



Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH

## **VIRTUS**

### **Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz**

#### Anhang B

Protokolle Literaturlauswertung  
der Daten zum thermisch-  
hydraulisch-mechanischen  
Materialverhalten von Salzge-  
steinen und EBS-Materialien

Ulrich Heemann (BGR)  
Herbert Kull (GRS)  
Sha Li (DBE TEC)  
Rüdiger Miehe (GRS)  
Christian Müller (DBE TEC)

Dezember 2014

**Deskriptoren:**

Endlager, Materialdaten, Prozess-Simulation, Untertagelabor, Visualisierung

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Dichte von Salzgestein.....</b>	<b>1</b>
1.1	Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW).....	2
1.1.1	BEW - Dichte – Steinsalz / Asse .....	2
1.1.2	BEW - Dichte – Kalisalz / Asse .....	3
1.1.3	BEW - Dichte – Steinsalz / Gorleben .....	4
1.1.4	BEW - Dichte – Steinsalz / VIRTUS .....	5
1.1.5	BEW - Dichte – Kalisalz / VIRTUS .....	6
1.1.6	BEW - Dichte – Anhydrit / VIRTUS .....	7
1.1.7	BEW - Dichte – Salzton / VIRTUS .....	8
1.1.8	BEW - Dichte – Hartsalz / VIRTUS .....	9
1.2	Begründung .....	10
1.2.1	Erläuterung zur Auswahl.....	10
1.2.2	Empfehlung für Best-Estimate-Werte (BEW) .....	15
1.2.3	Literaturverzeichnis.....	16
<b>2</b>	<b>Dichte von EBS-Materialien .....</b>	<b>23</b>
2.1	Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW).....	24
2.1.1	BEW - EBS - Salzgrus (+Brikett).....	24
2.1.2	BEW - EBS - Sorelbeton.....	25
2.1.3	BEW - EBS - Salzbeton .....	26
2.1.4	BEW - EBS - Ca-Bentonit .....	27
2.1.5	BEW - EBS - SVV.....	29
2.1.6	BEW - EBS - Schotter.....	30
2.1.7	BEW - EBS – Beton.....	31
2.2	Begründung .....	32
2.2.1	EBS-Materialien - Spezifikation.....	32
2.2.2	Empfehlung für Best-Estimate-Werte (BEW) .....	34
2.2.3	Literaturverzeichnis.....	36
<b>3</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit von Salzgestein .....</b>	<b>41</b>
3.1	Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW).....	42

3.2	Begründung .....	51
3.2.1	Einleitung.....	51
3.2.2	Auswertung.....	51
3.2.3	Empfehlung für Best-Estimate-Werte.....	67
3.2.4	Literaturverzeichnis.....	68
<b>4</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus .....</b>	<b>73</b>
4.1	Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW).....	74
4.2	Begründung .....	76
4.2.1	Einleitung.....	76
4.2.2	Auswertung.....	76
4.2.3	Empfehlung für Best-Estimate-Werte.....	78
4.2.4	Literaturverzeichnis.....	78
<b>5</b>	<b>Wärmekapazität von Salzgestein.....</b>	<b>81</b>
5.1	Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW).....	82
5.2	Begründung .....	86
5.2.1	Einleitung.....	86
5.2.2	Auswertung.....	86
5.2.3	Empfehlung für Best-Estimate-Werte.....	92
5.2.4	Literaturverzeichnis.....	93
<b>6</b>	<b>Wärmekapazität von Salzgrus .....</b>	<b>97</b>
6.1	Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW).....	98
6.2	Begründung .....	100
6.2.1	Einleitung.....	100
6.2.2	Auswertung.....	100
6.2.3	Empfehlung für Best-Estimate-Werte.....	101
6.2.4	Literaturverzeichnis.....	101
<b>7</b>	<b>Hydraulische Parameter von Salzgestein .....</b>	<b>103</b>
7.1	Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW).....	104
7.1.1	BEW-Salzgestein (ungeschädigt) - Permeabilität.....	104
7.1.2	BEW-Salzgestein (geschädigt) - Permeabilität.....	106

7.1.3	BEW-Salzgestein – Permeabilität, relativ .....	108
7.1.4	BEW-Salzgestein – Porosität .....	109
7.1.5	BEW-Salzgestein – Filtergeschwindigkeit .....	110
7.1.6	BEW-Salzgestein – Spezifische innere Oberfläche .....	111
7.1.7	BEW-Salzgestein - Tortuosität .....	112
7.1.8	BEW-Salzgestein - Hydraulische Dispersionslänge (nur Steinsalz).....	113
7.1.9	BEW-Salzgestein - Diffusionskoeffizienten .....	114
7.1.10	BEW-Salzgestein - Löslichkeiten von Gasen .....	115
7.1.11	Kapillardruck / Sättigung (zu ergänzen) .....	116
7.1.12	Löslichkeiten von Feststoffen (zu ergänzen) Begründung .....	117
7.2	Erläuterung zur Auswahl.....	118
7.2.1	Definition .....	119
7.2.2	Auswertung.....	120
7.2.3	Salzgesteine .....	120
7.2.4	Empfehlung für Best-Estimate-Werte (BEW) .....	122
7.2.5	Literaturverzeichnis.....	125
<b>8</b>	<b>Permeabilität von dilatantem Salzgestein.....</b>	<b>133</b>
8.1	Protokoll .....	134
8.2	Begründung .....	135
8.2.1	Zur Phänomenologie der Permeabilität.....	135
8.2.2	Messdaten und Auswertefunktionen .....	136
8.2.3	Zusammenfassung und Empfehlung.....	138
8.2.4	Literaturverzeichnis.....	138
<b>9</b>	<b>Hydraulische Parameter von EBS-Materialien.....</b>	<b>141</b>
9.1	Protokolle .....	142
9.1.1	EBS-Salzgrus (+Brikett)-Permeabilität .....	142
9.1.2	EBS-Sorelbeton-Permeabilität .....	144
9.1.3	EBS-Salzbeton-Permeabilität.....	146
9.1.4	EBS-Bentonit-Permeabilität .....	147
9.1.5	EBS-SVV-Permeabilität .....	149
9.1.6	EBS-Schotter-Permeabilität .....	150

9.1.7	EBS-Beton-Permeabilität .....	151
9.1.8	EBS-Salzgrus (+Brikett)-Porosität .....	152
9.1.9	EBS-Sorelbeton-Porosität .....	155
9.1.10	EBS-Salzbeton-Porosität .....	157
9.1.11	EBS-Ca-Bentonit-Porosität .....	158
9.1.12	EBS-SVV-Porosität .....	160
9.1.13	EBS-Schotter-Porosität .....	161
9.1.14	EBS-Salzgrus (+Brikett)-Relative Permeabilität .....	162
9.1.15	EBS-Salzgrus (+Brikett)- Kapillardruck-Sättigung (Threshold Pressure)	163
9.1.16	EBS-Bentonit- Kapillardruck-Sättigung .....	164
9.1.17	EBS-Salzgrus (+Brikett)- Tortuosität .....	165
9.1.18	EBS-Salzgrus (+Brikett)- Spezifische Oberfläche .....	166
9.2	Begründung .....	167
9.2.1	Empfehlung für Best-Estimate-Werte (BEW) .....	167
9.2.2	Literaturverzeichnis .....	182
<b>10</b>	<b>Elastische Parameter von Steinsalz .....</b>	<b>191</b>
10.1	Protokolle .....	192
10.2	Begründung .....	194
10.2.1	Allgemeines zu den elastischen Eigenschaften von Steinsalz, den beiden vorherrschenden Messtechniken und deren Bewertung .....	194
10.2.2	Auswertung .....	196
10.2.3	Literaturverzeichnis .....	207
<b>11</b>	<b>Kriechen von Salz .....</b>	<b>209</b>
11.1	Protokoll .....	210
11.2	Begründung .....	211
11.2.1	Zu den mathematischen Grundlagen der Beschreibung von Formänderungen .....	211
11.2.2	Zu den Stoffgesetzen des Kriechens von Salz .....	212
11.2.3	Homogenbereiche im Salz .....	216
11.2.4	Zur Auswahl der Vorfaktoren .....	219
11.2.5	Zusammenfassung und Empfehlung .....	222

11.2.6	Literaturverzeichnis.....	222
<b>12</b>	<b>Dilatanz im Salz.....</b>	<b>223</b>
12.1	Protokoll .....	224
12.2	Begründung .....	225
12.2.1	Zu den mathematischen Grundlagen der Beschreibung von Formänderungen .....	225
12.2.2	Zur Phänomenologie der Dilatanz im Salz .....	226
12.2.3	Messdaten und Auswertefunktionen .....	228
12.2.4	Zusammenfassung und Empfehlung.....	229
12.2.5	Literaturverzeichnis.....	230
<b>13</b>	<b>Thermischer Ausdehnungskoeffizient von Salzgestein .....</b>	<b>233</b>
13.1	Protokoll .....	234
13.2	Begründung .....	235
13.2.1	Einleitung.....	235
13.2.2	Halite .....	235
13.2.3	Anhydrit .....	237
13.2.4	Kalisalz .....	238
13.2.5	Empfehlung für Best-Estimate-Werte.....	239
13.2.6	Literaturverzeichnis.....	240
<b>14</b>	<b>Biot-Koeffizient von Salzgestein.....</b>	<b>245</b>
14.1	Protokoll .....	246
14.2	Begründung .....	247
14.2.1	Einleitung.....	247
14.2.2	Auswertung.....	247
14.2.3	Empfehlung für Best-Estimate-Werte.....	248
14.2.4	Literaturverzeichnis.....	248



## 1 Dichte von Salzgestein

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertage-labor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturauswertung</b>
<b>Material:</b>	<b>Salzgestein</b> - Steinsalz - Kalisalz - Anhydrit - Salzton - Hartsalz
<b>Datenblatt</b>	
<b>Parameter:</b>	<b>Dichte</b>
mit	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Best-Estimate-Wert (BEW)</li> <li>- Erläuterung zur Auswahl</li> </ul>	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>H. Kull, R. Miehe</b>
<b>Datum:</b>	<b>2012-09-18</b>

1.1 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW)

1.1.1 BEW - Dichte – Steinsalz / Asse

Parameter <i>frmdata</i>		Gesteinsdichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz	ASSE		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
2175	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - Dichte – Steinsalz / Asse

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/ROT 90/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	S.139, Werte aus Laboruntersuchungen an ASSE-Steinsalz		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$
<b>Numerische Modellierung</b>			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

n. a. nicht angegeben

1.1.2 BEW - Dichte – Kalisalz / Asse

Parameter <i>frmdata</i>		Gesteinsdichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Kalisalz	ASSE		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
1860	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - Dichte – Kalisalz / Asse

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/DEL 79/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	Daten entnommen aus Fig.23		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

n. a. nicht angegeben

1.1.3 BEW - Dichte – Steinsalz / Gorleben

Parameter <i>frmdata</i>		Gesteinsdichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz	GORLEBEN		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
2187	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - Dichte – Steinsalz / Gorleben

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/GES 83/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	S.03, Werte aus Gorleben Bhg.1004; 320 u. 410m		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

1.1.4 BEW - Dichte – Steinsalz / VIRTUS

Parameter <i>frmdata</i>		Gesteinsdichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz	VIRTUS		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
2175	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - Dichte – Steinsalz / VIRTUS

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/ROT 90/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	S.139, Werte aus Laboruntersuchungen an ASSE-Steinsalz		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho$ = Gesteinsdichte; [kg m <sup>-3</sup> ] $m$ = Masse; [kg] $V$ = Volumen; [m <sup>3</sup> ] $\rho = \rho_s \cdot (1-w) \cdot (1-n)$ mit $w$ = Wassergehalt; [-] $n$ = Porosität; [-] $\rho_s$ = Korndichte; [kg m <sup>-3</sup> ]
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

1.1.5 BEW - Dichte – Kalisalz / VIRTUS

Parameter <i>frmdata</i>	Gesteinsdichte (Density)		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Kalisalz	VIRTUS		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
2076	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - Dichte – Kalisalz / VIRTUS

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/HAE 02/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	Aus Anlage 6 entnommen		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Gratik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho =$ Gesteinsdichte; [kg m <sup>-3</sup> ] $m =$ Masse; [kg] $V =$ Volumen; [m <sup>3</sup> ] $\rho = \rho_s \cdot (1-w) \cdot (1-n)$ mit $w =$ Wassergehalt; [-] $n =$ Porosität; [-] $\rho_s =$ Korndichte; [kg m <sup>-3</sup> ]
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

1.1.6 BEW - Dichte – Anhydrit / VIRTUS

Parameter <i>frmdata</i>		Gesteinsdichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Anhydrit	VIRTUS		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
2920	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - Dichte – Anhydrit / VIRTUS

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/KAM 09/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	S.58 und S.249		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho$ = Gesteinsdichte; [kg m <sup>-3</sup> ] m = Masse; [kg] V= Volumen; [m <sup>3</sup> ] $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit w = Wassergehalt; [-] n = Porosität; [-] $\rho_s$ = Korndichte; [kg m <sup>-3</sup> ]
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

1.1.7 BEW - Dichte – Salztzn / VIRTUS

Parameter <i>frmdata</i>		Gesteinsdichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Salztzn, allgemein	VIRTUS		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
2565	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - Dichte – Salztzn / VIRTUS

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/KAM 09/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	S.58 und S.249		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho$ = Gesteinsdichte; [kg m <sup>-3</sup> ] $m$ = Masse; [kg] $V$ = Volumen; [m <sup>3</sup> ] $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w$ = Wassergehalt; [-] $n$ = Porosität; [-] $\rho_s$ = Korndichte; [kg m <sup>-3</sup> ]
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

1.1.8 BEW - Dichte – Hartsalz / VIRTUS

Parameter <i>frmdata</i>		Gesteinsdichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Hartsalz	VIRTUS	Halit, Sylvin, Kieserit, Anhydrit	n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
2153	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - Dichte – Hartsalz / VIRTUS

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/SAL 95/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	S.37		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Gratik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

## 1.2 Begründung

### 1.2.1 Erläuterung zur Auswahl

Die hier vorgestellten Werte zur **Gesteinsdichte** von Evaporiten stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS+ gesichteten und ausgewerteten Literatur dar /ROT 12/.

Die aufgeführten Werte resultieren überwiegend aus experimentellen Untersuchungen an Salzkernen aus dem Forschungsbergwerk ASSE /ROT 90/, /HAI 92/, /HAW 93/. Einzelwerte sind für Bernburg / Pöthen /KAM 09/, Teutschenthal /IfG 10/ und GORLEBEN /GES 83/, /POP 01/ repräsentativ. In der Regel sind keine spezifischen Angaben zur Zechstein-Formation / Evaporitfolge aufgeführt /LUX 97/, /SAL 95/, /WOL 11/.

#### Definition

Die Gesteinsdichte,  $\rho$  ist eine Stoffkonstante [ $\rho = m V^{-1}$ ], die sich aus der Masse,  $m$  und dem Volumen,  $V$  berechnet. Die Einheit der Gesteinsdichte wird in kg pro  $m^3$  angegeben. Einen Sonderfall stellt die im Bergbau übliche Angabe als Wichte,  $\gamma$  dar. In der Angabe als Wichte [ $\gamma = \rho g$ ] wird die Erdbeschleunigung,  $g$  berücksichtigt. Die Einheit der Wichte wird als N pro  $m^3$  angegeben.

#### Auswertung

Die direkte Ermittlung der Gesteinsdichte erfolgt in der Regel im Labor an Kernen durch Wägung zur Bestimmung der Gesteinsmasse und durch geometrische Vermessung. Alternativ kann das Volumen durch Pyknometermessungen ermittelt werden /SCH 67/, /KEZ 69/. In situ kann die Gesteinsdichte in direkt aus Bohrlochmessungen (z. B. aus Gamma-Messungen) abgeleitet werden.

Allgemein berücksichtigt die Angabe der Gesteinsdichte [ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ ] die Einzelkorndichte ( $\rho_s =$  Korndichte; [ $kg m^{-3}$ ]), die Porosität ( $n =$  Porosität; [-]) und den Feuchtegehalt ( $w =$  Wassergehalt; [-]) einer Kernprobe.

#### Salzgesteine

In der gesichteten Literatur werden Gesteinsdichten für Steinsalz allgemein, Werra- (z1), Staßfurt- (z2), Leinefolgen (z3), Kalisalz allgemein, Carnallit, Sylvinit, Kieserit, Hartsalz, Polyhalit und Anhydrit (Haupt- z3, Pegmatitanhydrit, z4) sowie Salzton untergliedert. Die Ergebnisse sind mit Angabe der Bandbreite in nachstehender Tabelle 1 zusammenge-

fasst. Vergleichend sind die Ergebnisse von /ZIM 01/ im Rahmen der Ermittlung der Mikrorissigkeit aus akustischen Gesteinseigenschaften am Beispiel von Steinsalz und Anhydrit mit aufgeführt.

Tab. 1: Nach Gesteinstyp gemittelter -nicht Standort spezifischer- Dichten

Mineral / Gesteinstyp	Werte Anzahl	Dichte (Mittelwerte)	Min	Max	Referenz /ZIM 01/
		$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]			
z3; Grauer Salzton	2	2565	2550	2580	2623
Steinsalz, allgemein	53	2182	2100	2385	2170
z3; Leine-Steinsalz	8	2161	2148	2181	
z2; Staßfurt-Steinsalz	14	2177	2150	2204	
z1; Werra-Steinsalz	6	2167	2140	2204	
Kalisalz, allgemein	1	2141			
Sylvinit	4	2056	2000	2100	2170
Carnallit	8	1834	1,600	2200	1640 1850
Polyhalit	1	2750			2534
Anhydrit	17	2745	2350	3000	2938
Kieserit	1	2600			2570
Hartsalz	2	2245	2153	2340	2320

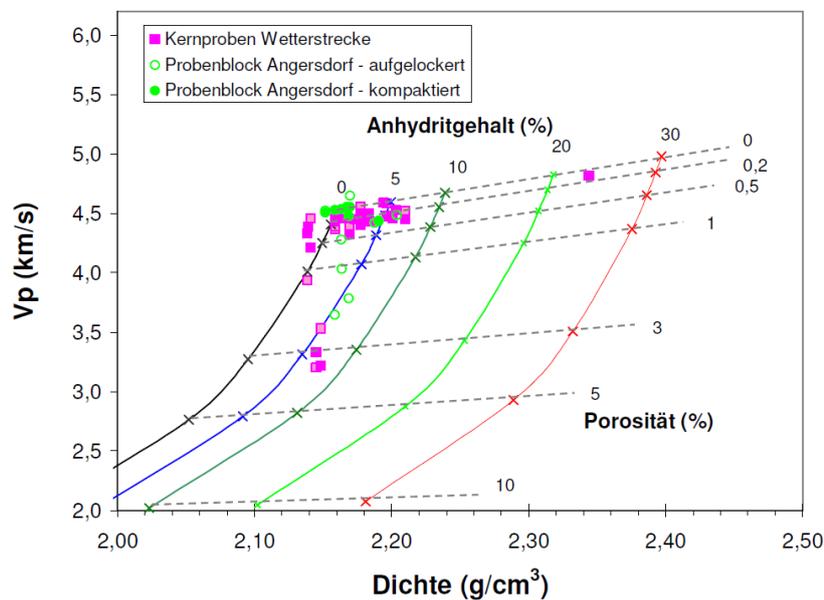


Abbildung 1: Einfluss des Anhydritgehaltes und der Porosität auf die Dichte von Leine-Steinsalz /IfG 10/.

Unterschiede der Dichten der Salzgesteine unterschiedlicher Herkunft (Standort) ergeben sich in erster Linie aus der mineralogischen Zusammensetzung (Reinheit, Einzelkorndich-

ten). In Abbildung 1 ist beispielhaft der Einfluss des Anhydritgehaltes auf die Dichte von Leinsteinsalz dargestellt /IfG 10/. Mit steigendem Anhydritgehalt nimmt die Dichte zu. Einen weiteren Einfluss auf die Dichte übt die Porosität, respektive Mikrorissigkeit aus.

Für die Modellierung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgesteinen werden in der gesichteten Literatur Gesteinsdichten aufgeführt, denen nicht näher spezifizierte experimentelle Untersuchungen zugrunde liegen /HAI 92/, /BRD 93/, /CHE 09/, /DBT 10/, /DUE 08/, /DUE 09/, /DUE 10a/, /HAW 93/, /IfG 05/, /KAM 09/, /PUD 94/, /ROT 84/, /ROT 90a/, /ROT 92a/, /ROT 04c/, /SLI 85/, /WAL 83/, /WOL 09/.

Die nachstehend aufgeführten Gesteinsdichten wurden aus der Liste der experimentell ermittelten Werte ausgewählt, die das Kriterium der Plausibilität erfüllen.

### Salzton

Für GORLEBEN, ERAM und ASSE liegen keine plausiblen Werte vor. Angaben für den Grauen Salzton (z3) sind in /KAM 09/ aufgeführt.

- $\rho_{\text{ASSE}} = \text{-/-}$   $\text{kg m}^{-3}$   $\text{-/-}$
- $\rho_{\text{GORLEBEN}} = \text{-/-}$   $\text{kg m}^{-3}$   $\text{-/-}$
- $\rho_{\text{ERAM}} = \text{-/-}$   $\text{kg m}^{-3}$   $\text{-/-}$
- $\rho_{\text{Virtus}} = 2565$   $\text{kg m}^{-3}$  /KAM 09/

### Karbonate; Dolomit

Nicht ausgewertet (keine Vorgabe für Literatur-Vorauswertung)

### Sulfate; Anhydrit, Kieserit, Polyhalit

Allgemeine Werte sind für den Hauptanhydrit (z3) /IfG 10/, /KAM 91/, /KAM 09/ und den Pegmatitanhydrit (z4) /IfG 10/ vorhanden. Im Rahmen modellmäßiger Berechnungen wird für die ASSE in /HAI 92/ für Kieserit eine Gesteinsdichte mit  $2600 \text{ kg m}^{-3}$  und für Polyhalit mit  $2750 \text{ kg m}^{-3}$  eingesetzt.

Für GORLEBEN, ERAM, ASSE liegen keine plausiblen Werte vor.

- $\rho_{\text{ASSE}} = \text{-/-}$  kg m<sup>-3</sup> -/-
- $\rho_{\text{GORLEBEN}} = \text{-/-}$  kg m<sup>-3</sup> -/-
- $\rho_{\text{ERAM}} = \text{-/-}$  kg m<sup>-3</sup> -/-
- $\rho_{\text{Virtus}} = 2920$  kg m<sup>-3</sup> /KAM 09/

### Steinsalz

Experimentell bestimmte Gesteinsdichten liegen für Werra (z1)-, Staßfurt (z2)- und Leine (z3)-Steinsalz vor.

Für den Standort ASSE sind die Folgen z2Na2 und z3Na3 durch eine Vielzahl von Messergebnissen belegt /ROT 90/, /HAI 92/ und /HAW 93/. Für den Standort GORLEBEN liegen für die Formation z2 Werte vor, die an Bohrkernproben ermittelt wurden /GES 83/, /POP 01/. Für den Standort ERAM lagen keine Werte vor. Für den virtuellen Standort VIRTUS können belastbare Gesteinsdichten aus den für **Steinsalz, allgemein** aufgeführten Werten abgeleitet werden /LUX 97/, /SAL 95/, /WOL 11/.

- $\rho_{\text{ASSE}} = 2175$  kg m<sup>-3</sup> /ROT 90/
- $\rho_{\text{GORLEBEN}} = 2187$  kg m<sup>-3</sup> /GES 83/
- $\rho_{\text{ERAM}} = \text{-/-}$  kg m<sup>-3</sup> -/-
- $\rho_{\text{Virtus}} = 2175$  kg m<sup>-3</sup> /ROT 90/

### Kalisalze

Kalisalze treten in den Folgen z1 (Thüringen und Hessen), z2 (Staßfurt) und z3 (Ronnenberg und Riedel) als Flöze sowie in Lagen von Carnallitit und Sylvinit auf.

Allgemeine Werte für Kalisalze sind in /DBT 06/, /DEL 79/, /DUE 09b/, /DUE 10a/, /HAE 02/, /HAI 92/, /IfG 05/, /SAL 92/ und /SAL 95/ aufgeführt.

Für GORLEBEN und ERAM liegen keine plausiblen Werte vor. Die Angabe für die ASSE bezieht sich auf den Carnallit des z2 /DEL 79/.

- $\rho_{\text{ASSE}} = 1860 \text{ kg m}^{-3}$  /DEL 79/
- $\rho_{\text{GORLEBEN}} = -/- \text{ kg m}^{-3}$  -/-
- $\rho_{\text{ERAM}} = -/- \text{ kg m}^{-3}$  -/-
- $\rho_{\text{Virtus}} = 2076 \text{ kg m}^{-3}$  /HAE 02/

### Hartsalz

Werteangaben für GORLEBEN, ERAM und ASSE fehlen. Allgemein Angaben sind in /SAL 92/ und /SAL 95/ aufgeführt. Aufgrund der Abhängigkeit der Dichte von den jeweiligen wechselnden Anteilen an Kieserit, Steinsalz, Kainit ist der angegebene Einzelwert mit Vorbehalt zu betrachten.

- $\rho_{\text{ASSE}} = -/- \text{ kg m}^{-3}$  -/-
- $\rho_{\text{GORLEBEN}} = -/- \text{ kg m}^{-3}$  -/-
- $\rho_{\text{ERAM}} = -/- \text{ kg m}^{-3}$  -/-
- $\rho_{\text{Virtus}} = 2153 \text{ kg m}^{-3}$  /SAL 95/

### 1.2.2 Empfehlung für Best-Estimate-Werte (BEW)

Die Wertesammlung bildet die lithostratigrafische Gliederung des Zechsteinmeeres nicht vollständig ab. Für ausgewählte Evaporitfolgen werden in der gesichteten Literatur Gesteinsdichten für Steinsalz, Kalisalz, Anhydrit und Salzton angegeben. Angaben für Karbonatgesteine (z. B. Dolomite) fehlen. In Tabelle 2 sind die Empfehlungen für die BEW-Gesteinsdichten zusammengefasst.

Tab. 2: Übersicht über empfohlene BEW-Gesteinsdichten

	Steinsalz	Kalisalz	Anhydrit	Salzton	Hartsalz
$\rho_{\text{ASSE}}$	2175	1860	-/-	-/-	-/-
$\rho_{\text{GORLEBEN}}$	2187	-/-	-/-	-/-	-/-
$\rho_{\text{ERAM}}$	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
$\rho_{\text{Virtus}}$	2175	2076	2920	2565	2153

Für den Standort GORLEBEN kann die Datensammlung /GES 79/, /POP 01/ möglicherweise durch Auswertung von BGR-internen Berichten ergänzt werden. Gleiches gilt für den Standort ERAM. Für den virtuellen Standort VIRTUS wurden Näherungswerte aus Untersuchungen an Evaporiten anderer Provenienzen übernommen /HAE 02/, /KAM 09/, /ROT 90/, /SAL 95/. Die Gesteinsdichten von Steinsalz des Standortes ASSE wurden für die Modellierung von In-situ-Versuchen verwendet /HAI 92/, /HAW 93/, /ROT 90a/.

Bei mineralogischer Reinheit und einer natürlichen sehr geringen Porosität entsprechen die Gesteinsdichten nahezu den Korndichten. Abweichungen zu höheren bzw. niedrigeren Dichten sind auf wechselnde mineralogische Anteile zurückzuführen /IfG 10/. Homogenbereiche zeichnen sich durch eine enge Bandbreite der Gesteinsdichten aus /ROT 90/. Durch unvollständige Evaporitfolgen und / oder Eindampfungszyklen sind standort-spezifische Abweichungen bedingt. Die Auflockerung des Kornverbandes führt zu einer höheren Porosität und damit zu kleineren Gesteinsdichten /IfG 10/.

In den angegebenen Werten sind Abweichungen, die auf mineralogische Inhomogenitäten und sekundäre Porositäten zurückzuführen sind, nicht berücksichtigt. Im natürlichen Mineralverband ist Wasser als Kristallwasser fixiert.

**1.2.3 Literaturverzeichnis**

- /BEC 04/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F. D., (2004): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project), European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 20621EN, Luxembourg.
- /BEC 99a/ Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., Olivella, S., (1999): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project), Final Report, European Commission, EUR19124EN, Luxembourg.
- /BER 00/ Bertram, J., (2000): Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Auslegungskriterien für Kavernen im Salinargebirge. Schriftenreihe Professur für Deponietechnik und Geomechanik Institut für Aufbereitung und Deponietechnik Technische Universität Clausthal, Heft 11, 279 S., Hrsg. Lux, Clausthal.
- /BIR 40/ Birch, F. & Clark, H., (1940): The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition, American Journal of Science, Vol. 238, No. 8., p.529-558.
- /BOL 96/ Bollingerfehr, W., (1996): Dam constructions in radioactive waste repositories in salt formation – long-term sealing system, European Commission, nuclear science and technology, EUR 16856EN, Luxembourg.
- /BOL 04/ Bollingerfehr, W. Manthee, F. Lerch, C. Linn, M., Ziegenhagen, J. (2004): Abschließende Auswertung des Projekts „Thermische Simulation der Streckenlagerung“. Teilvorhaben: Versuchsfeldaufwältigung und Rückgewinnung von Materialproben und Messeinrichtungen, FKZ 02E9289/3, Abschlussbericht, 71 S., Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH DBE, Peine.
- /BOR 05/ Bornemann, O., Heusermann, St. (2005): Geological and Geotechnical Investigation Methods to Characterize Domal Salt Structures. Proc. IV. International Congress „Brown Coal Mining“, June 6-8, p. 159-171, Belchatow, Poland.
- /BRD 93/ Breidenich, G. (1993): Gekoppelte Berechnung der thermomechanischen Feldgrößen in einer Steinsalzformation infolge der Einlagerung radioaktiver Wärme freisetzender Abfälle, Dissertation, ABEV Band 16.
- /CHE 09/ Chemia, Z. (2009) The effect of the salt viscosity on future evolution of the GORLEBEN salt diapir, Germany, Tectonophysics 473 (2009), S. 446 – 456.
- /DBE 96/ DBE, (1996): FEM-Berechnungen der Belastungen und Verschiebungen des Innenausbaufundamentes und der Stützringe des Schachtes GORLEBEN 1, Peine.

- /DBE 10/ DBE, (2010): Ergänzende mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnungen zur Nachweisführung für Abdichtbauwerke im Steinsalz, 9M/22310171/ECC/GH/LD/0007/01, Stand 23.07.2010.
- /DBT 06/ DBETEC, (2006): ASSE – Schacht 2 und Schacht 4: Nachweis zur Einhaltung der Grenztemperatur an der Oberfläche eines anstehenden Trümmernallits, Stand 08.08.2006, Dok.-Kennz.: A/GC/LD/0001/00
- /DEL 79/ Delisle, G., Langer, M., Wallner, M., (1979): Thermal Mechanical Modelling. US/FRG Bilateral Workshop on Waste Isolation Performance Assessment and In-Situ Testing.
- /DUE 08/ Düsterloh, U.; Lux, K.-H., (2008): Netzintegration von Offshore-Großwindanlagen – Compressed Air Energy Storage (CAES) - Geomechanische Untersuchungen zum Tragverhalten von Druckluftspeicherkavernen, Konzeptstudie für das
- /DUE 09/ Düsterloh, U., (2009): Druckluftspeicherung in Salzkavernen – Laborative und numerische Untersuchungen zum thermomechanischen Verhalten des Salzgebirges, Tagungsband Energie und Rohstoffe, Goslar, ISBN 978-3-86948-015-2.
- /DUE 09b/ Düsterloh, U.; Tedeeva, S., (2009): Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerks – Geomechanische Modellierung, EDGG, Heft 242, S. 67-80, 2009, ISBN 978-3-86944-012-5.
- /DUE 10a/ Düsterloh, U., (2010): Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlrumbauteilen im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen, Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal, ISBN 978-03-86948-068-8.
- /ENG 89/ Engelmann, H.J., Biurrun, E., (1989): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (KWA 5131 B5) Systemanalyse Mischkonzept, Temperaturberechnungen für die Langzeitsicherheitsanalyse, DBE-Bericht T23, Peine.
- /ENG 93/ Engelmann, H.J., Lommerzheim, A., Linn, M., Müller-Hoeppe, N., (1993): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02E8201), Vergleichende Temperaturfeldberechnungen für die Konzepte SL und GBS“A“ bei 200°C und 150°C Auslegungstemperatur, DBE-Bericht T55, Peine.
- /GES 79/ Gessler, K., (1979): Genauigkeitsprüfung der Dauerprüfstände – 2. Festigkeits- und Verformungsanisotropie von ASSE-Steinsalz, Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung mbH München, Institut für Tief Lagerung, FE-Vorhaben 77206, IfT-Abteilungsbericht 2/81
- /GES 83/ Gessler, K., Duda, E., (1983): Laboruntersuchung zur Ermittlung geomechanischer Kennwerte an Kernen der Bohrung GORLEBEN 1004 Teufe 320 bis 410 m (Na2), Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung mbH München, Institut für Tief Lagerung Wissenschaftlich Abteilung, IfT-Abteilungsbericht 13/83

- /HAE 02/ Häfner, F., Voigt, H.-D., Behr, A., (2002): Zeitliche Veränderung der Ausdehnung und der hydraulischen Eigenschaften von Auflockerungszonen um Hohlräume in Gesteinen mit visko-plastischen Eigenschaften, Abschlussbericht; Anlage zum Bericht: Kamlot, P., Böhnel, H., Bock, H. 2002: Untersuchung gesteinsmechanischer Eigenschaften von Sylvinit, IfG Leipzig.
- /HAI 92/ Haijink, B., (1992): Pilot test on radioactive waste disposal in underground facilities, Commission of the European Communities, nuclear science and technology, EUR 13985EN, Luxembourg.
- /HAW 91/ HAW-Project, (1991): Test disposal of highly radioactive radiation sources in the ASSE salt mine Fed. Rep. of Germany, Interim Report May-December 1990, Joint Report of GSF-Institut für Tief Lagerung - Stichting Energieonderzoek Centrum.
- /HAW 91a/ HAW-Project, (1991): Test disposal of highly radioactive radiation sources in the ASSE salt mine Fed. Rep. of Germany, Interim Report January – June 1991, Joint Report of GSF-Institut für Tief Lagerung - Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) – Agence Nationale Pour la Gestion de Déchets Radioactifs (ANDRA) - Empresa Nacional de Residuos Radioactivos S.A. (ENRESA), GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Tief Lagerung Abteilung für Endlagertechnologie, IfT-Abteilungsbericht 13/91.
- /HAW 92a/ HAW-Project, (1992): Test disposal of highly radioactive radiation sources in the ASSE salt mine, Progress Report January-June 1992, Joint Report of GSF-Institut für Tief Lagerung - Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) – Agence Nationale Pour la Gestion de Déchets Radioactifs (ANDRA) - Empresa Nacional de Residuos Radioactivos S.A. (ENRESA), GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Tief Lagerung Abteilung für Endlagertechnologie, IfT-Abteilungsbericht 7/92.
- /HAW 93/ HAW-Project, (1993): Test disposal of highly radioactive radiation sources in the ASSE salt mine, Progress Report July-December 1992, Joint Report of GSF-Institut für Tief Lagerung - Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) – Agence.
- /HOU 02/ Hou, Z., (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung, Heft 13, 366 Seiten.
- /IFG 05/ IFG, (2005): Prognose der dynamischen Langzeitstabilität von Grubengebäuden im Salinar unter Berücksichtigung von Diskontinuitäts- und Schichtflächen. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig.
- /IFG 10/ IfG, (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig.

- /GSF 86/ GSF-Institut für Tief Lagerung, (1986): Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk ASSE, Abschlussbericht 1983 – 1984, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kerntechnik und –technologie, EUR 10489DE.
- /KAM 09/ Kamlot, P. (2009): Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk, Habilitationsschrift TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2009-3, ISSN 1611-1605
- /KAM 91/ Kamlot, P., Schwandt, A. (1991): Zusammenfassung und Beurteilung des derzeitigen Wissensstandes über das geotechnische Verhalten von Anhydrit und Salzton (Arbeitspaket A), BMFT-Abschlußbericht 02E8241 mit Beiträgen von A. Schwandt.
- /KES 86/ Kessels, W., Feddersen, H.-K., Flach, D., Flentge, I., Frohn, C., Gies, H., Gommlich, G., Hahn J., Hente, B., Jockwer, N., Klarr, C., Pfeifer, S., Rothfuchs, T., Schmidt, M.W.; Wieczorek, K. (1986): Results of Temperature Test 6 in the ASSE Salt Mine, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kernforschung und technologie, Bericht EUR 10827EN, I + II.
- /KEZ 69/ Kézdi, Á. (1969): Handbuch der Bodenmechanik.- Bd.1 Bodenphysik, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- /SCH 67/ SCHULTZE, E. / MUHS, H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer-Verlag Berlin, 2. Auflage
- /KRO 09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, Ch., Xie, Mingliang, 2009: Restporosität und –permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM – Phase 1, GRS, Köln.
- /LUX 02a/ Lux, K.-H., Lomo-Appeyh, G.M., Eberth, S. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen Gutachten im Auftrag des AkEnd, Clausthal.
- /LUX 02b/ Lux, K.-H.; Düsterloh, U.; Hou, Z. (2002): Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Speicherkavernen durch Anwendung eines neuen Entwurfs- und Nachweis-konzeptes, Erdöl, Erdgas, Kohle, 118. Jg., H 6, S. 294-300 + H7/8, S. 354-360.
- /LUX 97/ Lux, K.-H.; Bertram, J.; Düsterloh, U.; Hou, Z. (1997): Modellversuche an axial gelochten Steinsalz-Großbohrkernen im Hinblick auf die Überprüfung und Erweiterung theoretischer Prognosemodelle zum Sicherheitsnachweis von Untertagedeponien, Forschungsvorhaben-BMBF, 02 C 0092.
- /POP 01/ Popp, T., Kern, H., Schulze, O. (2001): The evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation.-J. Geophys. Res. 106 , No. B3, 4061-4078.

- /POP 06/ Popp, T., Böhnel, H., Salzer K. (2006): Investigation of the Mechanical Behavior of Precompacted Crushed Salt in Contact to the Host Rock, Report on long-term creep tests and gas injection tests on moistened salt bricks during
- /POP 07/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, H., Minkley, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, Forschungsvorhaben SR 2470.
- /PUD 94/ Pudewills, A., Müller-Hoeppe, N., Papp, R. (1994): Thermal and Thermomechanical Analyses for Disposal in Drifts of a Repository in Rock Salt, Nuclear Technology, Vol. 112, Oct.1995
- /ROT 84/ Rothfuchs, T., Schwarzianeck, P., Feddersen, H.-K. (1984): Simulationsversuch im Älteren Steinsalz Na2ß im Salzbergwerk ASSE, Temperaturversuch 4 (TVF 4), Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kernforschung und -
- /ROT 90/ Rothfuchs, T., Duijves, K. A.\*), Müller-Lyda, I. (1990): The HAW-Project: Demonstration Facility for the Disposal of High-Level Waste in Salt, Interim Report 1988 - 1989, GSF-Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht 15/90, Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 13399 EN, \*) ECN
- /ROT 90a/ Rothfuchs, T., Duijves, K. A.\*), Müller-Lyda, I. (1990): The HAW-Project: Demonstration Facility for the Disposal of High-Level Waste in Salt, Synthesis Report 1985 - 1989, Commission of the European Communities, nuclear science and technology, EUR13263EN, GSF-Bericht 14/90, \*) ECN
- /ROT 92/ Rothfuchs, T., Feddersen, H.-K., Graefe, V., Hente, B., Wieczorek, K. (1992): HAW Test at ASSE: Measured and calculated rock response. In: Proc. of 33rd Symp. of Rock Mechanics, Santa Fe/New Mexico, 03. - 05.06.1992. (Eds.: Tillerson, J. R., Wawersik, W. R.). Rotterdam: Balkema, S. 211-220
- /ROT 95/ Rothfuchs, T., Prij, J., Kröhn, K.-P., van den Horn, B.A., Wieczorek, K., 1995: DEBORA-Project - Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste, Final Report Phase I 1991-1995, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht 28/95
- /ROT 12/ Literaturliste zur Erfassung und Ableitung qualitätsgesicherter Parameterwerte für numerische Simulationen von Prozessabläufen in Untertagelabors bzw. Endlagern für radioaktive Abfälle. Stand 2012-01-09. <intern>
- /SAL 92/ Salzer, K., Menzel, W. et al. (1992): Überprüfung vorhandener Modellvorstellungen zum Konvergenzverhalten und zur Standsicherheit komplexer Grubengebäude im Salzgestein. Forschungsvorhaben BMFT-FB/02E81616, Januar 1992
- /SAL 95/ Salzer, K., Menzel, W. et al. (1995): Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern für umweltgefährdende Abfälle in Salzformationen der flachen Lagerung im Zusammenhang mit dem Verformungs- und Bruchverhalten in

- und um Grubengebäude, Abschlußbericht zum BMBF Vorhaben 02 C 00628, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 10.10.1995
- /SLI 85/ Schlich, M.-K. (1985): Simulation der Bewegung von im natürlichen Steinsalz enthaltener Feuchte im Temperaturfeld, Teil 1 Text und Teil 2 Abbildungen, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kerntechnik und – technologie, EUR10672DE, Dissertation D-82 RWTH Aachen, Aachen.
- /SPI 93/ Spies, Th., Prij, J., Rothfuchs, T. (1993): Sealing of HAW-boreholes in Salt Formations: Objectives and First Results of the DEBORA-Project. In: Proc. of the CEC-Workshop PEGASUS - Projects on effects of gas in underground storage facilities for radioactive waste, Brüssel, 11.-12.6.1993, CEC, EUR 14816 EN, s. 113 - 127
- /VEN 84/ Venzlaff, H., Schnier, H., Diekmann, N., Bleich, W., Liedtke, L. (1984): Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk GORLEBEN (PSE II). Abschlussbericht für das BMFT-Forschungsvorhaben KWA 51062, BGR, Hannover.
- /VOG 88/ Vogler, S., Plischke, I., Heemann, U., Mahnken, R., Schulze, O., Hunsche, U. (1988): Geotechnisches Verhalten verschiedener Salzgesteine - Teilprojekt I: Langzeitdeformationsverhalten von Salzgesteinen. Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5502 8, BGR, Hannover.
- /WAL 83/ Wallner, M., Wulf, A. (1983): Thermomechanical Calculations Concerning the Design of a Radioactive Waste Depository in Rock Salt. In: Symp. Felsmechanik in Verbindung mit Kavernen und Druckschächten, Mai 1983, Aachen, Bd. 2,1003-1012, Rotterdam.
- /WAL 91/ Wallner, M., Weller, B. (1991): Dammbau im Salzgebirge - Untersuchung und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Optimierung eines Dammbauwerkes, Berechnungen zur Standsicherheit. 2. Zwischenbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5605A/8, BGR, Hannover.
- /WAL 94/ Walter, F., Dittrich, J., 1994: Gesteinsmechanische Laboruntersuchung an Anhydrit- und Salztongesteinen, 1. Zwischenbericht, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht 11/94
- /WIE 05/ Weise, D., Kamlot, P. (2005): Abschlussbericht zur Analyse der prinzipiellen Funktionstüchtigkeit von Strömungsbarrieren im Forschungsbergwerk ASSE, IfG, Leipzig.
- /WOL 09/ Wolf, J. 2009: Numerische Modellierung des Salinarbereichs Schacht 1 GORLEBEN, Kurzdokumentation zu Berechnungen am 2D- und 3D-Modell, DBE interner Bericht, Peine.
- /WOL 11/ Wolters, R.; Herchen, K.; Lux, K.-H.; Düsterloh, U. (2011): Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz, Teilprojekt 5, BMBF-Forschungsvorhaben, 02 C 1617, Jan. 2011.

