eingestuft[81]:

- Ätz-/Reizwirkung auf die Haut.
- Schwere Augenschädigung/-reizung.

Viskosität

Wassergläser haben sehr geringe Viskositäten. Beispielsweise hat das Natronwasserglas der Firma HEDINGER eine Viskosität von ca. 80 mPas bei 20°C[81]. Bei Einkomponenten Wasserglas steigt die Fließgrenze und Viskosität von Wasserglas mit zunehmender Gelierzeit. Zudem wird die Fließgrenze und die Viskosität von der Konzentration, Temperatur und der Art des Wasserglases beeinflusst[82]. Beispielhaft sollen im Folgenden die temperaturabhängige

Viskosität von Wasserglas 37/40 sowie die zeitabhängige Viskositätsveränderung von Wasserglas im Kontakt mit unterschiedlich konzentrierten NaCl-Lösungen gezeigt werden (**Abb. 19**).

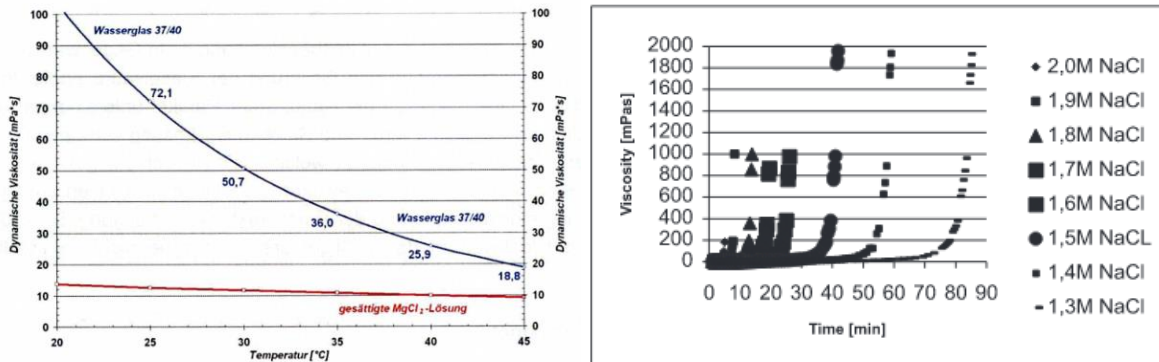


Abb. 19: Links: Temperaturabhängige Viskosität von Wasserglas 37/40[77]
Rechts: Gelierzeiten von Wasserglas bei 8°C nach der Mischung mit NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen[83]

Tab. 17: Viskositäten und Dichten verschiedener Wassergläser

Hersteller/ Produktname	Stoffbeschreibung	Viskosität	Dichte
Herdinger/ Wasserglas	Wässrige Natriumsilikat-Lösung (Na ₂ O x SiO ₂) ca. 40%; Molverhältnis 1:3,35	Ca. 80 mPas bei 20°C	1,36 g/cm ³ bei 20°C
Carl Jäger GmbH /Natronwasserglas 37/40 Bé	Wässrige Natriumsilikatlösung < 40 %, Molverhältnis > 3,2.	20 – 400 mPas bei 20°C	1,35 g/cm ³ bei 20°C
Otto Fischer GmbH & Co. KG / Natronwasserglas 37/40	wässrige Natriumsilikatlösung < 40 %, Molverhältnis > 3,2	20 – 400 mPas bei 20°C	1,35 g/cm ³ bei 20°C

Dichte

Die Dichte von Wasserglas wird in Grad Baumé angegeben und steht meist als Zusatz hinter der Produktbezeichnung. Kaliwasserglas 37/40 zum Beispiel bezeichnet ein Kaliwasserglas mit 37 bis 40 Grad Baumé. 37 bis 40 Grad Baumé entsprechen einer Dichte von 1,344 bis 1,382 g/cm³. Für Injektionen im Kontakt mit Salzgestein wird oft Wasserglas mit 37 bis 40 Grad Baumé verwendet, da Wassergläser mit geringeren Dichten für den Einsatz im Salz zu hohe Wasseranteile haben.

Topfzeit

In Kontakt mit $MgCl_2$ - und $NaCl$ -haltigen Lösungen kommt es zur Ausfällung von Wasserglas[77, 79]. Dem Wasserglas muss bei Injektionen im Kontakt mit Salz kein Härtemittel zugegeben werden, da beide Materialien sofort miteinander reagieren und es im Kontaktbereich zur Ausfällung einer Gelschicht kommt. Allerdings kommt es bei der Wasserglasinjektion nicht zum sofortigen Auskristallisieren der Lösung. Entlang der Randbereiche der Wegsamkeit bildet sich im Kontakt zwischen Salz und Wasserglas eine dünne Schicht aus ausgehärtetem Wasserglas. Auf dieser Schicht gleitet das injizierte Wasserglas dann weiter ins Gebirge hinein. Da Natriumchlorid Ionen durch die Schicht aus ausgehärteten Wasserglas diffundieren, wird davon ausgegangen, dass es allmählich zur Verengung der Wegsamkeit kommt, bis diese vollständig mit erhärtetem Wasserglas gefüllt ist. Dieser Effekt kann zurzeit allerdings noch nicht quantifiziert werden[77].

Wasserglas härtet auch im Kontakt mit dem CO_2 der Luft aus. Dieser Prozess läuft aber relativ langsam ab[84], weswegen eine Aushärtung des Wasserglas während der Injektion aufgrund des Kontakts zum CO_2 nur eine untergeordnete Rolle spielt. Solange reines Wasserglas ohne Härtemittel injiziert wird, kommt es in den für die Injektionsarbeiten nötigen Zeitraum nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Viskosität.

Druckfestigkeit

Über die Druckfestigkeit des mit Wasserglas der Härte 37/40 hergestellten Silikatgels liegen keine Angaben vor. Girmscheid gibt die Endfestigkeit eines Körpers aus reinem Injektionsgut für Silikatgele (Hartgele) mit 1 bis 2 N/mm^2 (1 bis 2 MPa) an, wobei Weichgele etwa ein Zehntel der Festigkeit von Hartgelen besitzen[85]. Auch Strauss und Prinz geben die Druckfestigkeit von Weichelen mit 0,3-0,5 N/mm^2 (0,3 - 0,5 MPa) in der gleichen Größenordnung an[86].

Einsatzbereich

Wasserglas ist ein molekulardispersives Injektionsmaterial mit einer niedrigen Viskosität, wodurch sich Wasserglas für die Injektion von Rissen mit kleinen Öffnungsweiten eignet. In Feldversuchen konnte gezeigt werden, dass Wasserglas in Risse mit Öffnungsweiten von unter 50 μm eindringen kann[87].

Erfahrungswerte

Um die Stabilität von Injektionskörpern aus Wasserglas über längere Zeiträume zu untersuchen hat Dietz[88] Untersuchungen an natürlichen Sandsteinen und mit Silikatgelen verkittetem Sand durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass nach 10 Jahren keine Ermüdung oder Entfestigung festzustellen ist.

Der einzige Unterschied zwischen einem silikatisch gebundenen natürlichen Sandstein und einem künstlich mit Silikatgelen verkitteten Sand ist, dass aufgrund des Altersunterschieds der

Proben die Kieselsäure im Natursandstein teilweise schon auskristallisiert ist. Aus dem Kieselsäuregel wird mit der Zeit Opal, Chalcedon und schließlich Quarz. Dies sind auch im Zechsteinsalinar sowie im Detritus von marinen Salzseen auftretende stabile Mineralphasen[88].

3.2.2 Kunstharze

Unter dem Begriff Kunstharze wird eine ganze Gruppe an Kunststoffen zusammengefasst, die durch Polymerisations-, Polyadditions- oder Polykondensationsreaktionen synthetisch hergestellt werden[89]. Die Gruppe der Kunstharze lässt sich wie folgt weiter untergliedern[90]:

- Epoxidharze,
- Polyurethanharze,
- Organomineralharze (Silikatharze),
- Polyesterharze

Kunstharze enthalten keine Schwebstoffe und lassen sich daher auch gut in kleine Risse/Klüfte injizieren. Aufgrund der großen Bandbreite an unterschiedlichen Kunstharzen sind diese als Injektionsmaterialien in der Baubranche weit verbreitet. Aber auch bei einem ausgewählten Kunstharz lassen sich durch Änderungen im Mischungsverhältnis (bei Zweikomponenten Harzen) oder durch Additive die Viskositäten, Abbindezeiten und mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Elastizitätsmodul) in Grenzen beeinflussen.

Aufgrund der großen Anzahl an verschiedenen Kunstharz Injektionsmaterialien werden in diesem Abschnitt nur Projekte beschreiben, bei denen Kunstharze im Salzgebirge erfolgreich eingesetzt wurden. Im folgenden Abschnitt „3.2.2.1 Denepox 40“ wird das erfolgreich zur Permeabilitätsverringerng bei Oberflächenpacker- und Bohrlochversuchen im Salz verwendete Epoxidharz Denepox 40 näher beschrieben.

Asse 1982 (Oberflächenversiegelung und Abdichtung von Kluftwegsamkeiten):

Im Bohrschacht 4 der Asse wurden mehrere Carnallitit- und Kieseritlagen aufgefahren. In diesen Bereichen kam es aufgrund der starken hygroskopischen Eigenschaften der Salze im Kontakt mit den Grubenwettern zur Entstehung von wässrigen Lösungen und Tropfstellen. Bereits nach kurzer Zeit ließen sich im Carnallititbereich kavernöse Auslaugungserscheinungen beobachten. Durch eine Versiegelung der Schachtoberfläche sollte das Fortschreiten der Laugung verhindert werden. Nachdem die feuchten Schachtoberflächen durch das Einleiten von Grubenwettern mit einer geringeren Luftfeuchtigkeit getrocknet wurden, traten entlang von feinen Rissen und Klüften Sickerlösungen aus dem Gebirge in den Schacht aus. Um die Kluftwegsamkeiten abzudichten wurde über abgepackerte 0,8 und 1,5 Meter lange Bohrlöcher ein Zweikomponenten Epoxidharz injiziert (Webac EP 400 der Firma Webac Bauinjektionschemie

GmbH, Hamburg). Bis zum Beginn der Beschichtungsarbeiten im Schacht ein Jahr später wurden keine Lösungszutritte im Schacht beobachtet[91].

Kalibetrieb Werra:

Während des Vortriebs kam es im Kontaktbereich zwischen Steinsalz (NaCl α) und einem Basaltschlot zu Zutritten von Salzlösung. Zunächst wurde versucht, die Zutritte mit Magnesiainjektionen abzudichten. Aufgrund der begrenzten Eindringfähigkeit des Magnesiainjektionsmaterials kam es nicht zum gewünschten Abdichtungserfolg. Da keine Feinstmagnesiabindemittel verwendet wurden, ließen sich mit dem MgO -Binder nur Rissweiten bis $300\ \mu\text{m}$ injizieren. Anschließend wurde konturnah mit Polyurethan und versuchsweise auch mit Polyester injiziert. Mit Polyurethaninjektionen konnten Rissweiten bis $50\ \mu\text{m}$ injiziert werden. Die Injektionsbohrlöcher waren bis zu 6 Meter tief und hatten einen Abstand von $0,2$ bis $2,0$ Meter zueinander. Im Schnitt wurde rund 1 Liter pro Bohrmeter injiziert und die mittlere Reichweite des Injektionsmaterials in das Gebirge hinein betrug $75\ \text{cm}$. Durch die Kunstharzinjektionen konnte ein Abdichtungsgrad von $95\ \%$ erreicht werden[92].

In jüngerer Zeit wurden umfangreiche Versuche mit Kunstharzen (Denepox 40) im Vorhaben CARLA durchgeführt [2].

3.2.2.1 Denepox 40

Von den bekannten Kunststoffinjektionsmaterialien sind Acryl-Gele und Einkomponenten Polyurethane für Injektionen im Salz nicht geeignet, da die Polymerisation unter den gegebenen Bedingungen gestört sein kann, oder sie nur eine geringe Haftfestigkeit am Salzgestein aufweisen. Vorteilhaft sind niedrigviskose Epoxidharze. Als Vorzugsmaterial wurde im Ergebnis umfangreicher Eignungstests und In-Situ Versuche das Material Denepox 40 von der Firma De Neef ausgewählt. Die Vorteile von Denepox 40 sind die niedrige Anfangsviskosität, die hohe Adhäsion zum Gebirge sowie eine hohe Zugfestigkeit[19].

Die Hersteller von Kunstharzen gehen davon aus, dass von einer Beständigkeit des Injektionsmaterials für einen Zeitraum von 100 bis 150 Jahren ausgegangen werden kann. Es ist davon auszugehen, dass nach dieser Zeit, durch das Aufkriechen des Gebirges auf das Verschlussbauwerk die Wegsamkeiten im Gebirge verschlossen sind[2].

Zusammensetzung

Denepox 40 ist ein niedrig viskoses Zweikomponenten Epoxidharz. Die Komponente A ist das Epoxydharz und die Komponente B ist ein Polyamin Härtemittel[93].

Herstellung/ Handhabung

Die Anlieferung von Denepox 40 erfolgt in zwei unterschiedlichen Gebinden, in denen die beiden Komponenten jeweils einzeln verpackt sind. Es ist wichtig beim Mischen der beiden Komponenten genau das vorgegebene Härtemittel-/Epoxydharzverhältnis einzuhalten sonst

kommt es nicht zur vollständigen Umsetzung der beiden Reaktanden und Teile vom Harz oder Härter bleiben ohne Reaktionspartner. Vom Hersteller wird empfohlen 2,85 Volumenanteile der Komponente A mit einem Anteil der Komponente B zu vermischen. Anschließend soll die Mischung 3 Minuten lang bei langsamer Geschwindigkeit umgerührt werden, wobei darauf zu achten ist, sowohl die Seiten als auch den Boden des Mischgefäßes sorgfältig umzurühren. Zu beachten ist, dass große Mengen Epoxidharz nach dem Anmischen schneller aushärten als kleine und, dass das Harz bei höheren Temperaturen schneller aushärtet als bei niedrigen[93].

Im Technischen Merkblatt für Denepox 40 werden folgende Arbeitsschritte für die Injektion von Denepox 40 angegeben[94]:

Zuerst muss die zu injizierende Fläche von anhaftendem Staub, Betonschlamm, Ölen und Fetten gereinigt werden, um eine optimale Verbindung zwischen Injektionsmaterial und Gebirge herzustellen. Bei der Auswahl der Packer ist darauf zu achten, dass diese für die Injektion von Harzen freigegeben sind. Die Abstände der Packer sind so zu wählen, dass ein vollständiges Eindringen des Harzes in den Riss möglich ist. Nach dem Setzen der Packer werden die beiden Komponenten des Harzes im vorgegebenen Verhältnis in einem Rührwerk miteinander vermischt, wobei nur die Menge, die in den nächsten 40 Minuten verarbeitet werden kann, angemischt werden sollte. Die Injektion kann entweder mit einer Handpumpe oder einer mechanischen Pumpe erfolgen. Nicht ausgehärtetes Injektionsmaterial kann mit dem Lösungsmittel MEK entfernt werden.

Im Technischen Merkblatt[94] werden zudem folgende Sicherheitshinweise für den Umgang mit Denepox 40 gegeben. Die Komponente A wird als ätzend beschrieben und Komponente B ist korrosiv. Im Umgang mit beiden Komponenten sollten immer Schutzbrille, Handschuhe und Schutzbekleidung getragen werden.

Viskosität

Die Viskosität der Mischung wurde nach Vorschrift ASTM D-1638 (Methods of Testing Urethane Foam Isocyanate Raw Materials) bestimmt und wird bei 25°C mit 85 mPas angegeben[94].

Dichte

Die Dichte von Denepox 40 beträgt zwischen 1 und 1,1 g/cm³.

Topfzeit

Denepox 40 hat eine Verarbeitungszeit von ca. 80 Minuten (100 g bei 25°C) und ist nach 24 Stunden ausgehärtet[94]. Bei der Verarbeitungszeit ist zu beachten, dass diese bei großen Mengen und bei höheren Umgebungstemperaturen kürzer ausfallen kann[93].

Druckfestigkeit

Die Festigkeitswerte von Denepox 40 sind in **Tab. 18** aufgelistet. Anzumerken ist, dass die vollständige chemische Stärke und mechanische Festigkeit nach nur 7 Tagen Aushärtung bei 20°C erreicht wird[94]. Bei Temperaturen von über 50°C nehmen die mechanischen Eigenschaften der Epoxydharze ab[94].

Tab. 18: Festigkeiten von Denepox 40[94].

Eigenschaft	Wert	Norm
Druckfestigkeit	ca. 100N/mm ²	DIN 50014
Zugfestigkeit	ca. 50 N/mm ²	ASTM D-638
Biegezugfestigkeit	> 60 N/mm ²	ASTM D-638

Einsatzbereich

Durch die geringe Viskosität eignet sich Denepox 40 im besonderen Maße zum Injizieren von feinen Rissen/ Klüften. Da keine wasserbasierte Flüssigkeit als Anmachflüssigkeit benötigt wird, eignet sich Denepox 40 für den Einsatz im Kontakt mit hygroskopischen Kalisalzen, da es zu keinen Löse- oder Umlöseprozessen zwischen Injektionsmaterial und anstehendem Salz kommt.

Vor der Injektion mit Denepox sollte die Oberfläche vorbereitet werden, das heißt der zu injizierende Bereich muss frei von Staub, Betonschlamm, Ölen oder Fetten sein, da diese Substanzen die Anhaftung des Injektionsmaterials an dem Gebirge negativ beeinflussen können[94]. Gerade bei der Injektion von feinen Rissen/Klüften im Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge ist nicht auszuschließen, dass Staub oder Betonschlamm zu injizierenden Wegsamkeiten vorzufinden sind.

Kaledin[19] trifft die Annahme, dass aufgrund der geringen Viskosität zwischen 70 mPas und 150 mPas Denepox 40 für die Injektion von Rissweiten zwischen 10 µm und 100 µm geeignet ist.

Erfahrungswerte

Die Untersuchung der Wirksamkeit von Denepox 40 als Injektionsmaterial im Carnallitit erfolgte mittels Bohrlochversuchen (D=150 mm) und Oberflächenpackertests (0,5 m * 0,5 m)[2]. In beiden Fällen gelang eine Verringerung der Permeabilität um mehrere Größenordnungen (**Tab. 19**). Der Injektionsdruck bei den Oberflächenpackertests betrug zwischen 10 und 15 bar. Bei den Bohrlochtests wurde mit maximal 30 bis 40 bar injiziert.

Tab. 19: Permeabilitäten vor und nach den Oberflächenpackertests des Injektionsmaterials Denepox 40[2]

Bezeichnung des Versuchs	Permeabilität	
	Vor der Injektion	Nach der Injektion
Oberflächenpacker 4	6,5 E-16 m ²	< 7 E-17 m ²
Oberflächenpacker 5	7 E-16 m ²	< 8 E-17 m ²
Oberflächenpacker 6	6 E-15 m ²	6 E-18 m ²
Oberflächenpacker 7	4 E-14 m ²	2 E-19 m ²
Bohrloch 1	> 1 E-14 m ²	6,5 E-20 m ²
Bohrloch 2	6 E-17 m ²	5 E-19 m ²

3.3 Sonstige Injektionsmittel

3.3.1 Mineralsynthese

Bei der Mineralsynthese kommt eine übersättigte Lösung zum Einsatz. Durch den Zusatz von Fällungsverzögerern kann eine Lösung in Bezug auf ein Mineral übersättigt werden. Durch den zeitlichen Abbau der Fällungsverzögerer kommt es zeitversetzt zur Auskristallisation des übersättigten Minerals aus der Lösung. Sowohl die Zeitdauer bis zum Aktivitätsverlust des Fällungsverzögerers als auch die Geschwindigkeit des Aktivitätsverlusts lassen sich durch die Auswahl geeigneter Fällungsverzögerer steuern. Die übersättigten Lösungen werden injiziert und nach einem definierten Zeitraum kommt es dann zur Ausfällung des Minerals in den von der Lösung erreichten Porenräumen. Im Gegensatz zu den partikelgestützten und partikelfreien Injektionsmaterialien kommt es nicht zur vollständigen Ausfüllung des Hohlraums sondern nur zu Verringerung der Permeabilität in den vorhandenen Wegsamkeiten, was in **Abb. 20** zu sehen ist[95].

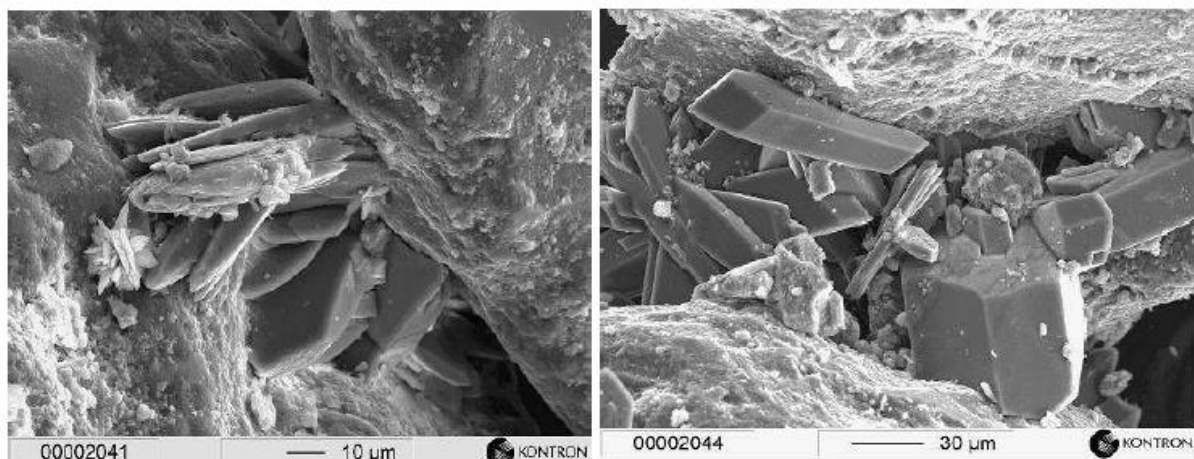


Abb. 20: Gipskristalle in den Porenräumen eines Sandsteins. Die Gipskristalle blockieren die Porenräume nicht komplett, aber führen zu einer Reduktion der Permeabilität[95]

Es gibt Erfahrungen mit einer Auswahl an Mineralen, die zur Mineralsynthese verwendet werden können. Nach Ziegenbalg können die folgenden Substanzen zur Herstellung von übersättigten Lösungen verwendet werden[96]:

- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Gips)
- CaSO_4 (Anhydrit)
- BaSO_4 (Barit)
- CaCO_3 (Calcit)
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandit)
- $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ Calciumphosphat (kommt nicht in Reinform in der Natur vor)
- CaSiO_3 Calciumsilicat (Wollastonit)

Im Weiteren werden nur Gips, Anhydrit, Calcit und Portlandit berücksichtigt, da diese Minerale natürlicherweise im Salinar vorkommen. Calcit wird als erstes Mineral im Salinarzyklus ausgeschieden und kommt teilweise auch in Salzstöcken vor. Ein Beispiel hierfür stellt das Straßfurt-Karbonat im Salzstock Gorleben dar. Portlandit ist einer der Hauptbestandteile von Zementstein und kann daher auch im Kontakt mit Salzbeton eingesetzt werden.

Zusammensetzung:

Das Fluid besteht aus einem gelösten Mineral (über der Sättigungskonzentration) und dem Fällungsverzögerer. Es sind zahlreiche Verbindungen als Fällungsverzögerer einsetzbar, die in **Tab. 20** aufgelistet sind. Fällungsverzögerer oder Inhibitoren verhindern oder verzögern für einen definierten Zeitraum die Keimbildung und das Kristallwachstum in der Lösung. Inhibitoren werden häufig eingesetzt, um Scaling zu verhindern. Als Scaling wird das ungewünschte Ausfallen bestimmter Minerale bezeichnet. Besonders in Rohrleitungen und an Reaktorwänden wird versucht, durch Inhibitoren Scaling zu verhindern, wodurch die Nutzungsdauer von Bauteilen erhöht wird[97].

Viele der Fällungsverzögerer sind Säuren. Aufgrund des hohen pH-Werts durch den Salzbeton im Bereich der Kontaktfuge können Säuren als Fällungsverzögerer nicht verwendet werden. Die Säuren werden durch die basischen Poren- und Überschusslösungen gepuffert und verlieren ihre Wirksamkeit. Porenlösungen des Salzbetons M2 haben einen pH-Wert von 10,9 und die Überschusslösung hat einen pH-Wert von 11,3[98].

Die weiteren Fällungsverzögerer aus **Tab. 20** sind nicht in den Arnsberger Listen aufgeführt und daher derzeit nicht für den Einsatz unter Tage zugelassen. Die Fällungsverzögerer, die von Ziegenbalg in der Grube Merkers zur Bekämpfung von Lösungszuflüssen verwendet wurden, werden in der verfügbaren Literatur[96] nicht namentlich erwähnt.

Tab. 20: Klassifikation der Fällungsverzögerer[97]

Stoffklasse	Chemische Verbindung
Carboxylate und Carboxylsäuren	Carboxymethyl-Cellulose
	Alginat
Monomere der Di- und Tri-Carbonsäuren	Natriumcitrat
Polyamide	
	Acrylamide
Homo, Block und Co-polymere	Acrylnitril
Polyphosphate	Pyrophosphate
	Pentanatriumtriphosphat
	Natriumhexametaphosphate
	Aminomethylenphosphat
Phosphonsäuren und ihre Ester	NTMP
	HEDP, ENTMP
Andere	Iminodisuccinat

Prinzipiell sind auch andere Methoden zur Ausfällung von Mineralen aus Lösungen denkbar. Durch Zugabe von CO_2 zu CaCl_2 -Lösungen kann Karbonat ausgefällt werden[97].

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Hohlraumfüllung ist abhängig von dem ausgefällten Mineral, der Menge des ausgefällten Minerals, der Kristallgröße und Kristallform. Je intensiver die Minerale miteinander verwachsen sind und je mehr des Hohlraumvolumens gefüllt ist, desto höher ist die Druckfestigkeit. Zudem ist die Druckfestigkeit bei vielen kleinen Kristallen größer als bei wenigen großen.

3.3.2 Salzhydratschmelzen

Salzhydrate sind Salze anorganischer und organischer Säuren, die eine gewisse Menge an Kristallwasser enthalten. Als Kristallwasser wird Wasser bezeichnet, das in kristallinen Festkörpern vorkommt. Salzhydrate können zwischen 1 und 12 Mol H_2O pro Mol Salz in das Kristallgitter einlagern[99].

Im Gegensatz zu Reinsalzen ohne Kristallwasser, wie z.B. NaCl , haben Salzhydratschmelzen wesentlich niedrigere Schmelzpunkte. Es gibt eine Vielzahl an Salzhydraten mit Schmelztemperaturen unter $100\text{ }^\circ\text{C}$. Für Injektionszwecke eignen sich Salzhydrate, die eine Schmelztemperatur unterhalb von 50 bis $60\text{ }^\circ\text{C}$, aber oberhalb der Gebirgstemperatur haben.

Vor dem Injektionsvorgang werden die Salzhydrate erwärmt und dabei aufgeschmolzen. Der Schmelzvorgang sollte unter ständigem Rühren erfolgen, damit es nicht zum inkongruenten Schmelzen der Salzhydrate und der Bildung eines Bodensatzes aus der Schmelze kommt. Anschließend werden die flüssigen Salzhydratschmelzen in die Kontaktfuge zwischen

Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge injiziert und kristallisieren im Laufe der Abkühlung aus.

Da Salzhydratschmelzen eine hohe Acidität haben[99, 100] muss geprüft werden, welchen Einfluss das alkalische Milieu im Bereich der Kontaktfuge auf die Salzhydratschmelzen hat und inwiefern deren Eigenschaften beeinflusst werden. Zudem muss vor dem Einsatz von Salzhydratschmelzen als Injektionsmaterialien geprüft werden, ob und wie stark diese den Beton des Streckenverschlussbauwerks angreifen. Salzhydratschmelzen können eine Acidität haben, die vergleichbar ist mit der von HCl und können gegenüber Metallen korrodierend wirken[99]. Allerdings weisen nur die Salzhydratschmelzen eine hohe Acidität auf, die festen Salzhydrate nicht.

„Duffy und Ingram haben die Acidität von Salz-Wasser-Systemen mit der von Mineralsäuren verglichen [101]. Im Konzentrationsbereich der Salzhydratschmelzen wurden in Salz-Wasser-Systemen ähnliche Aciditäten wie in starken Säuren festgestellt.“ [102] (Seite 44)

Ein weiterer Nachteil der meisten Salzhydratschmelzen ist, dass diese oberhalb des Schmelzpunktes zur Wasserabgabe neigen[99]. Somit kann es im Kontakt mit den Salzhydratschmelzen sowohl im Salzbeton als auch im anstehenden Salzgebirge zu Lösungserscheinungen kommen.

Salzhydratschmelzen eignen sich nur für die Kontaktfugeninjektion, wenn gezeigt werden kann, dass es aufgrund der Acidität und der Wasserabgabe nicht zur Verschlechterung der Materialeigenschaften des Streckenverschlussbauwerks und des umgebenden Salzgebirges kommt.

4 Verträglichkeiten

Im Folgenden Abschnitt werden die Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Injektionsmaterialien und dem Gebirge sowie den Baustoffen des Streckenverschlussbauwerks betrachtet. Hierdurch wird eine Aussage über die Einsatzfähigkeit der Injektionsmaterialien im Kontakt mit verschiedenen Baustoffen und dem Salzgebirge mit unterschiedlichen Zusammensetzungen bezüglich der Mineralogie.

4.1 Baustoff-Gebirge

Im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Salzgebirge kommt es hauptsächlich zu chemischen lösenden Angriffen zwischen den beiden Phasen in Form von Feststoff-Flüssigkeits Interaktionen. Zudem kann es zu physikalischen Feststoff-Feststoff Interaktionen durch die Wärmeentwicklung beim Abbinden des Baustoffes oder durch den Aufbau eines Quelldruckes beim Abbinden des Baustoffes kommen.

- Flüssigkeits-Feststoff Interaktionen
 - Überstandslösung aus dem Baustoff greift das anstehende Salz an
 - Betonschlämpe greift das anstehende Salz an
 - Lösungen aus dem Salzgebirge (Entweder IP21-Lösung oder gesättigte NaCl-Lösung) greifen den Baustoff an
- Feststoff-Feststoff Interaktionen
 - Chemische Alteration durch Wärmeentwicklung beim Abbindevorgang
 - Quell-/ Kristallisationsdruck des Baustoffes ist höher als die Druckfestigkeit des Baustoffes

Im Folgenden werden nur die Flüssigkeits-Feststoff Interaktionen näher betrachtet.

Bei den Flüssigkeits-Feststoff Interaktionen wird davon ausgegangen, dass sowohl die Betonplämpe, als auch eventuell entstehendes Überstandswasser die gleiche Fluidzusammensetzung haben wie die Anmachlösung des Baustoffes. Sorelbeton wird mit $MgCl_2$ -haltiger Lösung angemacht und Salzbeton mit gesättigter NaCl-Lösung.

Die Auswahl der Formationslösungen, die in Kontakt mit dem Baustoff kommen können, wird auf gesättigte NaCl- und IP21 Lösung beschränkt. Zutretende Lösungen werden sich entlang der Migrationspfade innerhalb der Salzstruktur oder entlang der Strecken mit Steinsalz aufsättigen, bevor sie in Kontakt mit dem Bauwerk kommen. Beim Kontakt der NaCl-Lösung mit Kalilagern (Carnallitit oder Hartsalz) finden weitere Umlöseprozesse statt. Hierbei werden die Kalisalze aufgelöst und NaCl fällt aus. In Abhängigkeit von den vorkommenden Salzmineralen wird sich in der zutretenden Lösung eine Zusammensetzung zwischen reiner NaCl-gesättigter und IP21-Lösung einstellen. Daher werden diese beiden Lösungen näher betrachtet in Bezug auf lösende Angriffe von zutretenden Lösungen an den Baustoff[24].

4.1.1 MgO-Baustoffe

Zum Anmischen von Magnesiabeton kommen unterschiedliche $MgCl_2$ -haltige Lösungen zum Einsatz. Für die folgende Betrachtung wurde eine $MgCl_2$ -Lösung der Zusammensetzung IP21 gewählt. Diese steht im Lösungsgleichgewicht mit folgenden Salzen: Halit, Sylvin, Carnallit und Kainit. Wenn davon ausgegangen wird, dass sowohl die Betonschlämpe als auch das Überstandswasser in Bezug auf die gelösten Ionen die gleiche Zusammensetzung haben wie die Anmachlösung, dann wird durch die von Magnesiabeton freigesetzten Lösungen nur Anhydrit und Kieserit gelöst (**Abb. 21**). Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass die Löslichkeit des Anhydrits vernachlässigbar gering ist und Kieserit eine geringe Reaktionsgeschwindigkeit aufweist.

In der umgekehrten Richtung ist der Magnesiabeton durch aus dem Salzgebirge oder Grubengebäude mit der Zusammensetzung IP21 zutretende Lösungen nicht lösungsfähig. Im Kontakt mit NaCl-gesättigter Lösung wird die strukturegebende Sorelphase 3-1-8 im Magnesiabeton angegriffen. Dies passiert, wenn der $MgCl_2$ -Gehalt der Lösung unter 50 g $MgCl_2/kg$ H_2O fällt[25].

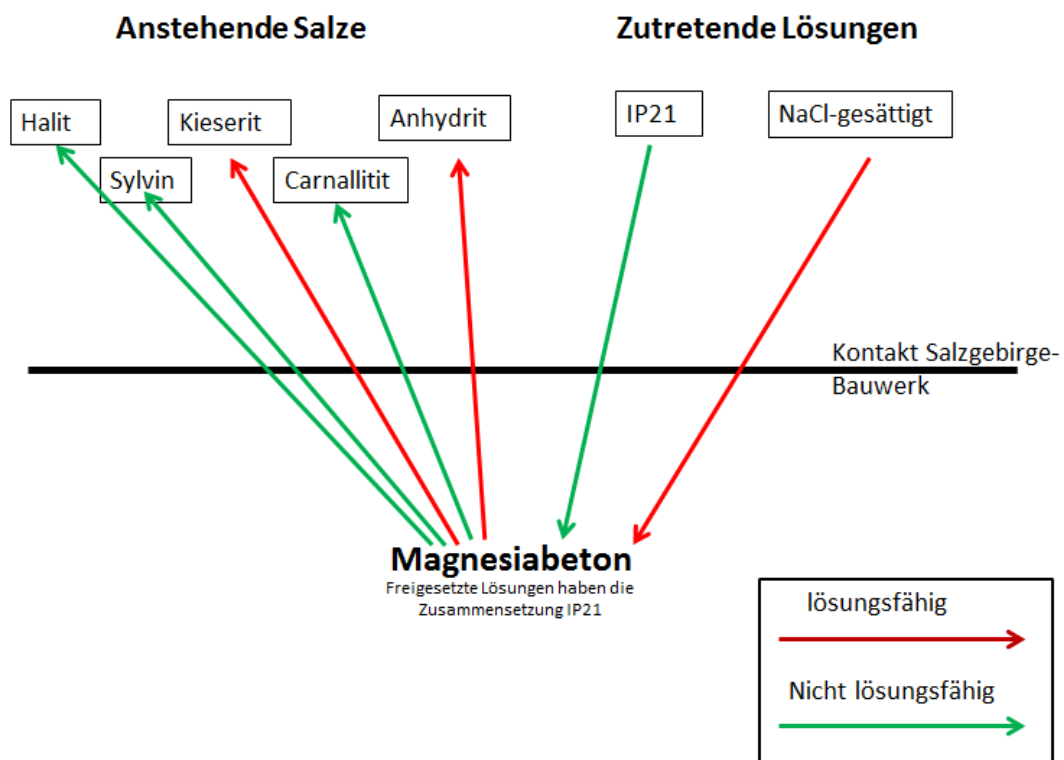


Abb. 21: Löslichkeiten von Baustoff und Salzgebirge im Kontakt mit aus dem jeweilig anderen Medium zutretenden Lösungen

4.1.2 Salzbeton

Analog zum Magnesiabeton werden folgende Fälle betrachtet: In Form von Betonschlämpe oder als Überstandswasser freigesetzte Lösung aus dem Baustoff, die mit dem Salzgebirge reagiert, und der Zutritt von gesättigten Lösungen aus dem Salzgebirge heraus an das Bauwerk.

Zur Herstellung von Salzbeton wird NaCl-gesättigte Lösung verwendet. In den folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass sowohl die Betonschlämpe als auch das Überstandswasser in Bezug auf NaCl gesättigt sind. Wie in Kapitel „2 Beschreibung der Gesteine“ beschrieben, ist von den im Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge anstehenden Salzen nur Halit lösungsstabil im Kontakt mit gesättigter NaCl-Lösung.

Im Kontakt mit IP21 Lösung kommt es zu zwei verschiedenen Reaktionen, die den Salzbeton angreifen. Zum einen kommt es durch das in der IP21-Lösung enthaltene Sulfat (IP21-Lösung enthält 34 g/l $MgSO_4$) zur Bildung von Calciumaluminatsulfaten, wie Ettringit, im Salzbeton. Zum anderen wird der Salzbeton auch durch den lösenden Angriff von Magnesium geschädigt[25].

Krauke und Fliß[25] haben an Salzbetonproben Durchströmungsversuche mit IP21 und NaCl gesättigter Lösung durchgeführt. Da die Proben mit der Rezeptur M2 nicht permeabel genug für die Strömungsversuche waren, wurden speziell für die Versuche permeablere Proben hergestellt, die dann nach 28 Tagen Abbindezeit durchströmt wurden. Die Proben hatten eine Länge von 10 cm und wurden in einer Versuchsreihe mit NaCl- und IP21 Lösung einfach durchströmt und in einem weiteren Versuch mehrfach mit IP21 Lösung durchströmt.

Nach den ersten Durchströmungszyklen mit IP21 Lösung verringerte sich die Permeabilität, stieg aber um 2 Größenordnungen bis zum Ende des Versuches mit 34 Durchströmungszyklen mit jeweils 50 ml Lösung an.

Die einfachdurchströmten Proben wurden nach 50, 100 und 150 Tagen hinsichtlich der einaxialen Druckfestigkeiten untersucht. Die Druckfestigkeiten wurden im Versuchszeitraum nur geringfügig beeinträchtigt, sodass der Baustoff seine ursprüngliche Festigkeit nicht verloren hat[25].

In **Abb. 22** ist zusammenfassend dargestellt im Kontakt mit welchen Lösungen Salzbeton stabil ist und welche Salze durch aus dem Salzbeton freigesetzte Lösungen angegriffen werden.

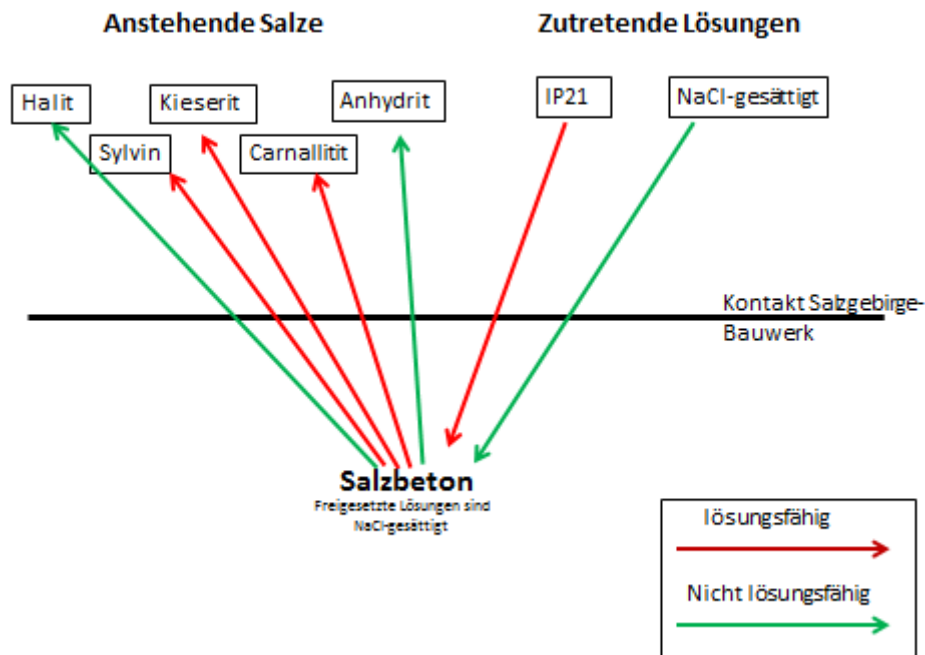


Abb. 22: Löslichkeiten von Salzbeton und Salzgebirge im Kontakt mit aus dem jeweilig anderen Medium zutretenden Lösungen

4.2 Injektionsmaterialien-Baustoffe

In diesem Abschnitt werden Interaktionen zwischen den Baustoffen des Verschlussbauwerks (Salzbeton und MgO-Binder) und den möglichen Injektionsmaterialien betrachtet. Da der Baustoff zum Zeitpunkt der Injektion abgebunden ist, werden nur Lösungen betrachtet, die vom Injektionsmaterialien ausgehen und den Baustoff angreifen. Zusammenfassend sind die Ergebnisse in **Tab. 21** dargestellt.

4.2.1 MgO-Binder-Baustoffe

Für die Abbindereaktion des Magnesiumbinders, der die Reaktion von Magnesiumoxid oder Magnesiumhydroxid mit magnesiumhaltigen Salzlösungen zugrunde liegt, wird Baustoff suspension mit $MgCl_2$ -haltigen Anmachlösungen hergestellt. Dies können zum Beispiel IP21 oder R-Lösungen sein. Wenn es während der Injektion eines Magnesiabinders in die Kontaktfuge zwischen einem Streckenverschlussbauwerk aus Salzbeton und dem Salzgebirge zum Abfiltrieren des Lösungsanteils des Injektionsmaterials kommt, dann kann die magnesiumhaltige Lösung den Salzbeton angreifen. Je mehr Magnesium die angreifenden Lösungen enthalten, desto instabiler wird Salzbeton, da durch den Austausch des Ca der CSH-Phasen gegen Magnesium die Festigkeit des Betons verloren geht[103]. Daher können Injektionsmaterialien aus Magnesiabinder nur im begrenzten Umfang eingesetzt werden, wenn das Streckenverschlussbauwerk aus Salzbeton besteht. Besteht das Streckenverschlussbauwerk aus MgO-Binder sind Injektionsmaterialien, die $MgCl_2$ -haltige Anmachlösungen enthalten, geeignet.

4.2.2 Feinstzement-Baustoffe

Bei den Feinstzementen, wie Ultrafin oder Microdur ist die Anmachlösung NaCl-gesättigt und kann Magnesiabeton angreifen. Für Streckenverschlussbauwerke aus Salzbeton sind diese Feinstzementsuspensionen, die NaCl-haltige Anmachlösungen enthalten, geeignet.

4.2.3 Zweikomponenten Bitumen-Baustoffe

Bitumen reagiert nicht mit dem Salzgebirge und kommt natürlich in Salzlagerstätten vor, was den Einsatz von Zweikomponenten Bitumen im Kontakt mit Magnesiabeton und Salzbeton möglich macht[19]. Zudem wurde 2K-Bitumen erfolgreich im Rahmen des Vorhabens CARLA verwendet, um eine künstlich hergestellte Betonierfuge zwischen zwei MgO-Betonplatten zu injizieren.

4.2.4 Kunstharze-Baustoffe

Kunstharze (zu dieser Gruppe zählt auch Denepox 40) eignen sich für den Einsatz als Injektionsmaterialien im Kontakt mit Salzbeton und Magnesiabinder. Da die Kunstharze keine wasserhaltige Lösung als Anmachflüssigkeit benötigen, kommt es zu keinen Löse- oder Umlöseprozessen zwischen Anmachlösung und Baustoff. Der Einsatz von Kunstharzen zu Abdichtungszwecken ist in der Bau- und Tiefbauindustrie weit verbreitet[19]. Allerdings kann die Stabilität der Kunstharze nur für einen Zeitraum von 100 bis 150 Jahren gezeigt werden, womit eine Einstufung der Kunstharze als langzeitstabil nicht möglich ist.

4.2.5 Wasserglas-Baustoffe

Für den Einsatz als Injektionsmaterialien für Salzbeton oder Magnesiabinder eignet sich Wasserglas nur unter bestimmten Bedingungen. Bei der Auswahl des Injektionsmaterials ist darauf zu achten, dass das Wasserglas keinen zu hohen Wassergehalt besitzt. Aus diesem Grund eignen sich nur wasserärmere Wassergläser für Injektionen im Kontakt mit Salzbeton oder Magnesiabinder.

Tab. 21: Verträglichkeit zwischen den beiden Baustoffen Magnesiabeton und Salzbeton mit den verschiedenen Injektionsmaterialien

	MgO-Binder	Feinstzement	2K-Bitumen	Wasserglas	Kunstharze
Magnesiabeton	+	-	+	+	+
Salzbeton	-	+	+	+	+

5 Anwendungsgrenzen

Im Folgenden werden die untere und obere Anwendungsgrenze der Injektionsmaterialien definiert und die Anwendungsgrenzen der einzelnen Injektionsmaterialien in **Abb. 23** sowie in **Tab. 22** zusammengefasst. Die Anwendungsgrenzen für die einzelnen Injektionsmaterialien wurden im Kapitel „3 Injektionsmaterialien“ bei den Beschreibungen der Injektionsmaterialien unter dem Punkt Einsatzbereich bereits kurz angesprochen.

5.1 Untere Anwendungsgrenzen

Die untere Anwendungsgrenze gibt an, ab welcher Rissöffnungsweite kein Injektionsmaterial mehr in den Spalt eindringen kann. Bei partikelgestützten Injektionsmaterialien kommt es zur Bildung eines Filterkuchens, wenn die Mindestspaltöffnungsweite unterschritten wird. Die größten in der Suspension enthaltenen Feststoffe bleiben an einer Engstelle hängen und es kommt zur Filterkuchenbildung. Der Filterkuchen verringert die Wegsamkeiten weiter, die Feststoffe der Suspension werden zurückgehalten und nur noch die Anmachlösung kann weiter in den Spalt eindringen.

Verschiedene Autoren geben Faustregeln zum geometrischen Verhältnis zwischen Rissweite der Kluft und Korndurchmesser des Injektionsmaterials. Dallmann[4] erwähnt, dass Feinstzemente ein größeres Verhältnis von Kluftöffnung zu Partikelgröße brauchen um in eine Kluft eindringen zu können. Dies ist auf chemische Filtrationseffekte durch steigende Anziehungskräfte der kleiner werdenden Korngröße zurückzuführen.

Laut DIN EN 12715 kann von einer Injizierbarkeit im Festgestein ab einem Verhältnis von Kluftöffnung zu größter Partikelabmessung von mindestens 3:1 ausgegangen werden.

Bei partikelfreien Injektionsmaterialien ist die untere Grenze der Injizierbarkeit von der Viskosität des Injektionsmaterials und der Benetzbarkeit abhängig. Je geringer die Viskosität eines Injektionsmaterials ist, desto besser kann es auch in Risse/Klüfte mit geringen Spaltöffnungsweiten eindringen.

5.2 Obere Anwendungsgrenzen

Die obere Anwendungsgrenze beschreibt die größte Spaltöffnungsweite, für die ein Injektionsmaterial einsetzbar ist. Bei größeren Spaltöffnungsweiten kann das Injektionsmaterial nicht mehr eingesetzt werden, da es ungehindert durch den Spalt abfließt ohne diesen abzudichten. Der Übergang ist nicht so genau definierbar wie die minimale Spaltöffnungsweite, da Faktoren, wie z.B. die Rauigkeit der Spaltwände, eine große Rolle spielen.

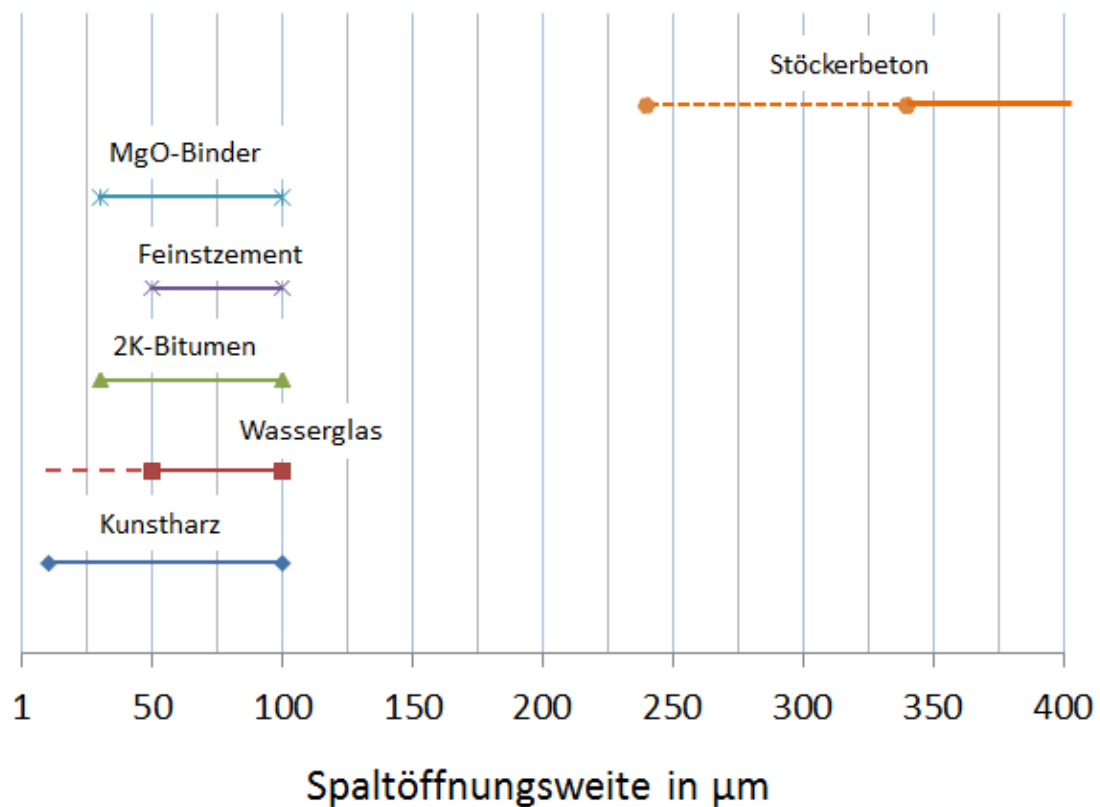


Abb. 23: Anwendungsgrenzen der einzelnen Injektionsmaterialien. Die gestrichelten Bereiche sind vermutete Reichweiten, die sich mit der vorhandenen Literatur nicht genau nachweisen lassen.

Tab. 22: Anwendungsgrenzen ausgewählter Injektionsmaterialien

Injektionsmaterialien	Untere Anwendungsgrenze	Quellenangabe	Obere Anwendungsgrenze	Quellenangabe
Stöckerbeton	GrenzRissweite zwischen 0,24 und 0,34 mm	[40]	-	
MgO-Binder	30 μm	[2]	100 μm	[2]
Feinstzement	50 μm	[68]	100 μm	[9]
2K-Bitumen	30 μm	[2]	100 μm	[27]
Wasserglas	Unter 50 μm	[87]	100 μm	[23]
Kunstharz	10 μm	[19]	100 μm	[19]

6 Injektionstechnik

Streckenverschlussbauwerke im ERAM sollen eine integrale Permeabilität von 10^{-18} m^2 aufweisen[104]. Die integrale Permeabilität wird im Baustoff, dem Kontaktbereich Baustoff-Gebirge und in der Auflockerungszone ermittelt. Naturgemäß stellt die Verbindung zwischen Baustoff und Gebirge eine mögliche Schwachstelle dar. Um die geforderten, geringen Permeabilitäten in diesen Bereich zu erzielen, wird der Kontaktbereich injiziert. Dies erfolgt entweder über ein Injektionssystem, das vor der Einbringung des Baustoffes in der Streckenkontur montiert wurde oder der Kontaktbereich wird nach der Aushärtung des Baustoffes angebohrt und über die Bohrlöcher injiziert. Die für die Vergütung eingesetzten Baustoffe werden sowohl bei der Verwendung von Bohrlochpackern als auch beim Einsatz von Injektionsschläuchen mithilfe von speziellen Injektionspumpen verpresst.

6.1 Injektionspumpen

Die Injektionspumpen dienen dazu, das Injektionsmaterial unter einem gewissen Druck und mit einem definierten Volumenstrom entweder in die Packer oder Manschettenrohre zu verpressen. Prinzipiell wird bei den Injektionspumpen zwischen Ein- und Zweikomponenten-Pumpen unterschieden. Einkomponenten Pumpen eignen sich zum Injizieren von Zementsuspensionen, Wasserglasgemischen und pastösen Substanzen, wie z.B. Bitumen. Zweikomponenten Pumpen können in einem festgelegten Mischungsverhältnis zwei Lösungen ansaugen, vermischen und anschließend verpressen. Daher eignen sich die Zweikomponenten-Pumpen zum Injizieren von Harzen.

Es wird eine Vielzahl unterschiedlicher Injektionspumpen von mehreren Herstellern angeboten. Meist unterscheiden sich die Pumpen im maximalen Injektionsdruck und der Pumprate. **Tab. 23** gibt eine Übersicht über vorhandene Ein- und Zweikomponenten Injektionspumpen und deren maximale Pumpraten und Injektionsdrücke.

Bei der Auswahl einer Injektionspumpe für eine Injektionsmaßnahme ist zu beachten, dass der pumpbare Volumenstrom mit steigendem Injektionsdruck abnimmt.

Tab. 23: Auflistung verschiedener Ein- und Zweikomponenten Injektionspumpen unterschiedlicher Hersteller mit unterschiedlichen Injektionsdrücken und Injektionsraten

Einkomponenten Pumpen

Firma	Modell	Max. Pumprate	Max. Injektionsdruck	Zementsuspensionen	Feinstzement-suspensionen	Wasserglasgemische	Pastöse Suspensionen	Injektions-harz
Obermann	DP 63/2-3-G	2*35 l/min	100 bar	x	x	x	x	
Obermann	DP 36-2-B	13 l/min	150 bar	x	x	x	x	
Obermann	DP 50-4-F	34 l/min	100 bar	x	x	x		
Obermann	DP 63N-4-H	63 l/min	100 bar			x		
Obermann	DP 63/2-3-Z	2*62 l/min	150 bar	x	x	x	x	
MAI	400EX	15-60 l/min	45 bar	Die gängigsten Injektionsmaterialien				
STS Scheltzke	IP 36-E-A-HGV	14,5 l/min	100 bar	x	x			
STS Scheltzke	IP 63 E-D-HGV	62 l/min	100 bar	x	x			
STS Scheltzke	IP 80-E-B-HGV	103 l/min	100 bar	x	x	x		
STS Scheltzke	HPS 110-E-B	245 l/min	245 bar	x				
Atlas Copco	Pumpac	200 l/min	190 bar	Die gängigsten Injektionsmaterialien				

Zweikomponenten Pumpen

Firma	Modell	Max. Pumprate	Max. Injektionsdruck	Mischungs-verhältnis	Injektionsharz
Desoi	Kolbenpumpe PN-1025-2K	6 l/min	10-90 bar	1:1	x
Desoi	Kolbenpumpe PN-1436-2K	8 l/min	5-100 bar	1:1	x
Desoi	Kolbenpumpe PN-2536-2K	17 l/min	20-250 bar	1:1	x
WEBAC	IP 2K-F2	14 l/min		1:1	x
Minova	SK 90	30 l/min	120 bar		x
Minova	CT-EL 5 II	4,8 l/min	170 bar		x
Perforator	PSP 4/85	8,7/min	120 bar	1:1	x

6.2 Injektionsverfahren

Injektionsleitungen

In dem Planfeststellungsunterlagen zum Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen in Morsleben wurde detailliert festgehalten, wie die Injektionsmaßnahmen durchzuführen sind. Die Streckenverschlüsse werden in 15 bis 30 Meter langen Segmenten betoniert. Wenn ein Bauwerk aus mehreren Segmenten besteht, müssen lediglich an einem Segment Injektionsmaßnahmen durchgeführt werden[9].

Zum Injizieren werden perforierte Manschettenrohre oder Injektionsschläuche verwendet, die in einem Abstand von ein bis zwei Metern ringförmig an der Streckenkontur angebracht werden. Die Injektionsleitungen sind an eine Vor- und Rücklaufleitung angeschlossen. Über die Vorlaufleitung wird das Injektionsmaterial gepumpt und die in der Firste angebrachte Rücklaufleitung dient der Entlüftung. Die Vorlaufleitung ist am tiefsten Punkt in der Sohle angebracht und das Injektionsmaterial breitet sich von unten nach oben in der Kontaktfuge aus. Sowohl die Verfüllleitung als auch die Rücklaufleitung werden über ein Hüllrohr aus dem Bauwerk geführt. Sowohl das Hüllrohr als auch die Vor- und Rücklaufleitungen bestehen nicht aus einem langzeitstabilen Material und müssen daher nach dem Ende der Injektionsmaßnahmen entfernt werden. Das Hüllrohr wird überbohrt und das entstehende Bohrloch mit einem geeigneten Mittel verfüllt[9]. Die Lage der einzelnen Leitungen der Injektionsmaßnahmen ist in **Abb. 24** schematisch dargestellt.

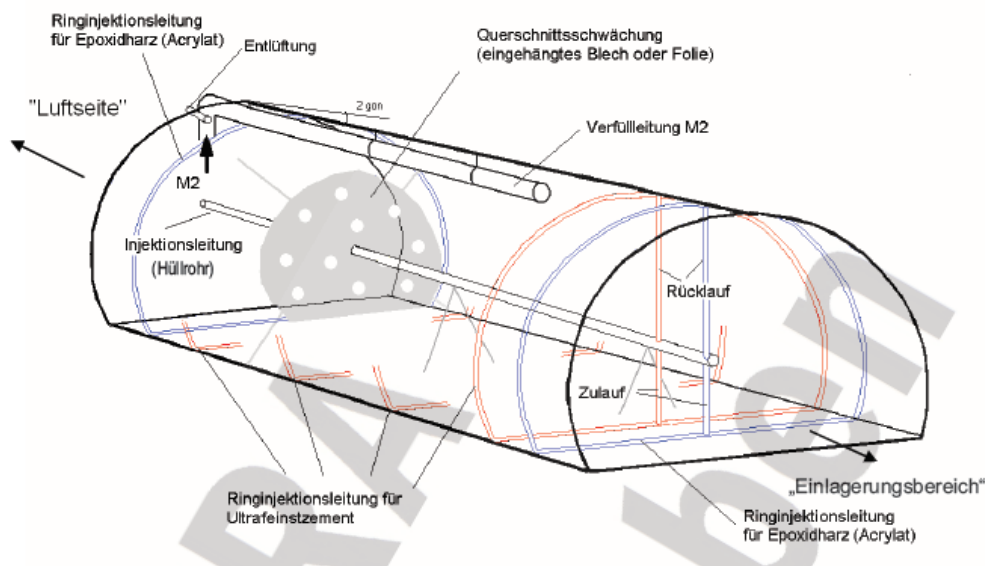


Abb. 24: Bauwerksentwurf zur Errichtung von Streckenverschlüssen und zur Abdichtung der Kontaktfuge mittels Injektionen in Morsleben[9]

Der Injektionsvorgang erfolgt in mehreren Schritten. Als erstes war geplant in den beiden äußeren Injektionsringen (an der Luftseite und auf der Rückwärtigen Seite) Kunstharz oder

Epoxidharz zu injizieren. Hiermit sollte die Kontaktfuge in diesem Bereich abgedichtet werden und ein späterer Austritt des Injektionsmaterials verhindert werden.

Im zweiten Schritt wurden die Injektionsleitungen mit dem Injektionsgut befüllt. Die Leitungen wurden so verlegt, dass sowohl die Befüllung als auch die Injektion in einer bestimmten Reihenfolge erfolgte. Die Injektion begann im letzten Ringschlauch in der Sohle. Die Injektion lief also von unten nach oben und von hinten nach vorne. Somit sollte gewährleistet werden, dass alle zugänglichen Hohlräume erreicht wurden und die Luft nach vorn entweichen konnte.

Nachdem die Injektionsleitungen befüllt sind und keine Luft mehr aus der Rücklaufleitung entweicht, wird diese verschlossen und der Druck in den Injektionsleitungen erhöht. Damit beginnt die eigentliche Injektion. Die Erhöhung des Drucks kann kontinuierlich oder stufenweise erfolgen.

Wenn der maximale Injektionsdruck erreicht ist, beginnt die Druckhaltephase. Der Vepressdruck wird aufrecht erhalten bis das Injektionsmaterial erhärtet ist.

Nach Abschluss der Injektionsmaßnahme wird das Hüllrohr überbohrt, um alle in der Streckenachse verlaufenden Leitungen zu entfernen. Das Bohrloch wird anschließend mit einem Salzbeton ähnlich der Rezeptur M2 verfüllt.

Injektionsleitungen: Befüllung aus einem Befahrungs- und Injektionsrohr

Auch bei dieser Variante werden Injektionsschläuche verwendet, die vor dem Betonieren ringförmig an der Streckenkontur befestigt werden. Die Schläuche werden dann aus einem parallel zur Bauwerksachse verlaufenden Befahrungs- und Injektionsrohr verfüllt. Hierbei kann jeder Ring separat injiziert werden. Es werden immer zwei Ringe gleichzeitig injiziert, wobei die äußeren Injektionsschläuche zuerst vergütet werden und das Bauwerksinnere zum Schluss. Um einen Austritt des Injektionsmaterials der Ringleitungen an den Stirnseiten des Bauwerks zu verhindern, wird die Kontaktfuge im Bereich der Stirnseiten vorab durch Bohrungen verfüllt[105]. Der Aufbau eines Streckenverschlussbauwerks mit Befahrungs- und Injektionsrohr ist in **Abb. 25** dargestellt. Nach dem Ende der Injektionsmaßnahmen wird das Befahrungs- und Injektionsrohr mit Beton verfüllt und die Fuge injiziert.

Die Injektion des Kontaktbereichs Bauwerk/Gebirge wurde bei der Errichtung eines 55 bar Hochdruckdammes auf dem Bergwerk AV/Blumenthal bereits erfolgreich durchgeführt[105].

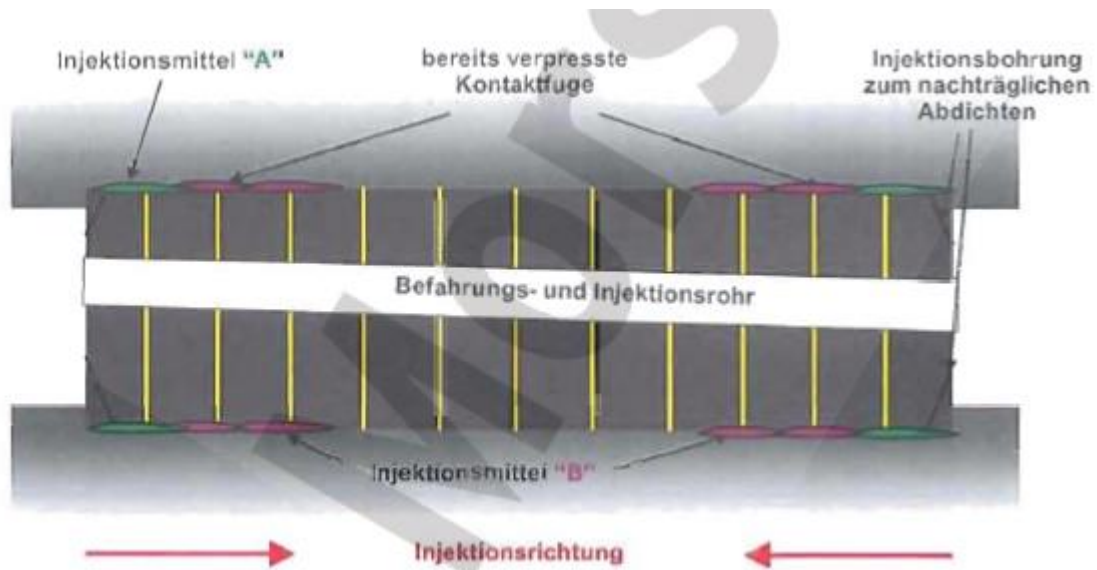


Abb. 25: Streckenverschlussbauwerk mit Befahrungs- und Injektionsrohr von dem aus die Befüllung der einzelnen Injektionsringe erfolgt[105]

Bohrlochinjektionen mit Bohrlochpackern

Um die Kontaktfuge zwischen Bauwerk und Gebirge zu injizieren, werden von der Stirnseite aus Bohrungen parallel zur Streckenachse entlang der Kontaktfuge gebohrt. Nach dem Bohren wird das Bohrloch von verbleibendem Bohrklein mittels Druckluft gereinigt, um eine möglichst gute Verbindung zwischen Injektionsmaterial und Gebirge zu gewährleisten. Die Injektion erfolgt über konventionellen Bohrlochpacker und beginnt im Bohrlochtieferen. Das Bohrloch wird mehrmals abgepackert und in kleinen Abschnitten injiziert. Um eine gleichbleibende Qualität des Injektionsmaterials zu gewährleisten, wird dieses für jeden Injektionsvorgang frisch hergestellt. Begonnen wird in dem untersten Bohrloch und nach Abschluss der Injektion wird mit der Injektion im nächst höheren Bohrloch begonnen. Auf diese Weise soll das Entweichen von Luft aus Fließwegen in der Kontaktfuge ermöglicht werden[2]. Ein richtungsgenaues Bohren der Injektionsbohrlöcher ist für dieses Verfahren von großer Bedeutung. Sobald die Bohrung abweicht und der Bohrfad außerhalb der Kontaktfuge liegt, kann keine Injektion der Kontaktfuge erfolgen.

Alternativ ist es auch möglich, Bohrungen von der Stirnseite mit einem Winkel zur Streckenachse durch das Streckenverschlussbauwerk in den Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge herzustellen (**Abb. 26**). Die Bohrungen werden im Bereich der Kontaktfuge abgepackert und injiziert. Das restliche Bohrloch wird anschließend verfüllt. Bei diesem Verfahren muss eine Vielzahl an Bohrungen im Streckenverschlussbauwerk erstellt werden, um eine lückenlose Vergütung der Kontaktfuge zu erreichen. Die Anzahl der benötigten Bohrungen wird durch die Länge der zu vergütenden Kontaktfuge und der Eindringfähigkeit des Injektionsmaterials in die Kontaktfuge gegeben. Je weiter entfernt vom Bohrloch das Injektionsmaterial noch in die Kontaktfuge eindringt, desto größer kann der Abstand zwischen den einzelnen Bohrungen

gewählt werden. Der Vorteil dieser Methode gegenüber den Bohrungen entlang der Kontaktfuge ist, dass die Richtungsgenauigkeit der Bohrungen (in gewissen Grenzen) eine untergeordnete Rolle spielt. Allerdings kann es gerade bei längeren Bohrlöchern durch kleine Winkelabweichungen beim Erstellen des Bohrlochs zu signifikanten Abweichungen der Bohrung kommen.

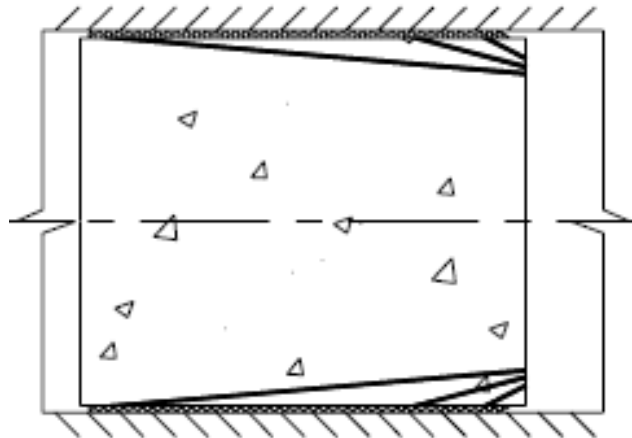


Abb. 26: Abdichtung der Kontaktfuge zwischen Bauwerk und Gebirge mittels Bohrungen von der Stirnseite des Bauwerks mit einem Winkel zur Streckenachse[19]

Bohrlochinjektionen mit Manschettenrohren

Die Bohrlöcher für die Injektion werden, wie bei der Injektion mittels Bohrlochpackern entweder entlang der Kontaktfuge oder diagonal in die Kontaktfuge gebohrt. Injektionen mit Manschettenrohren bieten die Möglichkeit der Mehrfachinjektion, wodurch der Erfolg der Injektionsmaßnahme verbessert werden kann.

Manschettenrohre sind aus Hart-PVC oder Stahl bestehende Injektionsrohre. In regelmäßigen Abständen sind die Rohre perforiert. Die Perforationslöcher sind auf der Außenseite des Manschettenrohres mit einer Kunststoffmanschette überzogen, die sich unter dem Injektionsdruck aufbläht und öffnet und somit den Austritt des Injektionsmaterials aus dem Manschettenrohr ermöglicht. Nachdem das Manschettenrohr mittig im Bohrloch platziert wurde, wird der Ringraum zwischen Manschettenrohr und Bohrlochwand mit Mörtel aufgefüllt. Wichtig für das Gelingen der Injektionsmaßnahme ist eine gleichmäßige Ausfüllung des Ringraums[106].

Die Injektion erfolgt abschnittsweise mittels eines Doppelpackers, der im Manschettenrohr liegt. Mit steigendem Injektionsdruck wird zuerst die Ringraumfüllung radial zum Bohrloch aufgebrochen und erst dann erfolgt die eigentliche Injektion. Nach der Injektion wird das Manschettenrohr gereinigt und kann zu einem späteren Zeitpunkt wiederverwendet werden. Die mehrphasigen Injektionen können entweder mit Injektionsmaterialien der gleichen oder unterschiedlichen Zusammensetzungen durchgeführt werden[106].

Im Vorhaben CARLA[2] wurden Injektionen mit Manschettenrohren in die Kontaktzone Bauwerk/Gebirge durchgeführt, und wie folgt bewertet: „Das Injektionsverfahren unter Einsatz von Manschettenrohren ist für diesen Einsatzzweck ungeeignet, da eine Injektion von Injektionsmaterialien in das Nahfeld der Injektionsbohrung nur erfolgt, wenn das umgebende Gebirge ausreichend porös oder die zu injizierenden Wegsamkeiten ausreichend große Spaltmaße aufweisen. Das ist im vorliegenden Fall bei einer Injektion im vergleichsweise niedrigporösen Salzgebirge und bei Spaltbreiten im mm-Bereich nicht der Fall.“

Variante Institut für Bergbau (IBB)

Als problematisch bei allen oben beschriebenen Injektionsverfahren wird das richtungsgenaue Bohren betrachtet. Bei den genannten Verfahren kommen drei verschiedene Bohrungen zum Einsatz.

1. Das im Dammbauwerk gelegene Hüllrohr mit den Injektionsleitungen und der Entlüftungsleitung wird überbohrt und anschließend das Bohrloch verfüllt.
2. Die Bohrung für die Injektion der Kontaktfuge ohne Injektionsschläuche wird entlang des Kontaktbereichs Bauwerk/Gebirge erstellt.
3. Es wird mit einem Winkel zur Streckenachse durch das Verschlussbauwerk gebohrt, um die Kontaktfuge injizieren zu können.

Wenn es zu Abweichungen des Bohrpfad bei Variante 1 kommt, gelingt es nicht vollständig, das Hüllrohr und die Injektionsleitungen aus dem Bauwerk zu entfernen, wodurch potentielle Wegsamkeiten parallel zur Streckenachse geschaffen werden.

Kommt es bei der zweiten Variante zu Abweichungen des Bohrpfad, dann liegt die Kontaktfuge außerhalb des Bohrloches und kann nicht injiziert werden.

Bei Variante drei spielen Abweichungen vom geplanten Bohrpfad eine untergeordnete Rolle. Durch Abweichungen kann es aber auch hier zu einer Verschlechterung des Abdichtungserfolges der Kontaktfuge kommen.

Bei Variante IBB wird eine Bohrung parallel zur Streckenkontur (Versorgungsbohrung), im Salz erstellt, die durch kurze rechtwinklig angeordnete Bohrungen mit der Strecke verbunden ist. In der Strecke werden Injektionsleitungen ringförmig angebracht und die Baustoffzufuhr erfolgt aus der streckenparallelen Bohrung. **Abb. 27** stellt den Aufbau dieser Variante dar.

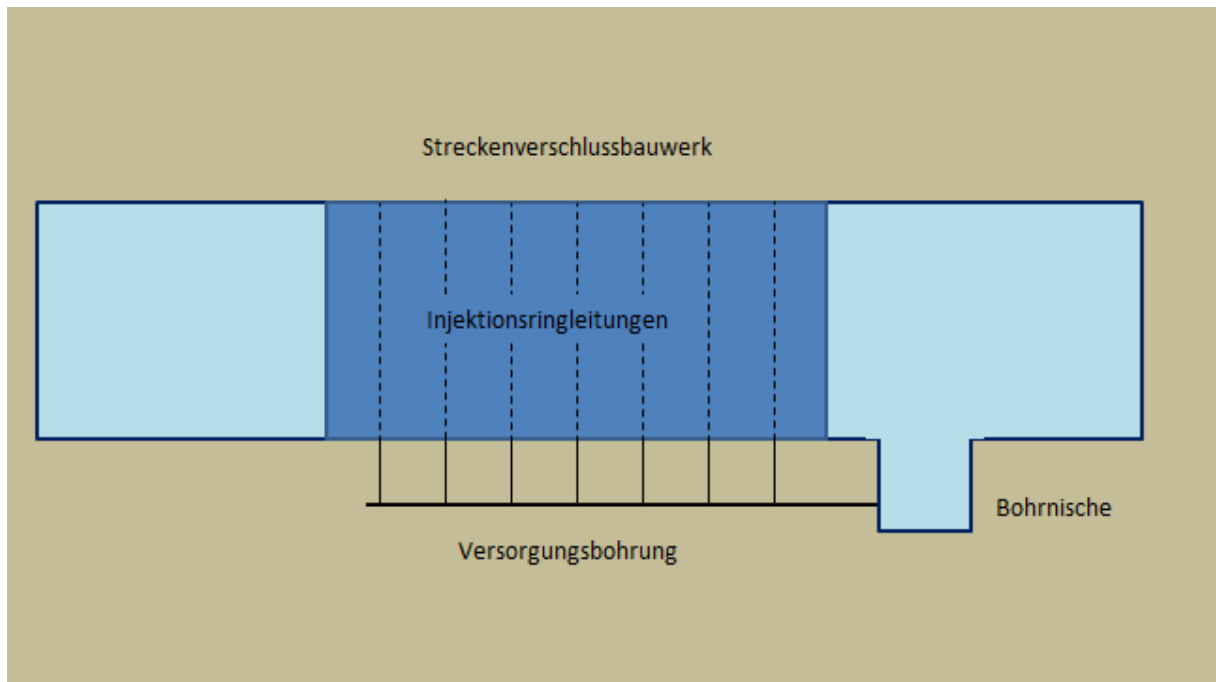


Abb. 27: Skizze des Injektionssystems mit der Versorgungsbohrung im Salz und den Injektionsringleitungen in der entlang der Streckenkontur des Verschlussbauwerks

Vor dem Nachschnitt der Auflockerungszone wird auf der dem Schacht zugewandten Seite des Streckenschlussbauwerks die Bohrnische aufgeföhren, aus der die Versorgungsbohrung entlang der Sohle der Strecke und die Entlüftungsbohrung entlang der Firste erstellt werden.

Nach dem Nachschnitt der Streckenkontur im Bereich des Streckenschlussbauwerks werden kurze Bohrungen, die senkrecht zur Streckenkontur ausgerichtet sind, in die Versorgungsbohrung erstellt. In jeder Bohrung wird eine Versorgungsleitung verlegt, die dann durch die Versorgungsbohrung bis in die Bohrnische reicht. Die Versorgungsleitung wird auf ein Verbindungsstück aufgesteckt, das einen Ausgang zu den Injektionsringleitungen hat. Das Verbindungsstück wird in das kurze Bohrloch einbetoniert. Der Beton soll auch dazu dienen, das Bohrloch abzudichten. Von dem Verbindungsstück zur Strecke hin verläuft dann die Injektionsleitung, die ringförmig entlang der Streckenkontur angebracht ist. Jede Ringleitung hat eine separate Versorgungs- und Entlüftungsleitung. Der Aufbau ist in **Abb. 28** dargestellt.

Die Entlüftungsleitungen in der Firste werden analog zu den Versorgungsleitungen an die Entlüftungsbohrung angeschlossen.

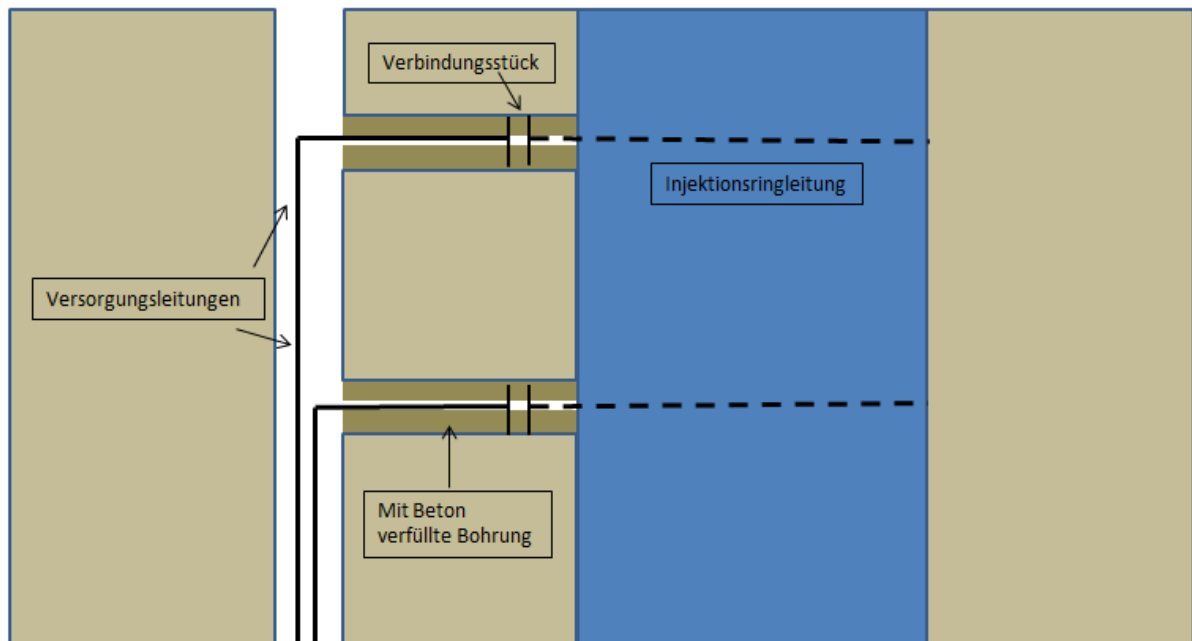


Abb. 28: Detailskizze der Verbindung zwischen den in der Versorgungsbohrung verlaufenden Versorgungsleitungen und den Injektionsleitungen. Die Verbindungsbohrlöcher werden mit Beton verfüllt

Nach dem Ende des Injektionsvorgangs wird die Versorgungsleitung von dem Verbindungsstück abgezogen und durch die Versorgungsbohrung entfernt. Sobald alle Versorgungsleitungen entfernt sind, kann das Versorgungsbohrloch mit Beton verfüllt werden. Das Verfüllen erfolgt unter Druck mit einer Verfülllanze, die langsam herausgezogen wird. Somit wird eine gute Anbindung des Baustoffes an das Salz gewährleistet.

Vergleich der unterschiedlichen Varianten

Jede Vergütungs-/ Injektionsmethode weist Vor- und Nachteile auf. Diese sind zusammenfassend in **Tab. 24** dargestellt.

Tab. 24: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Vergütungsmethoden

Injektionsmethode	Injektionsleitungen	Injektionsleitungen mit Befahrungs-/Injektionsrohr	Bohrloch mit Packern	Bohrloch mit Manschette n-rohren	Variante IBB
Vorteile	+ Flexible Lage und einfacher Einbau der Injektionsleitungen + Gute Erreichbarkeit der kompletten Kontaktfuge	+ Flexible Lage und einfacher Einbau der Injektionsleitungen + Gute Erreichbarkeit der kompletten Kontaktfuge + Alle Injektionsringe lassen sich individuell beaufschlagen + Injektion mit unterschiedlichen Injektionsmaterialien möglich	+ Die Bohrlöcher lassen sich einzeln beaufschlagen + Injektionen in die Auflockerungszone sind möglich + Gezieltes Anbohren einzelner Bereiche möglich	+ Mehrfachinjektionen möglich + Injektionen mit unterschiedlichen Injektionsmitteln möglich	+ Keine Bohrlöcher im Verschlussbauwerk + Flexible Lage der Injektionsleitungen + Alle Injektionsringe lassen sich individuell beaufschlagen + Injektion mit unterschiedlichen Injektionsmaterialien möglich
Nachteile	- Überbohren des Hüllrohrs mit den Injektionsleitungen - Richtungsgenaues Bohren nötig	- Befahrungs-/Injektionsrohr verläuft durch das Verschlussbauwerk	- Bohrlöcher im Verschlussbauwerk - Große Anzahl an Bohrlöchern nötig - Richtungsgenaues Bohren nötig - Gefahr des Verstopfens der Kontaktfuge beim Bohren	- Verfahren funktioniert nur bei ausreichend großen Wegsamkeiten mit Spaltbreiten im mm Bereich - Gefahr des Verstopfens der Kontaktfuge beim Bohren - Injektionserfolg im hohen Maße vom richtungsgenauen Bohren abhängig	- Einbau der Injektionsleitungen schwieriger als bei den anderen Verfahren - Mehraufwand durch die Erstellung der Bohrnische vor dem Verschlussbauwerk

Injektionsleitungen lassen sich einfach an der Streckenkontur anbringen und auch die Abstände zwischen den einzelnen Leitungen sind frei wählbar. Die Abstände, in denen die Injektionsleitungen zueinander angebracht werden, müssen im Vorfeld bestimmt werden. Der

Abstand hängt von der Öffnungsweite der Kontaktfuge sowie der Permeabilität der Auflockerungszone ab. Je höher die erwartete Permeabilität ist, desto größer können die Abstände zwischen den einzelnen Injektionsringen gewählt werden. Die Injektionsleitungen ermöglichen theoretisch eine gleichmäßige Ausbreitung des Injektionsgutes radial zur Leitung. Wenn der Abstand zwischen den Injektionsleitungen richtig gewählt ist, wird die Kontaktfuge vollständig mit Injektionsmaterial gefüllt.

Im Gegensatz zur Verfüllung der Kontaktfuge durch Bohrlöcher lässt sich mit dieser Methode eine unterbrechungsfreie Abdichtung der Kontaktfuge, ohne Lücken im Kontaktbereich die nicht durch Injektionsmaterial erreicht wurden, herstellen. Zudem sind die Unwägbarkeiten bei der Verwendung von Injektionsschläuchen geringer, da es nicht durch Bohrstaub oder Wärmeeinfluss infolge des Bohrens zum Verstopfen der Kontaktfuge im Bereich des Bohrlochs kommen kann[19].

Ein Nachteil der Injektion mit Injektionsleitungen ist das Überbohren des Hüllrohrs mit der Injektions- und Rücklaufleitung nach dem Ende der Injektionsmaßnahmen. Die Bohrung entlang der Streckenachse schafft einen potentiellen Migrationspfad durch das Streckenverschlussbauwerk. Wenn es beim Überbohren des Hüllrohrs zu Abweichungen vom geplanten Bohrfad kommt, wird dieses nur teilweise überbohrt und es kann zu Wegsamkeiten im Verschlussbauwerk entlang des Hüllrohrs kommen. Durch vorher eingebrachte Führungseinrichtungen, können die Abweichungen beim Überbohren minimiert werden.

Bei der Injektion mit Injektionsleitungen aus dem Befahrungs-/ Injektionsrohr heraus befinden sich die Anschlüsse für die Injektionsleitungen im Injektionsrohr. Somit ist jeder Injektionsring separat injizierbar. Dies ermöglicht eine exakt steuerbare Injektionsreihenfolge. Zudem ist die Verwendung von unterschiedlichen Injektionsmaterialien in unterschiedlichen Bereichen des Streckenverschlussbauwerks möglich. Der große Nachteil dieser Variante ist das parallel zur Streckenachse durch das Verschlussbauwerk verlaufende Befahrungs-/ Injektionsrohr. Nach dem Abschluss der Injektionsmaßnahmen wird das Befahrungs-/ Injektionsrohr verfüllt. Allerdings stellt der Kontaktbereich zwischen Streckenverschlussbauwerk und dem Befahrungs-/ Injektionsrohr eine mögliche Wegsamkeit dar, die beide Seiten des Verschlussbauwerks miteinander verbinden kann.

Injektionen mit Packern haben eine hohe Flexibilität. Es lassen sich gezielt beliebige Bereiche des Bauwerks oder der Kontaktzone anbohren und getrennt voneinander mit den gleichen oder unterschiedlichen Injektionsmaterialien injizieren. Wenn die Injektionsbohrungen bis in die Auflockerungszone hineinreichen, können mit dieser Methode auch Injektionen in die Auflockerungszone durchgeführt werden (Falls die Permeabilitäten in der Auflockerungszone hinreichend groß sind). Als Nachteil dieser Methode ist zu nennen, dass eine große Anzahl an Bohrungen durch das Verschlussbauwerk erstellt werden muss, um den Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge auf der gesamten Bauwerkslänge entlang der Sohle, den Stößen und im Firstbereich zu vergüten. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens wird durch das Bohren der

Injektionslöcher verursacht. Der Staub und das beim Bohren entstehende Bohrklein können in die Kontaktfuge eindringen und diese verstopfen. Dadurch wird ein Eindringen des Injektionsmaterials in die Kontaktfuge verhindert.

Manschettenrohre können nach der Injektion gereinigt werden. Somit ist es möglich, Manschettenrohre mehrmals zum Injizieren zu verwenden. Zudem können auch nacheinander unterschiedliche Injektionsmaterialien durch eine Bohrung injiziert werden. Allerdings besteht auch bei diesem Verfahren die Gefahr, dass die Kontaktfuge während des Bohrprozesses durch Staub und Bohrklein verstopft wird und eine Injektion daher nicht möglich ist. Die Bohrungen für die Injektion mittels Manschettenrohren werden meist entlang der Kontaktfuge erstellt. Daher ist der Injektionserfolg im hohen Maße davon abhängig, dass es nicht zu Abweichungen vom geplanten Bohrfad kommt. Falls Abweichungen vom geplanten Bohrfad auftreten liegt der Bohrfad außerhalb der Kontaktfuge und eine Injektion des Kontaktbereichs Bauwerk/Gebirge ist nicht mehr möglich. Im Forschungsvorhaben CARLA[2] wurde festgestellt, dass Manschettenrohr-Injektionen ungeeignet sind, um die Kontaktzone Bauwerk/Gebirge zu injizieren, da die Spaltöffnungsweiten und Porenräume in diesem Bereich zu klein sind, um mit diesem Verfahren abgedichtet werden zu können.

Bei der Variante des IBB verlaufen die Zulauf- und Rücklaufleitungen für die Injektionsringleitungen in zwei Bohrlöchern parallel zur Streckenkontur im Salz mit einer Entfernung von einem bis drei Metern zum Streckenverschlussbauwerk. Die Umsetzung dieser Variante erfordert, im Vergleich zu den bisher beschriebenen Systemen, einen erhöhten Aufwand im Vorfeld der Injektionsarbeiten. Neben den beiden Bohrlöchern parallel zur Streckenkontur müssen die Bohrnische, aus der heraus die Bohrlöcher gestoßen werden sowie die Verbindungsbohrungen zwischen Bohrloch und Streckenkontur gestoßen werden. Des Weiteren ist das Verlegen der Injektionsleitungen durch die Vor- und Rücklaufbohrung komplizierter als bei den anderen Varianten. Allerdings bietet dieses Verfahren auch eine Reihe von Vorteilen. Durch Erstellen der Vor- und Rücklaufbohrungen im Salzgebirge wird das Durchbohren des Verschlussbauwerks vermieden. Durch die Bohrungen im Verschlussbauwerk können Wegsamkeiten parallel zur Streckenachse geschaffen werden. Die Abstände zwischen den einzelnen Injektionsringleitungen (in Richtung der Streckenachse) sind frei wählbar, wodurch eine möglichst vollständige Verfüllung der Kontaktfuge erreicht werden kann. Da jeder Injektionsring eine separate Zu- und Rücklaufleitung hat, können die einzelnen Ringe in beliebiger zeitlicher Reihenfolge injiziert werden und es können unterschiedliche Injektionsmaterialien in verschiedenen Bauwerksabschnitten zum Einsatz kommen.

Allerdings ist die technische Umsetzbarkeit für diese Variante noch zu beweisen. Falls dies gelingt, bietet die Variante IBB eine Vielzahl an Vorteilen für eine möglichst vollständige Injektion der Kontaktfuge, ohne durch die Injektionsmaßnahme die Gefahr von neuen Wegsamkeiten im Streckenverschlussbauwerk zu schaffen. Zusammenfassend werden in **Tab. 25** alle obengenannten Verfahren zur Kontaktfugeninjektion aufgelistet werden. Zudem soll

aufgezeigt werden, welche Injektionsverfahren bereits angewendet wurden und welche Verfahren sich in der Planungsphase befinden.

Tab. 25: Zusammenfassung der Injektionsverfahren zur Kontaktfugeninjektion

Variante	Planung	Anwendung	Lokalität	Wann	Quelle
Injektionsleitungen		X	Teutschenthal,2a Sohle Kammer 208	2008	17,30,84
Befahrungsrrohr		X	AV/Blumenthal	2005	84
Bohrlochinjektion mit Bohrlochpackern		X	Teutschenthal,2a Sohle Kammer 208	2008	17
Bohrlochinjektion mit Manschettenrohren		X	Teutschenthal,2a Sohle Kammer 208	2008	17
Variante IBB	X		-	-	-

Teilbericht B

Laborative Charakterisierung

1 Vorstellung der Injektionsmaterialien

Im Anschluss an die Literaturrecherche zu den verfügbaren Injektionsmaterialien für die Injektion einer Kontaktfuge zwischen Steinsalz und einem Streckenverschlussbauwerk aus einem hydraulisch abbindenden Baustoff wurden 5 Injektionsmaterialien für die nachfolgende laborative Charakterisierung ausgewählt. Ausgewählt wurden 3 partikelgestützte und 2 partikelfreie Injektionsmaterialien.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden die Anwendungsgrenzen verschiedener Injektionsmaterialien zusammengestellt (Abb. 29). Die Literaturstellen aus denen die Daten zur Erstellung der Abbildung entnommen wurden, sind im Kapitel „5 Anwendungsgrenzen“ aus dem Teilbericht A aufgelistet. Aufgrund der schmalen Rissöffnungsweiten, die während der Injektion mit Feinstmagnesiabinder, Feinstzementen, 2-Komponentenbitumen, Wasserglas sowie Kunstharzen injiziert werden können, sollen diese Materialien im Labor näher untersucht werden. Auf die Auswahl der im geeigneten und nähergehend zu charakterisierenden Injektionsmaterialien wird im Folgenden kurz eingegangen.

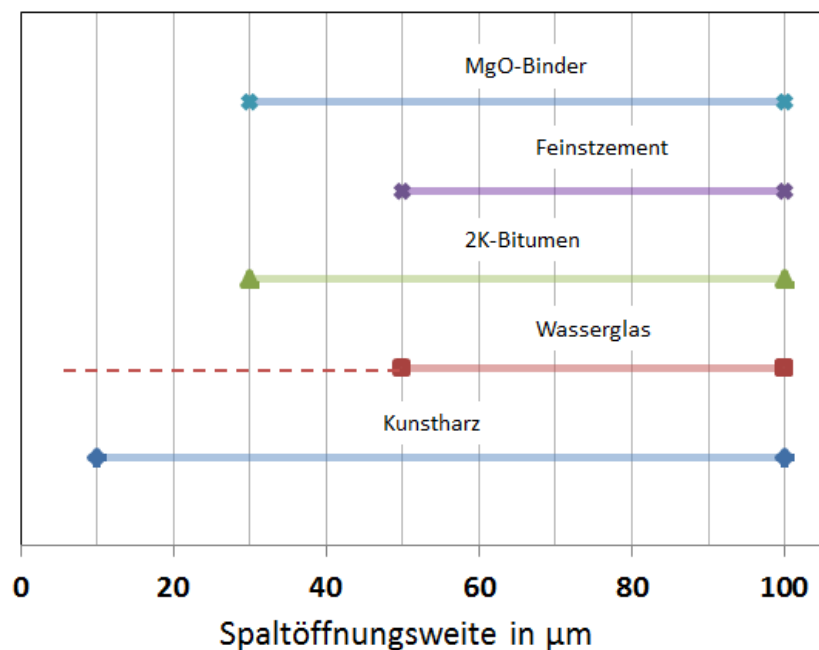


Abb. 29: Aus der Literatur entnommene Anwendungsbereiche der verschiedenen Injektionsmaterialien

1.1 Feinstmagnesiabinder

Für die Laboruntersuchungen wurde der Magnesiabinder IM 4+ der Firma K-UTEC ausgewählt, der sich neben der niedrigen Korngröße, dadurch auszeichnet, dass er im nicht eingespannten Zustand eine Volumenausdehnung von bis zu 10 Vol.-% aufweist. Das Mischungsverhältnis der verwendeten Rezeptur wird in **Tab. 26** gegeben.

Tab. 26: Informationen zur Zusammensetzung und zum Mischungsverhältnis von IM 4+[107]

Mischungsverhältnis IM 4+	
IM	56,70 Gew.-%
S30-Lösung	42,79 Gew.-%
Woerment	0,51 Gew.-%
Zusammensetzung IM	
MgO < 20 µm	20-30 Gew.-%
Dolomitkalkhydrat < 20 µm	0-1 Gew.-%
Brucit < 20 µm	0-1 Gew.-%
Anhydrit < 20 µm	70-80 Gew.-%

1.2 Feinstzement

Es sind eine Reihe verschiedener Feinstzemente unterschiedlicher Hersteller verfügbar, die zum Injizieren feinsten Wagsamkeiten verwendet werden können. Für die Nachvergütung des In-Situ-Versuchs im ERAM 2010[69] wurde der Feinstzement Ultrafin 12 der Firma HeidelbergCementAG verwendet. Dieser wird in diesem Vorhaben weitergehend untersucht werden. Da das Ultrafin 12 wie Zement stark hygroskopisch ist, muss es trocken gelagert werden und ist bei sachgemäßer Lagerung 6 Monate haltbar[58].

Tab. 27: Rheologische Daten von Ultrafin 12 bei unterschiedlichen Suspensionsdichten[108]. Die dargestellten Werte beziehen sich auf Suspensionen die mit Leitungswasser hergestellt wurden.

Labor-Nr.	W/F-Wert [-]	Marshzeit (t ₀) [s]	Suspensionsdichte [kg/m ³]	Wasserabsetzen [%]
2010-07-615	2,0	30	1.291	4,2
2010-07-616	1,8	32	1.319	3,5
2010-07-617	1,6	32	1.355	2,3
2010-07-618	1,4	33	1.395	0,7
2010-07-619	1,2	36	1.447	0,0
2010-07-620	1,0	41	1.512	0,0

Die Auswahl des Wasser/Feststoffwertes des Baustoffes erfolgte anhand der Daten in **Tab. 27** In dieser Tabelle wird das Wasserabsetzverhalten von Ultrafin 12 Suspensionen mit unterschiedlichen W/F-Werten 2 Stunden nach dem Anmischen dargestellt. Mit steigendem Wassergehalt neigt die Suspension zum Sedimentieren (Wasserabsetzen). Für die Versuche wurde eine Suspension mit einem Wasser/Feststoffwert von 1,4 ausgewählt, da diese bei einer niedrigen Marshzeit nur ein geringes Wasserabsetzen aufweist. Bei der für die Versuche verwendeten Rezeptur wurden keine Additive zur Suspension hinzugegeben. Daher entspricht der Wasser/Feststoffwert dem Wasser/Zementwert.

Um die Anmischflüssigkeit für die Suspension mit der 90%-NaCl gesättigten Lösung herzustellen wurden 322 Gramm NaCl in einem Liter Wasser bei 20° C gelöst. Sowohl bei der mit Leitungswasser als auch bei der mit 90%-NaCl gesättigter Lösung angemischten Suspension wurde das gleiche Volumen an Flüssigkeit verwendet. Da die verwendeten Flüssigkeiten unterschiedliche Dichten haben betrug der W/F-Wert bei der Suspension mit Leitungswasser 1,4 und bei der Suspension mit 90%-NaCl gesättigter Lösung 1,65.

1.3 2K-Bitumen

Das 2K-Bitumen besteht zum einen aus speziell aufgemahlenen Hartbitumen (H 165/175) und die zweite Komponente ist ein entaromatisierter Kohlenwasserstoff (Hydroseal G232 H), die im Massenverhältnis von 48/52 Ma.% (Hartbitumen zu Hydroseal) miteinander vermischt werden.

Entscheidend für die Eigenschaften des 2K-Bitumens ist die Korngrößenverteilung des eingesetzten Hartbitumens. Folgende Information wurde hierzu von Dr. Gruner von der TU Freiberg gegeben: „Je kleiner die Korngröße des Hartbitumens ist, desto schneller steift es an und desto schwieriger ist das Rühren. Um die Topfzeit auf ca. 15 Minuten zu verlängern, wurde für technische Anwendungen die Körnung in Richtung $d_{50} \leq \text{ca. } 150 \mu\text{m}$ verschoben. Die maximale Korngröße sollte aber dann 0,5 mm nicht übersteigen. Mit größerem Material wurde eine Entmischung beobachtet. Sonst findet keine Entmischung oder Sedimentation statt.“ Nähere Informationen zum 2K-Bitumen finden sich in der Patentschrift „Verfahren und Zusammensetzung zum Abdichten von Strecken im Bergbau und/oder eines Baukörpers“[27].

Das von der TU Freiberg bereitgestellte gemahlene Hartbitumen enthielt vermutlich durch den Transport einige größere Agglomerate, die sich unter geringer mechanischer Belastung in die einzelnen Partikel zerteilen ließen. Die Agglomerate wurden zerkleinert und anschließend wurde das Bitumen mit einer Analysesiebmaschine vom Typ „Haver EML 200 Digital T“ 20 Minuten pro Probe bei einer hohen Schwingungsintensität trocken gesiebt. Hierbei kam es verbreitet zu Anhaftungen des Bitumens an den Rändern der Siebe, was zu einem Massenverlust von 13,6 % im Laufe des Siebdurchgangs geführt hat. In **Tab. 28** sind die Ergebnisse der 4 Messvorgänge dargestellt.

Tab. 28: Analysenergebnis der Trockensiebung des Bitumens

Messung (Angaben in %)	1	2	3	4	Mittelwert (%)
> 500 µm	5,85	5,32	5,85	5,94	5,74
355-500 µm	11,23	10,37	10,86	12,73	11,30
250-355 µm	13,87	17,98	15,23	15,16	15,56
180-250 µm	15,85	14,04	15,04	12,94	14,47
125-180 µm	26,04	23,76	22,47	17,82	22,52
90-125 µm	19,43	20,92	21,36	25,34	21,76
63-90 µm	7,36	6,70	8,08	9,12	7,81
32-63 µm	0,38	0,92	1,11	0,95	0,84
< 32 µm	0	0	0	0	0
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Beim Sieben wurde festgestellt, dass sich die Maschen der Siebe mit einer Maschenweite $\leq 180 \mu\text{m}$ zugesetzt haben. Das bedeutet, dass die Siebdurchgangslinie (**Abb. 30**) unterhalb dieses Bereichs nicht repräsentativ ist. Die Analyse zeigt jedoch deutlich, dass ca. 25 % des Hartbitumens eine Korngröße von über 300 μm hat.

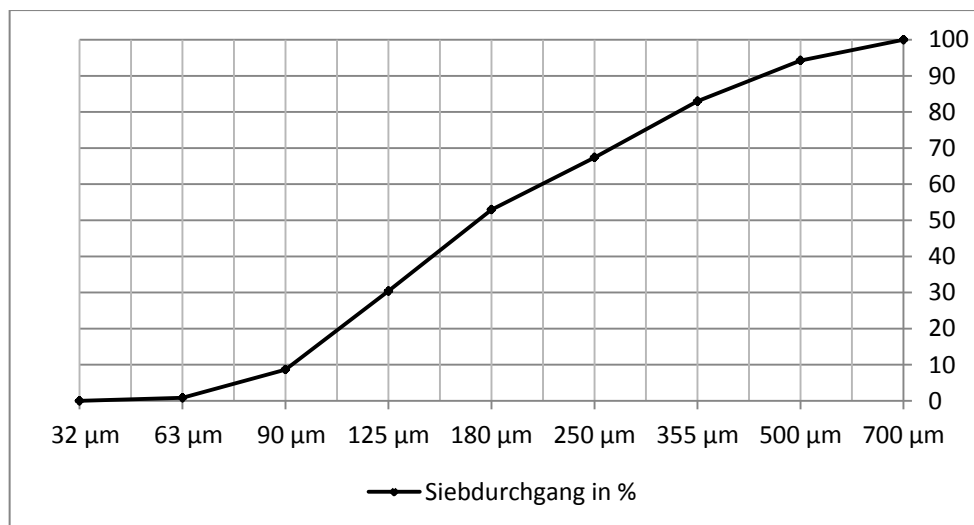


Abb. 30: Siebdurchgangslinie des Hartbitumens

1.4 Wasserglas

Als Wasserglas werden glasig erstarrte Schmelzen von Alkalimetallsilikaten sowie deren wässrige Lösungen bezeichnet. Für Abdichtungszwecke können Wassergläser mit unterschiedlichen Wassergehalten verwendet werden. Im Kontakt zum Salz können nur Wassergläser eingesetzt werden, die einen geringen Wassergehalt besitzen, da es sonst zu unerwünschten Löseprozessen kommen kann. Zum Einsatz kamen Wassergläser der Grädigkeit 37 bis 40 Grad Baumé. Für die laborative Charakterisierung wurde ein Natronwasserglas der Firma Roth mit einer vom Hersteller angegebenen Dichte von $1,37 \text{ g/cm}^3$ verwendet. Nähere Informationen zum Verhalten von Wasserglas im Salzgebirge finden sich im Kapitel „3.2.1 Wasserglas“ im Teilbericht A.

1.5 Kunstharz – Denepox 40

Im Tiefbau werden zahlreiche Kunstharze als Injektionsmaterialien verwendet. Allerdings lassen sich Acryl-Gele sowie Einkomponenten Polyurethane nicht im Salz einsetzen, da die Polymerisation unter diesen Bedingungen gestört sein kann. In umfangreichen Eignungstests und In-Situ Versuchen hat Kaledin[19] das Zweikomponentenharz Denepox 40 der Firma De Neef als geeignetstes Material für Injektionen im Salz ausgewählt. Daher das Denepox 40 für die laborative Charakterisierung ausgewählt.

2 Messmethoden und Aufbau der Messungen

2.1 Viskositätsmessungen

Die Viskositätsmessungen werden mittels eines Scherrheometers nach dem Platte/Platte Messsystem durchgeführt, wobei die dynamische Viskosität des Injektionsmaterials ermittelt wird. Hierbei ist es möglich, die Platten zu beheizen und somit die Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchzuführen. Zudem besteht die Möglichkeit die Viskositätsveränderung über die Zeit zu erfassen. Mithilfe der Abhängigkeit zwischen Viskosität und Zeit lässt sich die optimale Verarbeitungszeit des jeweiligen Injektionsmaterials ermitteln.

Die Scherkräfte, die im Baustoff auftreten, haben zu unterschiedlichen Zeiten sehr unterschiedliche Werte. Während des Anmischvorgangs des Baustoffes können Schergeschwindigkeiten in der Größenordnung von 1000 s^{-1} auftreten. Während der Lagerung des Baustoffes zwischen dem Anmischen und dem Verpressen treten sehr geringe Schergeschwindigkeiten von unter 1 s^{-1} auf.

Für Blut in Kapillaren werden in der Literatur für die Schergeschwindigkeit Werte zwischen $0,1$ und 100 s^{-1} angegeben[109]. Der Durchmesser von Blutkapillaren liegt im Mittel bei $8 \mu\text{m}$ [110]. Bei Injektionen in der Medizin kommen üblicherweise Nadeln mit einem Innendurchmesser von einigen hundert μm zum Einsatz. Für diese Injektionen wird eine Schergeschwindigkeit von 1000 bis 10000 s^{-1} angegeben[109]. Da die Öffnungsweite der zu injizierenden Kontaktfuge zwischen der Öffnungsweite der Blutkapillaren und der Injektionsnadeln liegt, wurde eine Schergeschwindigkeit von 100 s^{-1} als repräsentativ für die Injektionen ausgewählt.

Bei Viskositätsmessungen mit der Platte/Platte Messmethode wird die zu messende Flüssigkeit zwischen zwei Platten gegeben und anschließend wird die obere Platte in Rotation versetzt. Über die Messung des Abstands der Platten zueinander und der Drehzahl der oberen Platte können die Schergeschwindigkeit (Formel 10) sowie die Schubspannung (Formel 11) errechnet werden. Wenn sowohl die Schergeschwindigkeit als auch die Schubspannung bekannt sind, kann auch die Viskosität der Flüssigkeit im Messspalt bestimmt werden (**Abb. 31**). Die Messungen erfolgen mit dem Rheometer AR 500/1000 der Firma TA Instruments.

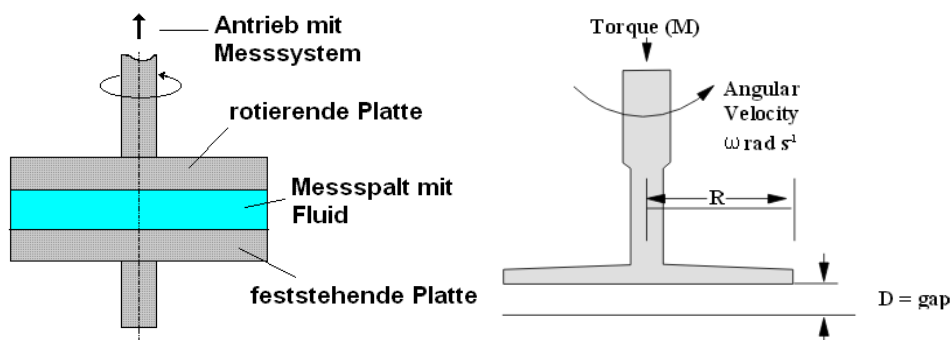


Abb. 31: Platte-Platte Rheometer[111, 112]

$$\text{Schergeschwindigkeit} = \frac{R}{D} \times \omega \quad (10)^{[5]}$$

$$\text{Schubspannung} = \frac{2}{\pi \times R^3} \times T \quad (11)^{[5]}$$

R= Radius der rotierenden Platte

D= Öffnungsweite des Messspalts

ω = Winkelgeschwindigkeit [rad s⁻¹]

M= Drehmoment der oberen Platte

Die Bestimmung der Viskosität mittels des Platte-Platte Verfahrens gelingt nicht mit allen Injektionsmaterialien. Für Ultrafin 12 und Wasserglas ist diese Methode nicht geeignet. Der Messspalt hat eine Höhe von 300 µm und im Kontakt der Luft härtet das Wasserglas seitlich aus. Dieser Effekt kann entweder auf die Aushärtereaktion des Wasserglases im Kontakt mit dem CO₂ der Luft oder durch eine Verdunstung des im Wasserglas enthaltenen Wassers zurückzuführen sein. Dies führt dazu, dass sich zuerst eine feste Haut auf dem Wasserglas bildet und es anschließend zur Bildung von Klümpchen kommt, die durch Verhaken/Verkanten einen Widerstand zwischen den beiden Platten erzeugen und somit eine höhere Viskosität gemessen wird als die des Fluides.

Auch bei den Messungen mit Ultrafin 12 gab es Schwierigkeiten. Der wässrige Anteil der Suspension floss aus dem Messspalt, wobei es dann in der zurückbleibenden Suspension zu Verklumpungen kam.

Bei den Messungen mit dem 2K-Bitumen hat die Korngröße der Bitumenstücke von teilweise über 300 µm zu Problemen geführt, da sich der geplante Abstand der Platten des Rheometers von 100 µm nicht einstellen ließ.



Abb. 32: Links: Rheometer Haake Mars III der Firma Thermo Scientific. Rechts: Detailaufnahme der Temperier Einheit sowie des Probenbechers und des Titandrehkörpers.

Um die Viskosität des 2K-Bitumens, des Wasserglases und des Feinstzements Ultrafin 12 zu messen wurde daher das Rotationsviskosimeter Haake Mars III der Firma Thermo Scientific verwendet (**Abb. 32**). Der Probenbecher ist zylindrisch mit einer ebenen Grundfläche und hat einen Durchmesser von 27,207 mm. Pro Messung wird der Becher mit 16 ml des zu untersuchenden Baustoffes befüllt. Der Rotationskörper, der in den mit Baustoff gefüllten Becher heruntergelassen wird, besteht aus Titan und hat einen Durchmesser von 25,079 mm und am unteren Ende einen Konuswinkel von 120°. Zwischen der Spitze des Konus und dem Boden des Probenbechers ist ein Abstand von 5,3 mm. Seitlich besteht zwischen Drehkörper und Becher ein Spalt von 1,064 mm.

2.2 Rheologie – Marshtrichter

Eine einfache Methode, mit der sich die Fließfähigkeit von Baustoffen ermitteln lässt, ist die Konsistenzprüfung mittels Marshtrichter. Der Marshtrichter ist ein Kunststofftrichter mit einem Fassungsvermögen von 1,5 Litern, der am unteren Ende eine Auslaufdüse mit einem Durchmesser von 8 mm hat. Für die Messung wird der Trichter schwingungsfrei ca. 15 cm über dem Auffangbehälter befestigt. Der Auffangbehälter muss eine Markierung bei 1000 ml Füllvolumen aufweisen. Nähere Informationen zum Aufbau und der Durchführung des Konsistenzprüfungsverfahrens für Baustoffe mittels Marshtrichter sind in DIN 4127 gegeben[113].

Die Marshtrichter-Auslaufzeit ist das Verhältnis der Geschwindigkeit mit der die Probenflüssigkeit durch die Auslaufdüse austritt zu der Kraft mit der die Flüssigkeit durch die Auslaufdüse drückt. Sie wird gemessen in Sekunden, die ein Liter Probenflüssigkeit benötigt um aus dem Marsh-Trichter durch die Auslaufdüse zu fließen[114].

2.3 Dichtemessungen

Für die Dichtemessungen wird das Dichtebestimmungsset YDK 01 der Firma Sartorius verwendet (**Abb. 33**), welches auf einer Präzisionswaage montiert wird. Bei der Dichtebestimmung mit dieser Apparatur wird das „Archimedische Prinzip“ verwendet. Das heißt, dass ein Körper beim Eintauchen in eine Flüssigkeit eine nach oben gerichtete Auftriebskraft erfährt, die den gleichen Betrag besitzt, wie die Gewichtskraft des verdrängten Flüssigkeitsvolumens. Wenn die Dichte des Glaskörpers, der in die zu untersuchende Flüssigkeit getaucht wird, bekannt ist, lässt sich mithilfe einer hydrostatischen Waage durch Wägen des Glaskörpers an Luft und in der zu untersuchenden Flüssigkeit die Dichte der Flüssigkeit ermitteln (Formel 12).

Zur Dichtebestimmung von Flüssigkeiten werden diese in einem kleinen Becherglas auf die Waage gestellt. Durch das Befestigen eines Thermometers am Rand des Becherglases lässt sich die Temperatur bei der Dichtemessung erfassen.

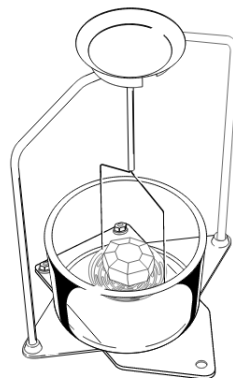


Abb. 33: Dichtebestimmungsset YDK 01 der Firma Sartorius[115]

$$\rho = \frac{A}{A-B} * \rho_f \quad (12)[115]$$

ρ = Dichte des Glaskörpers[g/cm³]

ρ_f = Dichte der zu untersuchenden Flüssigkeit [g/cm³]

A= Gewicht des Glaskörpers in der Luft [g]

B= Gewicht des Glaskörpers in der zu untersuchenden Flüssigkeit [g]

2.4 Grenzflächenspannung

Als Grenzflächenspannung werden die Kräfte bezeichnet, die an der Grenze zwischen zwei verschiedenen Phasen auftreten. Die Grenzflächenspannung kann sowohl zwischen zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten als auch zwischen einer Flüssigkeit und einer Gasphase gemessen werden. Die Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeiten und Gasen wird auch als Oberflächenspannung bezeichnet.

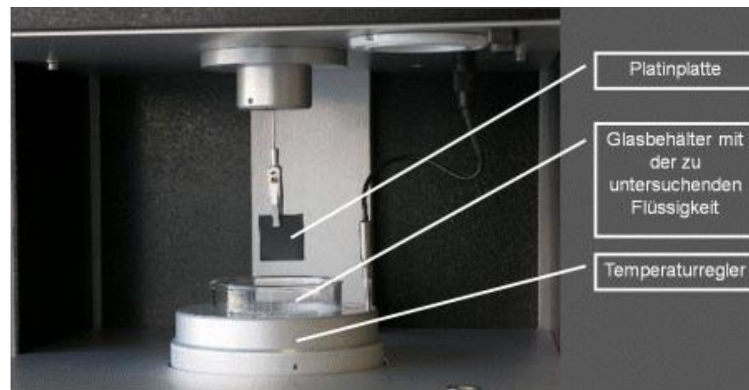


Abb. 34: Aufbau einer Wilhelmywaage[19]

Die Messung der Oberflächenspannung zwischen einer Flüssigkeit und der Umgebungsluft erfolgt mit einer Wilhelmywaage (**Abb. 34**). Hierbei wird ein an der Oberfläche aufgerautes Platinplättchen, das an einer Federwaage aufgehängt ist, in die zu untersuchende Flüssigkeit getaucht. Aufgrund der Rauigkeit der Oberfläche des Platinplättchens wird dieses durch die Flüssigkeit benetzt (**Abb. 35**). Als Folge der Benetzung steigt die Flüssigkeit an der Wilhelmyplatte empor, wodurch das benetzte Platinplättchen in die Flüssigkeit gezogen wird. An der Federwaage wird die Kraft gemessen, die notwendig ist, um die Wilhelmyplatte in der ursprünglichen Lage zu halten.

Mit der folgenden Formel lässt sich anschließend die Grenzflächenspannung berechnen:

$$\sigma = \frac{P}{2 \cdot (a+b)} \quad (13)$$

σ = Grenzflächenspannung [mN/m]

P = Kraft, die benötigt wird, um das Plättchen in der ursprünglichen Lage zu halten [N]

a = Breite des Platinplättchens [cm] (Das verwendete Plättchen hat eine Länge von 10 mm bei einer Breite von 19,9 mm und einer Dicke von 0,2 mm)

b = Länge des Platinplättchens [cm]

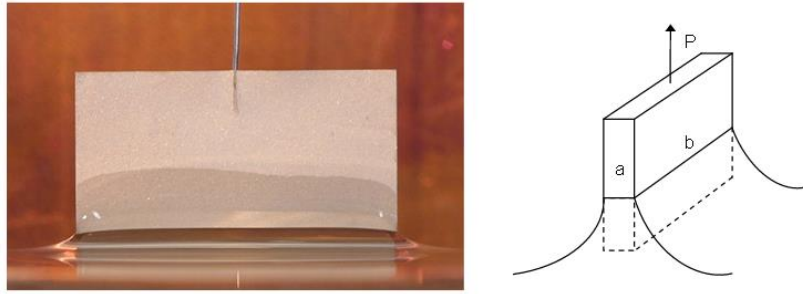


Abb. 35:Links: Benetzte Wilhelmyplatte. Rechts: Wilhelmyplatte der Länge b und Breite a die mit der Kraft P in der ursprünglichen Lage gehalten wird.

2.5 Kontaktwinkel

Die Kontaktwinkelmessungen werden nach der Methode des liegenden Tropfens durchgeführt. Hierbei wird die zu untersuchende Flüssigkeit auf eine Oberfläche gegeben und der Winkel, der sich im Dreiphasen Kontakt zwischen Flüssigkeit, Feststoff und Gasphase bildet, wird per Kamera aufgenommen und am PC graphisch ausgewertet.

Die Versuche wurden an einem Kontaktwinkelmessgerät des Typs OCA 15 gemacht. Dieses verfügt über eine S/W Kamera, welche ein Bild von 575 nutzbaren Zeilen liefert. Die Probe wird von der Rückseite her beleuchtet, wobei die Intensität den Gegebenheiten angepasst werden kann. Da Messreihen bei Temperaturen von 30°C und 40°C durchgeführt werden sollten, kam darüber hinaus eine Wärmekammer zum Einsatz, welche über ein Thermoelement sowie zwei Glasfenster verfügte. Der Aufbau der Messapparatur ohne Wärmekammer ist in **Abb. 36** dargestellt.



Abb. 36: Kontaktwinkelmessgerät des Typs OCA 15.

3 Durchführung der Messungen

Vor den Messungen wurde die jeweils benötigte Menge an Baustoff angemischt. Je nach Messung waren dies zwischen 75 und 200 Gramm. Für jede Messung wurde eine frische Charge Baustoff hergestellt und nach dem gleichen Verfahren angemischt. Die Einzelkomponenten wurden für 3 Minuten mit hoher Frequenz mit einem Milchaufschäumer gemischt. Die Zeit zwischen Anmischen des Baustoffes und dem Beginn des Versuchs wurde so kurz wie möglich gehalten, variiert aber von Versuch zu Versuch zwischen ein und vier Minuten.

Bei den Suspensionen (2K-Bitumen, IM 4+ und Ultrafin 12) wurden die Feststoffe unter langsamen Rühren zur Flüssigkeit hinzugegeben bevor anschließend mit dem Milchaufschäumer beide Materialien intensiv vermischt wurden.

Die Abwägung der Komponenten erfolgte mit der Feinwaage BP 310 S der Firma Sartorius, die eine Genauigkeit von 0,001 Gramm aufweist.

Für das Injektionsharz Denepox 40 wurden beide Komponenten abgewogen und anschließend mit dem Milchaufschäumer für 3 Minuten vermischt.

Da die Messungen des Wasserglases ohne Härter durchgeführt wurden, bedurfte es hier kein Anmischprozess.

3.1 Viskositätsbestimmung

Bei der Viskositätsbestimmung mittels Platte-Platte Verfahren wird der Baustoff nach dem Anmischen mit einer Pipette auf die untere Platte des Rheometers gegeben (ca. 3 ml). Durch anschließendes Herunterfahren bei gleichzeitigem Drehen der oberen Platte auf den Plattenabstand von 100 μm verteilt sich der Baustoff im Messspalt. Falls der Messspalt noch nicht vollständig mit dem Baustoff gefüllt ist, wird die obere Platte nach oben gefahren und der Vorgang wird wiederholt. Sobald der Messspalt vollständig mit Baustoff gefüllt ist, kann die Messung beginnen. Während des Befüllens des Messspalts sowie während der Messung wird die untere Platte auf die geforderte Temperatur (30 oder 40°C) erwärmt. Um sicherzustellen, dass der Baustoff bei Beginn der Messung die geforderte Temperatur hat, wird der Baustoff nach dem Befüllen eine Minute erwärmt und erst dann startet die Viskositätsmessung. Üblicherweise vergehen zwischen dem Anmischen des Baustoffes und dem Beginn der Messung 2 bis 4 Minuten.

Für die Messungen mit dem Rotationsviskosimeter werden 16 ml des Baustoffes nach dem Anmischen in den Becher des Rheometers gefüllt. Anschließend wird der Becher ins Rheometer eingebaut und der Drehkörper in den Baustoff getaucht, sodass dieser auf der Oberseite vollständig bedeckt ist. Nun wird der Drehkörper in Rotation versetzt und nach einer einminütigen Homogenisierungs- und Erwärmungsphase wird mit der Messung begonnen. Zwischen dem Anmischen des Baustoffes und dem Beginn der Messung vergehen etwa drei bis vier Minuten.

Üblicherweise werden bei Viskositätsmessungen mit dem Rotationsrheometer eine Messung sowie eine Wiederholungsmessung durchgeführt, was von den Mitarbeitern als repräsentativ betrachtet wird. Für die hier durchgeführten Messungen wurden eine Messung sowie zwei Wiederholungsmessungen durchgeführt.

3.2 Rheologie – Marshtrichter

Vor Beginn der Messung muss sichergestellt sein, dass sowohl der Marshtrichter als auch der Auffangbehälter trocken und frei von Suspensionsresten sind, da nur so vergleichbare Auslaufzeiten gemessen werden können. Anschließend werden 1,5 Liter der zu untersuchenden Injektionsmaterialien in den Marshtrichter gefüllt, wobei die Auslaufdüse mit dem Finger zugehalten wird. Sobald der Trichter befüllt ist, wird die Auslaufdüse geöffnet und die Zeit gestoppt bis 1000 ml des Injektionsmaterials in den Auffangbehälter geflossen sind.

Die Messungen wurden in einem auf die geforderten Werte von 30 und 40° C beheizten Raum durchgeführt, wobei die Ausgangsstoffe für die anzumischenden Baustoffe zum Erwärmen über Nacht im Raum gelagert wurden. Eine Überwachung der Temperatur der Injektionsmaterialien während der Messungen wurde nicht durchgeführt, da aufgrund der ausreichend langen Aufenthaltszeit im beheizten Raum von einer zur Lufttemperatur äquivalenten Baustofftemperatur ausgegangen wurde. Mit einer angemischten Charge Baustoff wurden jeweils zwei Messungen mit 2 separaten Versuchsaufbauten nacheinander mit einem zeitlichen Abstand von einer Minute durchgeführt.

3.3 Dichtemessung

Der Baustoff wurde während des Anmischens auf einer Heizplatte auf 30 bzw. 40° C erwärmt, wobei der Temperaturverlauf mit einem Thermometer permanent überwacht wurde. Das Wasserglas wurde unter ständigem Rühren ebenfalls auf der Heizplatte auf die geforderte Temperatur erwärmt. Zudem wurden der Glaskörper und das Becherglas, in dem die Messung stattfand, aufgewärmt. Während der Dichtemessung wurde die Temperatur mithilfe eines am Becherglas befestigten Thermometers erfasst. Üblicherweise vergingen zwischen dem Anmischen des Baustoffs und der Dichtebestimmung 60 bis 90 Sekunden.

3.4 Grenzflächenspannung

Nach dem Anmischen wurde der Baustoff in den Probenhalter gegeben und die erste Messung erfolgte 8 Minuten nach der Herstellung des Baustoffes. Der Probenhalter der Wilhelmywaage ist beheizbar und wurde zum Erwärmen auf die geforderten 30 bzw. 40° C verwendet. Zu Beginn der Messung wird der mit Baustoff gefüllte Probenhalter nach oben gefahren, bis das Platinplättchen in den Baustoff eintaucht. Beim Eintauchen wird die auf das Platinplättchen ausgeübte Auftriebskraft gemessen und sobald diese 8,0 mN überschreitet, wird die Höhe des Probenhalters als Nulllinie definiert. Anschließend wird das Platinplättchen 3 mm tief in den Baustoff getaucht und wieder um 3 mm herausgezogen. Nun beginnt die eigentliche Messung.

Durch das Eintauchen des Plättchens in den Baustoff wurde dieses benetzt, und die benetzende Flüssigkeit übt eine Gewichtskraft auf das Plättchen auf, die gemessen werden kann, und aus der die Oberflächenspannung berechnet wird.

Für alle Baustoffe, mit Ausnahme des Wasserglases, erfolgten die Messungen 8, 16, 24 und 32 Minuten nach dem Anmischen. Zwischen den einzelnen Messungen musste das Platinplättchen gereinigt und getrocknet werden, wodurch sich der zeitliche Abstand von 8 Minuten zwischen den einzelnen Messungen ergibt. Beim Wasserglas war nur eine Messung innerhalb von 3 Minuten nach der Entnahme der Probe aus dem Vorratsgefäß möglich, da es zu späteren Zeitpunkten, durch die einsetzende Vergelung bzw. Trocknung des Wasserglases, zur Ausbildung eines dünnen Häutchens auf der Probenoberfläche kam, welches weitere Messungen verhindert hat.

3.5 Kontaktwinkel

Für die Kontaktwinkelmessungen sollte eine Oberfläche ausgewählt werden, die dem Eindringen des Injektionsmaterials in die Kontaktfuge zwischen Streckenverschlussbauwerk und Steinsalz entspricht. Aufgrund der Annahme, dass mindestens eine Wandfläche der Kontaktfuge das anstehende Steinsalz der Streckenkontur ist und auch Wegsamkeiten der Auflockerungszone, in die das Injektionsmaterial eindringen kann, aus Salz bestehen, wurden die Kontaktwinkelmessungen auf Steinsalz durchgeführt.

Es gibt im Wesentlichen zwei verschiedene Oberflächenformen, die natürlicherweise im Salz der Streckenkontur vorkommen. Bedingt durch die Auffahrung der Strecke und des Nachschnitts der Streckenkontur mittels Teilschnittmaschine werden Scherkräfte auf das Gestein ausgeübt, wodurch es zum Herauslösen einzelner Kristalle aus dem Gesteinsverbund (selten) oder zum Zerschneiden der einzelnen Steinsalzkristalle kommt. Wenn die Natriumchloridkristalle zerschneiden, kann dies parallel zu den kristallographischen Flächen geschehen, wobei Steinsalz eine vollkommene Spaltbarkeit aufweist und sich glatte Bruchflächen bilden. Wenn der Bruch nicht entlang einer der kristallographischen Flächen verläuft, weist Steinsalz einen muscheligen Bruch auf. Daher wurden in Vorversuchen diese beiden Oberflächen hinsichtlich ihrer Kontaktwinkel verglichen, wobei allerdings kein Unterschied feststellbar war.

Zudem wurde versucht, Probenkörper aus feinem (kleiner 125 μm) gepresstem Steinsalzpulver herzustellen, um die große Oberfläche zu simulieren, mit der die Injektionsmaterialien innerhalb eines Risses in Kontakt kommen. Die Presstabletten wurden 3 Minuten lang bei einem Druck von 40 MPa gepresst. Auch auf den aus Salzpulver hergestellten Presstabletten wurden Kontaktwinkelmessungen durchgeführt, deren Ergebnis nicht von dem der zerschneidenden Salzkristalle abwich.

Versuchstechnisch waren die entlang der kristallographischen Ebenen vollkommen gespaltenen Salzkristalle am einfachsten zu handhaben, da diese sehr plane, parallele Oberflächen

aufweisen und sich dadurch bestens für die Messmethode des liegenden Tropfens eignen, bei der der Kontaktwinkel zwischen Injektionsmaterial und Salz mittels Kamera erfasst wird.

Nach dem Anmischen wurden die Injektionsmaterialien für die Versuche in einer Einwegspritze aufgesogen, welche anschließend in das Kontaktwinkelmessgerät eingebaut und an die Dosiervorrichtung angeschlossen wurde. Mit der Dosiervorrichtung wurde ein Tropfen von 2,5 µl durch die Kanüle der Spritze herausgedrückt. Dieser Tropfen hängt anschließend an der Kanüle und durch Hochfahren des Tisches mit der Salzprobe gelangt der Tropfen auf die Probenoberfläche. Sobald der Tropfen auf der Probenoberfläche zum Liegen kommt, wird der Probenstisch soweit nach unten gefahren, dass sich der Tropfen vollständig von der Kanüle löst. Der nun auf der Probenoberfläche in Ruhe liegende Tropfen wird von der Seite mit einer Kamera gefilmt und anschließend wird der Kontaktwinkel aus der Videoaufnahme bestimmt.

Die Versuche wurden jeweils in Gruppen zu 6 Einzelversuchen für die vier untersuchten Injektionsmaterialien mit Ausnahme des Wasserglases durchgeführt. Für das Wasserglas wurden 17 bzw. 10 Versuche bei den beiden Temperaturstufen durchgeführt. Die gewählten Temperaturen betragen 30° C und 40° C.

4 Vorstellung der Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Viskositätsmessungen vorgestellt, wobei die Durchschnittswerte der Einzelmessungen im Text vorgestellt und diskutiert werden. Die Kurvenverläufe der Einzelmessungen, aus denen die Durchschnittswerte gebildet wurden, sind im Anhang abgebildet.

4.1 Viskositätsbestimmung

4.1.1 IM 4+

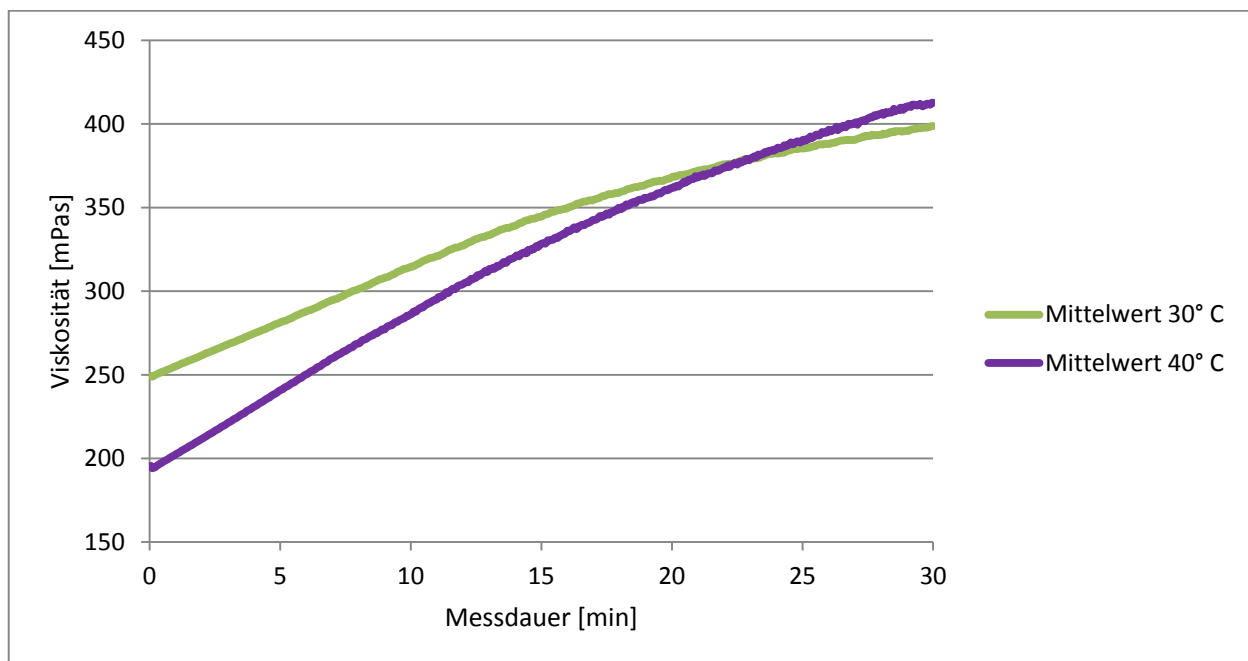


Abb. 37: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit IM 4+ bei 30 und 40° C.

Bei 30°C steigt die Viskosität der Suspension während der dreißig minütigen Messung von Anfangs 249 mPas auf 399 mPas zum Ende der Messung. In der zweiten Hälfte der Messung flacht die Kurve etwas ab. Bei der Messung bei 40° C ist die Viskosität zu Beginn der Messung mit 194 mPas deutlich niedriger und steigt im Messzeitraum auf 413 mPas an. Auch hier lässt sich im letzten Drittel der Messung ein Abflachen der Kurve erkennen. Nach knapp 23 Minuten weist die Suspension bei beiden Temperaturstufen die gleiche Viskosität auf. Im weiteren Verlauf hat die Suspension bei 40° C eine höhere Viskosität.

Wie bei den meisten Suspensionen sinkt die Anfangsviskosität des IM 4+ bei höherer Temperatur, da die Viskosität der Anmahlösung sinkt. Infolge einer höheren chemischen Reaktivität bei höheren Temperaturen kommt es jedoch auch zu einem schnelleren Ansteifen des Baustoffes. Wenn man die Definition der einzelnen Abschnitte des Aushärteverhaltens von Beton in **Abb. 38** zur Interpretation der gemessenen Viskositätsverläufe heranzieht, zeigt das IM

4+ ein frühes Ansteifen, wobei sich die Zunahme der Viskosität über die Zeit bis zum Erstarrungsbeginn verlangsamt.

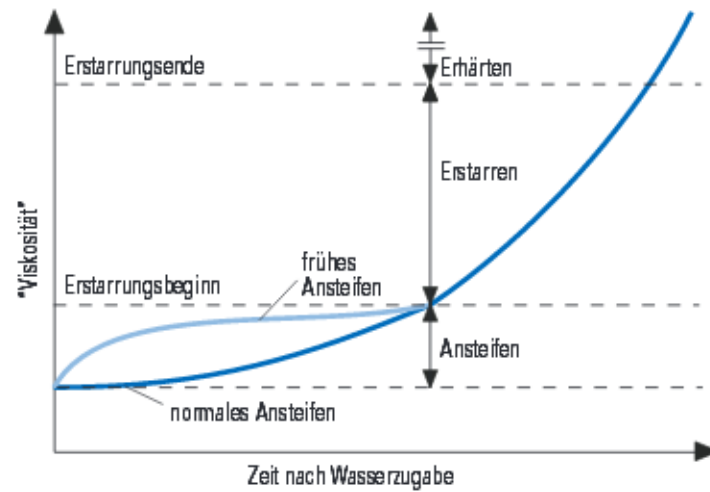


Abb. 38: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement und Beton[116]

4.1.2 Ultrafin 12

Für den Feinstzement Ultrafin 12 kamen für die Viskositätsmessungen zwei verschiedene Rezepturen zum Einsatz. Zum einem eine Rezeptur mit einem W/F-Wert von 1,4 bei der Leitungswasser als Anmachlösung verwendet wurde und zum anderen wurde eine 90% NaCl-gesättigte Lösung verwendet. Die Mengenteile Wasser und Zement wurden vor dem Anmischen abgewogen. Da die Salzlösung eine höhere Dichte aufweist, wurde hier beim Abwiegen eine Korrektur vorgenommen, sodass beide Suspensionen volumenmäßig mit derselben Flüssigkeitsmenge angemischt wurden, auch wenn sich dadurch ein W/F-Wert von 1,85 ergibt.

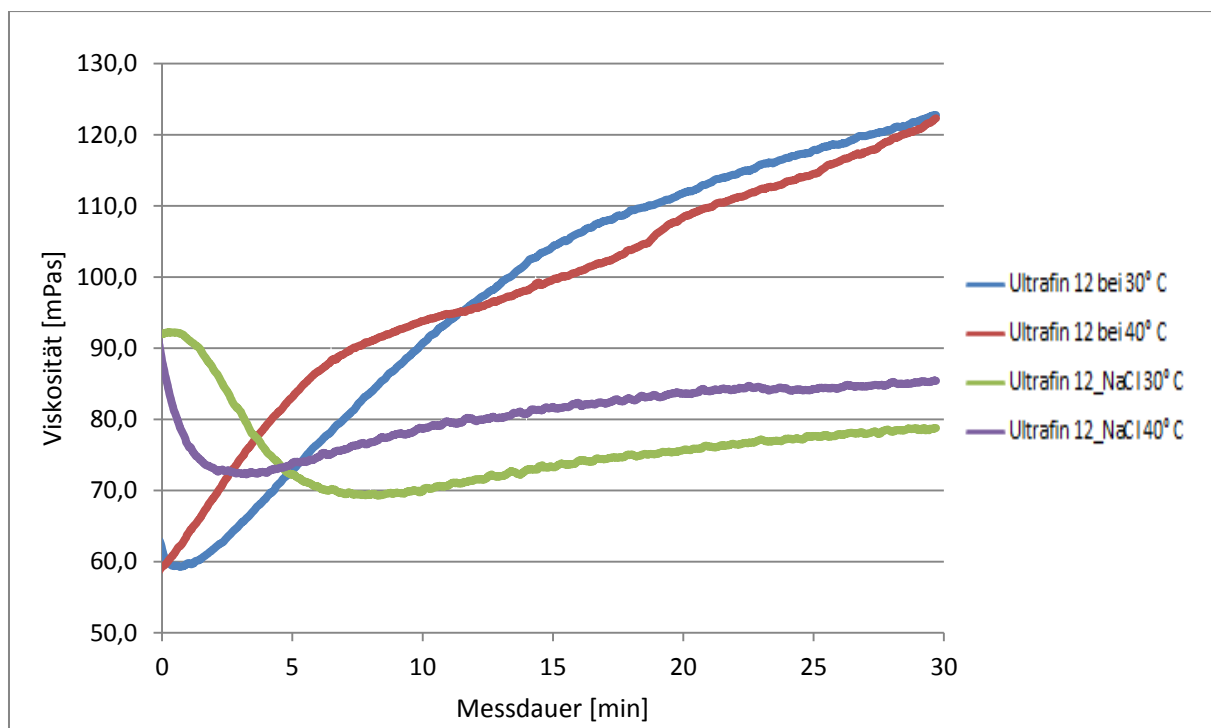


Abb. 39: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Ultrafin 12 bei 30 und 40° C. Die grüne und die violette Kurve stellen die Mittelwerte der Messungen der mit NaCl-haltiger Lösung angemischten Suspension dar.

Beide Kurvenverläufe der Messungen der mit Leitungswasser angemischten Suspension können in mehrere Abschnitte unterteilt werden (siehe **Abb. 39**). Die Messung bei 40° C hat eine Anfangsviskosität von etwa 60 mPas und steigt in den ersten 7 Minuten auf etwa 90 mPas an. Anschließend flacht der Kurvenverlauf ab und erreicht nach 30 Minuten eine Viskosität von etwas über 120 mPas. Bei der Messung bei 30° C sinkt in den ersten 30 Sekunden die Viskosität um ca. 3 mPas um anschließend für 2 Minuten einen horizontalen Verlauf bei 60 mPas aufzuweisen. Der weitere Verlauf ist durch einen Anstieg der Viskosität ausgezeichnet, der bis zum Zeitpunkt 15 Minuten steiler verläuft und anschließend abflacht. Die Viskosität dieser Messung ist nach 30 Minuten mit etwas über 120 mPas genauso hoch wie bei der Messung bei 40° C.

Die Verläufe der Messungen der mit Salzlösung angemischten Suspension von Ultrafin 12 weisen einen interessanten Verlauf auf. Bei beiden Temperaturstufen sinkt die Viskosität im ersten Drittel der Messung und steigt anschließend langsam an, erreicht aber nicht die Anfangswerte, die bei 92 und 89 mPas liegen (30° und 40° C). Der Tiefpunkt der Kurve ist bei der Messung bei 30° C nach knapp 4 Minuten erreicht und bei der Messung bei 40° C nach 7 bis 8 Minuten. Die Viskosität zum Ende der Messung nach 30 Minuten ist bei der höheren Temperatur mit 86 mPas höher als bei 30°C (79 mPas). Möglicherweise ist der langsame Anstieg der mit Salzlösung angemischten Suspension auf die verringerte Wasseraktivität von NaCl-Lösungen zurückzuführen, die die Reaktion von Zement verzögert[117].

Die mit Salzlösung angemischte Suspension weist eine ausgeprägte Thixotropie auf. Nach einer zehnmütigen Ruhephase ist es möglich, einen Behälter mit der Suspension auf den Kopf zu stellen, ohne dass die Suspension herausfließt. Allerdings reicht eine Anregungsphase von wenigen Sekunden um die Suspension wieder fließfähig zu bekommen. Thixotrope Flüssigkeiten können eine merkliche Einstellzeit der Viskosität aufweisen[118]. Auf diesen Effekt, der durch die Anfahrerschubspannung gekennzeichnet ist, ist vermutlich das Sinken der gemessenen Viskosität in den ersten Minuten zurückzuführen.