/ZIM 01/ Zimmer, U. (2001): Quantitative Untersuchung zur Mikrorissigkeit aus akustischen Gesteinseigenschaften am Beispiel von Steinsalz und Anhydrit. Dissertation. Berlin.

## 2 Dichte von EBS-Materialien

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertage-labor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturauswertung</b>
<b>Material:</b>	<b>EBS / ...</b> - Salzgrus (+Briketts) - Sorelbeton - Salzbeton - Ca-Bentonit - SVV - Schotter - Beton
<b>Datenblatt</b>	
<b>Parameter:</b>	<b>Dichte</b>
	mit - Best-Estimate-Wert (BEW) - Erläuterung zur Auswahl
<b>Bearbeiter:</b>	<b>H. Kull, R. Miehe</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-07-10</b>

2.1 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW)

2.1.1 BEW - EBS - Salzgrus (+Brikett)

Parameter <i>frmdata</i>		Dichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
EBS / Salzgrus (+Brikett)		ASSE	n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
siehe Wertetabelle		kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ

BEW - EBS - Salzgrus (+Brikett)

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/ZHA 93/, /SAL 07/	
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	/ZHA 93/; S.402, Werte aus Laboruntersuchungen an ASSE-Salzgrus /SAL 07/; S.13; Dichte von Salzbricketts nach Verdichtung 1973 – 1992 kg m <sup>-3</sup>
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	/ZHA 93/; Compaction behaviour of uncompacted and compacted wet crushed salt

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz																						
<p>Figure 6: Compaction behaviour of uncompacted and compacted wet crushed salt</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X g cm<sup>-3</sup></th> <th>Y MPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1,25</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>1,40</td><td>1,09</td></tr> <tr><td>1,52</td><td>2,19</td></tr> <tr><td>1,49</td><td>3,28</td></tr> <tr><td>1,52</td><td>4,37</td></tr> <tr><td>1,55</td><td>5,46</td></tr> <tr><td>1,61</td><td>7,65</td></tr> <tr><td>1,64</td><td>10,9</td></tr> <tr><td>1,69</td><td>13,1</td></tr> <tr><td>1,77</td><td>15,3</td></tr> </tbody> </table>	X g cm <sup>-3</sup>	Y MPa	1,25	0,00	1,40	1,09	1,52	2,19	1,49	3,28	1,52	4,37	1,55	5,46	1,61	7,65	1,64	10,9	1,69	13,1	1,77	15,3	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$	
X g cm <sup>-3</sup>	Y MPa																								
1,25	0,00																								
1,40	1,09																								
1,52	2,19																								
1,49	3,28																								
1,52	4,37																								
1,55	5,46																								
1,61	7,65																								
1,64	10,9																								
1,69	13,1																								
1,77	15,3																								

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>
Code <i>frmCode</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt	
Bewertung	
dataquality	
datasource	

ZHA 93, BEC99a, BEC04, GLA 92, GOM 95, DRO 96, IFT 88, IFT 89, KAP 86, KAP 86a, KAP 86b, KAP88, GLA 91, KRO 09, SAL 99, SNE 93, STM 94, WAM 89, WAT 95, ZHA 07, KAM 03, POP 06, SAL 07d, HOU 02, NN 03, LUX 06, SAL 07, BOL 96, BRD 93, ELL 04, FRO 95  
 fehlt: WAL 91b

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

n. a. nicht angegeben

2.1.2 BEW - EBS - Sorelbeton

Parameter <i>frmdata</i>		Dichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
EBS / Sorelbeton	ASSE		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
1900; 1937	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	Typ A1

BEW - EBS - Sorelbeton

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/DBT 06/; /IFG 04/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	Daten entnommen aus Blatt 16 /DBT 06/ Daten entnommen S..9 /IFG 04/		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Dichtewert gilt für Sorelbeton Typ A1; abweichende Dichten für Typ 29.6 A2 Sorelbeton => Magnesiabindersystem; zwei Sorelphasen [Mg(OH) <sub>2</sub> : MgCl <sub>2</sub> : H <sub>2</sub> O] Typ A1) 5:1:8; Typ A2) 3: 1:8 Rezeptur siehe /KRA 08/ ggf. Zuschlagstoffe zur Einstellung rheologischer Eigenschaften		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho =$ Gesteinsdichte; [kg m <sup>-3</sup> ] $m =$ Masse; [kg] $V =$ Volumen; [m <sup>3</sup> ] $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w =$ Wassergehalt; [-] $n =$ Porosität; [-] $\rho_s =$ Korndichte; [kg m <sup>-3</sup> ]
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			

DBT 06, IFG 04, WEI 05,  
neu: CDM 08

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

n. a. nicht angegeben

2.1.3 BEW - EBS - Salzbeton

Parameter <i>frmdata</i>		Dichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
EBS / Salzbeton			n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
1885	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - EBS - Salzbeton

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/RAA 84/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata ; InternalRemark</i>	/RAA 84/; Laborwerte aus Beprobung der Kammer 6 /ASSE (Wertebereich 1.860-1.910) /DBE 09/; Standardrezeptur für Salzbeton M2; Bl.11/12		
Graphik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			

RAA 84, XIE 00, DUE 10a  
 WAL 91b, DBE 85, DBE 90  
 neu: DBE 09

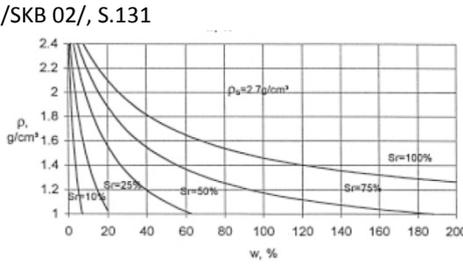
Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

2.1.4 BEW - EBS - Ca-Bentonit

Parameter <i>frmdata</i>		Dichte (Density)		
Material <i>frm_x-site</i>		Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
EBS / Ca-Bentonit				n. a.
Wert <i>frmdata</i>		Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
1700		kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	/JOC 08/

BEW - EBS - Ca-Bentonit

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/JOC 08/, /HER 02a/, /SKB 02/	Jockwer, N., Wieczorek, K. (2008): FEBEX. Investigations on gas generation, release and migration. – BMWi FKZ 02E9390, Final report, GRS-243, Köln. ISBN 978-3-939355-17-5 Herbert, H.-J., Moog, H.C. (2002): Untersuchungen zur Quellung von Bentoniten in hochsalinaren Lösungen, Abschlussbericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-179, ISBN 3-931995-47-X /SKB 02/; Pusch, R. (2002): The Buffer and Backfill Handbook. Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods. – Geodevelopment AB siehe Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-02-20, Stockholm.
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata ;InternalRemark</i>	/JOC 08/ mittlere Dichten bei einem Wassergehalt von ~14 Gew.% /HER 02a/ variierte Trocken-Einbaudichten von 1400-1800 kg m <sup>-3</sup> /SKB 02/ Werteangaben variieren stark je nach Konditionierung (z.B Einbaudichte, Feuchteanteil, Verdichtung und Bentonittyp (z.B. Montigel oder MX80...) /NTB 83/ Dichte: Montigel: 2847 kg m <sup>-3</sup> ; Dichte: MX 80: 2755 kg m <sup>-3</sup>

Grafik; Screenshot <i>curvedata</i>	Tabellenwerte <i>equation</i>	Formel / Gleichung	Beziehung/Gesetz
/SKB 02/, S.131  <i>Figure 7-1. Bulk density as a function of the water content at different degrees of water saturation for rho_s = 2700 kg/m^3.</i>	X Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho$ = Gesteinsdichte; [kg m <sup>-3</sup> ] $m$ = Masse; [kg] $V$ = Volumen; [m <sup>3</sup> ] $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w$ = Wassergehalt; [-] $n$ = Porosität; [-] $\rho_s$ = Korndichte; [kg m <sup>-3</sup> ]	

Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			

<i>datasource</i>	
-------------------	--

HER 02a, XIE 00, LUX 06, GRU 905 DIX 92
--

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

2.1.5 BEW - EBS - SVV

Parameter <i>frmdata</i>		Dichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
EBS / SVV			n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
1400	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

BEW - EBS - SVV

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/HER 05/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata ;InternalRemark</i>	S.25; Werte für lose Schüttdichte variieren zwischen 1350-1400 kg m <sup>-3</sup> ; S.83; Werte für verfestigten SVV liegen zwischen 1933 - 2147 kg m <sup>-3</sup>		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			

HER 05  
neu: HER 09

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

2.1.6 BEW - EBS - Schotter

Parameter <i>frmdata</i>		Dichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
EBS / Schotter			n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
1750	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	Schüttdichte

BEW - EBS - Schotter

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/BOL 96/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Geschütteter, verdichteter Basalt-Schotter		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

BOL 96

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

2.1.7 BEW - EBS – Beton

Parameter <i>frmdata</i>		Dichte (Density)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
EBS / Beton			n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
2260	kg m <sup>-3</sup>	rho, ρ	

**BEW - EBS - Beton**

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/DBE 96/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Beton Typ B15; weitere Werte für Stahlbeton (2280); Spritzbeton (2340); Stahlleichtbeton (1950); Mörtel (2980) alle in kg m <sup>-3</sup> /DBE 96/ mit Zitataus Betonkalender 1989 Teil 2		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	$\rho = m V^{-1}$ mit $\rho = \text{Gesteinsdichte; [kg m}^{-3}\text{]}$ $m = \text{Masse; [kg]}$ $V = \text{Volumen; [m}^3\text{]}$ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ mit $w = \text{Wassergehalt; [-]}$ $n = \text{Porosität; [-]}$ $\rho_s = \text{Korndichte; [kg m}^{-3}\text{]}$
<b>Numerische Modellierung</b>			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

**DBE 96**

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

## 2.2 Begründung

### 2.2.1 EBS-Materialien - Spezifikation

#### Dichte – Definition

Die Dichte,  $\rho$  ist eine Stoffkonstante [ $\rho = m \cdot V^{-1}$ ], die sich aus der Masse,  $m$  und dem Volumen,  $V$  berechnet. Die Einheit der Dichte wird in kg pro  $m^3$  angegeben.

Die direkte Ermittlung der Dichte erfolgt in der Regel im Labor an Kernen durch Wägung zur Bestimmung der Materialmasse und durch geometrische Vermessung zur Bestimmung des Gesamtvolumens. Alternativ kann das Volumen durch Pyknometermessungen ermittelt werden. In situ kann die Dichte indirekt aus Bohrlochmessungen (z. B. Gamma-Messungen, Gravimetrie) abgeleitet werden.

Allgemein berücksichtigt die Angabe der Dichte [ $\rho = \rho_s \cdot (1+w) \cdot (1-n)$ ] /SCH 67/, /KEZ 69/ die Einzelkorndichte ( $\rho_s =$  Korndichte [ $kg \cdot m^{-3}$ ]), die Porosität ( $n =$  Porosität [-]) und den Wassergehalt ( $w =$  Wassergehalt [-]) einer Probe.

Die hier vorgestellten Werte zur **Dichte** für unterschiedliche EBS-Materialien stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS+ gesichteten und ausgewerteten Literatur dar /ROT 12/. Bei der Durchsicht der Literatur war festzustellen, dass die Bezeichnung nicht konsistent und zum Teil nicht nachvollziehbar waren (Dichte, Einbau-, Schütt-, Einbring-, Rein-, Roh-, End-, Festkörper-, Korn-, Materialdichte).

- **Salzgrus + (Salzbriketts)**
  - a) Salz aus Auffahrung; Korn < 64mm; unverdichtet; /GLA 91/, /GLA 92/
  - b) Steinsalz; Korn  $\cong$  0,16-0,5mm; verdichtet ~ 130 MPa; /SAL 07/  
DIN 18125 T1
- **Sorelbeton** /KRA 08/  
Magnesiabindersystem; [ $Mg(OH)_2 : MgCl_2 : H_2O$ ]; (Zuschlagstoff)  
Typen A1 und A2 (thermodynamisch stabil)  
Mischungsverhältnisse A1) 5:1:8 und A2) 3:1:8
- **Salzbeton** /DBE 09/  
Typ M2; [Hochofenzement (CEM III), Steinkohleflugasche, Wasser, Salzzuschlag]  
Mischungsverhältnisse M2) 1:1:0,8:3,3
- **Ca-Bentonit** /HER 02a/, /NTB 83/, /NTB 82/  
Montmorillonit...Illit, Quarz, Sonstige Minerale + Wasser

Calciumbentonit; Smektit-Belegung mit  $\text{Ca}^{2+}$  oder  $\text{Mg}^{2+}$ : Calcigel, Montigel

Natriumbentonit; Smektit-Belegung überwiegend  $\text{Na}^{+}$ : Wyoming-Bentonit, MX80

aus /BRE 02/

CALCIGEL	Ca-Bentonit der Süd-Chemie AG aus bayerischen Vorkommen, Montmorillonitgehalt ca. 70 % in natürlicher Belegung (Ca, Mg).
IBECO-Ca-Bentonit	Ca-Bentonit der Firma IBECO Bentonit-Technologie mit bis zu 80 % Montmorillonit in natürlicher Belegung aus unterschiedlichen Vorkommen.
MX-80	Weltweit für die Endlagerung untersuchtes Referenzprodukt mit einem Montmorillonitgehalt von 75 % aus amerikanischen Vorkommen (Wyoming).
Friedländer Ton	Besteht aus 44 % unregelmäßigem Muskovit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineralen mit 60 ... 70 % Montmorillonit, woraus ein Gesamtmontmorillonitgehalt von ca. 30 % resultiert.

- **SVV** /HER 05/  
Magnesiumsulfat, wasserfrei; (Zuschlagstoff)
- **Schotter** /BOL 96/  
Basaltschotter
- **Beton** /DBE 96/  
[Zement, Zuschlagstoff, Wasser]

### 2.2.2 Empfehlung für Best-Estimate-Werte (BEW)

Die Ergebnisse der Dichtewerte in der gesichteten Literatur sind mit Angabe der Bandbreite in nachstehender Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Übersicht über empfohlene BEW für EBS-Materialdichten in  $\text{kg m}^{-3}$

	Salzgrus (+Brikett)	Sorelbeton	Salzbeton	Ca-Bentonit	SVV	Schotter	Beton
ASSE	1250 – 1770*	1900; 1937					
GORLEBEN							
ERAM							
Virtus	1250 – 1770*	1900; 1937	1885	1800	1400	1750	2260

\*Belastungsabhängig

Die nachstehend aufgeführten Dichten für **EBS-Materialien** wurden aus der Liste der experimentell ermittelten Werte ausgewählt, die das Kriterium der Plausibilität erfüllen. Die Werte resultieren überwiegend aus experimentellen Untersuchungen an Kernproben bzw. Schüttungen. Weitere Werte wurden aus anderen Literaturstellen übernommen.

Die Angaben zur Dichte von **Salzgrus** sind abhängig von der Kompaktion und der Zusammensetzung des Materials sowie dem Anteil der Feuchte /BEC 99a/, /BEC 04/, /ELL 04/, /FRO 95/, /GLA 92/, /GOM 95/, /KAM 03/, /KAP 86/, /KAP 86a/, /KAP 86b/, /KAP 88/, /KRO 09/, /NN 03/, /POP 06/, /SNE 93/, /WAT 95/, /ZHA 07/. **Salzbriketts** wurden im Rahmen des Dammbauprojektes von der Fa Kali+Salz, K+S hergestellt /STM 94/, /SAL 99/, /SAL 07/, /SAL 07d/.

Für **Sorelbeton** liegen zwei verwertbare Literaturstellen vor (/DBT 06/, IFG 04/), in denen zwischen Sorelbeton Asse und Sorelbeton Typ A1 und A2 unterschieden wird. In den Literaturstellen /WEI 05/ und /CDM 08/ waren keine Dichtewerte angegeben.

Untersuchungen zur Dichte von **Salzbeton** sind für Proben aus den Kammern 6 (Na3) 750 m-Sohle, und 7 (Na3) 750 m-Sohle der Asse vorgenommen worden /RAA 84/. Dichtewerte für Salzbeton aus Hope sind von /XIE 00/ beschrieben. Der Angabe der Salzbetondichte von /DUE 10a/ war keine Herkunft zuzuordnen. Die Literatur /WAL 91b/, /DBE 85/ und /DBE 90/ fehlt.

Dichteuntersuchungen zu **Ca-Bentonit** sind für MX-80 von /HER 02a/, /HOU 02/, /NN 03/, /SAL 99/, /XIE 00/ und für Calcigel von /GRU 05/ und /HER 02a/ beschrieben. Bei den

Proben handelt es sich um Presslinge bzw. Formsteine, die auf eine vorgegebene Dichte kompaktiert wurden.

Die Schüttdichte des lose einzubringenden SelbstVerheilendenSalzversatzes, **SVV** liegt in der Größenordnung von  $1400 \text{ kg m}^{-3}$ . Höhere Dichten resultieren nach /HER 05/ aus der Reaktion mit der zufließenden Lösung. Entsprechend der Lösungsspezifikation und dem Einspannungsgrad ergeben sich Dichten bis ca.  $2000 \text{ kg m}^{-3}$ .

Angaben zur Dichte von **Schotter** werden von /BOL 96/ für geschütteten und verdichteten für Basaltschotter gemacht.

Für **Beton** stand eine Literaturstelle /DBE 96/ zur Verfügung. Hier wird zwischen verschiedenen Betonarten (B15, Stahlbeton, Spritzbeton, Stahlleichtbeton) für den Standort Gorleben unterschieden.

### 2.2.3 Literaturverzeichnis

- /BEC 99a/ Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., Olivella, S., (1999): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project), Final Report, European Commission, EUR19124EN, Luxembourg.
- /BEC 04/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F. D., (2004): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project), European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 20621EN, Luxembourg.
- /BOL 96/ Bollingerfehr, W., (1996): Dam constructions in radioactive waste repositories in salt formation – long-term sealing system, European Commission, nuclear science and technology, EUR 16856EN, Luxembourg.
- /BRD 93/ Breidenich, G. (1993): Gekoppelte Berechnung der thermomechanischen Feldgrößen in einer Steinsalzformation infolge der Einlagerung radioaktiver Wärme freisetzender Abfälle, Dissertation, ABEV Band 16.
- /BRE 02/ Breidung, K.P. (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. – BMBF FKZ 02C0516, Kali+Salz, Bad Salzdetfurth.
- /CDM 08/ Datenblätter zum Sorelbeton. Prüflabor für Bau- und Feststoffe der Schachtanlage Asse, Stand 09/2007. Konzeptstudie zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Kammern der Südwestflanke der Schachtanlage Asse II; Projekt-Nr.: 61574 Bericht 01. Erstellt im Auftrag von: Bundesministerium für Bildung und Forschung Referat 713, 53170 Bonn
- /DBE 96/ DBE, (1996): FEM-Berechnungen der Belastungen und Verschiebungen des Innenausbaufundamentes und der Stützringe des Schachtes GORLEBEN 1, Peine.
- /DBT 06/ DBETEC, (2006): ASSE – Schacht 2 und Schacht 4: Nachweis zur Einhaltung der Grenztemperatur an der Oberfläche eines anstehenden Trümmercarnallits, Stand 08.08.2006, Dok.-Kennz.: A/GC/LD/0001/00
- /DBE 09/ NN 2009: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.- Verfahrensunterlage G296. Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtbauwerke im Steinsalz. Blatt 12, Bundesamt für Strahlenschutz , Salzgitter.
- /DBE 85/ DBE 85 nicht in Liste
- /DBE 90/ DBE 90 nicht in Liste

- DIN 18125 T1 (2010): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 1: Laborversuche.
- /DIX 92/ Dixon D.A., Gray, M.N., Lingnau, B., Graham, J. and Campbell, S.L. (1992 ?): Thermal expansion testing to determine the influence of pore water structure on water flow through dense clays. (Literatur fehlt)
- /DUE 10a/ Düsterloh, U., (2010): Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlrumbauteilen im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen, Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal, ISBN 978-03-86948-068-8.
- /ELL 04/ Elliger, C. (2004): Untersuchungen zum Permeationsverhalten von Salzlauge in Steinsalz bei der Endlagerung Wärme entwickelnder nuklearer Abfälle, Dissertation TU Darmstadt.
- /FRO 95/ Fröhlich, H. (1995): Bestimmung des Diffusions- und Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus: Abschlußbericht, Förderkennzeichen 02E84623, gemeinsamer Bericht mit 02E84629, Battelle-Ingenieurtechnik GmbH, Eschborn
- /GLA 91/ Gläß, F., Kappei, G., Schmidt, M. W., et al. (1991): Untersuchungen zum Versatz und Verschuß von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz. Abschlußbericht, GSF 19/91.
- /GRU 05/ Gruner, M., Sitz, P., Herbert, H.-J., Moog, H.C., Kolditz, O., Schanz, T. et al. (2005): Experimentelle und numerische Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken im Salinar mit Bentonitgemischen als Dichtelement, Schlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02C0881
- /GLA 92/ Gläß, F., Kappel, G., Schmidt, M.W., Schwieger, K., Starke, C., Taubert, E., Wallmüller, R., Walter, F., 1992: Untersuchung zum Versatz und Verschuß von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, kernforschung und -technologie, EUR 13955 DE
- /GOM 95/ Gommlich, G., Jockwer, N., Schneefuß, J., Heusermann, S. (1995): Direct Disposal of Spent Fuel in Rock Salt – Geomechanical Effects and Gas Release, Proc. 5th Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation – (ICEM 95), Vol. 1, p. 783-789, ASME, New York
- /HER 02a/ Herbert, H.-J., Moog, H.C. (2002): Untersuchungen zur Quellung von Bentoniten in hochsalinaren Lösungen, Abschlussbericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-179, ISBN 3-931995-47-X
- /HER 05/ Herbert, H.-J., Kull, H., Müller-Lyda, I. (2005): Weiterentwicklung eines Selbst Verheilenden Versatzes (SVV) als Komponente im Barriersystem Salinar, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-220, 53 S., ISBN 3-931995-90-9

- /HER 09/ Herbert, H.-J., Hertes, U., Meyer, L., Hellwald, K., Dittrich, J., (2009): SVV2 - Qualifizierung von Strömungsbarrieren in Salzformationen. - BMBF FKZ 02 C 1335, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-263, 123 S., ISBN 978-3-939355-40-3
- /HOU 02/ Hou, Z., (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung, Heft 13, 366 Seiten.
- /IFG 04/ IfG (2004): Anwendungsbezogene Untersuchungen an einer Pilotströmungsbarriere – Labortests am Sorelbeton und In-situ Untersuchungen – Abschlußbericht, Dok.-Kennz.: A/01VER/GB/FU/0005/00, Stand: 27.02.2004 (entspricht KAM 04 (s.o.))
- /IFT 89/ Dammbau im Salzgebirge, Untersuchung und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Optimierung eines Dammbauwerks, Jahresbericht 1988, BMFT-Förderkennzeichen KWA 5603 6, FE-Vorhaben 77289, Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung München, Institut für Tief Lagerung, Abteilung für Endlagertechnologie, IFT-Abteilungsbericht 2/89
- /JOC 08/ Jockwer, N., Wieczorek, K. (2008): FEBEX. Investigations on gas generation, release and migration. – BMWi FKZ 02E9390, Final report, GRS-243, Köln. ISBN 978-3-939355-17-5
- /KAM 03/ Kamlot, P., Brückner, D., Wiedemann, M. (2003): Investigation of stress state and rock-mechanical behaviour of backfill and host rock in dependence on temperature (contribution to the Bambus II project), Final report Institut für Gebirgsmechanik Leipzig, BMWi-Abschlußbericht 02E9259 mit Beiträgen von Manthei, G. (GMuG Ober-Mörlen)
- /KAP 86/ Kappei, G., 1986: Bodenmechanischer Versatzuntersuchung an Haldensalzhaufwerk, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München, GSF-Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht 3/86
- /KAP 86a/ Kappei, G., 1986: Bodenmechanischer Versatzuntersuchung an Salzhaufwerken (0 - 20 mm), Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München, GSF-Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht 4/86
- /KAP 86b/ Kappei, G., 1986: Verdichtungsverhalten von Steinsalzhaufwerken (0 – 20 mm), Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München, GSF-Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht 5/86
- /KAP 88/ Kappei, G., 1988: Ermittlung bodenmechanischer Eigenschaften von Salzhaufwerken als mögliche Versatzmaterialien in einem untertägigen Endlager, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München, GSF-Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht 1/88
- /KEZ 69/ Kézdi, Á. (1969): Handbuch der Bodenmechanik.- Bd.1 Bodenphysik, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

- /KRA 08/ Krauke, W., Fliß, T. 2008: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.- Verfahrensunterlage P266. Konzeption und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabinder. S.18, Bundesamt für Strahlenschutz , Salzgitter.
- /KRO 09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, Ch., Xie, Mingliang, 2009: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM – Phase 1, GRS, Köln.
- /NN 03/ N.N. (2003): Clausthaler Kolloquium zur Endlagerung 2003, Heft 14, 242
- /NTB 82/ Müller-Vonmoos, M., Kahr, G. (1983): Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX 80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode. – Inst. F. Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich, NAGRA Technischer Bericht NTB 82-06, Baden / Schweiz.
- /NTB 83/ Müller-Vonmoos, M., Kahr, G. (1983): Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel. – Inst. F. Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich, NAGRA Technischer Bericht NTB 83-12, Baden / Schweiz.
- /POP 06/ Popp, T., Böhnel, H., Salzer K. (2006): Investigation of the Mechanical Behavior of Precompacted Crushed Salt in Contact to the Host Rock, Report on long-term creep tests and gas injection tests on moistened salt bricks during.
- /RAA 84/ Raab, W., Fischle, W., Schauer mann, V., 1984: Untersuchung an Versatz- und Verschlussstoffen für ein untertägliches Endlager, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kernforschung und -technologie, EUR 9254 DE
- /ROT 12/ Literaturliste zur Erfassung und Ableitung qualitätsgesicherter Parameterwerte für numerische Simulationen von Prozessabläufen in Untertagelabors- bzw. Endlagern für radioaktive Abfälle. Stand 2012-01-09. <intern>
- /SAL 07/ Salzer, K. (2007): Untersuchung des mechanischen Verhaltens von kompaktiertem Salzgrus im Kontakt mit dem Wirtsgestein, Förderkennzeichen BMBF 02 E 9904, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig
- /SAL 07d/ Salzer, K., Popp, T., Böhnel, H. (2007): Mechanical and permeability properties of highly pre-compacted granular salt bricks, In: Lux, K.-H., Minkley, W., Wallner, M., Hardy, Jr., H.R. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics, Proc. of the 6th Conf. on the Mech. Behavior of Salt, Hannover 2007, p. 239-248, Lisse, Francis & Taylor (Balkema)
- /SAL 99/ Salzer, K. (1999): Randbedingungen und Eingangsparameter für die Modellierung von Verschlussbauwerken, Workshop "Langzeitsichere Verschlussbauwerke im Salinar - Stand der Realisierbarkeit", TU Bergakademie Freiberg, 4./5.11.1999
- /SCH 67/ SCHULTZE, E. / MUHS, H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer-Verlag Berlin, 2. Auflage.

- /SKB 02/ Pusch, R. (2002): The Buffer and Backfill Handbook, Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods. Geodevelopment AB, Technical Report TR-02-20, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- /SNE 93/ Schneefuß, J., Droste, J., Gommlich, G., Ohme, G. Jockwer, N., Mönig, J., Kunze, J., 1993: Arbeiten zur direkten Endlagerung von Brennelementen – Teil: Thermische Simulation der Streckenlagerung, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht 26/93
- /STM 94/ Stockmann, N., Beinlich, A., Droste, J., Flach, D., Gläß, F., Jockwer, N., Krogmann, P., Miehe, R., Möller, J., Schwägermann, F., Wallmüller, R., Walter, F., Yaramanci, U., 1994: Dammbau im Salzgebirge - Abschlußbericht Projektphase II, Berichtszeitraum 01.07.1998-31.12.1992, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht 18/94
- /WAL 91b/ Wallner, M., Weller, B. (1991): Dammbau im Salzgebirge - Untersuchung und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Optimierung eines Dammbauwerkes, Berechnungen zur Standsicherheit. 2. Zwischenbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5605A/8, BGR, Hannover.
- /WAT 95/ Walter, F., Gesteinsmechanische Laboruntersuchung an verfestigtem Salzgrusversatz, Bericht 1995, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Tieflagerung Abteilung für Endlagertechnologie, IfT-Abteilungsbericht 7/95
- /WEI 05/ Weise, D., Kamlot, P. (2005): Abschlussbericht zur Analyse der prinzipiellen Funktionstüchtigkeit von Strömungsbarrieren im Forschungsbergwerk ASSE, IfG, Leipzig.
- /XIE 00/ Z. Xie (2000): Rechnerische Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Abdichtungsbauwerken in Untertagedeponien für den Fall eines Lösungszutrittes, Heft 12, 278 Seiten.
- /ZHA 93/ Zhang, C.-L., Schmidt, M.W., Staupendahl, G., Heemann, U. (1993): Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus, Inst. F. Statik TU BS Bericht Nr. 93-73 und GSF-Inst. F. Tieflagerung, Braunschweig
- /ZHA 07/ Zhang, C.-L., Rothfuchs, T., Droste, J. (2007): Post-Tests on Thermo-Mechanically Compacted Salt Backfill Proceedings 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Hannover, 22 – 25 May 2007

## 3 Wärmeleitfähigkeit von Salzgestein

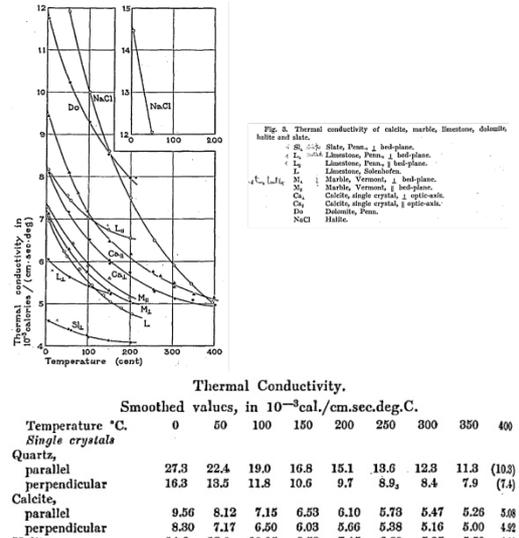
<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturlauswertung</b>
<b>Standort</b>	<b>Gorleben</b>
<b>Material:</b>	<b>Salzgesteine (vorwiegend) Anhydrit Kalisalz Salzton</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_XX.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit</b>
Anlage 01 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW) Anlage 02 Begründung	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Christian Müller</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-03-06</b>

3.1 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW)

Parameter <i>frmdata</i>	VIRTUS: Wärmeleitfähigkeit																																																																																		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>																																																																																	
Steinsalz	Gorleben	z2 (allgemein), z2HS1, z2HS2, z2HS3, z2HG																																																																																	
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung																																																																																
6,1 – 2,1 (0°C – 400°C)	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>	λ																																																																																	
Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>																																																																																		
/BIR40/ /CER82/ /EIS03/ /KOP85b/ /KOP95/																																																																																			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	Messwerte zur z2-Folge sind größtenteils aus /EIS03/. Es zeigt sich, dass /BIR40/ in erster Näherung (keine statistische Auswertung!) als Ausgleichskurve für die oben genannten Schichten angesehen werden kann. Da die z2-Folge homogene Steinsalzbereiche bildet, wird /BIR40/ auch als Ausgleichskurve für das Staßfurt-Steinsalz im Allgemeinen(z2) angesetzt. Messwerte für z2HG beruhen auf einer einzigen Probe.  In /BIR40/ handelt es sich um Labormessungen an Steinsalz mit äußerst geringen Verunreinigungen („obtained from Ward’s Natural Science Establishment“).																																																																																		
Anmerkungen <i>frmdata ;InternalRemark</i>	/BIR40/ S.548, Fig. 3 (Messwerte und Ausgleichskurve) /BIR40/ S.554, Tab.7 (Werte der Ausgleichskurve für 50°C Intervalle im Temperaturbereich von 0°C – 400°C Angabe der Wärmeleitfähigkeit in /BIR40/ ist: 10 <sup>-3</sup> cal cm <sup>-1</sup> sec <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> Umrechnung erfolgt durch 0,41868W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>																																																																																		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz																																																																																
<p>Fig. 5. Thermal conductivity of calcite, marble, limestone, dolomite, halite and silite.</p> <p>Legend:          □ Silite, Perm., 1 bed-plane.          ○ Silite, Perm., 2 bed-plane.          △ Silite, Perm., 3 bed-plane.          □ Limestone, Perm., 1 bed-plane.          △ Limestone, Subcartholm.          □ Marble, Vermont, 1 bed-plane.          △ Marble, Vermont, 2 bed-plane.          □ Calcite, single crystal, 1 optic-axis.          △ Calcite, single crystal, 2 optic-axis.          □ Dolomite, Perm.          △ Halite.</p> <p>Thermal Conductivity, Smoothed values, in 10<sup>-3</sup> cal./cm.sec.deg.C.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperature °C.</th> <th>0</th> <th>50</th> <th>100</th> <th>150</th> <th>200</th> <th>250</th> <th>300</th> <th>350</th> <th>400</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Quartz, parallel</td> <td>27.3</td> <td>22.4</td> <td>19.0</td> <td>16.8</td> <td>15.1</td> <td>13.6</td> <td>12.3</td> <td>11.3</td> <td>(10.3)</td> </tr> <tr> <td>Quartz, perpendicular</td> <td>16.3</td> <td>13.5</td> <td>11.8</td> <td>10.6</td> <td>9.7</td> <td>8.9,</td> <td>8.4</td> <td>7.9</td> <td>(7.4)</td> </tr> <tr> <td>Calcite, parallel</td> <td>9.56</td> <td>8.12</td> <td>7.15</td> <td>6.53</td> <td>6.10</td> <td>5.73</td> <td>5.47</td> <td>5.26</td> <td>5.08</td> </tr> <tr> <td>Calcite, perpendicular</td> <td>8.80</td> <td>7.17</td> <td>6.50</td> <td>6.03</td> <td>5.66</td> <td>5.38</td> <td>5.16</td> <td>5.00</td> <td>4.92</td> </tr> <tr> <td>Halite</td> <td>14.6</td> <td>12.0</td> <td>10.05</td> <td>8.58</td> <td>7.45</td> <td>6.60</td> <td>5.95</td> <td>5.50</td> <td>4.98</td> </tr> </tbody> </table>	Temperature °C.	0	50	100	150	200	250	300	350	400	Quartz, parallel	27.3	22.4	19.0	16.8	15.1	13.6	12.3	11.3	(10.3)	Quartz, perpendicular	16.3	13.5	11.8	10.6	9.7	8.9,	8.4	7.9	(7.4)	Calcite, parallel	9.56	8.12	7.15	6.53	6.10	5.73	5.47	5.26	5.08	Calcite, perpendicular	8.80	7.17	6.50	6.03	5.66	5.38	5.16	5.00	4.92	Halite	14.6	12.0	10.05	8.58	7.45	6.60	5.95	5.50	4.98	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X [°C]</th> <th>Y 10<sup>-3</sup> cal cm<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> / [W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>14,6 [6,1]</td></tr> <tr><td>50</td><td>12,0 [5,0]</td></tr> <tr><td>100</td><td>10,05 [4,2]</td></tr> <tr><td>150</td><td>8,58 [3,6]</td></tr> <tr><td>200</td><td>7,45 [3,1]</td></tr> <tr><td>250</td><td>6,60 [2,8]</td></tr> <tr><td>300</td><td>5,95 [2,5]</td></tr> <tr><td>350</td><td>5,50 [2,3]</td></tr> <tr><td>400</td><td>4,98 [2,1]</td></tr> </tbody> </table>	X [°C]	Y 10 <sup>-3</sup> cal cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> / [W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]	0	14,6 [6,1]	50	12,0 [5,0]	100	10,05 [4,2]	150	8,58 [3,6]	200	7,45 [3,1]	250	6,60 [2,8]	300	5,95 [2,5]	350	5,50 [2,3]	400	4,98 [2,1]	$\lambda = \frac{\lambda_0}{(1 + C \cdot T)}$ <p>mit</p> <p>λ = Wärmeleitfähigkeit [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]</p> <p>λ<sub>0</sub> = Wärmeleitfähigkeit bei 0°C [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]</p> <p>C = 0,0045</p> <p>λ<sub>0</sub> = 6,1</p> <p>T = °C</p>	<p>Tabellenwerte aus /BIR40/ (Werte der Ausgleichskurve)</p> <p>Funktion aus /CER82/ mit Kennwerten nach /BIR40/</p>
Temperature °C.	0	50	100	150	200	250	300	350	400																																																																										
Quartz, parallel	27.3	22.4	19.0	16.8	15.1	13.6	12.3	11.3	(10.3)																																																																										
Quartz, perpendicular	16.3	13.5	11.8	10.6	9.7	8.9,	8.4	7.9	(7.4)																																																																										
Calcite, parallel	9.56	8.12	7.15	6.53	6.10	5.73	5.47	5.26	5.08																																																																										
Calcite, perpendicular	8.80	7.17	6.50	6.03	5.66	5.38	5.16	5.00	4.92																																																																										
Halite	14.6	12.0	10.05	8.58	7.45	6.60	5.95	5.50	4.98																																																																										
X [°C]	Y 10 <sup>-3</sup> cal cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> / [W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]																																																																																		
0	14,6 [6,1]																																																																																		
50	12,0 [5,0]																																																																																		
100	10,05 [4,2]																																																																																		
150	8,58 [3,6]																																																																																		
200	7,45 [3,1]																																																																																		
250	6,60 [2,8]																																																																																		
300	5,95 [2,5]																																																																																		
350	5,50 [2,3]																																																																																		
400	4,98 [2,1]																																																																																		

<i>Numerische Modellierung</i>			
Constitutive model <small>frmCategory_ConstitutiveModel</small>	Code <small>frmCode</small>	Funktion <small>frmFunktion</small>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

<b>Parameter</b> <i>frmdata</i>		<b>VIRTUS: Wärmeleitfähigkeit</b>																																																																																																					
<b>Material</b> <i>frm_x-site</i>	<b>Standort</b> <i>site</i>	<b>Stratigrafie, Symbol</b> <i>stratigraphy</i>																																																																																																					
Steinsalz	Gorleben	z3 (allgemein), z3BT, z3BK, z3BD, z3OSO, z3OSM, z3OSU, z3LS,																																																																																																					
<b>Wert</b> <i>frmdata</i>	<b>Einheit</b> <i>functionparameter</i>	<b>Symbol</b> <i>functionparameter</i>	<b>Bemerkung</b>																																																																																																				
6,1 – 2,1 (0°C – 400°C)	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>	λ																																																																																																					
<b>Zitat; Symbol</b> <i>frmReference</i>	<b>Literatur</b> <i>citation</i>																																																																																																						
/BIR40/ /CER82/ /EIS03/ /KOP85b/ /KOP95/																																																																																																							
<b>Beschreibung</b> <i>frmdata ;description</i>	Messwerte zur z3-Folge sind größtenteils aus /EIS03/. Es zeigt sich, dass /BIR40/ in erster Näherung (keine statistische Auswertung!) als Ausgleichskurve für die oben genannten Schichten angesehen werden kann, wenn es sich um vorwiegend (!) halthaltige Schichten handelt. Da die Leine-Folge (im Vergleich zur Staßfurt-Folge) durch häufigere Wechsel im Stoffbestand gekennzeichnet ist, können je nach Lokation deutliche Abweichungen in der Wärmeleitfähigkeit auftreten. Diese Abweichungen lassen sich Allgemein mit dem vorliegenden Datenbestand nicht detailliert spezifizieren. Bei den oben genannten Schichten kann es sich um Einzelmessungen handeln; siehe beiliegende Begründung.  In /BIR40/ handelt es sich um Labormessungen an Steinsalz mit äußerst geringen Verunreinigungen („obtained from Ward’s Natural Science Establishment“).																																																																																																						
<b>Anmerkungen</b> <i>frmdata; InternalRemark</i>	/BIR40/ S.548, Fig. 3 (Messwerte und Ausgleichskurve) /BIR40/ S.554, Tab.7 (Werte der Ausgleichskurve für 50°C Intervalle im Temperaturbereich von 0°C – 400°C Angabe der Wärmeleitfähigkeit in /BIR40/ ist: 10 <sup>-3</sup> cal cm <sup>-1</sup> sec <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> Umrechnung erfolgt durch 0,41868W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>																																																																																																						
<b>Grafik; Screenshot</b>	<b>Tabellenwerte</b> <i>curvedata</i>	<b>Formel / Gleichung</b> <i>equation</i>	<b>Beziehung/Gesetz</b>																																																																																																				
 <p><b>Thermal Conductivity.</b> Smoothed values, in 10<sup>-3</sup>cal./cm.sec.deg.C.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperature °C.</th> <th>0</th> <th>50</th> <th>100</th> <th>150</th> <th>200</th> <th>250</th> <th>300</th> <th>350</th> <th>400</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Quartz,</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>parallel</td> <td>27.3</td> <td>22.4</td> <td>19.0</td> <td>16.8</td> <td>15.1</td> <td>13.6</td> <td>12.3</td> <td>11.3</td> <td>(10.3)</td> </tr> <tr> <td>perpendicular</td> <td>16.3</td> <td>13.5</td> <td>11.8</td> <td>10.6</td> <td>9.7</td> <td>8.9,</td> <td>8.4</td> <td>7.9</td> <td>(7.4)</td> </tr> <tr> <td><b>Calcite,</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>parallel</td> <td>9.56</td> <td>8.12</td> <td>7.15</td> <td>6.53</td> <td>6.10</td> <td>5.73</td> <td>5.47</td> <td>5.26</td> <td>5.08</td> </tr> <tr> <td>perpendicular</td> <td>8.30</td> <td>7.17</td> <td>6.50</td> <td>6.03</td> <td>5.66</td> <td>5.38</td> <td>5.16</td> <td>5.00</td> <td>4.92</td> </tr> <tr> <td><b>Halite</b></td> <td>14.6</td> <td>12.0</td> <td>10.05</td> <td>8.58</td> <td>7.45</td> <td>6.60</td> <td>5.95</td> <td>5.50</td> <td>4.98</td> </tr> </tbody> </table>	Temperature °C.	0	50	100	150	200	250	300	350	400	<b>Quartz,</b>										parallel	27.3	22.4	19.0	16.8	15.1	13.6	12.3	11.3	(10.3)	perpendicular	16.3	13.5	11.8	10.6	9.7	8.9,	8.4	7.9	(7.4)	<b>Calcite,</b>										parallel	9.56	8.12	7.15	6.53	6.10	5.73	5.47	5.26	5.08	perpendicular	8.30	7.17	6.50	6.03	5.66	5.38	5.16	5.00	4.92	<b>Halite</b>	14.6	12.0	10.05	8.58	7.45	6.60	5.95	5.50	4.98	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X [°C]</th> <th>Y 10<sup>-3</sup>cal cm<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> / [W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>14,6 [6,1]</td></tr> <tr><td>50</td><td>12,0 [5,0]</td></tr> <tr><td>100</td><td>10,05 [4,2]</td></tr> <tr><td>150</td><td>8,58 [3,6]</td></tr> <tr><td>200</td><td>7,45 [3,1]</td></tr> <tr><td>250</td><td>6,60 [2,8]</td></tr> <tr><td>300</td><td>5,95 [2,5]</td></tr> <tr><td>350</td><td>5,50 [2,3]</td></tr> <tr><td>400</td><td>4,98 [2,1]</td></tr> </tbody> </table>	X [°C]	Y 10 <sup>-3</sup> cal cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> / [W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]	0	14,6 [6,1]	50	12,0 [5,0]	100	10,05 [4,2]	150	8,58 [3,6]	200	7,45 [3,1]	250	6,60 [2,8]	300	5,95 [2,5]	350	5,50 [2,3]	400	4,98 [2,1]	$\lambda = \frac{\lambda_0}{(1 + C \cdot T)}$ <p>mit</p> <p>λ = Wärmeleitfähigkeit [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  λ<sub>0</sub> = Wärmeleitfähigkeit bei 0°C [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  C = 0,0045  λ<sub>0</sub> = 6,1  T = °C</p>	<p>Tabellenwerte aus /BIR40/ (Werte der Ausgleichskurve)</p> <p>Funktion aus /CER82/ mit Kennwerten nach /BIR40/</p>
Temperature °C.	0	50	100	150	200	250	300	350	400																																																																																														
<b>Quartz,</b>																																																																																																							
parallel	27.3	22.4	19.0	16.8	15.1	13.6	12.3	11.3	(10.3)																																																																																														
perpendicular	16.3	13.5	11.8	10.6	9.7	8.9,	8.4	7.9	(7.4)																																																																																														
<b>Calcite,</b>																																																																																																							
parallel	9.56	8.12	7.15	6.53	6.10	5.73	5.47	5.26	5.08																																																																																														
perpendicular	8.30	7.17	6.50	6.03	5.66	5.38	5.16	5.00	4.92																																																																																														
<b>Halite</b>	14.6	12.0	10.05	8.58	7.45	6.60	5.95	5.50	4.98																																																																																														
X [°C]	Y 10 <sup>-3</sup> cal cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> / [W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]																																																																																																						
0	14,6 [6,1]																																																																																																						
50	12,0 [5,0]																																																																																																						
100	10,05 [4,2]																																																																																																						
150	8,58 [3,6]																																																																																																						
200	7,45 [3,1]																																																																																																						
250	6,60 [2,8]																																																																																																						
300	5,95 [2,5]																																																																																																						
350	5,50 [2,3]																																																																																																						
400	4,98 [2,1]																																																																																																						