4.1.3 2K-Bitumen

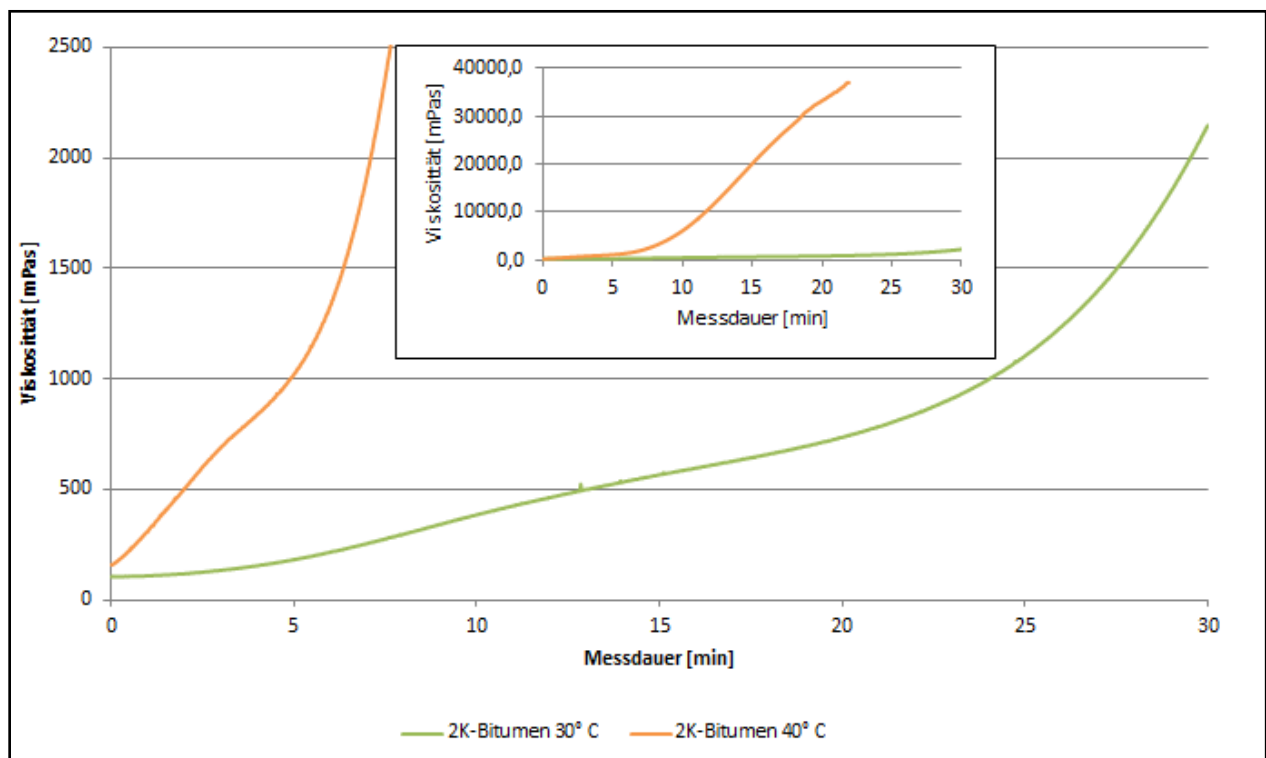


Abb. 40: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit dem 2K-Bitumen bei 30 und 40° C.

Insgesamt wurden mit dem 2K-Bitumen nur 4 Messungen durchgeführt. Davon entfallen drei Messungen auf die Temperaturstufe 30° C und eine Messung wurde bei 40° C durchgeführt. Es wurde nur eine Messung durchgeführt, da die mit dem 2K-Bitumen hergestellte Suspension schon 12 Minuten nach Beginn der Messung eine Viskosität von 10.000 mPas aufweisen hat und nach 22 Minuten betrug die Viskosität über 37.000 mPas, was recht hoch ist für Injektionszwecke.

Bei 30° C wies das 2K-Bitumen einen zweigeteilten Kurvenverlauf auf. Während der ersten gut 20 Minuten der Messung stieg die Viskosität vergleichsweise wenig von 110 auf 800 mPas, um dann während der letzten 10 Minuten der Messung zunehmend anzusteifen, wobei nach einer Messdauer von 30 Minuten eine Viskosität von 2150 mPas erreicht wurde.

4.1.4 Wasserglas

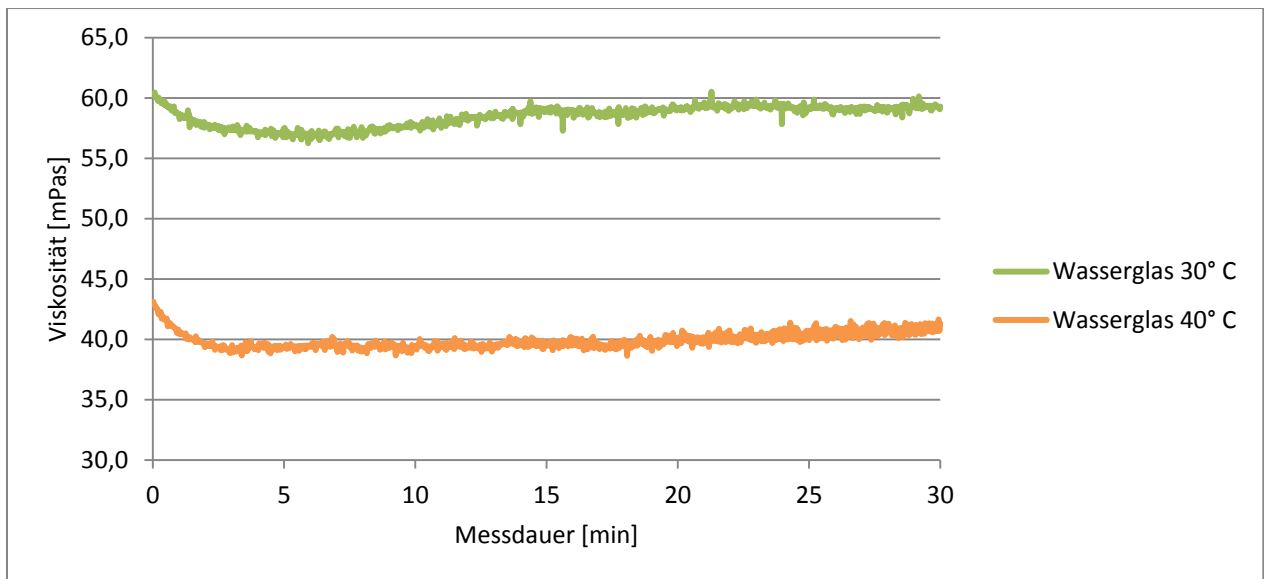


Abb. 41: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Wasserglas 37/40 bei 30 und 40° C.

Die Kurvenverläufe der Viskositätsmessungen des Wasserglases weisen bei beiden Temperaturstufen einen ähnlichen Verlauf auf. In den ersten drei Minuten sinkt die Viskosität um etwa 3 bis 4 mPas und steigt anschließend leicht zum Ende der Messung hin an (von 57 auf 59 mPas bei 30° C und von 39 auf 41,5 mPas bei 40° C).



Abb. 42: Anhaftungen von vergeltem Wasserglas am Drehkörper des Rheometers

Die Mittelwerte der Messungen und insbesondere die Einzelmessungen weisen mit zunehmender Messdauer einen unruhigen Verlauf auf. Das lässt sich wahrscheinlich auf die Ausbildung einer Anhaftung aus vergeltem Wasserglas am Drehkörper im Kontaktbereich zwischen Wasserglas und Luft zurückführen (**Abb. 42**). Die Ergebnisse für Wasserglas bestätigen die aus der Arrheniusgleichung zu erwartende Abnahme der Viskosität mit zunehmender Temperatur.

4.1.5 Denepox 40

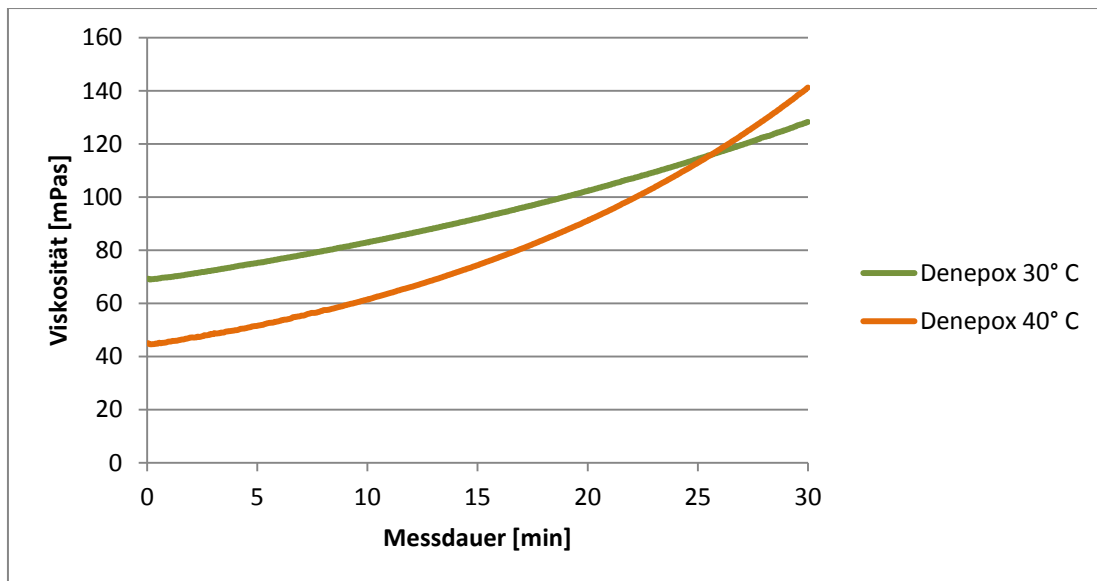


Abb. 43: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Denepox 40 bei 30 und 40° C.

Beim Betrachten der Verläufe der Viskositätsmessungen des Injektionsharzes Denepox 40 fällt auf, dass die Mittelwerte beider Messungen zum Ende der Messung hin einen zunehmend steileren Anstieg der Viskosität aufweisen, wobei der Viskositätsanstieg bei der höheren Messtemperatur deutlich ausgeprägter ist. Bei der Temperatur von 30° C stiegen die Messwerte im Laufe der Messung von 69 auf 128 mPas und bei 40° C von 44 auf 141 mPas. Nach einer Messdauer von etwa 25-26 Minuten kommt es zum Schnittpunkt der beiden Kurven. Für den weiteren Messverlauf wies das Injektionsharz bei der Temperatur von 30° C die niedrigere Viskosität auf.

Bedingt durch die Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeiten bei höheren Temperaturen (Arrhenius-Gleichung) kann es zur erheblichen Herabsetzung der Aushärtezeiten von Kunstharzen kommen[119]. Somit haben Harze bei höheren Temperaturen zwar eine niedrigere Anfangsviskosität, allerdings kommt es mit zunehmender Zeit nach dem Mischen zu einer stärkeren Zunahme der Viskosität. Sowohl die geringere Anfangsviskosität des Harzes bei der höheren Temperatur als auch die beschleunigte Abbindereaktion und schnellere Zunahme der Viskosität sind in **Abb. 43** gut zu erkennen.

Zusammenfassung

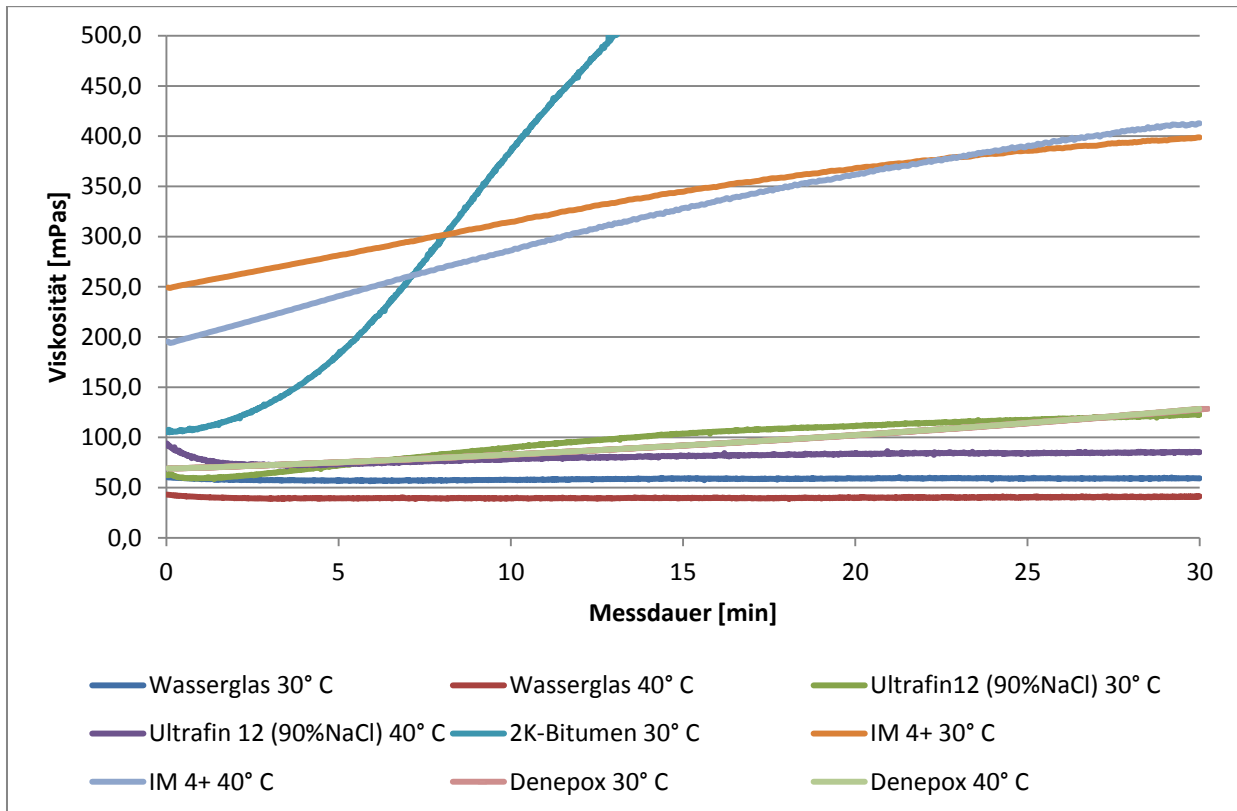


Abb. 44: Zusammenstellung der Mittelwerte der Viskositätsmessungen aller Injektionsmaterialien

In **Abb. 44** werden die Mittelwerte der einzelnen Viskositätsmessungen zusammenfassend dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass Wasserglas von den 5 untersuchten Injektionsmaterialien die niedrigste Viskosität im Messzeitraum aufweist. Das 2K-Bitumen weist initial zwar eine geringe Viskosität auf, jedoch steigt die Viskosität rasch in einen Bereich an, wo die Injizierbarkeit fraglich ist.

Von den betrachteten partikelgestützten Injektionsmaterialien hat das Ultrafin 12 die niedrigsten Viskositätswerte, sowohl bei den Messungen mit 90% NaCl gesättigter Lösung als auch bei den Messungen der mit Leitungswasser hergestellten Suspension. Die gemessenen Viskositäten des Ultrafin 12 sind in einer ähnlichen Größenordnung wie die des Injektionsharzes Denepox 40. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei den partikelgestützten Injektionsmaterialien Ultrafin 12 die niedrigste Viskosität aufweist und dass von allen betrachteten Baustoffen das Wasserglas die niedrigste Viskosität hat, wobei eine Übersicht über die Messungen der partikelfreien Baustoffe in **Abb. 45** gegeben ist.

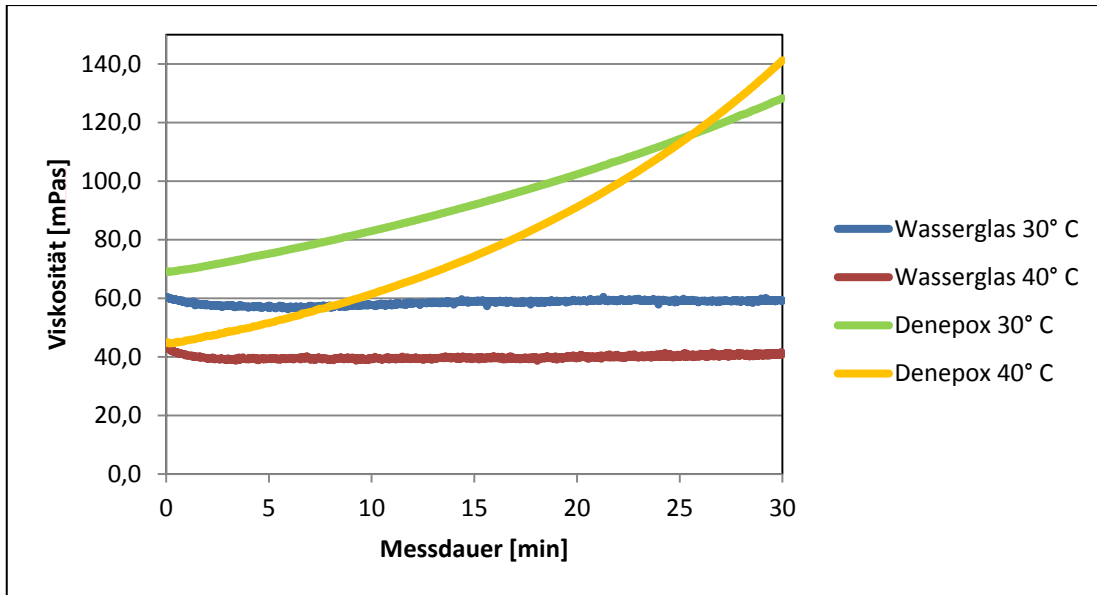


Abb. 45: Zusammenstellung der Mittelwerte der Viskositätsmessungen der partikelfreien Injektionsmaterialien

Für Wasserglas ist darauf hinzuweisen, dass es zu einer deutlichen Abnahme der Viskosität um ca. 30% durch die Erhöhung der Versuchstemperatur von 30 auf 40° C kam. Dieser Befund deckt sich mit früheren Untersuchungen. In **Abb. 46** sind die Ergebnisse von Viskositätsmessungen unterschiedlicher Wassergläser bei 21 und 17° C dargestellt, wobei sich selbst bei diesem geringen Temperaturunterschied eine merkbare Änderung in der Viskosität einstellt[79].

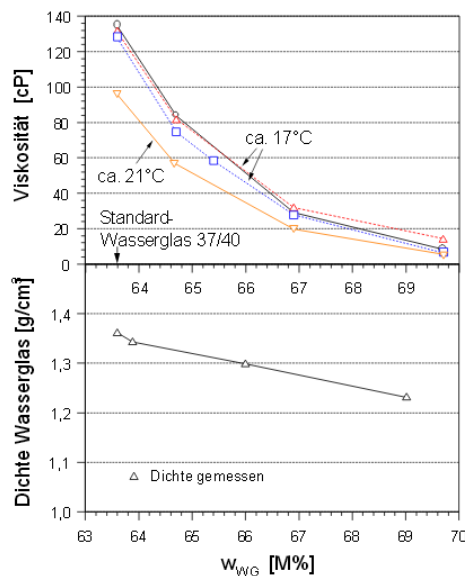


Abb. 46: Viskosität von Wassergläsern in Abhängigkeit von der Temperatur sowie ihrem Wasseranteil (w_{WG}). Untenstehend ist die Dichteänderung von Wassergläsern mit unterschiedlichen Wasseranteilen dargestellt[79].

4.2 Rheologie – Marshtrichter

In der Auswertung der Ergebnisse der Viskositätsbestimmung mittels Rheometer wurde auf eine Messung der Marshzeit für das Bitumen bei 40° C verzichtet, da dieses nach den Viskositätsmessungen als recht ungeeignet für Injektionsmaßnahmen erscheint.

Leider war keine Messung der Auslaufzeit mit dem Injektionsharz Denepox 40 möglich, da beide Reinigungsmittel (Aceton und Methylethylketon) den Kunststoff des Marshtrichters und auch des Auffangbehälters angreifen und auflösen.

Tab. 29: Marshzeiten (in Sekunden) der untersuchten Injektionsmaterialien (Auslaufdüse 8 mm)

Messung Nr.	Ultrafin 12		IM 4+		Wasserglas		2K-Bitumen	
	30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C
1	10,61	11,26	27,47	24,02	17,49	16,60	40,52	-
2	10,47	10,62	26,25	23,40	18,31	16,29	40,89	-
3	10,39	11,06	26,82	23,66	17,67	16,05	41,22	-
4	10,59	10,84	27,45	23,76	18,25	16,47	40,65	-
5	10,30	11,07	28,20	23,55	17,75	15,97	41,10	-
6	10,33	10,73	27,84	23,82	17,79	16,18	40,58	-
Mittelwert	10,45	10,93	27,34	23,70	17,88	16,26	40,83	-

Wie bei den Messungen mit dem Rheometer ist das Bitumen von den betrachteten Baustoffen am wenigsten fließfähig. Das IM 4+ hat bei beiden Temperaturen eine größere Marshzeit als Ultrafin 12 und das Wasserglas, wobei für das Ultrafin 12 eine um 6 bis 7 Sekunden kürzere Auslaufzeit als das Wasserglas gemessen wurde. Neben der Viskosität haben auch weitere Materialkennwerte, wie z.B. die Dichte der Injektionsmaterialien, einen Einfluss auf die Marshzeit. Infolge der höheren Dichte des Feinstzements Ultrafin 12 im Vergleich zum Wasserglas kommt es durch das höhere Gewicht der im Marshtrichter befindlichen Suspensions/Flüssigkeitssäule zu einer kürzeren Auslaufzeit. Abgesehen vom Ultrafin zeigen die beiden anderen Baustoffe bei der höheren Temperatur eine Abnahme der Marshzeit. Damit wird klar, warum die Marshzeit als Konsistenzprüfungsverfahren gilt und bei einem Vergleich von verschiedenen Injektionsmaterialien nur indikative Aussagen ermöglicht.

4.3 Dichtemessung

Die Ergebnisse der Dichtebestimmung der einzelnen Injektionsmaterialien bei 30 und 40° C sind in **Tab. 30** dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen befinden sich im Anhang.

Tab. 30: Dichte der verschiedenen Injektionsmaterialien bei 30 und 40° C

Injektionsmaterialien	IM 4+	Ultrafin 12	Wasserglas 37/40	Denepox 40	2K-Bitumen	Ultrafin 12 (90%-NaCl-Lösung)
Dichte bei 30° C [g/cm ³]	1,846	1,415	1,363	1,062	0,965	1,704
Dichte bei 40° C [g/cm ³]	1,840	1,412	1,357	1,054	-	1,696
Differenz je Grad Celsius [g/cm ³]	0,0006	0,0006	0,0006	0,0008		0,0008

Bei der Dichtebestimmung kam es nur zu geringen Schwankungen der Messwerte um den Mittelwert. Bei der höheren Temperatur hatten die Injektionsmaterialien immer eine geringere Dichte, wobei sich die Dichte beim Wasserglas und IM 4+ um 0,006 g/cm³ verringert hat, beim Ultrafin 12 um 0,003 g/cm³ und beim Denepox 40 um 0,008 g/cm³. Während des Anmischens des Bitumens bei 40° C steift dieses soweit an, dass der Glaskörper nicht mehr in den Baustoff eintaucht und daher keine Dichtemessung möglich war.

4.4 Grenzflächenspannung

Die Grenzflächenspannung oder auch Oberflächenspannung ist ein Wert, der angibt, wieviel Arbeit verrichtet werden muss, um die Oberfläche eines Fluides um einen bestimmten Betrag zu vergrößern. Aus der Washburn Gleichung ergibt sich, dass das Eindringvermögen von Flüssigkeiten in poröse Medien bei höherer Oberflächenspannung besser ist.

$$pc = \frac{2\gamma}{r} \cos\theta \qquad \text{Washburn Gleichung (14)}$$

pc= Kapillarkraft [N/m²]

γ= Oberflächenspannung [mN/m]

r= Radius der Kapillare [m]

cosθ= Benetzungswinkel [°]

Die Ergebnisse der einzelnen Messungen der Oberflächenspannung befinden sich im Anhang. In **Abb. 47** werden die gemessenen Oberflächenspannungen der einzelnen Baustoffe zusammenfassend dargestellt.

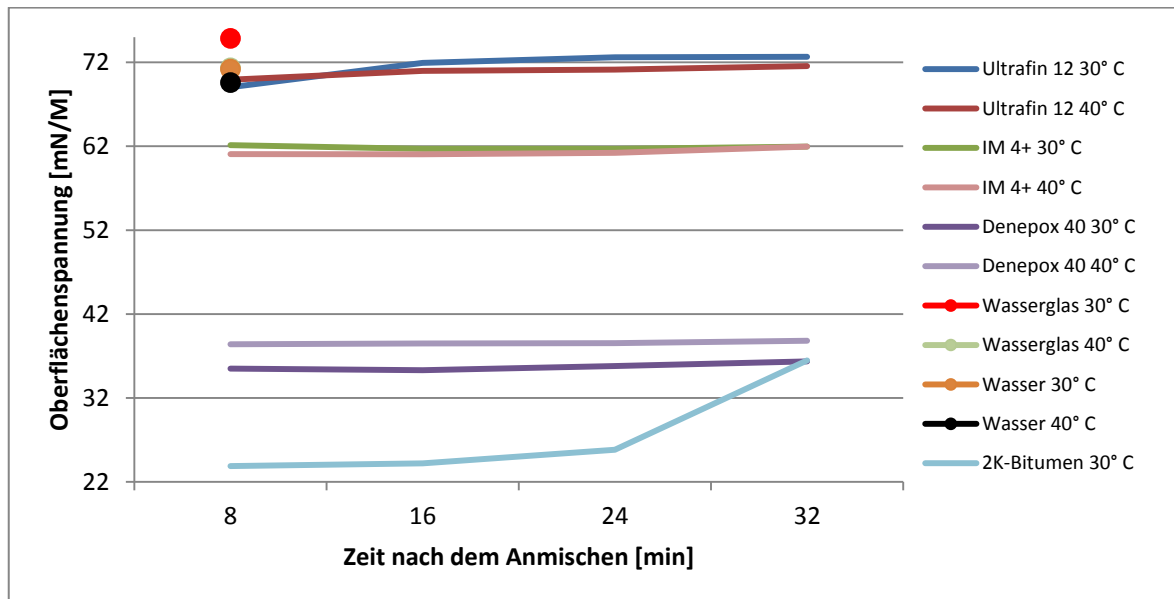


Abb. 47: Darstellung der Oberflächenspannung der untersuchten Injektionsmaterialien bei 30 und 40° C in Abhängigkeit der Zeit nach dem Anmischen

Die Oberflächenspannung des Wasserglases ist als einzige höher als die Oberflächenspannung von Wasser. Ultrafin 12 hat bei beiden Temperaturen ähnliche Oberflächenspannungen wie Wasser. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass es bei der gewählten Rezeptur im geringen Maße zum Wasserabsetzen kommt und sich auf der Oberfläche des Probenhalters ein dünner Wasserfilm ausbildet, der dann am Platinplättchen emporsteigt. Am niedrigsten ist die Oberflächenspannung des 2K-Bitumens. Das 2K-Bitumen zeigt über den Verlauf der Messung einen Anstieg der Oberflächenspannung von 23,876 mN/M auf 36,470 mN/M. Der Anstieg der Oberflächenspannung ist auf ein zunehmendes Ansteifens des Bitumens zurückzuführen. Etwa 25 bis 30 Minuten nach dem Anmischen ist das Bitumen bereits soweit ausgehärtet, dass es nicht mehr fließfähig ist (Auch wenn das Gefäß mit dem Bitumen auf den Kopf gestellt wird fließt dieses nicht heraus). Bei 40° C steift das Bitumen wesentlich schneller an und ist 5 bis 7 Minuten nach dem Anmischen nicht mehr fließfähig. Daher war eine Messung der Oberflächenspannung des Bitumens bei 40° C praktisch nicht durchführbar und auch nicht sinnvoll, da bei solch einem raschen Ansteifen das Bitumen nicht injizierbar ist.

4.5 Kontaktwinkel

In **Abb. 48** und **Abb. 49** sind exemplarisch die Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Kontaktwinkel für die beiden Injektionsmaterialien Ultrafin 12 und Wasserglas dargestellt. Auffällig ist, dass beim Wasserglas, im Gegensatz zu Ultrafin 12, eine Häufung größerer Kontaktwinkel gemessen wurde. Bei den Kontaktwinkeln beider Materialien lässt sich sehr gut ein Trend zu größeren Kontaktwinkeln bei höherer Temperaturen feststellen. Hierbei ist allerdings festzuhalten, dass es bei dem Wasserglas einen relativ großen Übergangsbereich (38°-52°) zwischen den Kontaktwinkeln beider Temperaturstufen gibt.

Eine wichtige Beobachtung während der Messung war die Tatsache, dass Wasserglas bei höheren Temperaturen dazu neigt, äußerst rasch eine Haut auszubilden, welche unter Umständen als Rüssel an der Nadel kleben bleibt, wenn man versucht diese aus dem Tropfen heraus zu ziehen. Diese Haut ist nach kurzer Zeit so belastbar, dass sie den gesamten Tropfen trägt, wobei dieser seine Kontur nichtmehr verändert. In die Ergebnisse wurden zwar nur Einzelversuche aufgenommen, bei welchen dieser Effekt nicht zum Tragen kam, jedoch sind die Ergebnisse insgesamt mit einer gewissen Unschärfe behaftet. Der Feinstzement „Ultrafin 12“ sowie die weiteren betrachteten Injektionsmaterialien zeigten hingegen ein weitaus einheitlicheres Verhalten. Einzig bei der Messung bei 30° C für 2K-Bitumen gab es einen Ausreißerwert (9°) und für Denepox 40 bei 40° C (18°). Für die Bildung der Mittelwerte wurden diese Ausreißerwerte nicht mit einbezogen. Beispielhaft für die Verteilung der gemessenen Kontaktwinkel wird die Häufigkeitsverteilung der Messungen für Ultrafin 12 in **Abb. 49** abgebildet. Die Häufigkeitsverteilungen der anderen Messungen befinden sich im Anhang.

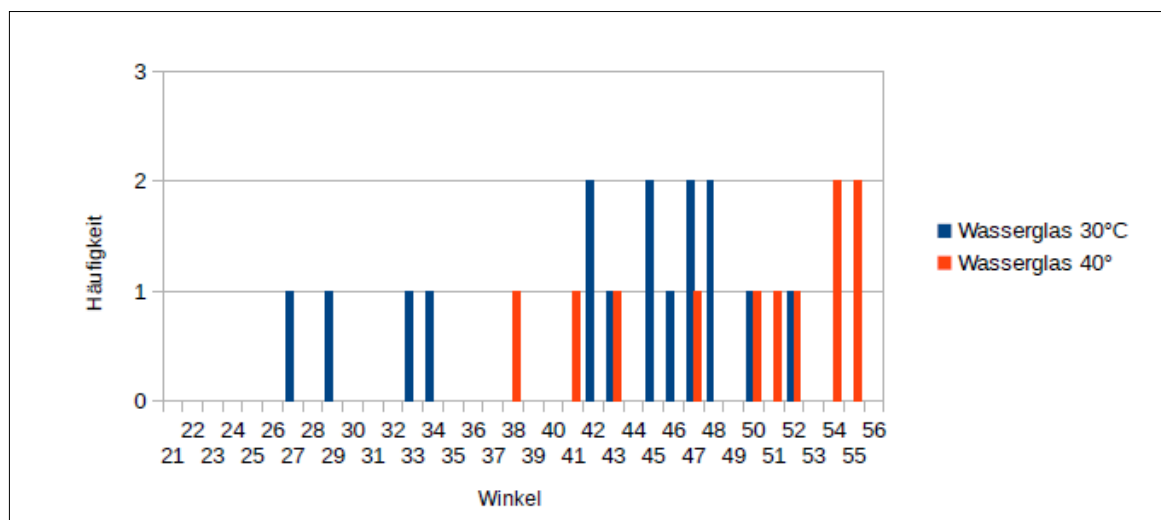


Abb. 48: Häufigkeit der gemessenen Kontaktwinkel von Wasserglas bei 30 und 40° C

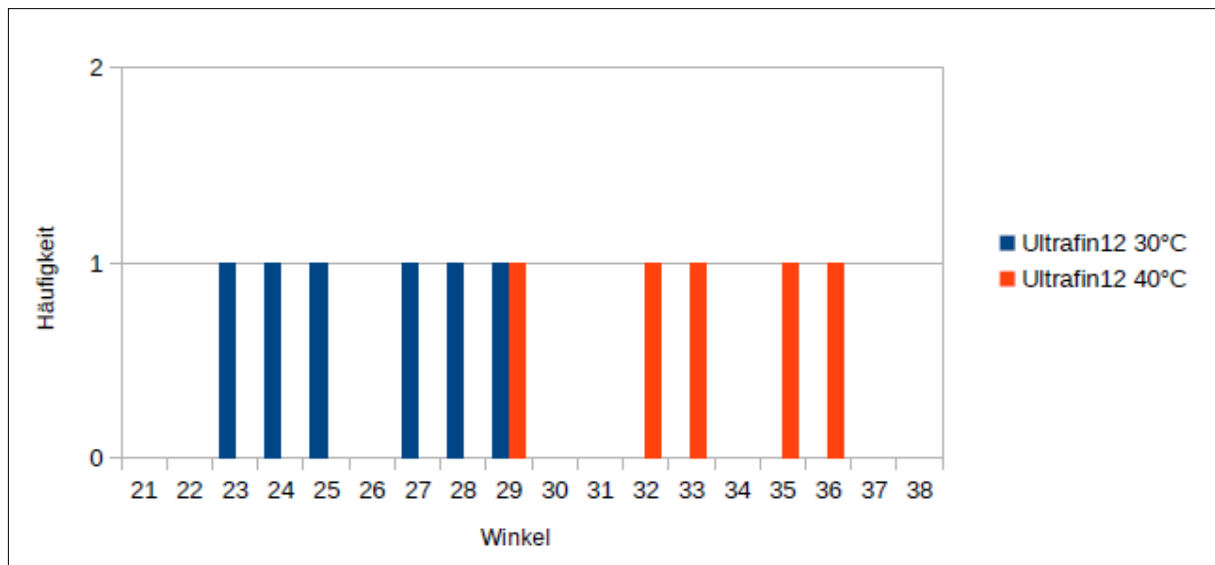


Abb. 49: Häufigkeit der gemessenen Kontaktwinkel von Ultrafin 12 bei 30 und 40° C

Die Eötvössche Regel besagt, dass die Oberflächenspannung jeder Flüssigkeit eine Funktion der Temperatur darstellt. In der Youngschen Gleichung wird der Kontaktwinkel einer Flüssigkeit unter Zuhilfenahme der Oberflächenspannung ermittelt. Dies bedeutet, dass eine Temperaturabhängigkeit der Kontaktwinkel der untersuchten Flüssigkeiten zu erwarten ist.

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{LS}}{\sigma_{LG}} \quad \text{Youngsche Gleichung (15)}$$

θ = Kontaktwinkel an der Oberfläche Flüssigkeit/Gas [°]

σ_{SG} = freie spezifische Oberflächenenergie eines ebenen Festkörpers [mN/m]

σ_{LS} = spezifische Grenzflächenenergie zwischen dem Festkörper und einem darauf befindlichen Flüssigkeitstropfen [mN/m]

σ_{SG} = der Oberflächenspannung der Flüssigkeit [mN/m]

Sowohl das Wasserglas als auch Ultrafin 12 weisen bei der höheren Temperatur höhere Kontaktwinkel auf. Allerdings ist es gerade beim Wasserglas äußerst schwierig, sinnvoll einen Mittelwert der Kontaktwinkelmessungen zu erstellen, da die Messwerte –möglicherweise bedingt durch die einsetzende Vergelung- über einen sehr weiten Bereich streuen (26,3° – 51,8° bei 30° C) und (37,1° – 54, 8° bei 40° C). Wenn alle erhaltenen Messwerte gemittelt werden erhält man bei 30° C einen Kontaktwinkel von 41,8° und bei 40° C von 48,4. Untenstehend sind in **Tab. 31** die Mittelwerte der weiteren Messungen angegeben. Auch hier lässt sich beobachten, dass die Kontaktwinkel bei 40° C, mit Ausnahme des Denepox 40, größer sind als bei der niedrigeren Temperaturstufe.

Tab. 31: Mittelwerte und Einzelmesswerte der Kontaktwinkelmessungen

Ultrafin 12		IM 4+		Denepox 40		2K-Bitumen	
30° C [°]	40° C [°]	30° C [°]	40° C [°]	30° C [°]	40° C [°]	30° C [°]	40° C [°]
23	28	45	49	27	30	24	22
27	32	41	47	32	26	14	15
24	34	41	41	28	26	15	16
27	32	42	55	33	31	16	23
23	36	42	48	31	33	20	18
29	35	51	51	27	28		20
25,4	32,8	43,7	48,5	29,7	29,0	17,8	19,0

In **Tab. 32** sind für Wasserglas die Kontaktwinkel der Einzelmessungen und die Durchschnittswerte aufgeführt. Der Grund für das Mehr an Messungen bezüglich des Wasserglases besteht in dessen schlechter Handhabbarkeit. Hier deutete sich schon zu Beginn der Messungen an, dass es zu größeren Schwankungen kommen wird.

Tab. 32: Wasserglas: Kontaktwinkel, Einzelmessungen und Mittelwerte

Messung Nr.	Wasserglas 30° C [°]	Wasserglas 40° C [°]
1	33,4	54,8
2	32,2	49,1
3	49,1	46,4
4	28,0	42,1
5	26,3	53,1
6	41,2	40,6
7	41,7	53,4
8	42,0	54,3
9	47,7	37,1
10	45,7	50,1
11	51,6	51,4
12	44,5	
13	46,6	
14	44,9	
15	47,2	
16	46,0	
Mittelwert	41,76	48,40

5 Injektionsversuche Sandstein

5.1 Motivation/ Zielstellung

Mit den nach der Literaturrecherche als geeignet zur Kontaktfugeninjektion erscheinenden Injektionsmaterialien wurden, neben den rheologischen Untersuchungen, auch Injektionsversuche an einem niedrig permeablen Sandstein durchgeführt. Das Ziel dieser Injektionsversuche war es, das Eindringverhalten der Injektionsmaterialien in poröse Medien näher zu beschreiben, und Informationen über die Porenradien zu erhalten, die mit dem Injektionsmaterialien injiziert werden können.

5.2 Aufbau des Versuches

5.2.1 Sandstein

Für die Injektionsversuche wurde eine niedrig permeabler Sandstein ausgewählt, dessen Permeabilität von $3,84 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ angegeben wurde[120]. Bei Permeabilitätsmessungen zur Auswertung der Injektionsversuche wurde festgestellt, dass die Permeabilität niedriger war (3 Messungen: $3,5\text{E-}16$ bis $5,8\text{E-}16 \text{ m}^2$). In **Tab. 33** werden die weiteren Materialkennwerte des verwendeten Sandsteins dargestellt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens VERA[77] zur Vergütung der Auflockerungszone im Salinar wurde mittels Oberflächenpackertests die Permeabilität der Auflockerungszone im Steinsalz ermittelt. Die hierbei gemessenen Permeabilitäten lagen zwischen $9,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$. Im Vorhaben CARLA[2] wurden an Kernen, die aus dem Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge entnommen wurden, ebenfalls Permeabilitätsmessungen durchgeführt, die Werte zwischen $1 \cdot 10^{-14}$ bis $5 \cdot 10^{-16}$ aufwiesen. Neben den aus den Bauwerken entnommenen Kernen, wurden im Vorhaben CARLA auch Permeabilitätstests mit Oberflächenpackern durchgeführt, bei denen Permeabilitäten zwischen $> 10^{-14} \text{ m}^2$ und $6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ermittelt wurden [2]. Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse wird die Permeabilität des Sandsteins als repräsentativ für die im Bereich der Kontaktfuge vorkommenden Permeabilitäten angesehen.

Tab. 33: Materialkennwerte des roten Wesersandsteins[120]

Materialkennwerte „Roter Wesersandstein Arholzen“ Solling Sandstein	
Eigenschaft	Wert
Rohdichte	2,42 g/cm ³
Druckfestigkeit	135 N/mm ²
Biegefestigkeit	21,3 N/mm ²
Luftpermeabilität	3,890 mD
Häufigste Porengröße	0,02-0,1 mm
Porosität	17,95 Vol.%

5.2.2 Injektionsmaterialien

Für die Injektion des Sandsteins wurden die gleichen Injektionsmaterialien verwendet wie für die rheologischen Untersuchungen. Bei der Injektion mit Ultrafin 12 die Rezeptur mit dem Wasser-/Zementwert von 1,4 und Leitungswasser zum Einsatz und bei der Injektion des Wasserglases musste ein Härtemittel zugegeben werden. Die Zugabe eines Härtemittels ist notwendig, da das Wasserglas sonst nicht aushärtet. Bei Injektionen im Salinar dienen gesättigte gesättigten Porenlösungen und das Salzgebirge als Härtemittel. Für die Wasserglas Injektionen stehen Ein- oder Zweiphasenverfahren zur Verfügung. Beim Einphasenverfahren wird das Wasserglas zusammen mit einem Härtemittel injiziert und es kommt zeitabhängig zur Erstarrung. Dieses wurde als repräsentativer für das Nachbilden der Wasserglasinjektion im Salinar erachtet, da beim Zweiphasenverfahren zuerst das Wasserglas und mit zeitlicher Verzögerung das Härtemittel injiziert wird. Beim Einphasenverfahren ist die Erstarrungszeit durch die Zugabe von unterschiedlich stark konzentrierten NaCl-haltigen Lösungen von wenigen Minuten bis zu einigen Stunden einstellbar. Die Erstarrungszeit muss so gewählt sein, dass es nicht während des Pumpprozesses zur Aushärtung des Wasserglases kommt. Wie in **Abb. 50** dargestellt, dauert die Gelbildung einige Zeit, dann allerdings kommt es zu einer deutlichen Viskositätserhöhung[74].

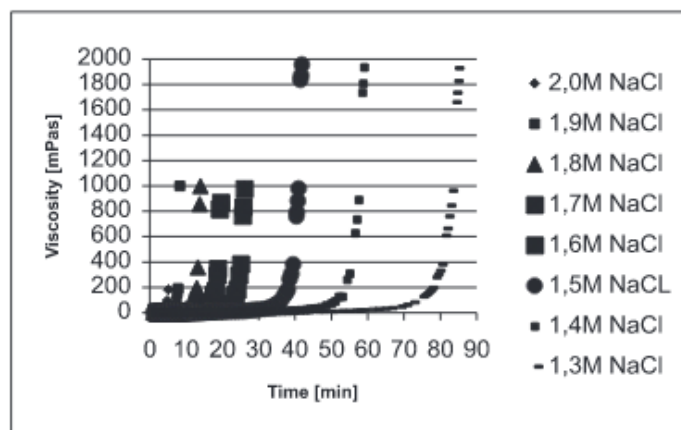


Abb. 50: Gelierzeiten von Wasserglas bei 8°C nach der Mischung mit NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen[83]

Um das Injizieren des Wasserglases ohne eine zu frühe Aushärtung zu erreichen, wurde eine 1,5 Molare NaCl-Lösung als Härtemittel verwendet, mit der es nach 35 bis 40 Minuten zu einem deutlichen Viskositätsanstieg und der Vergelung des Wasserglases kommt, was vorab in Laboruntersuchungen bestätigt werden konnte.

5.2.3 Injektionstechnik

Um gleiche Bedingungen für alle durchgeführten Injektionen sicherzustellen, wurden die Sandsteine vor der Injektion bis zur Gewichtskonstanz bei 105° C getrocknet. Die für die Injektion verwendeten Sandsteinblöcke waren Würfel mit einer Kantenlänge von 30 cm, bei

denen mittig in eine der Seiten ein 30 cm tiefes, bis zur gegenüberliegenden Seite reichendes Bohrloch erstellt wurde. Das Bohrloch hat einen Durchmesser von 18 mm, was dem Außendurchmesser der verwendeten Injektionsleitungen entsprach. Für die Injektionen wird die Injektionsleitung Intec Cem N verwendet, die bereits im Vorhaben CARLA erfolgreich zur Injektion der Kontaktfuge zum Einsatz kam. Diese Injektionsleitung kann zur Injektion von zementösen Substanzen, Bitumen und Wasserglas verwendet werden. Bevor die Injektionsleitung im Bohrloch verlegt werden konnte, wurde dieses mit Druckluft ausgeblasen, um Staub und kleine Gesteinsfragmente vom Bohren zu entfernen. Nachdem die Injektionsleitung im Bohrloch befand, wurden auf beiden Seiten der Injektionsleitung Schraubpacker ca. 4 bis 5 cm weit in die Injektionsleitung hineingedreht. In diesem Bereich kann kein Austritt des Injektionsmaterials erfolgen. Das heißt, dass nur 20-22 cm der Bohrlochlänge injiziert werden konnten. Außen auf dem Schraubpacker wurde anschließend auf beiden Seiten ein Anschlussstück montiert. Das Anschlussstück besitzt einen Schieber, mit dem die Durchlassöffnung geöffnet oder verschlossen werden kann. Der Aufbau (einseitig) ist in **Abb. 51** dargestellt. An das Anschlussstück kann die Injektionspumpe direkt angeschlossen werden. Für die Injektionen wurde die Handhebel Kolbenpumpe HP-60ZD der Firma Desoi verwendet.

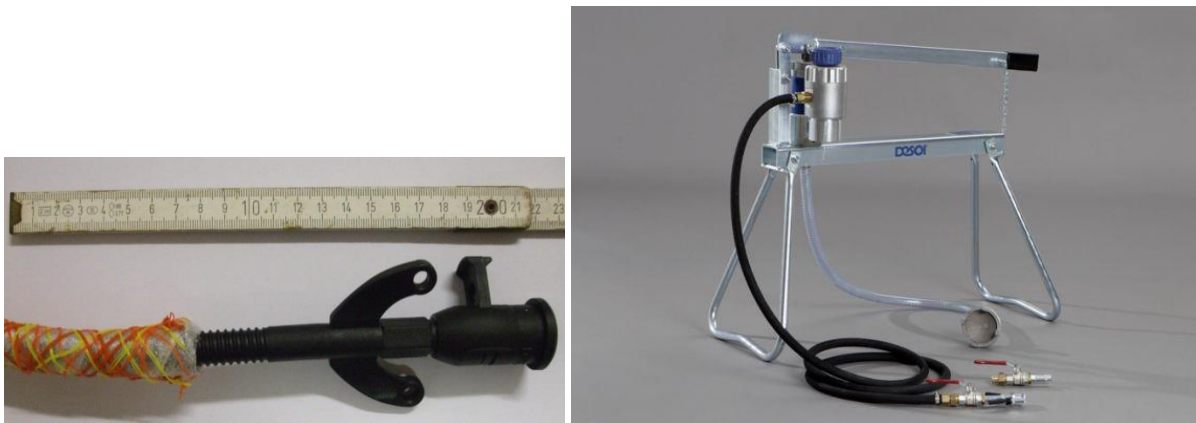


Abb. 51: Links: Aufbau der Injektionstechnik. Von links nach rechts: Injektionsleitung Intec Cem N, Schraubpacker, Anschlussstück für die Pumpe mit Schieber zum Verschließen. Rechts: Handhebelkolbenpumpe HP-60ZD der Firma Desoi

5.3 Versuchsdurchführung

5.3.1 Herstellung der Injektionsmaterialien

Die Injektionsmaterialien wurden gemäß den in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Rezepturen zusammengestellt und anschließend 5 Minuten mit einem auf einer Bohrmaschine aufgesetzten Rührer intensiv vermischt. Für jede Injektion wurden 3,5 Liter Injektionsmaterial hergestellt. Zwischen dem Vermischen und der Injektion wurde das Injektionsmaterial für 2 Minuten ruhen gelassen, damit untergerührte Luftbläschen entweichen konnten.

5.3.2 Ablauf der Injektion

Nach der zweiminütigen Ruhephase wurde das Injektionsmaterial in einen skalierten Messbecher gegeben und hieraus mit der Pumpe angesaugt, wodurch der Verbrauch an Injektionsmaterial verfolgt wurde. Zu Beginn der Injektion wurden beide Durchgangsöffnungen an den auf den Schraubpackern montierten Anschlussstücken geöffnet und an ein Anschlussstück wird die Pumpe angeschlossen und es wird mit dem Pumpen begonnen. Sobald auf der anderen Seite des Sandsteinblocks ein reiner Baustoffstrahl ohne Luftbläschen austrat wurde die Durchgangsöffnung auf dieser Seite verschlossen und es wurde mit dem Druckaufbau begonnen, wobei der Injektionsdruck von (2 MPa) über 25 Minuten gehalten wurde. Anschließend wurde die Durchlassöffnung des Anschlussstücks auf der Pumpenseite abgeschiebert und die Pumpe konnte abgenommen und gereinigt werden, ohne dass es in der Injektionsleitung zu einem Druckabfall kam.

Nach der Injektion wurden die Proben bis zur Auswertung im Trockenschrank bei 25° C gelagert.

5.3.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgte in drei Schritten. Im ersten Schritt wurde während der Injektion ein Injektionsprotokoll ausgefüllt, indem einige Informationen zur Injektion, wie z.B. das injizierte Volumen oder die Baustoff- und Lufttemperaturen notiert wurden. Zum anderen wurden aus den Steinen nach einer vierwöchigen Aushärtephase der Baustoffe 2 cm starke Platten herausgesägt, die, wie in **Abb. 52** dargestellt, in zwei verschiedenen Richtungen, die parallel zur Injektionsleitung verlaufen, entnommen wurden. Neben der optischen Auswertung der gesägten Platten wurde zusätzlich noch die Porenweitenverteilung der Sandsteine mittels Quecksilberdruckporosimetrie erfasst, um festzustellen, ob es durch die Injektion zu Veränderungen gekommen ist.

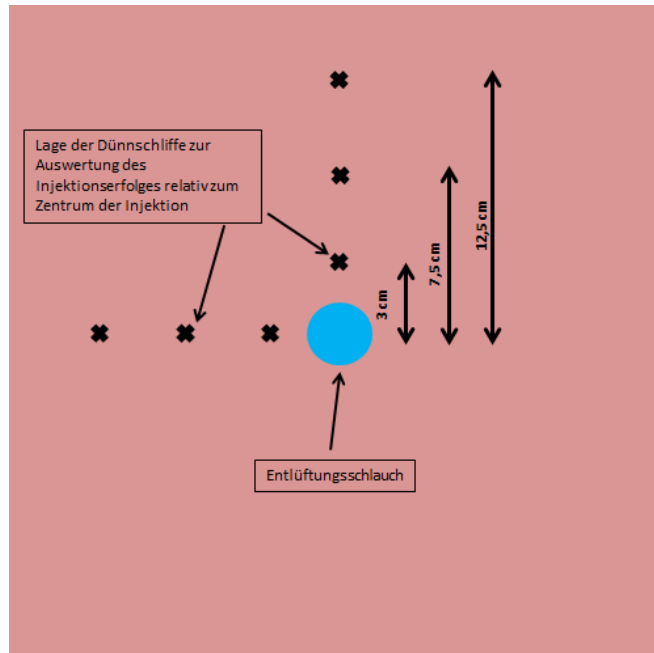


Abb. 52: Lage sowie Entfernung der Dünnschliffe zur Injektionsleitung zur Auswertung der Injektionsversuche

5.4 Vorstellung der Ergebnisse

5.4.1 Injiziertes Volumen

Mit dem Zweikomponentenbitumen sowie dem Harz Denepox 40 war es nicht möglich mit den vorhandenen Apparaturen sowie mit dem gewählten Aufbau eine Injektion erfolgreich durchzuführen. Der Ansaugschlauch der Injektionspumpe hat ein Sieb mit einer Maschenweite von 0,3 mm, welches bei der Injektion mit dem Bitumen immer wieder durch zu große Partikel verstopft wurde, wodurch kein Druckaufbau möglich war.

Für die Injektion mit dem Denepox 40 wurde eine spezielle Pumpe zur Injektion von Kunstharzen verwendet. Allerdings musste die Injektion infolge eines schadhafte Packers abgebrochen werden, bevor der maximale Injektionsdruck erreicht wurde. Bei den anderen Injektionsmaterialien wurden die in **Tab. 34** angegebenen Volumen injiziert.

Tab. 34: Volumen des in die Sandsteinblöcke injizierten Injektionsmaterials

Injektionsmaterialien	IM 4+	Ultrafin 12	Wasserglas
Injiziertes Volumen	820 ml	380 ml	410 ml

Bei den Injektionen mit Wasserglas und IM 4+ fiel auf, dass es auf den Stirnseiten des Sandsteins, in denen die Packer verschraubt waren, zu Austritten von Injektionsmaterial kam. Hierbei bildeten, sich wie in **Abb. 53** zu sehen im Verlauf der Injektion nach einigen Minuten 1 bis 4 mm große Kügelchen aus Baustoff auf der Oberfläche des Sandsteins.



Abb. 53: Austritte des Injektionsmaterials IM 4+ (rote Kreise) auf der Stirnseite des Sandsteins während der Injektion. Die Kantenlänge der Abbildung sind 10 cm.

5.4.2 Optische Auswertung

Die Auswertung der aus den Sandsteinblöcken herausgesägten Scheiben ergab keine Informationen hinsichtlich des Eindringverhaltens der Injektionsmaterialien in den Sandstein. Es war nicht möglich, die, wie im Fall des IM 4+, im Vergleich zum Sandstein sehr auffällig gefärbten Injektionsmaterialien mittels Mikroskop zu erkennen.

5.4.3 Hg-Porosimetrie

Da es mit der geplanten optischen Auswertung der gesägten Sandsteinplatten nicht möglich war, die Injektionsmaterialien zu erkennen, sollte mittels Hg-Porosimetrie über eine Veränderung in der Verteilung der Porenradialen eine Abschätzung zum Eindringverhalten der Injektionsmaterialien in den Sandstein erfolgen.

Bei der Quecksilber Porosimetrie wird die nicht benetzende Flüssigkeit Quecksilber unter Druck in das zu untersuchende Material intrudiert, wobei der Druck im Laufe der Messung erhöht wird. Während des Druckanstiegs wird das Volumen des in die Probe intrudierenden Quecksilbers gemessen. Hieraus kann anschließend mithilfe der Washburn Gleichung (vgl. Abschnitt "4.4 Grenzflächenspannung", die eine Zuordnung zwischen Druck und Porenradialen ermöglicht, die Porengrößenverteilung errechnet werden. Die Hg-Porosimetrie wurde bei Drücken bis 200 MPa mit den Geräten Pascal 140 und Pascal 240 der Firma ThermoFischer Scientific durchgeführt, wobei das Porosimeter Pascal 140 für die Intrusion bei geringem Druck und das Porosimeter Pascal 240 für die Messungen bei den höheren Drücken verwendet wurde. Anschließend wurden die Messdaten für die Auswertung kombiniert.

Aus jedem der drei Sandsteine wurden 4 Proben mit einer Kantenlänge von 7 mm für die Hg-Porosimetrie herausgesägt. Eine Kontrollprobe wurde am Rande des Sandsteinblocks entnommen, als Referenzwert für einen nicht injizierten Teil des Sandsteins. Die drei anderen Proben wurden direkt neben der Injektionsleitung gewonnen, mit einer Entfernung von 7,5 cm zu den Stirnseiten (Proben 7,5_1 und 7-5_2) sowie in der Mitte des Sandsteinblocks mit einer Entfernung von 15 cm zu beiden Stirnseiten.

Um einen Unterschied zwischen den Kontrollproben und den Proben, die im Kontakt mit der Injektionsleitung entnommen wurden, erkennen zu können, wurden alle drei Kontrollproben sowie jeweils die drei Messungen eines Sandsteinblocks in einem Diagramm übereinandergelegt. In **Abb. 54** sind beispielhaft die Verläufe der drei Messungen des mit dem IM 4+ injizierten Sandsteins sowie die drei Kontrollmessungen abgebildet. Hierbei lässt sich erkennen, dass die Unterschiede zwischen den drei Kontrollmessungen größer sind als die Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen des mit IM 4+ injizierten Sandsteinblocks. Mit einer Ausnahme verhält es sich ebenso mit den Messungen, der mit dem Wasserglas und Ultrafin 12 injizierten Blöcke. Die dazugehörigen Diagramme sind im Anhang dargestellt.

Der Verlauf der Porenweitenverteilung der Probe 7,5_2 des mit Ultrafin 12 injizierten Blocks weist im Bereich zwischen 2000 und 20000 nm Porenweite einen anderen Verlauf auf, als die restlichen Proben. Es lässt sich über den genannten Porenweitenbereich keine Zunahme des Porenvolumens feststellen, wodurch sich die Porenweitenverteilung der Probe in dem genannten Bereich unterhalb derer der Kontrollproben liegt. Dieses Verhalten erscheint unrealistisch für einen Sandstein und wird als Fehler bei der Messung interpretiert und wird nicht auf eine Injektion des genannten Porenbereichs zurückgeführt. Auf die weitere Auswertung des Versuchs mittels Permeabilitätsmessungen wird im Abschnitt „4.2 Vergütungs-/ Injektionsregime“ detaillierter eingegangen.

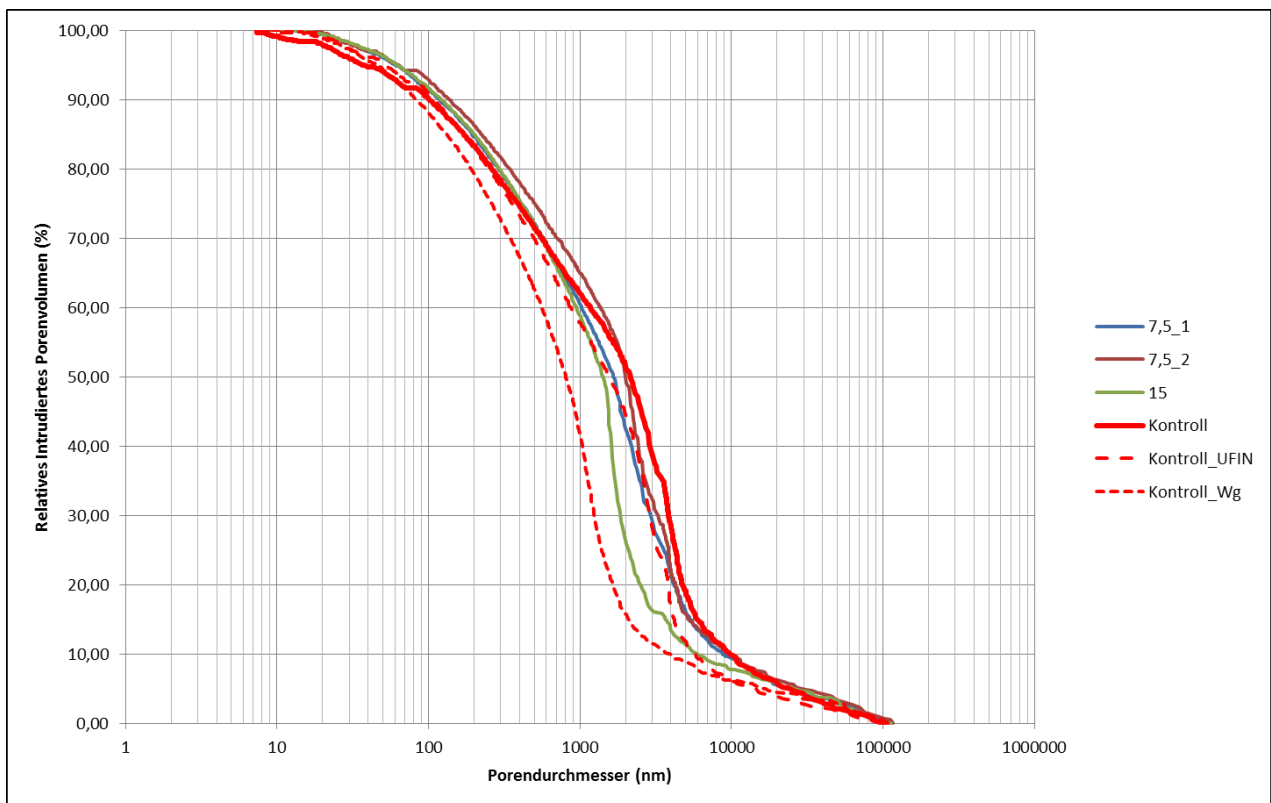


Abb. 54: Porengrößenverteilungen der drei Messungen entlang der Injektionsleitung des mit IM 4+ injizierten Sandsteinblocks (7,5_1 / 7,5_2 /15) sowie die Kontrollmessungen der nicht injizierten Bereiche der drei Sandsteinblöcke.

5.5 Interpretation

Weder bei der optischen Betrachtung der injizierten Sandsteinblöcke noch bei der Quecksilberdruckporosimetrie lässt sich ein Eindringen des Injektionsmaterials in die Poren des Sandsteins feststellen. Jedoch wurden in alle drei Sandsteinblöcke zwischen 410 und 820 ml injiziert und im Verlauf der Injektionen mit Wasserglas und IM 4+ konnte auf den Stirnseiten des Sandsteins beobachtet werden, wie es zu Austritten von Baustoff kam. Es lässt sich festhalten, dass die Sandsteine injiziert werden konnten und eine teilweise Durchströmung mit Baustoff stattfand, diese jedoch entlang diskreter Migrationspfade stattfand, die sich mit den ausgewählten Auswerteverfahren nicht nachvollziehen ließen.

Die Durchströmung von Sedimenten oder Sedimentgesteinen mit Fluiden ist ein Thema, das in der Geologie, insbesondere in Bezug auf Migrationsprozesse von Kohlenwasserstoffen untersucht wurde. Hierzu wurden zahlreiche [121 bis 123] Untersuchungen durchgeführt, die aufzeigen, dass der Fluidtransport nicht flächig sondern entlang diskreter Fließpfade stattfindet.

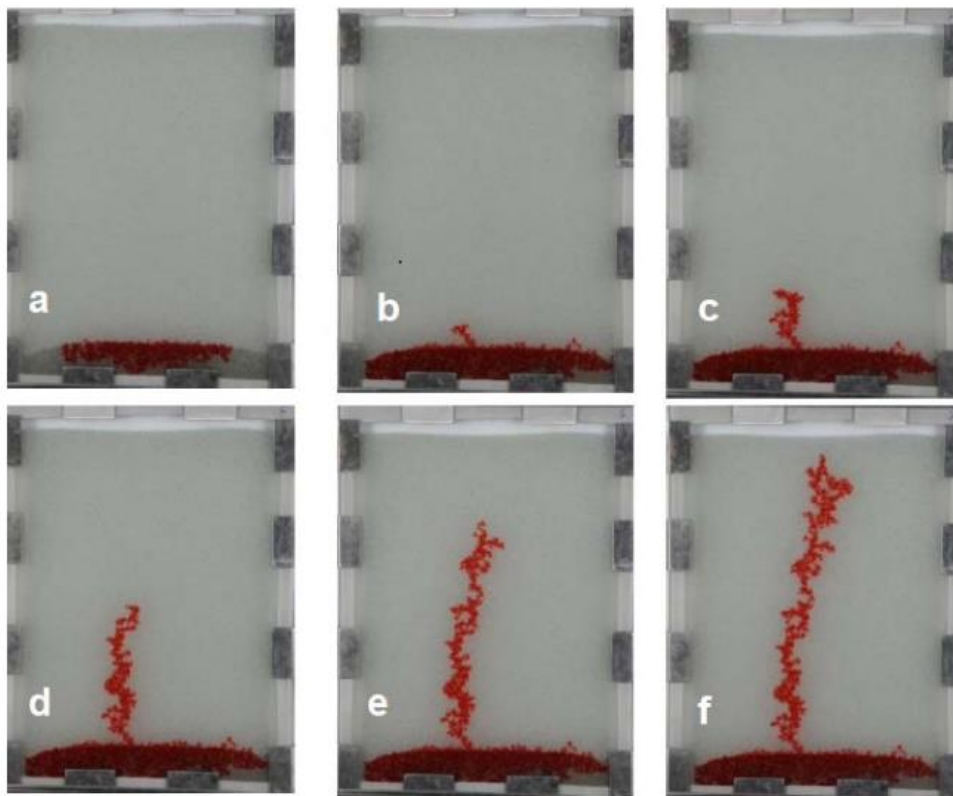


Abb. 55: Durchströmungsversuche von Glasperlen mit einer gefärbten Flüssigkeit. Selbst bei der gleichmäßigen Anströmung der oberen Schicht kommt es lediglich zur Ausbildung eines diskreten Fließpfades [123]

In **Abb. 55** ist ein Durchströmungsversuch mit einer gefärbten Flüssigkeit und Glasperlen gezeigt. Hierbei wurden Glasperlen mit zwei verschiedenen Durchmessern (1,5-2,0 und 0,8-1,0 mm) in ein Plexiglasrohr gefüllt. Die Perlen mit den größeren Durchmessern befinden sich im

unteren Bereich des Gefäßes und oben sind die Perlen mit dem geringeren Durchmesser. Aufgrund der niedrigeren Permeabilität der Schicht mit den kleinen Glasperlen wird die aufsteigende Flüssigkeit aufgestaut und die Porenräume zwischen den großen Glasperlen sind vollständig gefüllt. Folglich findet eine Anströmung der Schicht aus kleinen Glasperlen auf einer großen Fläche statt. In Bild b ist zu sehen, wie es initial zur Ausbildung mehrerer Migrationspfade kommt, die dann aber nicht weiter ausgebildet werden sobald sich einer der Migrationspfade über eine gewissen Mindestlänge ausgebildet hat (Bilder c bis f).

Ähnlich wird auch die Durchströmung des Sandsteins stattgefunden haben. Aufgrund der wenigen isolierten Migrationspfade war es nicht möglich diese mit der gewählten Auswertetechnik (Permeabilitätsmessungen, Quecksilberporosimetrie und mikroskopische Untersuchungen) ausfindig zu machen, obwohl sie zweifelsohne existent waren.

6 Probenkörper Salz

Um die im Labor charakterisierten Injektionsmaterialien näher zu untersuchen wurden Probenkörper hergestellt, die den Kontaktbereich zwischen dem Beton des Streckenverschlussbauwerks und dem Salzgebirge repräsentieren. Insbesondere im Firstbereich kann es, aufgrund des Schwindens von Beton beim Abbinden, zur Ausbildung einer Kontaktfuge kommen. Die Kontaktfuge entsteht, wenn der Beton infolge von autogenem oder thermischem Schwinden sein Volumen verringert, wodurch im Kontaktbereich zwischen Baustoff/Gebirge Zugspannungen aufgebaut werden. Sobald diese die Haftzugfestigkeit zwischen Beton und Salz überschreiten, kommt es zur Bildung eines Risses in diesem Bereich, der als Kontaktfuge bezeichnet wird. Da Zugspannungen maßgeblich zur Bildung der Kontaktfuge beitragen, wurden durch das Aufbringen von Zugspannungen im Spaltzugversuch im Labormaßstab Probenkörper hergestellt, in die die laborativ charakterisierten Baustoffe injiziert werden konnten.

6.1 Herstellung der Probenkörper

Um die Probenkörper herstellen zu können wurden in Bernburg im Steinsalzbergwerk der ESCO Salt Bohrkern mit einem Durchmesser von 215 mm entnommen. Das Salz hat einen NaCl-Gehalt von 99,8 % und hat eine mittel- bis grobspätige Struktur mit einer mittleren Kristallgröße zwischen einem und zwei Zentimetern.

Nach der Entnahme wurden die Kerne bei 20° C im Trockenschrank gelagert und per Spaltzugversuch der Länge nach halbiert. Anschließend wurde entlang der Bruchkante ein 2 cm breiter und ca. 1 cm tiefer Kanal der Länge nach in den Kern gesägt, indem später die Injektionsleitung verläuft (**Abb. 56**). Als Schalung zum Betonieren wurde ein Kunststoffrohr mit einem Innendurchmesser von 215 mm verwendet, auf beiden Stirnseiten mit einer Pressspanplatte geschlossen und mit Silikon abgedichtet.



Abb. 56: Links: Halbierter Salzkern mit gesägtem Kanal. Mitte: In der Verschalung fixierte Injektionsleitung. Rechts: Halbierter Salzkern mit der im Kanal verlegten Injektionsleitung während des Gießens des Betons

Nachdem die Schalung zusammengebaut wurde wird die Injektionsleitung in einer Bohrung in der unteren Pressspanplatte verklebt. Anschließend wurde in das Rohr eine 2 cm mächtige Betonschicht eingefüllt, auf der dann der halbierte Salzkern so platziert wurde, dass die Injektionsleitung über die gesamte Länge des Kerns Kontakt mit dem Salz hat. Hierbei hat der Kanal sicherstellt, dass die Injektionsleitung bei der Probenherstellung nicht vollständig vom Beton umschlossen wurde und somit nach dem Spaltzugversuch der Kontaktbereich nicht injizierbar war. In **Abb. 57** ist eine Nahaufnahme der Injektionsleitung im Kontaktbereich Beton/Salz dargestellt. Sie zeigt, dass der Kontaktbereich an die Injektionsleitung angebunden ist. Zusätzlich zur Unterseite wurde auch auf der Oberseite über den kompletten Rohrquerschnitt eine 2 cm mächtige Betonlage gegossen. Die Betonschichten auf beiden Stirnseiten ermöglichen das Anbringen der Schraubpacker mit denen die Injektionsleitung an die Pumpe angeschlossen wird.



Abb. 57: Anbindung der Injektionsleitung an den Kontaktbereich zwischen Beton und Salzkern

Zur Herstellung der Probenkörper kamen zwei verschiedene Betonsorten zum Einsatz. Zum einen wurde der Salzbeton, der im ERAM zur bergbaulichen Gefahrenabwehrmaßnahme (bGZ) Zentralteil eingesetzt bGZ-Salzbeton verwendet und zum anderen der Magnesiabinder MB10. Der bGZ-Salzbeton wurde im ERAM als Nachfolger für den Salzbeton M2 eingesetzt, da die zur Herstellung benötigte Steinkohlenflugasche nicht mehr verfügbar war. Zum bGZ-Beton liegen keine so detaillierten Informationen vor, wie zum Salzbeton M2, weswegen dieser als repräsentatives Vergleichsmaterial bei der Betrachtung der Schwindprozesse betrachtet wurde. Es lässt sich festhalten, dass sowohl der Magnesiabinder MB10 als auch der bGZ-Salzbeton bereits großmaßstäblich zur Herstellung von Streckenverschlüssen oder Versuchsbauwerken verwendet wurden und sich dabei als geeignete Baumaterialien herausgestellt haben. Die verwendeten Rezepturen sind in **Tab. 35** und **Tab. 36** angegeben.

Tab. 35: Rezeptur für 1 m³ des bGZ-Salzbetons

Gesteinskörnung				Zement		"Wasser"					Zusatzstoff	
Steinsalzzuschlag		Natursand 0/2		CEMIII/B 32,5 N-LH/HS/NA		Frischwasser		NaCl-Lösung		Gesamt-	Kalksteinmehl	
Zielitz		Rogätz		Holcim				(Restwasser)		wasser	Schwenk, Bernburg	
Dichte	Masse, tr.	Dichte	Masse, tr.	Dichte	Masse, tr.	Dichte	Masse	Dichte	Masse	Masse	Dichte	Masse, tr.
[kg/dm ³]	[kg]	[kg/dm ³]	[kg]	[kg/dm ³]	[kg]	[kg/dm ³]	[kg]	[kg/dm ³]	[kg]	[kg]	[kg/dm ³]	[kg]
2,16	770	2,64	307	3,05	328	1,00	165	1,20	150	315	2,74	328

Tab. 36: Rezeptur des Magnesiabinders MB10

Silikatischer Zuschlag	Bindemittel	Anmachlösung
Körnung 0-8 mm	Kaustischens MgO Styromag G75	R-Lösung
63,4 Gew. %	18,3 Gew. %	18,3 Gew. %

6.2 Spaltzugversuche

Die Herstellung der künstlichen Kontaktfuge erfolgte durch die Schädigung der Proben im Kontaktbereich zwischen MgO-Beton beziehungsweise Salzbeton und Salz mit einem Spaltzugversuch nach DIN EN 12390-6. Bei dem Spaltzugversuch wurde die zylindrische Probe mit dem Kontaktbereich zwischen Salz und Beton senkrecht zu den Lasteintragsplatten in eine Druckprüfmaschine eingespannt (**Abb. 58**).

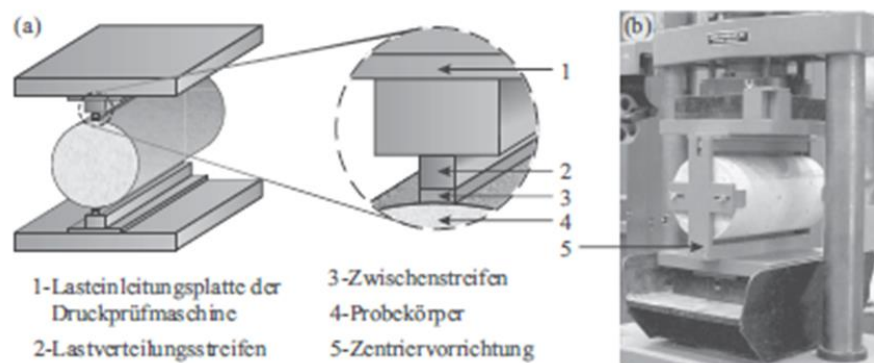


Abb. 58: Schematische Darstellung des Spaltzugversuchs nach DIN EN 12390-6[124]

Die Krafteinleitung auf die Probe erfolgt mittels zwei Lastverteilungstreifen. Die Lastverteilungstreifen müssen nach DIN aus einer Hartfaserplatte mit einer Dichte von über 900 kg/m³ bestehen, die eine Breite von 10 ± 1 mm und Dicke von 4 ± 1 mm besitzen. Die Länge muss so gewählt werden, dass die Länge der Hartfaserplatten die Länge der Probe übersteigt[124]. Durch die Ausübung einer Kraft auf die Probe über die beiden Lasteinleitungsplatten kommt es im Zentralteil der Probe zur Ausbildung von Zugspannungen, die, wie in **Abb. 59** dargestellt zu einem Versagen der Probe senkrecht zu den Lasteintragsplatten führt.

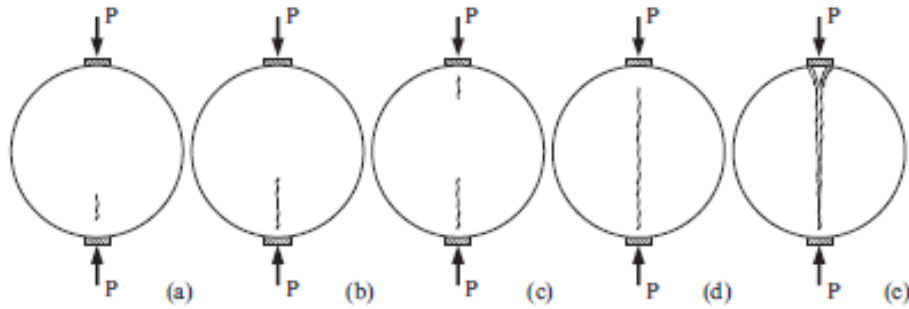


Abb. 59: Rissentwicklung im Spaltzugversuch nach Castro-Montero[125]

Um ein Auseinanderbrechen der Probe beim Spaltzugversuch zu verhindern wurde diese vor Beginn des Versuchs mit einem Schrumpfschlauch ummantelt. Der Spaltzugversuch wurde abgebrochen, sobald an einer der beiden Stirnseiten eine Schädigung der Probe sichtbar ist. Wichtig für den Spaltzugversuch ist der Zeitpunkt der Probenschädigung in Bezug auf das Betonalter. Wie in **Abb. 60** zu erkennen ist, findet das höchste Schwindmaß im Salzbeton M2 während der ersten 40 Tage nach der Herstellung des Baustoffes statt. Zu diesem Zeitpunkt hat die Zugfestigkeit des Betons, die proportional zur Druckfestigkeit ist, noch nicht ihren Maximalwert erreicht. Daher wird davon ausgegangen, dass es im Zeitraum zwischen 10 und 40 Tagen nach der Herstellung des Baustoffes zur Ausbildung der Kontaktfuge infolge der Überschreitung der Zugfestigkeit im Kontaktbereich zwischen Beton und Salz kommt.

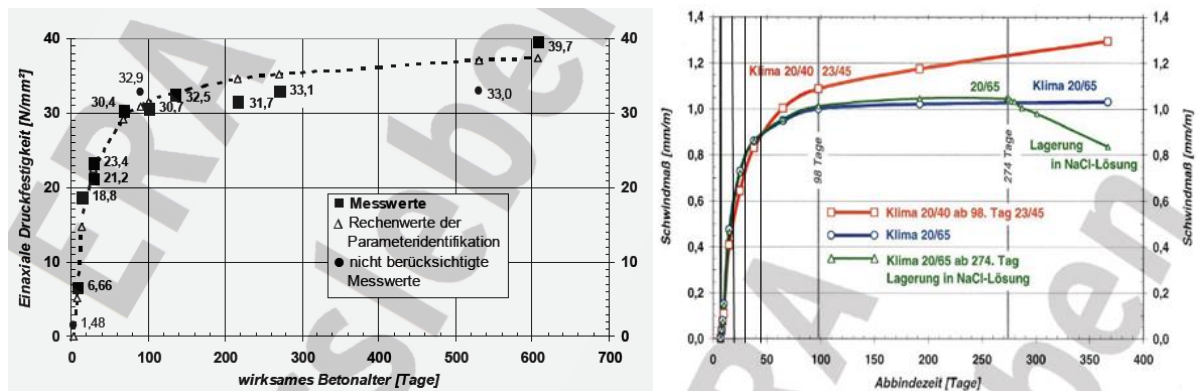


Abb. 60: Links: Einaxiale Druckfestigkeit des Salzbetons M2 in Abhängigkeit des wirksamen Betonalters. Rechts: Schwinden des Salzbetons M2 in mm/m in Abhängigkeit der Abbindezeit des Betons. Die 4 senkrechten schwarzen Linien auf der linken Seite der rechten Abbildung stellen die Zeitpunkte 10, 20, 30 sowie 40 Tage nach dem Beginn der Abbindezeit dar[98]. Bei 20° C entspricht das wirksame Betonalter der Abbindezeit

In Vorversuchen wurde herausgefunden, dass Proben des Salzbetons M2 nach einer Abbindedauer von 14 Tagen bei einer Raumtemperatur zwischen 20 und 25°C im Spaltzugversuch geschädigt werden können (ca. 14 Tage wirksames Betonalter) und es hierbei zur Trennung von Salz und Salzbeton kommt. **Abb. 61** zeigt Aufnahmen der erzeugten Kontaktfuge. Zu erkennen ist eine ganz scharfe Trennung der beiden Baustoffe. Die zwischen dem Salzbeton (in den Aufnahmen links oben) und dem Steinsalz befindliche Kontaktfuge ist in

den beiden Aufnahmen mit dem bei der Präparation der Proben zur Stabilisierung verwendeten Harz Araldite gefüllt.

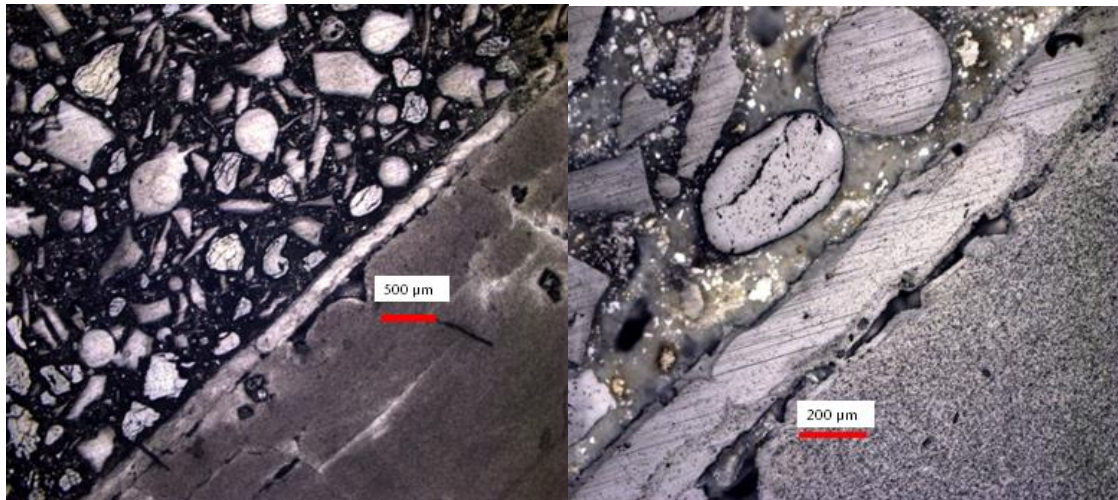


Abb. 61: Auflichtmikroskopie des im Spaltzugversuch geschädigten Kontaktbereich zwischen Salzbeton M2 und Steinsalz. Beide Aufnahmen zeigen den gleichen Schliff in unterschiedlicher Vergrößerung. Links oben ist der Salzbeton und rechts unten das Steinsalz. Die diagonal durch das Bildverlaufende Zone dazwischen ist die hergestellte Kontaktfuge, die zur Stabilisierung bei der Probenpräparation mit Araldite aufgefüllt wurde

Im weiteren Verlauf wurden 2 Probenkörper aus Salzbeton und 6 aus Magnesiabinder im Spaltzugversuch geschädigt. Während der Spaltzugversuche wurde mittels eines auf der Stirnseite der Probe befestigten Messschiebers die Öffnungsweite des sich bildenden Risses während des Spaltzugversuchs erfasst, und sobald 150 µm erreicht waren, wurde der Versuch abgebrochen.

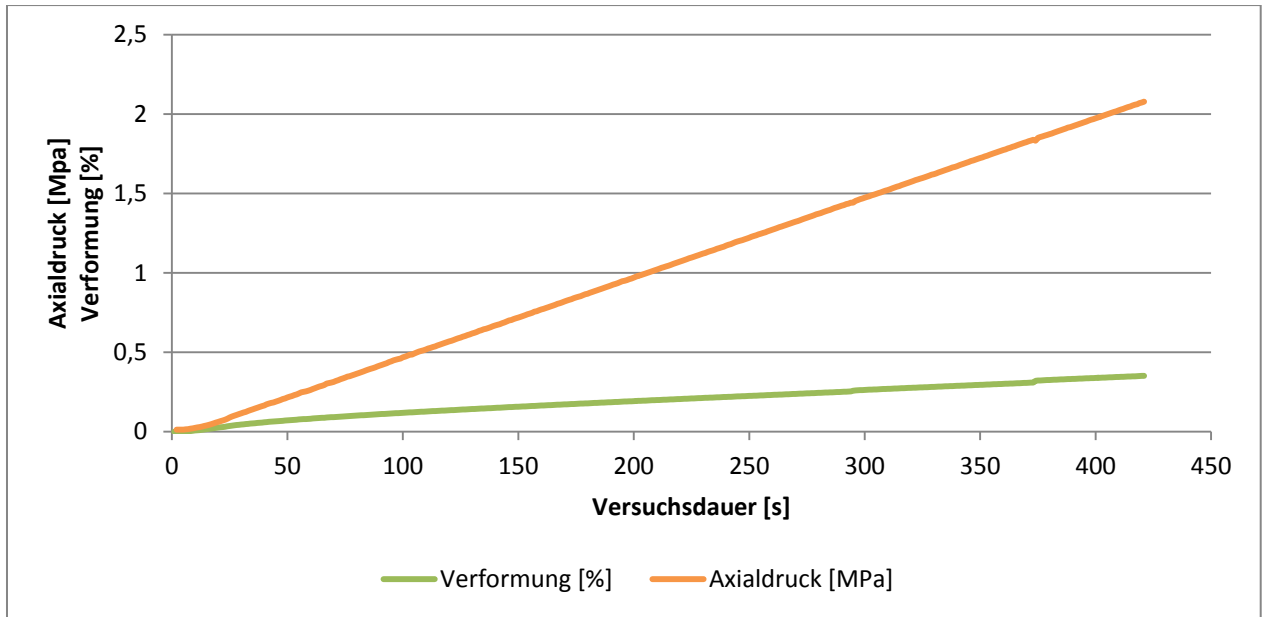


Abb. 62: Verformung und Axialdruck abgetragen gegen die Zeit beim Spaltzugversuch des Magnesiabetons MB10 nach 14 Tagen Abbindedauer

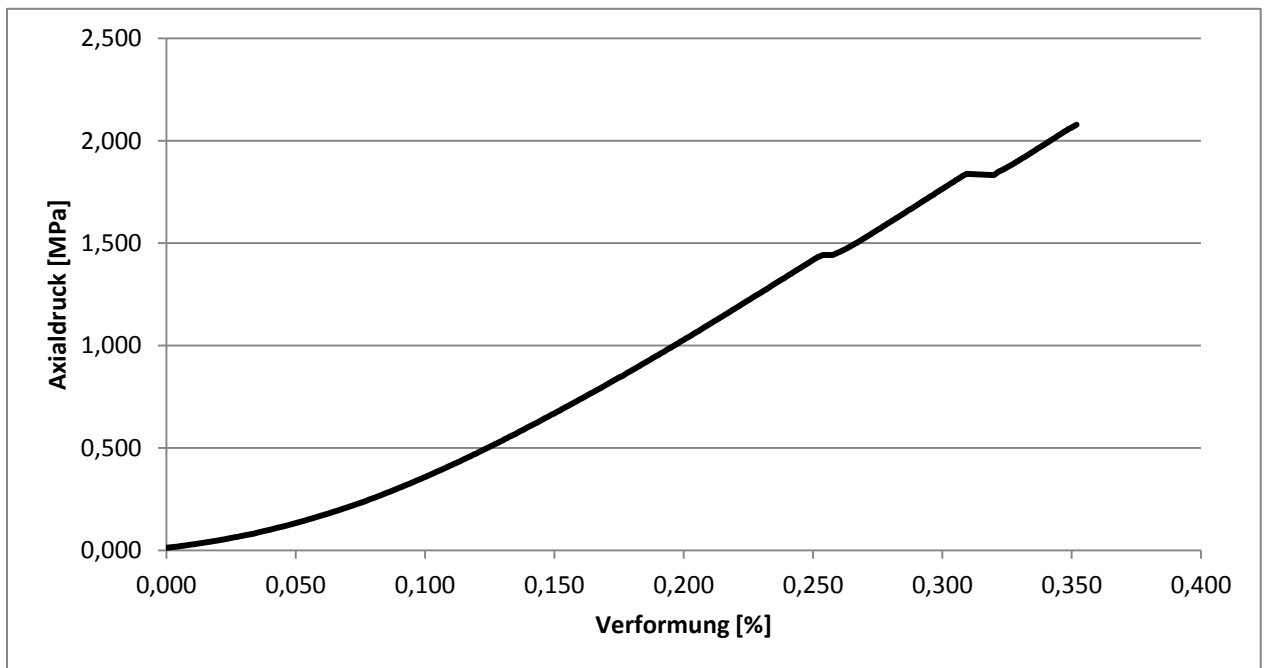


Abb. 63: Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung über die gesamte Messdauer des Spaltzugversuchs mit dem Magnesiabeton MB10 nach 14 Tagen Abbindedauer

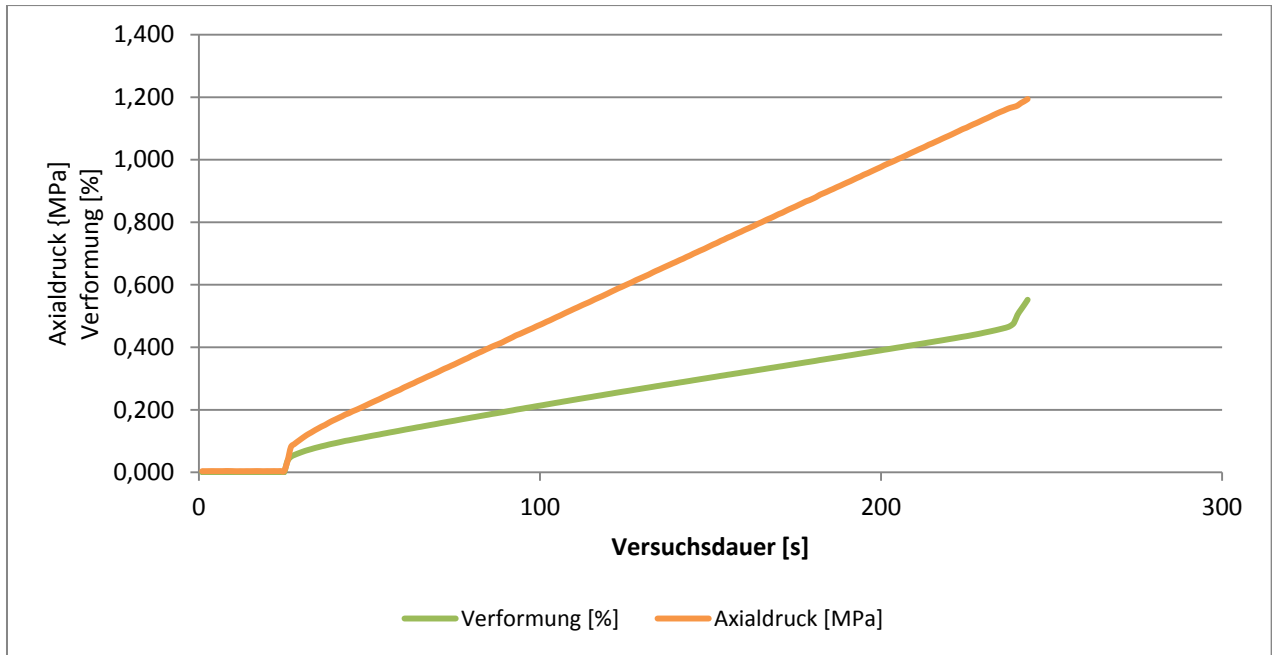


Abb. 64: Verformung und Axialdruck abgetragen gegen die Zeit beim Spaltzugversuch des bGZ-Salzbeton nach 14 Tagen Abbindedauer

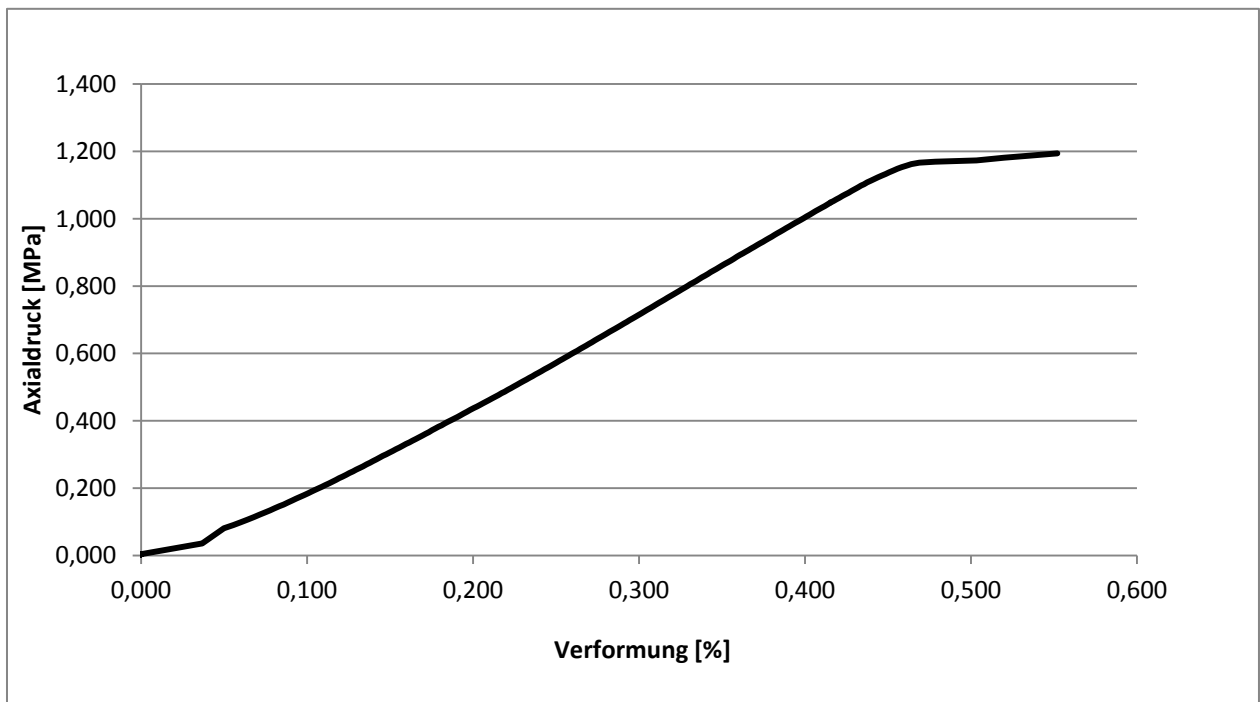


Abb. 65: Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung über die gesamte Messdauer des Spaltzugversuchs mit dem bGZ-Salzbeton nach 14 Tagen Abbindedauer.

Die beiden verwendeten Betonsorten wiesen ein unterschiedliches Verhalten im Spaltzugversuch auf. Zur Verdeutlichung sind in **Abb. 62** bis **Abb. 65** die Verläufe der Spaltzugversuche jeweils eines Probenkörpers für den Magnesiabinder MB10 und den bGZ-Salzbeton dargestellt. Der Magnesiabeton weist eine höhere Spaltzugfestigkeit auf als die mit

dem Salzbeton hergestellten Probenkörper. Auch das Bruchverhalten der beiden Baustoffe unterscheidet sich. Bei den mit Salzbeton hergestellten Probenkörpern tritt während der Schlussphase des Spaltzugversuchs eine stärkere Verformung auf und am Messschieber ist eine kontinuierliche Zunahme der Spaltöffnungsweite abzulesen. Die Zunahme der Rissweite beim Magnesiabeton ist sprunghaft, was sich sehr gut in Abb. 34 erkennen lässt. Bei einer Probe kam es zur Bildung eines Risses mit einer Öffnungsweite von 880 μm . Daher wurden zusätzlich Spaltzugversuche mit MB10 Proben mit einer Abbindezeit von 5 Tagen hergestellt. Bei diesen Proben konnte ein kontinuierlicher Anstieg der gemessenen Rissweite beobachtet werden. In **Abb. 66** ist das Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung für eine Probe aufgetragen, wo sich gegen Ende des Versuchs das Verhalten bei der Bildung der Kontaktfuge zeigt.

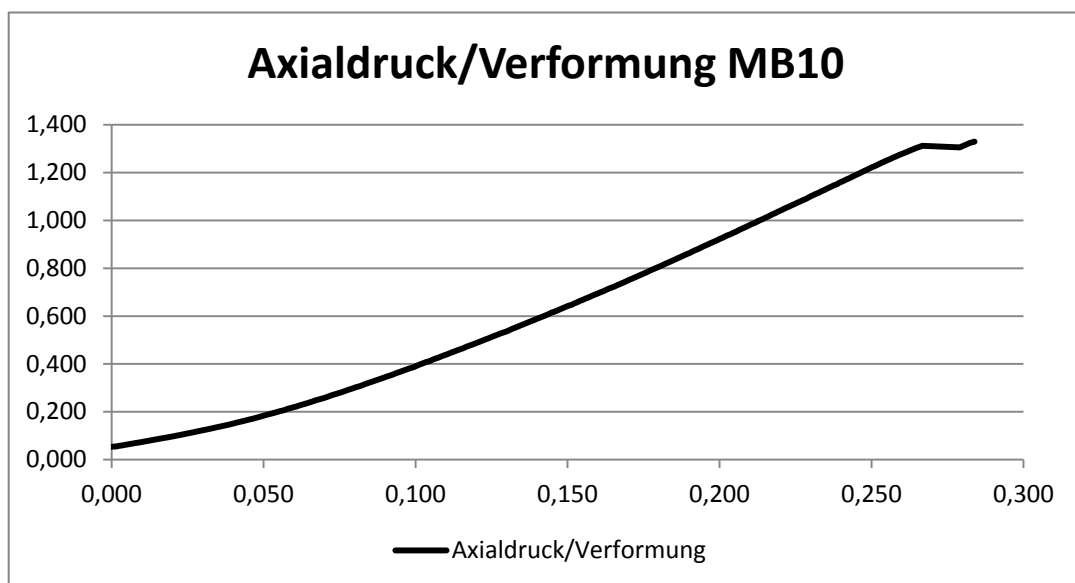


Abb. 66: Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung über die gesamte Messdauer des Spaltzugversuchs mit dem Magnesiabeton MB10 nach 5 Tagen Abbindedauer

Bei beiden Betonsorten schließen sich die während des Spaltzugversuchs auf der Stirnseite entstandenen Risse unter Entspannung wieder. Es wird angenommen, dass es im Laufe der Injektion zur erneuten Öffnung der Risse durch den Injektionsdruck kommt. Um zu sehen, was während einer Injektion mit der Rissweite passiert, wurde eine Probe MB10 nach dem ersten Spaltzugversuch, bei dem eine Rissweite von 150 μm erreicht wurde, erneut geschädigt. Dieser Kurvenverlauf ist in **Abb. 67** dargestellt. Am Messschieber ließ sich eine kontinuierliche Zunahme der Spaltöffnungsweite messen und es kam zu keiner weiteren Schädigung der Probe. Daher wird für die Injektionen, die bei einer definierten Spaltöffnungsweite stattfinden sollen, vorgeschlagen als Injektionsdruck den Maximaldruck, der im Spaltzugversuch erreicht wurde, anzuwenden.

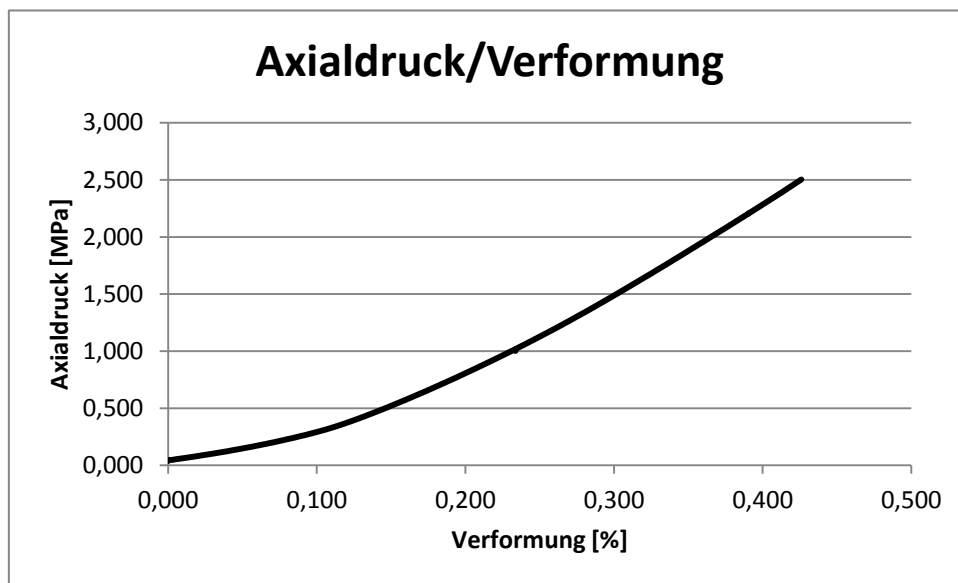


Abb. 67: Verhältnis zwischen Axialdruck und Verformung über die gesamte Messdauer des zweiten Spaltzugversuchs mit dem Magnesiabinder MB10

7 Bewertung der Injektionsmaterialien

7.1 Gewichtung der Anforderungen und Darstellung des Bewertungssystems

Eine Möglichkeit eine Entscheidungsfindung unter der Berücksichtigung quantitativer und qualitativer Kriterien durchzuführen stellt die Nutzwertanalyse dar. Hierbei werden die zu vergleichenden Materialien bezüglich unterschiedlicher Unterziele mit einem Punktebewertungsverfahren bewertet. Dazu werden Eingangs die Unterziele gewichtet und anschließend erfolgt für jedes Unterziel eine Bewertung der Materialien mittels Punktevergabe. Abschließend werden die Punkte aufsummiert.

Zu Beginn der Nutzwertanalyse, mit der die Bewertung der Injektionsmaterialien durchgeführt wurde wurden die im Kapitel „1.5 Anforderungen Injektionsmaterialien“ formulierten Anforderungen und Unterziele hinsichtlich Ihrer Wichtigkeit sortiert. Die Begründungen für die gewählte Rangfolge der Wichtigkeit wird in Tab. 37 erläutert. Das Ziel der Nutzwertanalyse ist es, die Injektionsmaterialien hinsichtlich Ihrer Eignung in Risse mit geringen Öffnungsweiten im Kontaktbereich zwischen Steinsalz und den Baustoff des Streckenverschlussbauwerks einzudringen, zu bewerten. Um die Sortierung der einzelnen Unterziele nach Ihrer Wichtigkeit vorzunehmen, wird aufgrund der großen Anzahl an Unterzielen (13), die eine direkte Wertung sehr erschwert, zuerst eine Wertung der Anforderungen hinsichtlich ihrer Wichtigkeit vorgenommen und anschließend werden in jeder Anforderung die einzelnen Unterziele ihrer Wichtigkeit nach sortiert.

Die Injektionsmaterialien, die in der auf dieser Bewertungsmatrix aufbauenden Nutzwertanalyse bewertet werden, haben die in Kapitel „1.5 Anforderungen Injektionsmaterialien“ genannten Ausschlusskriterien (Transport- und Lagerfähigkeit, Zulassung nach GesBergV, Verarbeitbarkeit, Partikelgröße unter 30 μm sowie die Beständigkeit gegenüber salinaren Lösungen) im Wesentlichen erfüllt. Einzelne Injektionsmaterialien erfüllen ein Ausschlusskriterium nicht oder nur teilweise, werden aufgrund Ihrer weiteren Vorteilhaften Eigenschaften berücksichtigt. Beispiele hierfür wären, das 2K-Bitumen das eine größere Partikelgröße aufweist, jedoch trotzdem ausgewählt wurde da es in anderen Forschungsvorhaben trotzdem gelang sehr feine Wegsamkeiten zu injizieren. Dies gilt ebenso für das Denepox 40 für das sich die Beständigkeit im salinaren Milieu nur für begrenzte Zeiträume aufzeigen lässt, jedoch vorteilhafte rheologische und mechanische Eigenschaften aufweist.

Die Wertung der Wichtigkeit erfolgte hinsichtlich der Aufgabenstellung der Injektionsmaterialien. Die Injektionsmaterialien sollen zur Abdichtung von Rissen im Kontaktbereich zwischen einem Streckenverschlussbauwerk aus hydraulisch abbindenden Baustoffen und dem Salzgebirge in Risse mit Öffnungsweiten unter 150 μm verpresst werden, um die geforderte integrale Permeabilität des Streckenverschlussbauwerks zu erreichen.

Da für das Eindringen der Injektionsmaterialien in Risse mit solch geringen Öffnungsweiten ein sehr gut fließfähiges Injektionsmaterialien benötigt wird, ist die Rheologie die wichtigste Anforderung, gefolgt von den als gleichwertig betrachteten chemischen, hydraulischen und mechanischen Anforderungen. Die mechanischen Eigenschaften der Injektionsmaterialien haben eine hohe Bedeutung für die Abdichtung der Kontaktfuge nach dem Aushärten der Injektionsmaterialien und besonders hinsichtlich der Erhaltung der geringen Durchlässigkeit unter Beanspruchung. Als unbedeutendste der fünf Anforderungen wird die Handhabung betrachtet. Die Reihenfolge der Unterziele wird in Tab. 37 dargestellt und begründet.

Diese Zur Gewichtung der Unterziele der Anforderungen wurden diese in Tab. 38 in eine Halbmatrix eingetragen. Beginnend in Zeile 1 mit dem Unterziel Dynamische Viskosität wird für alle Zeilen (Unterziele 1 bis 13) jeweils eine Wertung vorgenommen, welches Unterziel wichtiger ist. Wenn das Zeilenziel wichtiger ist als das Spaltenziel wird die Nummer der Zeile in das jeweilige Feld eingetragen und falls das Spaltenziel wichtiger ist, wird die Nummer der Spalte in das Feld eingetragen. Wenn zwei Kriterien als gleichwertig betrachtet werden wird das jeweilige Feld leer gelassen. Nach den paarweisen Gegenüberstellungen wird gezählt, wie oft jedes Kriterium in der Halbmatrix vorkommt und diese Anzahl wird im Feld Absolut eingetragen[126].

Tab. 37: Übersicht über die Wichtigkeit die den einzelnen Anforderungen und Unterzielen als Basis für die Berechnung der Zielgewichte der Nutzwertanalyse herangezogen wird.

Wichtigkeit der Anforderungen		Unterziele	Begründung der Unterziele pro Kategorie	
1	Rheologie	A) Dynamische Viskosität	Die Dynamische Viskosität wird als wichtigstes Unterziel betrachtet, da Sie direkt eine Information über die Fließfähigkeit des Injektionsmaterials liefert.	
		B) Partikelgrößenverteilung	Die Partikelgrößenverteilung bzw. die größten vorkommenden Partikel bei den partikelgestützten Injektionsmaterialien haben einen Einfluss auf das Eindringverhalten in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten. Aufgrund des KO-Kriteriums von einer Korngröße von < 30 µm wird die Partikelgröße der Viskosität <u>nachgestellt, da dieses sicherstellt, dass die Partikel des Injektionsmaterials nicht zu groß sind für die Injektion von Wegsamkeiten mit unter 150 µm Öffnungsweite.</u>	
		C) Topfzeit	Die Topfzeit gibt an, über welchen Zeitraum ein Injektionsmaterialien verarbeitbar ist. Innerhalb dieses Zeitraums kann es durch Veränderung der rheologischen Eigenschaften, allen voran der Viskosität zur deutlichen Verschlechterung der Fließfähigkeit kommen und wird daher von höherer Bedeutung gesehen als die Oberflächenspannung oder der Kontaktwinkel.	
		D) Oberflächenspannung	Die Oberflächenspannung eines Fluides ermöglicht eine Aussage über dessen Benetzbarkeit, wobei besser benetzende Flüssigkeiten einfacher in Poröse Medien eindringen können. Jedoch werden die Viskosität und Partikelgrößenverteilung als wichtigere Ziele gesehen.	
		E) Kontakt-winkel	Über die Washburn Gleichung beeinflussen sowohl die Oberflächenspannung als auch der Kontaktwinkel das Eindringverhalten des Injektionsmaterials in poröse Medien. Da der Kontaktwinkel über den Cosinus eingeht erhält er eine geringere Wichtung als die Oberflächenspannung.	
2	Chemisch	A) Alterungsbeständigkeit im salinaren Milieu	Wenn das eingesetzte Injektionsmaterialien nicht alterungsbeständig ist im salinaren Milieu, kann es seine mechanischen und hydraulischen Eigenschaften verlieren, wodurch sich erneut Wegsamkeiten entlang der Kontaktfuge ausbilden können, weswegen dies als wichtigstes Unterziel der chemischen Anforderungen betrachtet wird.	
		B) Temperaturentwicklung	Durch eine hohe Temperaturentwicklung beim Abbinden des Baustoffes kann es zu thermischen Volumenveränderungen kommen, wodurch bei einer Überschreitung von Haftzugfestigkeiten zwischen Injektionsmaterialien und Salzgebirge oder dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks erneut Wegsamkeiten ausbilden können. Da es nicht alleinig durch die Temperaturentwicklung sondern nur in Kombination mit einer Volumenreduktion und dem Überschreiten der Haftzugfestigkeit zur Bildung von Wegsamkeiten kommen kann wird dieses Unterziel als weniger wichtig als die Alterungsbeständigkeit betrachtet. Zudem sind die infolge der geringen injizierten Volumen (Öffnungsweite der Wegsamkeiten < 150 µm) zu erwartenden Volumenveränderungen als relativ gering zu betrachten.	
	Hydraulisch	A) Permeabilität	-	
	Mechanisch	A) Haftzugfestigkeit	Sowohl bei mechanischer Beanspruchung als auch infolge von Schwindprozessen des Injektionsmaterials oder des Baustoffes (Nach dem Zeitpunkt der Injektion) kommt es zum Aufbau von Zugspannungen im Kontaktbereich zwischen beiden Materialien kommen und sobald die Haftzugfestigkeit in einer der beiden Kontaktzonen (Dichtbaustoff-Injektionsmaterialien oder Injektionsmaterialien-Salzgebirge) überschritten wird, kommt es zum Abriß und der Ausbildung einer Wegsamkeit. Durch hohe Haftzugfestigkeiten wird dies verhindert, weswegen dies die wichtigste mechanische Eigenschaft der Injektionsmaterialien ist.	
		B) Schwindverhalten	Das Schwindverhalten des Injektionsmaterials nach der Injektion kann zur Ausbildung von neuen Wegsamkeiten im Kontaktbereich führen, wenn die Haftzugfestigkeit überschritten wird, weswegen das Schwindverhalten in der Wichtigkeit dem Schwindverhalten nachfolgt.	
		C) Verformungsverhalten/ Plastizität	Mit zunehmender Standzeit des Streckenverschlussbauwerks kommt es infolge von Konvergenz und Spannungsumlagerungen im Gebirge zur mechanischen Beanspruchung des Streckenverschlussbauwerks[26]. Injektionsmaterialien, die auf Verformungen plastische reagieren und ein gewisses Maß an Verformung ohne Rissbildung überstehen bzw. in entstehende Risse oder Klüfte eindringen können haben eine bessere Eignung hinsichtlich einer niedrigen Permeabilität im Bereich der Kontaktfuge als Materialien die spröde auf Deformation reagieren.	
		D) Druckfestigkeit	Um mechanischen Belastungen entgegenwirken zu können, muss das Injektionsmaterial eine hohe Druckfestigkeit aufweisen. Dieses Unterziel wird als weniger wichtig als die drei anderen eingestuft, da es nicht zwangsläufig bei geringen Druckfestigkeiten des Injektionsmaterials zur Erhöhung der Permeabilität im Bereich der Kontaktfuge kommt.	
	3	Handhabbarkeit	A) Reinigung	-

Tab. 38: Halbmatrix zur Bestimmung der Zielgewichte der einzelnen Unterziele an die Injektionsmaterialien

Anforderung	Unterziele	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Absolut	Relativ
Rheologie	Dynamische Viskosität	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	0,149
	Kontaktwinkel	2		2	3	4	5	2	2	2	2	2	2	2	2	12	0,138
	Oberflächenspannung	3			3	4	5	3	3	3	3	3	3	3	3	11	0,126
	Topfzeit	4				4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	10	0,115
	Partikelgrößenverteilung	5					5	5	5	5	5	5	5	5	5	9	0,103
Mechanisch	Haftzugfestigkeit	6						6	6	6	6			6	6	6	0,069
	Schwindverhalten	7							7	7	7	10	11		7	4	0,046
	Verformungsverhalten/Plastizität	8								8	8	10	11	12	8	3	0,035
	Druckfestigkeit	9									9	10	11	12	9	2	0,023
Hydraulisch	Permeabilität	10										10		10	10	6	0,069
Chemisch	Alterungsbeständigkeit im salinaren Milieu	11											11	11	11	6	0,069
	Geringe Temperaturentwicklung	12												12	12	4	0,046
Handhabbarkeit	Reinigung	13													13	1	0,012
Summe																87	1,000

Nachdem in Tab. 38 die Zielgewichte der einzelnen Unterziele bestimmt wurden, kann nun mit der Bewertung der Injektionsmaterialien begonnen werden. Hierzu können unterschiedliche Skalierungsmethoden verwendet werden. Hierbei kann entweder eine Ordinalskala mit Rangfolge oder eine Intervall Skala verwendet werden.

Bei der Ordinalskala wird eine Rangfolge der Injektionsmaterialien für ein Unterziel erstellt, wobei der beste Wert einer Eigenschaft fünf Punkte und der schlechteste einen Punkt erhält. Der Nachteil dieses Systems ist, dass die Abstände der Skala zwischen den einzelnen Injektionsmaterialien immer gleich groß sind, auch wenn die Messwerte, auf denen die Skalierung basiert, unterschiedliche Abstände zueinander haben. Dieser Effekt wird bei der Intervallskala vermieden. Bei der Intervallskala wird zwischen dem schlechtesten sowie dem besten Messwert eine Skala mit gleichgroßen Teilbereichen aufgestellt, anhand derer die Punkte für die Injektionsmaterialien vergeben werden[127].

Für die Erstellung der Nutzwertanalyse im Rahmen dieser Arbeit sollen beide Skalierungsmethoden angewendet werden. Wenn für ein Unterziel für alle Injektionsmaterialien Messwerte vorliegen, soll eine Intervallskala angewandt werden, da dies Abstände zwischen den Werten besser berücksichtigt als die Ordinalskala. Falls nicht für alle Injektionsmaterialien eines Unterziels Messwerte vorliegen, soll die Punktevergabe anhand der Reihenfolge, also mittels Ordinalskala vergeben werden.

Intervallskala

Die für die Intervallskala herangezogenen Messwerte wurden bei bergbautypischen Temperaturen von 30 und 40° C sowie über einen Zeitraum von 30 Minuten (Viskosität, und Oberflächenspannung) gemessen. Um aus den Messwerten einen einzelnen Wert zu erhalten, der für die Bewertung herangezogen werden kann, wurden Mittelwerte gebildet, auf deren Bildung im Folgenden näher eingegangen wird.

Rheologie

Viskosität

Die Viskosität der Injektionsmaterialien wird als arithmetischer Mittelwert der während der ersten und der letzten fünf Minuten (0-5 und 25-30 Minuten nach dem Anmischen) der Messungen bei 30° und 40 °C gewonnenen Daten angegeben. Je niedriger die Viskosität des betrachteten Injektionsmaterials ist, desto besser ist dessen Fließverhalten. Die niedrigste gemessene Viskosität in den betrachteten Zeiträumen war 41 mPas bei der Messung mit dem Wasserglas bei 40°C. Da der höchste bei der Viskosität gemessene Wert bei ca. 37.000 mPas liegt (2K-Bitumen bei 22 Minuten) und dieser Wert für Injektionszwecke als zu hoch erachtet wird und es dadurch zu einer Verzerrung der Skala kommt wird die Intervallskala zwischen den übrigen vier Injektionsmaterialien aufgestellt (49-320 mPas) und das 2K-Bitumen erhält 0 Punkte für die Viskosität, da es außerhalb des Skalenraumes liegt.

Kontaktwinkel

Neben der Viskosität ermöglicht auch der Kontaktwinkel eine Aussage über das Eindringverhalten von Flüssigkeiten in poröse Medien. Wenn der Kontaktwinkel eines auf einer festen Oberfläche liegenden Tropfens zwischen 0 und 90° beträgt, dann gilt diese Oberfläche für die Flüssigkeit als benetzbar. Zur Bewertung des Kontaktwinkels wird eine fünfstufige Intervallskala verwendet, die zwischen den 18,4 (2K-Bitumen) und 46,1 Grad (IM 4+) aufgespannt wird, wobei niedrigere Kontaktwinkel als vorteilhaft erachtet werden. Die zur Bewertung herangezogenen Kontaktwinkel wurden aus den Werten der Einzelmessungen bei 30 und 40° C gemittelt.

Oberflächenspannung

Für die betrachteten Injektionsmaterialien wurde die Oberflächenspannung für beide Temperaturstufen jeweils 8, 16, 24 und 32 Minuten nach dem Anmischen ermittelt. Für die Bewertung wird für jedes Injektionsmaterial der arithmetische Mittelwert der 8 Einzelmessungen herangezogen. Wie beim Kontaktwinkel wird eine Intervallskala mit fünf Wertebereichen erstellt, die von 27,60 mN/m (2K-Bitumen) bis hin zu 73,09 mN/m (Wasserglas 37/40) reichen, wobei eine möglichst niedrige Oberflächenspannung als vorteilhaft erachtet wird.

Tab. 39: Übersicht der Wertebereiche für die Intervallskalen

Rheologie			
Punkte	Viskosität [mPas]	Kontaktwinkel [Grad]	Oberflächenspannung [mN/m]
5	49 – 103,2	18,40 – 23,94	27,60 – 36,70
4	103,3 – 157,5	23,95 – 29,49	36,71 – 45,81
3	157,6 – 211,8	29,50 – 35,04	45,82 – 54,92
2	211,9 – 266,1	35,05 – 40,59	54,93 – 64,03
1	266,2 - 320	40,60 – 46,10	64,04 – 73,10

Ordinalskala

Bei den Unterzielen, für die keine Messwerte vorliegen oder nur für einzelne Materialien Werte vorliegen, wird die Bewertung relativ über die Reihenfolge der Injektionsmaterialien vorgenommen. Im Folgenden wird die Erstellung der Reihenfolge begründet, wobei zuerst erläutert wird, welche Werte in dem jeweiligen Unterziel als vorteilhaft betrachtet werden und für den Fall das Annahmen getroffen werden müssen, werden diese begründet und die Reihenfolge dargelegt.

Rheologie

Topfzeit:

Die Topfzeit gibt an, über welchen Zeitraum hinweg das jeweilige Injektionsmaterial noch verarbeitbar und verpressbar ist, wobei längere Verarbeitungszeiten als vorteilhaft erachtet werden. Für alle Injektionsmaterialien, mit Ausnahme des Wasserglases, waren Herstellerangaben verfügbar. Da das Wasserglas bei der Kontaktfugeninjektion ohne Härtemittel injiziert wird lässt es sich über beliebig lange Zeiträume verarbeiten, solange es nicht mit Salzstaub oder Salz in Kontakt kommt. Daher liegt das Wasserglas auf dem ersten Rang. Die Topfzeiten für die anderen Injektionsmaterialien sind 95 Minuten für das Ultrafin 12 (20° C)[58], 80 Minuten (100 Gramm bei 25°C) für das Denepox 40[93, 94], ≤ 30 Minuten für das IM 4+ (25° C)[107] und 15 Minuten für das 2K-Bitumen (keine Angabe zur Temperatur) [27]. Die angegebenen Topfzeiten sind für die jeweils angegebenen Temperaturwerte gültig, und können bei den bergbautypischen Temperaturen, die zwischen 30 und 40°C liegen abweichen.

Partikelgrößenverteilung:

Um partikelhaltige Injektionsmaterialien in Risse mit geringen Öffnungsweiten injizieren zu können müssen diese eine geringe Partikelgröße aufweisen. In der DIN EN 12715[23] wird ein Verhältnis von ungefähr 3:1 zwischen größter Partikelabmessung und der Rissweite, in die die Partikel noch eindringen können, angegeben. Daher wird eine möglichst kleine Korngröße für die partikelgestützten Injektionsmaterialien als vorteilhaft angesehen, wobei die partikelfreien Injektionsmaterialien (Denepox 40 und Wasserglas 37/40) aufgrund der Partikelfreiheit beide zusammen den ersten Platz in der Reihenfolge belegen. Von den partikelgestützten Injektionsmaterialien enthält das 2K-Bitumen mit einem Anteil von ca. 25 % mit einer Korngröße von über 300 µm die größten Partikel und liegt auf dem letzten Platz. Auf dem vorletzten Platz liegt das IM 4+ mit einem D_{90} -Wert von 15-20 µm[107]. Das Ultrafin 12 hat einen D_{95} -Wert von < 12 µm und liegt somit hinter den beiden partikelfreien Injektionsmaterialien auf dem dritten Rang[58].

Mechanische Eigenschaften

Druckfestigkeit:

Um mechanischen Beanspruchungen entgegenwirken zu können, wird eine höhere Druckfestigkeit als vorteilhaft angesehen, wobei für drei der Injektionsmaterialien Angaben hierzu vorliegen (Denepox: 100 MPa[93], 2K-Bitumen: 0,12 MPa[2] und IM 4+ 20-50 MPa[107]). Lediglich für das Wasserglas und Ultrafin 12 mit einem W/Z-Wert von 1,4 müssen Annahmen getroffen werden.

Über die Druckfestigkeit des mit Wasserglas der Härte 37/40 hergestellten Silikatgels liegen allerdings keine Angaben vor. Girmscheid[85] gibt die Endfestigkeit eines Körpers aus reinem Injektionsgut für Silikatgele (Hartgele) mit 1 bis 2 N/mm² (1 bis 2 MPa) an, wobei Weichgele

etwa ein Zehntel der Festigkeit von Hartgelen besitzen[85]. Auch Strauß und Prinz[86] geben die Druckfestigkeit von Weichgelen mit $0,3-0,5 \text{ N/mm}^2$ ($0,3 - 0,5 \text{ MPa}$) in der gleichen Größenordnung an[86].

Die Druckfestigkeit der ausgehärteten Suspension aus Ultrafin 12 hängt stark von dem eingesetzten Wasser/Bindemittel Gehalt ab. Eine Suspension mit einem W/B-Wert von 2,0 hat eine Druckfestigkeit von $> 4,0 \text{ MPa}$ nach 28 Tagen und ein Mörtel mit einem W/B-Wert von 0,5 hat eine 28 Tage Festigkeit von $> 60 \text{ MPa}$ [58]. Da selbst die Suspension mit einem noch größeren Wasseranteil als die im Vorhaben verwendeten eine Druckfestigkeit von $> 4,9 \text{ MPa}$ aufweist lässt kann dieser Wert als konservative Annahme herangezogen werden. Somit ergibt sich die folgende Rangfolge der Druckfestigkeiten: Die Druckfestigkeit des Wasserglases liegt über der des 2K-Bitumens jedoch unterhalb des Feinstzements Ultrafin 12.

Schwindverhalten:

Als vorteilhaft werden volumenkonstant aushärtende sowie leicht quellfähige Baustoffe angesehen, da für diese keine Zugspannungen durch die Volumenreduktion aufgebaut werden, die zur erneuten Bildung von Wegsamkeiten führen können. Eine Volumenerhöhung von mehr als 10 % wird als nicht erwünscht betrachtet, da es durch den entstehenden Druck zur Schädigung des Gebirges kommen kann. Für Denepox 40 ($< 3\%$)[93] und IM 4+ (+2 bis +10%)[107] liegen zum Schwindverhalten Herstellerangaben vor. Für die übrigen Injektionsmaterialien müssen Annahmen getroffen werden.

Wenn das injizierte Wasserglas in Kontakt mit Salz oder salinaren Lösungen tritt kommt es zur Gelbildung. Bei der Gelbildung verketten sich die Silikatphasen des Wasserglases, wobei amorphes Silikatgel sowie sekundärer Halit gebildet werden. Das Silikagel ist ein schneidbarer Feststoff mit geringer mechanischer Festigkeit[78]. Innerhalb der nächsten ca. 30 Tage läuft der Synäreseprozess ab[77]. Hierbei kommt es zu einer weiteren Verkettung der Silikatphasen, wobei Gerüststrukturen gebildet werden. Während des Synäreseprozesses erhöht sich die mechanische Festigkeit des Silikatgels und es kommt zu einer Volumenreduktion des Wasserglases, infolge der Abgabe einer wässrigen Synäreselösung[77]. Da das Wasserglas der Härte 37/40, im Vergleich zu anderen Wassergläsern (z.B. Hartgelen), einen relativ hohen Wasseranteil besitzt, ist auch mit einer merklichen Volumenreduktion infolge der Synärese zu rechnen, wenn das Wasser entweichen oder verdunsten kann. Das im Laufe des Synäreseprozesses freigesetzte Wasser migriert entlang von Korngrenzen und wird als Lösungseinschlüsse im Salz fixiert[78].

Die verwendete Suspension aus Ultrafin 12 hat ein Wasserabsetzen von 0,7 %. Dieser dünne Wasserfilm kann sich anschließend in feinen, nicht für die Baustoff suspension zugänglichen Wegsamkeiten verlieren und führt somit zum ursprünglichen Zementvolumen zu einer Volumenreduktion. Darüber hinaus laufen, in Abhängigkeit der Abbindezeit, mehrere Schwindprozesse im Zement ab (Kapillar-, Chemisches-, Trocknungs- und Carbonatisierungsschwinden), die insgesamt wenige mm/Meter Schwindmaß ausmachen[128].

Zwar steigt das Schwindmaß von Beton mit zunehmenden W/Z-Wert und liegt bei üblichen Zusammensetzungen im Bereich mm/Meter[129]. Daher wird, in Kombination mit dem Wasserabsetzen, ein Schwinden von wenigen Prozent für Ultrafin 12 angenommen.

Für das Schrumpfen von Bitumen ist beim Kalteinbau (Vernachlässigung von thermischem Schwinden) im Wesentlichen die Verdunstungsalterung verantwortlich. Bei der Verdunstungsalterung gehen, bei Temperaturen über dem Erweichungspunkt, die flüchtigen Bestandteile des Bitumens in die Gasphase über und somit tritt eine Volumenverringerng des Bitumens ein[73]. In der Patentschrift[27] zum 2K-Bitumen wird zudem angegeben: „Bei Verwendung des Bitumens als Injektionsmaterial kann das Lösungsmittel nicht entweichen oder verdunsten, wodurch das injizierte Dichtungsmaterial nicht oder nur über einen sehr langen Zeitraum hinaus erhärtet.“ Da es nicht zum Entweichen des Lösungsmittels aus dem Bitumen kommt und dieses kalt eingebaut wird, wird es als fast volumenkonstant in Bezug auf das Schwindverhalten angesehen.

Somit liegt das beim Abbinden leicht quellende IM 4+ auf dem ersten Rang. Auf dem zweiten Rang liegen das 2K-Bitumen, Denepox 40 und Ultrafin 12, da für diese aufgrund der geringen Unterschiede und der getroffenen Annahmen, keine Differenzierung sinnvoll ist.

Verformungsverhalten:

Um das Verformungsverhalten der Injektionsmaterialien zu beschreiben, wäre das Elastizitätsmodul als Materialkennwert mit dem eine Aussage über das Verformungsverhalten getroffen werden kann erforderlich. Jedoch liegen keine Informationen über das Elastizitätsmodul der ausgesuchten Injektionsmaterialien vor. Daher soll lediglich eine grobe Unterscheidung zwischen plastisch/duktile verformbaren Injektionsmaterialien, wie z.B. Bitumen, und starr/bruchhaft auf Verformung reagierenden vorgenommen werden. Damit liegt das Bitumen auf dem ersten Rang und die vier weiteren Materialien zusammen den zweiten Platz belegen.

Haftzugfestigkeit:

Je höher die Haftzugfestigkeit zwischen dem Injektionsmaterialien und dem Salz der Streckenkontur sowie dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks ist, desto unwahrscheinlicher ist die Bildung von Wegsamkeiten infolge der Überschreitung der Haftzugfestigkeit. Von den untersuchten Injektionsmaterialien liegen lediglich für das Wasserglas sowie das Kunstharz Denepox 40 Informationen über die Haftzugfestigkeit im Kontakt mit Steinsalz oder Beton vor.

Für Denepox 40 wird angegeben, dass die Haftung an trockenem und feuchtem Beton die Kohäsion von Beton übertrifft[94]. Für Wasserglas wurde im Vorhaben VerA die Haftzugfestigkeit von zwei Steinsalzprobenkörpern, die über eine dünne Schicht Wasserglas miteinander verbunden waren, nach 56 Tagen Aushärtezeit untersucht. Die Haftzugfestigkeit im Kontaktbereich betrug 0,78 MPa [77].

Da für die anderen Injektionsmaterialien keine Angaben zur Haftzugfestigkeit vorliegen, sollen hier Annahmen getroffen werden. Als Beispiel für die Haftzugfestigkeit eines zementbasierten hydraulisch abbindenden Baustoffes mit einer NaCl-haltigen Anmischlösung soll der Salzbeton M2 herangezogen werden, der eine Haftzugfestigkeit von 0,7 MPa nach 56 Tagen im Kontakt mit Steinsalz aufweist[17].

Dieser Wert liegt im Bereich der für das Wasserglas im Vorhaben VerA ermittelten Haftzugfestigkeiten im Kontakt mit Steinsalz. Daher wird angenommen, dass die Haftzugfestigkeit von Ultrafin 12 einen vergleichbaren Wert hat, wie das Wasserglas. Die ermittelte Haftzugfestigkeit liegt größenordnungsmäßig im Bereich der Zugfestigkeit von Steinsalz, die mit 0,5 bis 1,5 MPa (abhängig vom Steinsalztyp) angegeben wird [130].

Wakeley und Burkes[131] haben die Scherfestigkeit von Zement Injektionsmaterialien im Kontakt mit Steinsalz und Anhydrit untersucht und festgestellt, dass diese beim Steinsalz mindestens (Das Versagen der Probenkörper fand bei den Haftzugfestigkeitsuntersuchungen im Steinsalz und nicht im Kontakt Steinsalz/Injektionsmaterialien statt) ca. 2,5 mal so hoch war wie im Kontakt mit Anhydrit. Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers Morsleben wurden Haftzugfestigkeitsuntersuchungen zwischen Anhydrit und MgO-Beton (DBM 2) durchgeführt, die eine Haftzugfestigkeit von 0,28 MPa ergaben[25].

Mit den hier aufgeführten Informationen lässt sich keine präzise Aussage über die Haftzugfestigkeit des Injektionsmörtels IM 4+ treffen, jedoch soll aufgezeigt werden, dass es plausibel ist, für die Haftzugfestigkeit eines Magnesiabinders ähnliche Werte wie für das Wasserglas oder den Feinstzement anzunehmen.

Die Haftzugfestigkeit von Denepox 40 übersteigt die Kohäsion von Beton, der im Regelfall höhere Zugfestigkeiten aufweist als die Haftzugfestigkeiten von Wasserglas und Salzbeton M2 nach 56 Tagen im Kontakt mit Steinsalz. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass die für das Denepox 40 zur Bewertung herangezogenen Werte im Kontakt mit Beton und nicht Steinsalz ermittelt wurden, jedoch die einzigen verfügbaren darstellen.

Für Denepox 40 wird relativ zu den anderen betrachteten Injektionsmaterialien die beste Haftzugfestigkeit angenommen, gefolgt von den als gleichwertig betrachteten Haftzugfestigkeiten von Wasserglas und Magnesiabinder und Feinstzement.

Für das 2K-Bitumen wird die geringste Haftzugfestigkeit angenommen, da es nicht oder nur langsam erhärtet und somit keine mechanisch belastbare Verbindung mit den Materialien der Risswände eingeht. In der Patentschrift[27] zum 2K-Bitumen wird zur Erhärtung des Bitumens angegeben: „Bei Verwendung des Bitumens als Injektionsmaterial kann das Lösungsmittel nicht entweichen oder verdunsten, wodurch das injizierte Dichtungsmaterial nicht oder nur über einen sehr langen Zeitraum hinaus erhärtet.“

Hydraulische Anforderungen

Leider stehen Informationen zur Permeabilität nur für einen der fünf Baustoffe zur Verfügung. Daher kann diese Anforderung nicht in die Bewertung miteinfließen.

Chemische Anforderungen

Alterungsbeständigkeit:

Kohlenwasserstoffvorkommen wurden in einer Vielzahl deutscher Salzbergwerke (Sigmundshall, Siegfried - Giessen, Asse und Neuhof - Ellers) beobachtet, weswegen sie zum natürlichen Stoffbestand von Salzgesteinen gezählt werden[132]. Daher wird auch Bitumen als ein natürlicherweise in Salzlagerstätten vorkommender Stoff, der im Salzgebirge auch über lange Zeiträume als chemisch stabil anzusehen ist betrachtet[19].

Bei der Aushärtung von Wasserglas bilden sich SiO_2 -Phasen. Es gibt in der Natur eine Reihe von natürlichen SiO_2 -Phasen wie z.B. Opal oder Quarz, wobei der Opal keine interne Kristallstruktur aufweist und aus hydratisiertem Kieselgel besteht und somit geochemisch nah mit den Silikatgruppen des gelierten Wasserglases verwandt ist. In marinen Evaporitlagerstätten, wie z.B. dem Zechsteinsalinar, kommen sowohl Opal oder Quarz natürlich vor[88]. Ein weiteres natürliches Analogon für die Bildung von SiO_2 -Verbindungen aus Silikatgelen stellen die Cherts (sedimentär entstandene Silikatgesteine) der Sodaseen des ostafrikanischen Grabens dar, die Alter zwischen 300.000 und 780.000 Jahren aufweisen. In diesen Seen kommen, neben amorpher Kieselsäure, zahlreiche Na-Hydrosilikate vor die chemisch mit dem Wasserglas verwandt sind und Vorstufen für reine SiO_2 -Verbindungen sein sollen[77].

Problematisch hinsichtlich der Nachvergütung von Streckenverschlussbauwerken in Endlagerbergwerken ist, dass für Kunstharze keine Erfahrungswerte über die Alterungsbeständigkeit im salinaren Milieu, die über 50 Jahre hinausgehen bestehen. Daher kann für Kunstharze kein Nachweis der Langzeitstabilität über natürliche Analoga erbracht werden. Die ersten industriell gefertigten vollständig synthetischen Kunststoffe wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts hergestellt[133]. Nach der Entwicklung von Epoxidharzen in den 1960ern fanden diese schon bald Einsatz im Bergbau, zum Setzen von Klebeankern. In den frühen 1960er Jahren wurden zudem im deutschen Steinkohlenbergbau die ersten Polyurethaninjektionen zur Erhöhung der Standfestigkeit des Gebirges durchgeführt[134, 135]. Es ist anzunehmen, dass die gleichen Technologien in kurzem zeitlichen Abstand den Einzug in den Salzbergbau fanden, was bedeutet, dass man das Langzeitverhalten der Kunststoffe im Salinar nur über diesen Zeitraum betrachten kann.

Durch eine Reihe unterschiedlicher Faktoren (Sonnenstrahlung, Radioaktivität, mechanische oder chemische Einwirkungen, Temperatur- oder Feuchtigkeitsschwankungen) kann es im Laufe der Zeit zu einer irreversiblen Veränderung der Struktur und Zusammensetzung von Polymerwerkstoffen kommen[19]. Unter Laborbedingungen ist es möglich diese Einflussgrößen zu simulieren, und somit Aussagen über die Beständigkeit von Kunststoffen zu treffen. Hierbei

werden die Probenkörper Zerstörungsfaktoren ausgesetzt, die deutlich größer als unter realitätsnahen Einsatzbedingungen sind, wodurch ein um das 5 bis 25-fache beschleunigtes Altern der Kunststoffe hervorgerufen werden kann[19]. In Untersuchungen mit beschleunigtem Altern unter der Einwirkung von Salzlösung bei 7° C konnte für ein Polymerinjektionsmaterial der Firma DeNeef gezeigt werden, dass über einen Zeitraum von 110 Jahren keine Verschlechterung der Eigenschaften eintritt[19]. Die angenommene Temperatur von 7° C ist für ein Endlagerbergwerk im Salinar nicht repräsentativ, hier wird eine deutlich höhere Gebirgstemperatur erwartet, jedoch sind dies die einzigen vorhandenen Untersuchungsergebnisse. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei höheren Temperaturen chemische Reaktionen schneller ablaufen und somit zu einem beschleunigten Altern führen können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Informationen über die Stabilität von Epoxidharzen aus dem tatsächlichen Einsatz lediglich für einen Zeitraum von 50 Jahren vorliegen. Mit Untersuchungen zum beschleunigten Altern von Polymerwerkstoffen lässt sich die Stabilität über einen Zeitraum von 110 Jahren aufzeigen. Jedoch ist es nicht möglich für längere Zeiträume eine Aussage über die Stabilität von Kunststoffen im Salinar zu treffen.

Für den Injektionsmörtel IM 4+ wird vom Hersteller angegeben, dass dieser langzeitbeständig gegenüber hochkonzentrierten $MgCl_2$ - oder $MgSO_4$ -Lösungen ist. Im Kontakt mit Wasser oder schwach mineralisierten Lösungen nur bedingt beständig ist[107]. Bei Bauwerken, die aus Magnesiabeton errichtet werden, sind zutretende Lösungen mit einem $MgCl_2$ -Gehalt von unter 50 g/Kg H_2O gegenüber dem Baustoff lösungsfähig. Bei höheren $MgCl_2$ -Konzentrationen ist der Magnesiabeton jedoch langzeitstabil[25].

Salzbeton ist im Kontakt mit NaCl-gesättigten Lösungen stabil. Jedoch kommt es im Kontakt mit Mg-reichen Lösungen zum Herauslösen der Calcium-Silikat-Phasen des Zementsteins[136].

Für Wasserglas und Bitumen lässt sich die Alterungsbeständigkeit der Injektionsmaterialien im salinaren Milieu über natürliche Analoga über Zeiträume von über 100.000 Jahren aufzeigen. Die Langzeitstabilität dieser beiden Materialien ist unabhängig von der Mineralogie des Salzes als auch der Zusammensetzungen von gesättigten Lösungen. Die beiden hydraulisch abbindenden Baustoffe sind in ihrer Zusammensetzung und Lösungsbeständigkeit jeweils auf einen Anwendungszweck ausgelegt und weisen somit eine geringere Vielseitigkeit hinsichtlich der geochemischen Milieus für das die Alterungsbeständigkeit im Salinar gilt auf. Für das Epoxidharz lässt sich über Versuche mit beschleunigtem Altern eine Beständigkeit in salinaren Lösungen für einen Zeitraum von mindestens 110 Jahren aufgezeigt werden. Über längere Zeiträume ist dies jedoch nicht möglich.

Daher werden in der Rangfolge Wasserglas und das 2K-Bitumen aufgrund ihrer Beständigkeit gegenüber einer Reihe unterschiedlicher Lösungszusammensetzungen auf dem ersten Platz gesehen, gefolgt von den hydraulisch abbindenden Baustoffen, die jeweils gegenüber speziellen Lösungszusammensetzungen stabil sind. Als schlechtestes Injektionsmaterial hinsichtlich der

Alterungsbeständigkeit im salinaren Milieu, wird das Epoxidharz Denepox 40 erachtet, da es nicht möglich ist, für dieses Material vorherzusagen, ob es ohne eine Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften im Salinar über lange Zeiträume einsetzbar ist.

Temperaturentwicklung:

Eine möglichst geringe Temperaturentwicklung des Injektionsmaterials beim Abbinden wird als vorteilhaft angesehen, da es hierdurch in geringerem Maße zu thermischen Volumenänderungen (Schrumpfen) des Injektionsmaterials kommt. Die thermischen Volumenänderungen des Injektionsmaterials spielen jedoch aufgrund des geringen injizierten Volumens nur eine untergeordnete Rolle, da mit den untersuchten Injektionsmaterialien Wegsamkeiten mit Öffnungsweiten < 150 µm injiziert werden sollen.

Im Rahmen der Laborversuche wurde festgestellt, dass beim Aushärten des Denepox 40 volumenabhängig eine hohe Temperaturentwicklung erfolgt, die 100°C übersteigen kann. (Etwa 75 ml Denepox 40 wurden in einen Polypropylen Becher mit einem Schmelzpunkt von 130° C aufbewahrt, der nach einer Aufbewahrungszeit von ca. 45 Minuten geschmolzen ist). Die beiden hydraulisch abbindenden Injektionsmaterialien Ultrafin 12 und IM 4+ setzen beim Abbinden Energie in Form von Wärme frei, jedoch in geringerem Maße als das Denepox 40. Die geringste Temperaturentwicklung beim Abbinden, ist für 2K-Bitumen und Wasserglas zu erwarten. Daher werden diese beiden Materialien auf den ersten Platz gestellt, gefolgt von Ultrafin 12 und IM 4+ auf dem zweiten Platz und auf dem dritten Platz liegt das Denepox 40.

Handhabbarkeit:

Reinigung:

Die Handhabbarkeit der Injektionsmaterialien wird in hohem Maße durch den Reinigungsaufwand im Anschluss an die Injektionsmaßnahme beeinflusst. Dies betrifft zum einen den zeitlichen Aufwand, die Menge und Art der anfallenden Reinigungsmittel sowie mögliche Wechselwirkungen zwischen den Reinigungsmitteln und der Injektionstechnik.

Am unproblematischsten sind hierbei das Ultrafin 12 sowie das IM 4+ anzusehen, da bei beiden Injektionsmaterialien die Injektionstechnik mit Wasser oder Lauge gespült werden kann. Daher liegen diese beiden Materialien auf dem ersten Rang. Nach der Injektion von Wasserglas kann die Injektionstechnik mit heißem Wasser gespült werden, wenn sich jedoch feste Rückstände gebildet haben, ist es nur möglich diese mit Natronlauge zu entfernen. Aufgrund des Mehraufwandes durch die Bereitstellung des heißen Wassers sowie des erhöhten Risikos der Bildung von festen Anhaftungen, die mit Natronlauge entfernt werden müssen, liegt das Wasserglas auf dem zweiten Platz. Zum Reinigen der Injektionstechnik nach dem Einsatz von Denepox 40 wird vom Hersteller das Lösungsmittel Methylethylketon (MEK) empfohlen. Das Lösungsmittel MEK kann aber auch Kunststoffe angreifen, wodurch z.B. Dichtungen oder Kunststoffleitungen angegriffen werden können. Daher ist nach dem Reinigen zu überprüfen, dass sämtliche Kunststoffteile noch einsatzfähig sind. Als Lösungs- bzw. Reinigungsmittel für das

2K-Bitumen kann im untertägigen Einsatz Diesel verwendet werden (Im Labormaßstab stehen andere Reinigungsmittel zur Verfügung, allerdings haben diese keine Zulassungen für den Einsatz unter Tage). Vor allem ist jedoch der zeitliche Aufwand für die Reinigung der Injektionstechnik nach dem Einsatz des 2K-Bitumens außerordentlich hoch, da das Bitumen gut an Oberflächen anhaftet.