<i>Numerische Modellierung</i>			
<b>Constitutive model</b> <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>		<b>Code</b> <i>frmCode</i>	<b>Funktion</b> <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

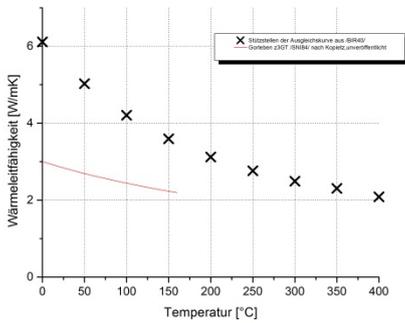
<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

Parameter <i>frmdata</i>	VIRTUS: Wärmeleitfähigkeit																																																																																		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>																																																																																	
Anhydrit	Gorleben	Anhydrit (allgemein), z3HA, z3AM																																																																																	
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung																																																																																
6,1 – 2,1 (0°C – 400°C)	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>	λ																																																																																	
Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>																																																																																		
/BIR40/ /CER82/ /EIS03/ /KOP85b/																																																																																			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	<p>Messwerte stammen aus /KOP85/ und /EIS03/. Insgesamt fanden sich Messwerte für 6 Proben (z3HA, z3AM). Die Werte differieren wenig von den Messwerten für Steinsalz von /BIR40/ weshalb auch hier die Beziehung vorgeschlagen wird. Auch hier gilt: Änderungen im Stoffbestand (durch z.B. Karbonatlagen) machen sich i.d.R. durch eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeiten bemerkbar.</p> <p>In /BIR40/ handelt es sich um Labormessungen an Steinsalz mit äußerst geringen Verunreinigungen („obtained from Ward’s Natural Science Establishment“).</p>																																																																																		
Anmerkungen <i>frmdata ;InternalRemark</i>	<p>/BIR40/ S.548, Fig. 3 (Messwerte und Ausgleichkurve)</p> <p>/BIR40/ S.554, Tab.7 (Werte der Ausgleichskurve für 50°C Intervalle im Temperaturbereich von 0°C – 400°C)</p> <p>Angabe der Wärmeleitfähigkeit in /BIR40/ ist: 10<sup>-3</sup> cal cm<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup></p> <p>Umrechnung erfolgt durch 0,41868W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup></p>																																																																																		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvdata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz																																																																																
<p><b>Thermal Conductivity.</b> Smoothed values, in 10<sup>-3</sup>cal./cm.sec.deg.C. Temperature °C. 0 50 100 150 200 250 300 350 400</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Single crystals</th> <th>0</th> <th>50</th> <th>100</th> <th>150</th> <th>200</th> <th>250</th> <th>300</th> <th>350</th> <th>400</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Quartz, parallel</td> <td>27.3</td> <td>22.4</td> <td>19.0</td> <td>16.8</td> <td>15.1</td> <td>13.6</td> <td>12.3</td> <td>11.3</td> <td>(10.3)</td> </tr> <tr> <td>perpendicular</td> <td>16.3</td> <td>13.5</td> <td>11.8</td> <td>10.6</td> <td>9.7</td> <td>8.9</td> <td>8.4</td> <td>7.9</td> <td>(7.4)</td> </tr> <tr> <td>Calcite, parallel</td> <td>9.56</td> <td>8.12</td> <td>7.15</td> <td>6.53</td> <td>6.10</td> <td>5.78</td> <td>5.47</td> <td>5.26</td> <td>5.08</td> </tr> <tr> <td>perpendicular</td> <td>8.30</td> <td>7.17</td> <td>6.50</td> <td>6.03</td> <td>5.66</td> <td>5.38</td> <td>5.16</td> <td>5.00</td> <td>4.92</td> </tr> <tr> <td>Halite</td> <td>14.6</td> <td>12.0</td> <td>10.05</td> <td>8.58</td> <td>7.45</td> <td>6.60</td> <td>5.95</td> <td>5.50</td> <td>4.98</td> </tr> </tbody> </table>	Single crystals	0	50	100	150	200	250	300	350	400	Quartz, parallel	27.3	22.4	19.0	16.8	15.1	13.6	12.3	11.3	(10.3)	perpendicular	16.3	13.5	11.8	10.6	9.7	8.9	8.4	7.9	(7.4)	Calcite, parallel	9.56	8.12	7.15	6.53	6.10	5.78	5.47	5.26	5.08	perpendicular	8.30	7.17	6.50	6.03	5.66	5.38	5.16	5.00	4.92	Halite	14.6	12.0	10.05	8.58	7.45	6.60	5.95	5.50	4.98	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X [°C]</th> <th>Y 10<sup>-3</sup>cal cm<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> / [W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>14,6 [6,1]</td></tr> <tr><td>50</td><td>12,0 [5,0]</td></tr> <tr><td>100</td><td>10,05 [4,2]</td></tr> <tr><td>150</td><td>8,58 [3,6]</td></tr> <tr><td>200</td><td>7,45 [3,1]</td></tr> <tr><td>250</td><td>6,60 [2,8]</td></tr> <tr><td>300</td><td>5,95 [2,5]</td></tr> <tr><td>350</td><td>5,50 [2,3]</td></tr> <tr><td>400</td><td>4,98 [2,1]</td></tr> </tbody> </table>	X [°C]	Y 10 <sup>-3</sup> cal cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> / [W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]	0	14,6 [6,1]	50	12,0 [5,0]	100	10,05 [4,2]	150	8,58 [3,6]	200	7,45 [3,1]	250	6,60 [2,8]	300	5,95 [2,5]	350	5,50 [2,3]	400	4,98 [2,1]	$\lambda = \frac{\lambda_0}{(1 + C \cdot T)}$ <p>mit</p> <p>λ = Wärmeleitfähigkeit [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]</p> <p>λ<sub>0</sub> = Wärmeleitfähigkeit bei 0°C [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]</p> <p>C = 0,0045</p> <p>λ<sub>0</sub> = 6,1</p> <p>T = °C</p>	<p>Tabellenwerte aus /BIR40/ (Werte der Ausgleichskurve)</p> <p>Funktion aus /CER82/ mit Kennwerten nach /BIR40/</p>
Single crystals	0	50	100	150	200	250	300	350	400																																																																										
Quartz, parallel	27.3	22.4	19.0	16.8	15.1	13.6	12.3	11.3	(10.3)																																																																										
perpendicular	16.3	13.5	11.8	10.6	9.7	8.9	8.4	7.9	(7.4)																																																																										
Calcite, parallel	9.56	8.12	7.15	6.53	6.10	5.78	5.47	5.26	5.08																																																																										
perpendicular	8.30	7.17	6.50	6.03	5.66	5.38	5.16	5.00	4.92																																																																										
Halite	14.6	12.0	10.05	8.58	7.45	6.60	5.95	5.50	4.98																																																																										
X [°C]	Y 10 <sup>-3</sup> cal cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> / [W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]																																																																																		
0	14,6 [6,1]																																																																																		
50	12,0 [5,0]																																																																																		
100	10,05 [4,2]																																																																																		
150	8,58 [3,6]																																																																																		
200	7,45 [3,1]																																																																																		
250	6,60 [2,8]																																																																																		
300	5,95 [2,5]																																																																																		
350	5,50 [2,3]																																																																																		
400	4,98 [2,1]																																																																																		

<i>Numerische Modellierung</i>			
Constitutive model <small>frmCategory_ConstitutiveModel</small>	Code <small>frmCode</small>	Funktion <small>frmFunktion</small>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

Parameter <i>frmdata</i>	VIRTUS: Wärmeleitfähigkeit		
Material <i>frmd_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Spezifikation <i>frmdata</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Kalisalz	Gorleben		undifferenziert
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
0,6 (0°C-160°C); konservativer Wert	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>	λ	
Zitat; Symbol <i>frmdReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Für die gering mächtigen Kaliflöze und Übergangsschichten ergeben sich im Vergleich zum Steinsalz deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten. Die niedrigsten Wärmeleitfähigkeiten liegen bei 0,6 W/m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> und sind als konservativer Wert für numerische Berechnungen zu betrachten. Da es sich bei diesen Gesteinen jedoch um petrographisch sehr variable Schichtglieder handelt, ist die Angabe einer Wärmeleitfähigkeit sehr stark von der Lokation, d.h. der mineralogischen Zusammensetzung abhängig. Ein allgemein gültiger Wert kann demnach nicht angegeben werden.		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz

<i>Numerische Modellierung</i>			
Constitutive model <small>frmCategory_ConstitutiveModel</small>	Code <small>frmCode</small>	Funktion <small>frmFunktion</small>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

<b>Parameter</b> <i>frmdata</i>	<b>VIRTUS: Wärmeleitfähigkeit</b>														
<b>Material</b> <i>frm_x-site</i>	<b>Standort</b> <i>site</i>	<b>Spezifikation</b> <i>frmdata</i>	<b>Stratigrafie, Symbol</b> <i>stratigraphy</i>												
Salzton	Gorleben		undifferenziert												
<b>Wert</b> <i>frmdata</i>	<b>Einheit</b> <i>functionparameter</i>	<b>Symbol</b> <i>functionparameter</i>	<b>Bemerkung</b>												
3,0 – 2,19 (0°C – 160°C)	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>	λ													
<b>Zitat; Symbol</b> <i>frmReference</i>	<b>Literatur</b> <i>citation</i>														
/SNI84/															
<b>Beschreibung</b> <i>frmdata ;description</i>															
<b>Anmerkungen</b> <i>frmdata; InternalRemark</i>	Für Für Salzton, d.h. den Grauen Salzton der Leine-Folge (z3GT) finden sich nur in /SNI84/ Messwerte, jedoch wurde nur eine geringe Anzahl an Proben gemessen. Da die Messwerte nach /SNI84/ im Streubereich der in der Literatur vorhanden Messwerte für Salzton liegen, wird vorgeschlagen die in /SNI84/ aufgeführte Beziehung vorerst als Wärmeleitfähigkeitswerte für Salzton zu verwenden.														
<b>Grafik; Screenshot</b>	<b>Tabellenwerte</b> <i>curvedata</i>	<b>Formel / Gleichung</b> <i>equation</i>	<b>Beziehung/Gesetz</b>												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X [°C]</th> <th>Y W m<sup>-1</sup> °K<sup>-1</sup></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>3,0</td></tr> <tr><td>50</td><td>2,69</td></tr> <tr><td>100</td><td>2,44</td></tr> <tr><td>150</td><td>2,23</td></tr> <tr><td>160</td><td>2,19</td></tr> </tbody> </table>	X [°C]	Y W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>	0	3,0	50	2,69	100	2,44	150	2,23	160	2,19	$\lambda = \frac{\lambda_0}{(1 + C \cdot T)}$ <p>mit</p> <p>λ = Wärmeleitfähigkeit [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]</p> <p>λ<sub>0</sub> = Wärmeleitfähigkeit bei 0°C [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]</p> <p>C = 0,0023</p> <p>λ<sub>0</sub> = 3,0</p> <p>T = °C</p>	Funktion aus /SNI84/ mit Kennwerten nach Koppitz, unveröffentlicht
X [°C]	Y W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>														
0	3,0														
50	2,69														
100	2,44														
150	2,23														
160	2,19														
<b>Numerische Modellierung</b>															
<b>Constitutive model</b> <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	<b>Code</b> <i>frmCode</i>	<b>Funktion</b> <i>frmFunktion</i>													
...															
...wird vom Expertengremium durchgeführt															
<b>Bewertung</b>															
<b>dataquality</b>															
<b>datasource</b>															

### 3.2 Begründung

#### 3.2.1 Einleitung

Die hier vorgestellten Werte zur Wärmeleitfähigkeit der Evaporite stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS gesichteten und ausgewerteten Literatur dar.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist eine Stoffkonstante und beschreibt die Wärmemenge, die in einer Sekunde durch den Querschnitt von  $1 \text{ cm}^2$  einer  $1 \text{ cm}$  dicken Platte fließt, wenn an beiden Enden eine Temperaturdifferenz von  $1^\circ\text{C}$  besteht. Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit hat die Form:

$$\lambda = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1} = 86,4 \text{ KJ} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1} = 20,635 \text{ Kcal} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$$

#### 3.2.2 Auswertung

Für die Wärmeleitfähigkeit von Evaporiten finden sich in der Literatur eine Reihe von Messwerten und Funktionen. In /GEV81/ findet sich eine Zusammenstellung von Messwerten zur Wärmeleitfähigkeit, die in den USA im Rahmen endlagerrelevanter Fragestellungen erhoben wurden. Je nach Temperaturregion sind Unterschiede um 4 Größenordnungen zu sehen (Abbildung 1). Die Unterschiede in einer Temperaturregion sind laut /GEV81/ abhängig von dem Grad der Gitterfehlstellen, der unterschiedlichen Probenbehandlung vor Messbeginn und der Art und Menge von Verunreinigungen in der Probe (Abbildung 1). Des Weiteren fällt auf, dass bei über 100 Kelvin der Einfluss der Verunreinigungen auf die Wärmeleitfähigkeit in den Hintergrund tritt /GEV81/. Bei den in (Abbildung 1) aufgeführten Gruppen interessiert insbesondere Gruppe 1, bei der es sich um Steinsalz mit einem hohen Reinheitsgrad handelt. Basierend auf den Messwerten der Gruppe 1 wurden für Temperaturen über 100 Kelvin von /GEV81/ die in Abbildung 1 aufgeführten Wärmeleitfähigkeiten für Steinsalz vorgeschlagen.

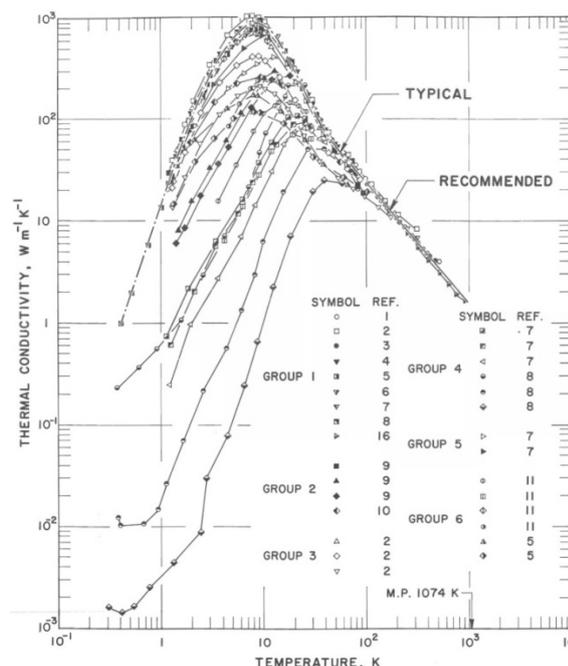


Abbildung 1: Wärmeleitfähigkeiten von Steinsalz in Abhängigkeit der Temperatur (Gruppe 1 – hoher Reinheitsgrad, Gruppe 2 – „annealed rock salt“, Gruppe 3 und 4 – unterschiedliche An-

teile an Na und NaOH, Gruppe 5 – „melted, treated with Cl<sub>2</sub> and recrystallized“, Gruppe 6 – Verunreinigungen unbekannt) aus /GEV81/.

[Temperature, T,K; Thermal Conductivity, k, Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]

T	k	T	k
0.4	0.95	25	191
0.5	1.78	30	130
0.6	3.13	40	75.0
0.7	4.97	50	54.0
0.8	7.40	75	34.9
0.9	10.0	100	24.3
1	14.0	150	15.0
2	99.3	200	10.9
3	270	250	8.24
4	443	293	6.65
5	595	300	6.57
6	735	400	4.80
7	820	500	3.67
8	880	600	2.98
9	870	700	2.47
10	836	800	2.08
15	502	900	1.85
20	306	1000	1.67

\*Those below 100 K are typical values.

**Abbildung 2: Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz in Abhängigkeit der Temperatur. Für Temperaturen über 100 K werden die aufgeführten Werte für Steinsalz vorgeschlagen. Als Grundlage dient die Gruppe 1 in Abbildung 1 /GEV81/.**

Häufig zitiert wird auch die Arbeit von /BIR40/. /BIR40/ führte umfangreiche Labormessungen an einer Reihe von eruptiven, sedimentären und metamorphen Gesteinen durch. Bei dem untersuchten natürlichen Steinsalz handelte es sich um einen klaren, zwei Zoll großen Würfel mit äußerst geringen Verunreinigungen. Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten sowie eine Ausgleichskurve sind in einem Diagramm gegen die Temperatur aufgetragen (Abbildung 3). Die Werte gelten im Temperaturbereich zwischen 0-400°C.

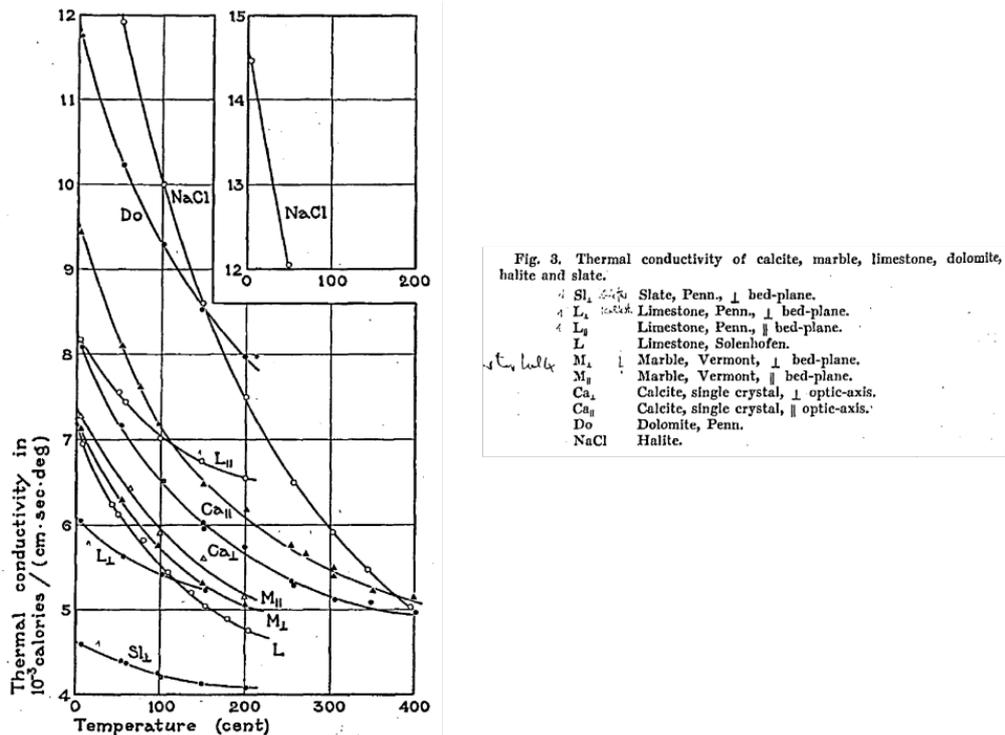


Abbildung 3: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Gesteinstypen /BIR40/. Aufgetragen sind die Messwerte als Punkte sowie eine Ausgleichskurve durch die Punkte.

Zusätzlich sind die Stützstellen der Ausgleichskurve für 50°C Intervalle in tabellarischer Form aufgetragen (Abbildung 4). Als Einheit ist  $[10^{-3} \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}]$  angegeben (Umrechnung durch  $0,41868 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). Sowohl die Gleichung der Ausgleichskurve als auch explizite Zahlenwerte der Wärmeleitfähigkeit sind in der vorliegenden Arbeit nicht aufgeführt.

Temperature °C.	Thermal Conductivity,								
	Smoothed values, in $10^{-3} \text{ cal./cm.sec.deg.C.}$								
	0	50	100	150	200	250	300	350	400
<i>Single crystals</i>									
Quartz,									
parallel	27.3	22.4	19.0	16.8	15.1	13.6	12.3	11.3	(10.3)
perpendicular	16.3	13.5	11.8	10.6	9.7	8.9	8.4	7.9	(7.4)
Calcite,									
parallel	9.56	8.12	7.15	6.53	6.10	5.73	5.47	5.26	5.08
perpendicular	8.30	7.17	6.50	6.03	5.66	5.38	5.16	5.00	4.92
Halite	14.6	12.0	10.05	8.58	7.45	6.60	5.95	5.50	4.98

Abbildung 4: Aus den Ausgleichskurven bestimmte Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Temperaturniveaus /BIR40/.

Für Deutschland sind im Hinblick auf endlagerrelevante Fragestellungen vorwiegend Wärmeleitfähigkeitsmessungen durch die BGR zu nennen. Im Folgenden soll versucht werden anhand der vorliegenden Datenbasis einen Überblick über die Wärmeleitfähigkeiten wesentlicher salinärer Schichtfolgen des Standortes Gorleben zu schaffen. Die Darstellung richtet sich sowohl nach der

Verdunstungsabfolge der Evaporite in Carbonate (Kalksteine und Dolomite), Sulfate (Gips, Anhydrit, Kieserit, Polyhalit), Steinsalz (NaCl) und Kali-/Magnesiumsalze (Carnallit, Sylvinit) als auch nach der Stratigraphie (sofern angegeben).

### Steinsalz

Erste Arbeiten sind diesbezüglich durch /KOP85b,KOP78/ durchgeführt wurden. /KOP78/ führte an Asse-Salzgesteinen mit unterschiedlichen Gesteinsgefüge zahlreiche Labormessungen statt. Die Messungen variieren für die unterschiedlichen Gefüge um 20 % im Temperaturbereich zwischen 30-350°C und sind nach /KOP85b/ in guter Übereinstimmung zu den Werten von /BIR40/. Exemplarisch zeigt Abbildung 5 Messwerte für zwei untersuchte Salzgesteine, die sich deutlich im Gesteinsgefüge unterscheiden. Bei der einen Probe handelt es sich um einen klaren, natürlichen Einkristall. Die andere Probe besteht aus polykristallinen Aggregaten, die deutlich mit Mikrorissen durchsetzt ist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Gesteinsgefüge als auch vorhandene Mikrorisse (durch z.B. die Probenahme) wenig Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeiten haben, so dass eine Übertragbarkeit vom Labor nach unter Tage zulässig ist /KOP85b/. Zu beachten ist, dass die Aussagen nur für reines Steinsalz gültig sind; Verunreinigungen machen sich in der Regel durch eine Erniedrigung der Wärmeleitfähigkeit bemerkbar.

Um die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu beschreiben, gibt /KOP85b/ nach /CER82/ folgende für Gesteine allgemein übliche Gleichung an:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{(1 + C \cdot T)}$$

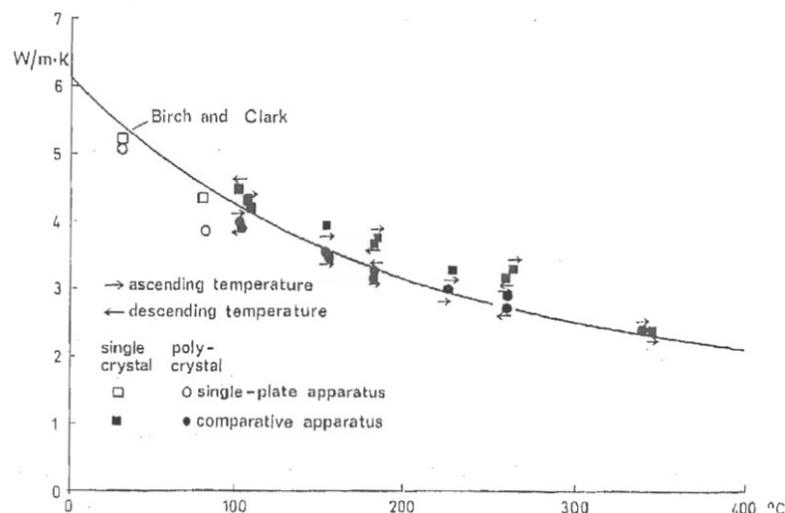


Abbildung 5: Labormessungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten von Asse-Steinsalz mit unterschiedlichen Gesteinsgefüge /KOP85b/.

Die Konstante C ist für Steinsalz mit 0,0045 anzunehmen /KOP85b/, während  $\lambda_0 = 6,1 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$  die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz bei 0°C ist /BIR40/. T ist in Kelvin anzugeben. In zahlreichen Literaturstellen wird auch folgende Form genannt /LAN86,LAN86a,WAL86a,WAL87/:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{(C \cdot T) - 0,229}$$

Beide Gleichungen unterscheiden sich jedoch erst deutlich im Nachkommastellenbereich. In weiteren Untersuchungen hat /KOP85b/ an einigen Salzgesteinen aus dem Salzstock Gorleben (Bohrung Go 1003) Laboruntersuchungen durchgeführt. Eine detaillierte stratigraphische Zuordnung (undifferenziert für Staßfurt- und Leine-Folge) fehlt; nach /KOP85b/ können die Proben als repräsentativ für die wichtigsten Schichten des Salzstockes angesehen werden. Es handelt sich um reines Steinsalz mit geringem Anhydritanteil. Nach Angaben von /KOP85b/ liegen die Ergebnisse des untersuchten Staßfurt Steinsalzes (z2) und des Leine Steinsalzes (z3) nur geringfügig unter den Ergebnissen zur Wärmeleitfähigkeiten am Asse-Steinsalz.

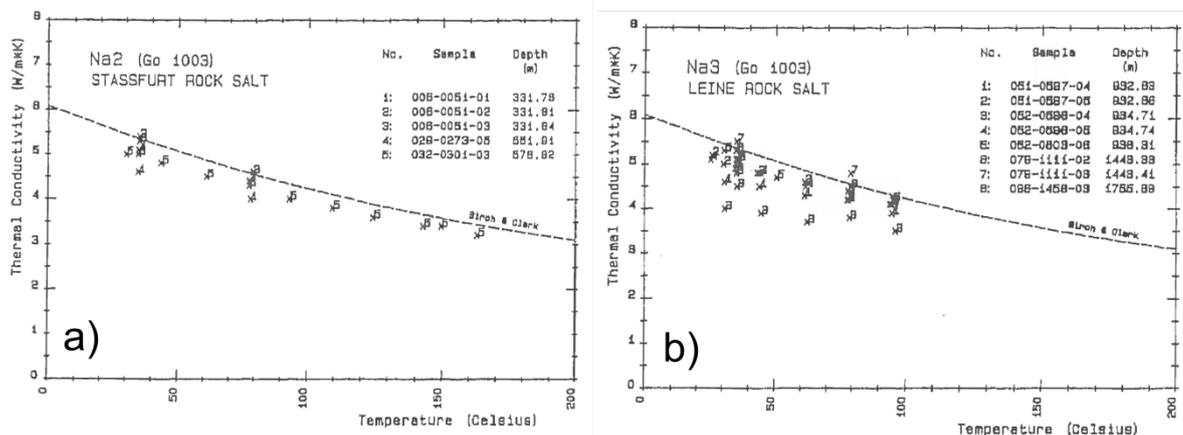


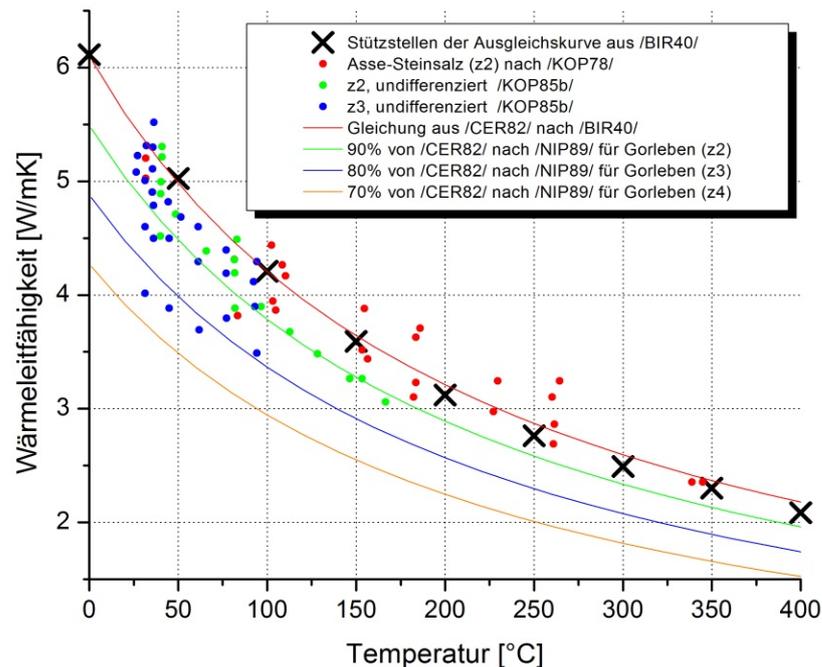
Abbildung 6: Gemessene temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten für Gorleben a) Na2 (z2,Staßfurt-Folge) und b) Na3 (z3,Leine-Folge) /KOP85b/.

Aus diesem Grund hält es /KOP85b/ für unnötig, zusätzlich zu den Werten von /BIR40/ weitere Beziehungen zur Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur anzugeben. Zudem sind die Werte von /BIR40/ bereits in einer Reihe von Modellierungen zum Einsatz gekommen /KOP85b/. In einigen Literaturstellen finden sich in diesem Zeitraum jedoch Hinweise, die eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit für Steinsalz aus dem Salzstock Gorleben vorsehen. In z.B. /NIP89/ werden für Berechnungen (Gorleben) für das Staßfurt-Steinsalz 90%, für das Leine-Steinsalz 80% und für das Aller-Steinsalz 70% der Wärmeleitfähigkeit nach obiger Formel angesetzt. Entsprechende Werte sind für bestimmte Temperaturniveaus in Tabellenform aufgeführt (Abbildung 7).

Schicht	Temperatur T (Kelvin)				
	280.0	310.0	350.0	400.0	480.0
<b>Staßfurt-Steinsalz:</b> -----					
Wärmeleitfähigkeit:	5.32	4.70	4.08	3.49	2.84
Spez. Wärmekapazität:	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
<b>Leine-Steinsalz:</b> -----					
Wärmeleitfähigkeit:	4.73	4.18	3.62	3.10	2.53
Spez. Wärmekapazität:	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
<b>Aller-Steinsalz:</b> -----					
Wärmeleitfähigkeit:	4.14	3.65	3.17	2.72	2.21
Spez. Wärmekapazität:	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0

**Abbildung 7: Thermische Materialeigenschaften des Steinsalzes im Salzstock Gorleben /NIP89/. Wärmeleitfähigkeit ist in  $W m^{-1} K^{-1}$  angegeben.**

Eine zusammenfassende graphische Darstellung der Werte von /BIR40/ und /KOP78/KOP85b/ findet sich in Abbildung 8. Zusätzlich sind die entsprechenden Funktionen nach /CER82/ sowie die Verringerung der Wärmeleitfähigkeiten für Staßfurt Steinsalz nach /NIP89/ aufgetragen. Anzumerken ist hierbei, dass die Werte zumindest für die Leine-Folge (z3) und die Aller-Folge (z4) mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. Für die Leine-Folge wurden nach Abbildung 8 nur Messwerte bis zu einer Temperatur von 100°C erhoben. Für die Aller-Folge (z4) hat /NIP89/ eine Verringerung auf 70% vorgeschlagen. Entsprechende Werte sind in /KOP85b/ jedoch nicht aufgeführt (Datenbasis?). Ferner schwanken die Messwerte im angegebenen Temperaturniveau deutlich; insbesondere die Wärmeleitfähigkeiten der Leine-Folge. Aufgrund der im Vergleich zur Streuung geringen Probenzahl, lässt sich ein allgemeiner Trend nicht erkennen. Die von /NIP89/ vorgenommene Verringerung der Wärmeleitfähigkeiten für Gorleben im Vergleich zur Asse Steinsalz /KOP78/ erscheint aufgrund dieser Datenlage daher fraglich.



**Abbildung 8:** Wärmeleitfähigkeiten für Steinsalz nach /BIR40/ sowie von /KOP78,KOP85b/ für Asse- und Gorleben-Steinsalz. Zusätzlich sind die Funktionen nach /CER82/ sowie die Verringerung für Gorleben-Steinsalz nach /NIP89/ dargestellt.

Weitere Messwerte zur Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz finden sich in den Arbeiten von /KOP95/ und /EIS03/. Die Messwerte aus /KOP95/ stammen von Proben von Bohrkernen der Tiefbohrung GO1003 des Salzstockes Gorleben. Als Messapparatur kam eine sog. Nadelsondenmeßeinrichtung zum Einsatz. Das Verfahren erlaubt die Durchführung von Wärmeleitfähigkeitsmessungen unmittelbar an Bohrkernen, jedoch mit der Einschränkung, dass aufgrund der begrenzten Eindringtiefe nur die Eigenschaften im Bereich der Messsonde erfasst werden /KOP95/. Außerdem kann die Wärmeleitfähigkeit nur für einen bestimmten Temperaturpunkt (hier 35°C) erfasst werden. Die Proben wurden den wesentlichen Schichtfolgen des Salzstockes Gorleben stratigraphisch zugeordnet und tabellarisch aufgelistet (Abb. 9).

Stratigraph. Zuordnung	z2UE (Na2)	z2HS3 (Na2)	z3BS (Na3)	z3BK/BD (Na3)	z3OSO (Na3)	z3HA (A3)	z3GT (A3 T3)	z2SF (K2)	z3BE (K3)
	4,97	5,73	5,66	4,98	4,60	5,26	2,10	1,57	3,37
	5,09	5,33	5,28	5,00	3,93	4,52	3,20	1,36	0,81
	4,50	5,32	5,00	5,17	4,48	5,40	3,10	2,82	1,59
	5,96		5,10	5,23	5,18	5,49		2,70	0,86
	5,29		4,50	4,92	5,24	5,27		1,09	0,67
	5,11		5,10			4,66		3,30	0,78
	4,91		5,30			4,80			
			5,28			5,10			
			5,52			4,80			
			4,77			4,90			
						5,43			
						5,50			
						5,44			
Mittelwert	5,12	5,46	5,15	5,06	4,72	5,12	2,80	2,14	1,30
Maximalwert	5,96	5,73	5,66	5,00	5,24	5,50	3,20	3,30	3,37
Minimalwert	4,50	5,32	4,50	4,92	3,93	4,52	2,10	1,09	0,67
Stand.abw.	0,41	0,19	0,32	0,12	0,45	0,33	0,61	0,91	0,89

**Abbildung 9: Gemessene Wärmeleitfähigkeiten für wesentliche Schichtfolgen des Salzstockes Gorleben nach /KOP95/**

Weitere Messungen fanden im Zeitraum von 1996 bis 2000 statt. Entsprechende Messwerte sind in /EIS03/ gelistet. Es handelt sich um Laboruntersuchungen zur Bestimmung thermophysikalischer und elektrischer Gesteinsparameter begleitend zu den Erkundungsarbeiten am Standort Gorleben. Die Gesteinsproben wurden beim Niederbringen von Erkundungsbohrungen oder beim Vortrieb der Schächte und Strecken entnommen /EIS03/. Die Messungen wurden in unterschiedlichen Laboratorien (Labor BGR und Labor GeoTec) durchgeführt, um hinsichtlich ihrer Belastbarkeit eine Vielfältigkeit der Messungen zu erzielen. Das Vorgehen und die einzelnen Apparaturen sind ausführlich in /EIS03/ beschrieben. Es finden sich sowohl Einzelmesswerte, die unter einer konstanten Temperatur von 20°C gemessen wurden als auch Messwerte, die temperaturabhängig im Bereich von 0°C bis 200°C bestimmt wurden. Zusätzlich findet sich zu jeder Probenmessung eine kurze petrographische Beschreibung und eine detaillierte stratigraphische Zuordnung.

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeiten aus /KOP78,KOP85a,KOP95,EIS03/ für das Staßfurt-Steinsalz zusammengefasst graphisch dargestellt. Es zeigt sich, dass die Wärmeleitfähigkeitskurve aus /CER82/ nach /BIR40/ in erster Näherung als Ausgleichskurve für das Staßfurt-Steinsalz angesehen werden kann.

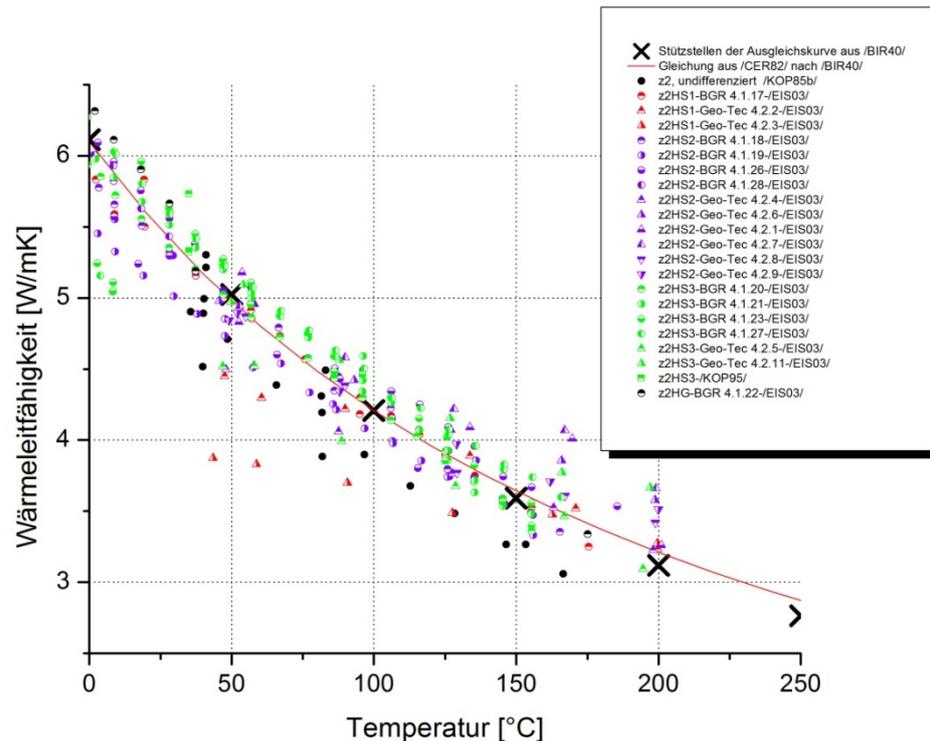


Abbildung 10: Wärmeleitfähigkeiten für die Staßfurt- Folge des Salzstockes Gorleben.

Analog dazu sind in Abbildung 11 die Wärmeleitfähigkeiten aus /KOP78,KOP85a,KOP95,EIS03/ für das Leine-Steinsalz zusammengefasst. Wie bereits in Abbildung 8 gezeigt, schwanken die Wärmeleitfähigkeiten der Leine-Folge tendenziell stärker. Gründe könnten hierfür im unterschiedlichen Aufbau der Folgen zu suchen sein. So finden sich homogene, zusammenhängende Steinsalzbereich vorwiegend innerhalb der Staßfurt-Folge (z2), die im Durchschnitt aus ca. 95 % Halit und 5 % Anhydrit besteht. Die Leine- und Aller-Folge (z3, z4) sind dagegen durch häufigere Wechsel im Stoffbestand gekennzeichnet /JAR93/.