7.2 Bewertung

Zur Bewertung der Injektionsmaterialien wird für jedes Unterziel, wie bereits erwähnt, entweder eine Ordinalskala oder eine Intervallskala herangezogen. Bei der Intervallskala werden die Punkte gemäß den in Tab. 39 aufgestellten Wertebereichen vergeben. Bei der Ordinalskala erfolgt die Bewertung der Injektionsmaterialien relativ zu einander, wobei die Rangfolge für jedes Unterziel im vorherigen Kapitel begründet wurde. Das beste Injektionsmaterial erhält 5 Punkte und das schlechteste jeweils einen. Falls zwei Injektionsmaterialien als gleichwertig hinsichtlich der Erfüllung des Unterziels angesehen werden, wird der mittlere Zahlenwert der für diese beiden Plätze zu vergebenden Punkte errechnet und an die beiden Injektionsmaterialien vergeben. Als Beispiel: Injektionsmaterial A liegt auf dem ersten Platz und erhält 5 Punkte auf dem zweiten Platz liegen die Injektionsmaterialien B und C (4 und 3 Punkte in der Rangfolge) so erhalten die Injektionsmaterialien B und C jeweils 3,5 Punkte.

Tab. 40: Übersicht über die Messwerte/Materialkennwerte und die jeweils für die Anforderungen vergeben Punkte.

Anforderung	Messwert/Materialkennwert (Punkte)				
Injektionsmaterialien	2K-Bitumen	Wasserglas 37/40	Denepox 40	Ultrafin 12	IM 4+
Rheologische Anforderungen					
Dynamische Viskosität [mPas]	>> 1.000 (0)	49,3 (5)	91,6 (5)	94,0 (5)	320 (1)
Partikelgrößenverteilung	1	4,5	4,5	3	2
Topfzeit	1	5	3	4	2
Oberflächenspannung [mN/m]	27,57 (5)	73,10 (1)	37,15 (4)	71,12 (1)	61,60 (2)
Kontaktwinkel [°]	18,4 (5)	45,1 (1)	29,35 (4)	29,1 (4)	46,1 (1)
Chemische Anforderungen					
Alterungsbeständigkeit im salinaren Milieu	4,5	4,5	1	2,5	2,5
Temperaturoentwicklung	4,5	4,5	1	2,5	2,5
Mechanische Anforderungen					
Haftzugfestigkeit	1	3	5	3	3
Schwindverhalten	3	1	3	3	5
Plastizität / Verformbarkeit	5	2,5	2,5	2,5	2,5
Druckfestigkeit	1	2	5	3	4
Handhabbarkeit					
Reinigung	1	3	2	4,5	4,5

Um aus den Punkten, die in den für die einzelnen Unterziele vergeben wurden, die gewichtete Bewertung zu erhalten, werden diese mit den in Tab. 38 bestimmten Zielgewichten multipliziert und das Ergebnis wird in Tab. 41 dargestellt.

Tab. 41: Übersicht über die vergebenen Punkte sowie die Ergebnisse für die einzelnen Injektionsmaterialien in den verschiedenen Kategorien sowie in der Gesamtwertung.

Anforderung	Bewertung				
	2K-Bitumen	Wasserglas 37/40	Denepox 40	Ultrafin 12	IM 4+
Rheologische Anforderungen					
Dynamische Viskosität	0	0,745	0,745	0,745	0,149
Partikelgrößenverteilung	0,103	0,464	0,464	0,309	0,206
Topfzeit	0,115	0,575	0,345	0,460	0,230
Oberflächenspannung	0,630	0,126	0,504	0,126	0,252
Kontaktwinkel	0,103	0,138	0,552	0,552	0,138
Rheologie Gesamt	1,538	2,048	2,610	2,192	0,975
Chemische Anforderungen					
Alterungsbeständigkeit im salinaren Milieu	0,311	0,311	0,069	0,173	0,173
Temperaturentwicklung	0,207	0,207	0,046	0,115	0,115
Chem. Anfor. Gesamt	0,518	0,518	0,115	0,288	0,288
Mechanische Anforderungen					
Haftzugfestigkeit	0,069	0,207	0,345	0,207	0,207
Schwindverhalten	0,138	0,046	0,138	0,138	0,230
Plastizität / Verformbarkeit	0,175	0,088	0,088	0,088	0,088
Druckfestigkeit	0,023	0,046	0,115	0,069	0,092
Mech. Anfor. Gesamt	0,405	0,387	0,686	0,502	0,617
Handhabbarkeit					
Reinigung	0,012	0,036	0,024	0,054	0,054
Gesamt	2,473	2,989	3,435	3,036	1,934

Von den fünf untersuchten Injektionsmaterialien erhalten die beiden partikelfreien Injektionsmaterialien sowie das Ultrafin 12 insgesamt die höchsten Punktzahlen, wobei das Denepox 40 vor dem Wasserglas liegt. Mit einem etwas höheren Wert, wie das Wasserglas, führt das Ultrafin 12 die Gruppe der partikelgestützten Injektionsmaterialien an, gefolgt von dem 2K-Bitumen und dem IM 4+. Auffällig ist, dass die Injektionsmaterialien teils nicht in jeder Anforderungskategorie gleich gut abschneiden. So hat das IM 4+ den zweithöchsten Wert bei den mechanischen Anforderungen, bei den rheologischen Anforderungen erzielt es jedoch den niedrigsten Wert. Die lässt sich in dem in Abb. 68 dargestellten Säulendiagramm gut erkennen.

Hierdurch zeigen sich die Eignungen der Injektionsmaterialien für unterschiedliche Aufgabenstellungen. Das Wasserglas eignet sich aufgrund der sehr niedrigen Viskosität besonders zum Injizieren feinsten Wagsamkeiten im Sinne einer Abdichtungsinjektion. Das Denepox 40 hat sehr gute mechanische Festigkeiten. Die Haftzugfestigkeit und Druckfestigkeit

sind deutlich höher als bei den anderen Injektionsmaterialien, wodurch sich das Denepox 40 besonders für verfestigende oder stabilisierende Injektionen eignet. Jedoch weist das Denepox 40 die Problematik auf dass die Alterungsbeständigkeit im salinaren Milieu nur über relativ kurze Zeiträume belegbar ist. Das 2K-Bitumen weist recht hohe Viskositäten auf, und hat nur geringe Haft- und Zugfestigkeiten, dafür erhärtet es über einen langen Zeitraum und behält somit seine Fließfähigkeit. Dadurch kann es, im Falle von Bewegungen im Bauwerk und der Entstehung von neuen Rissen, in diese hineinfließen und verschließen. Ein möglicher Einsatzzweck für das 2K-Bitumen wäre somit die Injektion von Bauwerken oder Bauwerksbereichen für die besonders hohe Konvergenzraten erwartet werden.

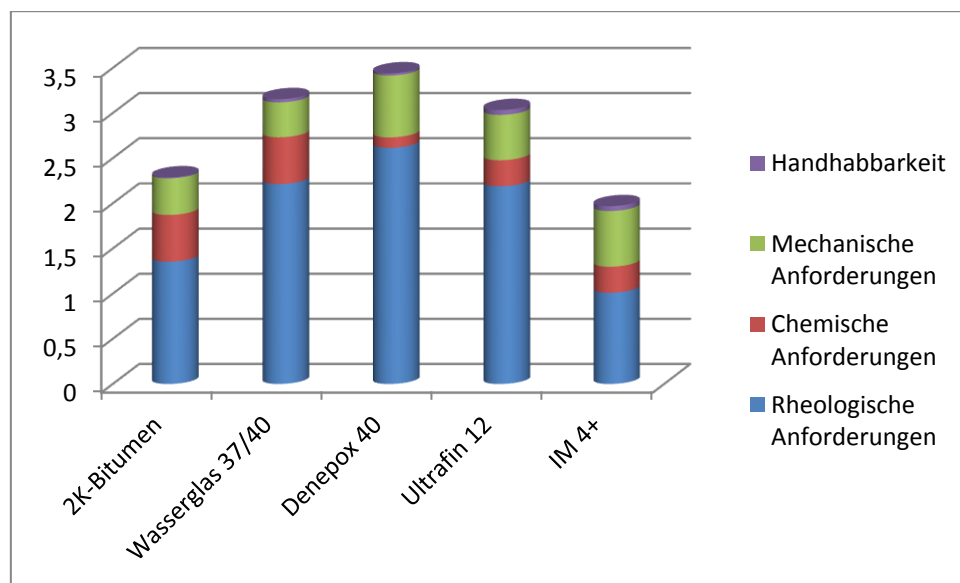


Abb. 68: Säulendiagramm der von den fünf ausgewählten Injektionsmaterialien hinsichtlich der unterschiedlichen Anforderungen erreichten Punkte.

Feinstbindemittel sind meist kostengünstiger als Injektionsharze [85] und eignen sich daher für eine erste Injektion, bei der große Volumina injiziert werden müssen. Jedoch lassen sich mit den partikelgestützten Injektionsmaterialien, infolge von Filterkuchenbildung vor Engstellen in Rissen, nicht alle Risse injizieren und oftmals werden auch die Risswickel nicht vollständig mit Bindemittel gefüllt. Daher ist es nötig, im Anschluss an eine partikelgestützte Injektion, noch einmal mit partikelfreien Injektionsmaterialien nachzuinjizieren. Der Feinstzement Ultrafin 12 kann im Kontakt mit Salzbeton und Steinsalz für Injektionszwecke eingesetzt werden. Er weist insbesondere eine niedrige Viskosität auf, die nur um 2,5 mPas höher ist als die des Injektionsharzes Denepox 40. Dahingegen wird der Injektionsmörtel IM 4+ im Kontakt mit Magnesiabeton und beim Auftreten von Kalisalzen eingesetzt.

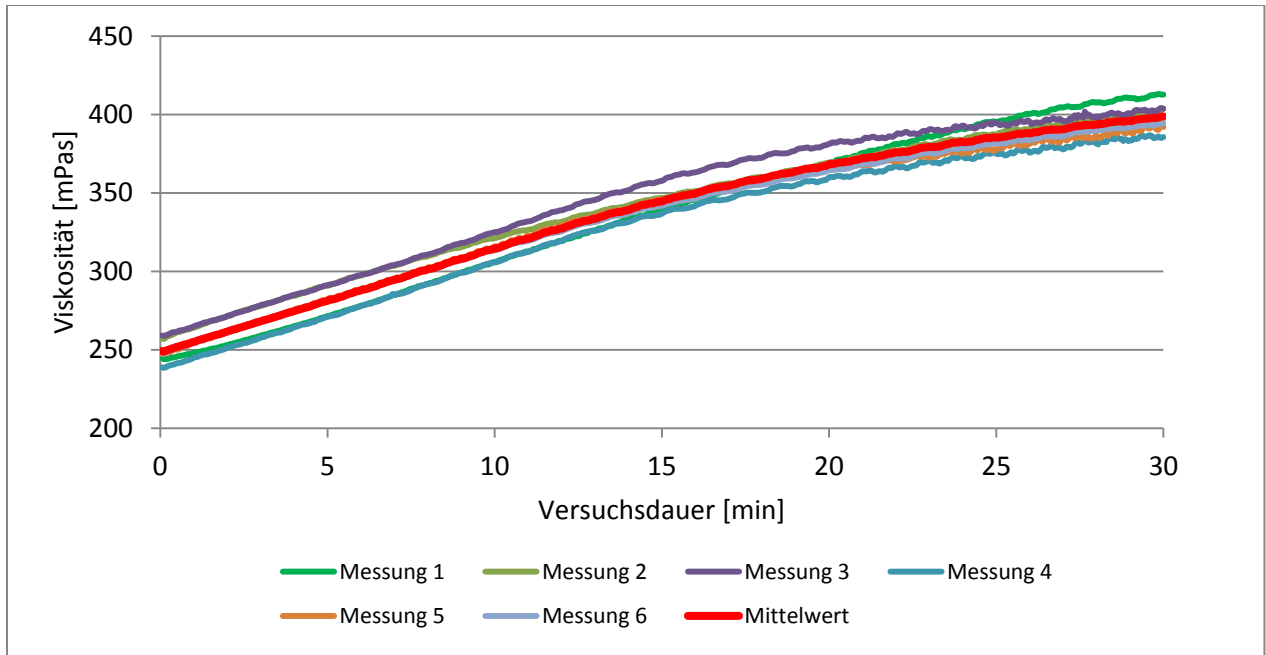
Von den fünf im Anschluss an die Literaturrecherche ausgewählten Injektionsmaterialien eignen sich prinzipiell alle zur Injektion von Wegsamkeiten mit Öffnungsweiten von unter 150 µm im Bereich der Kontaktfuge. Jedoch lässt sich auch festhalten, dass sich nicht alle Injektionsmaterialien gleichermaßen eignen und dass bei Injektionen mit unterschiedlichen Zielstellungen unterschiedliche der oben genannten Injektionsmaterialien eine Eignung

aufweisen und nicht eines für alle Aufgabenstellungen verwendet werden kann. Um die Anwendungsmöglichkeiten und Einsatzbereiche der Injektionsmaterialien noch detaillierter betrachten zu können, auch hinsichtlich der bei der Injektion einzusetzenden Drücke, sind weiterführende Untersuchungen nötig. Dazu gehören unter anderem die Untersuchungen der Partikelgrößenverteilungen in Suspension sowie der Haftzugfestigkeit der Injektionsmaterialien im Kontakt mit Salzbeton, Magnesiabinder und Steinsalz sowie weitere Untersuchungen zur Rheologie.

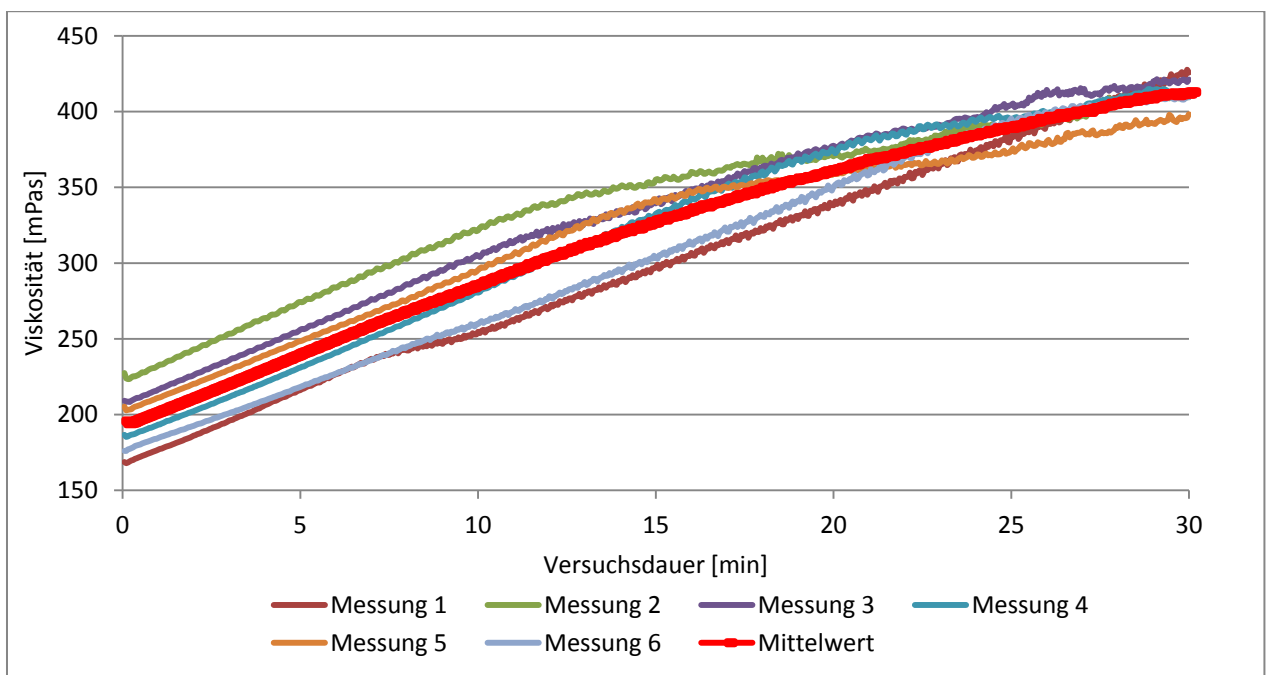
Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von IM 4+ bei 30° C.....	179
Anhang 2: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von IM 4+ bei 40° C.....	179
Anhang 3: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C.....	180
Anhang 4: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C.....	180
Anhang 5: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung der mit 90% NaCl gesättigter Lösung angemischter Ultrafin 12 Suspension bei 30° C.....	181
Anhang 6: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung der mit 90% NaCl gesättigter Lösung angemischter Ultrafin 12 Suspension bei 40° C.....	181
Anhang 7: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C.....	182
Anhang 8: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Wasserglas bei 30° C.....	182
Anhang 9: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Wasserglas bei 40° C.....	183
Anhang 10: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Denepox 40 bei 30° C.....	183
Anhang 11: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Denepox 40 bei 40° C.....	184
Anhang 12: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 bei 30 °C.....	185
Anhang 13: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 bei 40 °C.....	185
Anhang 14: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 mit 90% NaCl-gesättigter Lösung bei 30 °C.....	186
Anhang 15: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 mit 90% NaCl-gesättigter Lösung bei 40 °C.....	186
Anhang 16: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von IM 4+ bei 30 °C.....	187
Anhang 17: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von IM 4+ bei 40 °C.....	187
Anhang 18: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Wasserglas 37/40 bei 30 °C.....	188
Anhang 19: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Wasserglas 37/40 bei 40 °C.....	188
Anhang 20: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Denepox 40 bei 30 °C.....	189
Anhang 21: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Denepox 40 bei 40 °C.....	189
Anhang 22: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung des 2K-Bitumens bei 30 °C.....	190
Anhang 23: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.	191
Anhang 24: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	191
Anhang 25: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.	192
Anhang 26: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	192
Anhang 27: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.	193
Anhang 28: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	193
Anhang 29: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.	194

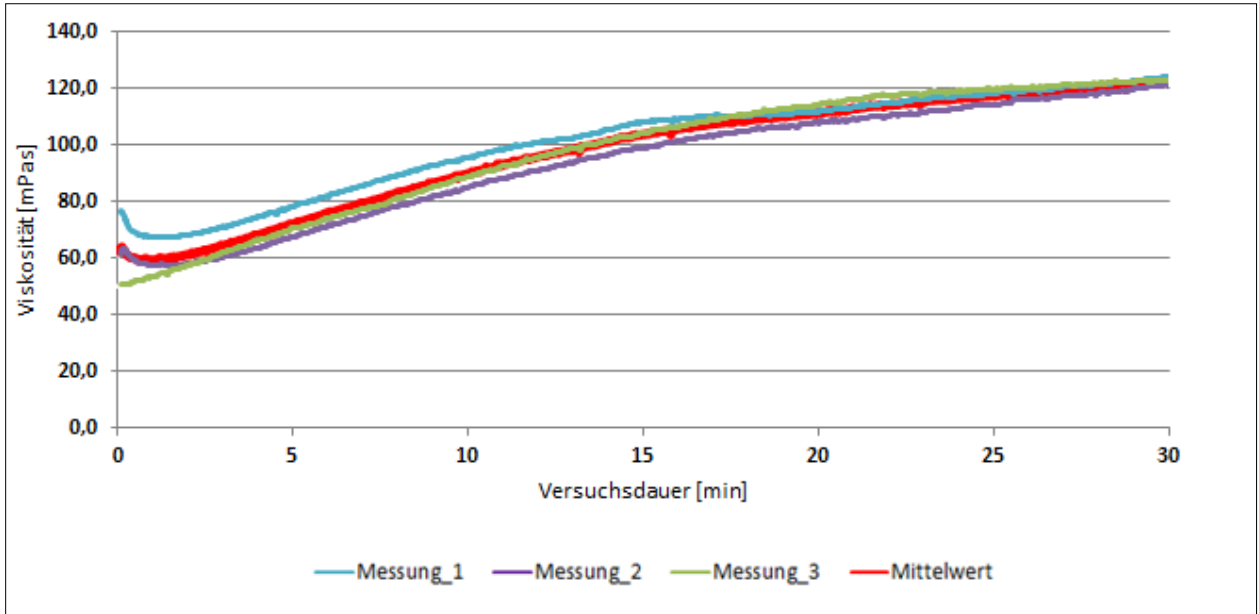
Anhang 30: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	194
Anhang 31: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 30° C.	195
Anhang 32: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	195
Anhang 33: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 40° C.	196
Anhang 34: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	196
Anhang 35: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.	197
Anhang 36: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	197
Anhang 37: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.	198
Anhang 38: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	198
Anhang 39: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.	199
Anhang 40: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.	199
Anhang 41: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem Injektionsharz Denepox 40 bei 30° und 40° C.	200
Anhang 42: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem Feinstmagnesiabinder IM 4+ bei 30° und 40° C.	200
Anhang 43: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem 2K-Bitumen bei 30° und 40° C.	201
Anhang 44: Porenweitenverteilungen der drei Messungen entlang der Injektionsleitung des mit Wasserglas injizierten Sandsteinblocks (7,5_1 / 7,5_2 /15) sowie die die Kontrollmessungen der nicht injizierten Bereiche der drei Sandsteinblöcke.	202
Anhang 45: Porenweitenverteilungen der drei Messungen entlang der Injektionsleitung des mit Ultrafin 12 injizierten Sandsteinblocks (7,5_1 / 7,5_2 /15) sowie die die Kontrollmessungen der nicht injizierten Bereiche der drei Sandsteinblöcke.	203



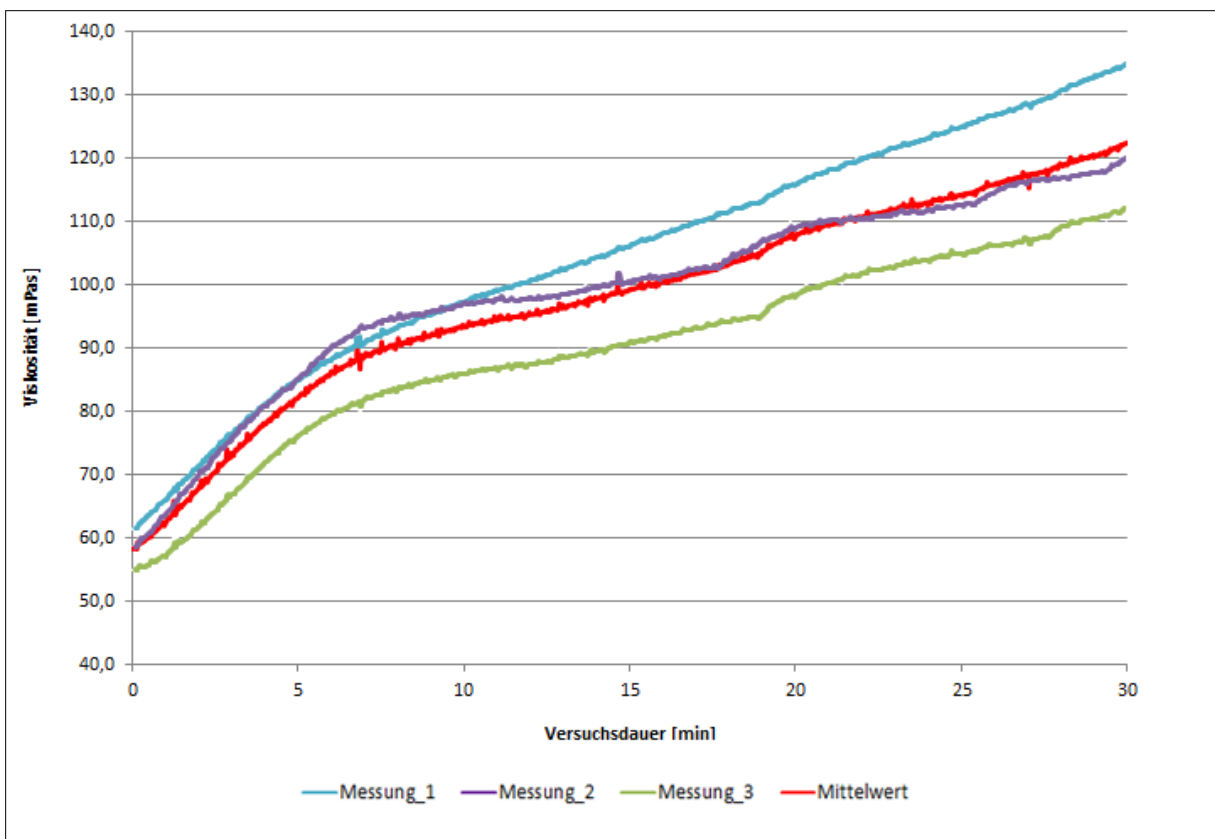
Anhang 1: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von IM 4+ bei 30° C



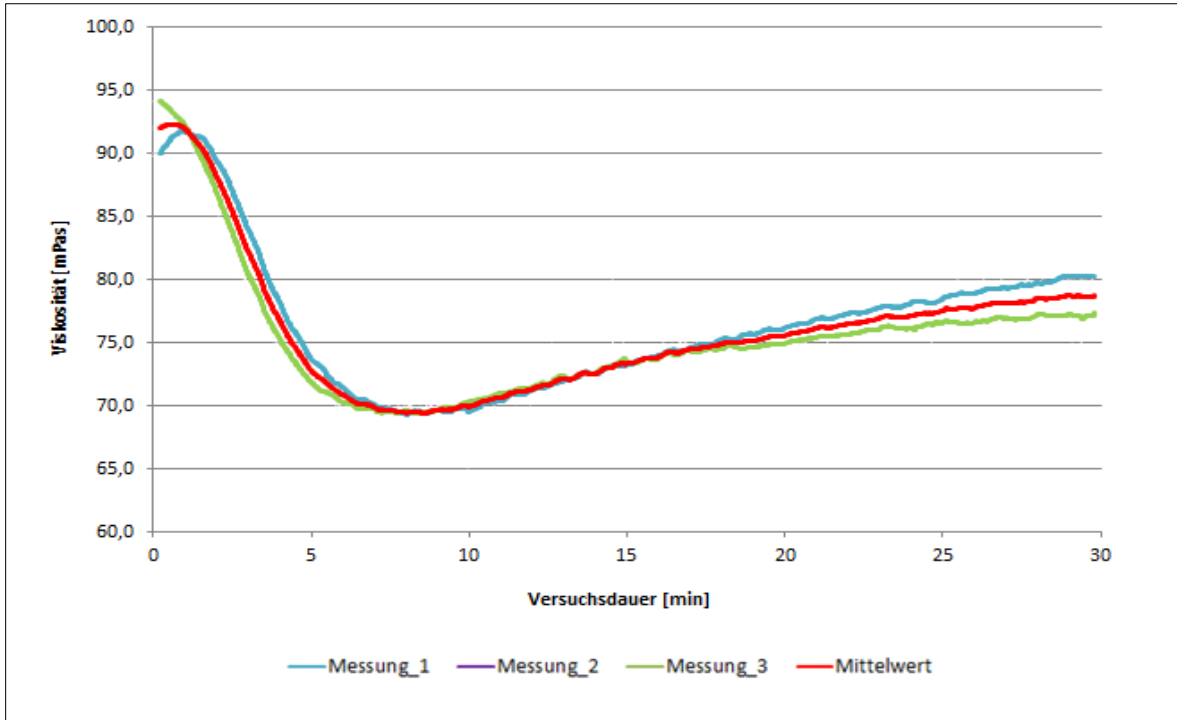
Anhang 2: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von IM 4+ bei 40° C



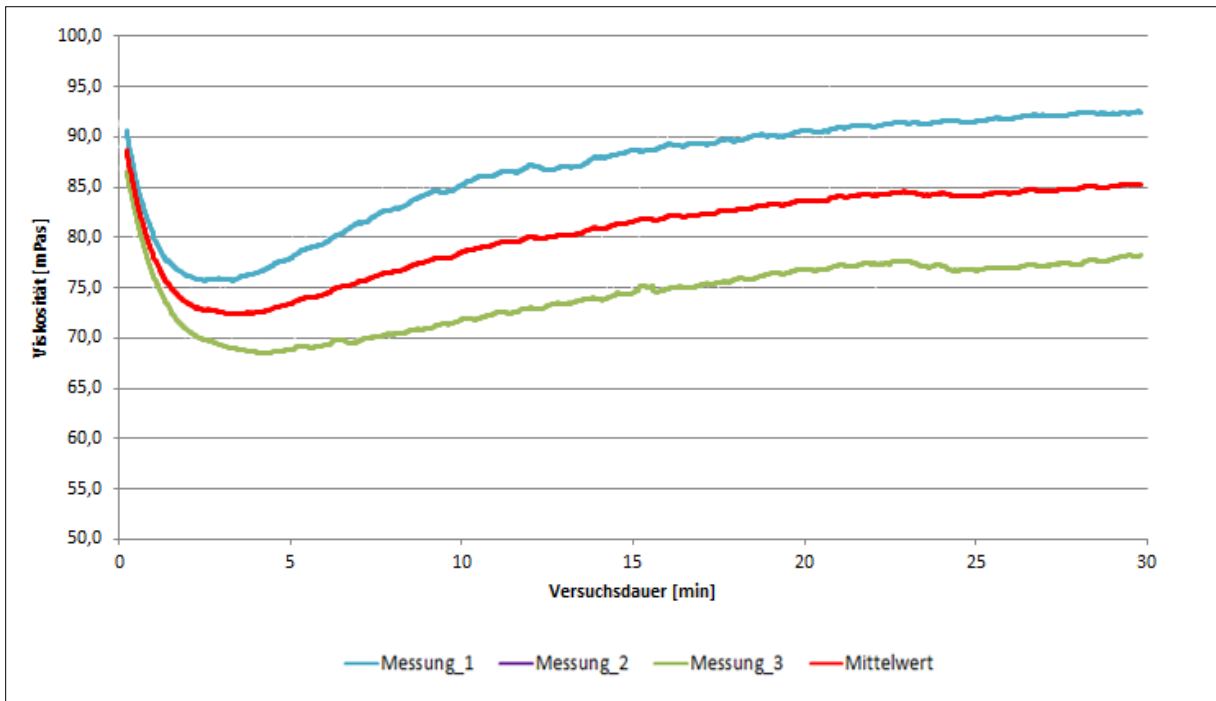
Anhang 3: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C



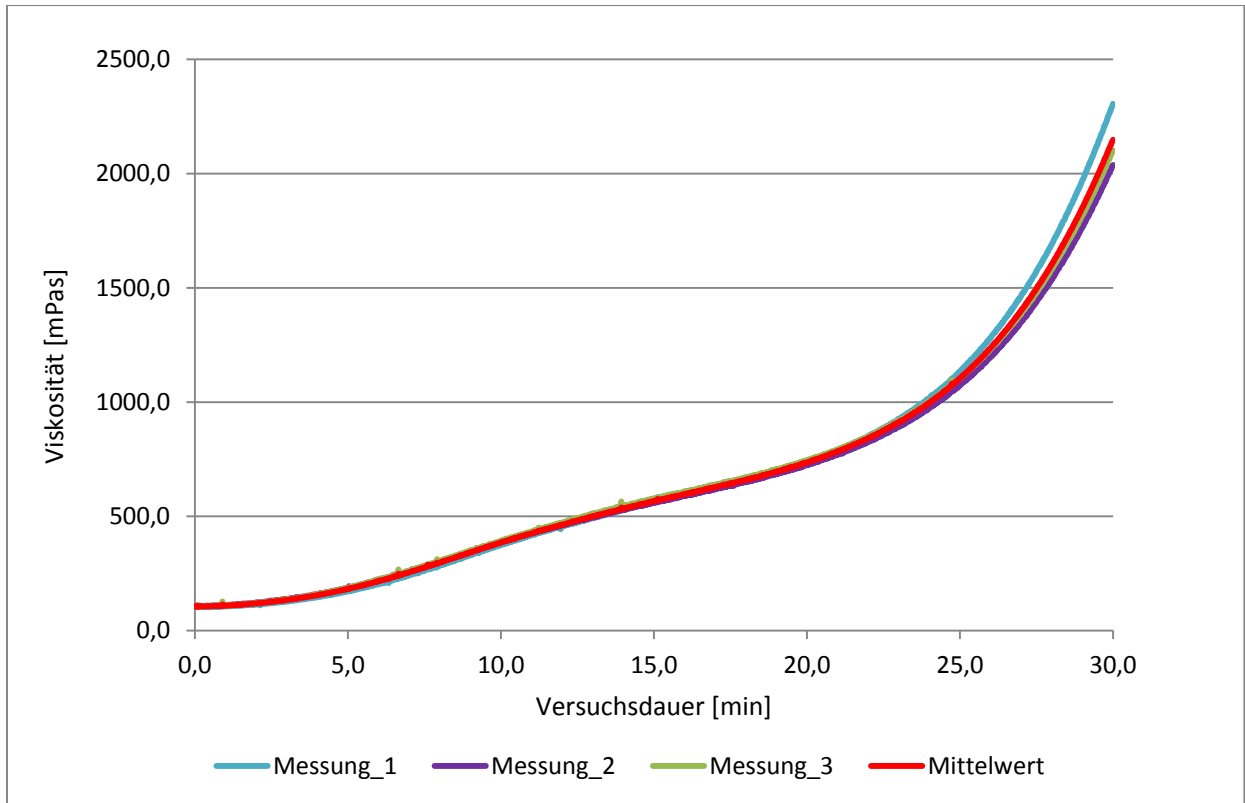
Anhang 4: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C



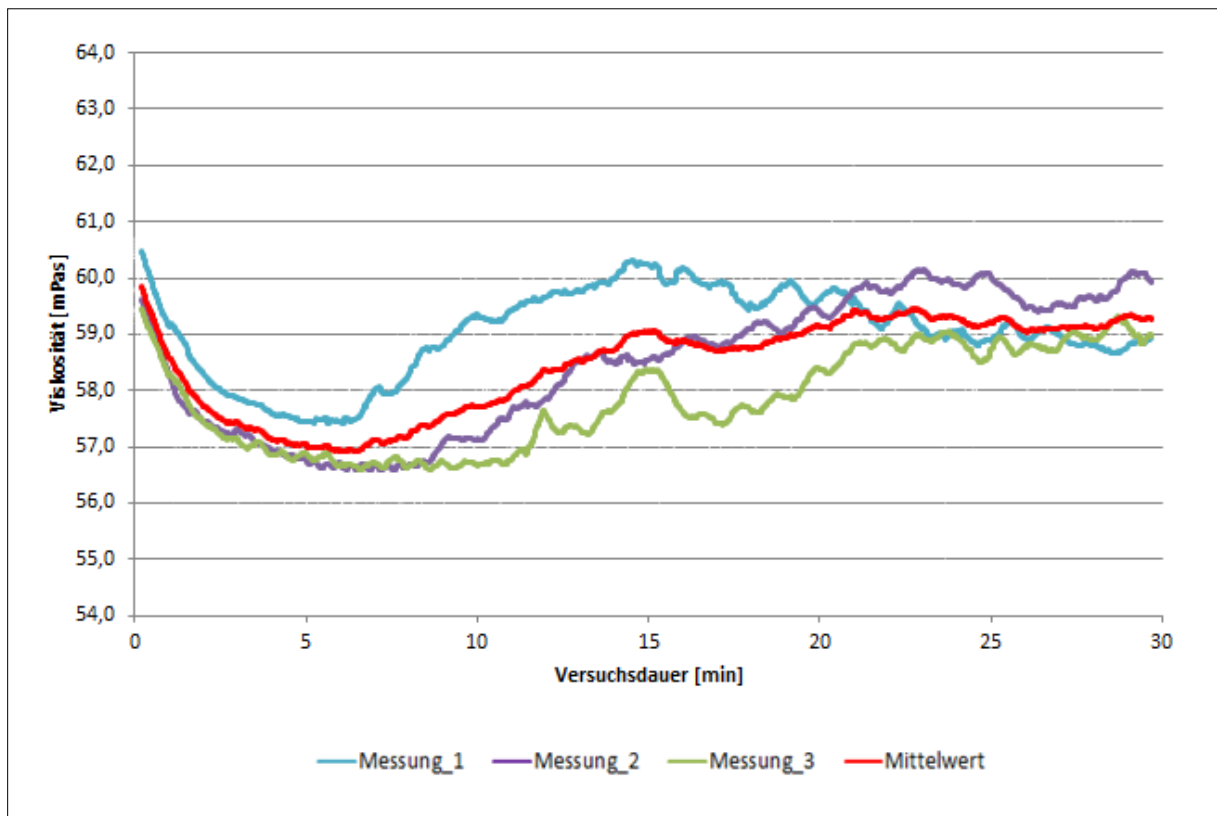
Anhang 5: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung der mit 90% NaCl gesättigter Lösung angemischter Ultrafin 12 Suspension bei 30° C



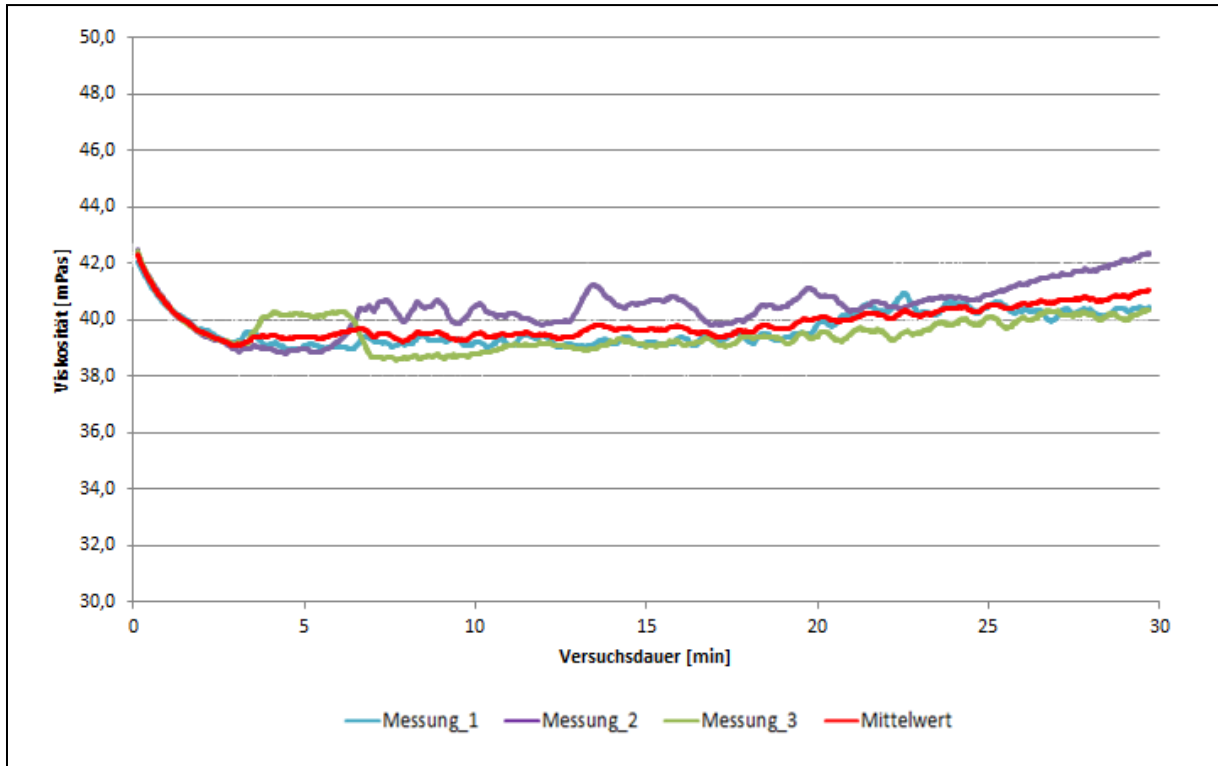
Anhang 6: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung der mit 90% NaCl gesättigter Lösung angemischter Ultrafin 12 Suspension bei 40° C



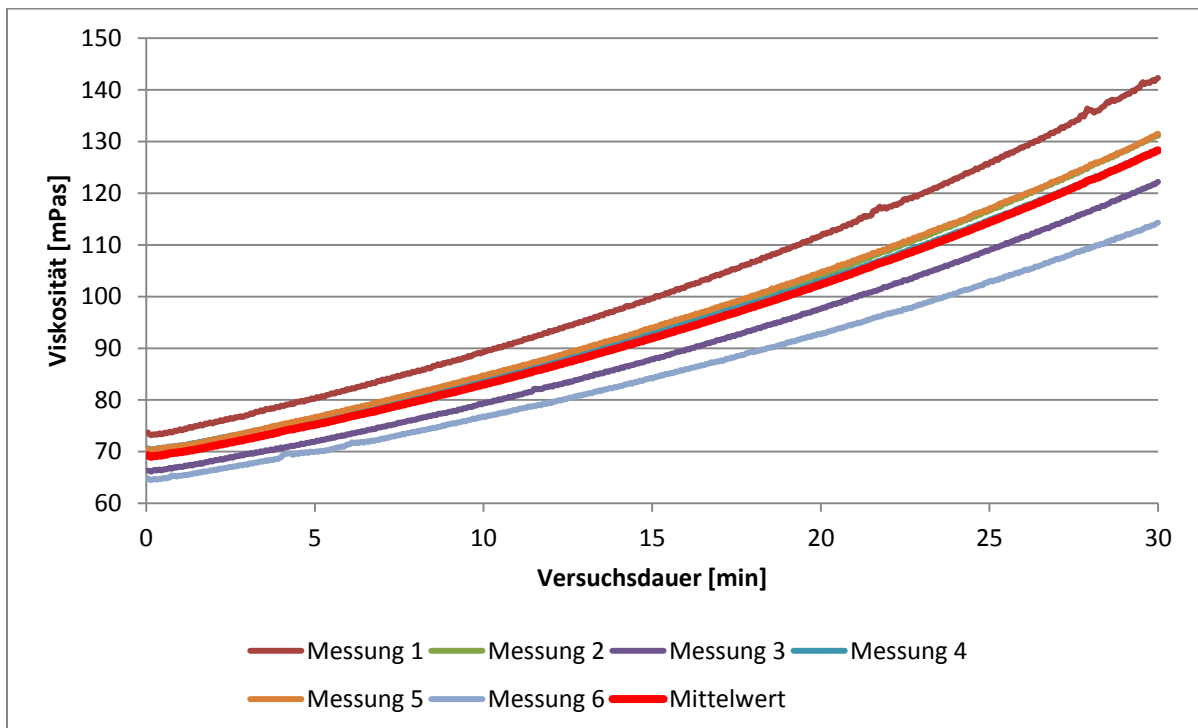
Anhang 7: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C



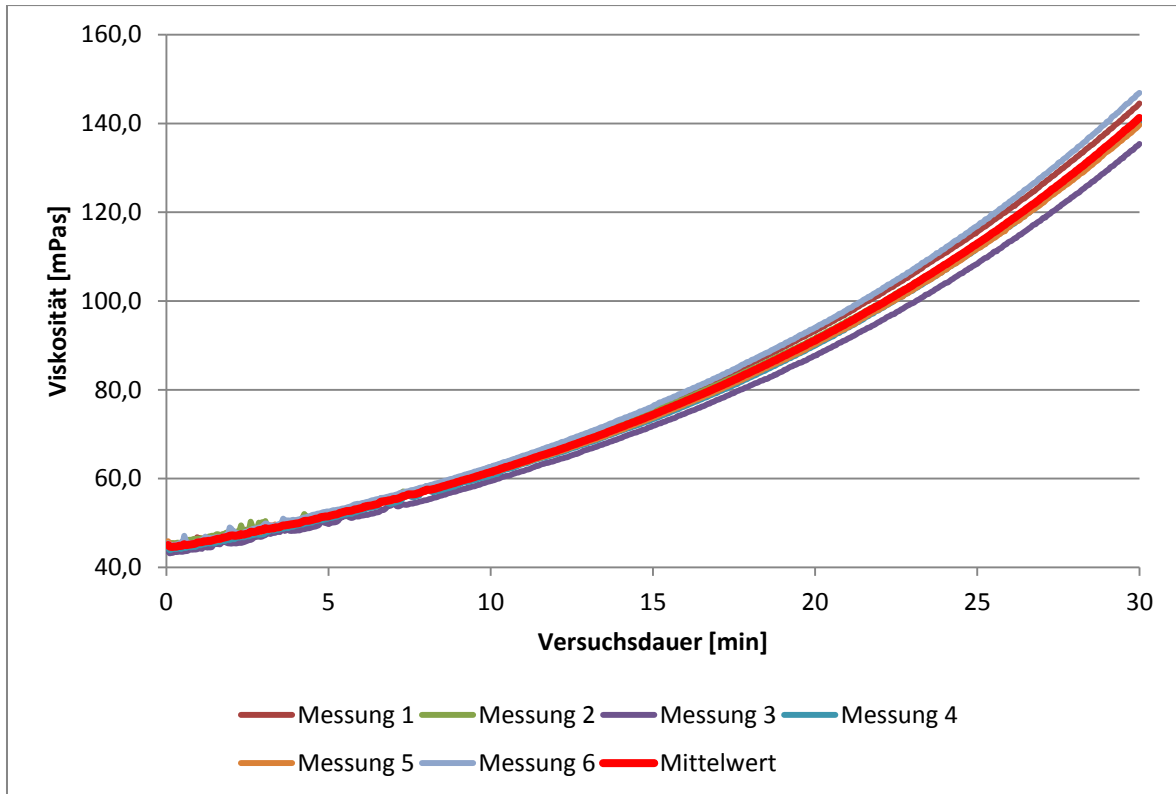
Anhang 8: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Wasserglas bei 30° C



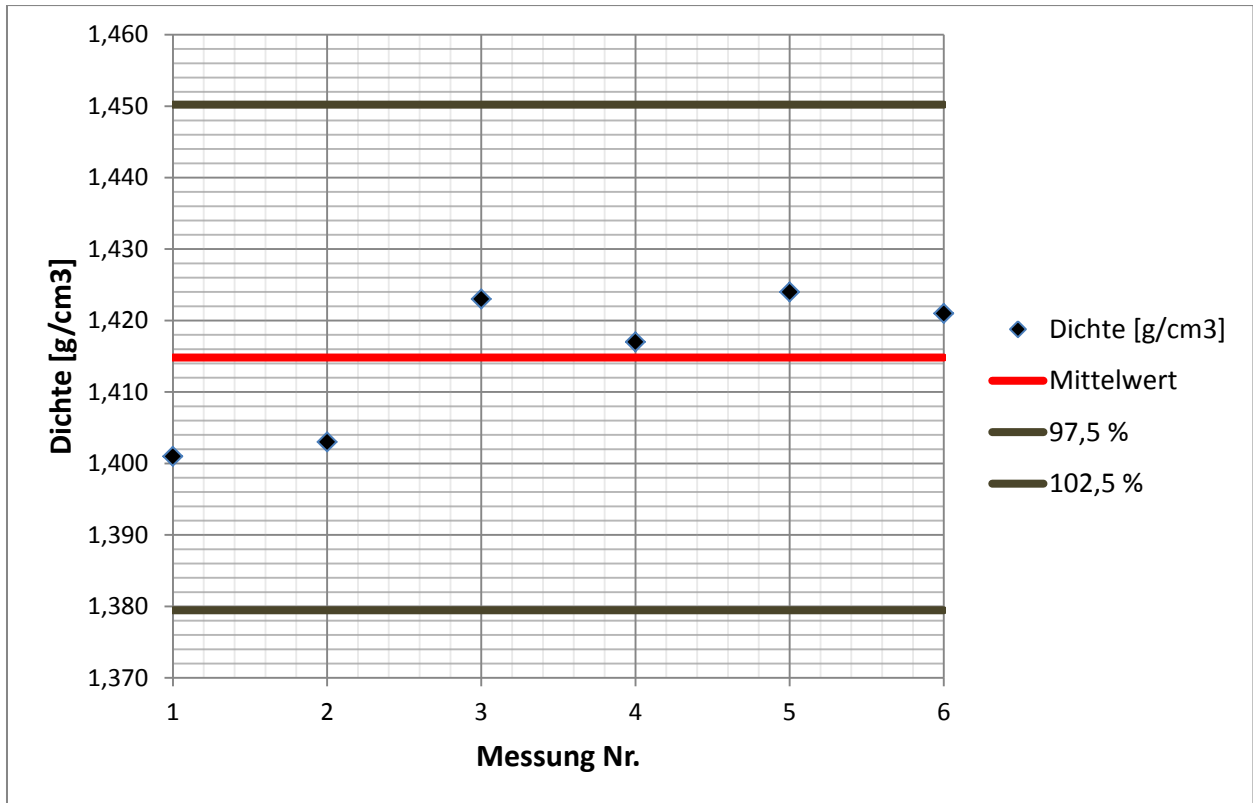
Anhang 9: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Wasserglas bei 40° C



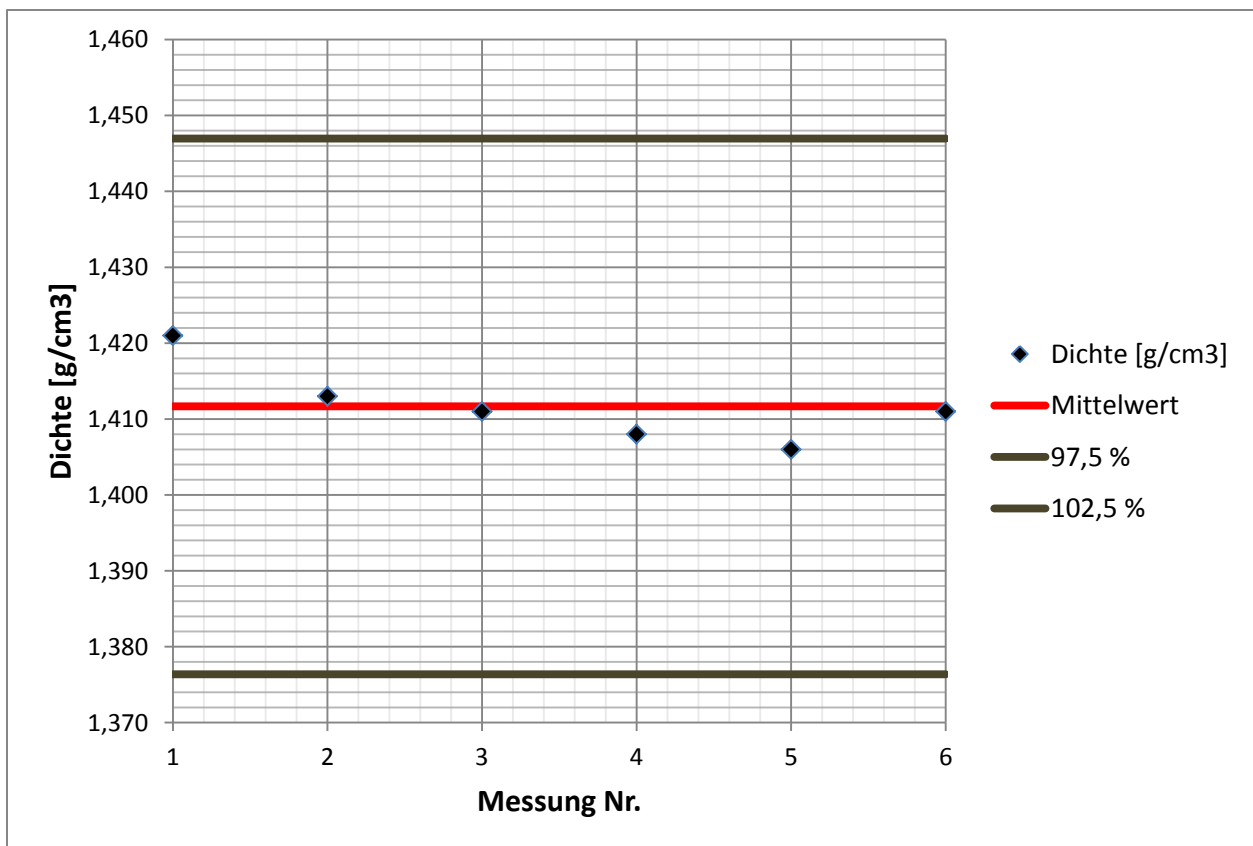
Anhang 10: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Denepox 40 bei 30° C



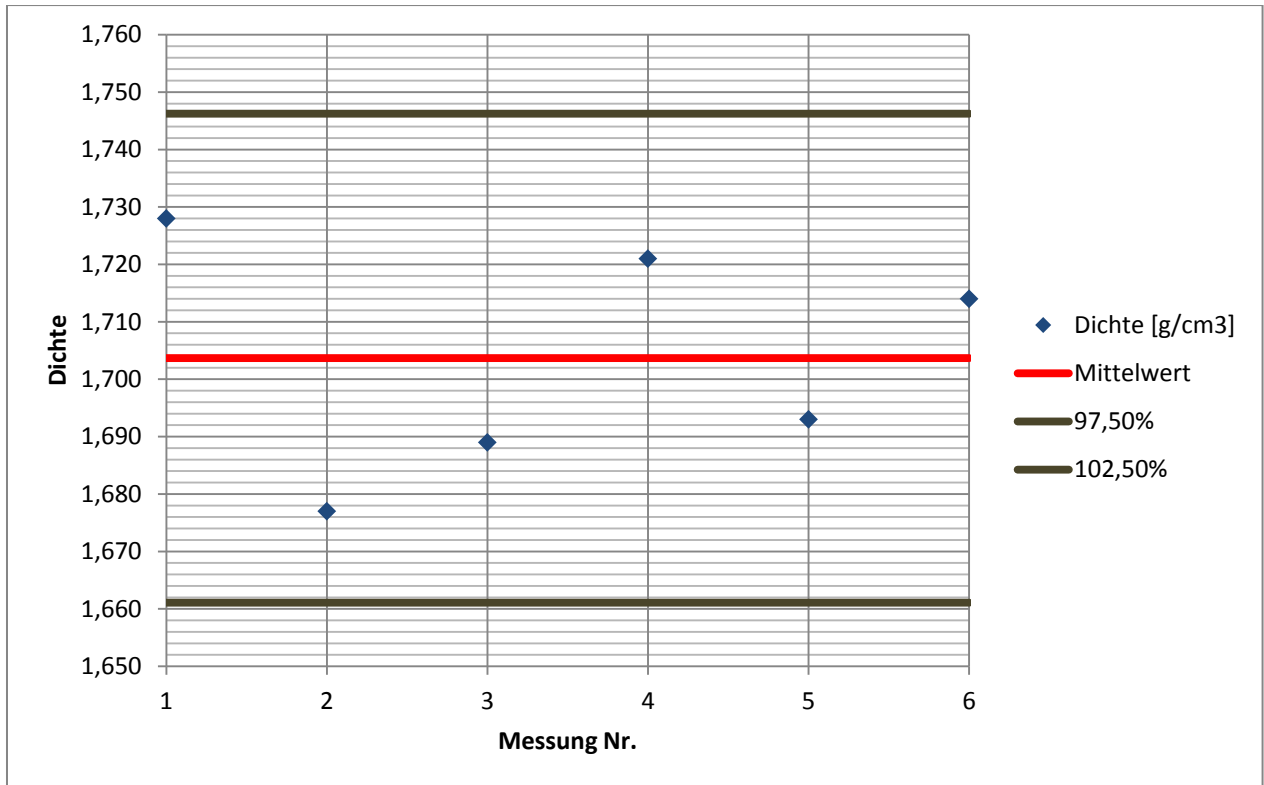
Anhang 11: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Denepox 40 bei 40° C



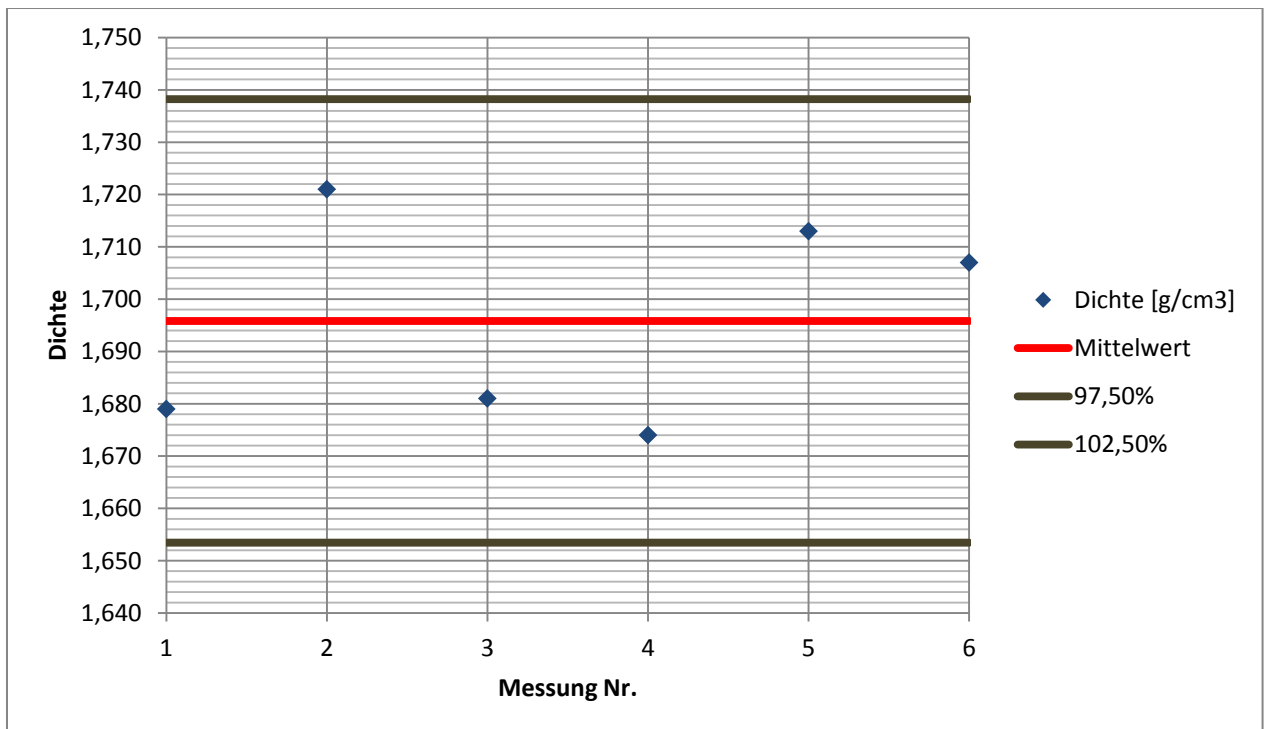
Anhang 12: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 bei 30 °C



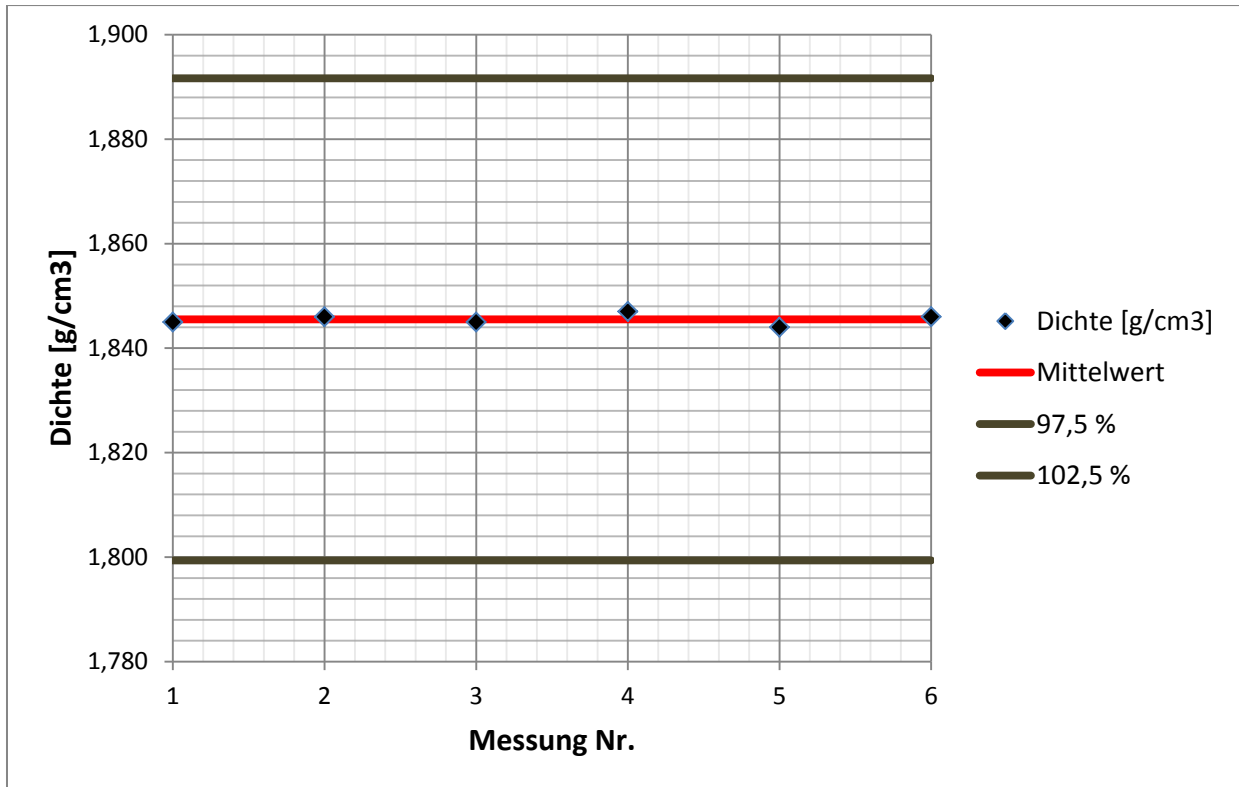
Anhang 13: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 bei 40 °C.



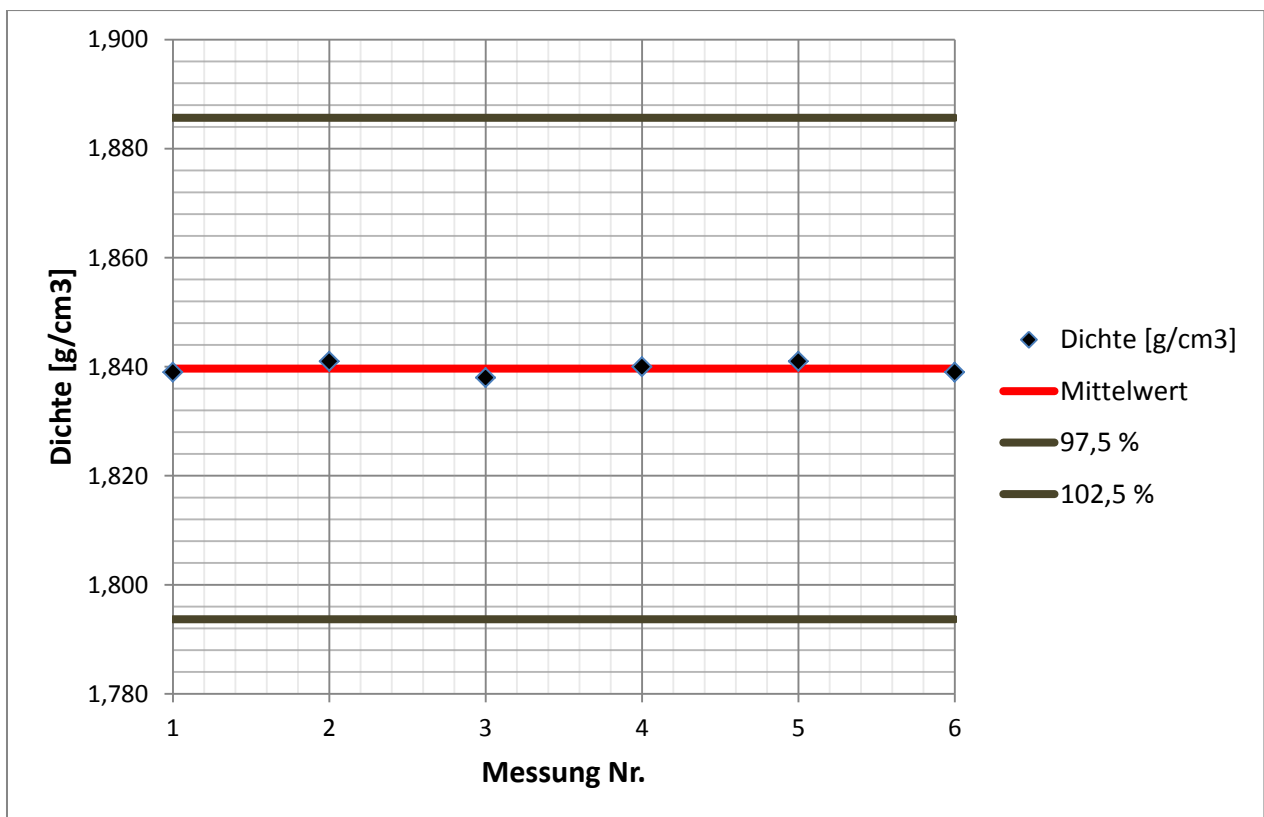
Anhang 14: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 mit 90% NaCl-gesättigter Lösung bei 30 °C.



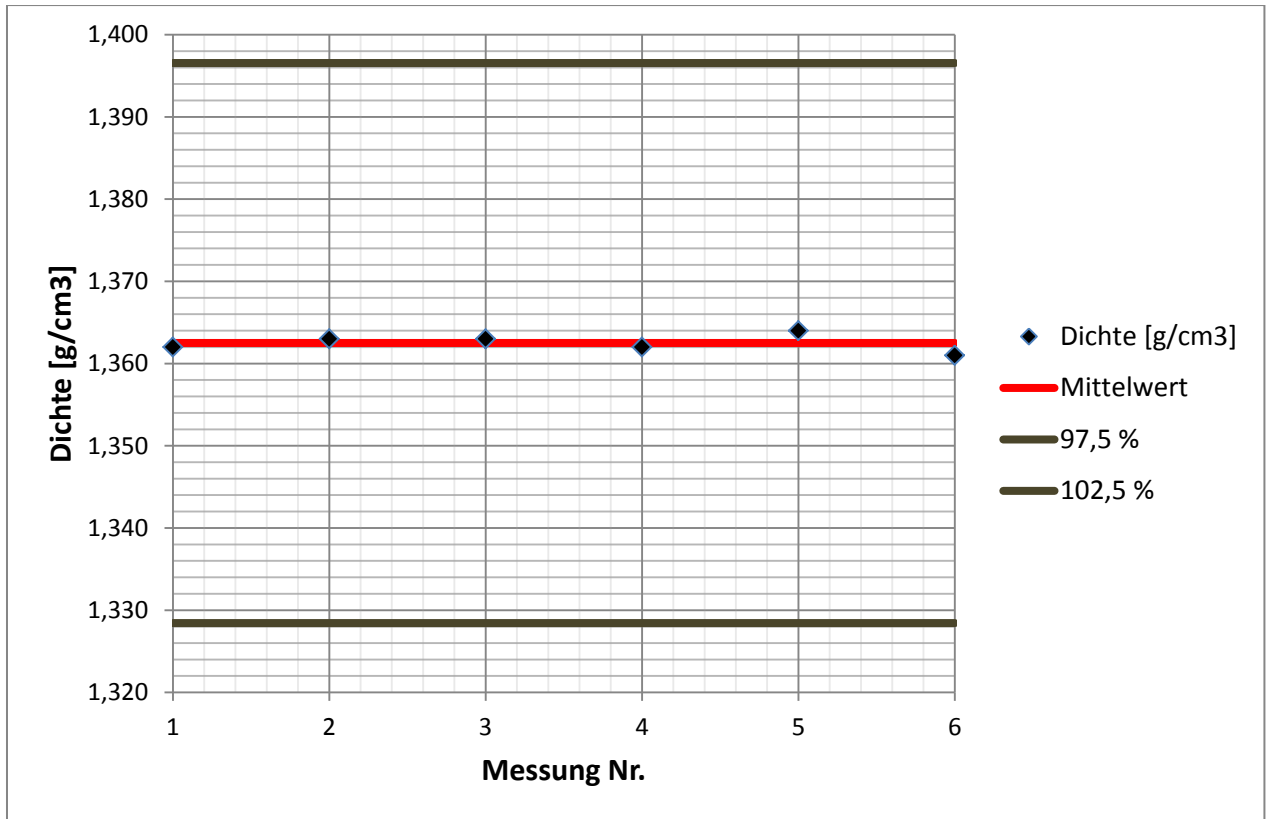
Anhang 15: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 mit 90% NaCl-gesättigter Lösung bei 40 °C.



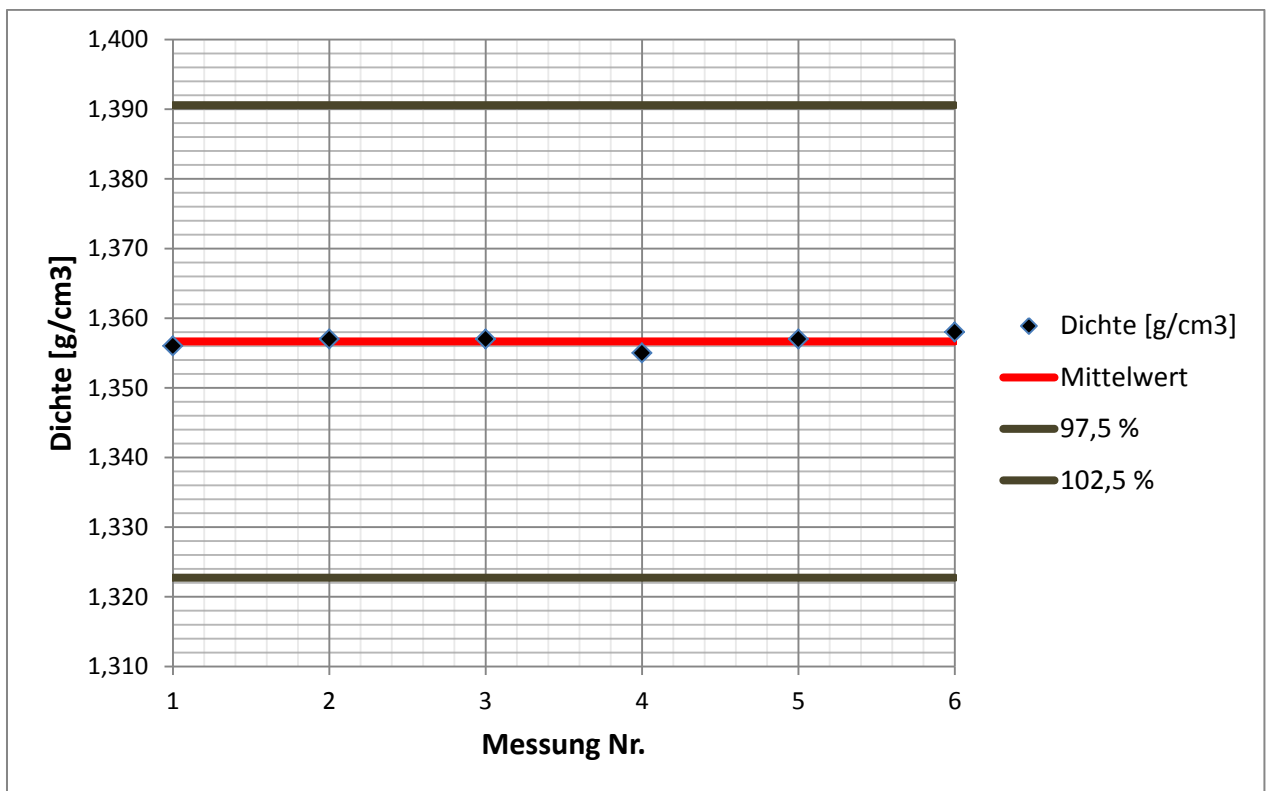
Anhang 16: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von IM 4+ bei 30 °C.