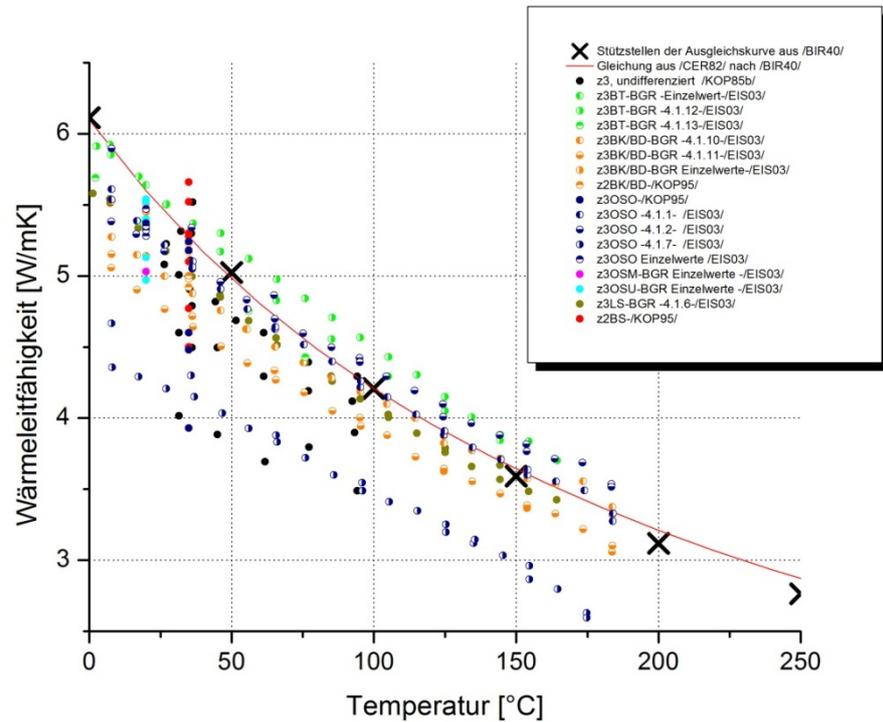
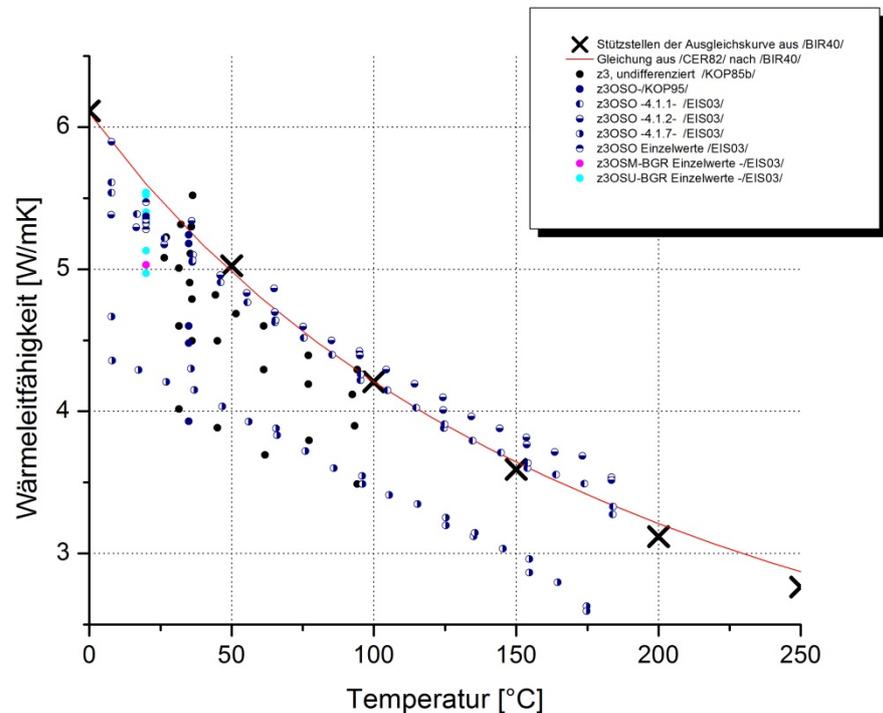


Abbildung 11: Wärmeleitfähigkeiten für die Leine-Folge (z3) des Salzstockes Gorleben.

Im Folgenden soll versucht werden, mit Hilfe der vorhandenen petrographischen Beschreibungen die Unterschiede in den Wärmeleitfähigkeiten zu ergründen. Dazu wurden die stratigraphischen Schichten mit einer hohen Schwankungsbreite (z3OSU, z3OSM, z3OSO) im Detail untersucht.



**Abbildung 12: Wärmeleitfähigkeiten für ausgewählte Schichten der Leine-Folge (z3) des Salzstockes Gorleben.**

Die von /KOP85b/ durchgeführten Messungen an nicht weiter differenzierten Leine-Folge Proben zeigen bereits eine deutliche Schwankungsbreite (Abbildung 12). Die von /KOP95/ durchgeführten Einzelmesswerte für das Obere Orangesalz (z3OSO) spiegeln diese Schwankungsbreite erneut wieder. Auch in den Messwerten von /EIS03/ sind deutliche Unterschiede in den Wärmeleitfähigkeiten festzustellen (auch wenn hier nur drei Proben untersucht wurden). Da in /EIS03/ eine petrographische Beschreibung vorgenommen wurde, kann ein Bezug zum Mineralbestand hergestellt werden. Die Auswertung zeigt, dass die Proben mit den höheren Wärmeleitfähigkeiten (4.1.2 und 4.1.1) ausschließlich halithaltigen, massig bis schwach körnigem, glasigen Steinsalz durchgeführt wurden. Die Probe mit der geringeren Wärmeleitfähigkeit (4.1.7) ist hingegen durch einzelne eingeschaltete Lagen Karbonatgestein gekennzeichnet. Die weiteren in /EIS03/ untersuchten Schichten zeigen Wärmeleitfähigkeiten, die sich zufriedenstellend durch die Ausgleichskurve von /BIR40/ beschreiben lassen. Die petrographische Beschreibung aus /EIS03/ zeigt, dass es sich ausnahmslos um Steinsalz handelt. Dementsprechend kann geschlussfolgert werden, dass die Wärmeleitfähigkeit von Schichten der Leine-Folge, bestehend aus reinem Steinsalz, durch die Beziehung von /BIR40/ beschrieben werden kann. Da es sich bei der Leine-Folge aber um eine recht inhomogene Schichtabfolge (im Vergleich zur Staßfurt-Folge) handelt, können vorhandene Unterschiede im Mineralbestand einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben.

**Polynomansätze für Steinsalz**

Neben der bekannten Funktion von /CER82/ (nach Ergebnissen von /BIR40/) finden sich weitere funktionelle Ansätze, die häufig durch einen Polynomansatz beschrieben sind. Sofern angegeben, ist als Quelle ausnahmslos /BIR40/ sowie /KOP78, KOP85a/ genannt. Ein häufig verwendeter Polynomansatz geht auf /SCH71/ zurück:

$$\lambda = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3$$

$$a_0 = 5,734; a_1 = -1,838 \cdot 10^{-2}; a_2 = 2,86 \cdot 10^{-5}; a_3 = -1,51 \cdot 10^{-8}$$

/SCH71/ nennt selber als Quelle der Anpassung die Arbeit von /BIR40/. Der Ansatz soll nach /SCH71/ im Temperaturbereich von 0°C bis 800°C gelten (/BIR40/ gibt aber nur Werte bis 400°C an). Der Parameter T ist hier in °C anzugeben. Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit ist  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

Daneben gibt es eine Reihe weiterer Ansätze, wobei die Herkunft oftmals unbekannt ist bzw. sich die Quelle in älteren Literaturstellen verläuft. Nachstehend sind die Ansätze mit den jeweiligen Quellen in Tabellenform zusammengefasst. Zusätzlich sind einige Anmerkungen zu den Ansätzen aufgeführt.

Tabelle 1: Polynomansätze zur Beschreibung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit.

	a0	a1	a2	a3	T	Quelle
0	5,734	$-1,838 \cdot 10^{-2}$	$2,86 \cdot 10^{-5}$	$-1,51 \cdot 10^{-8}$	Celsius (0-800°C)	BEC04; BEC99a; ROT92, FED86; KAM03; PLO79; ROT80; SCH71;
1	13,196	$-3,7384 \cdot 10^{-2}$	$4,0974 \cdot 10^{-5}$	$-1,51 \cdot 10^{-8}$	Kelvin	ROT04; BEC99a
2	5,4889	$-0,86503 \cdot 10^{-2}$	$-0,33298 \cdot 10^{-4}$	$-0,10914 \cdot 10^{-6}$	Celsius (30°-250°C)	ROT92; ROT88
3	6,109	$-2,5148 \cdot 10^{-2}$	$-7,153 \cdot 10^{-5}$	$-8,29 \cdot 10^{-8}$	Celsius	DEL79; LAN80a; ALB80b;
4	6,138	$-2,2248 \cdot 10^{-2}$	$3,627 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-9}$	Celsius (40-200°C)	BEC04; KRO09

(1) Wird in /ROT04/ aufgeführt, als Quelle wird /BEC99a/ genannt. In /BEC99a/ (BAMBUS I) wird der Ansatz bei den Berechnungen der NRG (Nuclear Research and Consultancy Group, NL) erwähnt. Darin steht, dass die Parameter dem NRG DEBORA Modellen entstammen. In dem vorliegenden DEBORA Bericht /ROT95/ ist dieser Ansatz jedoch nicht aufgeführt. Da die berechneten Wärmeleitfähigkeiten identisch zu denen von /SCH71/ sind (bis zur zweiten Nachkommastelle), bildet /SCH71/ wahrscheinlich die Grundlage.

(2) Dieser Ansatz wird u.a. in /ROT92/ (The HAW-Project Bericht) bei Berechnungen der GSF-Ift (V.Graefe) und /ROT88/ (Brine Migration Test) erwähnt. In /ROT92/ wird als Quelle die Arbeit von /KOP78/ genannt.

(3) Ein weiterer Ansatz wird in /DEL79, LAN80a, ALB80b, WAL79a/ genutzt. Leider ist die Herkunft unbekannt.

(4) Dieser Ansatz wird in /BEC04/ (BAMBUS II) bei Berechnungen „TSDE“ durch die DBE benutzt. Der Ansatz taucht nochmal in /KRO09/ (REPOPERM I) auf. Leider wird keine Quelle genannt. In /KRO09/ sind Wärmeleitfähigkeiten zwischen 3,0 – 5,3 zu wählen, d.h. der Ansatz müsste für einen Temperaturbereich zwischen etwa 40°C-200°C gültig sein. Der Parameter T ist in °C anzugeben.

Um einen Überblick zu schaffen, sind die Ansätze zusätzlich zu den Punkten der Ausgleichskurve von /BIR40/ sowie zu der in /KOP85b/ angegebenen Funktion in Diagrammform aufgetragen (Abbildung 13). Daraus wird ersichtlich, dass alle Polynomansätze im Vergleich zur Ausgleichskurve von /BIR40/ eine meist zufriedenstellende Übereinstimmung liefern.

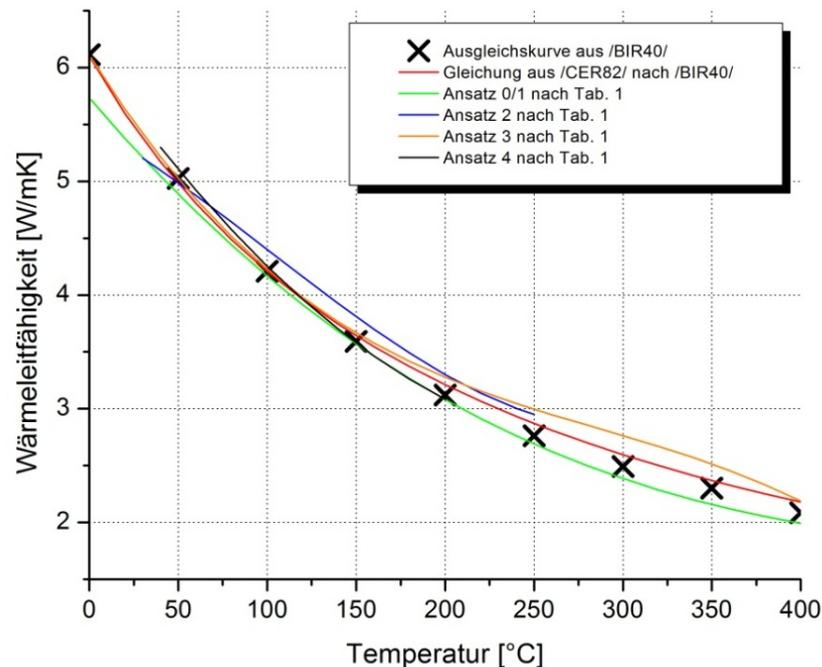


Abbildung 13: Darstellung der in der Literatur gesichteten Polynomansätze (Tabelle 1) im Vergleich zur Ausgleichskurve nach /BIR40/.

## Anhydrit

Für Anhydrite finden sich in der Literatur weitaus weniger Messwerte (Abbildung 14). /KOP85b/ führte Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Gorleben Hauptanhydrit z3HA durch. Die Messwerte differieren wenig von den ebenfalls durchgeführten Asse Steinsalz Proben, weshalb /KOP85b/ die allgemein gültige Beziehung nach /CER82/ mit Kennwerten nach /BIR40/ vorschlägt. Diese Beziehung gilt nach /KOP85b/ für Anhydrit im Temperaturbereich von 0°C-200°C. Weitere Messwerte finden sich in /KOP95/ und /EIS03/. Auch hier sollte die Wärmeleitfähigkeitskurve nach /CER82/ als brauchbare erste Näherung angesehen werden. Einzig die Probe 4.1.9. aus /EIS03/ zeigt deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten. Die Gründe sind in der unterschiedlichen petrographischen Zusammensetzung zu suchen; für die Probe sind Einschaltung flaseriger Lagen Karbonatgestein beschrieben. Eine weitere temperaturabhängige Beziehung für Anhydrit ist in /WAL87/ aufgeführt. Die Daten wurden im Rahmen eines Benchmark-Tests von der BGR und den Sandia National Laboratories genutzt. Eine Quelle der Kennwerte ist nicht angegeben. Insgesamt liegen die Wärmeleitfähigkeiten unterhalb der Messwerte nach /KOP85b/.

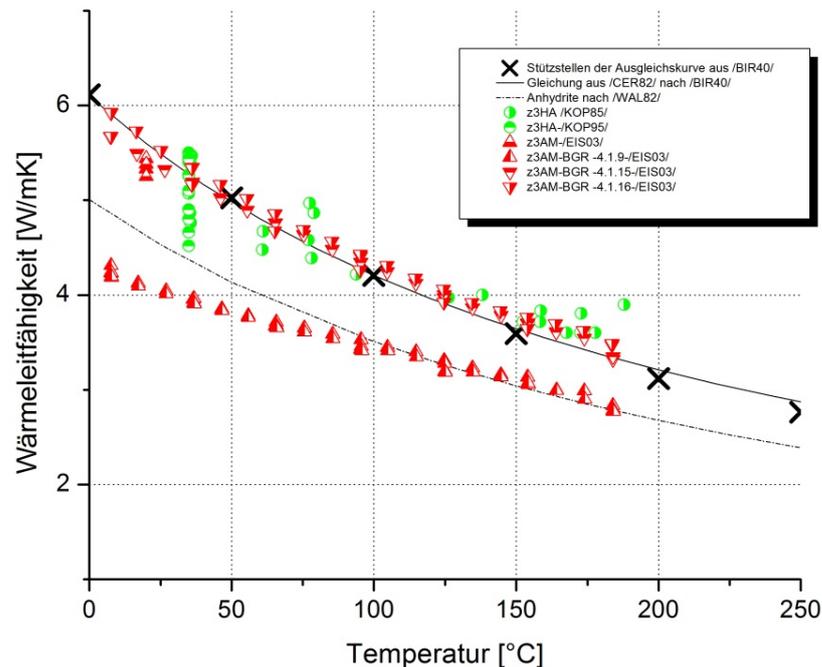


Abbildung 14: Wärmeleitfähigkeit für Anhydrit-Gestein des Salzstockes Gorleben.

### Kalisalze

Auch für die Kalisalze sind wesentlich weniger Literaturstellen für die Wärmeleitfähigkeit zu finden. Dem thermischen Verhalten von Carnallit kommt jedoch besondere Bedeutung zu, da es mit steigender Temperatur sein gebundenes Kristallwasser abgibt /FRE06/. Die temperaturabhängige Zersetzung hängt wesentlich vom Wasserdampfpartialdruck in den Poren ab, d.h. mit steigendem Gebirgsdruck verschiebt sich die Wasserabgabe zu höheren Temperaturen. Unverwitterter Carnallit, d.h. ein porenraumfreies System, kann bis zum Schmelzpunkt bei 167,5°C stabil sein /WIL83/.

Analog zu den Salzgesteinen finden sich Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Kalisalzen bei /KOP85b/. /KOP85b/ führte an Gorleben-Proben Wärmeleitfähigkeitsmessungen für Carnallit (z2SF, z2SF-z2UE sowie z3BE) durch. Bei den untersuchten Kaliflözen handelt es sich um mittel bis feinkörnigen Carnallit, bestehend aus Carnallit und Halit. Untergeordnet treten Anhydrit Partikel und kleinere Mengen an feinkörnigem Kieserit auf. Der Carnallitgehalt schwankt zwischen 18 – 80%. Insgesamt liegen die bestimmten Wärmeleitfähigkeiten für Carnallit deutlich unterhalb der Wärmeleitfähigkeiten für Salzgesteine hoher Reinheit (Abbildung 15). Ein Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit ist nicht zu beobachten. Eine scheinbare Erhöhung der Wärmeleitfähigkeiten durch den Dehydrationsprozess (Wärmefreisetzung durch den Umsetzungsprozess) ist erst ab Temperaturen von 160°C zu beobachten /KOP85b/. Für das untersuchte Kaliflöz z3BE liegen die meisten Werte unterhalb 1W/mK mit einem Minimum von 0,67 W/mK. Der Carnallitgehalt dieser Proben liegt zwischen 64-80%. Für das untersuchte Kaliflöz-Staßfurt (z2SF) wurden deutlich höhere Wärmeleitfähigkeiten gemessen, die zwischen 2-3,5 W/mK liegen.

Allerdings sind die Carnallitgehalte mit Werten zwischen 12-27% auch deutlich geringer. Der Einfluss des Carnallitgehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit ist insbesondere bei den Proben der kieseritischen Übergangsschichten bis Kaliflöz Staßfurt (z2UE-z2SF) deutlich zu erkennen. So zeigt die Probe mit den niedrigsten Carnallitgehalt (18%) Werte für die Wärmeleitfähigkeit die zwischen 3-3,5 W/mK liegen, während die Proben mit den höchsten Carnallitgehalt (51%) Werte bei 1W/mK zeigt. Eine generelle Ableitung zur Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Carnallitgehaltes ist jedoch nicht möglich.

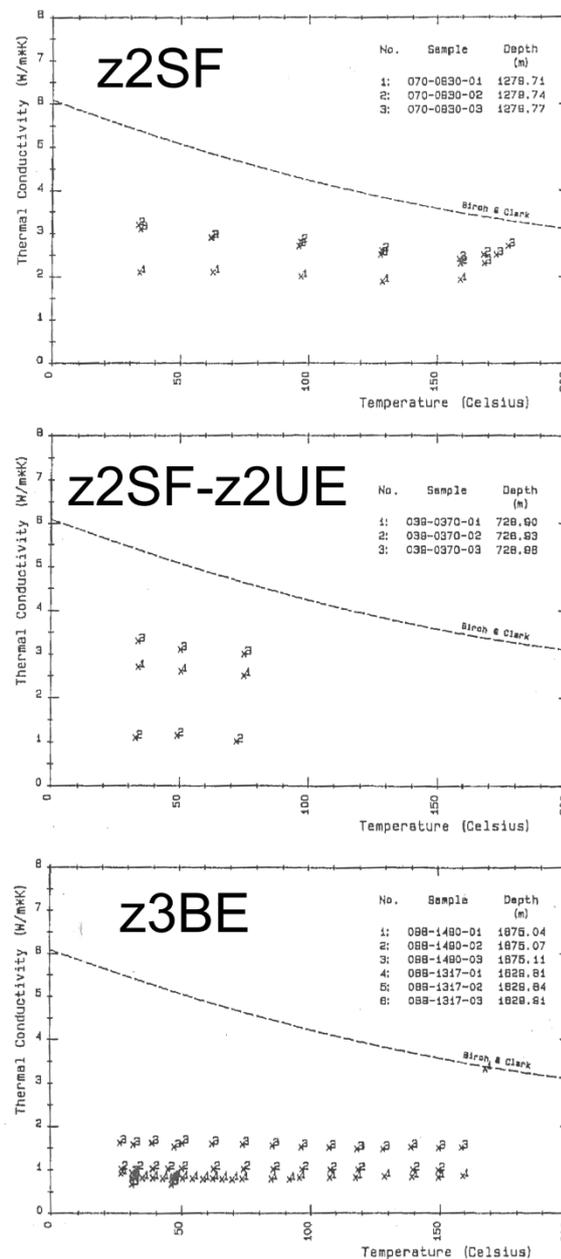


Abbildung 15: Wärmeleitfähigkeit für Carnallit-Gestein des Salzstockes Gorleben.

Weitere Wärmeleitfähigkeiten sind /EIS03/ zu entnehmen (Abbildung 16). Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit aufgrund unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung lassen sich hier insbesondere an Einzelmessungen des Kaliflözes Staßfurt (z2SF) zeigen. Im Steinsalzbereich der Kaliflözes (Halite/untergeordnet Carnallit/Kieserit) zeigen die Messungen Wärmeleitfähigkei-

ten, die vergleichbar zu Steinsalzproben sind und im Bereich der Wärmeleitfähigkeitskurve von /CER82/ nach /BIR40/ liegen. Mit zunehmendem Carnallitgehalt sinkt die Wärmeleitfähigkeit deutlich (Abbildung 16). Weitere Wärmeleitfähigkeiten (temperaturunabhängig) für Carnallitit sind /NIP89/ und /SNI84/ zu entnehmen. Als Quelle wird ausnahmslos /KOP85b/ zitiert, jedoch ist unklar, welche Werte als Berechnungsgrundlage für die angegebenen fixen, d.h. temperaturunabhängigen Werte dienen.

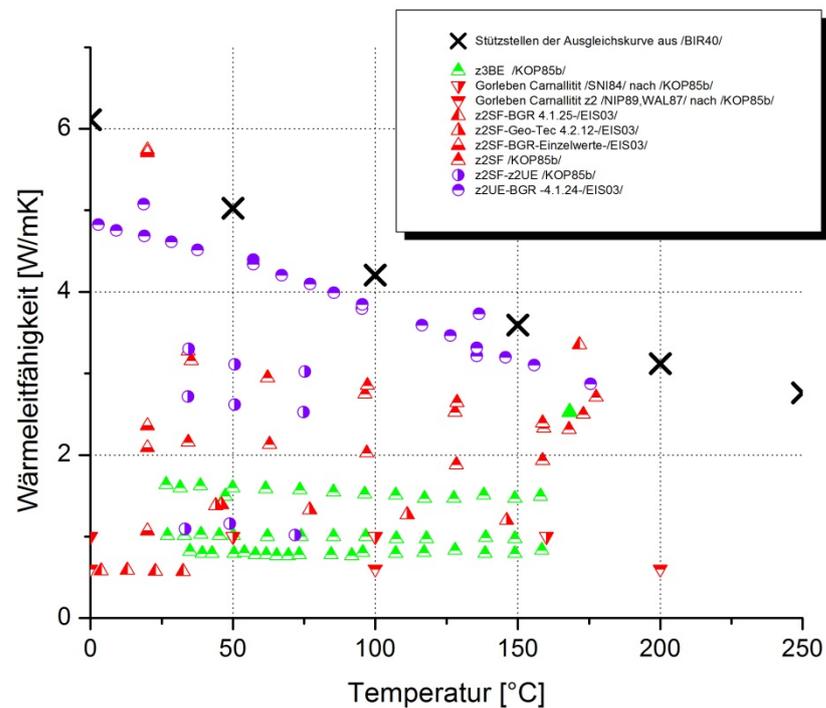


Abbildung 16: Wärmeleitfähigkeiten für Kaliflöze des Salzstockes Gorleben.

## Salzton

Für Salzton finden sich nur Werte für den Grauen Salzton der Leinefolge (z3GT) in /SNI84/. In /SNI84/ wird als Quelle eine unveröffentlichte Arbeit von Kopietz genannt („Temperaturfelderkundung Gorleben – Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben KWA 206000, BGR Archiv-Nr. 90035, 1981“). Insgesamt wurde nur eine geringe Probenzahl gemessen und nach /SNI84/ streuen die Werte stark, liegen jedoch im Streubereich der aus anderen Lokationen gemessenen Wärmeleitfähigkeit für Salzton. Ein Carnallitgehalt kann nach /SNI84/ für die geringeren Wärmeleitfähigkeit verantwortlich gemacht werden. Für den Grauen Salzton der Leinefolge wird in /SNI84/ die Beziehung aus /CER82/ mit veränderten Kennwerten genutzt (Abbildung 17). Die Konstante C ist für Salzton mit 0,0023 anzunehmen, während  $\lambda_0 = 3,0 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$  der Wärmeleitfähigkeit von Salzton bei  $0^\circ\text{C}$  entspricht /SNI84/. Die Beziehung gilt nach /SNI84/ im Temperaturbereich zwischen  $0$ - $160^\circ\text{C}$ .

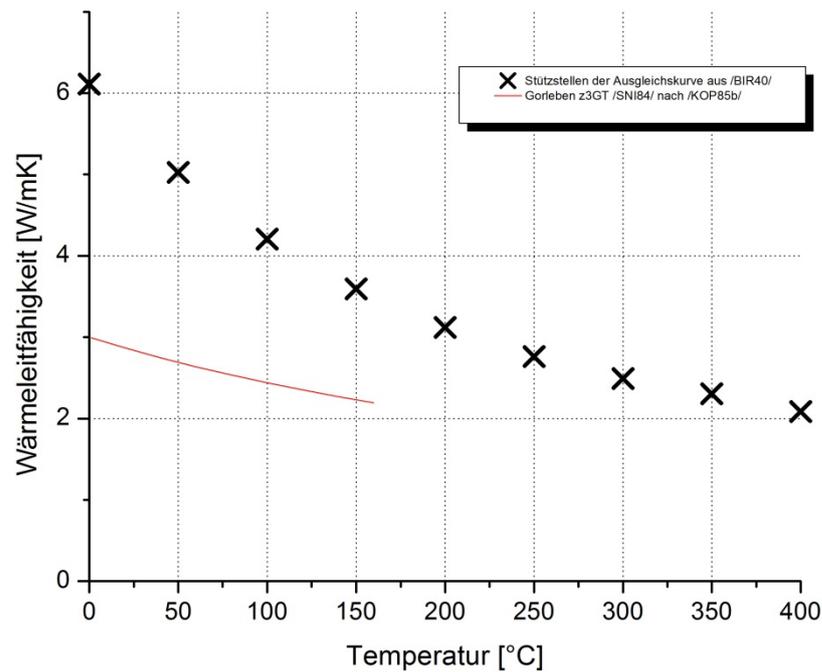


Abbildung 17: Wärmeleitfähigkeiten für den Grauen Salzton (z3GT) des Salzstockes Gorleben.

### 3.2.3 Empfehlung für Best-Estimate-Werte

Aus den vorliegenden Untersuchungen ergibt sich, dass die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Salzgesteinen in erster Näherung durch die Beziehung aus /CER82/ nach Kennwerten von /BIR40/ beschrieben werden kann. Insbesondere die homogenen Steinsalzbereiche des Staßfurt-Steinsalzes (Gorleben) lassen sich in ihrer möglichen Streubreite ausreichend abschätzen. Eine Verwendung der häufig in der Literatur aufgelisteten Polynomansätze erscheint fragwürdig, da die genaue Quelle oder der für die Anpassung verwendete Datensatz häufig unbekannt ist.

Die im Stoffbestand häufig wechselnden Schichten der Leine-Folge (Gorleben) zeigen demgegenüber eine deutlich höhere Schwankungsbreite. Sinnvoll wäre hier eine detaillierte stratigraphische Auswertung der einzelnen Schichtglieder, um diese Unterschiede zu erfassen und so eine verfeinerte Modellbildung zu ermöglichen. Für jedes einzelne Schichtglied liegen diesbezüglich jedoch zu wenige Messpunkte vor, um eine gesicherte statistische Aussage treffen zu können. Die Nutzung der Beziehung aus /CER82/ erscheint sinnvoll, wenn es sich um vorwiegend halithaltige Schichten handelt. Da die Leine-Folge durch häufigere Wechsel im Stoffbestand gekennzeichnet ist, können je nach Lokation deutliche Abweichungen in der Wärmeleitfähigkeit auftreten.

Für den Anhydrit liegen insgesamt recht wenige Messdaten vor, um eindeutige Aussagen treffen zu können. Es scheint jedoch, dass für reines Anhydrit die Beziehung aus /CER82/ nach /BIR40/ als empfohlene Referenzkurve angesehen werden kann.

Für die gering mächtigen Kaliflöze und Übergangsschichten ergeben sich im Vergleich zum Stein-salz deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten. Die niedrigsten Wärmeleitfähigkeiten liegen bei  $0,6 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$  und sind als konservativer Wert für numerische Berechnungen zu betrachten. Da es sich bei diesen Gesteinen jedoch um petrographisch sehr variable Schichtglieder handelt, ist die Angabe einer Wärmeleitfähigkeit sehr stark von der Lokation, d.h. der mineralogischen Zusammensetzung abhängig. Ein allgemein gültiger Wert kann demnach nicht angegeben werden. Es liegt folglich bei dem Nutzer, aus den aufgeführten Daten eine geeignete Auswahl zu treffen.

Für Salzton, d.h. den Grauen Salzton der Leine-Folge (z3GT) finden sich nur in /SNI84/ Messwerte, jedoch wurde nur eine geringe Anzahl an Proben gemessen. Da die Messwerte nach /SNI84/ im Streubereich der in der Literatur vorhanden Messwerte für Salzton liegen, wird vorgeschlagen diese Beziehung vorerst als Wärmeleitfähigkeitswerte für Salzton zu verwenden.

### 3.2.4 Literaturverzeichnis

/ALB80/ Albrecht, H., Langer, M., & Wallner, M. (1980). Thermomechanical effects and stability problems due to nuclear waste disposal in salt rock. ISRM International Symposium-Rockstore 80.

/BEC99/ Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., et al. (1999). Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project), Final Report, European Commission, EUR19124 EN. Tech. rep.

/BEC04/ Bechthold, W., Smailos, S., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., et al. (2004). Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project), Final Report, European Commission, EUR 20621 EN. Tech. rep.

/BIR40/ Birch, A., & Clark, H. (1940). The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition. American Journal of Science, 238(8), 529-558.

/CER82/ Cermak, V., & Rybach, L. (1982). Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In SpringerMaterials - The Landolt-Börnstein Database (Bd. c, S. --). Angenheister, G.

/DEL79/ Delisle, G., Langer, M., & Wallner, M. (1979). Thermal Mechanical Modelling - US/FRG Bilateral Workshop on Waste Isolation Performance Assessment and In-Situ Testing, Berlin, Oct. 1-5, 1979.

/EIS03/ Eisenburger, D., & Grisseemann, C. (2003). Projekt Gorleben - Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermophysikalischen und elektrischen Gesteinsparameter. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- (BGR), Hannover.
- /FED86/ Feddersen, H., Flach, D., Flentge, I., Frohn, C., Gies, H., Gommlich, G., et al. (1986). nuclear science and technology: Results of temperature test 6 in the Asse salt mine, Volume I, Main report, Commission of the European Communities EUR 10827. Tech. rep.
- /FRE06/ Freyer, D., Voigt, W., & Böttge, V. (2006). Zur thermischen Stabilität von Tachhydrit und Anhydrit. Kali und Steinsalz., 1, 28-37.
- /GEV81/ Gevantman, L., Lorenz, J., Haas, J. L., Clynne, M. A., Potter, R. W., Schafer, C. M., et al. (1981). Physical properties data for rock salt. (L. Gevantman, Hrsg.) National Bureau of Standards.
- /JAR93/ Jaritz, W. (1993). Die geowissenschaftliche Untersuchung des Salzstockes Gorleben auf seine Eignung für ein Endlager für radioaktive Abfälle. Geologisches Jahrbuch, A 142, 295-304.
- /KAM03/ Kamlot, P., Brückner, D., Wiedemann, M., Manthei, G., Minkely, W., & Schreiner, W. (2003). Investigation of Stress State and Rock-Mechanical Behaviour of Backfill and Host Rock in Dependence on Temperature (Contribution to the BAMBUS-II Project), Final Report, FKZ 02 E 9259. Tech. rep.
- /KOP85b/ Kopietz, J. (1985). Thermal Conductivity Measurements in Relation to the Geothermal Exploration of the Gorleben Salt Dome. Proceedings of the 19th International Conference on Thermal Conductivity.
- /KOP78/ Kopietz, J., & Jung, R. (1978). Geothermal In Situ Experiments in the Asse Salt Mine. Proceedings of the seminar in In Situ Heating Experiments in Geological Formations, Paris, DECD-NEA, (S. 45-59).
- /KOP95/ Kopietz, J., Greinwald, S., Bochem, M., Mors, K., Czora, C., & Koß, G. (1995). Untersuchung thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen - Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 02 E 8421 5. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /KRO09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., & Lerch, C. X. (2009). Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz - REOPERM Phase 1. Tech. rep., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH - gefördert durch das BMWi 02 E 10477.
- /LAN86/ Langer, M. (1986). MAIN ACTIVITIES OF ENGINEERING GEOLOGISTS IN THE FIELD OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 34, 25-38.
- /LAN86a/ Langer, M. (1986). RHEOLOGY OF ROCK-SALT AND ITS APPLICATION FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL PURPOSES. Proceedings of the International Symposium on Engineering in Complex Rock Formations, 3-7 November, Beijing, China.
- /LAN80/ Langer, W. (1980). Grundlagen des Standsicherheitsnachweises für ein Endlagerbergwerk im Salzgebirge - Vortrag gehalten auf der 4. Nationalen Tagung für Felsmechanik der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau.
- /NIP89/ Nipp, H.-K. (1989). Numerische Untersuchungen zur Integrität der Barriere Salzstock, Farbgraphische Auswertung des Berechnungsmodells 1986-2, un-

- veröffentlichter Bericht, Archiv 104414. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /PLO79/ Ploumen, P., Strickmann, G., & Winske, P. (1979). Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Teil I: Berechnung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturfelder. *Atomwirtschaft*, 2, 85-91.
- /ROT80/ Rothfuchs, T., & Durr, K. (1980). IN-SITU investigation of brine migration, temperature distribution, and convergence in salt in a high-level waste simulation experiment at the asse salt mine. In F. A. Kulacki, & R. W. Lyczkowski (Hrsg.), *Heat transfer in nuclear waste disposal: the Winter annual meetings of the american society of mechanical engineers*, Chicago, Illinois, November 16-21, 1980.
- /ROT04/ Rothfuchs, T., Droste, J., Herbert, H.-J., Kröhn, K.-P., Wieczorek, K., Zhang, C., et al. (2004). CROP - Cluster Repository Project. Tech. rep., Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, European Commission No. FIRI-CT-2000-20023.
- /ROT95/ Rothfuchs, T., Prij, J., van den Horn, B. A., Kröhn, K.-P., & Wieczorek, K. (1995). The DEBORA-Project - Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste, Final Report, Phase I, 1991-1995. Tech. rep., Joint Report of GSF - Institut für Tiefenlagerung and Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN).
- /ROT92/ Rothfuchs, T., Vons, L., Raynal, M., Major, J., & Müller-Lyda, I. (1992). The HAW project: Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine - Activity report, Jan. - June 1992.
- /ROT88/ Rothfuchs, T., Wieczorek, K., H.K., F., Staupendahl, G., Coyle, A., Kalia, H., et al. (1988). Brine Migration Test - Asse Salt Mine - Federal Republic of Germany, Final Report, GSF-Bericht 6/88. Tech. rep., Office of Nuclear Waste Isolation (ONWI) and Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München (gsf).
- /SCH71/ Schmidt, H. (1971). Numerische Langzeitberechnung instationärer Temperaturfelder mit diskreter Quellenverteilung unter Berücksichtigung temperatur- und ortsabhängiger Stoffwerte. Ph.D. dissertation, RWTH Aachen.
- /SNI84/ Schnier, H. (1984). Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben (PSE II) - BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5106 2 - Zusammenstellung geothermischer Parameter für geomechanische Berechnungen, Archiv-Nr. 97602. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /WAL86/ Wallner, M. (1986). STABILITY DEMONSTRATION CONCEPT AND PRELIMINARY DESIGN CALCULATIONS. *Proceedings Waste Management 86*, March 2-6, 1986, Tuscon, Volume 2, S. 145-151.
- /WAL87/ Wallner, M. (1987). COMPUTER SIMULATION OF THE LONG-TERM STABILITY OF A NUCLEAR WASTE REPOSITORY IN A SALT DOME. *Nuclear Simulation, Proceedings of an International Symposium and Workshop*, October 1987, Schliersee, Germany.

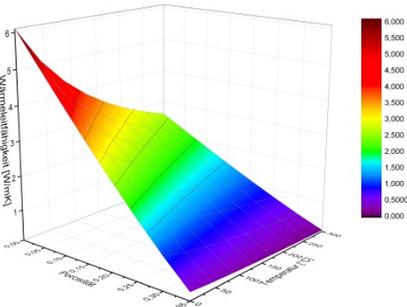
/WIL83/ Will, G., & Hinze, E. (1983). Entwässerungsverhalten von hydratisierten Salzphasen als Funktion des Druckes. In Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse, 1. Halbjahresbericht. GSF, Braunschweig.



## 4 Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturlauswertung</b>
<b>Standort</b>	
<b>Material:</b>	<b>EBS\Salzgrus</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_XX.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit</b>
Anlage 01 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW) Anlage 02 Begründung	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Christian Müller</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-05-24</b>

4.1 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW)

Parameter <i>frmdata</i>	VIRTUS: Wärmeleitfähigkeit		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>	
Salzgrus			
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>	λ	
Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/BEC04/ /VSG13/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	Ansatz nach Korthaus /BEC04/ mit Anpassung nach /VSG13/.		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Ta- bel- len wer te <i>cur- veda- ta</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
		$\lambda_{SG} = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_B}\right)^m \cdot \lambda_S + \frac{\eta}{\eta_B} \cdot \lambda_G$ $\lambda_S = \frac{\lambda_0}{(1 + C \cdot T)}$ <p>λ<sub>0</sub> = Wärmeleitfähigkeit bei 0°C [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]                      C = 0,0045                      λ<sub>0</sub> = 6,1                      T = °C</p> $\lambda_G = a_0 + a_1 \cdot \vartheta$ <p>a<sub>0</sub> = 0,42 W/mK, a<sub>1</sub> = 0,0027 W/mK, ϑ = °C</p>	Ansatz nach Kor- thaus /BEC04/  Anpassung nach /VSG13/

<i>Numerische Modellierung</i>			
Constitutive model <small>frmCategory_ConstitutiveModel</small>	Code <small>frmCode</small>	Funktion <small>frmFunktion</small>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

## 4.2 Begründung

### 4.2.1 Einleitung

Die hier vorgestellten Werte zur Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS gesichteten und ausgewerteten Literatur dar.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist eine Stoffkonstante und beschreibt die Wärmemenge, die in einer Sekunde durch den Querschnitt von  $1 \text{ cm}^2$  einer  $1 \text{ cm}$  dicken Platte fließt, wenn an beiden Enden eine Temperaturdifferenz von  $1^\circ\text{C}$  besteht. Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit hat die Form:

$$\lambda = 1\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1} = 86,4 \text{KJ} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1} = 20,635 \text{Kcal} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$$

### 4.2.2 Auswertung

Im Gegensatz zum intakten, niedrig porösen Steinsalz zeigt Salzgrus in Abhängigkeit des Kompaktionsgrades eine große Schwankungsbreite in der Wärmeleitfähigkeit. Neben der Temperatur ist die Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus daher wesentlich von der vorhandenen Porosität abhängig. Erste Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Salzgrus finden sich in /SNI84/ und in einer unveröffentlichten Messreihe von Walter, deren Daten in /BEC00/ aufgeführt sind. Beide Messungen wurden bei unterschiedlichen Porositäten und Temperaturen durchgeführt. Neuere Messergebnisse finden sich in /BEC00/ (TU Dresden), /BRE94/ und in den Berichten zu den Projekten BAMBUS /BEC99/ und BAMBUSII /BEC04/. Insgesamt fällt dabei auf, dass zwischen den Messergebnissen große Unterschiede bestehen. So liegen die Daten der TU Dresden /BEC00/ um den Faktor 3 unter den Daten von Walter /BEC00/. Als Grund wird in /BEC00/ die unterschiedlich verwendete Körnung genannt, weshalb nach /BEC00/ die Porosität kein ausreichendes Charakteristikum für die Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus ist. In /VSG13/ wird zudem bemerkt, dass Unterschiede in den Wärmeleitfähigkeiten vermutlich auf das verwendete Messverfahren zurückzuführen sind. Am zuverlässigsten scheinen Werte zu sein, die mit einem Infrarotmessverfahren erzielt wurden /BEC04/.

Eine Anpassung der Messwerte mittels funktionaler Beziehungen wurde von verschiedenen Autoren vorgenommen. Die Beziehungen finden sich fast ausschließlich in den BAMBUSI /BEC99/ und BAMBUSII /BEC04/ Berichten und wurden im Rahmen der dort aufgeführten numerischen Modellierungen von den einzelnen Institutionen entwickelt bzw. aus der Literatur übernommen. Die Ansätze setzen sich im Allgemeinen aus der Wärmeleitfähigkeit von intaktem Steinsalz zusammen, die in Abhängigkeit von der Porosität des Salzgruses mittels verschiedener Beziehungen entsprechend angepasst wird. Da für die Wärmeleitfähigkeit des intakten Steinsalzes häufig unterschiedliche Ansätze verwendet werden, sind die verwendeten Eingabeparameter häufig nicht untereinander zu vergleichen. Zudem wird von /VSG13/ angemerkt, dass Anpassungen immer nur einen Teil der vorhandenen Daten berücksichtigen und nicht im gesamten Porositätsbereich realistische Werte liefern. Ein phänomenologisch-theoretischer Ansatz zur Beschreibung der Porositätsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus wurde z.B. /BRE94/ entwickelt. Aufgrund der Verfügbarkeit vorhandener Messwerte fanden zur Eichung des Modells jedoch nur die Messwerte von Walter Verwendung.

Grundsätzlich sollte ein Ansatz für den Grenzfall der vollständigen Kompaktion Wärmeleitfähigkeiten liefern, die denen von intaktem Steinsalz entsprechen /VSG13/. Ein Ansatz, der diese Anforderungen erfüllt, wurde von Korthaus vorgeschlagen und ist in BAMBUSII /BEC04/ aufgeführt. Demnach ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit des Salzgruses als Mischung zwischen der Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes und der in den Poren des Salzgruses enthaltenen Luft nach folgender Form:

$$\lambda_{SG} = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_B}\right)^m \cdot \lambda_S + \frac{\eta}{\eta_B} \cdot \lambda_G$$

Der Faktor  $\lambda_S$  gibt die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz an. Für den Anteil des intakten Steinsalzes wird die in /CER82/ nach den Messwerten von /BIR40/ genannte Funktion vorgeschlagen:

$$\lambda_S = \frac{\lambda_0}{1 + C_\lambda \cdot \vartheta}$$

Für die in den Poren des Salzgruses enthaltene Luft hat /VSG13/ eine Anpassung mit den in der Literatur vorhandenen Messwerten vorgenommen. Demnach kann der Porenanteil des Salzgruses mit einer linearen Funktion mit  $a_0 = 0,42 \text{ W/(m K)}$  und  $a_1 = 0,0027 \text{ W/(mK)}$  gut angepasst werden:

$$\lambda_G = a_0 + a_1 \cdot \vartheta$$

Der Faktor  $\eta_B$ , als Bezugsporosität bezeichnet, wurde aufgrund der Anpassung und in Abweichung zu der Formulierung von Korthaus nicht auf 0,36, sondern auf 0,38 gesetzt.  $\eta_B$  ist damit Bestandteil der Anpassung und bezeichnet nicht die Einbauporosität /VSG13/. Der Funktionsparameter  $m$  des Porositätsanteils bei Steinsalz wurde nach /VSG13/ mit  $m = 1,14$  bestimmt.

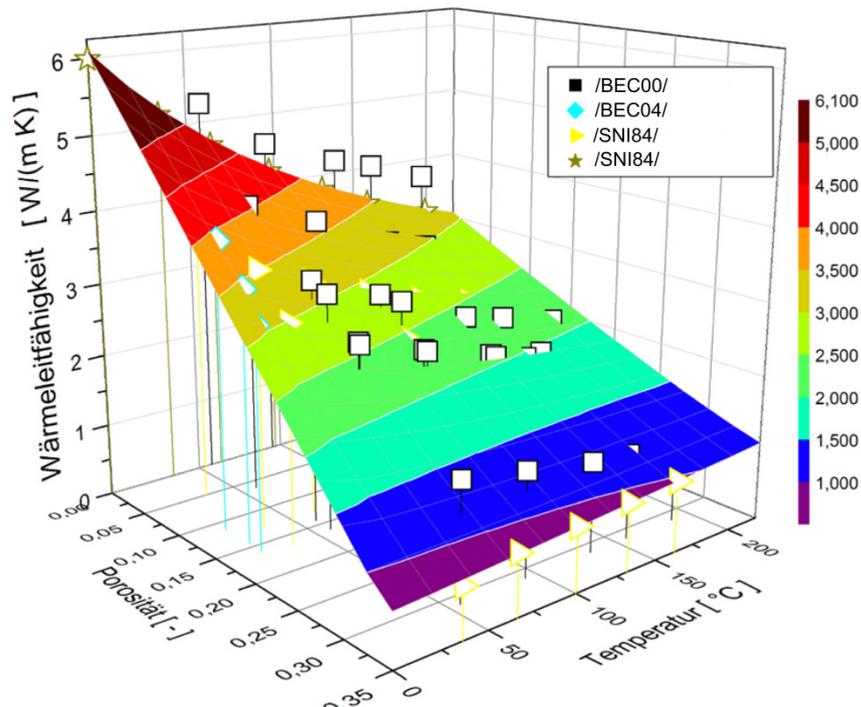


Abbildung 18: Temperatur- und Porositätsabhängige Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus; aus /VSG13/.

#### 4.2.3 Empfehlung für Best-Estimate-Werte

Aus der vorliegenden Literaturrecherche ergibt sich, dass die temperatur- und porositätsabhängige Wärmeleitfähigkeit am plausibelsten mit dem Ansatz nach Korthaus /BEC04/ und einer Anpassung nach /VSG13/ beschrieben werden kann. Wie bereits in /VSG13/ erwähnt, sind die für die Anpassung verwendeten Messergebnisse aus der Literatur mit großen Unsicherheiten hinsichtlich der Zuverlässigkeit (Dokumentation etc.) behaftet. Es ergeben sich zum Teil große Unterschiede in den aufgeführten Wärmeleitfähigkeiten des Salzgruses. Für eine Validierung des genannten Ansatzes und der Anpassung, sind daher weitere Messungen zur Überprüfung und Erweiterung der Datenbasis erforderlich /VSG13/. Des Weiteren ist zu bemerken, dass der Ansatz nur für trocknen Salzgrus anzuwenden ist. Eine Anpassung für Salzgrus mit entsprechender Laugensättigung ist aufgrund einer unzureichenden Datengrundlage nicht möglich. Entsprechende Messergebnisse finden sich nur in /BEC00/.

#### 4.2.4 Literaturverzeichnis

BEC99/ Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., et al. (1999). *Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project), Final Report*. Tech. rep., European Commission, EUR19124 EN.

- /BEC04/ Bechthold, W., Smailos, S., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., et al. (2004). *Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project), Final Report*. Tech. rep., European Commission, EUR 20621 EN.
- /BEC00/ Becker, D.-A., Bremer, N.-M., Richter, K.-J., Schneider, L., & Storck, R. (2000). *Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge bei Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken*. Tech. rep., Stoller Ingenieurtechnik GmbH und Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.
- /BIR40/ Birch, A., & Clark, H. (1940). The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition. *American Journal of Science*, 238(8), 529-558.
- /BRE94/ Breidenich, G. (1994). *Gekoppelte Berechnungen der thermomechanische Feldgrößen in einer Steinsalzformation infolge der Einlagerung radioaktiver wärmefreisetzender Abfälle*. Ph.D. dissertation, RWTH Aachen.
- /CER82/ Cermak, V., & Rybach, L. (1982). Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In *SpringerMaterials - The Landolt-Börnstein Database* (Vol. c, pp. --). Angenheister, G.
- /SCH84/ Schnier, H. (1984). *Standardsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben (PSE II) - BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5106 2 - Zusammenstellung geothermischer Parameter für geomechanische Berechnungen, Archiv-Nr. 97602*. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /VSG13/ Wieczorek, K., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Czaikowski, O., Navarro, M. (2013). Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus. Technischer Bericht im Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)“.



## 5 Wärmekapazität von Salzgestein

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturlauswertung</b>
<b>Standort</b>	<b>Gorleben</b>
<b>Material:</b>	<b>Salzgesteine (vorwiegend) Anhydrit Kalisalz Salzton</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_01.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Spezifische Wärmekapazität</b>
Anlage 01 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW) Anlage 02 Begründung	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Christian Müller</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-05-17</b>

5.1 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW)

<b>Parameter</b> <i>frmdata</i>		<b>VIRTUS: spezifische Wärmekapazität</b>																																										
<b>Material</b> <i>frm_x-site</i>	<b>Standort</b> <i>site</i>	<b>Stratigrafie, Symbol</b> <i>stratigraphy</i>																																										
Steinsalz	Gorleben	z2, z3, Steinsalz (allgemein)																																										
<b>Wert</b> <i>frmdata</i>		<b>Einheit</b> <i>functionparameter</i>	<b>Bemerkung</b>																																									
0,490 – 61,436 (15 K – 1074 K)		J/mol K	$C_p$ Umrechnung der molaren Wärmekapazität erfolgt über die Summenformel																																									
<b>Zitat; Symbol</b> <i>frmReference</i>		<b>Literatur</b> <i>citation</i>																																										
/KOP94/ /GEV81/																																												
<b>Beschreibung</b> <i>frmdata; description</i>		Messwerte aus /GEV81/. Es handelt sich dabei um Labormesswerte zur Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität von NaCl in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung zu Messwerten von /KOP94/.																																										
<b>Anmerkungen</b> <i>frmdata; internalRemark</i>																																												
<b>Grafik; Screenshot</b>		<b>Tabellenwerte</b> <i>curvedata</i>	<b>Formel / Gleichung</b> <i>equation</i>																																									
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>X [K]</th> <th>Y J/mol K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>0,490</td></tr> <tr><td>20</td><td>1,224</td></tr> <tr><td>25</td><td>2,937</td></tr> <tr><td>50</td><td>15,175</td></tr> <tr><td>75</td><td>25,945</td></tr> <tr><td>100</td><td>33,533</td></tr> <tr><td>150</td><td>41,855</td></tr> <tr><td>200</td><td>46,505</td></tr> <tr><td>250</td><td>48,953</td></tr> <tr><td>293</td><td>50,177</td></tr> <tr><td>300</td><td>50,421</td></tr> <tr><td>400</td><td>52,869</td></tr> <tr><td>500</td><td>54,827</td></tr> <tr><td>600</td><td>56,296</td></tr> <tr><td>700</td><td>57,520</td></tr> <tr><td>800</td><td>58,743</td></tr> <tr><td>900</td><td>59,722</td></tr> <tr><td>1000</td><td>60,701</td></tr> </tbody> </table>	X [K]	Y J/mol K	0	0	15	0,490	20	1,224	25	2,937	50	15,175	75	25,945	100	33,533	150	41,855	200	46,505	250	48,953	293	50,177	300	50,421	400	52,869	500	54,827	600	56,296	700	57,520	800	58,743	900	59,722	1000	60,701	$C_p = 47,494881 + 0,013561 * T$ mit $C_p = \text{Wärmekapazität [J/mol K]}$ $T = [\text{K}]$	Tabellenwerte und Funktion aus /GEV81/
X [K]	Y J/mol K																																											
0	0																																											
15	0,490																																											
20	1,224																																											
25	2,937																																											
50	15,175																																											
75	25,945																																											
100	33,533																																											
150	41,855																																											
200	46,505																																											
250	48,953																																											
293	50,177																																											
300	50,421																																											
400	52,869																																											
500	54,827																																											
600	56,296																																											
700	57,520																																											
800	58,743																																											
900	59,722																																											
1000	60,701																																											

<i>Numerische Modellierung</i>			
Constitutive model <small>frmCategory_ConstitutiveModel</small>	Code <small>frmCode</small>	Funktion <small>frmFunktion</small>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

<b>Parameter</b> <i>frmdata</i>	<b>VIRTUS: spezifische Wärmekapazität</b>																						
<b>Material</b> <i>frm_x-site</i>	<b>Standort</b> <i>site</i>	<b>Stratigrafie, Symbol</b> <i>stratigraphy</i>																					
Anhydrit	Gorleben	Anhydrit (allgemein)																					
<b>Wert</b> <i>frmdata</i>	<b>Einheit</b> <i>functionparameter</i>	<b>Symbol</b> <i>functionparameter</i>	<b>Bemerkung</b>																				
99,646 – 168,950 (298 K – 1000 K)	J/molK	$c_p$																					
<b>Zitat; Symbol</b> <i>frmReference</i>	<b>Literatur</b> <i>citation</i>																						
/GEV81/																							
<b>Beschreibung</b> <i>frmdata ;description</i>	Messwerte aus /GEV81/. Es handelt sich dabei um Labormesswerte zur Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität von Anhydrit.																						
<b>Anmerkungen</b> <i>frmdata; InternalRemark</i>																							
<b>Grafik; Screenshot</b>	<b>Tabellenwerte</b> <i>curvedata</i>	<b>Formel / Gleichung</b> <i>equation</i>	<b>Beziehung/Gesetz</b>																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X [K]</th> <th>Y J/mol K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>298</td><td>99,646</td></tr> <tr><td>300</td><td>99,830</td></tr> <tr><td>400</td><td>109,704</td></tr> <tr><td>500</td><td>119,579</td></tr> <tr><td>600</td><td>129,453</td></tr> <tr><td>700</td><td>139,327</td></tr> <tr><td>800</td><td>149,201</td></tr> <tr><td>900</td><td>159,076</td></tr> <tr><td>1000</td><td>168,950</td></tr> </tbody> </table>	X [K]	Y J/mol K	298	99,646	300	99,830	400	109,704	500	119,579	600	129,453	700	139,327	800	149,201	900	159,076	1000	168,950	$c_p = 70,206518 + 0,098744 * T$ <p>mit</p> $c_p = \text{Wärmekapazität [J/mol K]}$ $T = [\text{K}]$	Tabellenwerte und Funktion aus /GEV81/
X [K]	Y J/mol K																						
298	99,646																						
300	99,830																						
400	109,704																						
500	119,579																						
600	129,453																						
700	139,327																						
800	149,201																						
900	159,076																						
1000	168,950																						

<i>Numerische Modellierung</i>			
<b>Constitutive model</b> <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>		<b>Code</b> <i>frmCode</i>	<b>Funktion</b> <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

## 5.2 Begründung

### 5.2.1 Einleitung

Die hier vorgestellten Werte zur spezifischen Wärmekapazität der Evaporite stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS gesichteten und ausgewerteten Literatur dar.

Die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes ist eine physikalische Eigenschaft und bezeichnet die auf die Masse bezogene Wärmekapazität, d.h. die Energiemenge, die benötigt wird um 1 kg eines Stoffes um 1K zu erwärmen. Die Einheit der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck  $c_p$  hat die Form (massenbezogene Wärmekapazität):

$$c_p = \frac{J}{kg \cdot K}$$

Häufig ist die molare Größe nach folgender Beziehung angegeben (molare Wärmekapazität):

$$c_{mol} = \frac{J}{mol \cdot K}$$

Für die Umrechnung wird angenommen, dass 1 mol NaCl eine Masse von 58,5 g hat. Neben der Wärmekapazität wird in der gesichteten Literatur häufig die Wärmespeicherungszahl  $s$  genannt, welche folgende Form annimmt (volumetrische Wärmekapazität):

$$s = c_p \cdot \rho [J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

Eine Umrechnung erfolgt durch Division mit der Dichte. Zur Umrechnung wurde im Rahmen dieser Zusammenstellung ein Wert von NaCl von  $2170 \text{ kg m}^{-3}$  angenommen.

### 5.2.2 Auswertung

In der Literatur wird häufig ein konstanter Wert für die spezifische Wärmekapazität im Rahmen von numerischen Modellierungen verwendet. Da jedoch auch die Wärmekapazität eine, wenn auch geringe, Temperaturabhängigkeit zeigt, wird im Folgenden detailliert auf diese Beziehungen eingegangen. Auf eine Auswertung und Darstellung konstanter Werte wurde verzichtet, da hier ausnahmslos eine Quellenangabe fehlt. Zudem können entsprechende Werte aus den funktionalen Beziehungen abgeleitet werden.

In Abbildung 1 findet sich eine Darstellung aller gesichteten Wärmekapazitätsbeziehungen wieder. Die entsprechenden Funktionen sind in Tabelle 1 gelistet. Die Art der Quelle ist dabei recht unterschiedlich. Es kann sich um Beziehungen ohne oder unsichere Quellenangaben, Angaben aus Standardwerken wie das Landolt-Börnstein Tabellenwerk oder d'Ans-Lax Taschenbuch für Chemiker und Physiker handeln. Einzig bei den aufgeführten Funktionen aus /KOP94,EIS03/ handelt es sich um Eigenmessungen. Weitere Einzelmessungen finden sich vom „National Bureau of Standards“ herausgegebenen Monograph „Physical Properties Data of Rock Salt“ /GEV81/. Im Folgenden wird näher auf diese Eigenmessungen eingegangen.

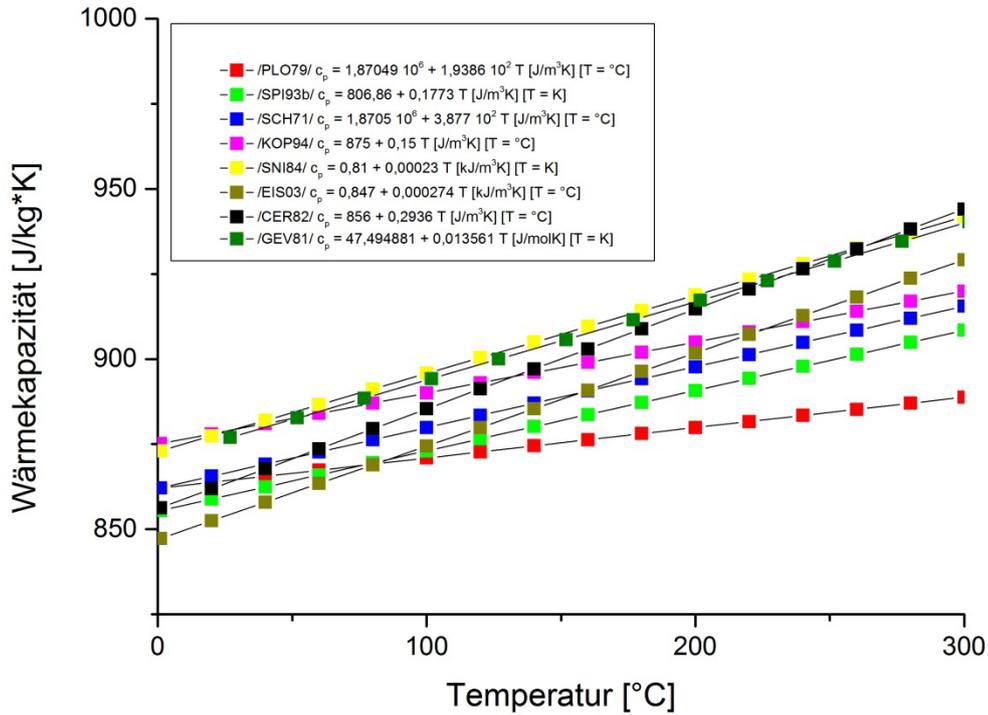


Abbildung 19: Lineare Beziehungen zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur.

Tabelle 2: Lineare Beziehungen zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur.

	spezifische Wärmekapazität $c_p$ / Wärmespeicherzahl $s$	Quelle
1	$s = 1,87049 \cdot 10^6 + 1,9386 \cdot 10^2 \cdot T$ [J/m <sup>3</sup> K] [T = °C]	/PLO79, ROT80, ONW81/
2	$s = 1,8705 \cdot 10^6 + 3,8722 \cdot 10^2 \cdot T$ [J/m <sup>3</sup> K] [T = °C]	/SCH71, HAW88, ROT95, KRO96, BEC04, HAW92, BEC99, HAW92, KAM03/
3	$c_p = 806,86 + 0,1773 \cdot T$ [J/kg K] [T = K] $c_p = 855,281 + 0,177 \cdot T$ [J/kg K] [T = °C]	/SPI93, ROT88, BEC04, ROT04, KRO09/
4	$c_p = 875 + 0,15 \cdot T$ [J/kg K] [T = °C]	/KOP94/
5	$c_p = 0,81 + 0,00023 \cdot T$ [kJ/kg K] [T = °C]	/SNI84/
6	$c_p = 0,847 + 0,000274 \cdot T$ [kJ/kg K] [T = °C]	/EIS03/
7	$c_p = 856 + 0,2936 \cdot T$ [J/kg K] [T = °C] $c_p = 856,86 + 0,2789 \cdot T$ [J/kg K] [T = °C]	/CER82, BEC01/
	(lineare Regression aus angegebenen Werten berechnet)	
8	$c_p = 47,494881 + 0,013561 \cdot T$ [J/mol K] [T = K]	/GEV81/

/KOP94/ ermittelte die spezifische Wärmekapazität von NaCl in Abhängigkeit von der Temperatur, die an drei in den kristallographischen Richtungen 111, 110 und 100 orientierten Einkristall-Proben bei einer Aufheizrate von 0,2 K/min über ein Temperaturintervall von 50 bis 210°C gemessen wurde. Zur Validierung ist zusätzlich ein Vergleich zu Messwerten vom „National Bureau of Standards“ herausgegebenen Monograph „Physical Properties Data of Rock Salt“ /GEV81/ aufgeführt. Nach /KOP94/ gleichen sich die Kurven; die angegebene Abweichung von etwa 1% liegt im Bereich der Reproduzierbarkeit. Aus Abb. 1 wird ersichtlich, dass die Abweichungen im unteren Temperaturniveau geringer und zu höheren Temperaturen größer werden.

Spezielle Messungen der spezifischen Wärme an Gorlebenmaterial finden sich in /EIS03/. Es handelt sich um Laboruntersuchungen zur Bestimmung thermophysikalischer und elektrischer Gesteinsparameter begleitend zu den Erkundungsarbeiten am Standort Gorleben. Die Gesteinsproben wurden beim Niederbringen von Erkundungsbohrungen oder beim Vortrieb der Schächte und Strecken entnommen /EIS03/. Die Messungen wurden im Labor Geotec mit einem Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter gemessen. Dies arbeitet mit Grundeinrichtungen der Differenz-Thermoanalyse-Apparatur der Fa. NETZSCH (Typ 404), wurde jedoch speziell für den Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 250°C umgerüstet /EIS03/. Zusätzlich findet sich zu jeder Probenmessung eine kurze petrographische Beschreibung und eine detaillierte stratigraphische Zuordnung. Im Folgenden soll versucht werden anhand der vorliegenden Datenbasis aus /EIS03/ einen Überblick über die Wärmeleitfähigkeiten wesentlicher salinärer Schichtfolgen des Standortes Gorleben zu schaffen. Die Darstellung richtet sich sowohl nach der Verdunstungsabfolge der Evaporite in Carbonate (Kalksteine und Dolomite), Sulfate (Gips, Anhydrit, Kieserit, Polyhalit), Steinsalz (NaCl) und Kali-/Magnesiumsalze (Carnallitit, Sylvinit) als auch nach der Stratigraphie (sofern angegeben).

### Steinsalz

In /EIS03/ wurden hauptsächlich Proben aus dem Knäuelsalz (z2HS1), dem Streifensalz (z2HS2) und dem Kristallbrockensalz (z2HS3) untersucht (Abbildung 2 bis 4). Weitere Einzelproben aus anderen Schichtgliedern sind in Abbildung 5 dargestellt. Der Mittelwert der untersuchten Halitproben liegt nach /EIS03/ im untersuchten Temperaturintervall zwischen  $c_p = 0,85$  und  $0,90$  kJ/kgK. Die nach /EIS03/ berechnete mittlere Temperaturabhängigkeit ist Tab. 1 zu entnehmen und zusätzlich in den jeweiligen Abbildungen eingetragen. Um einen Vergleich herzustellen, ist zusätzlich die Temperaturabhängigkeit nach /KOP94/ und /GEV81/ aufgetragen.

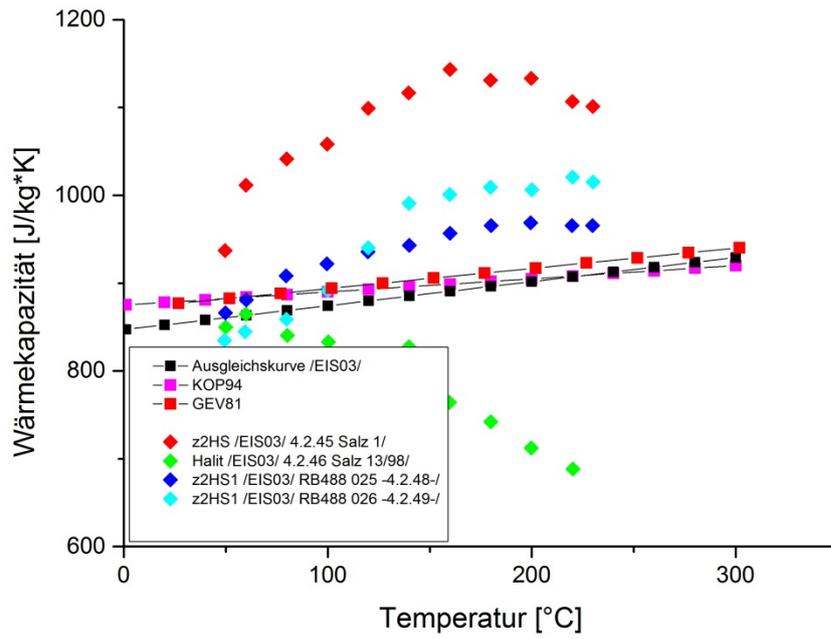


Abbildung 20: Spezifische Wärmekapazitäten für das Knäuelsalz (z2HS1) aus /EIS03/.

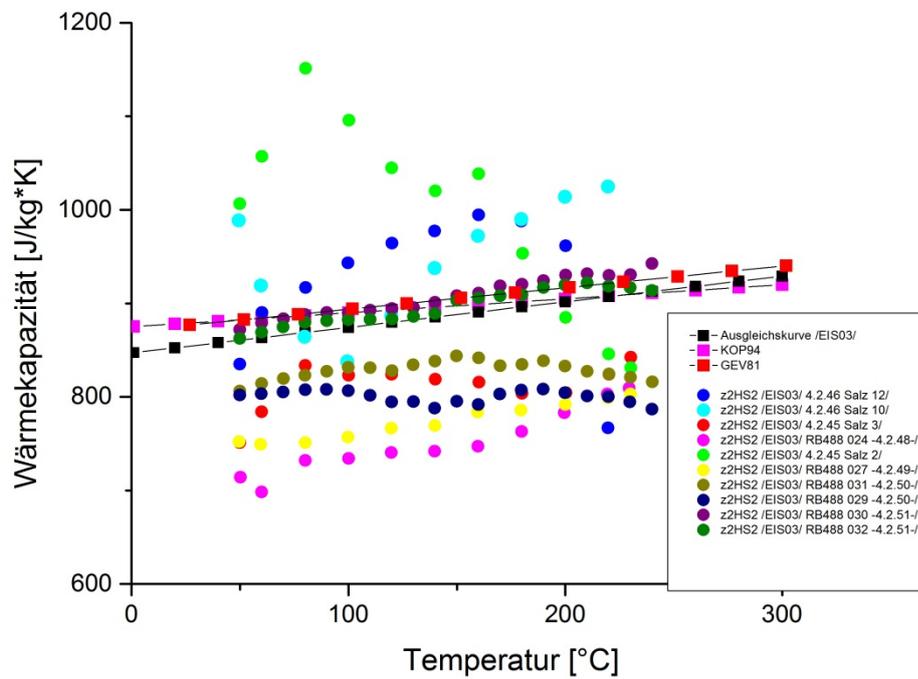


Abbildung 21: Spezifische Wärmekapazität für das Streifensalz (z2HS2) aus /EIS03/.

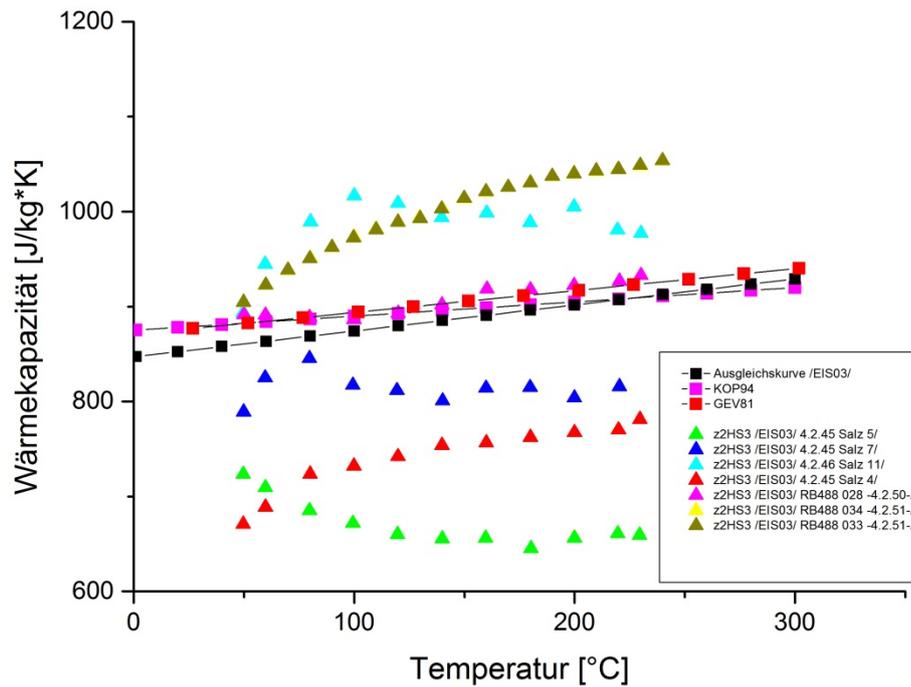


Abbildung 22: Spezifische Wärmekapazität für das Kristallbrockensalz (z2HS3) aus /EIS03/.

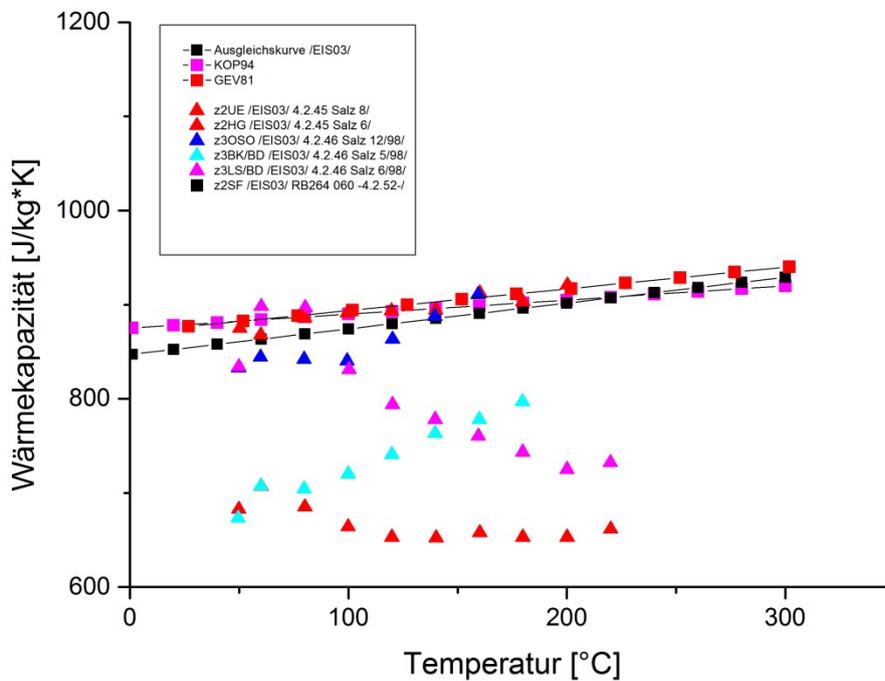


Abbildung 23: Spezifische Wärmekapazitäten für unterschiedliche Sichten des Staßfurt (z2) und Leine (z3) Steinsalzes.

## Anhydrit

Für Anhydrit-Schichten finden sich in /EIS03/ nur zwei Einzelmessungen (Abbildung 6). Unter der petrographischen Kurzbezeichnung wird die Gorlebenbankprobe (z3OSM) als Anhydrit eingestuft; nähere Angaben dazu fehlen. Die weitere Probe wird stratigraphisch nicht weiter differenziert und nur als Anhydritgestein angesprochen. Ein Vergleich mit Messungen an Anhydrit aus /GEV81/ zeigt, dass die Anhydritprobe aus /EIS03/ vergleichbare Werte zeigt. Die in /GEV81/ genannten Messwerte sind jedoch nicht mit der zusätzlich aufgeführten Ausgleichskurve konsistent. Ein Vergleich mit einer eigenen Anpassung ergibt einen Fehler im Steigungsfaktor (Fehlerteufel?). Bei der in Abb. 6 genannten Funktion handelt es sich um die korrigierte Beziehung. Für die Umrechnung der molaren Wärmekapazität wurde die Masse der Formeleinheit zu Grunde gelegt.

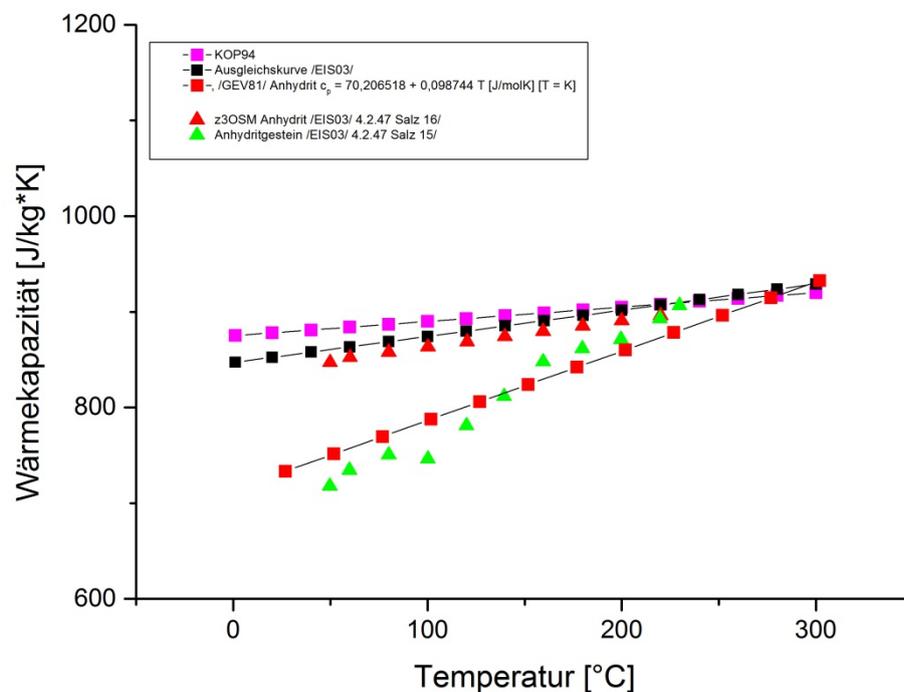


Abbildung 24: Spezifische Wärmekapazitäten für Anhydrit.

## Kalisalze

Analog zum Anhydrit finden sich wenige Messwerte zu den Kalisalzen. Die Einzelmessungen aus /EIS03/ sind in Abbildung 7 dargestellt. Der Anstieg der Wärmekapazität ist auf den Dehydrationsprozess zurückzuführen.

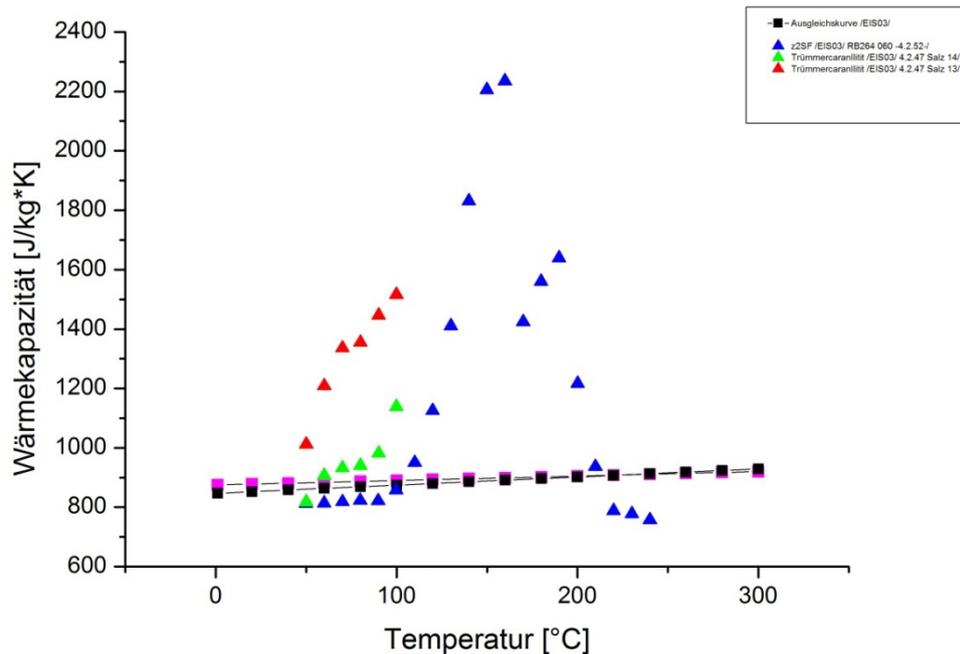


Abbildung 25: Spezifische Wärmekapazität für Kalisalze aus /EIS03/.

### 5.2.3 Empfehlung für Best-Estimate-Werte

Generell wird davon ausgegangen, dass die spezifische Wärmekapazität verschiedener Festgesteine recht einheitlich ist /SNI84,KOP94/. Eine Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität ist nachzuweisen, jedoch generell als gering anzusehen. In der bearbeiteten Literatur wird die spezifische Wärmekapazität für Steinsalz durch verschiedene, aber recht ähnliche lineare Beziehungen beschrieben (Abbildung 1). Einzig die in /KOP94/, /EIS03/ und /GEV81/ genannten Daten gehen auf Labormessungen zurück. Die lineare Beziehung aus /KOP94/ ist nach /KOP94/ in guter Übereinstimmung mit den in der Literatur aufgeführten spezifischen Wärmekapazitäten für Steinsalz. So zeigt ein Vergleich zu Messwerten vom „National Bureau of Standards“ /GEV81/ eine Abweichung von etwa 1% /KOP94/. Eine größere Anzahl von Messwerten für verschiedene stratigraphische Schichten findet sich in /EIS03/. Dabei handelt es sich vorwiegend um Gesteine aus dem Kristallbrockensalz (z2HS3), dem Streifensalz (z2HS2) und dem Knäuelsalz (z2HS1). Für weitere stratigraphische Schichten (z.B. aus der Leine-Folge) finden sich nur Einzelmessungen.

Obwohl für NaCl bzw. reines Steinsalz in der Literatur generell ein leichter linearer temperaturabhängiger Anstieg der Wärmekapazität beschrieben ist, sind ähnliche Tendenzen in den dargestellten Messkurven von /EIS03/ nicht immer zu erkennen. Unterschiede in der Wärmekapazität hinsichtlich der einzelnen Schichtglieder (-> Unterschiede im Mineralbestand) sind sowohl für das Staßfurt Steinsalz als auch für die Einzelmessungen der Leine-Folge aufgrund der Schwankungsbreite bzw. einer geringen Probenanzahl nicht auflösbar. Des Weiteren ist eine stratigraphiebezogene Auswertung nach /EIS03/ zu vermeiden, da die Prüfkörper in Relation zur Korn-

größe relativ klein sind und als nicht repräsentativ für die Gesamtprobe anzusehen sind. /EIS03/ gibt für das Steinsalz des Salzstockes Gorleben im Allgemeinen eine mittlere lineare Temperaturabhängigkeit (Tab. 1) an. Für die spezifische Wärmekapazität des Steinsalzes wird als Best-Estimate-Wert die Beziehung von /GEV81/ empfohlen. Messungen von /KOP94/ liefern übereinstimmende Ergebnisse. Zwar sind die Änderungen nach dieser Beziehung relativ gering, jedoch kann ein Einfluss insbesondere bei instationären Berechnungen bei größeren Temperaturänderungen nicht ausgeschlossen werden /SNI84/.

Für Anhydrit wird die Beziehung aus /GEV81/ als Best-Estimate-Wert vorgeschlagen. Zwar finden sich nur wenige weitere Messreihen, jedoch zeigt die in /EIS03/ explizit als Anhydrit angesprochene Probe eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten bzw. der funktionale Beziehung aus /GEV81/.

Für weitere Schichten kann aus den vorliegenden Einzelmessungen kein Trend abgeleitet werden. Für Carnallit erschwert die Freisetzung des Kristallwassers die Angabe eines sinnvollen Wertes.

#### 5.2.4 Literaturverzeichnis

- /BEC99/ Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., et al. (1999). Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project), Final Report. Tech. rep., European Commission, EUR19124 EN.
- /BEC04/ Bechthold, W., Smailos, S., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., et al. (2004). Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project), Final Report. Tech. rep., European Commission, EUR 20621 EN.
- /BEC01/ Becker, D.-A., Bremer, N.-M., Richter, K.-J., Schneider, L., & Storck, R. (2000). Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge bei Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken. Tech. rep., Stoller Ingenieurtechnik GmbH und Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.
- /CER82/ Cermak, V., & Rybach, L. (1982). Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In SpringerMaterials - The Landolt-Börnstein Database (Vol. c, pp. --). Angenheister, G.
- /EIS03/ Eisenburger, D., & Grisseemann, C. (2003). Projekt Gorleben - Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermophysikalischen und elektrischen Gesteinsparameter. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /GEV81/ Gevantman, L.H. and Lorenz, J. and Haas, J. L. and Clynne, M. A. and Potter, R. W. and Schafer, C M. and Tonkins, R. P. T. and Shakoor, A. and Hume, H. R. and Yang, J. M. and Li, H. H. and Matula, R. A. (1981). Physical properties data for rock salt. National Bureau of Standards.

- /KAM03/ Kamlot, P., Brückner, D., Wiedemann, M., Manthei, G., Minkely, W., & Schreiner, W. (2003). Investigation of Stress State and Rock-Mechanical Behaviour of Backfill and Host Rock in Dependence on Temperature (Contribution to the BAMBUS-II Project), Final Report, FKZ 02 E 9259. Tech. rep., Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IFG).
- /KOP94/ Kopietz, J. (1994). Untersuchungen thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen - 2. Zwischenbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 02 E 8421 5. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover (BGR).
- /KRO96/ Kröhn, K.-P., & Rothfuchs, T. (1996). Designing an In-situ Experiment For The Investigation Of Compaction And Gas Flow PParameter In Crushed Salt Used As Sealing Material In HLW Disposal BBorehole (The Debora Project). Project on Effects of GAS in Underground Storage facilities for radioactive waste (PEGASUS project) - Proceedings of a progress meeting held in Rapolano Terme, Italy on 14 and 15 June 1995.
- /KRO09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., & Lerch, C. X. (2009). Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz - REOPERM Phase 1. Tech. rep., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH - gefördert durch das BMWi 02 E 10477.
- /ONW81/ /ONWI, & GSF. (1981). Versuchsprogramm für eine Laugenmigrationsversuch im Salzbergwerk Asse. Tech. rep., Office of Nuclear Waste Isolation (ONWI) und Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung MBH München (GSF), Institut für Tiefenlagerung.
- /PLO79/ Ploumen, P., Strickmann, G., & Winske, P. (1979). Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Teil I: Berechnung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturfelder. Atomwirtschaft, 2, 85-91.
- /ROT80/ Rothfuchs, T., & Durr, K. (1980). IN-SITU investigation of brine migration, temperature distribution, and convergence in salt in a high-level waste simulation experiment at the asse salt mine. In F. A. Kulacki, & R. W. Lyckowski (Ed.), Heat transfer in nuclear waste disposal: the Winter annual meetings of the american society of mechanical engineers, Chicago, Illinois, November 16-21, 1980.
- /ROT04/ Rothfuchs, T., Droste, J., Herbert, H.-J., Kröhn, K.-P., Wiczorek, K., Zhang, C., et al. (2004). CROP - Cluster Repository Project. Tech. rep., Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, European Commission No. FIRI-CT-2000-20023.
- /HAW88/ Rothfuchs, T., Duijves, K., & Stippler, R. (1988). Das HAW-Projekt - Demonstrationseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse. Zwischenbericht 1985-1987. Tech. rep., Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF) - Institut für Tiefenlagerung and Stichting Energieonderzoek Centrum Nedrland (ECN).
- /ROT95/ Rothfuchs, T., Prij, J., van den Horn, B. A., Kröhn, K.-P., & Wiczorek, K. (1995). The DEBORA-Project - Development of Borehole Seals for High-Level

- Radioactive Waste, Final Report, Phase I, 1991-1995. Tech. rep., Joint Report of GSF - Institut für Tiefenlagerung and Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN).
- /HAW92a/ Rothfuchs, T., Vons, L., Raynal, M., Major, J., & Müller-Lyda, I. (1992). The HAW project: Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine - Activity report, Jan. - June 1992.
- /HAW92/ Rothfuchs, T., Vons, L., Raynal, M., Major, J., & Müller-Lyda, I. (1992). The HAW project: Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine - Activity report, May 1990 - December 1991. Tech. rep., Joint Report of GSF - Institut für Tiefenlagerung and Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN).
- /ROT88/ Rothfuchs, T., Wieczorek, K., H.K., F., Staupendahl, G., Coyle, A., Kalia, H., et al. (1988). Brine Migration Test - Asse Salt Mine - Federal Republic of Germany, Final Report, GSF-Bericht 6/88. Tech. rep., Office of Nuclear Waste Isolation (ONWI) and Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung München (gsf).
- /SCH71/ Schmidt, H. (1971). Numerische Langzeitberechnung instationärer Temperaturfelder mit diskreter Quellenverteilung unter Berücksichtigung temperatur- und ortsabhängiger Stoffwerte. Ph.D. dissertation, RWTH Aachen.
- /SNI84/ Schnier, H. (1984). Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben (PSE II) - BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5106 2 - Zusammenstellung geothermischer Parameter für geomechanische Berechnungen, Archiv-Nr. 97602. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /SPI93/ Spies, T., van den Horn, B., Prij, J., Rothfuchs, T., & Müller, K. (1993). Sealing of Haw-Boreholes in Salt Formations (Deborra-Project). 3. Progress Meeting PEGASUS, Cologne, June 3-4, 1993.