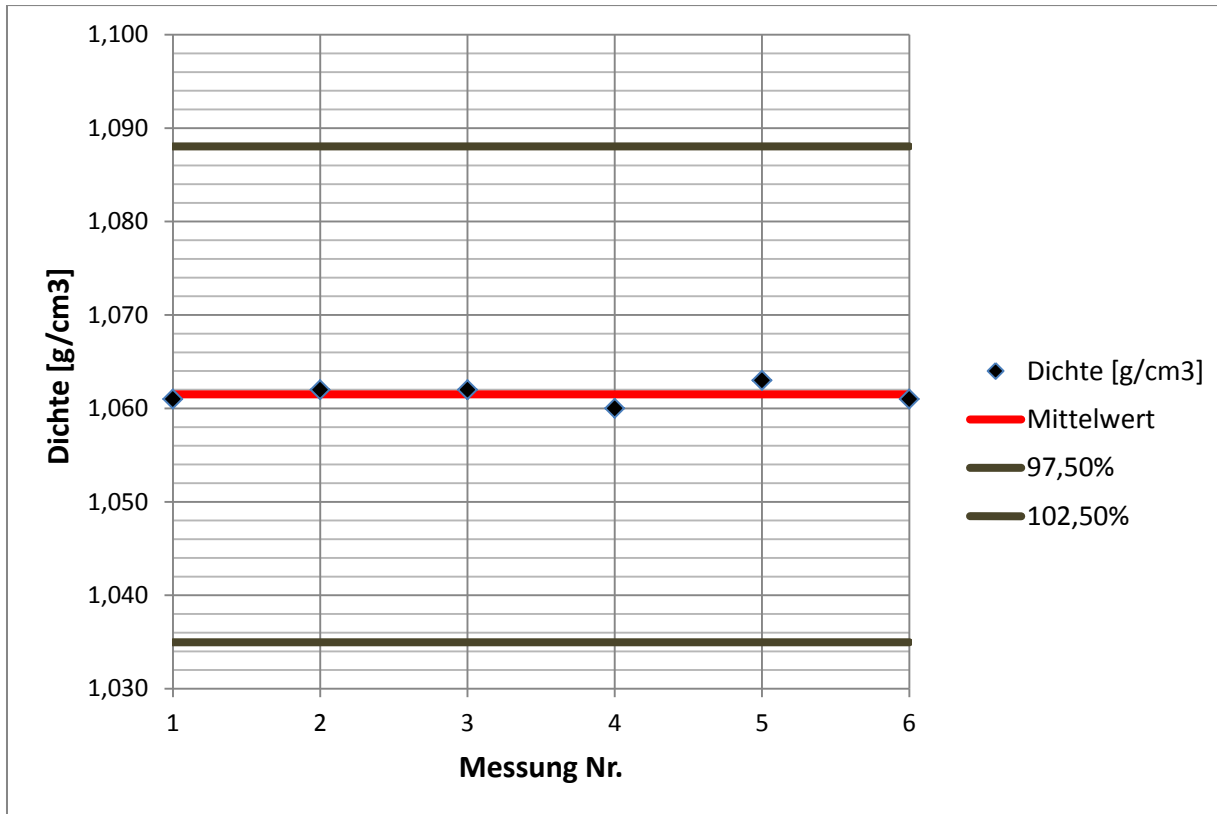
Anhang 17: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von IM 4+ bei 40 °C.



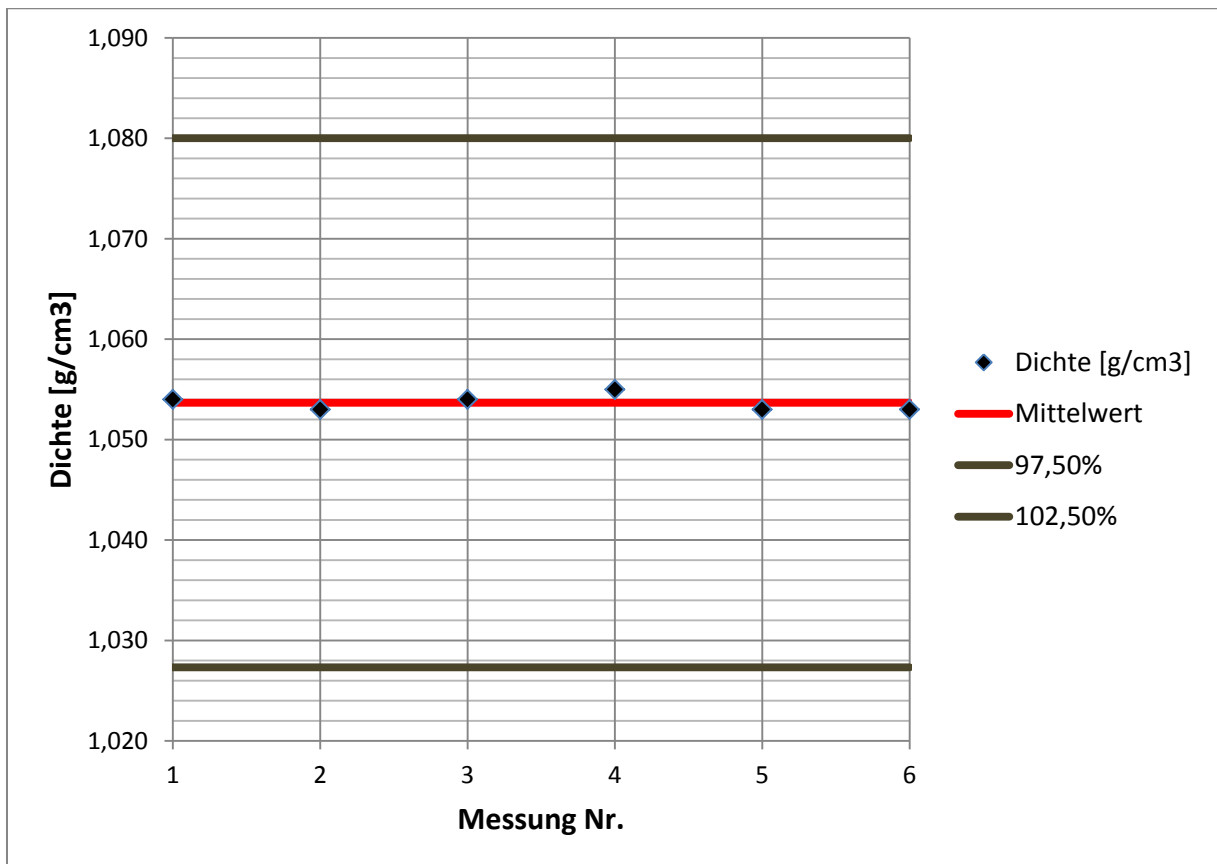
Anhang 18: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Wasserglas 37/40 bei 30 °C



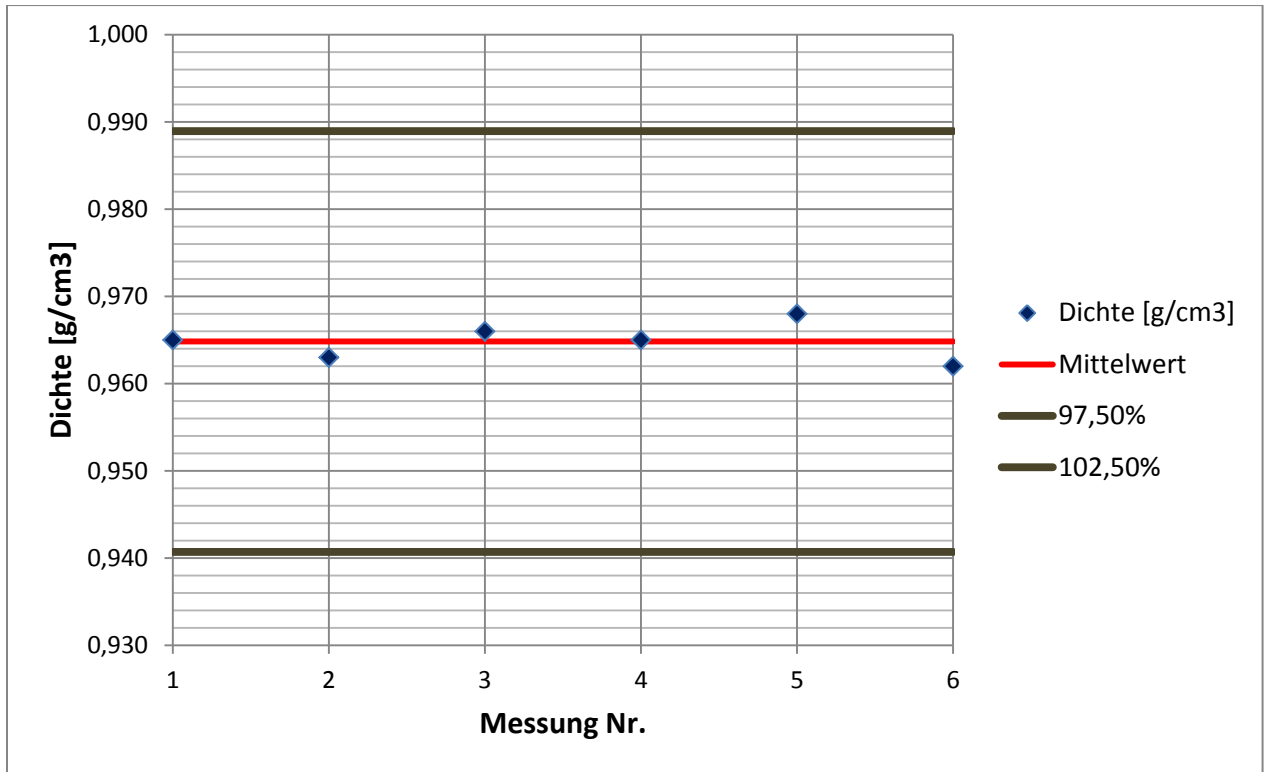
Anhang 19: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Wasserglas 37/40 bei 40 °C



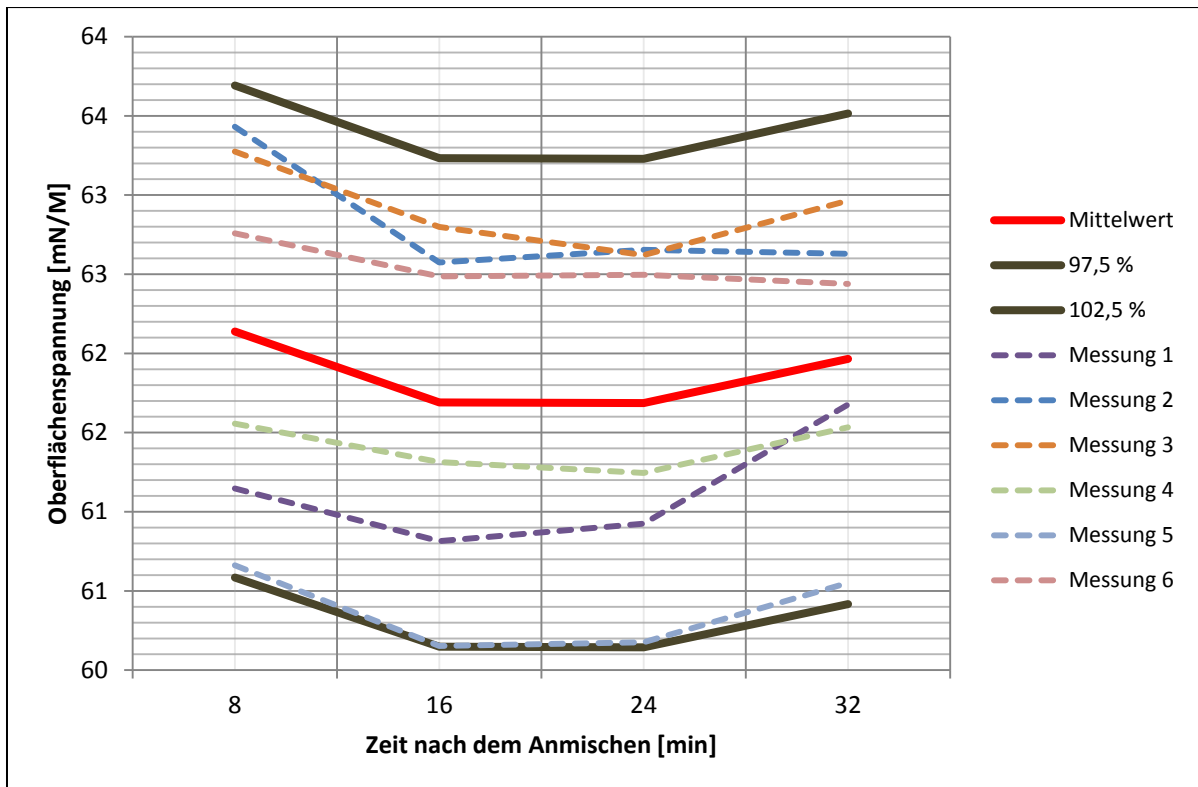
Anhang 20: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Denepox 40 bei 30 °C



Anhang 21: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Denepox 40 bei 40 °C



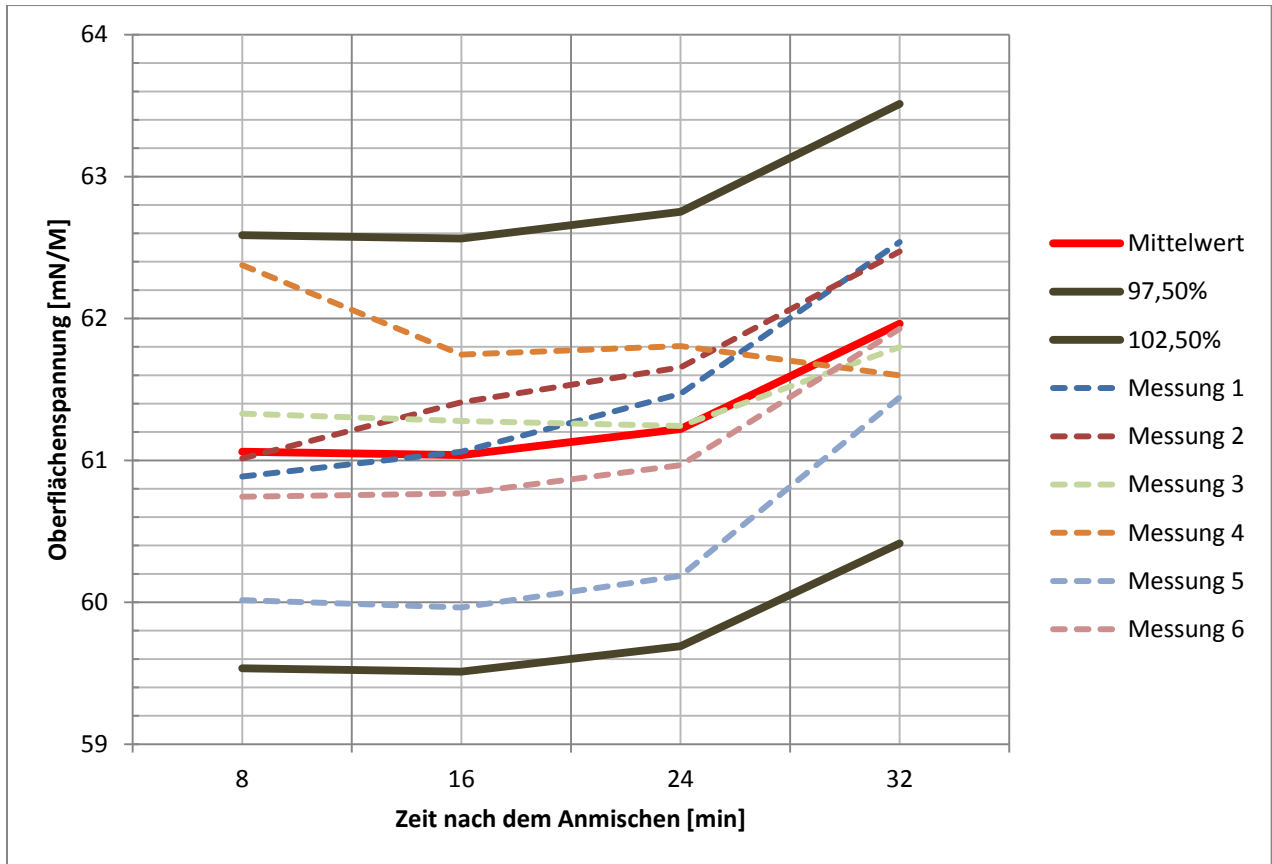
Anhang 22: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung des 2K-Bitumens bei 30 °C



Anhang 23: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächenspannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	62,138	± 0,019	30,19° C	± 0,02
16	61,690	± 0,019	30,23° C	± 0,02
24	61,686	± 0,019	30,14° C	± 0,02
32	61,966	± 0,019	30,09° C	± 0,02

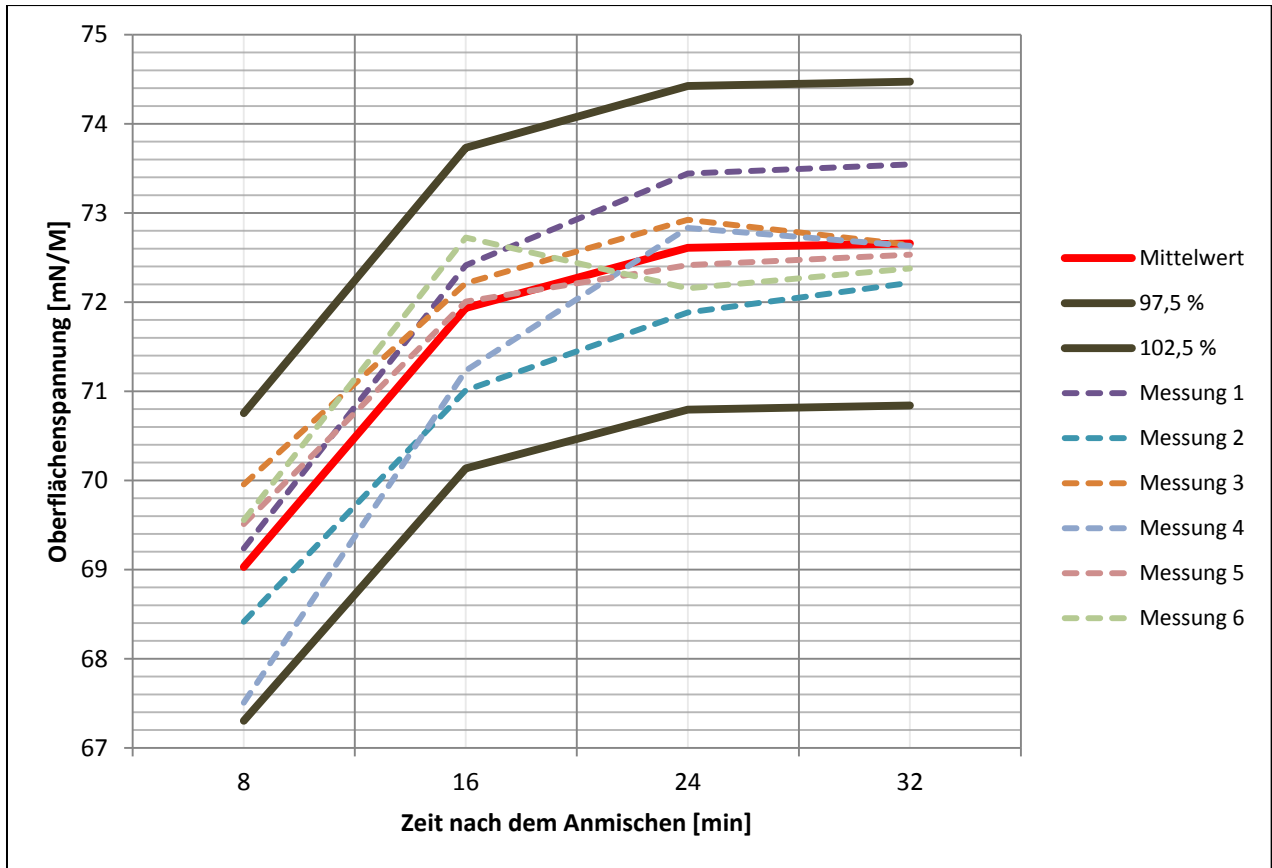
Anhang 24: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 25: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächenspannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	61,061	± 0,019	40,13° C	± 0,02
16	61,037	± 0,021	40,12 ° C	± 0,02
24	61,221	± 0,019	40,15 ° C	± 0,02
32	61,963	± 0,019	40,08 ° C	± 0,02

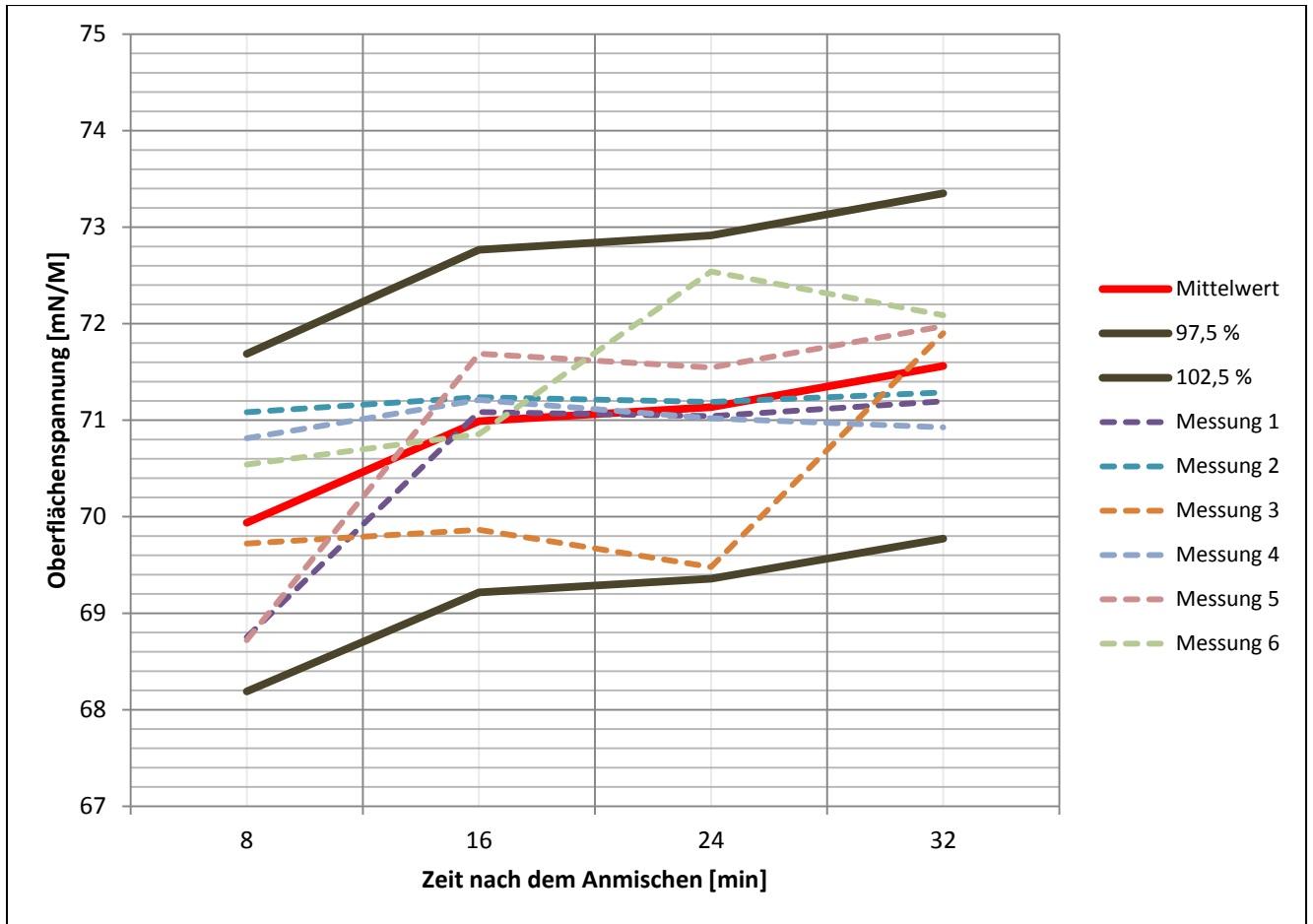
Anhang 26: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 27: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächenspannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	69,030	± 0,019	30,18 ° C	± 0,02
16	71,934	± 0,019	30,09 ° C	± 0,02
24	72,609	± 0,019	30,15 ° C	± 0,02
32	72,657	± 0,019	30,18 ° C	± 0,02

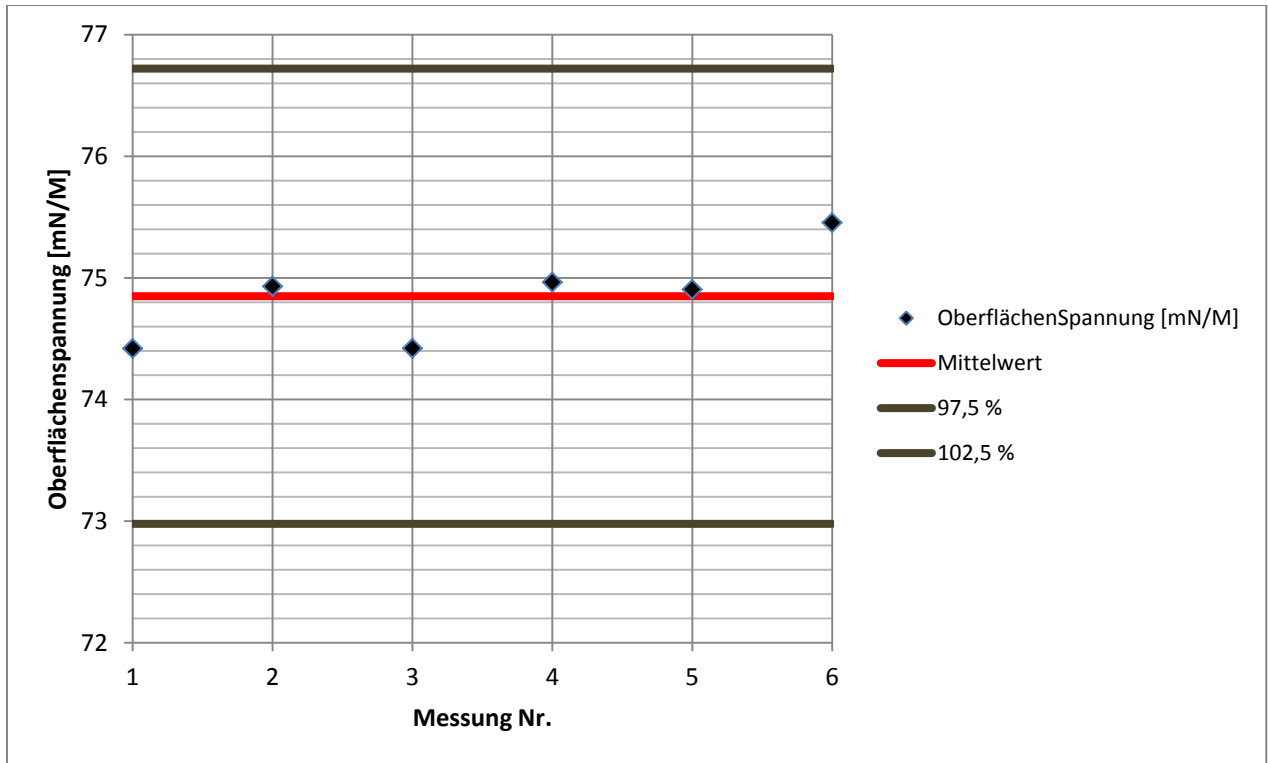
Anhang 28: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 29: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächenspannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	69,939	± 0,019	39,79 ° C	± 0,02
16	70,991	± 0,019	40,05 ° C	± 0,02
24	71,136	± 0,019	40,05 ° C	± 0,02
32	71,562	± 0,019	40,09 ° C	± 0,02

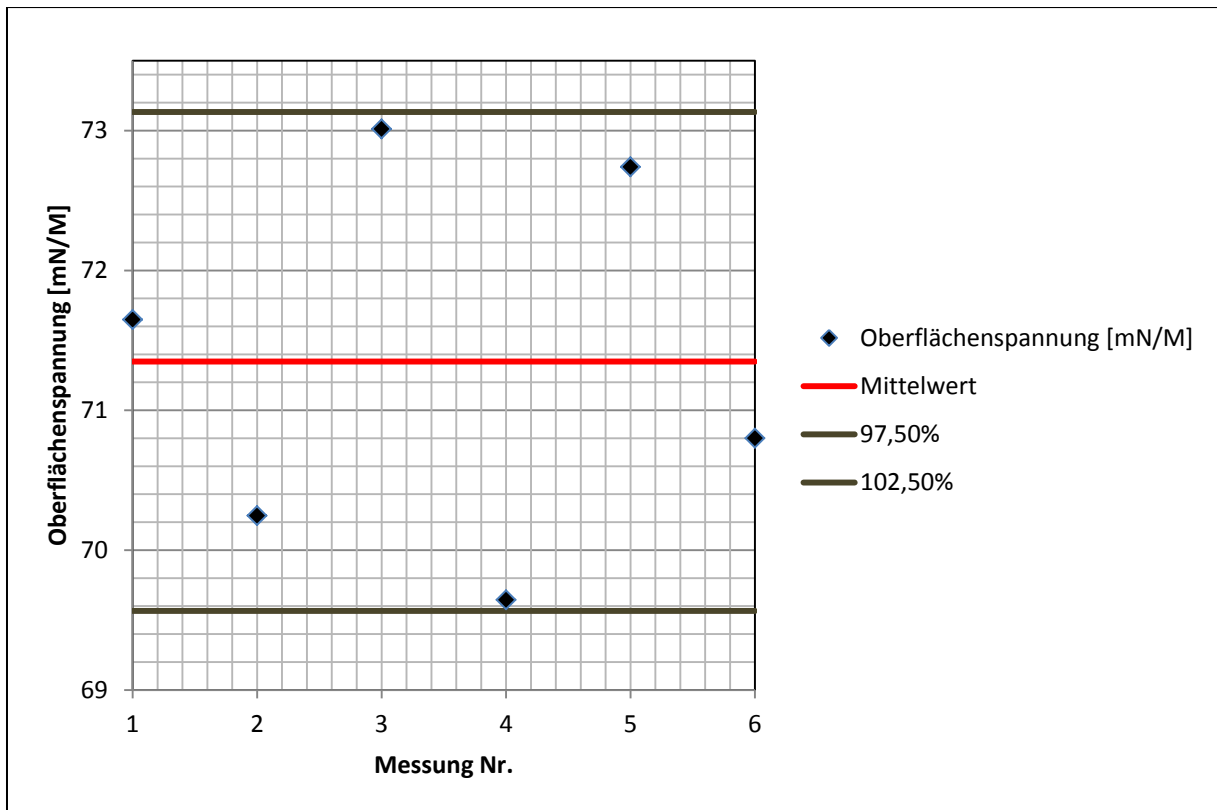
Anhang 30: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 31: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 30° C.

Messung Nr.	Oberflächenspannung	Abweichung	Temperatur	Abweichung
1	74,420	± 0,016	29,87	± 0,03
2	74,930	± 0,014	30,09	± 0,02
3	74,421	± 0,017	30,01	± 0,03
4	74,965	± 0,018	30,11	± 0,01
5	74,906	± 0,017	30,09	± 0,01
6	75,454	± 0,019	30,10	± 0,02
Mittelwert	74,849	± 0,017	30,05	± 0,02

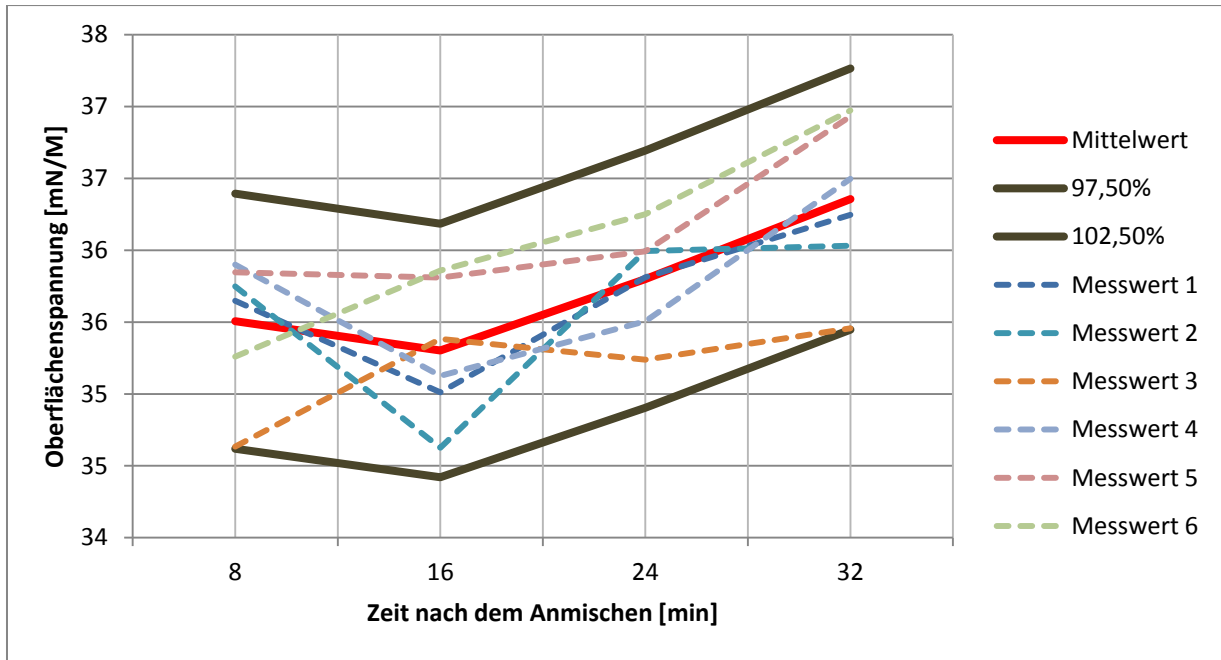
Anhang 32: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 33: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 40° C.

Messung Nr.	Oberflächenspannung	Abweichung	Temperatur	Abweichung
1	71,649	± 0,019	40,17	± 0,02
2	70,247	± 0,019	39,40	± 0,03
3	73,012	± 0,020	39,91	± 0,01
4	69,645	± 0,018	40,49	± 0,02
5	72,741	± 0,018	40,66	± 0,03
6	70,801	± 0,019	39,32	± 0,02
Mittelwert	71,349	± 0,019	40,09	± 0,02

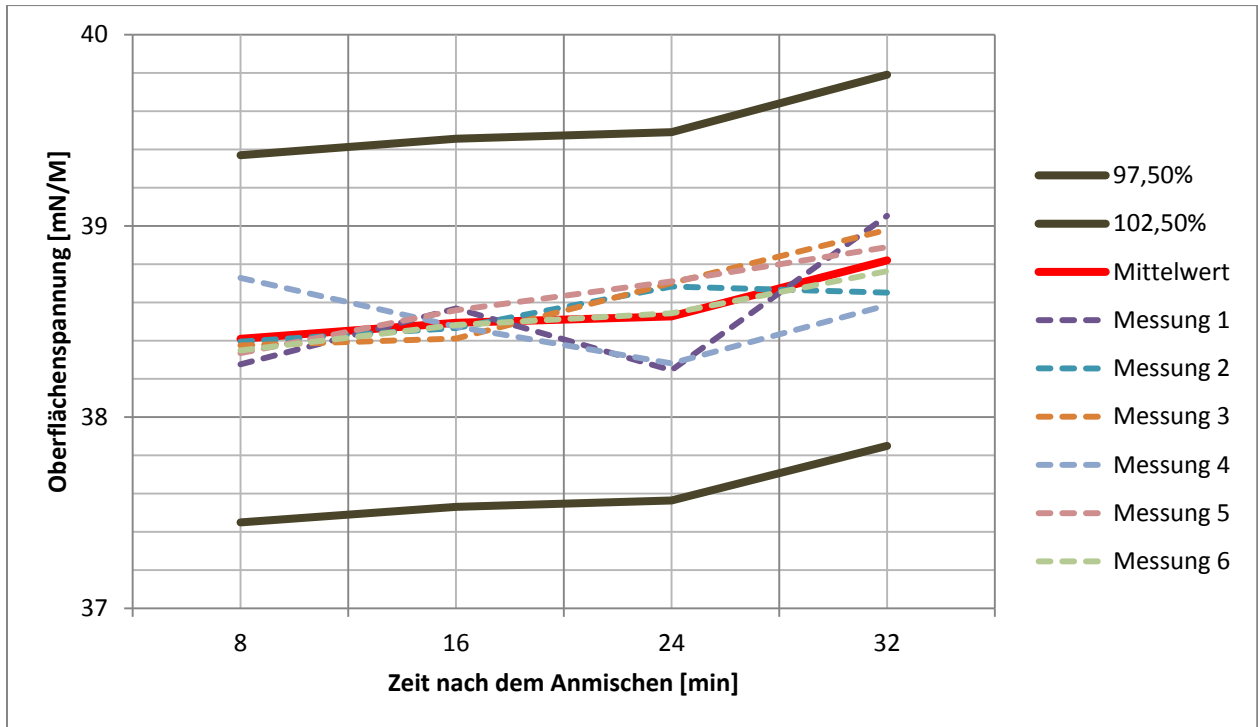
Anhang 34: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannungs- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 35: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächenspannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	35,506	± 0,019	30,31° C	± 0,02
16	35,303	± 0,018	30,33° C	± 0,02
24	35,799	± 0,019	30,36 ° C	± 0,02
32	36,356	± 0,017	30,32 ° C	± 0,02

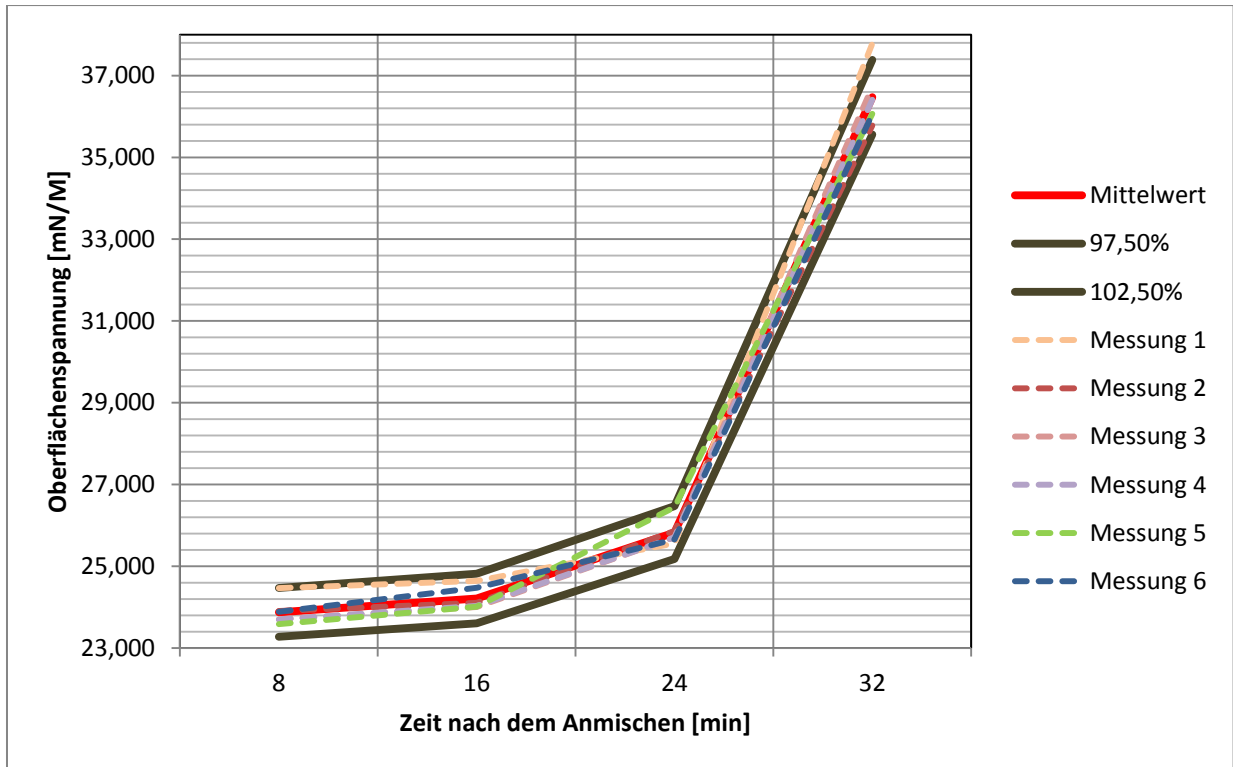
Anhang 36: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 37: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächenspannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	38,410	± 0,019	39,66° C	± 0,02
16	38,493	± 0,019	40,05° C	± 0,02
24	38,527	± 0,019	40,06° C	± 0,02
32	38,820	± 0,019	40,29° C	± 0,02

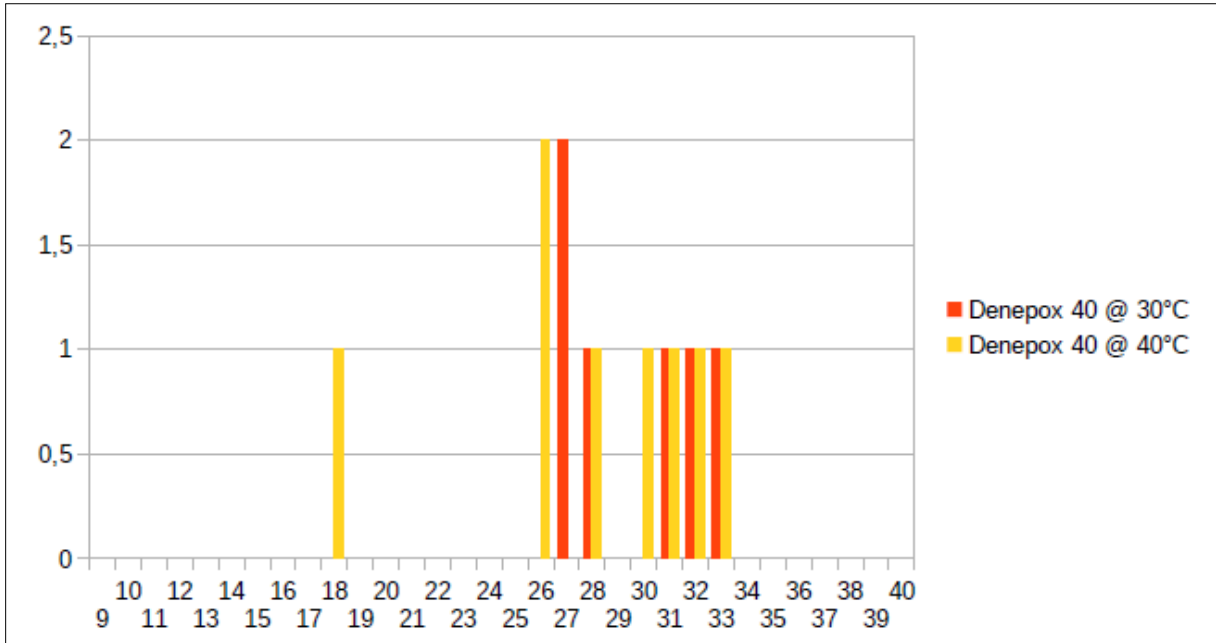
Anhang 38: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



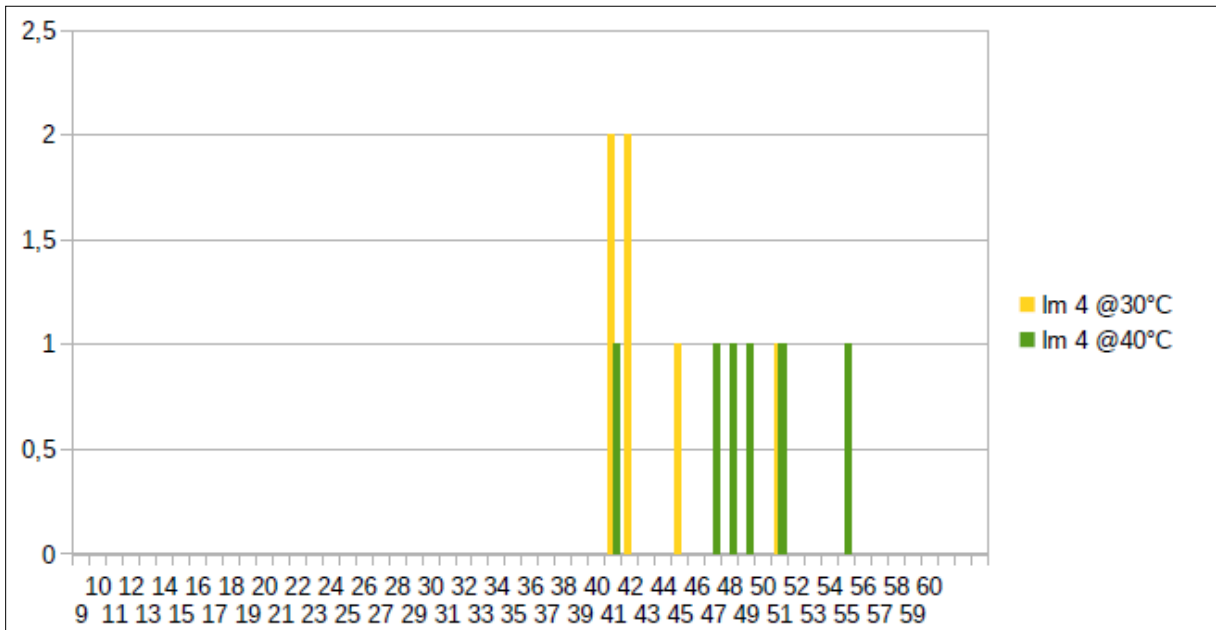
Anhang 39: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächen- spannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	23,876	± 0,019	30,24° C	± 0,02
16	24,213	± 0,020	30,27° C	± 0,02
24	25,824	± 0,019	30,43° C	± 0,02
32	36,470	± 0,018	30,47° C	± 0,02

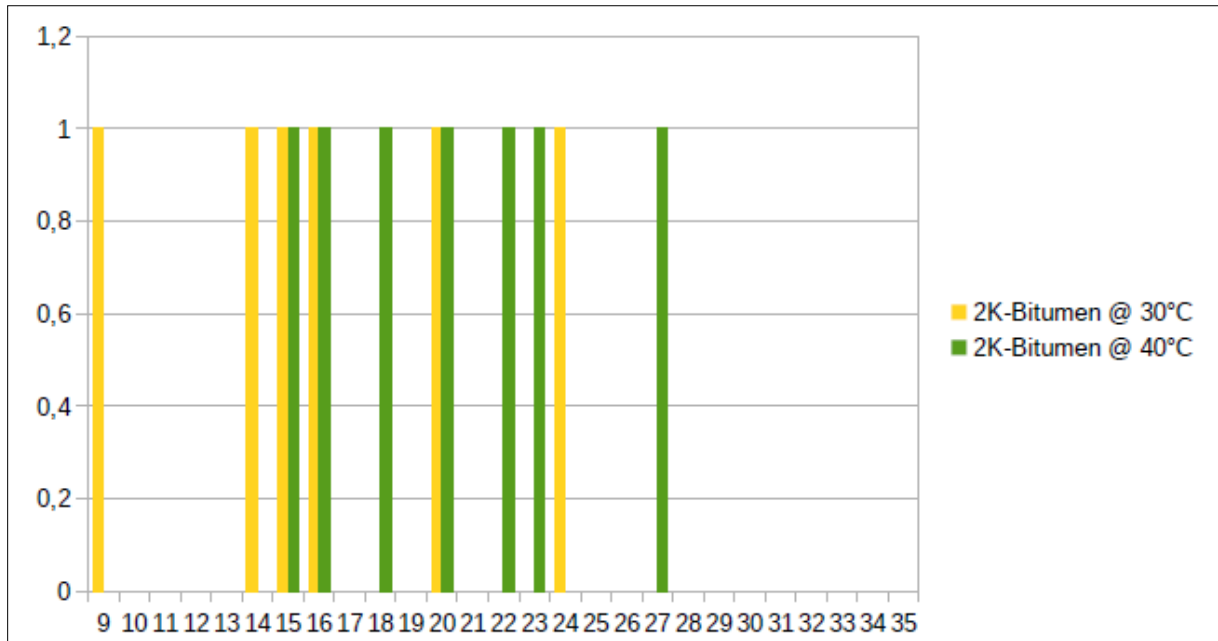
Anhang 40: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



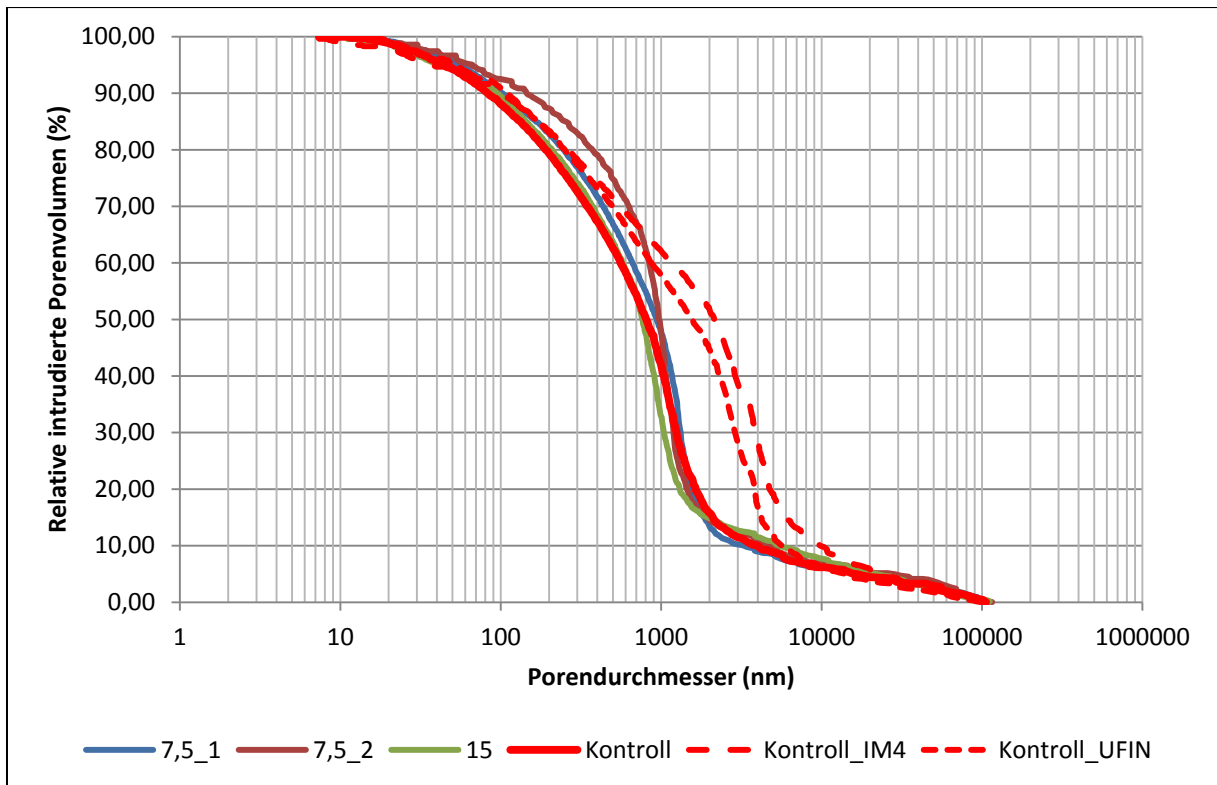
Anhang 41: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem Injektionsharz Denepox 40 bei 30° und 40° C.



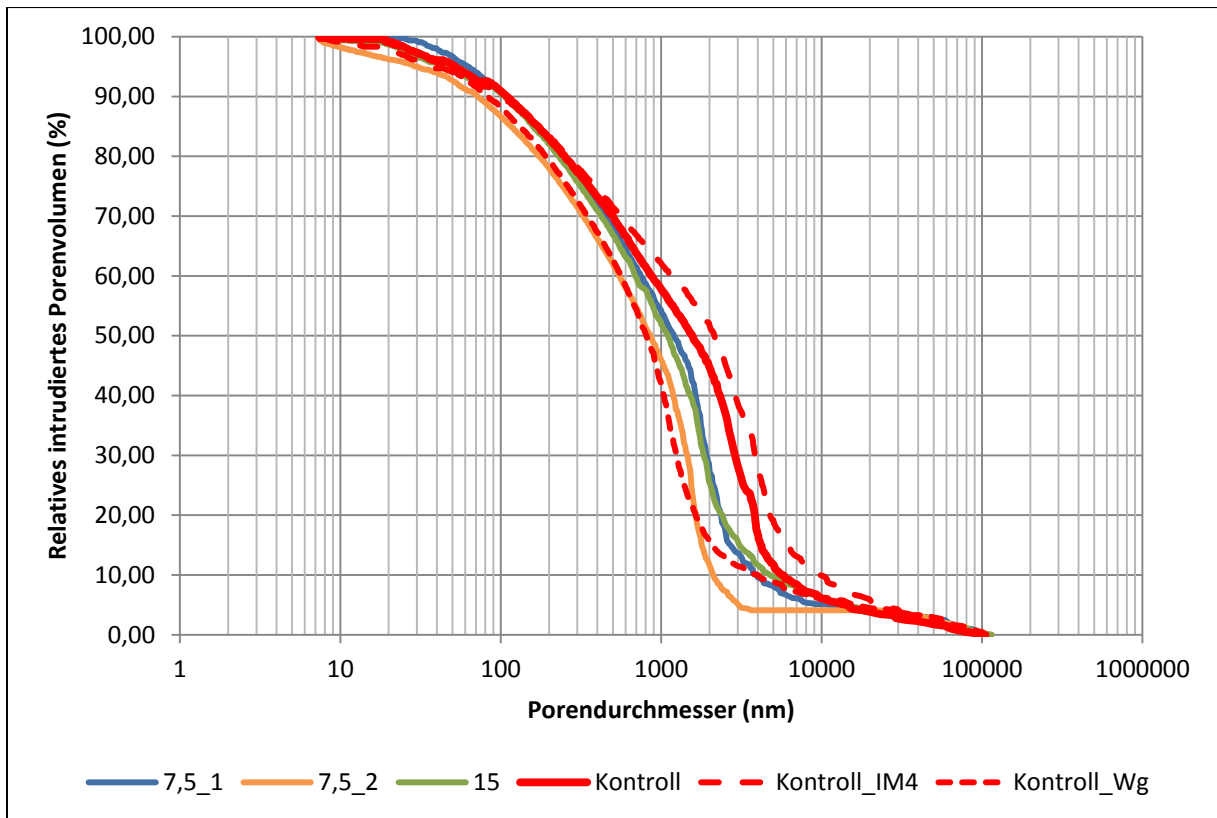
Anhang 42: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem Feinstmagnesiabinder IM 4+ bei 30° und 40° C.



Anhang 43: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem 2K-Bitumen bei 30° und 40° C.



Anhang 44: Porenweitenverteilungen der drei Messungen entlang der Injektionsleitung des mit Wasserglas injizierten Sandsteinblocks (7,5_1 / 7,5_2 / 15) sowie die die Kontrollmessungen der nicht injizierten Bereiche der drei Sandsteinblöcke.



Anhang 45: Porenweitenverteilungen der drei Messungen entlang der Injektionsleitung des mit Ultrafin 12 injizierten Sandsteinblocks (7,5_1 / 7,5_2 / 15) sowie die die Kontrollmessungen der nicht injizierten Bereiche der drei Sandsteinblöcke.

Teilbericht C

Strömungstechnischer Funktionsnachweis

1 Aufgabenstellung

In Abhängigkeit von der Standortsituation können in einem Strecken- oder Schachtverschlussbauwerk der Kontaktbereich zwischen dem Dichtmaterial und dem Gebirge sowie die Auflockerungszone (ALZ) im Gebirge Zonen höherer Permeabilität darstellen – s. **Abb. 69** und **Abb. 70**. Insbesondere für Dichtmaterialien auf der Basis hydraulisch abbindender Baustoffe (u.a. Zemente, Betone), die nicht durch primär gegebene und/oder angeregte Reaktionen und Prozesse mit Volumenzunahme aktiv dichten, wie z.B. Sorelbaustoffe, quellfähige Tone, ergibt sich vielfach im Kontakt zum Gebirge lokal eine höhere Permeabilität. Mögliche Ursachen für eine solche unzureichende vollständige Anbindung an die Gebirgskontur, eine daraus resultierende erhöhte Systempermeabilität und ggf. auch eingeschränkte mechanische Wirkungsweise können sein:

- unzureichende Einbauqualität im Kontaktbereich und daraus resultierend eine reduzierte Anbindung an die Gebirgskontur und eine erhöhte Permeabilität im Kontaktbereich,
- Schwinden des Dichtbaustoffes (z. B. im Ergebnis des Abbindevorgangs),
- thermisch bedingte Ausdehnung und Kontraktion (z. B. im Ergebnis eines Hydratations- und Abbindevorgangs),
- Setzungsprozesse des gesamten Dichtbauwerkes,
- geomechanische Baustoffcharakteristik und –verhalten des Dammkörpers (Rissbildung),
- Wechselwirkungen des Dichtmaterials mit der Salinarkontur und/oder der angreifenden Lösung, die zu einer Erhöhung der Permeabilität an der Kontur führen kann (z.B. Korrosion),
- chemische und mechanische Beeinflussung des Gebirges und der ALZ vor dem Einbau des Dichtungssystems.

Die genannten Ursachen können auch in beliebiger Kombination auftreten.

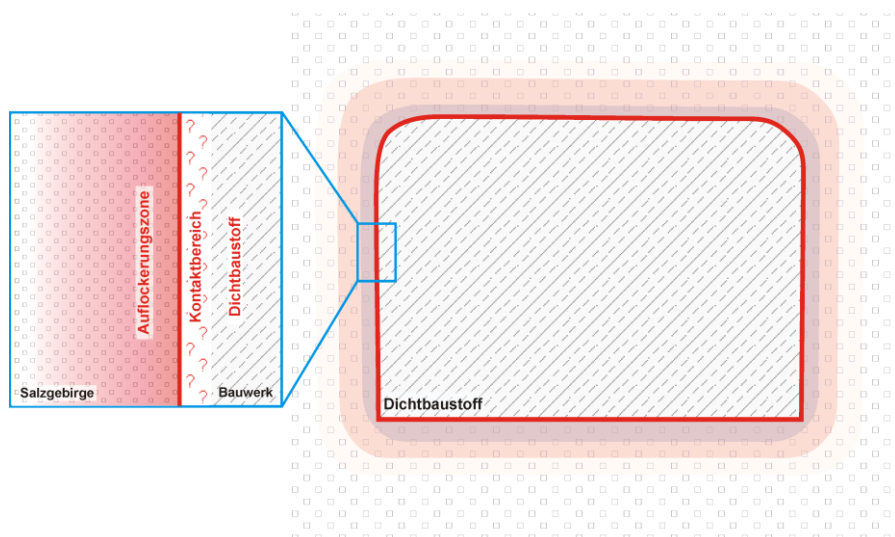


Abb. 69: Schematische Darstellung Streckenverschlussbauwerk mit Details zum Kontakt Baustoff/Gebirge

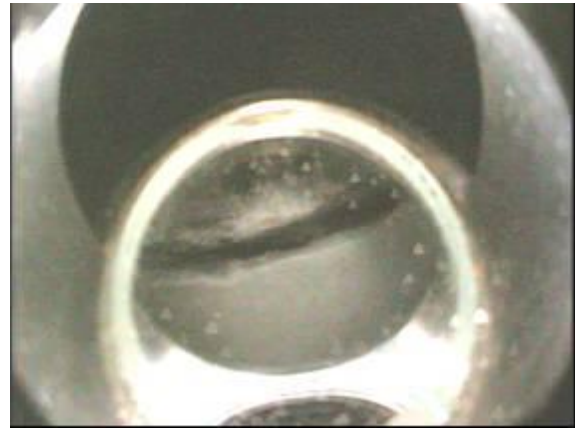


Abb. 70: Aufnahmen von offenen Kontaktbereichen zwischen Baustoff/Gebirge

Zur Vermeidung der o. g. Ursachen werden bereits bei der Konzipierung des Bauwerkes, der Materialauswahl, der Einbautechnologie und der gezielten Vergütung des Kontaktbereiches große Anstrengungen unternommen, um eine hinreichende Abdichtung zu erreichen. Wesentliche Konzepte dabei sind:

- spezielle Einbauverfahren für den Kontaktbereich Dichtbaustoff/Gebirge,
- Injektion des Kontaktbereiches nach unterschiedlichen Injektionskonzepten,
- Verwendung expansionsfähiger bzw. quellfähiger Materialien,
- temporäre Sicherungs- und Ausbaumaßnahmen.

Trotz umfangreicher Anstrengungen weisen großtechnisch hergestellte Bauwerke immer wieder lokal permeable Bereiche im Kontakt zwischen Dichtbaustoff und Gebirge auf. Dies gilt im Besonderen für Bauwerke aus hydraulisch abbindenden, kohäsiven Dichtmaterialien, in denen sich das Abbindeverhalten, die thermisch bedingte Volumenänderung und die Wechselwirkungen des Baustoffes mit der Salinarkontur überlagern. Beispiele hierfür sind eine Reihe von Betonpfropfen und Bentonitelemente in Schächten, Bohrlochverschlüsse und Dammbauwerke z.B. [2, 137, 138]. Dies kann lokal und integral über den Bauwerksquerschnitt und die Bauwerkslänge zu einer unzureichenden strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes gegenüber Strömungs- und Stofftransportprozessen führen. Verbleibende, höher permeable Bauwerksbereiche, die auf Grund der Flächen- und Permeabilitätsverhältnisse bei einer integralen Betrachtung des Dichtsystems nicht dominieren, können zu einer signifikanten Verkürzung des Beginns des Stoffaustrags aus einem Bauwerk und zu lokal beginnenden Korrosionsprozessen führen.

Die Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung eines Bauwerkes im Rahmen der langzeitsicheren Verwahrung eines Grubengebäudes für die Endlagerung wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle setzt eine Nachweisführung der strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes voraus. Die Funktionsnachweise für realisierte Dichtbauwerke beruhen aktuell in der Regel auf Untersuchungen von Probenmaterial aus den einzelnen Strömungsbereichen des Bauwerkes (Dichtelement, Kontakt Dichtmaterial/Gebirge und ALZ/Gebirge) und lokaler In-Situ-

Messungen für ausgewählte Parameter (z.B. Permeabilität Kontaktbereich Baustoff/Gebirge). Einzelne Bauwerke, vorwiegend im Zusammenhang mit Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, wurden über pneumatische und hydraulische Bauwerkstests auf ihre strömungstechnische Wirkung untersucht (z.B. [2, 137, 138]).

Die Nachweisführung auf der Basis von Untersuchungen an Probenkörpern und einzelner In-Situ-Untersuchungen beschränkt die Bauwerksbeurteilung auf lokale Bereiche in dem Strömungsraum. Sie ermöglichen eine Gegenüberstellung zu vorliegenden Material- und Prozessparametern sowie Erwartungs- und Zielwerten. Die zu minimierende Anzahl an Bohrungen in einem Dichtbauwerk schränkt den Untersuchungsumfang auf vergleichsweise wenige lokale Punkte im Bauwerk ein. Dies birgt die Gefahr der Nichterfassung lokaler Heterogenitäten in den strömungstechnischen Eigenschaften im Bauwerk und kann zu einer Fehlbeurteilung der Strömungs- und Stofftransportprozesses sowie der daraus resultierenden Stoffausbreitung und Korrosionsprozesse führen. Die vorliegenden Erfahrungen aus der Testung von Versuchsbauwerken zeigen die Notwendigkeit einer großmaßstäblichen Bauwerkstestung im Sinne eines Nachweises am Prototyp und die Bereitstellung von Handlungsoptionen für eine ggf. erforderliche nachträgliche Vergütung/Abdichtung verbliebener Wegsamkeiten.

Das Grundkonzept des Vorhabens sieht die Entwicklung eines Nachweiskonzeptes für die strömungstechnische Testung von untertägigen Verschlussbauwerken über im Kontaktbereich installierte Druckkammern vor. Für die Situation, dass im Ergebnis des Bauwerkstests eine unzureichende Dichtheit und/oder lokale Wegsamkeiten im Bauwerk nachgewiesen wird, soll eine Auswahl von Behandlungsfluiden und Beaufschlagungsregimen entwickelt werden, die eine nachträgliche Vergütung des Bauwerkes durch Injektion über eine der Druckkammern ermöglicht. Es werden Fluide verwendet, die auf Grund ihrer Zusammensetzung und/oder ihres Chemismus geeignet sind, die Porosität und Permeabilität im Kontaktbereich zwischen Dichtmaterial und Salinarkontur (ggf. auch Auflockerungszone) möglichst auf der gesamten Testlänge des Bauwerkes nachhaltig zu reduzieren. Dazu ist standortbezogen eine Kombination von Wirkmechanismen erforderlich, wobei das angewendete Wirkprinzip so „einfach“ wie möglich sein sollte. Der Schwerpunkt der Behandlung liegt auf dem Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge.

Nach der Vergütung erfolgt eine erneute Bauwerkstestung zur Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes im Rahmen des Funktionsnachweises.

2 Erläuterungen zum Strömungsprozess bei In-Situ-Bauwerkstests

2.1 Prozesse und Einflüsse

Für den Strömungsprozess in einem Bauwerk ergeben sich, unabhängig vom Strömungsfluid, folgende Prozesse und Einflussgrößen:

- die Geometrie des Strömungsraumes (u.a. Bauwerkslänge, Querschnitt, Querschnittsveränderung) und die Kenntnisse zur Ausdehnung der in einem Bauwerk vorhandenen Strömungsräume mit unterschiedlichen strömungstechnischen Eigenschaften (z. B. Auflockerungszone Gebirge, Kontaktbereich zwischen Dichtelement und Gebirge sowie Dichtelement aus Baustoff),
- die strömungstechnischen Eigenschaften der im vorhergehenden Anstrich genannten Strömungsräume im Bauwerk und ggf. ihre räumliche und zeitabhängige Veränderung (z.B. im Ergebnis des Herstellungsvorgangs und der Herstellungstechnologie des Bauwerkes, unter dem Einfluss der gebirgsmechanischen Einspannung, im Ergebnis des Abbindevorgangs des Baustoffes),
- die Anfangsdruck- und Temperaturverteilung im Bauwerk und im Gebirge und
- Druck- und Temperaturverlauf während des Strömungstests.

Zusätzlich zu diesen Sachverhalten ergeben sich unterschiedliche Einflüsse für die Gas- und Lösungsströmung:

- Beeinflussung der *effektiven Phasenpermeabilität* (auch effektive Permeabilität) der einzelnen Strömungsräume durch die räumlich und zeitlich veränderliche Flüssigkeitssättigung im Porenraum – Zweiphasenströmung (z.B. Veränderung durch Aufsättigung bei Lösungsströmung oder Trocknung bei Gasströmung),
- Sekundärreaktionen in einzelnen Strömungsräumen des Bauwerkes im Kontakt mit dem strömenden Fluid, die Einfluss auf die Permeabilität, Porosität und Porenraumsättigung nehmen (z.B. durch die Abbindereaktionen des Baustoffes, das Quellen oder Schwinden des Baustoffs und/oder des Gebirges, Trocknung, Carbonatisierung).

Die genannten Einflüsse werden in jedem Fall in laborativen und halbtechnischen Versuchen und erst recht in großtechnischen Bauwerken wirksam. Sie variieren über die Bauwerkslänge und den Querschnitt und verändern sich zeitabhängig in Abhängigkeit vom Durchströmungsprozess.

Trotz oder gerade auf Grund dieser sich wechselseitig überlagernden Einflussprozesse erfordert der Funktionsnachweis eines Verschlussbauwerkes die großtechnische, strömungstechnische Testung. Im Ergebnis dieser Tests liegen Kenntnisse zum Versuchsverlauf, Messdaten (Drücke und Temperaturen) und Beobachtungen an unterschiedlichen Stellen im Bauwerk vor. Voraussetzung für die Auswertung und Aussagekraft dieser Bauwerkstests ist es, soweit möglich, die oben genannten Eigenschaften und Prozesse, die im Labor und am Standort ermittelt

bar sind, so gut wie möglich, ggf. in ihrem Schwankungsbereich, zu bestimmen. In **Tab. 42** sind die im Vorfeld ermittelten Eigenschaften und Informationen zur Charakterisierung des Bauwerkes und des Strömungsprozesses zusammengefasst. Sie bilden die Grundlage für die Planung, Durchführung und Auswertung der In-Situ-Bauwerkstests.