## 6 Wärmekapazität von Salzgrus

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturlauswertung</b>
<b>Standort</b>	<b>Asse</b>
<b>Material:</b>	<b>Salzgrus</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_XX.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Spezifische Wärmekapazität</b>
Anlage 01 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW) Anlage 02 Begründung	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Sha Li, Christian Müller</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-05-24</b>

6.1 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW)

Parameter <i>frmdata</i>		VIRTUS: spezifische Wärmekapazität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>	
Salzgrus	Asse		
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
	J/kg K	$C_{p,cs}$	
Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/BEC99a/ /VSG13/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	In /BEC99a/ finden sich Laborwerte zur Wärmekapazität für Salzgrus. Für die spezifische Wärmekapazität kann die gleiche Beziehung wie für intaktes Steinsalz angegeben werden. Die volumetrische Wärmekapazität ist von der Porosität abhängig und muss über die Porosität erniedrigt werden. Eine Beziehung hierfür stammt aus /BEC99a/. Bei signifikanten Lösungsanteil muss zusätzlich der Anteil der Lösung berücksichtigt werden. Ein Vorschlag hierzu findet sich in /VSG13/.		
Anmerkungen <i>frmdata ;InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
		$C_{p,cs} = C_{p,rs}$ $S_{CS} = S_{RS} \cdot (1 - \varphi)$ $S_{CS} = S_{RS} \cdot (1 - \varphi) + S_{FL} \cdot S$ mit $C_p$ = Spez. Wärmekapazität [J/kg K] $s$ = Vol. Wärmekapazität [J/m <sup>3</sup> K] $\varphi$ = Porosität [-]	Nach /BEC99a/  Nach /BEC99a/  Nach /VSG13/

<i>Numerische Modellierung</i>			
<i>Constitutive model</i> <small>frmCategory_ConstitutiveModel</small>		<i>Code</i> <small>frmCode</small>	<i>Funktion</i> <small>frmFunktion</small>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

## 6.2 Begründung

### 6.2.1 Einleitung

Die hier vorgestellten Werte zur spezifischen Wärmekapazität des Salzgruses stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS gesichteten und ausgewerteten Literatur dar.

Die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes ist eine physikalische Eigenschaft und bezeichnet die auf die Masse bezogene Wärmekapazität, d.h. die Energiemenge, die benötigt wird um 1 kg eines Stoffes um 1K zu erwärmen. Die Einheit der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck  $c_p$  hat die Form (massenbezogene Wärmekapazität):

$$c_p = \frac{J}{kg \cdot K}$$

Häufig ist auch die molare Größe nach folgender Beziehung angegeben (molare Wärmekapazität):

$$c_{mol} = \frac{J}{mol \cdot K}$$

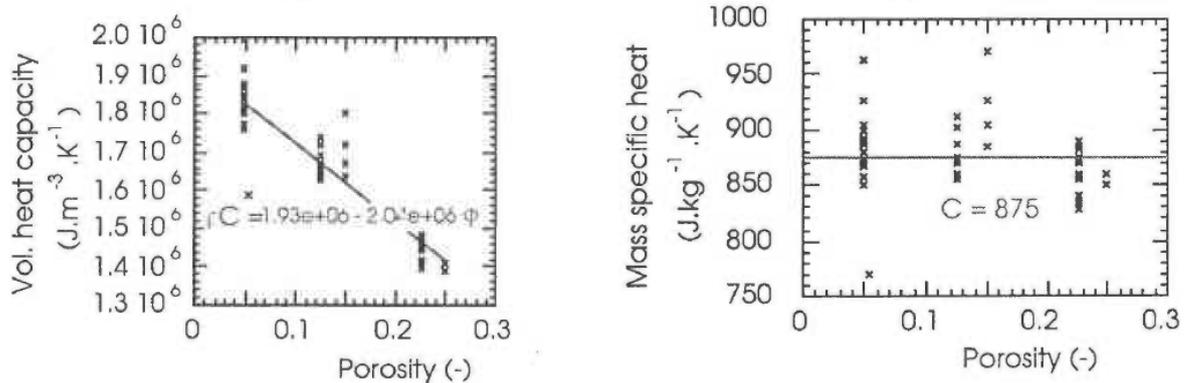
Für die Umrechnung wird angenommen, dass 1 mol NaCl eine Masse von 58,5 g hat. Neben der Wärmekapazität wird in der gesichteten Literatur häufig die Wärmespeicherzahl  $s$  (volumetrische Wärmekapazität) genannt, welche folgende Form annimmt:

$$s = c_p \cdot \rho [J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

Eine Umrechnung erfolgt durch Division mit der Dichte des Salzgruses, die abhängig von der jeweiligen Porosität ist.

### 6.2.2 Auswertung

Für die im Rahmen des Projektes gesichtete Literatur liefern allein die Arbeiten von /BEC99a/ Werte aus Laboruntersuchungen, die von G.3S mit Asse Salzgrus unter 20°C und 80°C gemessen wurden. **Abbildung 26** stellt die Untersuchungsergebnisse unter Raumtemperatur (20 °C) dar:



**Abbildung 26: Volumetrische- und spezifische Wärmekapazität in abhängig von Porosität unter Raumtemperatur (20° C) nach /BEC99a/.**

Es wird nachgewiesen, dass die spezifische Wärmekapazität des Salzgruses unabhängig von der Porosität ist. Durch Extrapolierung der Ergebnisse und Normierung mit Asse Steinsalz ergibt sich eine nur geringe Abweichung zum intakten Steinsalz, weshalb für die spezifische Wärmekapazität die gleiche Beziehung wie für intaktes Steinsalz empfohlen wird /BEC99a/. Die volumetrische Wärmekapazität ist jedoch deutlich von der Porosität abhängig, da eine Porositätsreduktion eine Erhöhung der Dichte bewirkt. Die Dichte des Steinsalzes wird dabei über die Porosität erniedrigt und die volumetrische Wärmekapazität des Salzgruses kann wie folgt angegeben werden:

$$s_{cs} = c_{p,rs} \cdot \rho_{rs} \cdot (1 - \varphi) = s_{rs} \cdot (1 - \varphi)$$

In der Arbeit von /VSG13/ wird Salzgrus als trockene und feuchte Phase unterteilt. Für Salzgrus mit signifikanter Sättigung  $s$  wird der Anteil der Lösung additiv berücksichtigt, wobei diese Beziehung ohne experimentelle Angaben abgesichert ist:

$$s_{cs} = s_{rs} \cdot (1 - \varphi) + s_{Fl} \cdot s$$

### 6.2.3 Empfehlung für Best-Estimate-Werte

In /BEC99a/ wird nachgewiesen, dass Salzgrus die gleiche Temperatur abhängige spezifische Wärmekapazität wie Steinsalz hat. Die volumetrische Wärmekapazität muss über die Porosität erniedrigt werden. Des Weiteren muss bei signifikanter Sättigung der Anteil der Lösung berücksichtigt werden.

### 6.2.4 Literaturverzeichnis

/BEC99a/ Bechthold, W., Heusermann, S., Rothfuchs, T. Poley, A., Ghoreychi, M., Gens, A., Olivia, S. (1999): Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt, Bambus project final report, EUR 19124EN.

/VSG13/ Wieczorek, K., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Czaikowski, O., Navarro, M. (2013): Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus, GRS, Braunschweig.



7      **Hydraulische Parameter von Salzgestein**

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertage-labor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturauswertung</b>
<b>Material:</b>	<b>Salzgestein</b> - Steinsalz - Kalisalz - Anhydrit - Salzton - Hartsalz
<b>Datenblatt</b>	
<b>Parameter:</b>	<b>Hydraulik</b> - Permeabilität - Permeabilität, relativ - Porosität - Filtergeschwindigkeit - Spez. innere Oberfläche - Kapillardruck - Tortuosität - Hydr. Dispersionslänge - Diffusionskoeffizient - Löslichkeit von Gasen - Löslichkeit von Feststoffen
mit - Best-Estimate-Wert (BEW) - Erläuterung zur Auswahl	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>H. Kull, R. Miehe</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-07-10</b>

7.1 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW)

7.1.1 BEW-Salzgestein (ungeschädigt) - Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>		Intrinsische Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz, <u>ungeschädigt</u> (gilt auch für alle übrigen Salzgesteine)		ASSE VIRTUS	
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
<10 <sup>-21</sup> (10 <sup>-23</sup> )	m <sup>2</sup>	k	Ungeschädigtes Gebirge

BEW-Salzgestein (ungeschädigt) - Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/ROT 86b/			
Beschreibung <i>frmdata;description</i>	In-situ-Messungen, Packertests mit Gas (Neon); z2, Na2p, Wertangabe S.47		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
		$k = \frac{q \eta l}{A \Delta p}$	DARCY, für inkompressible Fluide, linearer Fluss
		$k = \frac{q \eta}{l \pi} \frac{p_m}{(p_e^2 - p_w^2)} \ln \frac{r_e}{r_w}$	DARCY, für kompressible Fluide, radialer Fluss
	X	Y	k Permeabilität [m2] q Fließrate [m3 s-1] η dyn. Viskosität [Pa s] A Fläche [m2] l Länge [m] Δp Differenzdruck [Pa] P <sub>m</sub> Druck; gem. Fließrate [Pa] p <sub>e</sub> Gasdruck; (Gebirge) [Pa] p <sub>w</sub> Gasdruck; (Bohrloch) [Pa] r <sub>e</sub> eff. Radius; (Gebirge) [m] r <sub>w</sub> eff. Radius; (Bohrloch) [m]
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			
Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:	
Datum:	Datum:	Datum:	

n. a. nicht angegeben

MLY 99a, NOS 01, HOU 03, BEC 04, HAW 89a, IFT 86a, IFT 89, JOC 08, JOC 95, KAM 02, KAM 05, KES 86, ROT 86b, ROT 90a, STM 94, WIE 04, WIE 05, WIE 98, WIE 99, MIN 07a, MIN 09, POP 06, POP 07, POP 07b, POP 07c, POP 08, DUE 03a, EBE 07, LUX 05, WOL 10, EBE 08a, HOU 02, NN 03, LUX 00e, SAL 07, DEL 83, HEU 89c, ALK 10, ALK 08, BOL 96, DBE 10, DBE 10a, DBE 10b, EBE 08, HAE 02, IFG 04, IFG 10, LUX 02, PEA 96, POP 01, POP 07c, PUS 02, SOP 83, STM 90, HOU 07, OLI 96, SLI 85, POP 10, FLA 00 , KAM 01, KAM 02, KAM 05, KAM 09, KAM 99, POP 06, POP 07, SAL 07, DBE 10 KAM 09, WIE 98,  
fehlt: HEE 97, LAN 95a, POP 02, STU 91, SER 02  
Zusätzlich: SUL 07c, HAW 91, HAI 92, KRO 09, ROT 90, ROT 95b, SAL 95, ROT 04, ROT 04a

7.1.2 BEW-Salzgestein (geschädigt) - Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>		Effektive Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz, <u>geschädigt</u>	<b>ASSE VIRTUS</b>		n. a.
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
$<10^{-21} - 10^{-14}$	m <sup>2</sup>	k	Geschädigtes Gebirge

**BEW-Salzgestein (geschädigt) - Permeabilität**

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/ALK 08/, /WIE 98/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	/ALK 08/; Tab. 3-1; S.27-29; Zusammenstellung von funktionalen Zusammenhängen (Formeln) /WIE 98/; S.23, S.25; Bohrlochmessungen in einem Pfeiler		
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>
	X	Y	<b>...vom Spannungszustand</b> $k_{initial} = 6 \cdot 10^{-14} e^{-1,342 \sigma_3}$ $k_{final} = 3 \cdot 10^{-19} e^{-0,606 \sigma_3}$ $\sigma_3$ min. Hauptspannung..
			<b>...von der Porosität</b> $k_{initial} = 3 \cdot 10^{-15} \phi^{2,29}$ $\phi$ Porosität...
<b>Numerische Modellierung</b>			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>		Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<b>Bewertung</b>			
<i>dataquality</i>			

<i>datasource</i>	
-------------------	--

ALK 08, ALK 10, BEC04, BOL 96, DBE 10, DBE 10, DBE 10a, DBE 10b, DEL 83, DUE 03a, EBE 07, EBE 08, EBE 08a, FLA 00 , HAE 02, HAW 89a, HEE 97, HEU 89c, HOU 02, HOU 03, HOU 07, IFG 04, IFG 10, IFT 86a, IFT 89, JOC 08, JOC 95, KAM 01, KAM 02, KAM 02, KAM 05, KAM 05, KAM 09, KAM 09, KAM 99, KES 86, LAN 95a, LUX 00e, LUX 02, LUX 05, MIN 07a, MIN 09, MLY 99a, NN 03, NOS 01, OLI 96, PEA 96, POP 01, POP 02, POP 06, POP 06, POP 07, POP 07, POP 07b, POP 07c, POP 07c, POP 08, POP 10, PUS 02, ROT 86b, ROT 90a, SAL 07, SAL 07, SLI 85, SOP 83, STM 90, STM 94, STU 91, WIE 04, WIE 05, WIE 98, WIE 99, WOL 10,

fehlt:

Zusätzlich:

7.1.3 BEW-Salzgestein – Permeabilität, relativ

Parameter <i>frmdata</i>		Relative Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz, geschädigt	ASSE VIRTUS		
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
Angabe gültig für absolute Permeabilität $k_{abs.} = 0,298 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$	m <sup>2</sup>	k	Geschädigtes Gebirge

BEW-Salzgestein – Permeabilität, relativ

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>		Literatur <i>citation</i>	
nach /PRE 97/ in /WIE 98/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>		Relative Permeabilität, gemessen an Bohrkernprobe E3/1	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot		Tabellenwerte <i>curvedata</i>	
aus /WIE 98/ S.63		Sättigung (Lauge)	$k_{rel}$
	X	Y	
	0,52	1 E-5	
	0,5	1 E-4	
	0,4	2 E-2	
	0,36	8 E-2	
	X	Y	
	0,36	1 E-5	
	0,4	2 E-3	
	0,5	5 E-2	
	0,52	1 E-1	
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>		Code <i>frmCode</i>	
		Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

WIE 98, BOL 96  
fehlt:  
Zusätzlich:PRE 97

7.1.4 BEW-Salzgestein – Porosität

Parameter <i>frmdata</i>		Porosität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz		ASSE VIRTUS	
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
0,000175	[-]	φ	ungeschädigtes Gebirge

BEW-Salzgestein – Porosität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
Nach /PUS 02/ in /ALK 08/; /KUH 89/,			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>			
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
aus /ALK 08/, Fig. 4-4; S.33	X [MPa]	Y [%]	$\phi = 4,495 \sigma_3^{-0,9945}$
	2	2,26	$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$ $\phi = \frac{V_{por.}}{V_{ges.}} = \frac{V_{por.}}{V_{por.} + V_{mat.}}$ <p>                     φ = Porosität [-], [%]                      ρ = Gesamtdichte [kg m<sup>-3</sup>]                      ρ<sub>s</sub> = Korndichte [kg m<sup>-3</sup>]                      V<sub>por.</sub> = Porenvolumen [m<sup>3</sup>]                      V<sub>ges.</sub> = Gesamtvolumen [m<sup>3</sup>]                      V<sub>mat.</sub> = Matrixvolumen [m<sup>3</sup>]                      σ<sub>3</sub> = Minimalspannung [Pa]                 </p>
	3	1,51	
	4	1,13	
	5	0,91	
	6	0,76	
	7	0,65	
	8	0,57	
	9	0,51	
	10	0,46	
	<b>Numerische Modellierung</b>		
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

JOC 95, WIE 04, WIE 98, POP 07c, HOU 02, ALK 10, ALK 08, BOL 96, DBE 10, EBE 08, IFG 04, IFG 10, SOP 83, STM 90, OLI 96, SLI 85, STM 94, fehlt:  
Zusätzlich: /KUH 89/

7.1.5 BEW-Salzgestein – Filtergeschwindigkeit

Parameter <i>frmdata</i>		Filtergeschwindigkeit	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz	ASSE VIRTUS		
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung

BEW-Salzgestein – Filtergeschwindigkeit

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Leitet sich aus dem Durchlässigkeitsbeiwert, $k_f$ bei Kenntnis des hydraulischen Potentials ab		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
		$v = k_f \cdot \text{grad } h$ $v = \frac{q}{A}$ <p> <math>v</math> = Filtergeschwindigkeit [m s<sup>-1</sup>]  <math>k_f</math> = Durchlässigkeitsbeiwert [m s<sup>-1</sup>]                      grad h = hydraul. Potential [-]  <math>q</math> = Fiessrate [m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>]  <math>A</math> = Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]                 </p>	
<i>Numerische Modellierung</i>			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

fehlt: SER 02  
Zusätzlich:

7.1.6 BEW-Salzgestein – Spezifische innere Oberfläche

Parameter <i>frmdata</i>	spezifische innere Oberfläche		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz	ASSE VIRTUS		
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
100	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	Sg	

BEW-Salzgestein – Spezifische innere Oberfläche

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/SOP 83/, /SLI 85/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	im Labor an Asseproben gemessen, unterhalb der Bestimmungsgrenze, BET-Methode		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<b>Numerische Modellierung</b>			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

SLI 85  
fehlt:  
Zusätzlich: SOP 83

7.1.7 BEW-Salzgestein - Tortuosität

Parameter <i>frmdata</i>		Tortuosität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz			
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
1		$\tau$	

**BEW-Salzgestein - Tortuosität**

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/OLI 96/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	/OLI 96/ Wert angenommen; Eingabeparameter für Steinsalz in Code_Bright; S.15; ...andere Werte nicht bekannt		
Grafik; <i>Screenshot</i>	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<i>Numerische Modellierung</i>			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
<i>Bewertung</i>			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

OLI 96  
fehlt:  
Zusätzlich:

7.1.8 BEW-Salzgestein - Hydraulische Dispersionslänge (nur Steinsalz)

Parameter <i>frmdata</i>		Hydraulische Dispersionslänge	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz			
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
0,05 und 0,005	m	$d_t$	

BEW-Salzgestein - Hydraulische Dispersionslänge (nur Steinsalz)

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/OLI 96/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	/OLI 96/ Wert angenommen; Eingabeparameter für Steinsalz in Code_Bright; S.15; Longitudinal, Transversal		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

OLI 96  
fehlt:  
Zusätzlich:

7.1.9 BEW-Salzgestein - Diffusionskoeffizienten

Parameter <i>frmdata</i>		Diffusionskoeffizienten	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz	<b>ASSE, VIRTUS</b>		
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
10 <sup>-9</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	D	/BOL 96/; S.267

BEW-Salzgestein - Diffusionskoeffizienten

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	/BOL 96/; S295; Angabe zu Diffusionskoef. von Steinsalz in Lauge /FRO 95/; S.VII-22; Wasserstoff in Steinsalz

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz																		
<p>/FRO 95/</p> <p>Tabelle 7 - 5: Abschätzung des effektiven binären Diffusionskoeffizienten für Wasserstoff und Stickstoff (bei 20 °C)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>k [m<sup>2</sup>]</th> <th>b(N<sub>2</sub>) [bar]</th> <th>D<sub>12,p(μ=1) [(m<sup>2</sup>/s) bar]</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1·10<sup>-17</sup></td> <td>0,5...0,6</td> <td>8·10<sup>8</sup>...1,1·10<sup>8</sup></td> </tr> <tr> <td>5·10<sup>-17</sup></td> <td>0,4...0,5</td> <td>2,5·10<sup>8</sup>...4·10<sup>8</sup></td> </tr> <tr> <td>1·10<sup>-16</sup></td> <td>0,3...0,4</td> <td>3·10<sup>8</sup>...5·10<sup>8</sup></td> </tr> <tr> <td>5·10<sup>-16</sup></td> <td>0,2...0,3</td> <td>6,4·10<sup>8</sup>...1,4·10<sup>7</sup></td> </tr> <tr> <td>1·10<sup>-16</sup></td> <td>0,1...0,2</td> <td>3,2·10<sup>8</sup>...1,3·10<sup>7</sup></td> </tr> </tbody> </table>	k [m <sup>2</sup> ]	b(N <sub>2</sub> ) [bar]	D <sub>12,p(μ=1) [(m<sup>2</sup>/s) bar]</sub>	1·10 <sup>-17</sup>	0,5...0,6	8·10 <sup>8</sup> ...1,1·10 <sup>8</sup>	5·10 <sup>-17</sup>	0,4...0,5	2,5·10 <sup>8</sup> ...4·10 <sup>8</sup>	1·10 <sup>-16</sup>	0,3...0,4	3·10 <sup>8</sup> ...5·10 <sup>8</sup>	5·10 <sup>-16</sup>	0,2...0,3	6,4·10 <sup>8</sup> ...1,4·10 <sup>7</sup>	1·10 <sup>-16</sup>	0,1...0,2	3,2·10 <sup>8</sup> ...1,3·10 <sup>7</sup>		$\frac{D_c}{D_t} = D \nabla^2 c$ <p>mit</p> <p>D Diffusionskoeffizient [m<sup>2</sup>]</p> <p>c Konzentration [kg kg<sup>-1</sup>]</p>	
k [m <sup>2</sup> ]	b(N <sub>2</sub> ) [bar]	D <sub>12,p(μ=1) [(m<sup>2</sup>/s) bar]</sub>																			
1·10 <sup>-17</sup>	0,5...0,6	8·10 <sup>8</sup> ...1,1·10 <sup>8</sup>																			
5·10 <sup>-17</sup>	0,4...0,5	2,5·10 <sup>8</sup> ...4·10 <sup>8</sup>																			
1·10 <sup>-16</sup>	0,3...0,4	3·10 <sup>8</sup> ...5·10 <sup>8</sup>																			
5·10 <sup>-16</sup>	0,2...0,3	6,4·10 <sup>8</sup> ...1,4·10 <sup>7</sup>																			
1·10 <sup>-16</sup>	0,1...0,2	3,2·10 <sup>8</sup> ...1,3·10 <sup>7</sup>																			

<p>/JOC 08/; S.27</p> <p>Fig. 6-3 Diffusion coefficient of helium determined in the EDZ of the three test site:</p>			
---	--	--	--

Numerische Modellierung			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
dataquality			
datasource			

BOL 96, FRO 95, SLI 85,  
fehlt:  
Zusätzlich: JOC 08

7.1.10 BEW-Salzgestein - Löslichkeiten von Gasen

Parameter <i>frmdata</i>		Löslichkeiten von Gasen	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz			
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
	[Liter <sub>gas</sub> kg <sub>wasser</sub> <sup>-1</sup> ]		

BEW-Salzgestein - Löslichkeiten von Gasen

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>																																					
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>																																						
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>																																						
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz																																			
<p>/JOC 08/; S.13</p> <p>Tab. 4-1 Tracer gases with their physical parameters relevant for gas migration</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tracer gas</th> <th>Molecular weight <math>\frac{1}{\sqrt{M}}</math></th> <th>Diffusivity in air <math>[\text{m}^2\text{s}^{-1}] \cdot 10^{-4}</math></th> <th>Diffusivity in water <math>[\text{m}^2\text{s}^{-1}] \cdot 10^{-9}</math></th> <th>Solubility in water (1 bar) [l gas kg<sup>-1</sup> water]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Helium</td> <td>4.0 0.50</td> <td>0.698</td> <td>5.8</td> <td>0.0083</td> </tr> <tr> <td>Neon</td> <td>20.0 0.22</td> <td>0.307</td> <td>2.8</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>Iso-butane</td> <td>56.1 0.13</td> <td>0.154</td> <td>1.154</td> <td>0.0325</td> </tr> <tr> <td>Krypton</td> <td>83.8 0.11</td> <td>0.149</td> <td>1.276</td> <td>0.59</td> </tr> <tr> <td>Sulphur hexafluoride</td> <td>146.0 0.08</td> <td>0.075</td> <td>0.928</td> <td>0.0056</td> </tr> <tr> <td>Nitrogen</td> <td>28.0 0.19</td> <td></td> <td>2.34</td> <td>0.0156</td> </tr> </tbody> </table> <p>values are from literature /LID 94/ /DAN 92/ <i>italic values are calculated</i></p>				Tracer gas	Molecular weight $\frac{1}{\sqrt{M}}$	Diffusivity in air $[\text{m}^2\text{s}^{-1}] \cdot 10^{-4}$	Diffusivity in water $[\text{m}^2\text{s}^{-1}] \cdot 10^{-9}$	Solubility in water (1 bar) [l gas kg <sup>-1</sup> water]	Helium	4.0 0.50	0.698	5.8	0.0083	Neon	20.0 0.22	0.307	2.8	0.01	Iso-butane	56.1 0.13	0.154	1.154	0.0325	Krypton	83.8 0.11	0.149	1.276	0.59	Sulphur hexafluoride	146.0 0.08	0.075	0.928	0.0056	Nitrogen	28.0 0.19		2.34	0.0156
Tracer gas	Molecular weight $\frac{1}{\sqrt{M}}$	Diffusivity in air $[\text{m}^2\text{s}^{-1}] \cdot 10^{-4}$	Diffusivity in water $[\text{m}^2\text{s}^{-1}] \cdot 10^{-9}$	Solubility in water (1 bar) [l gas kg <sup>-1</sup> water]																																		
Helium	4.0 0.50	0.698	5.8	0.0083																																		
Neon	20.0 0.22	0.307	2.8	0.01																																		
Iso-butane	56.1 0.13	0.154	1.154	0.0325																																		
Krypton	83.8 0.11	0.149	1.276	0.59																																		
Sulphur hexafluoride	146.0 0.08	0.075	0.928	0.0056																																		
Nitrogen	28.0 0.19		2.34	0.0156																																		
Numerische Modellierung																																						
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>																																				
...wird vom Expertengremium durchgeführt																																						
Bewertung																																						
<i>dataquality</i>																																						
<i>datasource</i>																																						

JOC 08  
fehlt:  
Zusätzlich:

7.1.11 Kapillardruck / Sättigung (zu ergänzen)

Parameter <i>frmdata</i>		Kapillardruck/Sättigung	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz			
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung

**Kapillardruck / Sättigung (zu ergänzen)**

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
/BOL 96/			
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Angaben zu „capillary conductivity“ $m^2 s^{-1}$ ; Kapillardruck ???		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<i>Numerische Modellierung</i>			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

BOL 96  
fehlt:  
Zusätzlich:

7.1.12 Löslichkeiten von Feststoffen (zu ergänzen) Begründung

Parameter <i>frmdata</i>		Löslichkeiten von Feststoffen	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>		Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz			
Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
	[mol kg <sub>wasser</sub> <sup>-1</sup> ]		

Löslichkeiten von Feststoffen (zu ergänzen)

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>		
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>			
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	keine Angaben zu Löslichkeiten in /DEL 83/		
Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
/FRO 03/; <del>DEL 83/</del>			
<b>Numerische Modellierung</b>			
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>	
...wird vom Expertengremium durchgeführt			
Bewertung			
<i>dataquality</i>			
<i>datasource</i>			

FRO 03, DEL 83

fehlt:

Zusätzlich:

## 7.2 Erläuterung zur Auswahl

Die hier vorgestellten **hydraulischen Parameter** von Evaporiten stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS+ gesichteten und ausgewerteten Literatur dar /ROT 12/.

Danach liegt die intrinsische Permeabilität,  $k$  für alle Salzgesteine in der Größenordnung von  $k < 10^{-21} \text{ m}^2$  (/BEC 04/, /DUE 03a/, /DBE 10/, /DBE 10a/, /DBE 10b/, /FLA 00/, /HAI 92/, /HAE 02/, /HAW 91/, /HOU 02/, /HOU 03/, /HOU 07/, /IFT 86a/, /KAM 01/, /KAM 09/, /LUX 00e/, /LUX 02/, /MIN 07a/, /MIN 09/, /MYL 99a/, /NOS 01/, /OLI 96/, /PEA 96/, /POP 07/, /POP 10/, /ROT 86b/, /ROT 90/, /ROT 95b/, /SAL 95/, /SLI 85/, /SOP 83/, /STM 90/, /STM 94/, /WIE 99/, /WIE 04/, /WIE 05/). Die Aussage gilt für den nicht geschädigten Salzgesteinsverband und ist unabhängig von der Lithostratigrafie sowie der Evaporitabfolge. Permeabilitätsangaben von  $k < 10^{-22} \text{ m}^2$  liegen im Bereich bzw. unterhalb einer vertrauenswürdigen messtechnischen Bestimmungsgrenze. Die Bestimmungsgrenze hängt auch mit der Anwendbarkeit der für die Auswertung herangezogenen Fließgesetze (z. B. *DARCY*) zusammen. Eine zu berücksichtigende Abgrenzung zum diffusiven Fluss (z. B. *KNUDSEN*) wird in /KUH 89/ aufgezeigt. Die den hydraulischen Fluss beschreibende Filtergeschwindigkeit,  $v$  ist mit *DARCY* und mit *KNUDSEN* über die Porosität,  $\phi$  verknüpft /ROT 04/, /ROT 04a/.

Filtergeschwindigkeit = DARCY-Term + KNUDSEN-Term

$$v = \frac{k}{\eta} \text{grad } p + c_K \frac{\sqrt{T}}{p_v} \cdot \phi \text{grad } p_v$$

$v$	=	Filtergeschwindigkeit, ( $\text{m s}^{-1}$ )
$k$	=	Permeabilität, ( $\text{m}^2$ )
$\eta$	=	dynamische Viskosität von Wasser, ( $\text{Pa s}$ )
$p$	=	hydraulischer Druck, ( $\text{Pa}$ )
$c_K$	=	Knudsen Faktor, ( $\text{m}^2 \text{K}^{-0.5} \text{s}^{-1}$ )
$T$	=	Temperatur, ( $\text{K}$ )
$p_v$	=	Wasserdampfpartialdruck, ( $\text{Pa}$ )
$\phi$	=	Porosität, (-).

Ob *DARCY*- oder *KNUDSEN*-Fluss überwiegt hängt vom Verhältnis zwischen dem mittleren Porenradius und der „Freien Weglänge“ der Moleküle des Fluides ab. Im Fall, dass der mittlere Porenradius eines Salzgesteines kleiner ist als die „Freie Weglänge“ des Fluides ist der *DARCY*-Fluss vernachlässigbar, gleiches gilt für den Zweiphasenfluss bei dem zusätzlich die Benetzungseigenschaften zu berücksichtigen sind. Nach /KUH 89/ dominiert bei einer intergranularen Porosität von  $0,175 \cdot 10^{-3}$  [-] im nicht geschädigten Salzgesteinsverband der *KNUDSEN*-Fluss. Für

die Angabe einer Filtergeschwindigkeit ist die Kenntnis der intrinsischen Permeabilität und des hydraulischen Potentials erforderlich.

### 7.2.1 Definition

Allgemein werden die hydraulischen Eigenschaften eines porösen Gesteins durch die **Permeabilität,  $k$**  unter Verwendung des Fließgesetzes nach DARCY bzw. abweichend die von geklüfteten Gesteine über die Kluftöffnungsweite beschrieben (CUBIC Law, /WIT 79/, /KAM 09/).

#### Anhydrit, Salztone

Im geschädigten Gesteinsverband kommen ausschließlich Kluft-Permeabilitäten /KAM 05/ vor, die nur bei bekannter Kluftöffnungsweite angegeben werden kann. Im ungeschädigten Gebirge liegt die intrinsische Permeabilität im Bereich der von Salzgesteinen.

Tab. 1: Dokumentierte nicht gewichtete Permeabilitätswerte für Salzgesteine für nicht geschädigten / geschädigten Bereiche

Mineral / Gesteinstyp	Werte Anzahl	Max	Min
		<b>Permeabilität, <math>k</math> [<math>m^2</math>]</b>	
z3; Grauer Salzton	3	1,0 E-18	1,0 E-23
z4; Roter Salzton	1	1,0 E-21	1,0 E-21
Steinsalz, allgemein	147	1,0 E-11	1,0 E-25
z3; Leine-Steinsalz	14	1,0 E-16	1,0 E-23
z2; Staßfurt-Steinsalz	9	1,0 E-15	1,0 E-23
Sylvinit	2	1,0 E-16	1,0 E-23
Carnallitit	1	1,0 E-22	1,0 E-22
Anhydrit	50	1,0 E-06	1,0 E-24

Durch den Bergbau induzierte Spannungsumlagerungen führen zur Schädigung des Gefüges der Salzgesteine /ALK 08/, /ALK 10/, /EBE 08a/, /IfG 10/, /LUX 02/, /MIN 07a/, /MIN 09/, /POP 01/, /POP 07c/, /PUS 02/. Gefüge- und damit Permeabilitätsänderungen korrelieren mit den **Differenzspannungen** bzw. der Ausdehnung des gestörten Bereiches (z. B. Auflockerungszone, ALZ) /DBE 10a/, /DUE 03a/, /EBE 07/, /JOC 08/, /LUX 02/, /LUX 05/, /INN 03/, /SUL 07c/, /WIE 04/, /WIE 98/. Im Weiteren führt die Schädigung zu einer Vergrößerung der Porosität und damit zu einer Erhöhung der Permeabilität /IfG 10/, /LUX 02/, /POP 01/, /POP 07/, /POP 07c/, /PUS 02/, /SUL 07c/. Eine Schädigung durch geochemische Umwandlungsprozesse ist sekundärer Natur /VOI 08/. Eine Abhängigkeit der Permeabilität von Lösungsprozessen ist in der Literatur nicht dokumentiert.

Angaben zum Einfluss von Sättigungen auf die relativen Permeabilitäten und **Kapillardrücke** beschränken sich auf Laborversuche /WIE 98/. Das Auftreten einer mobilen fluiden Phase ist für das ungeschädigte Salzgestein, mit Ausnahme begrenzter Zuflüsse lauge- bzw. gasgefüllter Taschen / Nester, in der Literatur nicht ausgewiesen. Auch fehlen in der Literatur Hinweise auf Porendruckmessungen im ungeschädigten Gebirge, die eine Aussage über Sättigungsverhältnisse zu lassen würden. Angaben über die Sättigung und damit zur **relativen Permeabilität** sind aus diesem Grund nicht möglich und auf geschädigte Bereiche begrenzt. Alternativ sind zur Beschreibung relativer Permeabilitäten und Kapillardruck-Sättigungsbeziehungen die konstitutiven Beziehungen -wie bei Salzversatz (EBS)- nach BROOKS-COREY und VAN GENUCHTEN heranzuziehen /KRO 09/.

Die aufgeführten Werte resultieren überwiegend aus experimentellen Untersuchungen an Salzkernen aus dem Forschungsbergwerk ASSE /HAW 89a/, /IFG 04/, /IFT 86a/, /JOC 95/, /KES 86/, /LUX 02/, /ROT 95b/, /STM 94/, /WIE 98/. Einzelwerte sind für Bernburg / Pöthen / Sigmundshall /FLA 00/, /KAM 01/, /KAM 02/, /KAM 99/, /KAM 05/, /KAM 09/, /POP 07c/, /SAL 95/, /SLI 85/, /WIE 05/, Teutschenthal, /IFG 10/ und GORLEBEN /POP 01/ repräsentativ. In der Regel sind keine spezifischen Angaben zur Lithostratigrafie des Zechsteins bzw. der Evaporitfolge aufgeführt.

### 7.2.2 Auswertung

Der Literatúrauswertung für die Permeabilität und der Porosität liegen die o. g. experimentellen Untersuchungsergebnisse zu Grunde. Die Untersuchungen erfolgten im Labor an Bohrkernen mittels Durchströmung bei definierten Spannungsbedingungen. In situ sind Packertests in Bohrlochern Grundlage für die Ableitung der Gebirgspermeabilität für Fluide.

Angaben zur Filtergeschwindigkeit, Laugensättigung oder Kapillardruck für Salzgesteine im ungeschädigten Gebirgsverband sind in der Literatur aufgrund fehlender Grundvoraussetzungen nicht vorhanden. Angaben zur Laugensättigung für einen geschädigten Gebirgsverband wie z. B. der ASSE /STO 06/ oder bei Versuchen in der Auflockerungszone /WIE 98/ beruhen auf geoelektrischen Messungen.

### 7.2.3 Salzgesteine

In der gesichteten Literatur sind Angaben zur Permeabilität für Steinsalz allgemein, Staßfurt- (z2), Leinefolgen (z3), Carnallitit, Sylvinit und Anhydrit sowie Salzton aufgeführt. Unterschiede in der intrinsischen Permeabilität von unbeschädigtem Salzgestein sind durch die Messmethodik be-

gründet. Für geschädigte Bereiche (Auflockerungszone, ALZ, Excavation Damaged / Disturbed Zone, EDZ) bestehen funktionale Zusammenhänge zwischen der Permeabilität und dem Spannungszustand im Gebirge sowie der Permeabilität und der Porosität. Die in der o. g. Literatur aufgeführten Abhängigkeiten in sind /ALK 08/ zusammengefasst.

Tab. 2: Übersicht über die BEW-Permeabilität und die BEW-Porosität für ungeschädigte Salzgesteine

	Steinsalz	Kalialz	Anhydrit	Salzton	Hartsalz
$k$ , ASSE	< 1 E-21	-/-	-/-	-/-	-/-
$k$ , GORLEBEN	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
$k$ , ERAM	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
$k$ , Virtus	< 1 E-21	< 1 E-21	< 1 E-21	< 1 E-21	< 1 E-21
$\phi$ , Virtus [%]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02

7.2.4 Empfehlung für Best-Estimate-Werte (BEW)

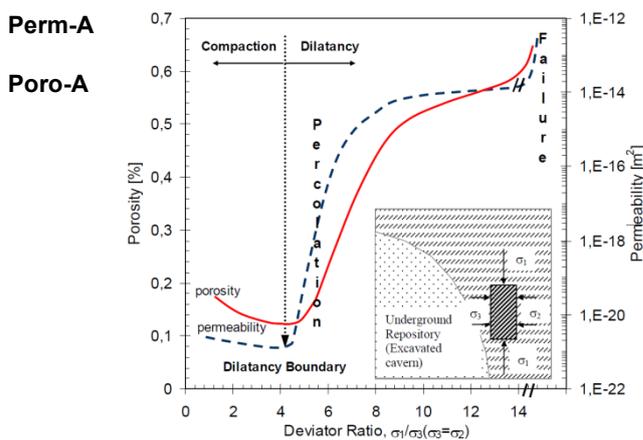
Die vorliegende Wertesammlung weist für alle **ungeschädigten** Evaporite dieselbe Größenordnung für die intrinsische Permeabilität auf. Daher wird für die Standorte ASSE und VIRTUS die Angabe eines einheitlichen Permeabilitätswertes empfohlen. Für GORLEBEN und ERAM waren für die intrinsische Permeabilität keine Werte verfügbar.

Die Auswirkung bergbaulicher Tätigkeiten auf die **Schädigung der Salzgesteine** wird in /ALK 08/ übersichtsmäßig zusammengefasst. Beschrieben wird die Ausbildung einer Auflockerungszone im Nahbereich von Grubenräumen unter Einbeziehung der Änderung der Tragfähigkeit und der hydraulischen Eigenschaften der Salzgesteine. In Abhängigkeit von der minimalen Hauptspannung und bei Überschreitung einer kritischen Dilatanzgrenze entstehen Rissnetze (intergranulare Porosität), die zur Änderung der intrinsischen Permeabilität führt. Diese kann nach /ALK 08/ eine Erhöhung um Zehnerpotenzen bedeuten. Die Permeabilitäts-erhöhung beginnt mit dem dilatanten Verhalten und reicht von ca.  $10^{-21} \text{ m}^2$  bis  $10^{-14} \text{ m}^2$ . Die allgemeine Gültigkeit von Perkolationsmodellen für spröde deformierte, geklüftete Gesteine stellt /ALK 08/ in Frage. Messwerte für geschädigte Anhydrite (/KAM 05/, /SAL 95/) und Salztone (SAL 95/) sind standortspezifisch.

Funktionale Beziehungen bestehen nach /ALK 08/ und /WIE 98/ zwischen der Permeabilität mit...

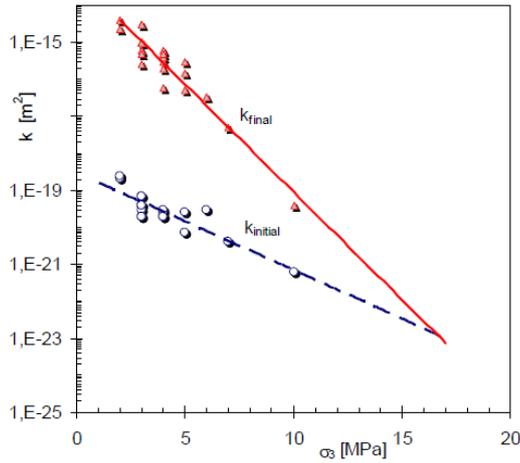
- ...dem Spannungszustand
- ...der Porosität
- ...der Ausdehnung der Auflockerungszone

und sind in den nachfolgenden Diagrammen zusammengestellt.



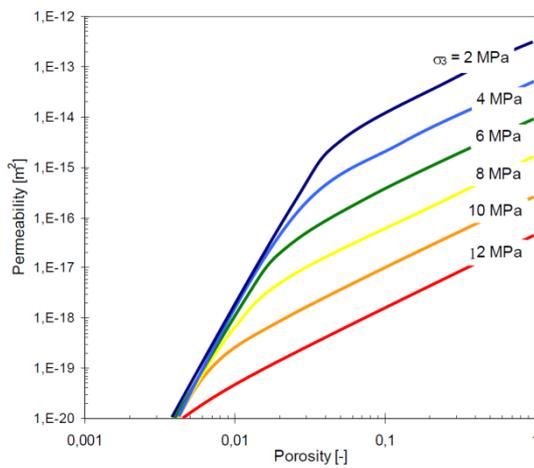
Porositäts-Permeabilitäts-Verhalten von Salzgestein in Abhängigkeit von den deviatorischen Spannungsbedingungen /ALK 08/, /ALK 07/.

Perm-B



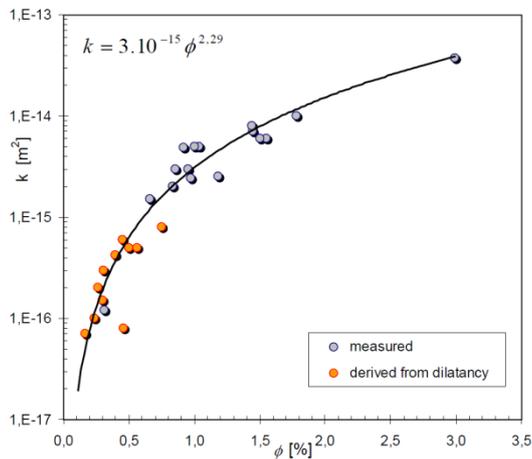
Ausgangs- und Endpermeabilität in Abhängigkeit von der minimalen Hauptspannung /ALK 08/, /PUS 02/

Perm-C



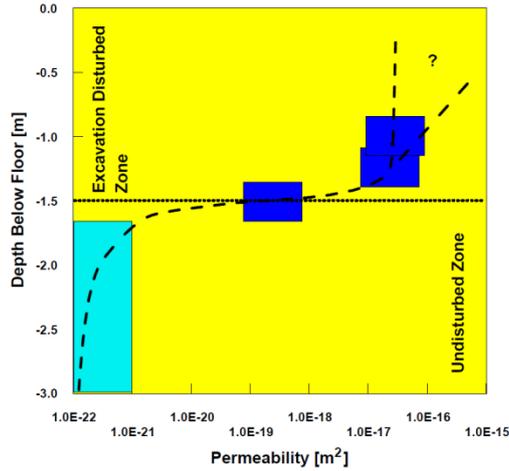
Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung /ALK 08/, /POP 07/

Perm-D



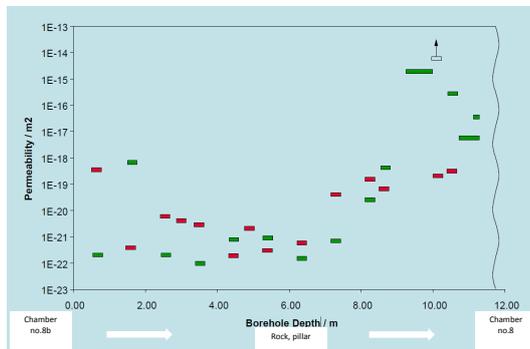
Endpermeabilitäten als Funktion der Porosität /ALK 08/, /PUS 02/

Perm-E



Permeabilitätsverteilung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Strecke (hier speziell zur Sohle) /WIE 98/

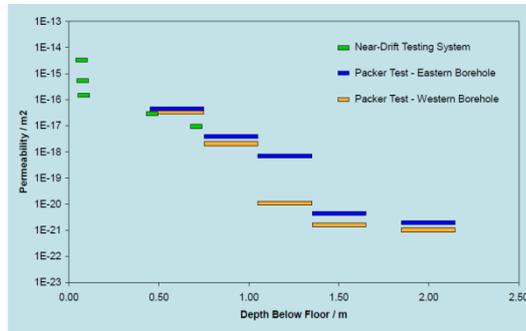
Perm-F



Permeabilitätsverteilung gemessen im Pfeilerbereich zwischen zwei Kammern / ASSE nach /WIE 04/

Abb. 4-17

Perm-G



Permeabilitätsverteilung gemessen in der Sohle / ASSE nach /WIE 04/

Abb. 4-23

/STM 90/

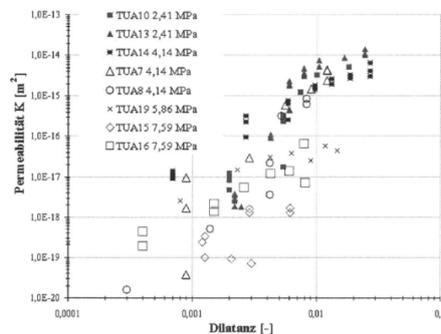


Bild 6.5 Gemessene Permeabilitäten in Abhängigkeit von Minimalspannung und Dilatanz nach Stormont (1990)

aus /HOU 02/, S.177

**7.2.5 Literaturverzeichnis**

- /ALK 07/ H. Alkan, Y. Cinar, G. Pusch Rock Salt Dilatancy Boundary From Combined Acoustic Emission and Triaxial Compression Tests, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 44, Nr.1, 108-120, Jan 2007
- /ALK 08/ Alkan, H. & Müller, W (2008): Numerical Modelling of Dilatancy Induced Percolative Permeation in Rock Salt, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Köln.
- /ALK 10/ Alkan, H., Müller, W., Minkley, W., Jobmann, M. (2010): A Benchmarking of the Numerical Approaches for the Stress-Dilatancy-Permeability Relationship in EDZ of Rock Salt, Solution Mining Research Institute Fall 2010 Technical Conference Leipzig, Germany.
- /BEC 04/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F. D., (2004): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project), European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 20621EN, Luxembourg.
- /DBE 10/ DBE, (2010): Ergänzende mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnungen zur Nachweisführung für Abdichtbauwerke im Steinsalz, 9M/22310171/ECC/GH/LD/0007/01, Stand 23.07.2010.
- /DBE 10a/ DBE (2010): Untersuchung der Kontaktzone am ASSE-Vordamm – Gesamtinterpretation, 9M/22310131/ECC/GH/BZ/0021/01, Stand 15.07.2010.
- /DBE 10b/ DBE (2010): Untersuchung der Kontaktzone am ASSE-Vordamm – Zusammenfassung und Interpretation der Messergebnisse 9M/22310131 / ECC/GH/BZ/0035/01, Stand 03.05.2010.
- /DUE 03a/ Düsterloh, U.; Lux, K.-H. (2003): Mechanische und hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des konturnahen Gebirges in Verbindung mit der Planung von Damm- und Verschlussbauwerken im Salinar. In: Handbuch Umweltwissenschaften, Ausgabe 2003/2004, S. 111 – 120, ISBN 3-9803983-5-8.
- /EBE 07/ Eberth, S.; Lux, K.-H. (2007): Fundamentals and first application of a new healing model for rock salt, Proceedings of the 6th conference on the mechanical behaviour of salt, in: The Mechanical Behavior of Salt, Balkema, Taylor & Francis, Hannover.
- /EBE 08a/ Eberth, S. (2008): Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge, Heft 15, 226 Seiten.
- /FLA 00/ Flach, D. (2000): Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON), Förderkennzeichen 02E8765, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-160.
- /FRO 95/ Fröhlich, H. (1995): Bestimmung des Diffusions- und Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus: Abschlußbericht, Förderkenn-

zeichen 02E84623, gemeinsamer Bericht mit 02E84629, Battelle-Ingenieurtechnik GmbH, Eschborn

- /FRO 03/ Fröhlich, H., Voigt, W., Suworow, T., Elliger, C., Hampe, M. J. (2003): Untersuchung der Durchlässigkeit von kompaktiertem Salzgrus und Salzgestein gegenüber Laugen bei HAW- und DE-typischen Temperaturen, 6. Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Karlsruhe, 27. – 28. Mai 2003, FZKA Nr. 8, S. 151-173.
- /HAE 02/ Häfner, F., Voigt, H.-D., Behr, A., (2002): Zeitliche Veränderung der Ausdehnung und der hydraulischen Eigenschaften von Auflockerungszonen um Hohlräume in Gesteinen mit visko-plastischen Eigenschaften, Abschlussbericht; Anlage zum Bericht: Kamlot, P., Böhnel, H., Bock, H. 2002: Untersuchung gesteinsmechanischer Eigenschaften von Sylvinit, IfG Leipzig.
- /HAI 92/ Haijink, B., (1992): Pilot test on radioactive waste disposal in underground facilities, Commission of the European Communities, nuclear science and technology, EUR 13985EN, Luxembourg.
- /HAW 89a/ HAW-Projekt, Demonstrationseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse, 1. Halbjahresbericht 1989, Gem. Bericht der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München und des Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland, Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung München, Institut für Tief- lagerung, IfT-Abteilungsbericht 9/89.
- /HAW 91/ HAW-Project, (1991): Test disposal of highly radioactive radiation sources in the ASSE salt mine Fed. Rep. of Germany, Interim Report May-December 1990, Joint Report of GSF-Institut für Tief- lagerung - Stichting Energieonderzoek Centrum.
- /HOU 02/ Hou, Z., (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung, Heft 13, 366 Seiten.
- /HOU 03/ Hou, Z., Lux, K.-H., Alkan, H., Pusch, G. (2003): Salzmechanik – hydraulisch- mechanische Kopplung: Anwendungspotential für Endlager, Untertagedeponien und sonstigen Bergbau, 6. Statusgespräch Untertägige Entsorgung, Karlsruhe, 27. Und 28. Mai 2003, FZKA-PTE Nr. 8, S. 175-192.
- /HOU 07/ Hou, Z., Wolters, R., Rokahr, R., Zapf, D., Salzer, K., Günther, R.-M., Minkley, W., Pudewills, A., Heemann, U., Schulze, O., Zetsche, F., Hampel, A. (2007): Comparison of advanced constitutive models for the mechanical behavior of rock salt - results from a joint research project, II. Numerical modeling of two in situ case studies and comparison, In: Lux, K.-H., Minkley, W., Wallner, M., Hardy, Jr., H.R. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics, Proc. of the 6th Conf. on the Mech. Behavior of Salt, Hannover, p. 89-98, Lisse, Francis & Taylor (Balkema).
- /IFG 04/ Anwendungsbezogene Untersuchungen an einer Pilotströmungsbarriere – Labortests am Sorelbeton und In-situ Untersuchungen – Abschlußbericht, Dok.-Kennz.: A/01VER/GB/FU/0005/00, Stand: 27.02.2004.

- /IFG 10/ IfG, (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig.
- /IFT 86a/ GSF-Institut für Tief Lagerung (1986): Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse, Abschlussbericht 1983 – 1984, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kerntechnik und –technologie, EUR 10489 DE.
- /JOC 95/ Jockwer, N., Rothfuchs, T. (1995): Investigations and modelling of fluid release from rock salt at elevated temperature, Proc. Workshop Testing and Modelling of Thermal, Mechanical and Hydrogeological Properties of Host Rocks for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, EUR 16219 EN, CEC, Brussels/GSF 86/GSF-Institut für Tief Lagerung, (1986): Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk ASSE, Abschlussbericht 1983 – 1984, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kerntechnik und –technologie, EUR 10489DE.
- /JOC 08/ Jockwer, N., Wieczorek, K. (2008): ADDIGAS - Advective and diffusive gas transport in rock salt formations, final report, Förderkennzeichen BMWi 02E9824, GRS Braunschweig, ISBN 978-3-939355-08-3.
- /KAM 99/ Kamlot, P. et al. (1999): Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salztun (BARITON), IfG Leipzig, BMBF-Abschlußbericht 02E8755 mit Beiträgen von Manthei, G., Philipp, J. und Fechner, T.
- /KAM 01/ Kamlot, P., Flach, D. (2001): Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen, Proceedings 5. Projektstatusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen, PtWT+E, Forschungszentrum Karlsruhe.
- /KAM 02/ Kamlot, P., Manthei, G., Bock, H. (2002): Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN), Förderkennzeichen BMBF 02E9158, IfG Leipzig.
- /KAM 05/ Kamlot, P. et al. (2005): Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN II), BMWA-Abschlußbericht 02E9582 mit Beiträgen von Manthei, G., Bock, H.
- /KAM 09/ Kamlot, P. (2009): Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierenfunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk, Habilitationsschrift TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2009-3, ISSN 1611-1605.
- /KES 86/ Kessels, W., Feddersen, H.-K., Flach, D., Flentge, I., Frohn, C., Gies, H., Gommlich, G., Hahn J., Hente, B., Jockwer, N., Klarr, C., Pfeifer, S., Rothfuchs, T., Schmidt, M.W.; Wieczorek, K. (1986): Results of Temperature Test 6 in the ASSE Salt Mine, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kernforschung und technologie, Bericht EUR 10827EN, I + II.

- /KRO 09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, Ch., Xie, Mingliang, 2009: Restporosität und –permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM – Phase 1, GRS, Köln.
- /KUH 89/ Kuhn, K., Rothfuchs, T. (1989): In situ-experiments on the disposal of High-level radioactive wastes (HAW) at the Asse salt mine Federal Republic of Germany. Proc. WM Symp., Tucson (USA), Vol. 1, pp 567-573.
- /LUX 00e/ Lux, K.-H.; Hou, Z. (2000): Geomechanical Design of underground Waste Repositories in Salt Mine. Proceedings of Underground Construction 2000, Cracow - Poland, 2000.
- /LUX 02/ Lux, K.H., Xie, Z., Hou, Z., Düsterloh, U. (2002): Mechanische und hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des konturnahen Gebirges in Verbindung mit der Planung von Damm- und Verschlussbauwerken im Salinar, Teil A, mechanische Modellierung und mechanisch-hydraulische Tragwerks analyse, Abschlussbericht, Clausthal.
- /LUX 05/ Lux, K.-H. (2005): Zum langfristigen Tragverhalten von verschlossenen solegefüllten Salzkavernen – ein neuer Ansatz zu physikalischer Modellierung und numerischer Simulation: Theoretische und laborative Grundlagen, Erdöl, Erdgas, Kohle, 121. Jg., Heft 11, S. 414-421.
- /MIN 07a/ Minkley, W., Popp, T. (2007): Das Gasfracanalogon Merkers infolge des Gebirgschlages 1989 - Wiederherstellung der Barriereintegrität, GRS Workshop: Gase im Endlager, Berlin 17. - 18. April 2007, GRS-242.
- /MIN 09/ Minkley, W. (2009): Final Disposal in Rock Salt and Barrier Integrity, Conference on the Impact of Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) Processes on the Safety of Underground Radioactive Waste Repositories, Luxembourg, September 29 – October 1, 2009.
- /MYL 99a/ Müller-Lyda, I. (1999): Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-151, ISBN 3-931995-10-0.
- /NN 03/ N.N. (2003): Clausthaler Kolloquium zur Endlagerung 2003, Heft 14, 242 Seiten.
- /NOS 01/ Noseck, U (2001): Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern, Förderkennzeichen BMWi 02 E 8855, GRS-153, GRS Braunschweig, ISBN 3-931995-15-1.
- /OLI 96/ Olivella, S., Carrera, J., Gens, A., Alonso, E. (1996): Porosity variations in saline media caused by temperature gradients coupled to multiphase flow and dissolution/precipitation, Transport in Porous Media 25, p. 1-25, 1996.
- /PEA 96/ Peach C.J., Spiers C.J. (1996): Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock, Tectonophysics 256, 101-128, Elsevier.

- /POP 01/ Popp, T., Kern, H., Schulze, O. (2001): The evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation.-J. Geophys. Res. 106 , No. B3, 4061-4078.
- /POP 07/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, H., Minkley, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, Forschungsvorhaben SR 2470.
- /POP 07c/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, H., Minkley, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, Forschungsvorhaben SR 2470.
- /POP 10/ Popp, T., Salzer, K., Weise, D., Wiedemann, M. (2010): Hydraulische Barriereintegrität von carnallitischem Salzgebirge, Kali und Steinsalz, Heft 2/2010.
- /PRE 97/ Pusch, G, Reitenbach, V (1997): Messung hydraulischer Parameter des Zweiphasenflusses an Steinsalzproben. - Abschlußbericht, Clausthal-Zellerfeld, (in /WIE 98/).
- /PUS 02/ Pusch, G., Alkan, H., Cinar, Y. (2002): Mechanische und Hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des Gebirges in Verbindung mit der Planung von Verschlussbauwerken im Salinar. Teil B: Hydraulische Modellbildung, Abschlussbericht, Clausthal.
- /ROT 86b/ Rothfuchs, T. (1986): Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter In-situ-Bedingungen, Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kernforschung und Technologie, Bericht EUR 10392 DE, GSF-Bericht 30/85.
- /ROT 90/ Rothfuchs, T., Duijves, K. A.\*), Müller-Lyda, I. (1990): The HAW-Project: Demonstration Facility for the Disposal of High-Level Waste in Salt, Interim Report 1988 - 1989, GSF-Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht 15/90, Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 13399 EN, \*) ECN.
- /ROT 95b/ Rothfuchs, T., Prij, J., Kröhn, K.-P., van den Horn, B.A., Wieczorek, K., 1995: DEBORA-Project - Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste, Final Report Phase I 1991-1995, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht 28/95.
- /ROT 04/ Rothfuchs, T., Bollingerfehr, W., Droste, J., Herbert, H.-J., Kröhn, K.-P., Wieczorek, K. Zhang, C.-L. (2004): A Basis for Evaluation and Developing Concepts of Final Repositories for High-Level Radioactive Waste. CROP. Cluster Repository Project, GRS-201, Köln, ISBN 3-931995-68-2.
- /ROT 04a/ Rothfuchs, T., Droste, J., Herbert, H.-J., Kröhn, K.-P., Wieczorek, K., Zhang, C. (2004): CROP Cluster Repository Project. A Basis for Evaluation and Developing Concepts for Final Repositories for High-Level Radioactive Waste, German Country Annexes, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-201, Köln

- /ROT 12/ Literaturliste zur Erfassung und Ableitung qualitätsgesicherter Parameter-werte für numerische Simulationen von Prozessabläufen in Untertagelabors- bzw. Endlagern für radioaktive Abfälle. Stand 2012-01-09. <intern>
- /SAL 95/ Salzer, K., Menzel, W. et al. (1995): Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern für umweltgefährdende Abfälle in Salzformationen der flachen Lagerung im Zusammenhang mit dem Verformungs- und Bruchverhalten in und um Grubengebäude, Abschlußbericht zum BMBF Vorhaben 02 C 00628, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 10.10.1995.
- /SER 02/ Scherzberg, H. (2002): Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien - Technikums- und in situ-Versuche am Dreistoffsystem Polymineralisches Salzgestein-Versatzstoff-Fluid, Förderkennzeichen BMBF 02E9057, K-UTEC, Sondershausen
- /SLI 85/ Schlich, M.-K. (1985): Simulation der Bewegung von im natürlichen Steinsalz enthaltener Feuchte im Temperaturfeld, Teil 1 Text und Teil 2 Abbildungen, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kerntechnik und -technologie, EUR10672DE, Dissertation D-82 RWTH Aachen, Aachen.
- /SOP 83/ Schopper, J.R. et. al. (1983): Petrophysikalische Untersuchungen an Salzproben zur Permeabilität, Porosität und inneren Oberfläche, 2. Halbjahresbericht, GSF.
- /STM 90/ Stormont, J.C. (1990): Gas Permeability Changes in Rock Salt During Deformation, Dissertation. (*University of Arizona, Tucson, 1991*)
- /STM 94/ Stockmann, N., Beinlich, A., Droste, J., Flach, D., Gläß, F., Jockwer, N., Krogmann, P., Miehe, R., Möller, J., Schwägermann, F., Wallmüller, R., Walter, F., Yaramanci, U., 1994: Dammbau im Salzgebirge - Abschlußbericht Projektphase II, Berichtszeitraum 01.07.1998-31.12.1992, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht 18/94.
- /STO 06/ Stockmann, N., Marggraf, G., Taylor, T., Teichmann, L., Heydorn, M., Hensel, G. (2006): Zusammenstellung und Bewertung der ab 1988 im Grubengebäude der Schachanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase. Projekt Langzeitsicherheit Asse, Gesellschaft für Umwelt und Gesundheit, GSF-Forschungsbergwerk Asse.
- /SUL 07c/ Popp, T., Schulze, O. (2009): Application of the dilatancy concept to ascertain the damage and healing behaviour of rock salt, REPOSAFE - International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, Braunschweig, November 6 – 9, 2007. Conference Proceedings, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-S-49 (2009, April) p. 43-56, ISBN 978-3-939355-19-9.
- /VOI 08/ Voigt, H.-D., Kawka A. (2008): Permeabilitätsverhalten von Carnallitischem Salzgebirge gegenüber hochkonzentrierten Lösungen. Kali und Salz, Hf.2/2008, Kassel. ISSN 1614-1210.
- /WIE 98/ Wieczorek, K., Zimmer, U. (1998): Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge, Abschlußbericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2651, Köln.

- /WIE 99/ Wieczorek, K., Zimmer, U. (1999): Hydraulic behavior of the excavation disturbed zone around openings in rock salt, ICEM' 99 - 7th International conference on radioactive waste management and environmental remediation, Nagoya, Japan, September 26-30, 1999, JSME/ASME International.
- /WIE 04/ Wieczorek, K., Schwarziameck, P. (2004): Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand, Förderkennzeichen BMWA 02E9118, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-198, Braunschweig, ISBN 3-931995-65-8.
- /WIE 05/ Wieczorek, K., Mieke, R. (2005): Barriereverhalten von Anhydrit: Phase 2 - BARIANO; Untersuchungen bei großräumigen Spannungsumlagerungen; Abschlussbericht, Förderkennzeichen BMWA 02 E 9592, GRS-209, GRS Braunschweig, ISBN 3-931995-76-3.
- /WIT 79/ Witherspoon, P.A., Wang, J., Iwai, K., Gale, J. (1979): Validity of cubic law for flow in a deformable rock fracture. –Report LBL-9557, Lawrence Berkley Laboratory, California, USA.



## 8 Permeabilität von dilatantem Salzgestein

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturlauswertung</b>
<b>Standort</b>	<b>Gorleben, Morsleben</b>
<b>Material:</b>	<b>Steinsalz</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE Permeabilität in dilatantem Salz.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Permeabilität</b>
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Ulrich Heemann, unterstützt von W. Gräsle</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-11-30</b>

8.1 Protokoll

Untersuchtes Phänomen		Permeabilität dilatanten Steinsalzes
Material	Standort	Stratigrafie, Symbol
Steinsalz	Morsleben, Gorleben, <b>Asse</b>	

Referenzfunktion	Parameter	Erläuterung
$k = \frac{k_{tp}}{\left(\frac{\phi}{\phi_{tp}}\right)^{-n_1} + \left(\frac{\phi}{\phi_{tp}}\right)^{-n_2}}$ $k_{tp} = a_k \text{Exp}(-b_k P_{\min})$ $\phi_{tp} = a_\phi \text{Exp}(-b_\phi P_{\min})$ $P_{\min} = -\sigma_{\max}$	$a_k = 4.27 E - 14 m^2$ $b_k = 1.26 MPa^{-1}$ $a_\phi = 0.0263$ $b_\phi = 0.3093 MPa^{-1}$ $n_1 = 4$ $n_2 = 1.07$	Die Permeabilität $k$ ist hier eine skalare Funktion der durch Dilatanz hervorgerufenen Porosität $\phi$ und der anliegenden minimalen Hauptdruckkomponente $P_{\min}$ .

Literatur	
Beschreibung	
Anmerkungen	Der bisher erbrachte Ausdruck ist gültig bei konstanter minimaler Hauptdruckkomponente. Das Verhalten bei sich ändernder Spannung ist nicht eindeutig definiert.

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte	Erläuterungen
		Die links dargestellten Kurvenverläufe zeigen die Entwicklung der Permeabilität als Funktion der Porosität und der minimalen Hauptdruckkomponente

Numerische Modellierung	Constitutive model	Code
		JIFE, ADINA, ...

Bewertung	
dataquality	
datasource	

## 8.2 Begründung

### 8.2.1 Zur Phänomenologie der Permeabilität

Die hier untersuchte physikalisch/technische Größe der Permeabilität beruht auf dem Ansatz von Darcy, dass bei gegebener Durchströmbarkeit eines porösen Körpers der sich einstellende Strom  $\bar{j}$  proportional zu einem treibenden Druckgradienten  $\bar{\nabla}p$  ist, bestimmt weiterhin durch die Viskosität  $\eta$  des Fluides und einer Körper-bezogenen Konstante  $k$  (Permeabilität), die als Materialeigenschaft dieses Festkörpers zu werten ist.

$$\bar{j} = -\frac{k}{\eta} \bar{\nabla}p \quad (1.1)$$

Die Permeabilität ist durch die Geometrie (Porosität, Vernetzung der Poren, Porengröße und Durchmesser der Verbindungskanäle, Tortuosität) der Porenräume im Festkörper bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass obige Kenngrößen sich infolge starker mechanischer Belastung ändern können.

Jungfräuliches Salz hat aufgrund seiner ausgeprägten Kriecheigenschaften und des über Jahrmillionen dauernden überlagernden Gebirgsdrucks effektiv sämtliche Wegsamkeiten, die sich bei der ursprünglichen Genese gebildet haben, geschlossen. In diesem Zustand zeigen auch technische Messungen Permeabilitäten in der Größenordnung  $k \leq 10^{-21} m^2$ . Bei derart geringen Werten ist bereits die Grenze der Gültigkeit des Darcy-Ansatzes (Gl. 1.1) näherungsweise erreicht. Effektiv bedeutet ein solch niedriger Wert, wenn er unverändert bleibt, dass ein solcher Körper mit den Abmessungen eines typischen Endlagers und einem Druckgradienten, der durch die Größenordnung  $1 MPa/100 m$  bis  $10 MPa/100 m$  gekennzeichnet ist, als technisch dicht gelten kann.

Wenn das Salz infolge bergbaulicher Tätigkeiten in der Nähe der neuen Hohlräume jedoch eine hinreichende Belastung erfährt derart, dass die Dilatanzgrenze überschritten wird, ist mit der Ausbildung von Mikrorissen und bei hinreichender Rissdichte auch mit einer sich einstellenden relevanten Permeabilität zu rechnen.

In älteren Arbeiten (Peach 1991, Stormont & Daemen 1992) wurde die Permeabilität dilatierenden Salzes üblicherweise als Potenz der Porosität oder in einer vergleichbaren Beziehung dargestellt. Durch eine weitergehende Untersuchung von Popp (2002) wurde erkannt, dass die Permeabilitätsentwicklung in zwei Bereiche aufgeteilt werden kann. Der erste ist durch einen starken Anstieg der Permeabilität mit zunehmender Dilatanz gekennzeichnet (Potenzansatz). Dieser ist durch das Phänomen der Perkolation, also der Wirkung zunehmender Vernetzung, bestimmt. Ab einer hinreichenden Rissdichte bzw. Porosität ist die Vernetzung jedoch so dicht, dass praktisch alle potentiellen Fließwege genutzt werden können und die Permeabilität nunmehr ungefähr linear mit der Porosität ansteigt. Tatsächlich können durch die wirksame Spannung auch die Riss-

länge und –öffnung und somit der lokale Fließwiderstand und die Vernetzung maßgeblich beeinflusst werden, so dass die Spannung ebenfalls in die funktionale Abhängigkeit der Permeabilität aufgenommen werden muss.

In der Regel wird die Permeabilität als Skalar beschrieben. Gerade im Falle spannungsbedingter Schädigung handelt es sich jedoch in der Regel um eine tensorielle Größe, nimmt also unterschiedliche Werte in unterschiedlichen Richtungen an. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass mit der Ausrichtung der Mikrorisse unter einem gegebenen Spannungsfeld auch die Fließwege durch diese Richtung definiert werden. Bei einem hydraulischen Druckgradienten quer zur Hauptausrichtung der Mikrorisse ist somit mit deutlich längeren Fließwegen zu rechnen, die zu einem entsprechend erhöhten Fließwiderstand führen. Dieser Umstand muss ggf. durch einen Tortuositätstensor beschrieben werden.

$$k_{ij} = k_0 t_{ij} \quad (1.2)$$

In vielen Fällen sind die sich einstellenden durchlässigen Bereiche aber geometrisch derart begrenzt, dass die Strömung zwangsweise kanalisiert ist und somit nur die Permeabilität in Fließrichtung bedeutsam wird, die ggf. durch einen skalaren Wert beschrieben werden kann.

In der Realität eines Bergwerkes treten häufig auch Situationen auf, in denen die Poren oder Mikrorisse der Festkörper durch zwei Fluide gefüllt sind, die sich nicht mischen und gegenseitig bei der Bewegung durch die Wegsamkeiten behindern. In Bezug auf ein Endlager sind dies in erster Linie Wasser und Gas. Eine befriedigende Beschreibung der sich einstellenden relativen Permeabilitäten (Zwei-Phasen-Permeabilität) in dilatantem Steinsalz als Funktion der Porosität und des wirksamen Gebirgsdrucks existiert nicht und wird hier auch nicht behandelt.

Hier werden auch nicht Verheilungsprozesse berücksichtigt, die langfristig zu einer Reduzierung der Durchlässigkeiten führen. Weiterhin wird hier die Auflockerung von Steinsalz unter hydraulischem Druck eines Fluides und die sich daraus ergebende Permeabilität nicht behandelt.

## 8.2.2 Messdaten und Auswertefunktionen

Popp (2002) nutzte zur Auswertung der Permeabilität von Steinsalz auch Permeabilitätsmessungen bei recht großen, durch Dilatanz erzeugten Porositäten. Weiterhin bezog er die zusätzlich Wirkung des äußeren Spannungsfeldes auf die Permeabilität mit ein. Leider war der angepasste steile Ast, der der Perkulationswirkung des dichter werdenden Rissnetzes zuzuschreiben ist, inkonsistent an die Daten angepasst. Heemann (2004) konnte diesen Fehler korrigieren und fand

zudem eine Formulierung frei von Sprüngen in der Permeabilitäts-Porositäts-Entwicklung. Die funktionale Beziehung ergab sich demgemäß als

$$k = \frac{k_{tp}}{\left(\frac{\phi}{\phi_{tp}}\right)^{-n_1} + \left(\frac{\phi}{\phi_{tp}}\right)^{-n_2}} \quad (1.3)$$

mit den spannungsabhängigen Parametern

$$\begin{aligned} k_{tp} &= a_k \text{Exp}(-b_k P_{\min}) \\ \phi_{tp} &= a_\phi \text{Exp}(-b_\phi P_{\min}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

$P_{\min}$  stellt dabei die minimale Hauptdruckkomponente der anliegenden Spannung dar mit

$$P_{\min} = -\sigma_{\max} \cdot \quad (1.5)$$

Die Parameter sind gegeben durch

$$\begin{aligned} a_k &= 4.27 E - 14 m^2 \\ b_k &= 1.26 MPa^{-1} \\ a_\phi &= 0.0263 \\ b_\phi &= 0.3093 MPa^{-1} \\ n_1 &= 4 \\ n_2 &= 1.07 \end{aligned} \quad (1.6)$$

Da der Exponent  $n_2$  experimentell nur unzureichend bestimmbar ist, kann hier auch problemlos der theoretisch zu erwartende Wert  $n_2 = 1$  eingesetzt werden. Bei gleicher Porosität wird also die Permeabilität mit ansteigendem minimalem Druck  $P_{\min}$  exponentiell abfallen. Abb. 1 zeigt den Verlauf für unterschiedliche Werte von  $P_{\min}$  als Funktion der Porosität.

Leider machen die Gln. (1.4) keine Aussage darüber, ob damit die Permeabilität durch die Spannung während der Porositätsentwicklung beeinflusst wird oder ob die Beziehung auch bei nachträglichen Druckschwankungen ihre Gültigkeit behält.

Es bleibt zu beachten, dass obige Beziehungen in jedem Fall ihre Gültigkeit verlieren, wenn die minimale Hauptdruckkomponente nennenswert in den Zugspannungsbereich wandert. Spätestens ab einer Zugspannung von 1 MPa ist mit der Bildung von Makrorissen zu rechnen. Das impliziert aber nicht nur bei der Berechnung der Permeabilität gravierende Änderungen, sondern zuvor auch auf der mechanischen Seite.

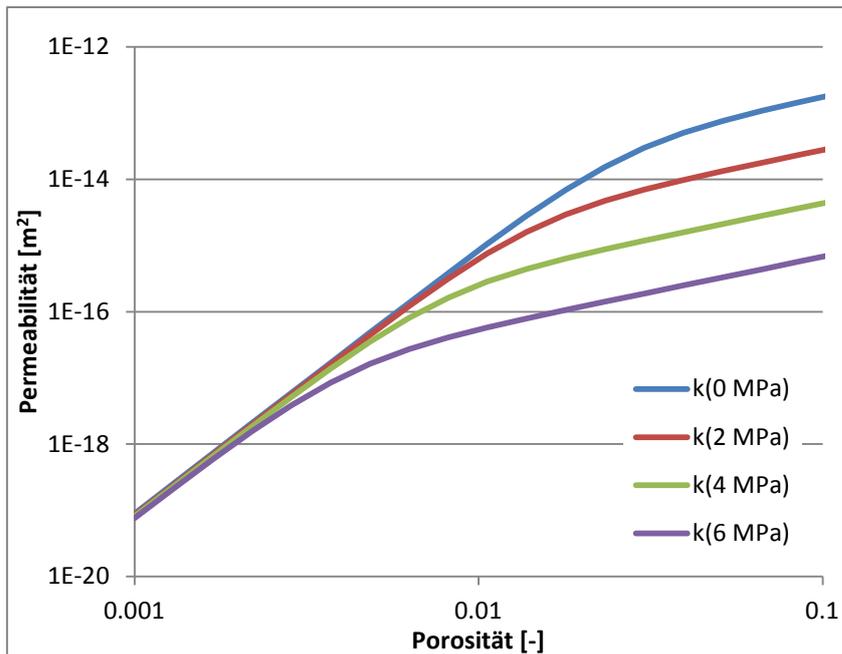


Abb. 1: Entwicklung der Permeabilität als Funktion der Porosität und der minimalen Hauptdruckkomponente.

### 8.2.3 Zusammenfassung und Empfehlung

Jungfräuliches Salz kann in aller Regel als technisch dicht angesehen werden. Bei der Entwicklung von Dilatanz kann durch die Vernetzung der sich ergebenden Mikrorisse eine relevante Permeabilität entstehen, die in ihrer besten bisher bekannten Form durch obige Gleichungen beschrieben werden kann. Trotz der eingangs erwähnten Schwächen wie das Fehlen anisotroper Eigenschaften und der nicht eindeutigen Wirkung der minimalen Hauptdruckkomponenten auf die Entwicklung kann der obige Ansatz als bester bestehender durchaus erfolgreich eingesetzt werden, zumal plötzliche Spannungsänderungen nur in zeitlicher Nähe zu technisch bedingten Eingriffen zu erwarten sind. Langfristig ist mit stabilen Spannungsverhältnissen zu rechnen, auf die obige Beziehung anwendbar ist.

### 8.2.4 Literaturverzeichnis

Heemann, U., Heusermann, S. (2004): Theoretical and experimental investigation on stresses and permeability in the BAMBUS project, Proc. for the Internat. Conf. on Radioactive Waste Disposal 2004, S. 481-488, Berlin

Peach, C.J. (1991): Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks, *Geologica Ultraiectina* 77

Popp, T. (2002): Transporteigenschaften von Steinsalz - Modellierung der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung, *Meyniana* 54, S. 113-129, Veröffentlichungen aus dem Institut für Geowissenschaften der Universität Kiel

Stormont, J.C., Daemen, J.J.K. (1992): Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation. *Int. J. Rock Mech. Sci & Geomech. Abstr.* 29, S. 325-342



## 9      Hydraulische Parameter von EBS-Materialien

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertage-labor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturlauswertung</b>
<b>Material:</b>	<b>EBS / ...</b> - Salzgrus (+Briketts) - Sorelbeton - Salzbeton - Beton - Ca-Bentonit - SVV - Schotter
<b>Datenblatt:</b>	
<b>Parameter:</b>	<b>Hydraulik</b> ...Permeabilität ...Relative Permeabilität ...Porosität ...Kapillardruck-Sättigung ...Tortuosität ...Spezifische Oberfläche - Hydr. Dispersionslänge - Diffusionskoeffizient - Löslichkeit von Gasen - Löslichkeit von Feststoffen - Dynamische Viskosität - Dichte, Fluid
	mit - Best-Estimate-Wert (BEW) - Erläuterung zur Auswahl
<b>Bearbeiter:</b>	<b>H. Kull, R. Mieke</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-07-10</b>

9.1 Protokolle

9.1.1 EBS-Salzgrus (+Brikett)-Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>		Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>	
Salzgrus	Virtus		
Wert <i>frmdata</i>		Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>
$k = a \cdot \phi^b$		m <sup>2</sup>	k

EBS-Salzgrus (+Brikett)-Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/FEI 96/, /MLY 99/	sowie /NOS 01/, /KRO 09/
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	Nach der gesichteten Literatur besteht für Salzgrus ein direkter Zusammenhang zwischen der Permeabilität, k und der Porosität, $\phi$ (gilt für $\phi > 0,3\%$ ) /FEI 96/, /MLY 99/, /NOS 01/. Die Parameter a und b beschreiben phänomenologische Effekte (z.B. Kompaktion, Feuchtegehalt) /NOS 01/, /KRO 09/ und werden aus experimentellen Daten durch Regression bestimmt /MLY 99/. Generell wird k zur Beschreibung einer vom Fluid unabhängigen Permeabilität verwendet.  Salzgrus kann aus verschiedenen Materialien bestehen. Im Allgemeinen wird unter Salzgrus zerkleinertes Steinsalz verschiedener Körnung aus dem Auffahrungsbetrieb verstanden.
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	/FEI 96/, /MLY 99/; Ableitung einer Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung /NOS 01/; Permeabilitäten von Salzgrus; vergleichende Analyse /KRO 09/; Analytische Bewertung phänomenologischer Effekte

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<p>in /FEI 96/, Abb.1, S.10</p>	X	Y	$k = a \phi^b$ mit k Permeabilität, eff.; [m <sup>2</sup> ] a Parameter; [?], [m <sup>2</sup> ] b Parameter; [?] $\phi$ Porosität; [-] nach /MLY 99/ S.43: <b>Salzgrus, trocken</b> a 1,303 10 <sup>-10</sup> b 3,841 <b>Salzgrus, feucht</b> a 7,464 10 <sup>-9</sup> b 5,253
<p>Fig. 4.1.20 Comparison of the permeability of the TSDE backfill samples with data from other investigations performed on Asse backfill</p>			/ROT 03/ S.27 <b>Salzgrus, fine grained</b> a 1,12 10 <sup>-8</sup> b 5,25 <b>Salzgrus, coarse grained</b> a 6,7 10 <sup>-11</sup> b 2,64 <b>Salzgrus, in situ TSDE</b> a 8,0 10 <sup>-11</sup> b 2,5

<p>/SAL 07d/, S.244</p> <p>Figure 6 Porosity-permeability data for dry salt brick material deformed in compression under triaxial loading conditions at room temperature. In addition, the ranges of the datasets of Müller-Lyda (1999) are schematically indicated.</p>		<p>/SAL 07d/, 244</p> $k = k_{intr} \cdot \phi^b$ <p>mit</p> <p><math>k</math> Permeabilität, eff.; [m<sup>2</sup>]</p> <p><math>k_{intr}</math> intr. Permeabilität, [m<sup>2</sup>]</p> <p><math>b</math> Parameter; [?]</p> <p><math>\phi</math> Porosität; [-]</p> <p><b>Salzbrikett</b></p> <p><math>k_{intr}</math> 3,93 10<sup>-20</sup></p> <p><math>b</math> 4,46</p>	
--	--	--	--

Numerische Modellierung		
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt		
<i>Bewertung</i>		
<i>dataquality</i>		
<i>datasource</i>		

KAP 84, ROT 97, MLY 99, NOS 01, ROT 03, ZHA 07, BEC04, BEC99a, GLA 92, GLA 91, KRO 09, ROT 01, ZHA 07, KAM 03, POP 06, SAL 07d, EBE 07, EBE 08, HOU 02, NN 03, NN 95, SAL 07b, SAL 07, FEI 96, /BOL 96, EBE 08, ELL 04, FRO 95,  
keine PDF-HAI 94, DRO 97, KAP 86KAP 86aKAP 86b, ROT 98a,  
fehlt /BLE 84/,/CRI 93//HEE 97//HEE 99//KEL 85//LAN 97//LAN 98a//VEN 84, BRU 99

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

n. a. nicht angegeben

9.1.2 EBS-Sorelbeton-Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>	Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Sorelbeton	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
10 <sup>-20</sup> und 10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup>			

EBS-Sorelbeton-Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/IFG 04/	IFG (2004): Anwendungsbezogene Untersuchungen an einer Pilotströmungsbarriere – Labortests am Sorelbeton und In-situ Untersuchungen – Abschlußbericht, Dok.-Kennz.: A/01VER/GB/FU/0005/00, Stand: 27.02.2004 (entspricht KAM 04 (s.o.))
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata ;InternalRemark</i>	

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz																								
<p>In-situ</p> <table border="1"> <tr><td>Sorelbeton</td><td>13,4</td><td>1,4 · 10<sup>-18</sup></td><td>7,8</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>20,2</td><td>5,7 · 10<sup>-19</sup></td><td>2,0</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>13,9</td><td>1,5 · 10<sup>-18</sup></td><td>7,9</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>67,9</td><td>1,1 · 10<sup>-19</sup></td><td>1,9</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>111,5</td><td>2,7 · 10<sup>-19</sup></td><td>7,9</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>15,3</td><td>7,3 · 10<sup>-19</sup></td><td>2,0</td></tr> </table>	Sorelbeton	13,4	1,4 · 10 <sup>-18</sup>	7,8	Sorelbeton	20,2	5,7 · 10 <sup>-19</sup>	2,0	Sorelbeton	13,9	1,5 · 10 <sup>-18</sup>	7,9	Sorelbeton	67,9	1,1 · 10 <sup>-19</sup>	1,9	Sorelbeton	111,5	2,7 · 10 <sup>-19</sup>	7,9	Sorelbeton	15,3	7,3 · 10 <sup>-19</sup>	2,0	X	Y	nach (/IFG 04/, S.41) $V(t) = \frac{K}{\eta} \cdot A \cdot \frac{dp}{dl}$ K = Permeabilität η = dynamische Viskosität A = Querschnittsfläche dp/dl = Druckgradient über die Länge
Sorelbeton	13,4	1,4 · 10 <sup>-18</sup>	7,8																								
Sorelbeton	20,2	5,7 · 10 <sup>-19</sup>	2,0																								
Sorelbeton	13,9	1,5 · 10 <sup>-18</sup>	7,9																								
Sorelbeton	67,9	1,1 · 10 <sup>-19</sup>	1,9																								
Sorelbeton	111,5	2,7 · 10 <sup>-19</sup>	7,9																								
Sorelbeton	15,3	7,3 · 10 <sup>-19</sup>	2,0																								

			nach (/IFG 04/, Anl.47)	
--	--	--	-------------------------	--

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>
	Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchge-  
führt

<i>Bewertung</i>	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

MHO 11, IFG 04, ~~IFG 06~~  
fehlt: WEI 05

9.1.3 EBS-Salzbeton-Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>	Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Salzbeton	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
$10^{-18} - 10^{-17}$	m <sup>2</sup>	k	/IFT 89/

EBS-Salzbeton-Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
	/MHO 11/, /IFG 06/, /WEI 05/, IFT 89/, /STM 94/, /DBE 10/; /DBE 10a/
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
	X	Y	$k = a \phi^b$ mit k Permeabilität, eff.; [m <sup>2</sup> ] a Parameter; [?], [m <sup>2</sup> ] b Parameter; [?] φ Porosität; [-] nach /MLY 99/ S.43:	

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt

<i>Bewertung</i>	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

IFT 89, STM 94, DBE 10, DBE 10a, DBE 10b, MHO 11  
keine PDF:  
fehlt :

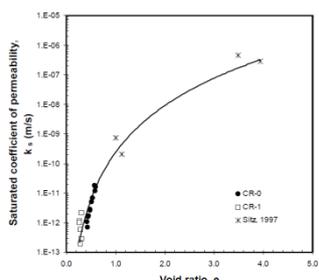
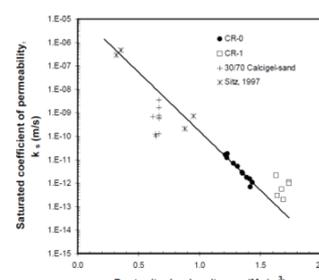
9.1.4 EBS-Bentonit-Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>	Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Bentonit	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
10 <sup>-11</sup>	m s <sup>-1</sup>	k <sub>f</sub>	/BRE 02/
10 <sup>-18</sup>	m <sup>2</sup>	k	umgerechnet für Wasser k = k <sub>f</sub> * 10 <sup>-7</sup>