Tab. 42: Übersicht der im Vorfeld laborativ oder In-Situ ermittelten Informationen und Parameter

1	2	3	4	5	6	7
Parameter/Information	DE/Baustoff	Kontaktbereich DE/Gebirge	ALZ	Gebirge	Druckkammer	Baustoffe außerhalb DE
Thermodynamische Eigenschaften → Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, spezifische Reaktionsenthalpie	✓	?	✓	✓	✓	✓
Gebirgsmechanische Eigenschaften → Normalspannung/Gebirgszustand, Relaxation Baustoff, Konvergenz Gebirge	✓	?	✓	✓	✓	✓
Abmaße → Längen, Mächtigkeiten, Breiten, Höhen, luftgefüllte Hohlräume Volumen → Druckkammer, ggf. Kontrollkammer	✓	?	✓	✓	✓	✓
Strömungstechnisch relevante Eigenschaften → Permeabilität, totale und effektive Porosität, Lösungsgehalt, optional Porengrößenverteilung, Verhalten Baustoff und Gebirge gegenüber strömenden Fluiden (Sekundärreaktionen, Quellen, Schwinden)	✓	?	✓	✓	✓	✓
Versuchsparameter für strömungstechnische In-Situ-Bauwerkstests → zeitlicher Ablauf, Art des Fluids, Druckregime, Monitoringkonzept	?	?	?	?	?	?
Rheologische Eigenschaften des Strömungsfluids → dynamische Viskosität und Kompressibilität der vorgesehenen Fluide für das Temperaturniveau der Tests	✓					

In jedem Fall verbleiben für großtechnische Versuchsbauwerke einzelne Strömungsräume, für die eine Ermittlung repräsentativer strömungstechnischer Eigenschaften im Vorfeld nicht möglich ist. Dies gilt in erster Linie für den Kontaktbereich zwischen dem eigentlichen Dichtelement (Bau- bzw. Dichtmaterial) und dem Gebirge. Auf Grund der geringen Permeabilität des Dichtelementes und dem in der Regel ebenfalls geringen Permeabilitätsniveau der Auflockerungszone im Gebirge kommt vielfach dem Kontaktbereich zwischen Dichtelement und Gebirge die entscheidende strömungstechnische Bedeutung für das Gesamtsystem zu. Dies gilt besonders für Dichtelemente aus hydraulisch abbindendem Material, die im Verlauf des Abbindeprozesses einen relativ steifen Körper bilden. Die Volumenveränderungen sowohl im Ergebnis der Wärmeentwicklung als auch im Ergebnis der Kristallisationsvorgänge während des Abbindeprozesses sowie die zeitliche Überlagerung dieser Prozesse bestimmen das Permeabilitätsniveau des Kontaktbereiches. Auf Grund der

Maßstabsabhängigkeit dieser Vorgänge ist eine strömungstechnische Charakterisierung und Beurteilung dieses Kontaktbereiches ohne entsprechende Großversuche nicht möglich.

2.2 Integrale Permeabilität des Bauwerkes

Die hydraulische Barrierewirkung eines Bauwerkes ist das Ergebnis der strömungstechnischen Wirkung der einzelnen Strömungsräume und ihres Anteils am Gesamtströmungsprozess. Ausgehend vom DARCY-Gesetz kann für die laminare Einphasenströmung in einem in Strömungsrichtung isotropen Bauwerk die integrale Permeabilität nach Gleichung (1) berechnet werden:

$$k_{\text{int}} = \frac{(k_{\text{ALZ}} \cdot A_{\text{ALZ}}) + (k_{\text{KB}} \cdot A_{\text{KB}}) + (k_{\text{DE}} \cdot A_{\text{DE}})}{A_{\text{int}}} \quad (1)$$

k	-	Permeabilität	[m ²]
A	-	Fläche	[m ²]

Indizes:

int	-	integral
ALZ	-	Auflockerungszone
DE	-	Dichtelement
KB	-	Kontaktbereich Baustoff/Gebirge

Aus der Gleichung (1) wird deutlich, dass neben der Permeabilität nur die durchströmte Querschnittsfläche bestimmend für die hydraulische Wirkung eines in sich homogenen Strömungsbereiches ist. Die Anwendung dieses relativ einfachen Zusammenhangs für die Ermittlung und Beurteilung der integralen Permeabilität eines Bauwerkes scheitert in der Regel an der fehlenden und/oder unscharfen Kenntnis der Flächenanteile einzelner Strömungsbereiche und ihrer Permeabilität (vor allem KB sowie der Heterogenität der strömungstechnisch relevanten Eigenschaften Permeabilität und Porosität entlang des Strömungsweges. Aus Gleichung (1) wird ebenfalls deutlich, dass in Abhängigkeit der Flächen- und Permeabilitätsverhältnisse der einzelnen Strömungsräume integral eine geringe Permeabilität ermittelt wird, jedoch lokal in einzelnen Strömungsräumen Parameterschwankungen über Zehnerpotenzen möglich sind. Dieser Sachverhalt gewinnt an Bedeutung bei der Betrachtung von Strömungsgeschwindigkeiten und des Transportes von im Strömungsfluid gelösten Komponenten sowie der Prognose des Zeitpunkts für das Einsetzen des Stoffaustrags aus einem Bauwerk. Darüber hinaus ist die Veränderung des Porengefüges in Bereichen hoher Strömungsgeschwindigkeit nicht auszuschließen (z.B. durch Suffosion, Erosion). Bei Kenntnis der einzelnen Größen bzw. plausiblen Annahmen ermöglicht Gleichung (1) die Prognose der integralen Permeabilität eines Bauwerkes im stationären Strömungszustand.

2.3 Ermittlung der integralen Permeabilität von Verschlussbauwerken

Eine Möglichkeit der repräsentativen Ermittlung der integralen Permeabilität für ein Bauwerk sind großmaßstäbliche Strömungsversuche an realen Bauwerken. Für diese Versuche gelten folgende Prämissen:

- Auf Grund des mit Dichtbauwerken angestrebten geringen Permeabilitätsniveaus sind stationäre Strömungsprozesse im Testverlauf weitgehend auszuschließen.
- Für den Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge liegen oftmals keine Kenntnisse oder nur Annahmen für die Permeabilität, die Porosität und die strömungswirksame Fläche entlang des Strömungsweges sowie die hydraulisch wirksame Länge vor.
- Für das Dichtelement können aus Laboruntersuchungen und der Geometrie des Bauwerkes Angaben zur Permeabilität, Porosität und strömungswirksamen Fläche abgeleitet werden.
- Für die Auflockerungszone im Gebirge sind Aussagen zur Permeabilität, Porosität und die Änderung in Abhängigkeit vom Konturabstand möglich.
- Es liegen Kenntnisse zur Dichte, Viskosität und Kompressibilität des Strömungsfluids vor.
- Für jede Art von Verschlussbauwerk muss davon ausgegangen werden, dass das gesamte Verschlussystem oder einzelne Strömungsbereiche darin einen Lösungsgehalt besitzen. Dies hat zur Folge, dass die sich daraus ergebende Phasenverteilung im Porenraum (Porenraumsättigung) und ihr Einfluss auf die Kompressibilität und die Strömungsprozesse (räumlich differenziert Ein- und Zweiphasenströmung) bauwerksspezifisch beurteilt und ggf. berücksichtigt werden muss:

Gasströmung

Für die Gasströmung führt eine Porenraumsättigung mit Flüssigkeit zur Reduzierung der Gaspermeabilität. Der Strömungsprozess von Gas kann dann durch die Zweiphasenströmung im Porenraum bestimmt werden. Die für diese Bedingungen ermittelte Permeabilität wird als effektive Gaspermeabilität bezeichnet.

Bei hohen Permeabilitäten muss in Abhängigkeit vom strömenden Gas und dem Lösungsgehalt im Bauwerk der Einfluss eines Trocknungsprozesses beurteilt werden.

Für eine Beurteilung der Gasströmung sollte die Porenraumsättigung mit Flüssigkeit in den Strömungsbereichen des Bauwerkes ermittelt werden.

Lösungsströmung

Durch den Eintritt von Flüssigkeit in das Bauwerk mit einem ungesättigten Porenraum kommt es zur Aufsättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit. Auf Grund der in der Regel unterschiedlichen Permeabilitätsbedingungen in den einzelnen Strömungsbereichen erfolgt die Aufsättigung räumlich differenziert, beginnend in den höher permeablen Bereichen. Bei Vernachlässigung einer nicht auszuschließenden Restgassättigung im Porenraum kann für die aufgesättigten Bereiche von einer Einphasenströmung ausgegangen werden. Im Bereich der Sättigungsfront gelten die Gesetzmäßigkeiten der Zweiphasenströmung.

Für die Versuchsmethodik der Untersuchungen mit Lösung sollte in jedem Fall eine längere Zeit für die Aufsättigung des Bauwerkes bzw. der Strömungsbereiche im Bauwerk vorgesehen werden.

Aus den zeit- und ortsabhängig veränderlichen Sättigungsbedingungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Bei Flüssigkeitstests sollte der Durchströmungsprozess so lange wie möglich fortgesetzt werden, um den Aufsättigungsprozess voranzutreiben.
- Die Versuchsdaten von Lösungstests beschreiben immer den Strömungsprozess im gesättigten und teilgesättigten ($S_L > S_{HL}$) Bauwerksbereich.
- Die Kompressibilität des Strömungsraumes wird von der Restgassättigung bestimmt.

Die vorangegangenen allgemeinen Erläuterungen machen die Notwendigkeit einer bauwerksbezogenen Beurteilung des Einflusses von Mehrphasenströmungsprozessen auf der Grundlage der Bauwerkskenntnisse und der Versuchsdaten deutlich.

Bei diesen Betrachtungen ist zu berücksichtigen, dass Mehrphasenströmungsprozesse in den zum Teil geringstpermeablen Strömungsbereichen eines Bauwerkes schwierig zu beurteilen sind. Dies resultiert in erster Linie aus der Notwendigkeit materialspezifisch den Zusammenhang von Phasenpermeabilität (relative Permeabilität), Kapillardruck und Sättigung des Porenraumes zu beschreiben.

- Hinsichtlich des anzuwendenden Versuchsregimes¹ ist auch für die Lösungstests geringpermeabler Bauwerke die Durchführung von Impulstest nach einer Aufsättigungsphase sinnvoll. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sich der Druckimpuls im gesättigten Porenraum ausbreitet. Ausgehend von einer mehrfachen Versuchswiederholung ist auf der Basis reproduzierbarer Versuchsdaten eine Aussage zur Permeabilität dieses Bauwerksbereiches möglich. Für die Beurteilung der Impulstests sollte die Kompressibilität des Strömungsraumes in begleitenden Versuchen ermittelt und in der Versuchsinterpretation berücksichtigt werden.
- Versuche mit konstantem Druck oder konstantem Volumenstrom beinhalten in den Versuchsdaten einen Einfluss der sich räumlich verändernden Sättigung, welcher sich möglicherweise mit fortschreitender Sättigungsfront reduziert. Die Kompressibilität des Phasensystems im Porenraum hat keinen oder zumindest einen deutlich reduzierten Einfluss. Diese beiden Sachverhalte favorisieren Bauwerkstests mit konstantem Druck oder konstantem Volumenstrom. Für das nachzuweisende Permeabilitätsniveau $\leq 1E-17 \text{ m}^2$ und DARCY-Geschwindigkeiten von ca. 0,02 m/a bei Testdruckgradienten von 0,1 MPa/m ergeben sich Versuchszeiten von Jahren bei Einsatz hoch präziser Messtechnik unter den In-Situ-Bedingungen.

¹ Druckniveau, Geschwindigkeit der Druckbeaufschlagung, Reihenfolge der Druckbeaufschlagung im Fall von mehreren beaufschlagten Bereichen

- Mögliche Sekundärreaktionen des strömenden Fluides mit dem Dichtbaustoff und/oder dem Gebirge müssen im Vorfeld abgeklärt und gegebenenfalls im Versuchskonzept, im Versuchsverlauf und bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Die Strömungsprozesse im Bereich der Aufsättigungsfront werden durch diese Sekundärreaktionen im Porengefüge und daraus resultierende Veränderungen überprägt. Zusätzlich zur Mehrphasenhydraulik ist dann die Berücksichtigung der Geochemie und der Grenzflächenprozesse zwischen Lösung und Feststoff und der Folgen für Permeabilität und Porosität erforderlich.

3 Testung Bauwerk

3.1 Grundkonzept

Das Grundkonzept der strömungstechnischen Testung eines Verschlussbauwerkes bzw. eines Abschnittes in einem Verschlussbauwerk beruht auf der diskreten Druckbeaufschlagung eines Prüfvolumens und der Überwachung der Druckganglinien in dem Prüfvolumen sowie den gegebenenfalls davor und/oder dahinter angeordneten Kontrollvolumen. Basierend auf den erfassten Druckganglinien für die drei Volumen sowie ggf. der erfassten Volumenstromganglinie, der Kenntnis der Geometrie und Eigenschaften des Strömungsraumes, der Kenntnis der Geometrie und Volumina der drei Volumen sowie den Eigenschaften des verwendeten Testfluides ist eine modellgestützte Auswertung des Versuches und die Ermittlung der Permeabilität des getesteten Bauwerksabschnittes möglich.

Bei der Durchführung eines Durchströmungsversuches in einem Bauwerk erfolgt die Druckbeaufschlagung mit dem jeweiligen Testfluid. Dafür können folgende Versuchsregime unterschieden werden:

- Impulstest,
- Test mit konstantem Druck,
- Test mit konstantem Volumenstrom.

Die Schwierigkeit für die Konzipierung, Planung, Installation und Durchführung entsprechender Versuche besteht vielfach darin, dass das Permeabilitätsniveau im Vorfeld nicht bekannt ist. Die unterschiedliche Einbausituation der Verschlussbauwerke führt zu einem breiten Schwankungsbereich der integralen Bauwerkspermeabilität. Dies macht es erforderlich, für die Versuchsdurchführung Messgeräte mit unterschiedlichen Messbereichen für die präzise Volumenstrom- und Druckmessung vorzuhalten.

Ausgehend von den Erläuterungen im Abschnitt „1.2.2 Standort / Gebirge – Prämissen“ und den Konzepten und Ergebnissen zu den Injektionsmaterialien im Abschnitt „7 Bewertung der Injektionsmaterialien“ werden der Konzeption des versuchstechnischen Nachweises der strömungstechnischen Dichtheit folgende Anforderungen zu Grunde gelegt:

- Anwendung des Nachweiskonzeptes für Verschlussbauwerke aus hydraulisch abbindendem Dichtbaustoff in einer Salinarformation,
- Testung und Nachweisführung für den Kontaktbereich zwischen Dichtbaustoff und Gebirge, Für das kompakte Dichtelement wird eine Rissbeschränkung unterstellt, die durch die Auswahl und Konditionierung des Dichtmaterials sowie betontechnologische Maßnahmen beim Einbau des Dichtelementes gewährleistet wird.

Für die Testung und Nachweisführung im Kontakt Dichtbaustoff und Gebirge wird von einer Beurteilung des gesamten umlaufenden Kontaktbereiches ausgegangen. Die segmentweise Testung einzelner Teilbereiche durch eine gezielte Installation von Testausrüstung und die

angepasste Positionierung von Bohrungen (z.B. nur Firste oder nur einzelne Stöße) wird gegebenenfalls geprüft.

- Durchführbarkeit von aufeinander aufbauenden Tests mit Gas und Flüssigkeit,
- Durchführbarkeit von Injektions- / Vergütungsmaßnahmen im zu testenden Bauwerksabschnitt zwischen strömungstechnischen Tests bei Erhalt der Befahrbarkeit der Testbohrungen,

Die Maßnahmen zur Vergütung im Rahmen des Funktionsnachweises beschränken sich auf den getesteten Bauwerksabschnitt. Sie sind nicht vergleichbar mit den möglicherweise durchgeführten Injektionsmaßnahmen beim Einbau des Dichtelementes.

- Entlüftbarkeit der Testinstallation für Vergütungsmaßnahmen (Injektionen) und strömungstechnische Tests mit Flüssigkeit,
- keine dauerhaft verbleibenden axialen Kabeldurchführungen im Bauwerk,
- sicherer Nachweis eines Niveaus der integralen Permeabilität $\leq 1E-17 \text{ m}^2$.

Ausgehend von der zu Grunde liegenden Aufgabenstellung (Errichtung flüssigkeitsdichter Bauwerke) wird nachfolgend der Schwerpunkt auf die Beurteilung geringpermeabler Bauwerke gelegt. Für diese Gegebenheiten werden in den nachfolgenden Betrachtungen die Durchführung von Impulstests und die Auswertung des daraus resultierenden instationären Strömungsprozesses zur Ermittlung der Bauwerkspermeabilität betrachtet.

Die Anwendung der Versuchskonzepte mit konstantem Volumenstrom oder konstantem Druck stellen für geringpermeable Verschlussbauwerke hohe Anforderungen an die Volumenstromsteuerung oder die Volumenstrommessung. Für ein Bauwerk mit einer integralen Permeabilität von $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$ ergibt sich für die theoretische Annahme einer stationären Flüssigkeitsströmung¹ in einem gesättigten Porenraum für einen Druckgradienten von 0,1 MPa/m ein Volumenstrom von ca. 43 ml/(m²·d). Für diese überschlägliche Abschätzung sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Den Überlegungen liegt die Annahme eines gesättigten Porenraumes zu Grunde. Unter realen Bedingungen ist von einem teilgesättigten Porenraum und dem Einfluss der Flüssigkeitssättigung und Kompressibilität auf den Strömungsprozess auszugehen. In der Folge bestimmt die effektive Flüssigkeitspermeabilität und die sich einstellende Druckverteilung den Strömungsprozess. Die effektive Flüssigkeitspermeabilität ist in jedem Fall geringer als die absolute Flüssigkeitspermeabilität, wodurch von einer längeren Versuchsdauer auszugehen ist.
- Die effektive Porosität im Kontaktbereich ist möglicherweise deutlich höher. Dies würde zu einer Reduzierung der Abstandsgeschwindigkeit und zu längeren Testdauern führen.
- Die Porositäts- und Permeabilitätsverteilung im Testintervall sind erfahrungsgemäß nicht isotrop und homogen. Die nicht identifizierbare Verteilung der Permeabilitäten und ihres Flächenanteils bestimmt die Druckreaktion im Prüf- und den Kontrollräumen.

¹ einphasige, isotherme, laminare Strömung im Geltungsbereich des DARCY-Gesetzes

Für die reale Strömung ist unter dem Einfluss der genannten Aspekte von geringeren Volumenströmen auszugehen.

Ausgehend von diesen Überlegungen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass eine Testung des gesamten Bauwerkes für das angestrebte Permeabilitätsniveau und den sich daraus ergebenden Zeitbedarf nicht möglich ist. Das Konzept der Testung und Nachweisführung für die oben angesetzten Druck- und Permeabilitätsbedingungen konzentriert sich daher auf die Nachweisführung für einen Bauwerksabschnitt zwischen 1m bis 2m Länge.

Im Zusammenhang mit dem geringen Druckgradienten für die Volumenstromabschätzung muss auf das mögliche Druckniveau unter Einhaltung des Normalspannungskriteriums für Bauwerksversuche eingegangen werden. Die Vorgabe des Testdrucks für ein Bauwerk wird im Wesentlichen von seinem Einspannungszustand und der daraus resultierenden Permeabilität im Kontaktbereich von Dichtmaterial und Gebirge bestimmt. Dabei darf der Prüfdruck die radiale Einspannung des Bauwerkes nicht überschreiten (Normalspannungskriterium). Da, abgesehen von quellfähigen Bentonit und hydraulischen Bindemitteln mit Expansionsvermögen (z.B. Magnesiabinder), die Einspannung abhängig von der Konvergenz und damit an große Zeiträume gebunden ist, sind für die Nachweisführung in zeitlicher Nähe zum Einbau des Dichtelementes vielfach nur geringe Prüfdrücke möglich. Daraus wird deutlich, dass letztendlich für die Beurteilung der Abdichtfunktion des Bauwerkes der Einspannungszustand eine bestimmende, oft limitierende Größe ist. Standortbezogen und in Abhängigkeit von den Belastungsszenarien für das Bauwerk ist in jedem Fall zu prüfen, für welche Bedingungen der Nachweis der Abdichtfunktion geführt werden muss. Das Test- und Druckregime ist an die Standortbedingungen und die Zielstellung der Nachweisführung anzupassen.

Für die gegebenenfalls erforderliche Nachvergütung des Bauwerkes im Testintervall wird von einem maximalen Fluiddruck von 2 bis 3 MPa ausgegangen. Für diese Druckbedingungen ist im Testintervall von einer Überschreitung des Normalspannungszustandes auszugehen. Aber bei entsprechend langsamer Druck- und Fließaufbaurrate wird das maßgebliche effektive Normalspannungskriterium nicht verletzt. Eine zusätzliche Reserve besteht in der Aufreißfestigkeit.

3.2 Installationskonzept

Ausgehend von dem im Abschnitt „3.1 Grundkonzept“ vorgestellten Testkonzept und den Anforderungen wird eine Grundkonfiguration des Bauwerkstests aus einer zentral angeordneten Prüfkammer sowie in Bauwerksrichtung davor und dahinter positionierten Kontrollkammern entsprechend **Abb. 71** und **Abb. 72** vorgestellt. Dieses Grundkonzept stellt nach einem Variantenvergleich die optimale und erfolgsversprechendste Variante dar.

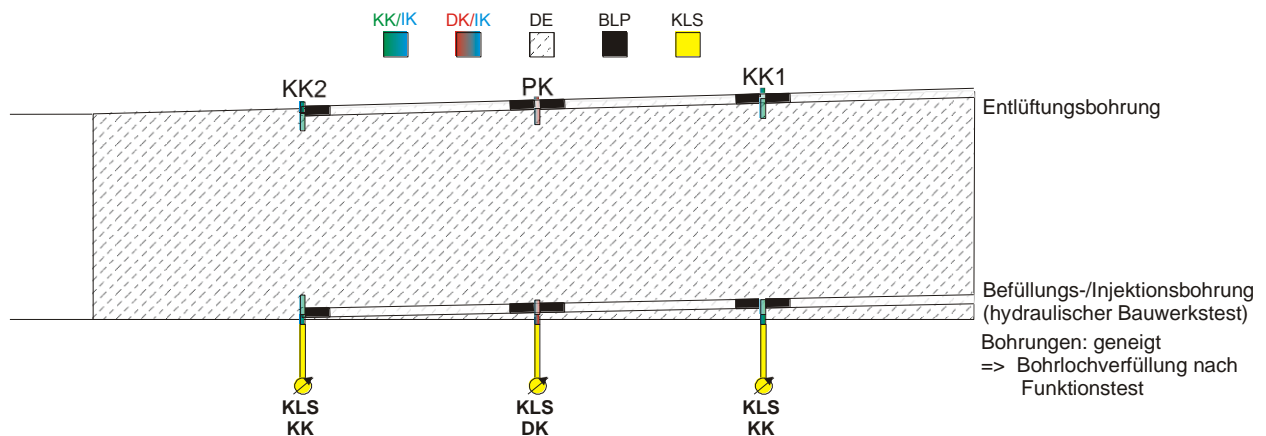


Abb. 71: Grundkonzept der Installation des Nachweiskonzeptes – Längsschnitt

KK – Kontrollraum; DK – Druckkammer; PK – Prüfkammer; DE – Dichtelement; KLS – kabelloser Sensor; BLP - Bohrlochpacker

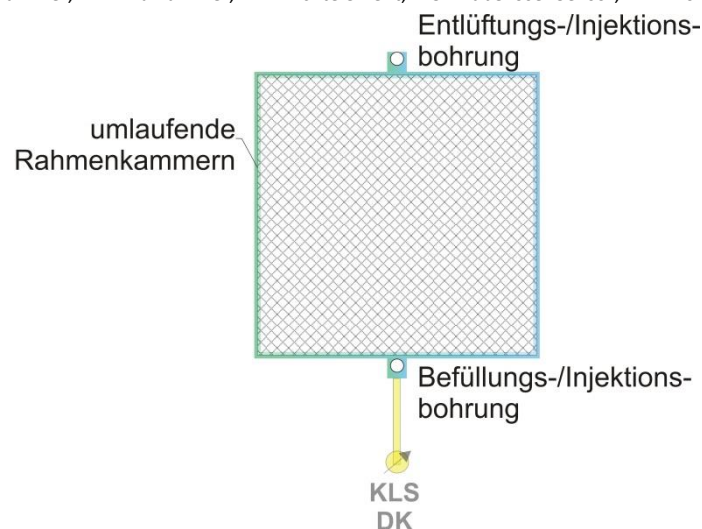


Abb. 72: Grundkonzept der Installation des Nachweiskonzeptes – Querschnitt

Das Installationskonzept ist durch folgende Schwerpunkte gekennzeichnet:

- Installation von umlaufenden Rahmenkammern (Hohlraum als perforierte Stahlkammer, im KB installiert → zur einen Hälfte im Dichtbaustoff und zur anderen im umgebenden Gebirge),
- drucktechnischer Anschluss der Rahmenkammern über einfallende Bohrungen (\varnothing 70 mm) von der Luftseite,
- Abpackern relevanter Bereiche in den Bohrungen (z.B. für Injektion, für Bauwerkstest) durch entsprechend gestaltete Bohrlochpacker,
- Druck-/Temperaturerfassung durch kabellose Sensorik.

3.2.1 Prüf- und Kontrollkammern

Das Prüf- und die Kontrollvolumen (nachfolgend auch als Prüf- und Kontrollkammern bezeichnet) werden als Rahmenkammern entsprechend **Abb. 73** vorgesehen, die mit ihrem äußeren Rand in das Gebirge und dem inneren Rand in den Baustoff einbinden. Im Ausgangszustand stellen die Kammern definierte, gaserfüllte Hohlraumvolumina über den gesamten Umfang des

Bauwerkes dar. Die Kammern sind perforiert, so dass ein Austreten von Fluid aus den Kammern in das umgebende Gebirge bzw. den Feststoff möglich ist. Zur Vermeidung des Eindringens von Baustoffsuspension in die Rahmenkammern müssen beim Einbau des Dichtbaustoffes diese durch ein geeignetes Vlies (Glasfaser) geschützt werden. Ausgehend von der Partikelgrößenverteilung in der Baustoffsuspension muss ausgehend von der Maschenweite ein geeignetes Vlies ausgewählt werden.

Im Rahmen der Einbautechnologie des Dichtelementes muss sichergestellt werden, dass durch die Vergütung des Bauwerkes im Herstellungsprozess keine partikelfreien Injektionsmaterialien in die Ringkammern eindringen.

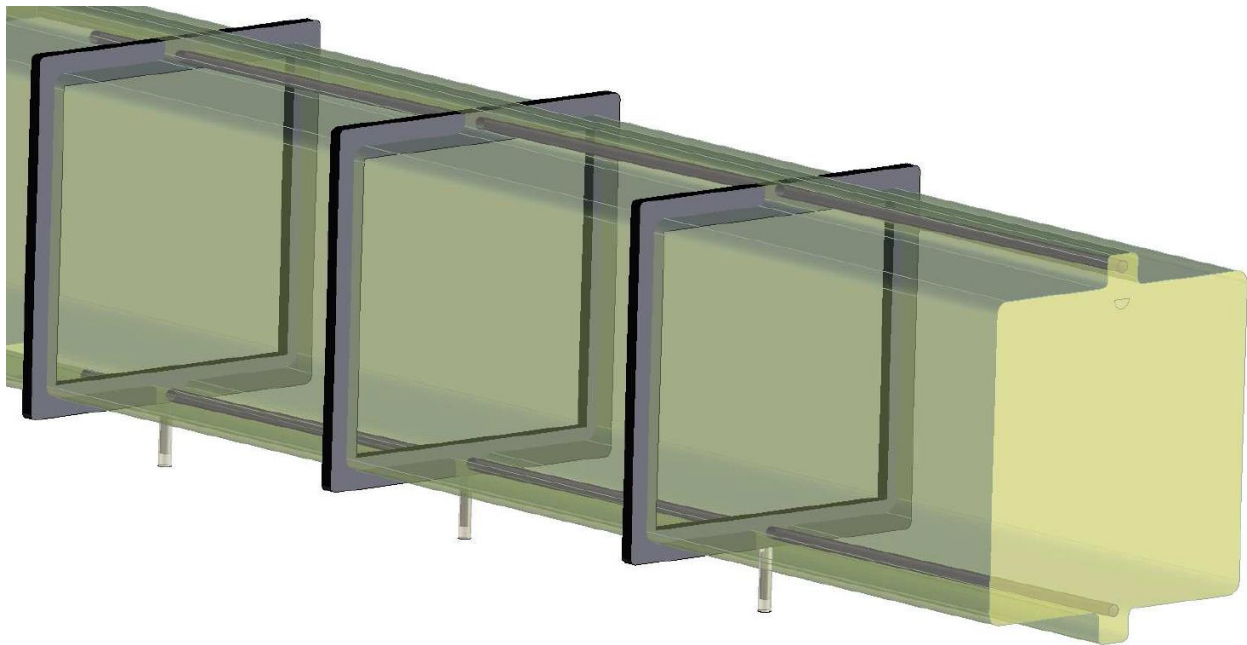


Abb. 73: Schematische Darstellung der Rahmenkammern

Die Höhe der Rahmen gleicht die Unebenheiten in der jeweiligen Kontur aus und muss standortbezogen festgelegt werden. Die Rahmenkammern werden vorgefertigt angeliefert und am Bauwerksstandort endmontiert und installiert. Zur Gewährleistung einer Korrosionsbeständigkeit bis zum Abschluss des Funktionsnachweises wird die Ausführung der Druckkammern aus Edelstahl vorgesehen. Für die Installation im Stoß müssen in Abhängigkeit von der Höhe und der Tiefe der Rahmenkammern umlaufende Nuten in das Gebirge geschnitten werden. Die einzelnen Segmente müssen entsprechend den Standortbedingungen untertage angepasst und im installierten Zustand verschweißt werden. Nach dem Einbau der Rahmenkammern werden diese mit dem Vlies verkleidet, wobei das Vlies in der Kontur einbindet und abdichtet. Abschließend können die vorbereiteten Rahmenkammern mit einem Mörtel, der dem Dichtbaustoff entspricht, eingeputzt werden.

Jede Rahmenkammer besitzt im Hochpunkt und im Tiefpunkt gegebenenfalls eine Verbreiterung (nicht in **Abb. 73** dargestellt), die es ermöglicht, einen strömungstechnischen Anschluss durch eine Bohrung zu realisieren.

Die Optimierung des Anschlusses der drei Kammern mit jeweils einer Bohrung im Bauwerkhöchsten und einer Bohrung im Bauwerk tiefsten (Abschnitt „3.2 Installationskonzept“) macht es erforderlich, dass der Bohrungsanschluss und gegebenenfalls die Rahmenvergrößerungen bei der Installation in einer Flucht liegen. Um den bohrtechnischen Herausforderungen des Anschlusses der Rahmenkammern über die zwei Bohrungen im Kontaktbereich mit der erforderlichen Präzision gerecht zu werden, kommen z.B. Führungsstoffrohre zum Einsatz, welche vor der Bauwerkserstellung in die Kontur eingelassen und nach der Bauwerkserstellung entsprechend überbohrt werden. Zur Gewährleistung des Anschlusses der Bohrungen an die Kammern werden die Durchführungen durch die Ringkammern vorgefertigt und in die Bohrungsführungen integriert.

An die Prüf- und Kontrollkammern werden folgenden Anforderungen gestellt:

- definiertes, unveränderliches Volumen über den Versuchszeitraum,
- hohe Steifigkeit gegenüber Druckbeanspruchungen,
Gewährleistung eines konstanten Volumens, auch bei Verformung des Dichtelementes (z.B. Sekundärreaktionen mit Volumenzunahme für Magnesiabinder),
- keine chemische Wechselwirkung mit dem Strömungsfluid (z.B. Korrosion).

3.2.2 Bohrungen und Testinstallation

Die Prüf- und Kontrollkammern werden durch je eine Bohrung in der Bauwerkssohle und der Bauwerksfirse angeschlossen (Abschnitt „3.2 Installationskonzept“). Die Firsebohrung hat, neben der möglichen Druckbeaufschlagung und/oder Drucküberwachung, die Funktion der Entlüftung der Kammern bei Flüssigkeitsbeaufschlagung. Zur Gewährleistung der Entlüftungsfunktion und der vollständigen Aufsättigung der unterschiedlichen Kammern müssen die Bohrungen von der luftseitigen Ortsbrust einfallend verlaufen. Die Bohrung in der Sohle dient, insbesondere bei der Flüssigkeitsbeaufschlagung, zur Befüllung bzw. Injektion. Auch diese Bohrung wird einfallend gestoßen. Das Einfallen ist standortbezogen, in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie vorzugeben. Zur Gewährleistung des Einfallens der Firsebohrung ist eine Installation in einer vorgeschrittenen Firse vorgesehen.

Die beiden Bohrungen sind im Zusammenhang mit der Installation der Kammern durch geeignete technische Konzepte lagestabil vorzinstallieren bzw. in ihrem Verlauf vorzugeben (z.B. durch Installation entsprechender Führungsrohre). Die Bohrungen werden nach dem Einbau des Verschlussbauwerkes auf- oder nachgebohrt.

Für die Bohrungen wird ein Durchmesser von 70 mm vorgesehen. Die Erfahrungen aus einer Vielzahl von In-Situ-Permeabilitätsuntersuchungen mit Gas und Lösung zeigen, dass im Querschnitt einer 70 mm-Bohrung eine für die Flüssigkeits- und Suspensionsströmung erforderliche Leitungsinfrastruktur in den Bohrlochpackern möglich ist. In Abhängigkeit von den rheologischen Eigenschaften der einzusetzenden Flüssigkeiten und dem vorgesehenen bzw. resultierenden Druckregime ist im Vorfeld die Dimensionierung der Leitungsstränge erforderlich.

Technische Voraussetzung für die Druckbeaufschlagung bzw. die Messungen in den einzelnen Kammern ist eine strömungstechnische Abdichtung der jeweiligen Kammer im Bereich des Bohrungsanschlusses. Für gleichzeitige Messungen in den Kammern ist ein System aus Doppelpackern erforderlich, welches es ermöglicht, alle drei Kammern gleichzeitig strömungstechnisch abzudichten. Für entsprechende Doppelpacker liegen umfangreiche Erfahrungen vor. Ein gleichzeitiger Einsatz mehrerer Doppelpacker in einer Bohrung ist den Bearbeitern in einer solchen Ausführung nicht bekannt. Ein entsprechendes Packersystem müsste entwickelt, gebaut und getestet werden. An das System bestehen folgende Anforderungen:

- gleichzeitige Abdichtung der drei Kammern,
- Lagestabilität der Packerintervalle,
- Anschlussmöglichkeit von Druckleitungen variabler Größe,
- Dichtheit für die Testbedingungen und das nachzuweisende Permeabilitätsniveau.

Nach Abschluss der Tests und ggf. erforderlicher Vergütungsmaßnahmen im Kontaktbereich werden beide Bohrungen und die Kammern mit Dichtmaterial verfüllt. Konzepte und technische Erfahrungen mit der Verfüllung entsprechender Hohlräume und Bohrungen liegen

vor (Stand der Technik). Das Einfallen der Bohrungen schafft Verhältnisse, die eine erfolgreiche Bohrlochverfüllung erwarten lassen.

3.2.3 Datenerfassung und Übertragung

In jeder Kammer erfolgt eine Druck- und Temperaturüberwachung. Die Sensoren werden in der Streckensohle in jeder Kammer installiert, sind drucktechnisch an die Rahmenkammern angeschlossen und dienen zur Beurteilung des Druckes in der jeweiligen Kammer (z.B. Anmachlösung, Monitoring der Spiegelstände bei Befüllung mit Testlösung oder im Ergebnis von Vergütungsmaßnahmen). Die Sohlensensoren sind gleichzeitig redundante Sensoren für die Drucküberwachung über die Packersensoren in den Kammern.

Die Übertragung der Daten aus dem Bauwerk erfolgt kabellos über ein entsprechendes Sender- und Empfangssystem¹. Ein entsprechendes System wird seit November 2010 erfolgreich im Salzbetonbauwerk im Bergwerk Morsleben (In-Situ-Versuch „Abdichtbauwerk im Steinsalz“ auf der 3. Sohle eingesetzt).

Zusätzlich zur Datenerfassung im Bereich der Bauwerkssohle (in jeder Kammer) erfolgt über die Packerinstallation für jede Kammer ein Druckmonitoring der Tests in der Firstbohrung (redundante Druckerfassung). Hierzu kommt die bei den In-Situ-Permeabilitätsuntersuchungen standardmäßig eingesetzte Drucksensorik und entsprechende Datenerfassungstechnik zum Einsatz.

3.3 Testdurchführung

3.3.1 Grundprinzip

Das für Abdichtbauwerke angestrebte Niveau der integralen *Permeabilität* von $\leq 1\text{E-}17 \text{ m}^2$ führt zu langsamen Strömungsprozessen mit geringen Volumenströmen im Gesamtsystem aus Bauwerk und Gebirge. Für die Charakterisierung derart geringer Permeabilitätsniveaus bzw. langsamer Strömungsprozesse wurden Impulstests und die Auswertung des dabei angeregten instationären Strömungsvorgangs entwickelt. Für diese Tests wird das Strömungsmedium in einem bekannten Volumen (Druckkammer) in kurzer Zeit auf das Druckniveau des Tests (Prüfdruck) verdichtet und strömt dann, ohne Nachlieferung von Fluid bzw. Druckhaltung, aus der Druckkammer in den zu testenden Bauwerksabschnitt. Die dabei gemessenen Versuchsparameter, die Kenntnis der Versuchsgeometrie (Druckkammervolumen, Flächen, Längen) der Strömungsräume, die Anfangs- und Randbedingungen sowie die rheologischen Eigenschaften des strömenden Fluides (s. **Tab. 42**) bilden die Grundlage für eine Auswertung der Impulstests (s. Abschnitt „3.4 Auswertungsmethodik der strömungstechnischen In-Situ-Bauwerkstests“).

Beim Nachweis eines Permeabilitätsniveaus des getesteten Bauwerksabschnittes $\gg 1\text{E-}17 \text{ m}^2$ (insbesondere vor Vergütungsmaßnahmen des Kontaktbereiches bzw. bei verkürzten Testlän-

¹ von IBeWa entwickelte, kabellose Funksensorik (patentrechtlich geschützt: DE 202012007536 U1)

gen) besteht die Möglichkeit den Bauwerkstest als Test mit konstantem Druck durchzuführen. Dieses Testregime ermöglicht die Ermittlung von Permeabilitäten im Bereich von $\gg 1E-17 \text{ m}^2$. Erfahrungsgemäß kommen Tests mit konstantem Druck für pneumatische Bauwerkstests am Anfang der strömungstechnischen Testung zum Einsatz.

3.3.2 Pneumatische Tests (Tests mit Gas)

Bei pneumatischen Bauwerkstests wird das Prüfvolumen über eine entsprechende Druckarmatur bzw. -regelanlage mit trockener Druckluft als inertes Strömungsfluid beaufschlagt. Zusätzlich ist es möglich das Strömungsfluid mit einem entsprechenden Gastracer zu dotieren. Die pneumatischen Tests ermöglichen folgenden Kenntnisgewinn:

- Qualitative Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes im Ist-Zustand (Feststellung von technisch bedingten Undichtheiten, Testung des Reaktionsverhaltens der Drucksensoren, Abstimmung des Regimes der Messwerterfassung, Ableitung des Testregimes und der Vorgaben für die Druckbeaufschlagung),
- Beurteilung lokaler Wegsamkeiten anhand der Detektion von Tracergas,
- Ermittlung eines Niveaus der effektiven, integralen Gaspermeabilität des Bauwerkes für den Sättigungszustand als Referenz- bzw. Vergleichsgröße für die Beurteilung der Auswirkungen der vorgesehenen Vergütungsmaßnahmen und
- Beurteilung der Druckausbreitung im Bauwerk an Hand der Druckreaktionen in der Kontrollkammern.

Die gewonnenen Kenntnisse und Erfahrungen sind wichtige Anhaltspunkte zur Auslegung des Druckregimes für den Test mit Flüssigkeit (z.B. NaCl-Lösung).

3.4 Auswertungsmethodik der strömungstechnischen In-Situ-Bauwerkstests

Für die Auswertung von strömungstechnischen Bauwerkstests können unterschiedliche Konzepte verfolgt werden z.B:

- analytische Lösung für die Problemstellung,
- Typkurvenverfahren,
- Nutzung von numerischen Programmsystemen zur Simulation der Strömungsprozesse in einem Modell des Bauwerkes.

Unabhängig von der Auswahl des Auswertungsansatzes basiert die Versuchsinterpretation auf der Gegenüberstellung von Messdaten und berechneten Daten. Die Anpassung erfolgt dabei auf der Basis eines history match der Versuchsdaten. Vielfach sind die Parameter Permeabilität und Porosität des Kontaktbereiches zwischen Baustoff und Gebirge die wesentlichen Größen der Anpassung. Das Auswertungskonzept erfordert detaillierte Kenntnisse zum geometrischen Aufbau des Dichtbauwerkes, den bekannten Materialeigenschaften, den Fluideigenschaften und dem Versuchsverlauf.

Für die Auswertung durch Simulation kommen Programmsysteme zur Anwendung, die es ermöglichen in einem numerischen Modell wesentliche Teile der im Vorfeld ermittelten Eingangsgrößen (siehe **Tab. 42**) und Randbedingungen abzubilden. Diese Modelle schaffen die Grundlage, den in der Regel instationären Strömungsprozess im Bauwerk abzubilden und den lokalen Druckverlauf an ausgewählten Punkten im Bauwerk (Messpunkte im Versuch) zu berechnen. Grundlage der Simulation bildet die Lösung der partiellen Differentialgleichung für die isotherme Fluidströmung (Gas oder Flüssigkeit) für die Versuchskonfiguration sowie die Anfangs- und Randbedingungen.

Die Gegenüberstellung von Messdaten und Modellergebnissen ermöglicht zum einen die Beurteilung der Abweichung der Messdaten von den modellgestützten Vorhersagen und schafft zum anderen die Möglichkeit der Parameteridentifikation im Modell. Dabei werden in erster Linie die Parameter, die nicht im Vorfeld ermittelt werden konnten (Abmessung, Permeabilität und Porosität des Kontaktes zwischen Dichtelement und Gebirge) variiert bzw. identifiziert. Im Ergebnis dieses Anpassungsprozesses von Modell- an Versuchsdaten wird ein Verständnis des Strömungsvorgangs gewonnen und dadurch die integrale Permeabilität des Bauwerkes bestimmt.

Die Übertragung der Kenntnisse zum Bauwerk und zum Strömungsprozess auf das numerische Modell erfordert in jedem Fall eine Vereinfachung und Verallgemeinerung. Ausgangspunkt dabei sollte immer der Kenntnisstand zu den die Strömungsräume beschreibenden Parametern und Abmessungen sowie ihrer räumlichen Variation sein. In Abhängigkeit von dem Aufbau des Strömungsraumes und der räumlichen Verteilung der strömungstechnischen Eigenschaften ist die Abbildung des Strömungsvorgangs in einem 1-, 2- oder 3-dimensionalen Modell möglich. Dies setzt voraus, dass im Vorfeld die Eigenschaften in einer entsprechenden Datendichte zur repräsentativen Belegung des Modells ermittelt wurden. Liegen entsprechende Daten nicht oder unzureichend vor, reduziert sich der Aussagengewinn mehrdimensionaler Modelle auf eine bessere Beurteilung von komplexen Strömungsprozessen (Prozessmodell). Der Standortbezug tritt dabei in den Hintergrund.

In einer Verallgemeinerung kann davon ausgegangen werden, dass Verschlussbauwerke, abgesehen von deutlichen Unterschieden in der Größe und Verteilung der Permeabilität sowie Mächtigkeit der Auflockerungszone, als radialsymmetrische Strömungsräume mit axial homogener Eigenschaftsverteilung und geometrischem Aufbau sind. In der Regel weisen In-Situ-Permeabilitätsuntersuchungen einen relativ gleichmäßigen strömungstechnischen Aufbau der Auflockerungszone nach. In dieser Situation ist vielfach die Verwendung eines zweidimensionalen, radialsymmetrischen Modells gerechtfertigt.

Die für die Testauswertung zur Verfügung stehenden Programmsysteme ermöglichen die Simulation von isothermer Gas- und Flüssigkeitsströmung in ein-, zwei- und dreidimensionalen Modellen für unterschiedliche Koordinatensysteme. In Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie ist gegebenenfalls eine Transformation auf das Koordinatensystem des Programms erforderlich (z. B. Übertragung des viereckigen Streckenquerschnittes auf das radiale Bezugs-

system über die Umrechnung der Flächen der Strömungsräume auf äquivalente Kreis- bzw. Kreisringflächen).

3.5 Beispielhafte Testkonfiguration und Auswertung

Bisherige Konzepte für die strömungstechnische Testung von Verschlussbauwerken gehen vielfach von einer vollflächigen Druckbeaufschlagung einer einseitig installierten Druckkammer aus. In **Abb. 74** sind, als Beispiel für eine modellgestützte Auswertung eines Impulstests eines solchen Bauwerkstests (ohne Kontrollkammern), die Anpassung von berechnetem und gemessenem Druckverlauf dargestellt. Der für die Befüllung und Beaufschlagung der Druckkammer erforderliche Volumenstrom wurde ebenfalls erfasst und der modellgestützten Auswertung (Randbedingung 2. Ordnung) für die Druckkammer vorgegeben.

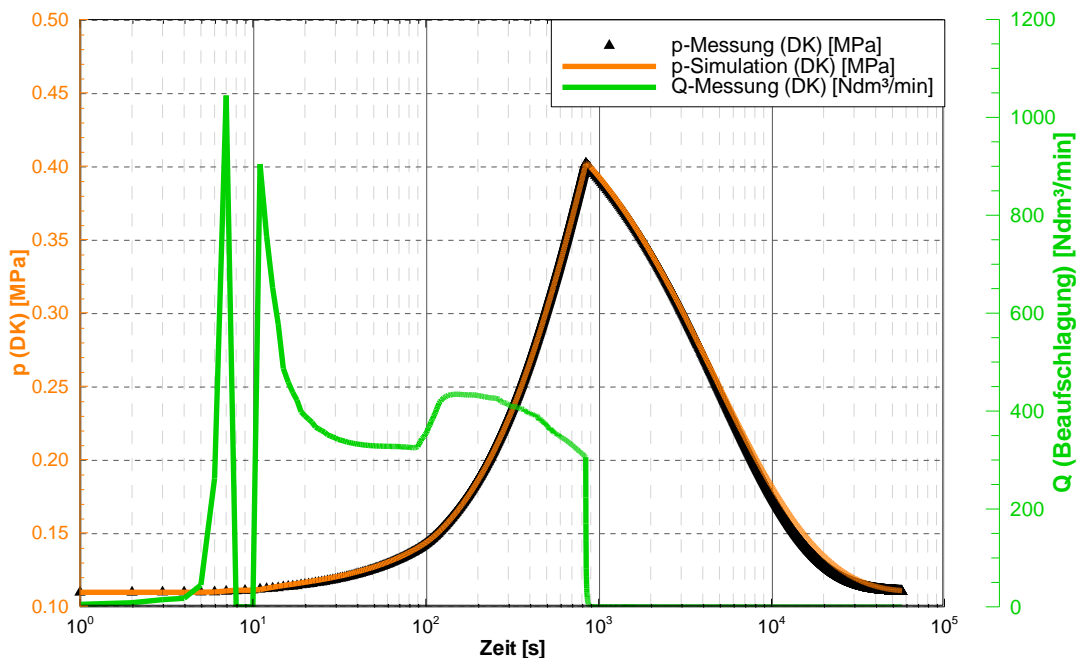


Abb. 74: Beispiel der Auswertung eines Bauwerkstests

Die **Abb. 75** zeigt an einem 3d-Modellausschnitt ein Beispiel für die Diskretisierung in Zylinderkoordinaten und die Parametrisierung für die Auswertung eines Bauwerkstests für eine einseitig installierte und beaufschlagte Druckkammer.

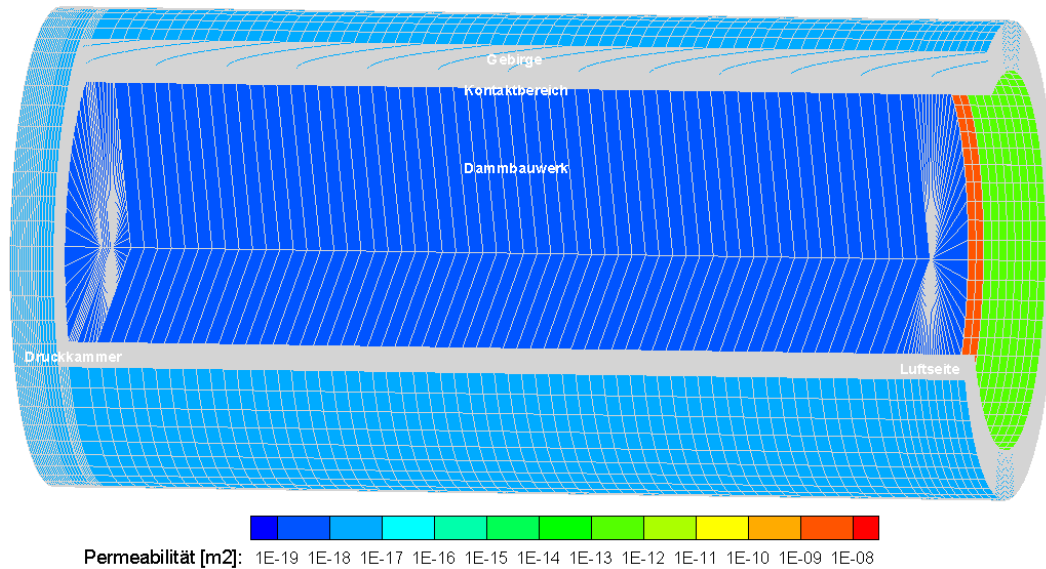


Abb. 75: Beispiel 3d-Modellausschnitt für die Auswertung eines Bauwerkstests über eine einseitig positionierte Druckkammer

Zur Beurteilung der Wirkung und Eignung des in Abschnitt „3.2 Installationskonzept“ vorgestellten Installationskonzeptes wurde ein 2d-Modell entwickelt und homogen parametrisiert. Für das Modell des Strömungsraumes wurden die theoretischen Druckganglinien im beaufschlagten Prüfvolumen und in den Kontrollvolumen für die Gas und Flüssigkeitsströmung prognostiziert. Auf Grund des symmetrischen Aufbaus und der Eigenschaftsverteilung konnte der Strömungsraum als zweidimensionaler Schnitt in einem Zylinderkoordinatensystem entlang der Bauwerksachse berechnet werden (**Abb. 76**).

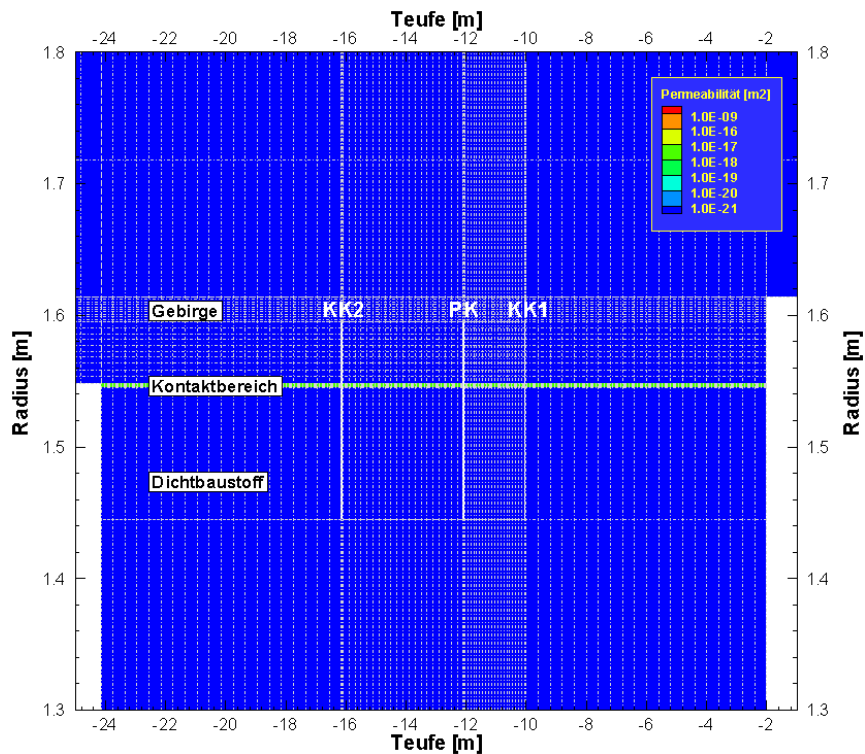


Abb. 76: Vereinfachtes 2d-Modell – Beispiel der Testauswertung für das im Abschnitt 0 vorgestellte Installationskonzept

Die Eingangsparameter des Modells wurden aus Erfahrungswerten abgeleitet. Die Parameter sind in der **Tab. 43** zusammengefasst.

Tab. 43: Eigenschaften der Testkonfiguration (vorgestelltes Installationskonzept)

Parameter	Einheit	Wert
Mächtigkeit des Kontaktbereiches zwischen Baustoff und Gebirge	m	0,003
Abstand zwischen Prüfraum (PK) und linkem Kontrollraum (KK2)	m	4
Abstand zwischen Prüfraum (PK) und rechtem Kontrollraum (KK1)	m	2
Permeabilität Gebirge	m ²	10 ⁻²²
effektive Porosität Gebirge	-	0,004
Permeabilität Baustoff	m ²	10 ⁻²²
effektive Porosität Baustoff	-	0,004
Permeabilität Kontakt	m ²	10 ⁻¹⁴ – 10 ⁻¹⁸
Viskosität Gas/Flüssigkeit	Pas	1,9·10 ⁻⁵ /2,0·10 ⁻³
Dichte Gas/Flüssigkeit	kg/m ³	1,14/1204,2
Volumina der Prüf- und Kontrollkammern	l	81,6

Für die beiden Fluide wurde für die Permeabilitäten des Kontaktbereiches von 10^{-14} bis 10^{-18} m² bei einer Schrittweite von jeweils einer Zehnerpotenz der Strömungsprozess aus dem Prüfraum bei einer Druckbeaufschlagung von 1 MPa für eine Testdauer von ca. 167 h berechnet. Die Ergebnisse der 4 Modellvarianten je Fluid sind in **Abb. 77** und **Abb. 78** dargestellt.

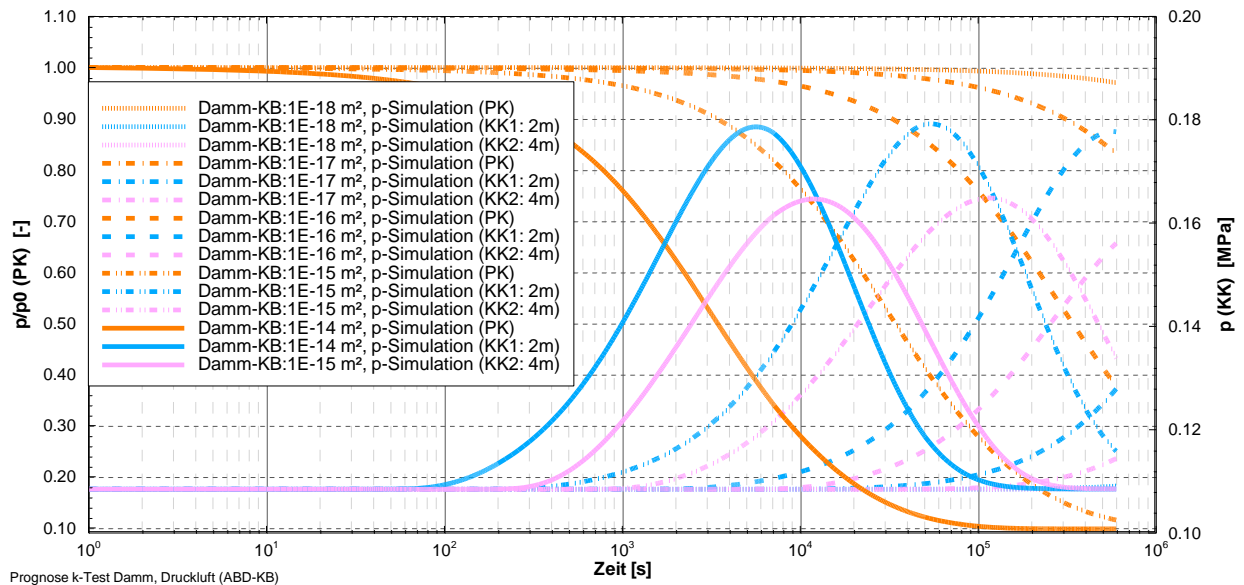


Abb. 77: Prognostizierte Druckganglinien PK, KK1 und KK2 für pneumatische Tests (Druckluft) und Permeabilitäten im KB von $1 \cdot 10^{-14}$ m² bis $1 \cdot 10^{-18}$ m²

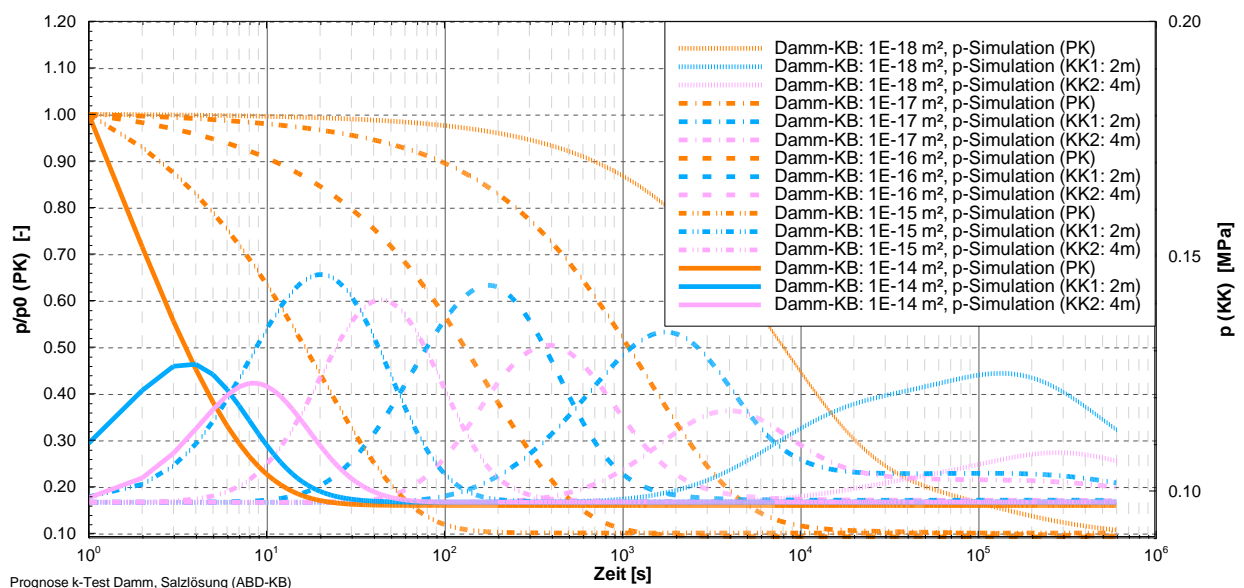


Abb. 78: Prognostizierte Druckganglinien PK, KR1 und KR2 für hydraulische Tests (Salzlösung) und Permeabilitäten im KB von $1 \cdot 10^{-14}$ m² bis $1 \cdot 10^{-18}$ m²

Im Ergebnis der Modellrechnungen können folgende Schlussfolgerungen formuliert werden:

- Für die gewählte Testkonfiguration mit Abständen zwischen PK und KK im Bereich von 2 m bis 4 m kommt es bei Permeabilitäten von $1E-18$ m² (Lösung) bzw. $1E-17$ m² (Gas) innerhalb eines Tages zu Druckreaktionen in den Kontrollkammern. Für geringere Permeabilitäten ergeben sich für die gewählte Testkonfiguration längere Testdauern.

- Es ist standortbezogen zu prüfen, inwiefern durch eine Reduzierung der Kontrollkammer-
volumen die Sensitivität der Druckreaktion erhöht werden kann.
- Für jeden Bauwerkstest sollte in vorlaufenden Modellrechnungen auf der Grundlage der
Standortgeometrie, der Kenntnisse zu den Dichtmaterialien und dem Gebirge (ALZ) sowie
dem möglichen Druckregime eine Konfiguration der Ringkammern hinsichtlich Volumen und
Positionierung erfolgen.

4 Vergütung

4.1 Strömungstechnische Aspekte

Den Ausgangspunkt der Überlegungen zu Strömungsprozessen der im Abschnitt „3 Injektionsmaterialien“ beschriebenen Injektionsflüssigkeiten bildet eine Beschreibung des möglichen Strömungsraumes im Kontakt zwischen Baustoff und Gebirge:

Im Ergebnis des Einbaus und des Abbindeprozesses ist von einem dreigeteilten Porensystem auszugehen. Dieses setzt sich zusammen aus der Porosität des Baustoffes, der Porosität des Gebirges bzw. der konturnahen Auflockerungszone und der Porosität des Kontaktbereiches zwischen Baustoff und Gebirge. Für die drei genannten Bereiche des Porensystems ist von einer unterschiedlichen Gesamtporosität und einer deutlich abweichenden Porengrößenverteilung und -struktur in den Teilbereichen auszugehen. Ein Beispiel dafür geben die in **Abb. 79** vergleichend dargestellten Porengrößenverteilungen (Ergebnisse aus Quecksilberporosimetrie¹) für Salzbeton M2, Steinsalz und den in den Injektionsversuchen verwendeten Roten Wesersandstein.

Im Standardversuch der Quecksilberporosimetrie werden Proben mit einer Kantenlänge ≤ 7 mm untersucht. Aus dieser Probengröße wird eine Schranke der Methodik für die Ermittlung der Porengrößenverteilung deutlich. Die zu untersuchende Porenstruktur sollte in einer Probe mit dem genannten Abmaß repräsentativ abgebildet werden². Für die Beispieluntersuchungen an Steinsalz (**Tab. 44**) wird daraus sofort die eingeschränkte Aussagefähigkeit für das in der Regel grob kristalline Steinsalz deutlich. Während für den Sandstein und den Salzbeton von einer Repräsentanz der Probe für die Porenstruktur ausgegangen werden kann, ist eine Quecksilberporosimetrie für Steinsalz bei einer Kantenlänge ≤ 7 mm, wenn überhaupt, nur für sehr feinkristallines Steinsalz aussagekräftig. Für grobkristallineres Steinsalz sind andere Methoden für die Ermittlung der Porengrößenverteilung an größeren Probenkörpern erforderlich. Für Steinsalz in der Auflockerungszone kann unter In-Situ-Bedingungen von einer sehr geringen Porosität (Größenordnung $< 0,01$) ausgegangen werden. Für den Dichtbaustoff und den Kontakt von Baustoff und Gebirge ist von wesentlich größeren Porositäten auszugehen (Salzbeton M2: 0,19) Die Porosität des Gebirges ist damit für Volumenbilanzen eher untergeordnet. Die Bedeutung des sich aus dem Porengefüge des Steinsalzes ergebenden Kapillardrucks ist gegenwärtig noch nicht zu beurteilen. Dies setzt die Kenntnis einer repräsentativen Porengrößenverteilung voraus.

Vor dem Hintergrund dieser Erläuterungen dient die vergleichende Gegenüberstellung der Porengrößenverteilung in **Abb. 79** in erster Linie einer Vorstellung zu den wirkenden Porensystemen und der Verdeutlichung der großen Unterschiede in den Porenstrukturen in den Teilsystemen Dichtbaustoff und Gebirge. Für den Kontakt von Baustoff und Gebirge liegen aus dem Projekt keine Kenntnisse und Erfahrungen zur Porengrößenverteilung vor. Beobachtungen

¹ siehe Glossar

² Alternativ stehen ebenfalls Dilatometer für Probenabmessungen bis ca. 20 mm Kantenlänge zur Verfügung. Dies führt, neben dem Einsatz eines erhöhten Quecksilbervolumens, zu einer größeren Ungenauigkeit der Porosimetrie und der ermittelten Parameter.

an Kernproben aus dem Kontakt von Baustoff und Gebirge lassen auf eine breite Spanne der Porengrößenverteilung von wenigen Nanometern bis mehreren Zentimetern schließen.

Die Porengrößenverteilung und der Porengrößenanteil bestimmen den Kapillardruck, die Permeabilität und die Injizierbarkeit eines Porensystems. Aus den dargestellten Porengrößenverteilungen können u.a. die in **Tab. 44** und **Abb. 79** zusammengefassten Informationen zur Porenstruktur der Materialien abgeleitet werden.

Tab. 44: Ausgewählte Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie

Material	totale Porosität	Porositätsanteil			Porenradius			
		Makroporen	Mesoporen	Mikroporen	Maximum	Grenze Makro/ Meso	Grenze Meso/ Mikro	Grenze Makro/ Mikro
	[-]	[-]	[-]	[-]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
Salzbeton M2	0,191	0,034	-	0,157	53800	-	-	42
Steinsalz	0,013	0,006	0,001	0,006	51500	1500	25	-
Wesersandstein ¹	0,128±0,016	0,014±0,003	0,093±0,014	0,021±0,050	54500±3100	650 – 2950	200 - 750	-

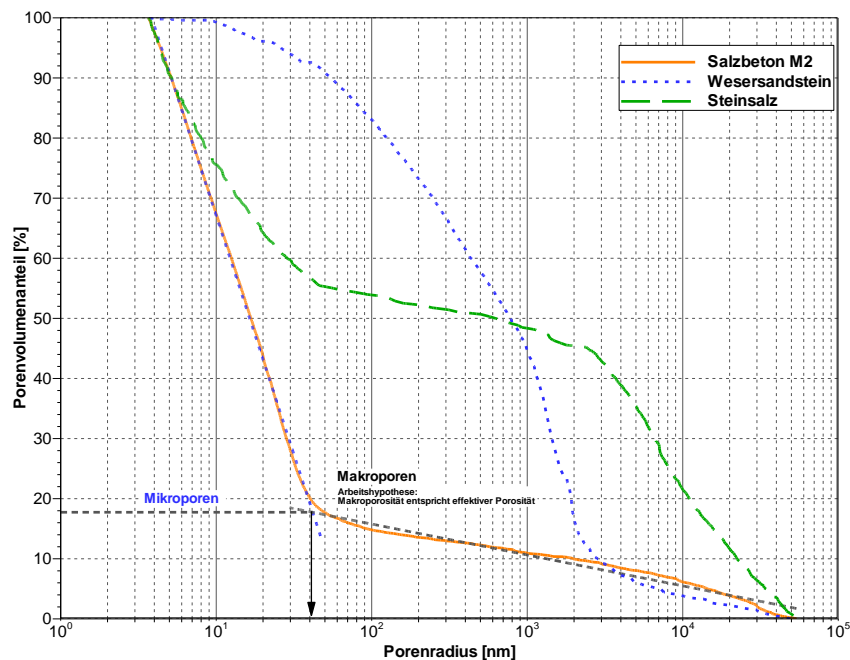


Abb. 79: Porengrößenverteilung Salzbeton M2, Wesersandstein, Steinsalz, kleines Dilatometer

Im Ergebnis des Einbaus des hydraulisch abbindenden Dichtmaterials ist, je nach Rezeptur, thermodynamischen Bedingungen und Eigenschaften des Gebirges von einer Feuchtigkeit in dem Porensystem auszugehen. Diese verteilt sich in Abhängigkeit von der Porengrößenverteilung und dem sich daraus ableitenden Kapillardruck unterschiedlich in dem Porensystem. Ganz generell ist davon auszugehen, dass, auf Grund des Benetzungsverhaltens von Wasser, der

¹ Mittelwerte für 12 Einzelmessungen

Porenraum mit einer Wasserschicht bzw. einer Schicht der Porenlösung benetzt ist und dass diese Porenraumsättigung mit Flüssigkeit mit Reduzierung der Porenquerschnitte zunimmt.

Das Gesamtsystem aus Porenvolumen, Porengrößenverteilungen und Phasenverteilung im Porenraum bestimmt das Permeabilitätsverhalten und die Injizierbarkeit des Porenraumes. Dabei ist davon auszugehen, dass die Makroporen mit großer Wahrscheinlichkeit den bestimmenden Einfluss auf den Strömungsprozess haben (vgl. Abb. 53: Austritte des Injektionsmaterials IM 4+ (rote Kreise) auf der Stirnseite des Sandsteins während der Injektion. Die Kantenlänge der Abbildung

Die effektiv für die jeweilige fluide Phase wirksame Permeabilität wird bestimmt von dem Gehalt der jeweiligen anderen Phase im Porenraum. Die Normierung der sich effektiv ergebenden Permeabilität auf die absolute Permeabilität wird als relative Permeabilität der jeweiligen Phase entsprechend Gleichung (3) (Glossar) bezeichnet. **Abb. 86** im Glossar zeigt schematisch den Zusammenhang von relativer Permeabilität für die jeweilige Phase und der Flüssigkeitssättigung für die Standardsituation einer Gas- und einer Flüssigkeitsphase im Porenraum (Zweiphasen-System). Im Fall des Auftretens von mehr als zwei nicht mischbaren fluiden Phasen im Porenraum, z.B. Gas, wässrige Lösung, organische Flüssigkeit (z.B. Epoxidharz, Bitumen), ergibt sich ein Mehrphasensystem, welches auf der Basis der temperaturabhängigen Grenzflächenspannungen und Kontaktwinkel in Teilsysteme zu differenzieren und hinsichtlich der Strömungsprozesse zu beurteilen ist. Ohne im Detail auf die Zusammenhänge einzugehen, ist in diesen Systemen die wässrige Lösung immer die den Feststoff¹ benetzende Phase. Diese wird von der organischen Phase benetzt. Die Gasphase im Porenraum gilt in diesem System als nicht benetzende Phase. In Abhängigkeit von diesem Benetzungsverhalten, den sich ergebenden Kapillardrücken und der Sättigungsverteilung der Phasen im Porenraum ergeben sich die effektiv wirksamen Permeabilitäten jeder Phase.

Die bestimmenden Benetzungseigenschaften Grenzflächenspannung und Kontaktwinkel für die Injektionsmaterialien wurden für die Temperaturen 30° C und 40° C ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Abschnitten „4.3 Dichtemessung und 4.4 Grenzflächenspannung“ dokumentiert.

Neben der Phasenverteilung im Porenraum wird der Strömungsprozess der Fluide bestimmt von der dynamischen Viskosität der Fluide. Diese ist abhängig von der Temperatur und für ausgewählte Flüssigkeiten, wie z.B. Injektionsmörtel und Bitumen², vom Schergefälle (Strukturviskosität/Dilatanz) und der Zeit (Thixotropie/Rheopexie). Die für 30°C und 40°C im Zeitraum von ca. 30 Minuten nach dem Anmischen für ein Schergefälle von 100 s⁻¹ ermittelten dynamischen Viskositäten der Injektionsmaterialien sind im Abschnitt „4.1 Viskositätsbestimmung“ dokumentiert.

Für die feststoffhaltigen Flüssigkeitssysteme sind zusätzlich das Verhalten der Feststoffpartikel in der Suspension und die Wechselwirkung (z.B. Kolmation) mit dem Porengefüge zu berücksichtigen. Ausschlaggebend dafür sind die Partikelgrößenverteilung in der Flüssigkeit und die Porengrößenverteilung.

¹ für Salinargestein und silikatische Oberflächen

² stark temperaturabhängig

Ohne im Detail auf die materialbezogen unterschiedlich zu berücksichtigenden physikalischen Prozesse und Zusammenhänge einzugehen, können zu den genannten Einflussgrößen folgende Wirkungen zusammengefasst werden:

- mit zunehmender Grenzflächenspannung der Flüssigkeit erhöht sich die Benetzbarkeit einer Feststoffoberfläche im Ergebnis der sich einstellenden Energiebilanz,
- für nacheinander durchgeführte Injektionen mit unterschiedlichen Flüssigkeiten in ein Porensystem wird bei gleicher Viskosität immer die Flüssigkeit mit der höheren Grenzflächenspannung die Flüssigkeit mit der geringeren Grenzflächenspannung verdrängen,
- mit zunehmender Grenzflächenspannung der Flüssigkeit erhöht sich der Kapillardruck bzw. die kapillare Steighöhe im Porengefüge,
- mit zunehmendem Kontaktwinkel reduziert sich der Kapillardruck bzw. die kapillare Steighöhe,
- mit zunehmender Viskosität reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit des Fluides,
- in Abhängigkeit von der Zeit, dem Fluidruck und dem Schergefälle muss das Strömungsverhalten der Injektionsmaterialien beurteilt und aufeinander abgestimmt werden,
- mit zunehmendem Partikeldurchmesser und Partikelkonzentration in der Suspension sowie abnehmendem Porendurchmesser wird es zur Kolmation im Porenraum kommen.

Einfache Ansätze gehen davon aus, dass ab einem Poren-Partikelgrößenverhältnis von 3:1 eine Brückenbildung und Kolmation einsetzt. In Abhängigkeit von den spezifischen Eigenschaften der Partikel (Partikelform, Ladung, Oberflächenbeschaffenheit) und den Poreneigenschaften (z. B. Konnektivität, Tortousität, Porengrößenverteilung) variiert das Kolmationsverhalten einer Suspension im Porenraum.

4.2 Vergütungs-/ Injektionsregime

Ausgehend von den Erläuterungen im vorangegangenen Abschnitt sowie den in Abschnitt „7 Bewertung der Injektionsmaterialien“ vorgestellten Ergebnissen aus der Untersuchung der unterschiedlichen Injektionsmaterialien im Rahmen dieses Vorhabens ergibt sich die Möglichkeit und Notwendigkeit der Auswahl und gegebenenfalls einer Kombination von Injektionsmaterialien und Druckregimen für die Vergütung von Wegsamkeiten im Kontakt Baustoff/Gebirge.

Ausschlaggebend für die Auswahl des Injektionsmaterials und des Druckregimes sind zum einen die strömungsrelevanten Eigenschaften des zu injizierenden Bereiches und die Eigenschaften des zu injizierenden Fluides bzw. die Wechselwirkungen mit dem Porengefüge und den Porenfluiden bei den herrschenden thermodynamischen Bedingungen. Ausgehend von den Erläuterungen zum Injektionsvorgang im „2.1 Prozesse und Einflüsse“ können hier nochmals folgende einflussnehmenden Eigenschaften zusammengefasst werden:

Injektionsraum:

- Aufbau und Geometrie,
- Porosität und Porengrößenverteilung der unterschiedlichen Strömungsräume,
- mechanische Festigkeit und Spannungszustand,
- Flüssigkeitsgehalt und Flüssigkeitssättigung im Porenraum der unterschiedlichen Strömungsräume,

Injektionsfluid:

- Grenzflächenspannung und Kontaktwinkel für das Phasensystem Injektionsflüssigkeit/Gas und gegebenenfalls Injektionsfluid/Porenlösung für die thermodynamischen Bedingungen,
- dynamische Viskosität für die thermodynamischen Bedingungen und das anzuwendende Druckregime – Kenntnisse zum zeit- und scherspannungsabhängigen Verhalten des Fluides im Strömungsprozess unter dem Einfluss von Druck und Temperatur,
- Partikelgrößenverteilung im Fluid,
- zeitabhängiges Materialverhalten des Injektionsmaterials unter den Anwendungsbedingungen,
- Wechselwirkungen des Injektionsmaterials mit den Fluiden und Feststoffen im Injektionsraum für die thermodynamischen Bedingungen.

Bezüglich der Parametrisierung des Injektionsraumes liegen aktuell im Wesentlichen die beispielhaften Porengrößenverteilungen für den Salzbeton M2 und Steinsalz und die Porengrößenverteilung des im Projekt injizierten Roten Wesersandsteins (Abschnitt „5 Injektionsversuche Sandstein“) vor. Nachfolgend werden als Grundlage von Überlegungen zur Anwendbarkeit der Injektionsmaterialien die Ergebnisse des Roten Wesersandsteins und die Erfahrungen aus den Injektionsversuchen laut Abschnitt „5 Injektionsversuche Sandstein“ herangezogen. Der für die Untersuchungen angewendete Rote Wesersandstein besitzt, im Vergleich zu den vom Hersteller angegebenen $3,9\text{E-}15\text{ m}^2[120]$, mit $3,5\text{E-}16\text{ m}^2$ bis $5,8\text{E-}16\text{ m}^2$ eine deutlich geringere Permeabilität¹.

Im Ergebnis von Quecksilberporositätsuntersuchungen des Institutes für Bergbau an drei Gesteinsblöcken des Roten Wesersandsteins mit je 4 Proben je Block ergibt sich für das Gestein ein triple porosity system mit einer mittleren totalen Porosität von $0,128\pm 0,016$ (12 Messwerte) und einem Porositätsanteil von Makroporen von ca. $0,013\pm 0,003$ (12 Messwerte). Die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie sind in **Abb. 80** und **Abb. 81** für die Zusammenhänge Porenvolumenanteil und Porosität in Abhängigkeit vom Porenradius dargestellt. Für die je Probe ermittelten Einzelergebnisse wurde eine mittlere Kurve berechnet und in **Abb. 80** und **Abb. 81** hervorgehoben dargestellt. Die aus den Einzelergebnissen abgeleitete Differenzierung

¹ Wertebereich der Gaspermeabilität für 3 Einzelmessungen an getrockneten Probenkörpern

des Porenraumes nach den Porenradien in Makro-, Meso- und Mikroporen erfolgt entsprechend den Angaben in **Tab. 44**.

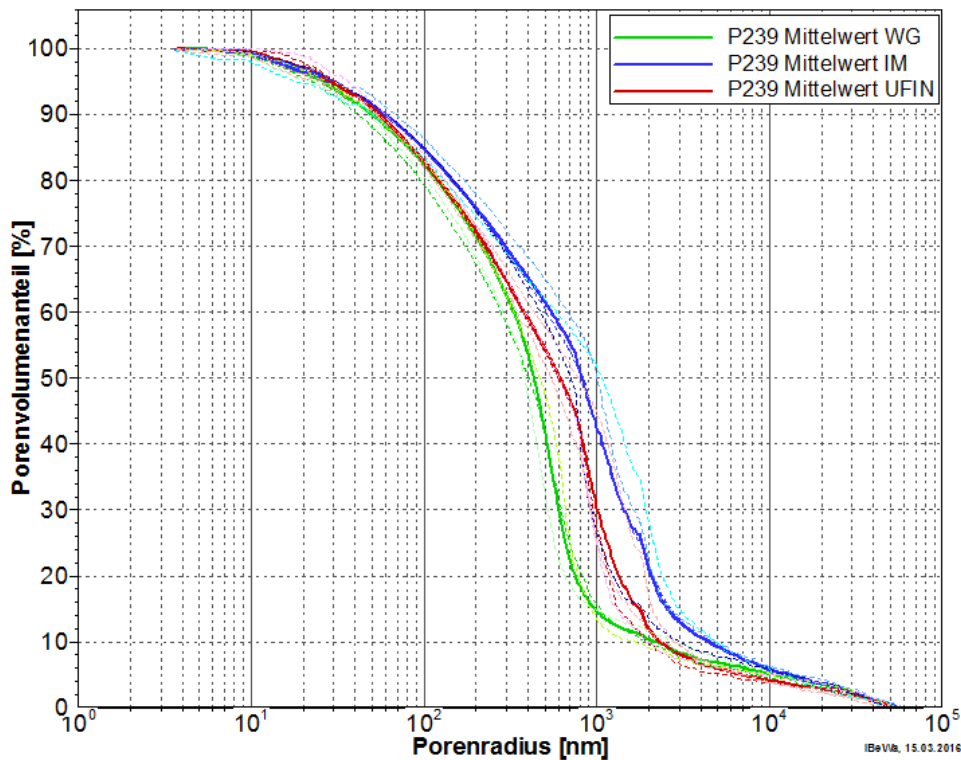


Abb. 80: Porengrößenverteilung Roter Wesersandstein. Volumenanteil in Abhängigkeit von den Porenradien.

Für die weiteren Betrachtungen wird als Bezugsgröße der Porenradius an der Grenze zwischen Makro- und Mesoporosität bei ca. 2500 nm betrachtet. Diese Auswahl erfolgt relativ willkürlich. Sie nimmt Bezug auf die Arbeitshypothese, dass die Makroporosität bestimmend für die Strömungsprozesse und das Injektionsverhalten der porösen Materialien ist. Dafür ist davon auszugehen, dass sowohl die Porengröße bzw. der Porengrößenbereich der Makroporen als auch der Porositätsanteil (Volumenanteil der Makroporen) bestimmend für die Permeabilität und das Injektionsverhalten sind. Diese Zusammenhänge müssten in die Vorgabe einer Bezugsgröße einfließen.

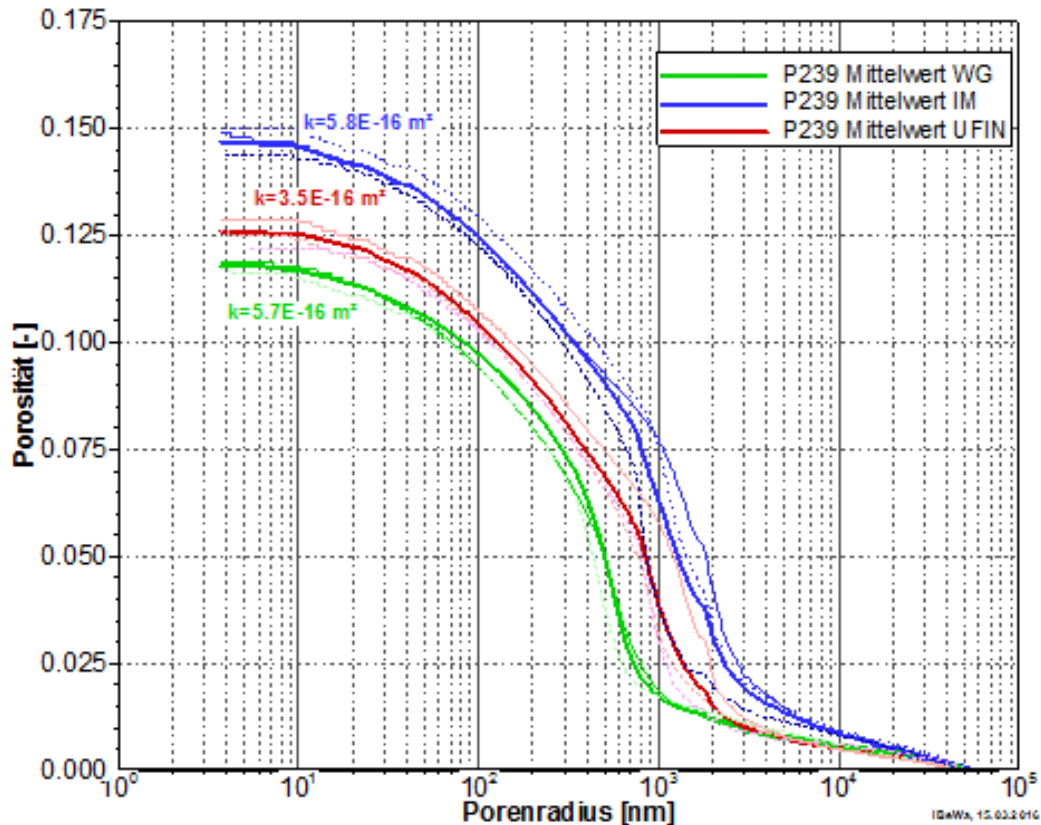


Abb. 81: Porengrößenverteilung Roter Wesersandstein. Porosität in Abhängigkeit von den Porenradien

Zur Beurteilung dieses Zusammenhanges wurde an drei Proben die Gaspermeabilität des getrockneten Sandsteins ermittelt. Die Ergebnisse der Permeabilitätsuntersuchungen sind gemeinsam mit den Einzelergebnissen der Quecksilberporosimetrie je Gesteinsblock in **Tab. 45** zusammengefasst.

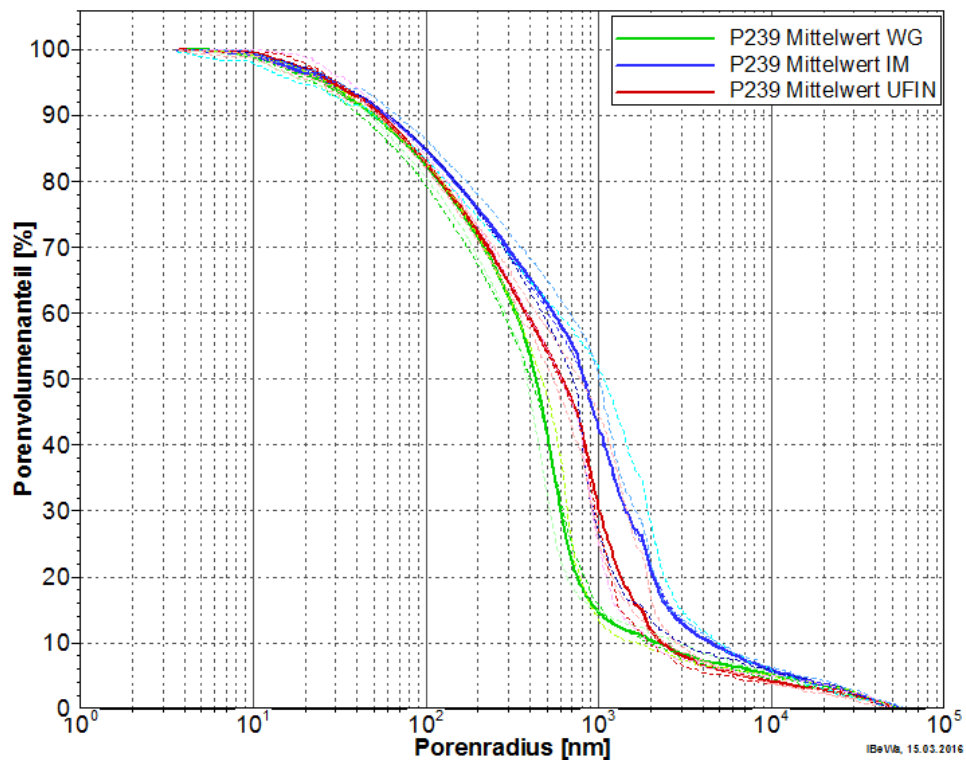
Tab. 45: Ergebnisse Permeabilität und Quecksilberporosimetrie

Probe	totale Porosität	Permeabilität	Porositätsanteil			Porenradius		
			Makroporen	Mesoporen	Mikroporen	Maximum	Grenze Makro/ Meso	Grenze Meso/ Mikro
	[-]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[nm]	[nm]	[nm]
P239-1/IM4	0,147±0,003	5,8E-16	0,015±0,001	0,110±0,005	0,021±0,008	55500±2400	2610	380
P239-2/WG	0,112±0,012	5,7E-16	0,014±0,002	0,078±0,010	0,020±0,006	55300±2100	810	270
P239-3/UFIN	0,126±0,003	3,5E-16	0,010±0,001	0,094±0,004	0,020±0,002	53100±4100	1530	380

In **Abb. 81** sind die Permeabilitätsergebnisse den Ergebnissen Quecksilberporosimetrie zugeordnet. Die Permeabilitäten sind in Abhängigkeit von der Makroporosität in **Abb. 82**

dargestellt. Der als x-Fehlerbalken verdeutlichte Wertebereich der je Probe ermittelten Makroporositäten (mindestens 4 Einzelwerte) zeigt, entsprechend den Schwankungen der Porengrößenverteilungen in **Abb. 80** und **Abb. 81**, eine Schwankung der ermittelten Makroporositäten. Es wird davon ausgegangen, dass diese Variabilität der Makroporosität die Permeabilität der untersuchten Materialprobe bestimmt. Dies wird von dem in **Abb. 82** ersichtlichen Anstieg der Permeabilität in Abhängigkeit von der Makroporosität bestätigt. Die geringe Änderung der Makroporosität führt für die untersuchten Proben zu einer Erhöhung der Permeabilität um den Faktor von ca. 1,7.

Die Zuordnung der Permeabilitäten zu dem Zusammenhang von Porosität und Porengröße in **Abb. 80** und **Abb. 81**, scheint auf den ersten Blick nicht plausibel. Die Proben P239-1/IM4 und -2/WG besitzen annähernd gleiche Permeabilitäten ($5,8E-16 \text{ m}^2$, $5,7E-16 \text{ m}^2$). Trotzdem ordnen sich die Funktionen der Probe P239-3/UFIN mit einer geringeren Permeabilität ($3,5E-16 \text{ m}^2$) zwischen den Funktionen der zwei vorangenannten Proben ein. Die Ursache dafür



wird in dem aus

Abb. 80, besser ersichtlichen höheren Volumenanteil an Makroporen im Porengrößenbereich $>3000 \text{ nm}$ gesehen. Der augenscheinlich geringe Unterschied im Kurvenverlauf bedeutet einen höheren Anteil an mit großer Wahrscheinlichkeit für die Permeabilität bestimmenden Makroporen.

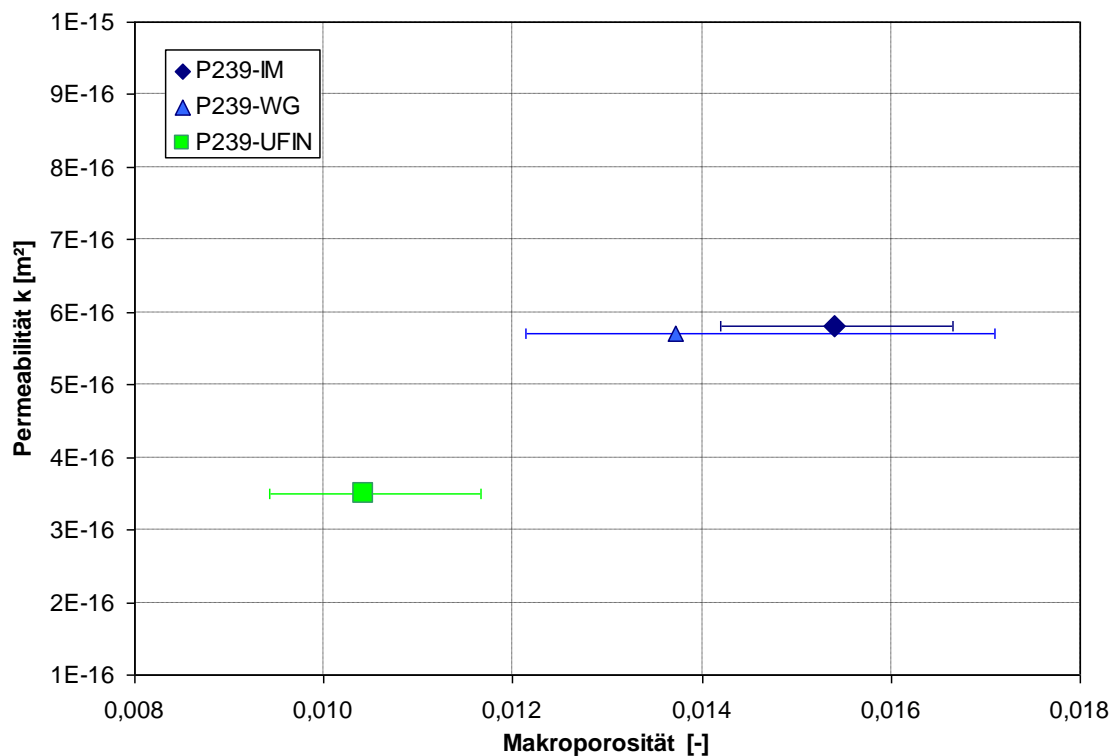


Abb. 82: Permeabilität in Abhängigkeit der Makroporosität, die x-Fehlerbalken kennzeichnen den Wertebereich der ermittelten Makroporosität

Aus den vorliegenden Kenntnissen zu den Porengrößenverteilungen des Sandsteins (Tab. 45) ergeben sich Makroporengehalte mit Porenradien > 810 nm bzw. Porendurchmessern > 1620 nm. In Abhängigkeit von dieser Information zur Porenstruktur ist die Auswahl der Partikelgrößenverteilung in dem einzusetzenden Injektionsmaterial erforderlich. Für den allgemeinen Ansatz eines Verhältnisses zwischen Partikelgröße und Porengröße und/oder Rissweite von 1 : 3 (s. Abschnitt 1.5) ergibt sich für den Makroporenbereich daraus theoretisch eine Injizierbarkeit für Partikel mit Durchmessern < 540 nm. Eine Injizierbarkeit des Mesoporenraumes mit partikelgestützten Injektionsmaterialien ist für diesen Ansatz, vor dem Hintergrund der Partikelgrößen der Injektionsmaterialien bis in die Größenordnung von ca. 10 nm, theoretisch auch denkbar. Für den Injektionsprozess wird jedoch vermutet, dass bereits die Wechselwirkungen der Partikel im Injektionsmaterial mit dem Makroporenraum zu einer Minimierung des Eintrags in den Mesoporenraum verursacht.

Ausgehend von dem geringen Makroporenanteil und der geringen initialen Permeabilität des Sandsteins wäre, wenn überhaupt erforderlich, eine vergleichende Permeabilitäts- und Porengrößenuntersuchung für Injektionen mit einem molekulardispersen Injektionsmaterial (Reduzierung des Meso- und Makroporenraumes) und eines partikelgestützten Injektionsmaterials (vermutlich maßgeblich für die Reduzierung des Makroporenraums) erforderlich.

Auf Grund der wenigen vorliegenden Daten und Zusammenhänge ist eine repräsentative Ableitung eines Zusammenhangs zwischen Makroporengehalt, Permeabilität und Injizierbarkeit noch nicht möglich. In der Prüfung dieses Konzeptes bzw. der Ermittlung dieser Zusammenhänge für den Kontakt Baustoff/Gebirge wird ein wesentlicher Baustein für die Beurteilung der Strömungsprozesse und der Injizierbarkeit eines Kontaktbereiches Baustoff/Gebirge gesehen. Hierfür sind weiterführende Untersuchungen an Proben aus dem Kontaktbereich Baustoff/Gebirge erforderlich. Diese sollten auf die Ermittlung und Korrelation der Permeabilität und der Makroporosität ausgerichtet werden. Ein entsprechender Zusammenhang wäre die Grundlage für die Interpretation von In-Situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Kontakt Baustoff/Gebirge hinsichtlich der Auswahl des Injektionsmaterials und der Festlegung eines Injektionsregimes.

Eine Parametrisierung der in Frage kommenden Injektionsmaterialien erfolgte im Teilbericht „B – Laborative Charakterisierung“.

Ausgehend von der Porengrößenverteilung des Wesersandsteins (**Abb. 80** und **Abb. 81**) sind in **Abb. 83** die Kapillardruckkurven für Wasser und die molekulardispersen Injektionsmaterialien Wasserglas, Epoxidharz und Bitumen in Abhängigkeit von der Fluidsättigung im Porenraum (links) und der Porengröße (rechts) dargestellt. Für die Berechnung der Kapillardruckkurven wurden die Grenzflächenspannungen und der Kontaktwinkel für die Temperaturstufe 30°C und 30 Minuten nach Anmischen des jeweiligen Fluides entsprechend den Erläuterungen in den Abschnitten „3 Durchführung der Messungen“ und „4 Vorstellung der Ergebnisse und Diskussion“, zu Grunde gelegt. Auf Grund des Feststoffgehaltes in den Suspensionen der Injektionsmörtel ist eine solche Darstellung für Ultrafin und IM 4+ nicht aussagekräftig.

Aus den Druckkurven wird deutlich, dass die Benetzungseigenschaften des Wasserglases im Vergleich zu den anderen Injektionsmaterialien zu den höchsten Kapillardrücken im Porengefüge des Sandsteins führen. Bedingt durch den Benetzungswinkel und die geringfügig abweichende Grenzflächenspannung ist der Kapillardruck des Wasserglases und auch der anderen Injektionsmaterialien geringer als der des Wassers. Dies bestätigt, dass in einem trockenen Porenraum Wasser immer als benetzende Phase wirksam werden würde bzw. in einem feuchten Porenraum das Wasser auf der Porenoberfläche nicht durch das Wasserglas oder auch die anderen Injektionsmaterialien (mit Ausnahme des 2K-Bitumens) verdrängt werden könnte. Beim Wasserglas ist darauf hinzuweisen, dass die Salzlösung als Härterlösung fungiert und diese somit nur bedingt verdrängt werden kann.

Aus dem dargestellten Zusammenhang resultiert eine Vorstellung zum erforderlichen Druckniveau für die Injektion der unterschiedlichen Fluide in die einzelnen Porenbereiche. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Injektion zusätzlich der Druckverlust in Folge der Permeabilität und Viskosität des jeweiligen Fluides mit zu berücksichtigen ist, so dass, auch unter Berücksichtigung des mit großer Wahrscheinlichkeit nicht trockenen Porenraumes, ein höherer Injektionsdruck erforderlich ist.

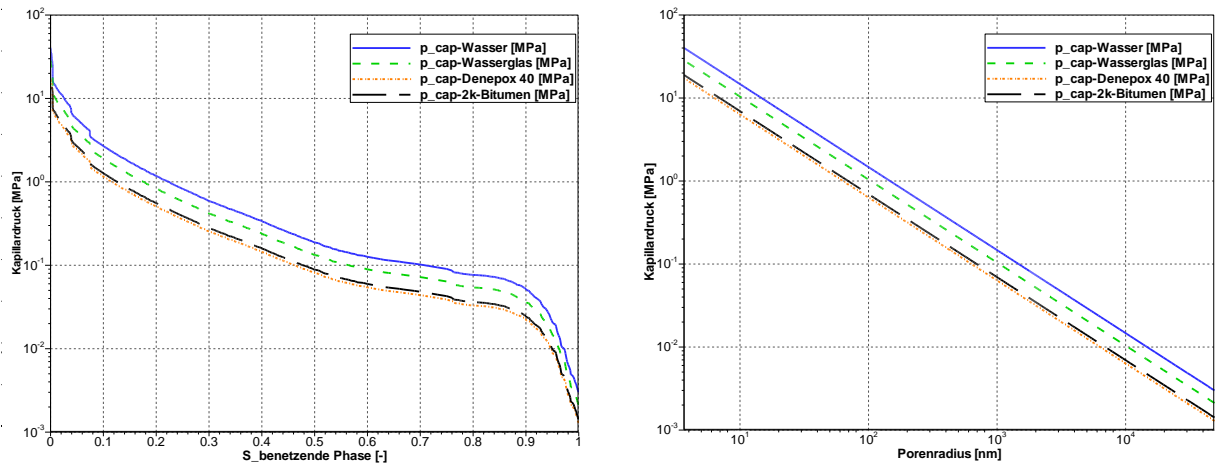


Abb. 83: Gegenüberstellung der Kapillardruckkurven für Wasser, Wasserglas, Denepox 40 und 2k-Bitumen links: in Abhängigkeit von der Fluidsättigung im Porenraum; rechts: in Abhängigkeit vom Porenradius

Die Darstellung der dynamischen Viskositäten der Injektionsmaterialien 30 Minuten nach Herstellung der Materialien in **Abb. 84** zeigen einen Schwankungsbereich der Viskosität über mehrere Zehnerpotenzen. Unter Berücksichtigung dieser Viskositätsergebnisse ist Wasserglas prinzipiell das für eine Injektion am besten geeignete Material.

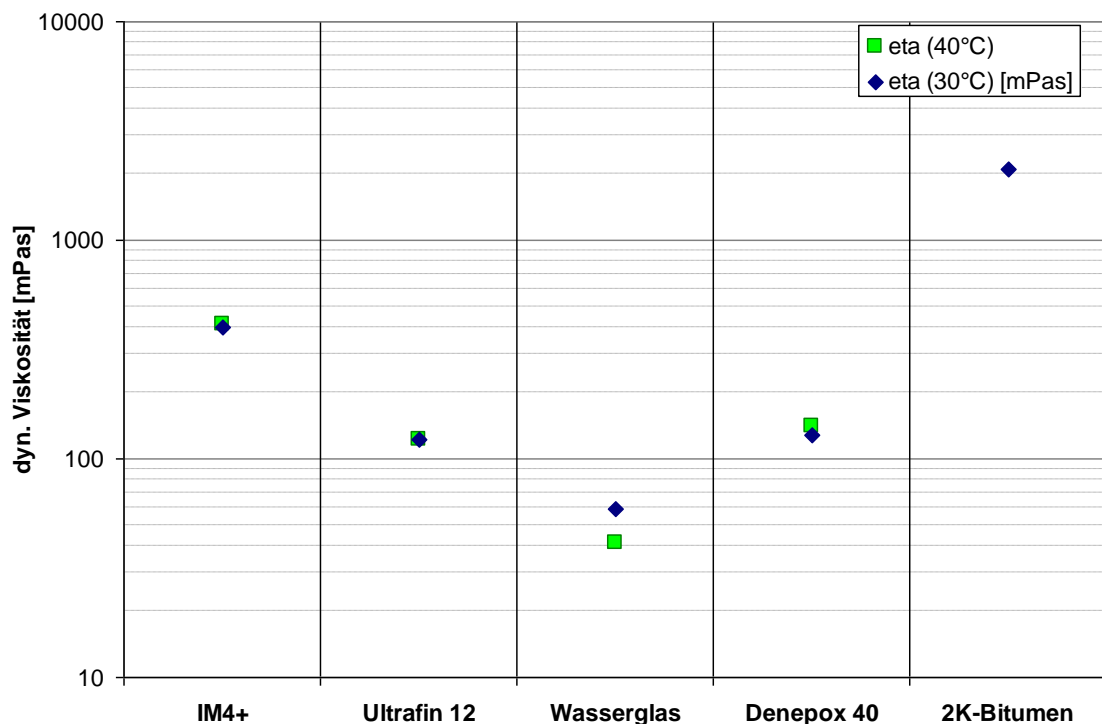


Abb. 84: Dynamische Viskosität der Injektionsmaterialien 30 Minuten nach Herstellung des jeweiligen Materials für 30°C und 40°C

Das Injektionsverhalten der Suspensionen wird wesentlich beeinflusst von dem Verhältnis von Porengrößenverteilung und Partikelgrößenverteilung. Aktuell liegen lediglich die Kenntnisse

über die Partikelgröße des Trockenmaterials der Injektionsmörtel IM 4+ mit $d_{90}=15-20 \mu\text{m}$ und des Ultrafin 12 mit $d_{95}=12 \mu\text{m}$ vor. Partikelgrößenverteilungen in der Suspension liegen aktuell nicht vor. Unter der Annahme, dass die Partikelgrößenverteilung des trockenen Materials repräsentativ für die Suspension ist, wären Porensysteme mit einem dominierenden Porenanteil von $> 60 \mu\text{m}$ mit den Feststoffsuspensionen injizierbar. Unter Berücksichtigung der Porengrößenverteilung des Wesersandsteins in **Abb. 80** und **Abb. 81** wird deutlich, dass für diese Situation nur ein Porenvolumenanteil von ca. 1,5 Vol.-% injizierbar ist. Für den kleineren Porenraum ist von einer Kolmation der Feststoffpartikel und mit großer Wahrscheinlichkeit einem Abpressen von Wasser auszugehen.

Diese wenigen Überlegungen verdeutlichen und bestätigen, das es erforderlich ist, die Wahl des Injektionsmaterials und des Druckregimes der Injektion auf die Porengrößenverteilung, die Kapillardrücke im Porenraum sowie das rheologische Verhalten der Materialien anzupassen.

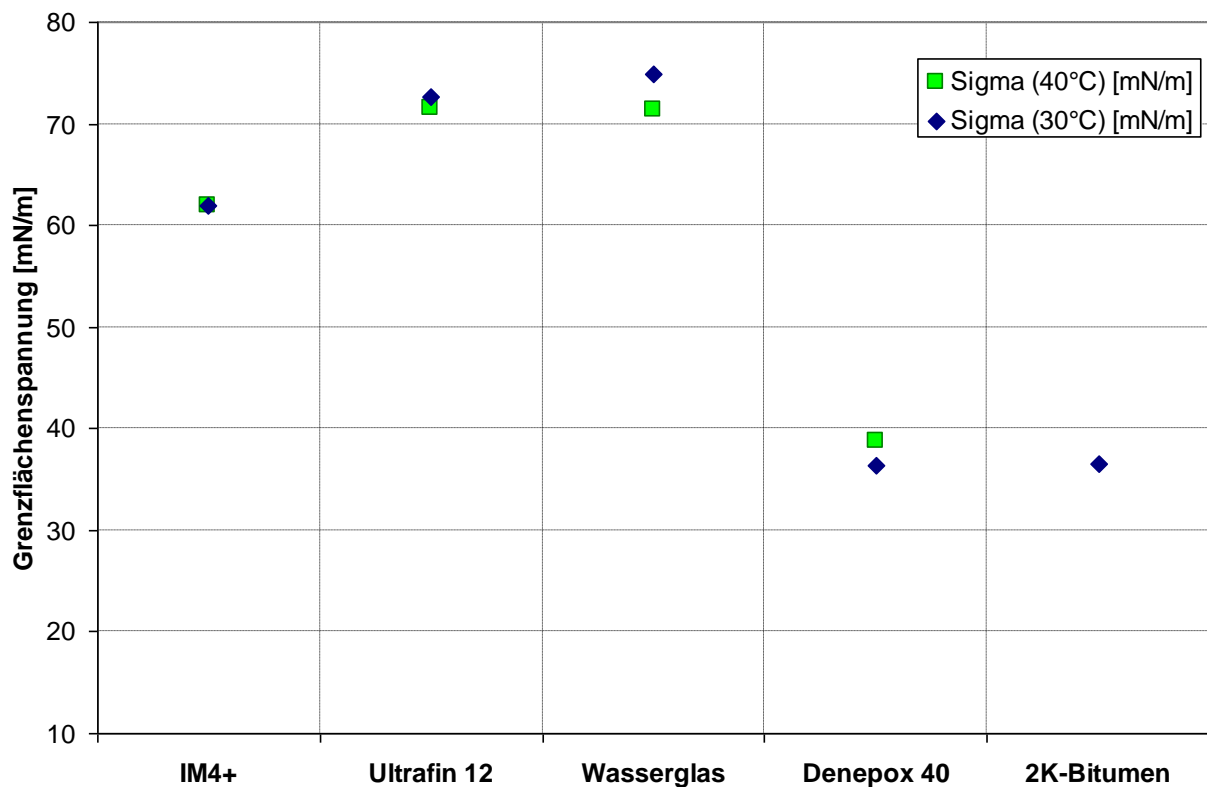


Abb. 85: Grenzflächenspannung der Injektionsmaterialien 30 Minuten nach Herstellung des jeweiligen Materials für 30°C und 40°C

Zusammenfassung der Ergebnisse

Streckenverschlussbauwerke dienen in Endlagerbergwerken als technische Barriere, die verhindern soll, dass kontaminierte Lösungen aus den Einlagerungsbereichen freigesetzt werden. Um dies zu realisieren müssen Streckenverschlussbauwerke eine möglichst geringe querschnittsgemittelte Permeabilität aufweisen, wobei der Kontaktbereich zwischen dem Gebirge und dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks einen oftmals höher permeablen Bereich darstellt. Um den Kontaktbereich nach der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks hinsichtlich der erreichten Permeabilität zu überprüfen und gegebenenfalls mittels Injektionen abzudichten wurden in diesem Forschungsvorhaben ein Nachweiskonzept erarbeitet sowie unterschiedliche Injektionsmaterialien untersucht.

Für Injektionsarbeiten steht eine Vielzahl an Injektionsmaterialien, die auch im Tief- und Tunnelbau eingesetzt wird zur Verfügung. Für die Kontaktfugeninjektion eines Streckenverschlussbauwerks im Salinar sind diese aufgrund der speziellen Anforderungen dieses Aufgabengebiets nur zum Teil einsetzbar. Dies gilt im Besonderen für die Anforderungen hinsichtlich der Beständigkeit im salinaren Milieu sowie die chemische Verträglichkeit mit dem Salzgebirge. Die Beständigkeit im salinaren Milieu ist für Streckenverschlussbauwerke in Bergwerken zur Endlagerung radioaktiver Abfälle von besonderer Bedeutung, da über geologische Zeiträume ein sicherer Abschluss der Abfälle von der Hydro- und Geosphäre gewährleistet sein muss. Da für die im Berg- und Tunnelbau sonst vielfach für Abdichtinjektionen eingesetzten Kunstharze nicht als beständig im salinaren Milieu gelten können sie nicht zur Kontaktfugeninjektion eingesetzt werden. Um in die Risse und Wegsamkeiten im Bereich der Kontaktfuge mit Öffnungsweiten unter 100 µm eindringen können eignen sich sowohl partikelgestützte als auch partikelfreie Injektionsmaterialien. Die Auswahl des Injektionsmaterials hängt von den für das Streckenverschlussbauwerk verwendeten Baustoffen, der Geologie des umliegenden Gebirges als auch den Eigenschaften der jeweiligen Injektionsmaterialien ab. Daher ist für die Auswahl des geeigneten Injektionsmittels ein detaillierter Kenntnisstand der Materialeigenschaften notwendig. Um die für die Injektion von Rissen mit geringen Öffnungsweiten besonders wichtigen rheologischen Eigenschaften für ausgewählte Injektionsmittel näher zu ermitteln wurden im Rahmen einer laborativen Charakterisierung unterschiedliche Materialkennwerte bestimmt. Diese wurden anschließend verwendet um die Injektionsmaterialien hinsichtlich Ihrer Eignung zur Kontaktfugeninjektion zu vergleichen und zu bewerten. Neben den rheologischen Eigenschaften spielen mechanische und chemische Eigenschaften sowie die Handhabbarkeit der Injektionsmaterialien bei der Bewertung eine Rolle.

Bei den rheologischen Eigenschaften, ins besonders bei der dynamischen Viskosität erzielten die beiden partikelfreien Injektionsmittel (Wasserglas und das Injektionsharz Denepox 40) als auch der Feinstzement Ultrafin 12 die besten Werte. Neben der Viskosität wird das Eindringverhalten in Risse maßgeblich durch die Partikelgröße der Injektionsmaterialien beeinflusst, weswegen partikelfreie Injektionsmaterialien generell ein besseres Eindringverhalten in Risse mit geringen Öffnungsweiten aufweisen. Von den partikelgestützten Injektionsmaterialien weist der Feinstzement Ultrafin 12 die geringste Partikelgröße auf gefolgt vom IM 4+ und dem 2K-Bitumen, dass Partikel mit Durchmessern von teilweise über 300 µm enthält. Neben der großen Partikelgröße weist das 2K-Bitumen auch eine hohe Viskosität auf, die deutlich schneller und ausgeprägter als bei den anderen Injektionsmitteln ansteigt. Die längste Verarbeitungszeit hat das Wasserglas, gefolgt von Feinstzement Ultrafin 12 und dem Injektionsharz Denepox 40. Unter Berücksichtigung aller betrachteten rheologischen Kenngrößen eignen sich das Wasserglas der Grädigkeit 37/40, das Denepox 40 sowie der Feinstzement Ultrafin 12 am besten für die Kontaktfugeninjektion.

Bei der Betrachtung der mechanischen Eigenschaften erweisen sich andere Injektionsmaterialien als vorteilhaft. Das Kunstharz Denepox 40 hat die höchsten Druck- und Haftzugfestigkeiten gefolgt vom Feinstmagnesiabinder IM 4+ und dem Feinstzement Ultrafin 12. Das beim Abbinden leicht quellende IM 4+ weist somit das geringste Schwindmaß beim abbinden auf, gefolgt von dem Wasserglas, Ultrafin 12 und Denepox 40. Das Bitumen verhält sich im Gegensatz zu den anderen Injektionsmaterialien unter Deformation plastisch.

Insgesamt weist das Injektionsharz Denepox 40 die unter Betrachtung der rheologischen und mechanischen Eigenschaften die vorteilhaftesten Eigenschaften für die Kontaktfugeninjektion auf, gefolgt von dem Wasserglas der Grädigkeit 37/40 und dem Feinstzement Ultrafin 12. Jedoch erweist sich der Einsatz des Injektionsharzes in Streckenverschlussbauwerken in Endlagerbergwerken, die hohe Anforderungen hinsichtlich der Beständigkeit des Injektionsmittels auch über geologische Zeiträume haben als schwierig. Für Zeiträume über 100 Jahre hinaus ist es nur schwer möglich die Beständigkeit von Kunstharzen aufzuzeigen. Generell ist es wie oben dargestellt schwierig ein Injektionsmittel zu finden, das hinsichtlich aller aufgestellten Anforderungen die besten Eigenschaften aufweist. Es gilt vielmehr die jeweilige Aufgabenstellung präzise zu formulieren und dementsprechend das geeignete Injektionsmaterial auszuwählen. Bei der Abdichtung der Kontaktfuge, wo ins besonders den rheologischen Eigenschaften und dem Eindringverhalten der Injektionsmaterialien eine hohe Bedeutung beigemessen wird eignen sich Denepox 40, Wasserglas 37/40 und Ultrafin 12 am besten.

Ein Baustein für die Beurteilung eines Streckenverschlussbauwerkes ist der gegenständliche Funktionsnachweis über die strömungstechnische Testung des Bauwerkes oder eines Bauswerksabschnittes. Im Rahmen des Teilvorhabens erfolgte die Entwicklung eines Konzeptes für einen entsprechenden strömungstechnischen Bauwerkstest einschließlich der Handlungsoptionen der Vergütung der strömungsrelevanten Bereiche im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge.

Das Grundkonzept der strömungstechnischen Testung beruht auf der Druckbeaufschlagung einer zentralen Druckkammer bei gleichzeitiger Erfassung der zeitabhängigen Druckreaktion in den beidseitig zur Druckkammer angeordneten Kontrollkammern. Die dazu erforderlichen Ringkammern werden vor dem Einbau des Verschlussbauwerkes vorinstalliert und über eine Befüll- und Entlüftungsbohrung von der Ortsbrust des Bauwerkes angeschlossen. In Auswertung der erfassten Druckganglinien erfolgt die modellgestützte Ermittlung der integralen Permeabilität des getesteten Bauwerksabschnittes.

Die ermittelte Permeabilität bildet die Grundlage für die Beurteilung der Dichtwirkung und gegebenenfalls die Auswahl eines Injektionsmittels für die nachträgliche Vergütung des Bauwerksabschnittes. Wesentliches Kriterium für die Auswahl des Injektionsmittels ist der physikalische Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität. Im Rahmen des Vorhabens wurden auf der Basis von Quecksilberporosimetrie- und Gaspermeabilitätsuntersuchungen der Zusammenhang zwischen Makroporosität und Permeabilität ermittelt. Auf der Basis der im Berichtsteil B für die Injektionsmaterialien dokumentierten Parameter erfolgte eine erste Beurteilung der Eignung für die Injektion.

5 Verzeichnisse

5.1 Variablen

A	-	Fläche	[m ²]
n	-	Porosität	[-]
p	-	Druck	[Pa]
u	-	fiktive DARCY-Geschwindigkeit	[m/s]
v	-	Geschwindigkeit	[m/s]

5.2 Indizes

a	Abstand
abs	absolut
ALZ	Auflockerungszone
D	Darcy
DE	Dichtelement
eff	effektiv (im Sinne von nutzbar, durchströmbar, mobil, wirksam)
F	Fluid
int	integral
KB	Kontaktbereich
M	Mantel
max	maximal
Ph	Phase – fluide Phase
rel	relativ
t	total

5.3 Abkürzungen

A	Auswertung
ALZ	Auflockerungszone
B	Beurteilung
BLP	Bohrlochpacker
D	Durchführung
DE	Dichtelement
DK	Druckkammer
Hg	Quecksilber
KB	Kontaktbereich
KK	Kontrollraum
KLS	kabelloser Sensor
P	Planung
PK	Prüfkammer

5.4 Glossar

Abstandsge- schwindigkeit	Geschwindigkeit eines Flüssigkeitsteilchens und/oder gegenüber dem Feststoff inerten Flüssigkeitsinhaltsstoffes im effektiven/durchströmbar/mobilen Porenraum
--------------------------------------	---

$$v_a = \frac{u_D}{n_{\text{eff}}} \quad (1)$$

v_a	Abstandsgeschwindigkeit	[m/s]
u_D	fiktive DARCY-Geschwindigkeit oder Filtergeschwindigkeit	[m/s]
n_{eff}	effektive (durchströmbare, mobile) Porosität	[-]

Fluide Synonym für Gase, Flüssigkeiten, Emulsionen und Suspensionen

Quecksilberporosimetrie Methode zur Ermittlung der Porengrößenverteilung

Injektion von Quecksilber in ein poröses Probenstück mit einer Kantenlänge von \leq ca. 7 mm oder \leq ca. 25 mm mit Drücken bis 400 MPa oder 700 MPa. Auf der Grundlage der Grenzflächenspannung und des Kontaktwinkels für Quecksilber können aus dem hoch präzise erfassten Quecksilbervolumen und der Druckganglinie das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung ermittelt werden. Untersuchungen erfolgen in der Regel an getrockneten Festkörperproben, die nach dem Versuch verworfen werden müssen.

integrale Permeabilität Ingenieurtechnischer Parameter zur Beschreibung/Parametrisierung der strömungstechnischen Wirkung eines Verschlussbauwerkes aus unterschiedlichen Strömungsräumen (Bauwerk/Dichtelement, Kontaktbereich zwischen Dichtelement und Gebirge, Auflockerungszone im Gebirge, unverritztes Gebirge), der durch Gleichung (2) definiert ist:

$$k_{\text{int}} = \frac{(k_{\text{ALZ}} \cdot A_{\text{ALZ}}) + (k_{\text{KB}} \cdot A_{\text{KB}}) + (k_{\text{DE}} \cdot A_{\text{DE}})}{A_{\text{int}}} \quad (2)$$

k_{int}	-	integrale Permeabilität des Gesamtsystems	m^2
k_{ALZ}	-	Permeabilität Auflockerungszone im Gebirge	m^2
k_{KB}	-	Permeabilität Kontaktbereich Baustoff/Gebirge	m^2
k_{DE}	-	Permeabilität Baustoff	m^2
A_{int}	-	integral wirksame Fläche des Gesamtsystems	m^2
A_{ALZ}	-	Fläche Auflockerungszone im Gebirge	m^2
A_{KB}	-	Fläche Kontaktbereich Baustoff/Gebirge	m^2
A_{DE}	-	Fläche Baustoff	m^2

Auf Grund der möglichen großen Flächenunterschiede der Strömungsräume sind deutliche Permeabilitätsunterschiede über mehrere Zehnerpotenzen möglich. Entsprechende große, lokale Schwankungen der Permeabilität können auch innerhalb der einzelnen Strömungsräume auftreten (z.B. Kontakt zwischen Baustoff und Gebirge). Eine Beurteilung der Strömungsprozesse in dem Bauwerk (Strömungsgeschwindigkeiten, Stofftransport, Erosion) erfordert daher immer die Kenntnis der Permeabilitäten in den einzelnen Strömungsräumen.

effektive Phasenpermeabilität Der Strömungsprozess einer flüssigen und gasförmigen [Phase](#) in einem ungesättigten Porenraum folgt den Gesetzmäßigkeiten der Zweiphasenströmung. Diese werden maßgeblich bestimmt durch die effektive Phasenpermeabilität in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit. Das Permeabilitätsverhalten wird durch das Konzept der relativen Phasenpermeabilität laut Gleichung (3) beschrieben.

$$k_{\text{rel, Ph}} = \frac{k_{\text{Ph}} (S_{\text{Ph}} = x)}{k_{\text{abs, Ph}} (S_{\text{Ph}} = 1)} \quad (3)$$

$k_{\text{rel, Ph}}$	-	relative Phasenpermeabilität[-]
----------------------	---	---------------------------------

k_{ph}	-	effektive Phasenpermeabilität	$[m^2]$
$k_{abs, Ph}$	-	absolute Phasenpermeabilität ($S_{Phase} = 1$)	$[m^2]$
S_{Ph}	-	volumetrische Sättigung des Porenraumes mit Phase	$[-]$
x	-	Wertebereich S_{Phase} ($0 \leq x \leq 1$)	$[-]$

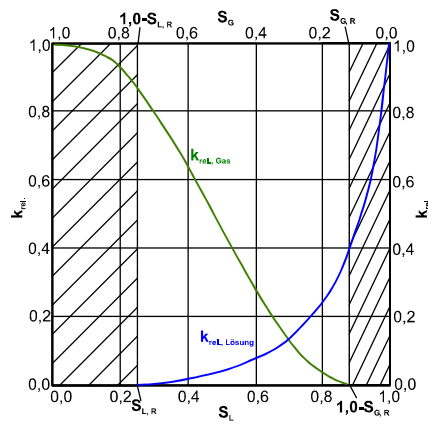


Abb. 86: Relative Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit (nach [139])

[Erläuterung: s_L – Wassersättigung, s_{LR} – Restwassersättigung, s_G – Gassättigung, s_{GR} – Restgassättigung]

Literaturangaben

- [1] DIN 4093 (September 1987): Einpressen im Untergrund – Planung, Ausführung, Prüfung
- [2] Knoll, P., et. al.: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV. Abschlussbericht ; [Laufzeit: 1.10.2002 - 31.10.2004]. Hannover, Teutschenthal [u.a.]: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek 2005
- [3] Deutsch, V., Morgner, W., Vogt, M.: Magnetpulver-Rißprüfung. Grundlagen und Praxis. Düsseldorf: VDI-Verl. 1993
- [4] Dallmann, T.: Grouting Prediction Systems for Hard Rock – Based on active design. Licentiat Thesis, Stockholm 2001
- [5] Eriksson, M.: Grouting Field Experiment at the Äspö Hard Rock Laboratory. Tunneling and Underground Space technology (2002) 17, S. 287–293
- [6] Bollingerfehr, W., et. al.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. AP 1.2 – Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, FKZ 02 E 10065
- [7] SalzWiki (2012) Deliqueszenzfeuchte. Dr. M. Steiger, Universität Hamburg, Department Chemie, Anorganische und Angewandte Chemie.
<http://193.175.110.91/salzwiki/index.php/Deliqueszenzfeuchte>, 02.07.2012.
- [8] Schön, J. H. Helbig, K., Treitel, S.: Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of petrophysics. Handbook of geophysical exploration Seismic exploration, / ed.: Klaus Helbig and Sven Treitel ; Vol. 18. London: Geophysical Press 1996
- [9] Mauke, R., Laske, D.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton) und Nachweiskonzept für das südliche Wetterrollloch), Unterlagen-Nr. P 255, 2007
- [10] Müller-Hoeppe, N.: Vorbemessung. GRS, Bd. 287. Köln: GRS 2012
- [11] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Verfüllung von Strecken mit hohen Anforderungen - Konzeptplanung und Nachweisführung., P 195. Revision 00. Unterlagentitel Teil 1 von 2., 2004
- [12] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Verfüllung von Strecken mit hohen Anforderungen – Konzeptplanung und Nachweisführung, P 195. Revision 00. Unterlagentitel Teil 1 von 2, 2004
- [13] Müller-Hoeppe, N., et. al.: Integrität geotechnischer Barrieren Teil 1 Vorbemessung. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, 2012
- [14] Ahrens, E., Onofrei, M.: Ultrafine Cement Grout For Sealing Underground Nuclear Waste Repositories., 1996
- [15] Jessberger, H. L.: Dokumentation zum Gefrierverfahren. Grundlagen und Anwendung. Bochum: Ruhr Universität 1981
- [16] Krauke, W., Klimpke, A., Laske, D.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Verfüllen untertägiger Bohrungen mit Magnesiabinder, Unterlagen-Nr.: P 174. Revision: 00, 1999

- [17] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz., Unterlagen-Nr.: G 296. Revision: 00., 2009
- [18] Mischo, H.: Untersuchungen an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge. Dissertation, 2002
- [19] Kaledin, O.: Abdichtung und Verfestigung der konturnahen Auflockerungszone beim Errichten von Verschlussbauwerken im Carnallitgestein unter Verwendung von Kunststoffinjektionen. Dissertation, 2008
- [20] Eyermann, T.J., Van Sambeek, L.L., Hansen, F.D.: Case Studies of Sealing Methods and Materials Used in the Salt and Potash Mining Industries. Sandia Report, SAND95-1120 - UC-721, 1995
- [21] Bezirksregierung Arnsberg: Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten. Gesundheitsschutz- Bergverordnung-GesBergV. 1991
- [22] Sammelliste der nach § 4 Abs. 1. GesBergV zugelassenen Stoffe. Stand 17. Januar 2014
- [23] DIN EN 12715
- [24] Niemeyer, M., et. al.: Endlager Morsleben Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA. Unterlagennummer: P 277, 2009
- [25] Krauke, W., Fliß, T.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabinder, Unterlagen-Nr. P 266, 2008
- [26] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz., Unterlagen-Nr.: G 296. Revision: 00., 2009
- [27] DE102005009036B3
- [28] Bach, J.: Untersuchung der lösekinetischen Vorgänge beim Ersaufen der Staßfurter Kaligruben. ABSCHLUSSBERICHT_FVV_TV4, 2010
- [29] Mengel, K.: Skript zur Vorlesung Salzlagerstätten, 2011
- [30] Köbel-Ebert, E., et al.: Gesteinskunde. Skript für die Übungen zur Dynamik der Erde, 2011
- [31] Holser, W. T.: Mineralogy of Evaporites. In Burns, R.G. (ed.). Marine Minerals. Reviews in Mineralogy America (1979) 6, S. 211–294
- [32] Freyer, D., Voigt, W.: Bericht: Aussagen zur thermischen Stabilität von Tachyhydrit bezugnehmend zur Problematik Grube Teutschenthal, Freiberg 2005
- [33] Voigt, W., Voigt.H., Jockel, A. (Hrsg.): Lösungsprozesse im Carnallitischen Salzgebirge – Geochemische Modellierung und Praktische Bedeutung
- [34] Helms, M.: Experimentelle Untersuchungen zur Fällungskinetik von Anhydrit (CaSO₄) bei der hydrogeothermalen Energiegewinnung. Diplomarbeit Teil 2, 2002
- [35] Grassmann, J., Gysel, M., Schneider, J.F.: Technischer Bericht 12. Anhydrit als Wirtsgestein für die Endlagerung Radioaktiver Abfälle in der Schweiz, 1979
- [36] BERGBAU-FORSCHUNG GMBH, Forschungsstelle für Grubenausbau und Gebirgsmechanik: Untersuchungsbericht Nr. 3574, 1984
- [37] BERGBAU-FORSCHUNG GMBH, Forschungsstelle für Grubenausbau und Gebirgsmechanik: Untersuchungsbericht Nr. 3801, 1985
- [38] BERGBAU-FORSCHUNG GMBH, Forschungsstelle für Grubenausbau und Gebirgsmechanik: Untersuchungsbericht Nr. 1140, 1974

- [39] DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH: Untersuchungsbericht Nr. U493ST22, Essen 1993
- [40] DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH: Untersuchungsbericht Nr. U408ST22, Essen 1992
- [41] Prinz, H.: Abriß der Ingenieurgeologie. Mit Grundlagen der Boden- und Felsmechanik, des Erd-, Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien; 74 Tabellen. Stuttgart: Enke 1991
- [42] Koenig, H. W.: Neuzeitliche Einpresstechnik. Die Wasserwirtschaft 42 (1952) 4, S. 120–132
- [43] Neumann, H.: Das Sedimentverhalten als Kenngröße für die Untersuchung von Injektionszementen. Zement-Kalk-Gips 11 (1958) 8, S. 339–345
- [44] Baston, K.: Beitrag zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Injektionsdruck, Einwirkradius und erreichter Druckfestigkeit unter besonderer Berücksichtigung der Elastizitätseigenschaften zementierter Proben von Lockergestein. Bergbauwissenschaften 13 (1966) 10, S. 401–416
- [45] Cambefort, H.: Bodeninjektionstechnik. Wiesbaden/Berlin 1969
- [46] Köster, R., Kaufmann, M., Laske, D.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. ERA Morsleben Systembeschreibung und Qualitätssicherungskonzept Bohrlochverfüllung mit Magnesiabinder, G148. Revision 00, 2002
- [47] Jasmund, K., Lagaly, G. (Hrsg.): Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Darmstadt: Steinkopff Verlag 1993
- [48] Sitz, P., Elert, K.-H., Schwandt, A., Gruner, M.: Salztone als natürliche Analoga für Bentonit-Dichtelemente im salinaren Gebirge. Aspekte der Langzeitsicherheit bei der Nachnutzung und Stilllegung von Kali- und Steinsalzbergwerken. Sondershausen 2001
- [49] Elert, K.-H.: Untersuchungen zum Stoffverhalten von Ton-Salz-Systemen unter Einbeziehung von Salztonen als natürliche Analoga. Teilbericht, 1995
- [50] US Army Corps of Engineers: Engineering and Design: Grouting Technology. Engineering Manual 1110-2-3506, 1984
- [51] Robertston Jr, H., Rieke, H., Chilingar, G.: Viscosity Measurements of aqueous clay Suspensions as a tool for determining mineralogic type of clays. Sedimentology 4 (1965), S. 181–187
- [52] Scapozza, I.: Untersuchungen zum Verhalten einer Kombinationsbarriere aus Asphalt auf mineralischer Trag- und Dichtungsschicht. Dissertation, 2002
- [53] Osewald, R.: Entwicklung und Erprobung mineralischer Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen. Abschlussbericht, Aachen 2008
- [54] Technische Universität München – Zentrum Geotechnik – Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau: Skript zur Vorlesung Spezialverfahren
- [55] K-UTEC Sondershausen: Baustoffkatalog. Zuletzt aufgerufen am: 29.10.2014
- [56] Abuhress, O.: Laborative Untersuchungen an Magnesiabindersuspensionen für die Anwendung als Injektionsmittel zur Bekämpfung von Salzlösungszuflüssen im Kali- und Steinsalzbergbau. Diplomarbeit, 2001
- [57] Müller-Hoeppe, N., Pöhler, M.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager (02 E 9087). Dokumentierte Erfahrung hinsichtlich dichter Dammbauwerke im Salinar - Abschlussbericht, Technischer Anhang 2, Peine 1999
- [58] HeidelbergZement Ag: Technisches Merkblatt ULTRAFIN 12
- [59] Dyckerhoff: Produktdatenblatt MIKRODUR
- [60] Gallagher, P. M.: Passive Site Remediation for Mitigation of Liquefaction Risk. Dissertation, Blackburg, Virginia 2000

- [61] Lichtsteiner, F.: Injektionsmaßnahmen in der Praxis. Die Injektionssysteme im Überblick. Tunnel 16 (1997) 7, S. 43–50
- [62] Tax, M., Kühling, G., Schulze, B.: Verbesserung der Injizierbarkeit und der chemischen Widerstandsfähigkeit von Feinstzement-Suspensionen. Felsbau 11 (1993) 2, S. 88–96
- [63] Dyckerhoff: Sicherheitsdatenblatt zum Injektionsbindemittel MICRODUR R. Version 2.0, 2011
- [64] Schulze, B., Kühling, G., Tax, M.: Neue Zusatzmittel für feststoffreiche Feinstzement-Suspensionen. Bauingenieur 67 (1992) 11, S. 499–504
- [65] Vorläufiges Merkblatt für Zementeinpressung im Bergbau. Fassung 1969. Beton 20 (1970) 1, S. 19–22
- [66] Littlejohn, G. S., Bruce, D. A.: Rock anchors. State of the art. Brentwood, Eng.: Foundation Publications 1977
- [67] Dyckerhoff: MIKRODUR®MICROFINE Cements Types: P, R. <http://www.dyckerhoff-bohrtechnik.de/online/download.jsp?idDocument=5456&instance=5>, Aufgerufen am 13.05.2016
- [68] Pusch, R. e. a.: Final Report on Test 4 – Sealing of Natural Fine-Fracture Zone, Technical Report 91-26, SKB – Stripa-Projekt, Stockholm 1991
- [69] Mauke, e. a.: In Situ-Versuch für ein Abdichtbauwerk im Steinsalz. 40. Geomechanik-Kolloquium. Leipzig 2011
- [70] Sitz, P.: Langzeitstabile Verschlussbauwerke in Strecken und Schächten. Bergbaukolloquium Freiberg (2001), S. 520–526
- [71] Neglia, S.: Migration of fluids in sedimentary basins. AAPG Bull (1979) 63, S. 573–597
- [72] Wolf, M.: Nagra – Technischer Bericht 89-14. Mikrobieller Abbau von Bitumen, 1989
- [73] Kudla, W., Dahlhaus, F., et. al.: Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. Abschlussbericht Vorhaben 02C1124, Freiberg 2009
- [74] Buja, H.-O.: Spezialtiefbautechnik von A - Z. Grundlagen, Gerätetechnik, Verfahren; [das Fachbuch für Studium und Praxis]. Norderstedt: Books on Demand 2013
- [75] Christ, A.: Chemie und Eigenschaften von Wasserglas. Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung (1994)
- [76] PG Corporation: Silicates for Ground Consolidation. Powerpoint Präsentation. Öffnungsdatum: 20.02.2015
- [77] Bollingerfehr, W., et. al.: Vergütung der Auflockerungszone im Salinar (VerA) – Abschlussbericht. FKZ 02 E 10649, 2011
- [78] Borstel, L. von: Demonstrationsversuche zur Beschreibung der Viskositätsveränderung beim Übergang von Natronwasserglas zu Silicatgel. Technischer Bericht, 2015
- [79] Vogel, H.: Dränfähige Stabilisierungsinjektionen in erosions- und suffosionsanfälligen Lockergesteinen. Dissertation, 1999
- [80] Hölzer, W.: Die Bodenverfestigung feinkörniger, bindiger Böden durch Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen. Untersuchungen an der Bodenfließgrenze. Dissertation, 2000
- [81] HEDINGER: Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EU) Nr. 453/2010. Wasserglas, 2013
- [82] Pulsfort, M., Walz, B.: Skript zur Vorlesung: Spezialgrundbau – Teil B – Injektionen, 1997
- [83] Funehag, J., Axelsson, M.: Hydrogeological characterization and sealing of narrow fractures in hard rock – a case study. RMZ-Materials and Geoenvironment 50 (2003) 1, S. 121–124
- [84] Wohlleben, M. (Hrsg.): Mineralfarben. Beiträge zur Geschichte und Restaurierung von Fassadenmalereien und Anstrichen. ID, Bd. 19. Zürich: vdf Hochsch.-Verl. an der ETH 1998
- [85] Girmscheid, G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn 2012
- [86] Prinz, H., Strauß, R.: Ingenieurgeologie. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. 2011

- [87] Axelsson, M., Nilsson, J.: Sealing of narrow Fractures in Rock with use of Silica Sol. An Introductory Study on Material Characteristics and Behaviour as a grout, Göteborg, Schweden 2002
- [88] Dietz, C.: Künstliche SandverkieSELung. Zeitschrift für praktische Geologie (1933) 4, S. 57–61
- [89] DIN 55958
- [90] Stein, D.: 'Instandhaltung von Kanalisationen'. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 2000
- [91] Kolditz, H., Steinberg, S.: Versiegelung des Carnallitits im Bohrschacht Asse 4. Kali und Steinsalz Band 11 (1992) Heft 1/2, S. 23–32
- [92] Schwerter, R.: Die Bekämpfung von Salzlösungszuflüssen. Kali und Steinsalz Band 11 (1992) Heft 1/2, S. 32–43
- [93] De Neef Construction Chemicals, Inc: Technical Information Epoxies - Denepox I-40
- [94] De Neef Construction Chemicals, Inc: Technisches Merkblatt Denepox 40
- [95] Ziegenbalg, G.: Präsentation: In-Situ immobilization of contaminants and sealing of soil and rock by crystallization processes from supersaturated solutions
- [96] Ziegenbalg, G.: Directed and Controlled Crystallisation of Slightly Soluble Minerals - a New Technology to Seal Water Inflows and to Immobilise Contaminants, 2008
- [97] Graupner, U.: Untersuchungen zu Kristallisation schwerlöslicher Salze aus übersättigten Lösungen. Dissertation, 2006
- [98] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen. Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2. , Unterlagen-Nr. P 192. Revision 00., 2004
- [99] Rudolph, C.: Entwicklung einer Methode zur Suche nach Kristallisationsinitiatoren für Salzhydratschmelzen mittels High-Throughput-Screening. Dissertation, 2002
- [100] Fischer, S.: Anorganische Salzhydratschmelzen – ein unkonventionelles Löse- und Reaktionsmedium für Cellulose. Dissertation, 2003
- [101] Duffy, J. A., Ingram, M. D.: Inorganic Chemistry. 16, 2988. 1977, 1977
- [102] Bok, F.: Nitrierung von Aromaten mit Salzhydratschmelzen. Dissertation, 2010
- [103] Herbert, H.-J., et. al.: Nichtarteigene Materialien. Workshop zu Verschlussystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, Braunschweig 2010
- [104] Bollingerfehr, W., Jobmann, M., Herold, P.: Anforderungen an Schachtverschlüsse für HAW-Endlager. ELSA-Workshop. Peine 2012
- [105] Pettenpohl, H., Pier, J.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Konzeptplanung für die Errichtung und Nachweisführung für die Funktionstüchtigkeit von temporären Abdichtungen, P 264. Revision 00, 2006
- [106] Spezial-Tiefbau-Systeme GmbH: Ausrüstung für: Spezialtiefbau und Ankertechnik. Prospekt. Aufgerufen am 21.08.2014
- [107] K-UTEC Sondershausen: Technische Informationen zu Injektionsmörtel IM 4+. Stand 09.11.2010., 2010
- [108] HeidelbergZement Ag: Prüfzeugnis. Ultrafin 12 – Laboruntersuchungen zur Rheologie bei diversen Suspensionsdichten, 2010
- [109] Christen, D. S.: Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik. Handbuch für Chemiker und Verfahreningenieure. VDI-Buch. Heidelberg: Springer 2010
- [110] Suter, D.: Vorlesungsnotizen: Einführung in die Medizinphysik I – Blutkreislauf. (SS 2015)

- [111] http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/platte_00045platte_00045viskosimeter.glos.html. (Aufrufdatum: 05.01.2015)
- [112] TA Instruments: AR 500 / 1000 Rheometer. Hardware Manual
- [113] DIN 4127 (2014-02-00): Erd- und Grundbau – Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau und für deren Ausgangsstoffe.
- [114] Guria, Ch., Kumar, R., Mishra, P.: Rheological analysis of drilling fluid using Marsh Funnel. *Journal of Petroleum Science and Engineering* (2013) 105, S. 62–69
- [115] Betriebsanleitung Set zur Dichtebestimmung für Analysenwaage KERN ABT. Version 1.0. 02/2007. KERN & Sohn GmbH. (Aufrufdatum 14.12.2015).
- [116] Wischers, G.: Ansteifen und Erstarren von Zement und Beton. *Beton* 31 (1981) 9, S. 337–340
- [117] Engelhardt, H.-J.: Einfluss von Salzen auf die Hydratation und die Festmaterialeigenschaften von API-Zementen
- [118] Mollet, H., Grubenmann, A.: Formulierungstechnik. Emulsionen, Suspensionen, feste Formen. Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH 2000
- [119] Habenicht, G.: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendung. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2002
- [120] Grimm, W.-D.: Feldspatführender Sandstein, reich an Gesteinsbruchstücken: Roter Wesersandstein Arholzen, 1990
- [121] Dembiki jr, H., Anderson, M.: Secondary migration of oil: Experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits. *AAPG Bull* (1989) 73, S. 1018–1021
- [122] Catalan, L., et. al.: An experimental study of secondary migration. *AAPG Bull* 76 (1992), S. 638–650
- [123] Vasseur, G., et. al.: Flow regime associated with vertical secondary migration. *Marine and Petroleum Geology*, Elsevier, 2013, 45, pp.150-158.
- [124] Malárics, V.: Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben. KIT, Diss.--Karlsruhe, 2010. Karlsruher Reihe Massivbau, Baustofftechnologie, Materialprüfung, Bd. 69. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2011
- [125] Skalny, J. P., Mindess, S.: *Materials science of concrete*, Vol.III. American Ceramic Society, Westerville 1991
- [126] Engelfried, J.: Nachhaltiges Umweltmanagement. Management 10-2012. München: Oldenbourg 2011
- [127] Lengwenat, E.: Vorlesungsskript: Mehrdimensionale Bewertungsverfahren, 2013
- [128] Zement-Taschenbuch. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik 2008
- [129] Weigler, H., Karl, S.: Beton. Arten, Herstellung, Eigenschaften. Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Berlin: Ernst 1989
- [130] Düsterloh, U.: Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlraumbauten im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen. Ein Beitrag zum Nachweis von Standsicherheit und Barrierenintegrität für untertägige Abfallentsorgungsanlagen und Hohlraumbauten des salinaren Berg- und Kavernenbaus. Techn. Univ., Habil.-Schr.--Clausthal, 2009. Schriftenreihe / Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Bd. 16. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger-Verl. 2010
- [131] Wakeley, L.D., Burkes, J.P.: Distribution of Chloride in a Salt-Saturated Grout in Contact with Halite Rock. In: *Cement and Concrete Research*, S. 267–274

- [132] Erstellt von: BGR, DBE Technology GmbH, GRS, IFG, KIT: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283, 2012
- [133] Lienhard, J., et. al.: Construction Manual for Polymers + Membranes. Materials / Semi-finished Products / Form Finding / Design. Basel: De Gruyter 2012
- [134] U.S. Departement of the Interior - Bureau of Mines. Staff, Denver Research Center: Comparative Study of Rock Support Systems for a High level Nuclear Waste Geologic Repository in Salt. (Interagency Agreement NRC-02-80-075), Dezember, 1987
- [135] Jankowski, A.: Polyurethane for consolidation of rock. Glückauf vol. 108 (1972) no. 14, S. 582–584
- [136] Meyer, T., Herbert, H.J., Schmidt Döhl, F.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Endlager Morsleben. Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen., Unterlagen-Nr.: P 180. Revision: 00., 2003
- [137] K+S: Schachtverschluss Salzdettfurth. BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02C0516, 2002
- [138] TU BAF: FuE Streckendamm Sondershausen, Entwicklung eines Grundkonzepts für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar – Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen, BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02C0547, (2003)
- [139] Luckner, L., Schestakow, W. M.: Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie 1986