EBS-Bentonit-Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/BRE 02/, /GRU 05/	Breidung, K-P. (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. – Abschlussbericht. BMBF FKZ 02C0516, K+S-Aktiengesellschaft, Kassel. Gruner, M., Sitz, P., Herbert, H.-J., Moog, H.C., Kolditz, O., Schanz, T. et al. (2005): Experimentelle und numerische Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken im Salinar mit Bentonitmischen als Dichtelement, Schlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02C0881
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata ;InternalRemark</i>	...der Einheit nach ist es der hydr. Durchlässigkeitsbeiwert k <sub>f</sub> $k_f = k \cdot \frac{\rho_{Fl} g}{\eta_{Fl}}; \frac{m^2 \cdot kg \cdot m \cdot s}{m^3 \cdot s^2 \cdot kg} = \frac{m}{s}$ (nach Darcy) ... Durchlässigkeit, im Labor an Presslingen gemessen ... Durchlässigkeit ist abhängig von der Einbaudichte

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
/GRU 05/ Fig. 2-39, S.55 		$k_s = a e^b$ k <sub>s</sub> „Permeabilität“; [m s <sup>-1</sup> ] a Parameter; [?] b Parameter; [?] e Porenzahl; [-] mit $e = \frac{n}{1-n} = \frac{V_{Hohraum}}{V_{Fest}}$ n Porosität; [-]	$k_s = 2,39 \cdot 10^{-10} e^{5,25}$ nach /GRU 05/ S.54
/GRU 05/, Fig. 2.40, S.56 		$k_s = a \exp(-0,12 \rho)$ mit k <sub>s</sub> „Permeabilität“; [m s <sup>-1</sup> ] a Parameter; [?] b Parameter; [?] ρ Dichte; [kg m <sup>-3</sup> ]	$k_s = 1,72 \exp(-0,12 \rho)$ nach /GRU 05/ S.55

Numerische Modellierung		
Constitutive model	Code	Funktion

<i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	<i>frmCode</i>	<i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt

<i>Bewertung</i>	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

GRU 05  
fehlt: DIX 92,

9.1.5 EBS-SVV-Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>	Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
SVV	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
10 <sup>-18</sup>	m <sup>2</sup>	k	...nach Feststoff-Fluid-Reaktion

EBS-SVV-Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/HER 05/	Herbert, H.-J., Kull, H., Müller-Lyda, I. (2005): Weiterentwicklung eines Selbst Verheilenden Versatzes (SVV) als Komponente im Barriersystem Salinar, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-220, 53 S., ISBN 3-931995-90-9
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<p>/HER 05/, S47</p> <p>Abb. 6.12: Petrophysikalische Eigenschaften von SVV im Vergleich mit dem Verfestigungsverhalten von kompaktiertem Salzgrus.</p>	X	Y		

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt	
<i>Bewertung</i>	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

HER 05, HER 09

9.1.6 EBS-Schotter-Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>	Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Schotter	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
10 <sup>-8</sup>	m <sup>2</sup>	k	/MHO 11/

EBS-Schotter-Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/MHO 11/, /CHA 01/	Müller-Hoeppe, N. 2011: Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichteelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen, Bericht – ENTWURF –, Stand: 11.02.2011, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY, Peine. Chang, W.S. (2001): Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung. – Dissertation, Uni Stuttgart.
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	...Permeabilität ist abhängig von der Korngröße /CH 01/ und Einbringtechnik /MHO 11/

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
/CHA 01/; S.43 Kies  $K = \begin{cases} 2,525 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 & \text{für Kies 4/8} \\ 1,010 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 & \text{für Kies 8/16} \\ 4,040 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 & \text{für Kies 16/32} \end{cases}$	X	Y		

Numerische Modellierung		
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt		
Bewertung		
<i>dataquality</i>		
<i>datasource</i>		

Erstellt:	Gepüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:
MHO 11		

9.1.7 EBS-Beton-Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>	Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Beton	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
	m <sup>2</sup>	k	

EBS-Beton-Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt	
<b>Bewertung</b>	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

Erstellt:	Gepüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

--

9.1.8 EBS-Salzgrus (+Brikett)-Porosität

Parameter <i>frmdata</i>	Porosität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Salzgrus / +Briketts	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
Salzgrus: function of compaction Briketts: 9 ±1	[%], [-] [%]	$\phi, n$	

EBS-Salzgrus (+Brikett)-Porosität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/BEC 99a/, /ALK 08/	/BEC 99a/; Tab. 3.10b Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., Olivella, S., (1999): „Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project)“, Final Report, European Commission, EUR19124 EN /ALK 08/ Alkan, H. & Müller, W (2008): Numerical Modelling of Dilatancy Induced Percolative Permeation in Rock Salt, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Köln.
/SAL 07d/, /STM 94/	/SAL 07d/, Salz-Briketts, Tab.1 S.240 Salzer, K., Popp, T., Böhnelt, H. (2007): Mechanical and permeability properties of highly pre-compacted granular salt bricks, In: Lux, K.-H., Minkley, W., Wallner, M., Hardy, Jr., H.R. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics, Proc. of the 6th Conf. on the Mech. Behavior of Salt, Hannover 2007, p. 239-248, Lisse, Francis & Taylor (Balkema) /STM 94/ Stockmann, N., Beinlich, A., Droste, J., Flach, D., Gläß, F., Jockwer, N., Krogmann, P., Miehe, R., Möller, J., Schwägermann, F., Wallmüller, R., Walter, F., Yaramanci, U., 1994: Dammbau im Salzgebirge - Abschlußbericht Projektphase II, Berichtszeitraum 01.07.1998-31.12.1992, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht 18/94
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	/ALK 08/S.29 aus /HEE 04/ (Lit. liegt nicht vor) $\phi = a_{\phi} \cdot \exp(-b_{\phi} \cdot \sigma_{min})$ , die Parameter a, b sind experimentell zu bestimmen

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz																					
/ALK 08/S.29 aus /HEE 04/				$\phi = a_{\phi} \cdot \exp(-b_{\phi} \cdot \sigma_{min})$																					
/BEC 99a/; Salzgrus  Table 3.10b: Permeability measurements performed by G.3S during a hydrostatic loading at room temperature.	Pressure X [MPa]	Porosity Y [%]		...bei Raumtemperatur																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Hydrostatic pressure (MPa)</th> <th>Porosity (%)</th> <th>Permeability (mD)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,2</td><td>18,3</td><td>7,5 · 10<sup>-25</sup></td></tr> <tr><td>10</td><td>16,3</td><td>6,5 · 10<sup>-25</sup></td></tr> <tr><td>20</td><td>13,6</td><td>1,3 · 10<sup>-25</sup></td></tr> <tr><td>30</td><td>11,6</td><td>4,1 · 10<sup>-26</sup></td></tr> <tr><td>50</td><td>8,0</td><td>1,3 · 10<sup>-26</sup></td></tr> <tr><td>60</td><td>5,4</td><td>2,1 · 10<sup>-27</sup></td></tr> </tbody> </table>	Hydrostatic pressure (MPa)	Porosity (%)	Permeability (mD)	0,2	18,3	7,5 · 10 <sup>-25</sup>	10	16,3	6,5 · 10 <sup>-25</sup>	20	13,6	1,3 · 10 <sup>-25</sup>	30	11,6	4,1 · 10 <sup>-26</sup>	50	8,0	1,3 · 10 <sup>-26</sup>	60	5,4	2,1 · 10 <sup>-27</sup>	0,2 10 20 30 50 60	18,3 16,3 13,6 11,6 8,0 5,4		
Hydrostatic pressure (MPa)	Porosity (%)	Permeability (mD)																							
0,2	18,3	7,5 · 10 <sup>-25</sup>																							
10	16,3	6,5 · 10 <sup>-25</sup>																							
20	13,6	1,3 · 10 <sup>-25</sup>																							
30	11,6	4,1 · 10 <sup>-26</sup>																							
50	8,0	1,3 · 10 <sup>-26</sup>																							
60	5,4	2,1 · 10 <sup>-27</sup>																							

<p><b>/BEC 99a/, Salzgrus</b></p> <p>Table 3.10c: Permeability measurements performed by G.3S during a hydrostatic loading at a temperature of 80 °C</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Hydrostatic pressure (MPa)</th> <th>Porosity (%)</th> <th>Permeability (m<sup>2</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10</td><td>16.2</td><td>6.610<sup>13</sup></td></tr> <tr><td>20</td><td>9.2</td><td>2.010<sup>13</sup></td></tr> <tr><td>30</td><td>6.6</td><td>4.210<sup>14</sup></td></tr> <tr><td>40</td><td>5.0</td><td>4.710<sup>12</sup></td></tr> <tr><td>50</td><td>3.5</td><td>9.010<sup>16</sup></td></tr> <tr><td>60</td><td>2.9</td><td>7.010<sup>16</sup></td></tr> </tbody> </table>	Hydrostatic pressure (MPa)	Porosity (%)	Permeability (m <sup>2</sup> )	10	16.2	6.610 <sup>13</sup>	20	9.2	2.010 <sup>13</sup>	30	6.6	4.210 <sup>14</sup>	40	5.0	4.710 <sup>12</sup>	50	3.5	9.010 <sup>16</sup>	60	2.9	7.010 <sup>16</sup>	<p>Pressure X [MPa]</p> <p>10 20 30 40 50 60</p>	<p>Porosity Y [%]</p> <p>16,2 9,2 6,6 5,0 3,5 2,9</p>	<p>...bei 80°C</p>
Hydrostatic pressure (MPa)	Porosity (%)	Permeability (m <sup>2</sup> )																						
10	16.2	6.610 <sup>13</sup>																						
20	9.2	2.010 <sup>13</sup>																						
30	6.6	4.210 <sup>14</sup>																						
40	5.0	4.710 <sup>12</sup>																						
50	3.5	9.010 <sup>16</sup>																						
60	2.9	7.010 <sup>16</sup>																						
<p><b>/BEC 99a/, s.101, Salzgrus</b></p> <p>Table 3.3: Evolution of lateral stress/axial stress versus porosity in oedometer condition</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Porosity</th> <th>lateral stress / axial stress</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.2737</td><td>0.3634</td></tr> <tr><td>0.2114</td><td>0.3828</td></tr> <tr><td>0.1375</td><td>0.4659</td></tr> <tr><td>0.0800</td><td>0.6143</td></tr> <tr><td>0.04167</td><td>0.7644</td></tr> <tr><td>0.01429</td><td>0.8949</td></tr> </tbody> </table>	Porosity	lateral stress / axial stress	0.2737	0.3634	0.2114	0.3828	0.1375	0.4659	0.0800	0.6143	0.04167	0.7644	0.01429	0.8949	<p>Coeff. X [-]</p> <p>0,3634 0,3828 0,4659 0,6143 0,7644 0,8949</p>	<p>Porosity Y [-]</p> <p>0,2737 0,2114 0,1375 0,08 0,04167 0,01429</p>	<p>...bei Kompaktion</p>							
Porosity	lateral stress / axial stress																							
0.2737	0.3634																							
0.2114	0.3828																							
0.1375	0.4659																							
0.0800	0.6143																							
0.04167	0.7644																							
0.01429	0.8949																							
<p><b>/STU 04/, Salzgrus</b></p> <p>Figure 2: Compaction behaviour of the sample pre-compacted in situ compared with an earlier oedometer test on loose crushed salt</p>			<p><b>Vor-kompaktierte Proben</b> /KRO 09/, (Labor) Beschreibung der Abhängigkeit der Spannungs-Porositäts-Beziehung als...</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Funktion der Sieblinie</li> <li>- Funktion der Kompaktion</li> <li>- Funktion der Temperatur</li> <li>- Funktion der Feuchte</li> </ul>																					
<p><b>/ROT 03/, Salzgrus</b></p> <p>Fig. 4.2.6 Comparison between measured and calculated backfill pressure as a function of average porosity</p>			<p><b>Nicht-kompaktierte Proben</b> /ROT 03/, S. 36 (in situ)</p>																					
<p><b>/ELL 04/, s.187, Salzgrus Asse</b></p> <p>Abb. 12.9: Permeabilitäts-Porositäts-Korrelationen von A9- und A4-Proben (Messwerte im roten Bereich)</p>			<p>Gegenüberstellung von funktionalen parametern <math>\log(k_{Lauge}) = \log(A) + m \log(\epsilon)</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Autor</th> <th>Quelle</th> <th>Trocken kompaktierter Salzgrus</th> <th>Feucht kompaktierter Salzgrus</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Eigene Messungen</td> <td>[6]</td> <td><math>[m = 4,1] \log(A) = -9,0]</math></td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>GRS</td> <td>[96]</td> <td><math>[m = 3,8] \log(A) = -9,9]</math></td> <td><math>[m = 5,3] \log(A) = -8,1]</math></td> </tr> <tr> <td>Cinar</td> <td>[71]</td> <td><math>[m = 4,3] \log(A) = -8,4]</math></td> <td><math>[m = 5,0] \log(A) = -7,9]</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>Tab. 12.1: Referenzwerte für m und log(A) von Salzgrus</p>	Autor	Quelle	Trocken kompaktierter Salzgrus	Feucht kompaktierter Salzgrus	Eigene Messungen	[6]	$[m = 4,1] \log(A) = -9,0]$	-	GRS	[96]	$[m = 3,8] \log(A) = -9,9]$	$[m = 5,3] \log(A) = -8,1]$	Cinar	[71]	$[m = 4,3] \log(A) = -8,4]$	$[m = 5,0] \log(A) = -7,9]$					
Autor	Quelle	Trocken kompaktierter Salzgrus	Feucht kompaktierter Salzgrus																					
Eigene Messungen	[6]	$[m = 4,1] \log(A) = -9,0]$	-																					
GRS	[96]	$[m = 3,8] \log(A) = -9,9]$	$[m = 5,3] \log(A) = -8,1]$																					
Cinar	[71]	$[m = 4,3] \log(A) = -8,4]$	$[m = 5,0] \log(A) = -7,9]$																					

<p><b>Numerische Modellierung</b></p>		
<p>Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i></p>	<p>Code <i>frmCode</i></p>	<p>Funktion <i>frmFunktion</i></p>

...wird vom Expertengremium durchgeföhrt

<i>Bewertung</i>	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

KAP 84, ROT 03, ZHA 93, GLA 91, KRO 09, ROT 01, SAL 99, ZHA 07, KAM 03, POP 06, SAL 07d, BEC 97, EBE 07, HOU 02, SAL 07b, EBE 08, ELL 04, HEI 91, FRO 95, OLI 902  
 keine PDF: HAI 94, DRO 97, ROT 98a, WAT 95, SAL 07, BOL 96, STM 94  
 fehlt: BRU 99

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

n. a. nicht angegeben

9.1.9 EBS-Sorelbeton-Porosität

Parameter <i>frmdata</i>		Porosität		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>		
Sorelbeton	Virtus			
Wert <i>frmdata</i>		Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
0,26 - 0,141		[-]	$\phi, n$	

EBS-Sorelbeton-Porosität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/IFG 04/	IfG (2004): Anwendungsbezogene Untersuchungen an einer Pilotströmungsbarriere – Labortests am Sorelbeton und In-situ Untersuchungen – Abschlußbericht, Dok.-Kennz.: A/01VER/GB/FU/0005/00, Stand: 27.02.2004.
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	IFG; Labormessungen an Bohrkernen, ASSE, Pilotströmungsbarriere, 775m-Sohle
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Nach /IFG 04/ wurden Permeabilitätsmessungen sowohl im Labor als auch in situ an Sorelbeton aus der Asse-Pilotströmungsbarriere durchgeführt. Die Permeabilitätswerte liegen zwischen 10-20 und 10-18 m2 (/IFG 04/, S.41).

Graphik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz																																																																																																				
/IFG 04/, S.41	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Anstehendes</th> <th>Versuchsdauer [h]</th> <th>Permeabilität [m<sup>2</sup>]</th> <th>Porosität [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Sorelbeton</td><td>7,3</td><td>3,0·10<sup>-18</sup></td><td>2,3</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>17,2</td><td>7,0·10<sup>-19</sup></td><td>2,0</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>66,4</td><td>1,4·10<sup>-19</sup></td><td>7,9</td></tr> <tr><td>Steinsalz</td><td>17,3</td><td>1,8·10<sup>-19</sup></td><td>0,79</td></tr> <tr><td>Steinsalz</td><td>17,8</td><td>2,2·10<sup>-21</sup></td><td>0,47</td></tr> <tr><td>Steinsalz</td><td>86,7</td><td>2,1·10<sup>-21</sup></td><td>0,53</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>13,8</td><td>1,1·10<sup>-18</sup></td><td>2,0</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>14,4</td><td>2,1·10<sup>-18</sup></td><td>8,0</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>14,3</td><td>1,3·10<sup>-18</sup></td><td>7,8</td></tr> <tr><td>Steinsalz</td><td>18,9</td><td>1,4·10<sup>-20</sup></td><td>0,40</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>13,4</td><td>1,4·10<sup>-18</sup></td><td>7,8</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>20,2</td><td>5,7·10<sup>-19</sup></td><td>2,0</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>13,9</td><td>1,5·10<sup>-18</sup></td><td>7,9</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>67,9</td><td>1,1·10<sup>-19</sup></td><td>1,9</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>111,5</td><td>2,7·10<sup>-19</sup></td><td>7,9</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>15,3</td><td>7,3·10<sup>-19</sup></td><td>2,0</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>111,5</td><td>4,1·10<sup>-20</sup></td><td>7,8</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>14,6</td><td>1,4·10<sup>-18</sup></td><td>8,0</td></tr> <tr><td>Steinsalz</td><td>65,9</td><td>1,6·10<sup>-19</sup></td><td>0,79</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>16,0</td><td>2,2·10<sup>-18</sup></td><td>1,8</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>68,0</td><td>2,8·10<sup>-19</sup></td><td>2,0</td></tr> <tr><td>Sorelbeton</td><td>16,1</td><td>2,5·10<sup>-18</sup></td><td>8,0</td></tr> <tr><td>Steinsalz</td><td>13,3</td><td>3,2·10<sup>-19</sup></td><td>0,79</td></tr> <tr><td>Steinsalz</td><td>15,9</td><td>1,5·10<sup>-19</sup></td><td>0,80</td></tr> </tbody> </table>	Anstehendes	Versuchsdauer [h]	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]	Porosität [%]	Sorelbeton	7,3	3,0·10 <sup>-18</sup>	2,3	Sorelbeton	17,2	7,0·10 <sup>-19</sup>	2,0	Sorelbeton	66,4	1,4·10 <sup>-19</sup>	7,9	Steinsalz	17,3	1,8·10 <sup>-19</sup>	0,79	Steinsalz	17,8	2,2·10 <sup>-21</sup>	0,47	Steinsalz	86,7	2,1·10 <sup>-21</sup>	0,53	Sorelbeton	13,8	1,1·10 <sup>-18</sup>	2,0	Sorelbeton	14,4	2,1·10 <sup>-18</sup>	8,0	Sorelbeton	14,3	1,3·10 <sup>-18</sup>	7,8	Steinsalz	18,9	1,4·10 <sup>-20</sup>	0,40	Sorelbeton	13,4	1,4·10 <sup>-18</sup>	7,8	Sorelbeton	20,2	5,7·10 <sup>-19</sup>	2,0	Sorelbeton	13,9	1,5·10 <sup>-18</sup>	7,9	Sorelbeton	67,9	1,1·10 <sup>-19</sup>	1,9	Sorelbeton	111,5	2,7·10 <sup>-19</sup>	7,9	Sorelbeton	15,3	7,3·10 <sup>-19</sup>	2,0	Sorelbeton	111,5	4,1·10 <sup>-20</sup>	7,8	Sorelbeton	14,6	1,4·10 <sup>-18</sup>	8,0	Steinsalz	65,9	1,6·10 <sup>-19</sup>	0,79	Sorelbeton	16,0	2,2·10 <sup>-18</sup>	1,8	Sorelbeton	68,0	2,8·10 <sup>-19</sup>	2,0	Sorelbeton	16,1	2,5·10 <sup>-18</sup>	8,0	Steinsalz	13,3	3,2·10 <sup>-19</sup>	0,79	Steinsalz	15,9	1,5·10 <sup>-19</sup>	0,80		
Anstehendes	Versuchsdauer [h]	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]	Porosität [%]																																																																																																				
Sorelbeton	7,3	3,0·10 <sup>-18</sup>	2,3																																																																																																				
Sorelbeton	17,2	7,0·10 <sup>-19</sup>	2,0																																																																																																				
Sorelbeton	66,4	1,4·10 <sup>-19</sup>	7,9																																																																																																				
Steinsalz	17,3	1,8·10 <sup>-19</sup>	0,79																																																																																																				
Steinsalz	17,8	2,2·10 <sup>-21</sup>	0,47																																																																																																				
Steinsalz	86,7	2,1·10 <sup>-21</sup>	0,53																																																																																																				
Sorelbeton	13,8	1,1·10 <sup>-18</sup>	2,0																																																																																																				
Sorelbeton	14,4	2,1·10 <sup>-18</sup>	8,0																																																																																																				
Sorelbeton	14,3	1,3·10 <sup>-18</sup>	7,8																																																																																																				
Steinsalz	18,9	1,4·10 <sup>-20</sup>	0,40																																																																																																				
Sorelbeton	13,4	1,4·10 <sup>-18</sup>	7,8																																																																																																				
Sorelbeton	20,2	5,7·10 <sup>-19</sup>	2,0																																																																																																				
Sorelbeton	13,9	1,5·10 <sup>-18</sup>	7,9																																																																																																				
Sorelbeton	67,9	1,1·10 <sup>-19</sup>	1,9																																																																																																				
Sorelbeton	111,5	2,7·10 <sup>-19</sup>	7,9																																																																																																				
Sorelbeton	15,3	7,3·10 <sup>-19</sup>	2,0																																																																																																				
Sorelbeton	111,5	4,1·10 <sup>-20</sup>	7,8																																																																																																				
Sorelbeton	14,6	1,4·10 <sup>-18</sup>	8,0																																																																																																				
Steinsalz	65,9	1,6·10 <sup>-19</sup>	0,79																																																																																																				
Sorelbeton	16,0	2,2·10 <sup>-18</sup>	1,8																																																																																																				
Sorelbeton	68,0	2,8·10 <sup>-19</sup>	2,0																																																																																																				
Sorelbeton	16,1	2,5·10 <sup>-18</sup>	8,0																																																																																																				
Steinsalz	13,3	3,2·10 <sup>-19</sup>	0,79																																																																																																				
Steinsalz	15,9	1,5·10 <sup>-19</sup>	0,80																																																																																																				

Numerische Modellierung		
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt

Bewertung	
dataquality	
datasource	

**MHO 11, IFG 04**  
**keine PDF:**  
**fehlt: WEI 05**

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

n. a. nicht angegeben

9.1.10 EBS-Salzbeton-Porosität

Parameter <i>frmdata</i>		Porosität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>	
Salzbeton	Virtus		

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
7	[%]	$\phi, n$	Lösungsporosität

EBS-Salzbeton-Porosität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/DBE 10a/	DBE 2010: Untersuchung der Kontaktzone am ASSE-Vordamm – Gesamtinterpretation, 9M/22310131/ECC/GH/BZ/0021/01, Stand 15.07.2010.
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Diskrepanz zwischen niedrigen Permeabilitätswerten und hohen Porositäten. In /DBE 10/ werden Porositäten von 18 % angegeben.

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<p>/DBE 10a/</p> <p>Abbildung 6.1-3: Porositäten der untersuchten Kernproben</p>			

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i> Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt	
Bewertung	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

<b>DBE 10, DBE 10a, DBE 10b, MHO 11</b>		
<b>keine PDF:</b>		
<b>fehlt:</b>		
<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

n. a. nicht angegeben

9.1.11 EBS-Ca-Bentonit-Porosität

Parameter <i>frmdata</i>	Porosität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Ca-Bentonit	Virtus	industriell aufbereitet (z. B. Moosbach)

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
27 - 34	[%]	$\phi, n$	/MHO 11/; keine Messwerte

EBS-Ca-Bentonit-Porosität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/GRU 05/, /MHO 11/	<p>Gruner, M., Sitz, P., Herbert, H.-J., Moog, H.C., Kolditz, O., Schanz, T. (2005): Experimentelle und numerische Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken im Salinar mit Bentonitgemischen als Dichtelement, Schlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02C0881.</p> <p>Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen, Bericht – ENTWURF –, Stand: 11.02.2011, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY, Peine.</p>
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	<p>... industriell aufbereitetes (konditioniertes) Material</p> <p>... Porositätswerte stehen für trockenes Material mit einem Restwassergehalt</p> <p>... Porositätsangaben nach Messwerten für reine Ca-Bentonite fehlen; weitere Literaturangaben beziehen sich auf Gemische (Sand/Ton; Splitt/Ton,...)</p>

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<p>Figure 3.49 Saturated coefficient of permeability vs. bentonite dry density</p>			
<p>Figure 3.55 Saturated coefficient of permeability vs. void ratio</p>			

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i> Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt		
<i>Bewertung</i>		
<i>dataquality</i>		
<i>datasource</i>		

**GRU 05**  
**keine PDF:**  
**fehlt:**

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

*n. a. nicht angegeben*

9.1.12 EBS-SVV-Porosität

Parameter <i>frmdata</i>	Porosität		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>	
SVV	Virtus		

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
0,45 – 0,55	[-]	$\phi, n$	loser Versatz

**EBS-SVV-Porosität**

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/HER 05/	Herbert, H.-J., Kull, H., Müller-Lyda, I. (2005): Weiterentwicklung eines Selbst Verheilenden Versatzes (SVV) als Komponente im Barriersystem Salinar, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-220, 53 S., ISBN 3-931995-90-9
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>die Ausgangsporosität des als loser Versatz eingebrachte SVV verringert sich bei Lösungszutritt durch Neu-Kristallisationen von 0,55 auf kleiner 0,03. Nach /HER 05/ besteht die gleiche Permeabilität-Porosität-Beziehung wie beim feuchten Salzgrus. Im Endzustand erreicht der verfestigte SVV Porositäten kleiner 3% (<math>k \sim 10^{-18} m^2</math>).</li> </ul>

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<p>/HER 05/, S47</p> <p>Abb. 6.12: Petrophysikalische Eigenschaften von SVV im Vergleich mit dem Verfestigungsverhalten von kompaktiertem Salzgrus.</p>			

Numerische Modellierung		
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt

Bewertung	
dataquality	
datasource	

**HER 05, HER 09**  
keine PDF:  
fehlt:

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

n. a. nicht angegeben

9.1.13 EBS-Schotter-Porosität

Parameter <i>frmdata</i>	Porosität		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>	
Schotter	Virtus		

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
23 – 38	[%]	$\phi, n$	

EBS-Schotter-Porosität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/MHO 11/, /CHA 01/	Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichteelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen, Bericht – ENTWURF –, Stand: 11.02.2011, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY, Peine.  Chang, W.S. (2001): Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung. – Dissertation, Uni Stuttgart.
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	...die Porosität des Schotters hängt von der Einbringtechnologie ab

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz										
/CHA 01/; S.43  <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Kieszusammensetzung</th> <th>Porosität <math>\epsilon_{exp}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Kies 4/8</td> <td>0,376</td> </tr> <tr> <td>Kies 8/16</td> <td>0,374</td> </tr> <tr> <td>Kies 16/32</td> <td>0,379</td> </tr> <tr> <td>Mittelwert</td> <td>0,376</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center; font-size: small;">Tabelle 4.2: Gemessene Porosität <math>\epsilon_{exp}</math> der Kies-Schüttung</p>	Kieszusammensetzung	Porosität $\epsilon_{exp}$	Kies 4/8	0,376	Kies 8/16	0,374	Kies 16/32	0,379	Mittelwert	0,376			
Kieszusammensetzung	Porosität $\epsilon_{exp}$												
Kies 4/8	0,376												
Kies 8/16	0,374												
Kies 16/32	0,379												
Mittelwert	0,376												

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt

<i>Bewertung</i>	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

<b>MHO 11</b> <b>keine PDF:</b>		
<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

n. a. nicht angegeben

9.1.14 EBS-Salzgrus (+Brikett)-Relative Permeabilität

Parameter <i>frmdata</i>	Relative Permeabilität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Salzgrus / +Briketts	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
Wertetabelle	[-]	$k_r$	

EBS-Salzgrus (+Brikett)-Relative Permeabilität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/STM 94/	/STM 94/ Stockmann, N., Beinlich, A., Droste, J., Flach, D., Gläß, F., Jockwer, N., Krogmann, P., Miehe, R., Möller, J., Schwägermann, F., Wallmüller, R., Walter, F., Yaramanci, U., 1994: Dammbau im Salzgebirge - Abschlußbericht Projektphase II, Berichtszeitraum 01.07.1998-31.12.1992, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht 18/94
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	Intrinsische Permeabilität von Salzbriketts =>0,85 mD /STM 94/
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	keine Angaben zu funktionalen Zusammenhängen z. B. Corey-Brooks bzw. van Genuchten

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz															
	<table border="1"> <tr> <th><math>S_w</math> [%]</th> <th><math>k_{rw}</math> [-]</th> <th><math>k_{rg}</math> [-]</th> </tr> <tr> <td>100</td> <td>0,74</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>0,27</td> <td>0,10</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>0,13</td> <td>0,12</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>0,063</td> <td>0,30</td> </tr> </table>	$S_w$ [%]	$k_{rw}$ [-]	$k_{rg}$ [-]	100	0,74	0,00	40	0,27	0,10	26	0,13	0,12	13	0,063	0,30	Salzbrikett /STM 94/ S.255 $k_{abs.} = 0,85 \text{ mD}$	
$S_w$ [%]	$k_{rw}$ [-]	$k_{rg}$ [-]																
100	0,74	0,00																
40	0,27	0,10																
26	0,13	0,12																
13	0,063	0,30																

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt	
Bewertung	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

9.1.15 EBS-Salzgrus (+Brikett)- Kapillardruck-Sättigung (Threshold Pressure)

Parameter <i>frmdata</i>		Kapillardruck-Sättigung (Threshold Pressure, Sperrdruck)	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>	
Salzgrus (+Brikett)		Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
$P_{Threshold} = 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot k_{intr}^{-0,353}$	[Pa]	$P_{Threshold}$	/POP 06/

EBS-Salzgrus (+Brikett)- Kapillardruck-Sättigung (Threshold Pressure)

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/POP 06/	Popp, T., Böhnelt, H., Salzer K. (2006): Investigation of the Mechanical Behavior of Precompacted Crushed Salt in Contact to the Host Rock, Report on long-term creep tests and gas injection tests on moistened salt bricks during compaction, D 3.5.5, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 28. February, 2006
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	Bericht NFPRO; Zusammenstellung von Permeabilitäten für verschiedene Materialien, u.a. Salzgrus; ...Angaben zum Gas-Eintrittsdruck, Sperrdruck

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<p>/POP 06, S.33</p> <p>Figure 3-8. Relationship between gas threshold pressure and intrinsic permeability for various low permeability rock formations (claystones, shales, sandstones) (modified after Matokus, et al., 2005 – for the various references see the later authors). In addition, the ranges of threshold pressure correlated with permeability for various lithological soil portions are indicated (as estimated by Davies (1980)). The results obtained here are shown by yellow circles.</p>	X      Y		

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt	
Bewertung	
dataquality	
datasource	

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

9.1.16 EBS-Bentonit- Kapillardruck-Sättigung

Parameter <i>frmdata</i>	Kapillardruck-Sättigung		
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>	
Bentonit	Virtus		

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
		k	

EBS-Bentonit- Kapillardruck-Sättigung

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/ENG 04/	Engelhardt, I. (2004): Experimental and Numerical Investigations with Respect to the Material Properties of Geotechnical Barriers. - Dissertation, TU-Tübingen.
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
<p>Abb. 24: Messdaten der Kapillardruck-Sättigungsbeziehung und Kurvenanpassung der van Genuchten und Brooks- Corey Funktion</p>	X Y	/ENG 04/ Bentonit	1. van Genuchten 2. Brooks-Corey

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt	
Bewertung	
dataquality	
datasource	

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

9.1.17 EBS-Salzgrus (+Brikett)- Tortuosität

Parameter <i>frmdata</i>	Tortuosität	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Salzgrus (+Brikett)	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
$1,25 \leq T \leq 1,75$	[-]	$T$	/ELL 04/

EBS-Salzgrus (+Brikett)- Tortuosität

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/ELL 04/	Elliger, C. (2004): Untersuchungen zum Permeationsverhalten von Salzlauge in Steinsalz bei der Endlagerung Wärme entwickelnder nuklearer Abfälle, Dissertation TU Darmstadt.
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	/ELL 04/, S.178...Der Tortuositätsexponent, $c$ für trockenes und feuchtes Steinsalz (vgl. Kap. 6.3) liegt in einem Bereich von $1,25 \leq c_1 \leq 1,75$ ; andererseits wurde bei der Untersuchung verschiedener anderer Schüttungen ein maximaler Wert von $c_{max} = 2,1$ gefunden. Die Tortuosität bei der Durchströmung mit Salzlauge kann im Vergleich zu nicht-durchströmtem Steinsalz sowohl zu- wie auch abnehmen.

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
/ELL 04/	X	Y		

Numerische Modellierung		
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt		
Bewertung		
<i>dataquality</i>		
<i>datasource</i>		

Erstellt:	Gepüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

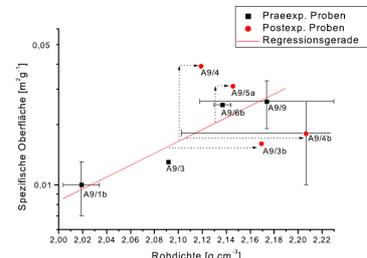
9.1.18 EBS-Salzgrus (+Brikett)- Spezifische Oberfläche

Parameter <i>frmdata</i>	Spezifische Oberfläche	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Salzgrus (+Brikett)	Virtus	

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
0,01 – 0,05	[m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> ]	S	/ELL 04/

EBS-Salzgrus (+Brikett)- Spezifische Oberfläche

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/ELL 04/	Elliger, C. (2004): Untersuchungen zum Permeationsverhalten von Salzlauge in Steinsalz bei der Endlagerung Wärme entwickelnder nuklearer Abfälle, Dissertation TU Darmstadt.
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	
Anmerkungen <i>frmdata; InternalRemark</i>	/ELL 04/, S.178....

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>		Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz
/ELL 04/, S.135 	X	Y		

Numerische Modellierung		
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Code <i>frmCode</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>
...wird vom Expertengremium durchgeführt		
Bewertung		
dataquality		
datasource		

Erstellt:	Gepüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

## 9.2 Begründung

### 9.2.1 Empfehlung für Best-Estimate-Werte (BEW)

Die hier vorgestellten hydraulischen Parameter von **Engineered Barrier Systems, EBS** stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS+ gesichteten und ausgewerteten Literatur dar /ROT 12/.

#### EBS-Materialien - Spezifikation

- **Salzgrus + (Salzbrikett)**
  - a) Salz aus Auffahrung; Korn < 64mm; unverdichtet; /GLA 91/
  - b) Salzbrikett; Korn  $\cong$  0,16-0,5mm; verdichtet ~ 130 MPa; /SAL 07/
- DIN 18125 T1
- **Sorelbeton** /KRA 08/
  - Magnesiabindersystem;  $[\text{Mg}(\text{OH})_2 : \text{MgCl}_2 : \text{H}_2\text{O}]$ ; (Zuschlagstoff)
  - Typen A1 und A2 (thermodynamisch stabil)
  - Mischungsverhältnisse A1) 5:1:8 und A2) 3:1:8
- **Salzbeton** /DBE 09/
  - Typ M2; [Hochofenzement (CEM III), Steinkohleflugasche, Wasser, Salzzuschlag]
  - Mischungsverhältnisse M2) 1:1:0,8:3,3
- **Beton** /DBE 96/
  - [Zement, Zuschlagstoff, Wasser]
- **Ca-Bentonit** /HER 02a/, /NTB 83/, /NTB 82/
  - Bentonit: >60 Gew.% Montmorillonit...Illit, Quarz, Sons. Minerale + Wasser
  - Ca-Bentonit; Belegung mit  $\text{Ca}^{2+}$  oder  $\text{Mg}^{2+}$ ; Calcigel, Montigel
  - Na-Bentonit; Belegung überwiegend mit  $\text{Na}^+$ ; Wyoming, MX-80
- **Schotter** /BOL 96/
  - Basaltschotter
- **SVV** /HER 05/
  - Magnesiumsulfat, wasserfrei; (+Zuschlagstoff)

**Funktionaler Zusammenhang und Parameter für Salzgrus**

Tab. 1: Für Salzgrus dokumentierte Parameter für Porositäten von ~0,3 bis 35 %.

Material			a	b	Quelle
Salzgrus	$k = a \phi^b$	m <sup>2</sup>	1,559 10 <sup>-8</sup>	5,24	/BEC 99a/
Salzgrus	$k = a \phi^b$	m <sup>2</sup>	6,237 10 <sup>-10</sup>	4,497	/EBE 08/
Salzgrus, fine grained	$k = a \phi^b$	m <sup>2</sup>	1,12 10 <sup>-8</sup>	5,25	/ROT 03/
Salzgrus, coarse grained	$k = a \phi^b$	m <sup>2</sup>	6,7 10 <sup>-11</sup>	2,64	/ROT 03/
Salzgrus, TSS in situ	$k = a \phi^b$	m <sup>2</sup>	8,0 10 <sup>-11</sup>	2,50	/ROT 03/
Salzgrus, TSS in situ	$k = a \phi^b$	m <sup>2</sup>	8,0 10 <sup>-11</sup>	2,50	/ROT 03/
Salzgrus, Brikett	$k = k_{intr.} \phi^b$	m <sup>2</sup>	3,93 10 <sup>-20</sup>	4,46	/SAL 07d/

➤ **Salzgrus**

Für Salzgrus besteht nach /FEI 96/ und /MYL 99/ für die intrinsische Permeabilität, k ein Zusammenhang mit der Porosität. Nach /FEI 96/ muss für die Auswertung der experimentellen Labordaten ein physikalisch oder zumindest phänomenologisch begründeter Ansatz vorgegeben werden, dessen Parameter an die Datenbasis angepasst werden können. In der Literatur existiert kein theoretisch hergeleiteter Ansatz zur Beschreibung der Permeabilität von Salzgrus als Funktion der Porosität oder anderer Einflussgrößen.

Wohl aber existieren für Sande analytisch hergeleitete Ansätze. Beispiele hierfür finden sich bei SCHEIDEGGER, KOZENY-CARMAN oder KEZDI, die zumeist durch eine superlineare Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung charakterisiert sind.

$$k = \frac{n^3}{T^2 S^2} \quad (\text{Gl.1})$$

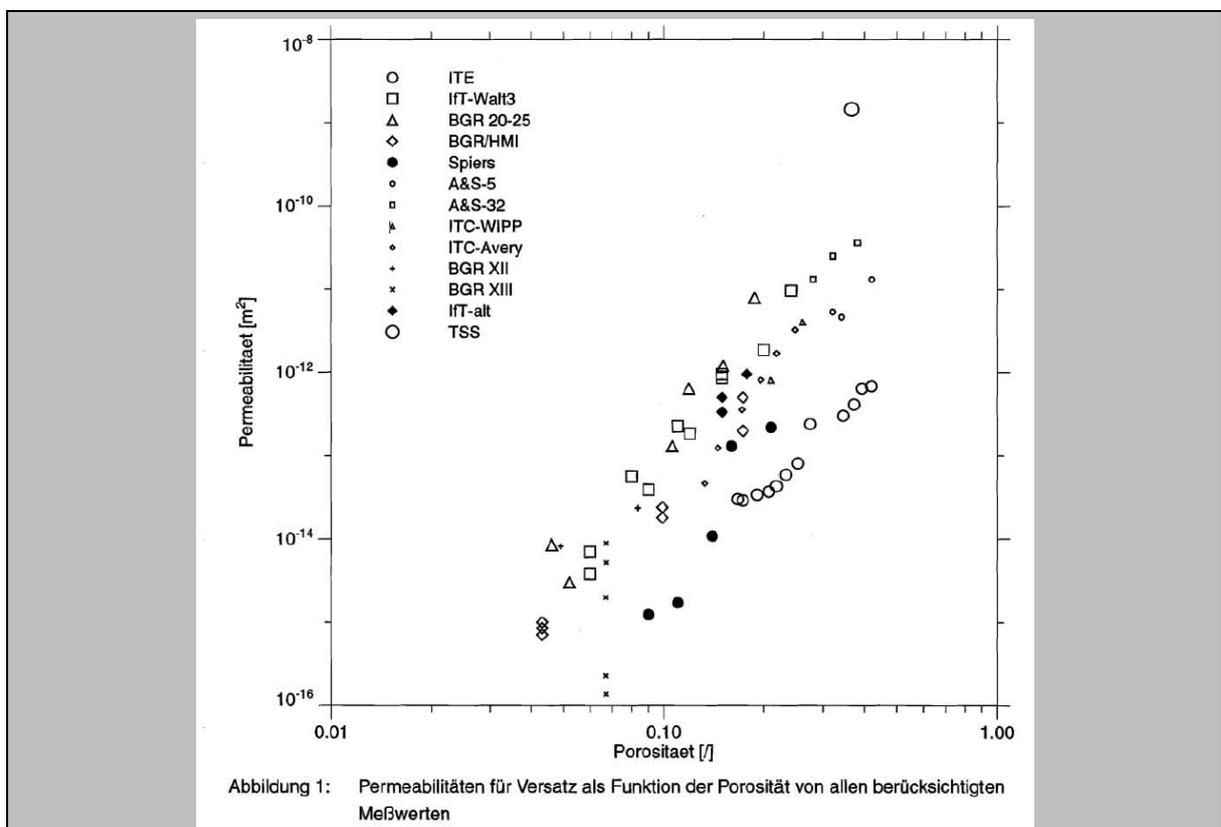
$$k = C \cdot D^2 \frac{e^3}{1+e} \quad (\text{Gl.2})$$

$$k = A \cdot n^m \quad (\text{Gl.3})$$

- k = Permeabilität
- n = Porosität
- T = Tortuosität
- S = innere spezifische Oberfläche
- C = Konstante für Porengeometrie (C=1/2 bis 1/3)
- D = Korndurchmesser; ermittelt aus der inneren Oberfläche und dem Volumen
- e = Porenzahl;  $e = n/(1 - n)$

A und m = Parameter, bestimmt durch Regression experimenteller Daten

Die in /FEI 96/ zusammengestellten experimentellen Daten lassen für den durch die Messdaten abgedeckten Porositätsbereich, der sich von  $n = 0,043$  bis etwa  $n = 0,42$  erstreckt, einen linearen Zusammenhang zwischen  $\log(k)$  und  $\log(n)$  erkennen und legen damit einen Potenzansatz nahe (Gl.3). Hierbei sind A und m Parameter, die aus den experimentellen Daten durch Regression bestimmt werden können. Der Ansatz stellt nur eine phänomenologische Beschreibung der Beziehung dar. Er erscheint geeignet, den größten Teil der Änderung der Permeabilität mit der Porosität zu beschreiben. Aus der Darstellung der Messwerte geht aber auch hervor, dass die Permeabilität noch durch weitere Einflussgrößen mitbestimmt wird, denn die Messwerte streuen über zwei Größenordnungen.



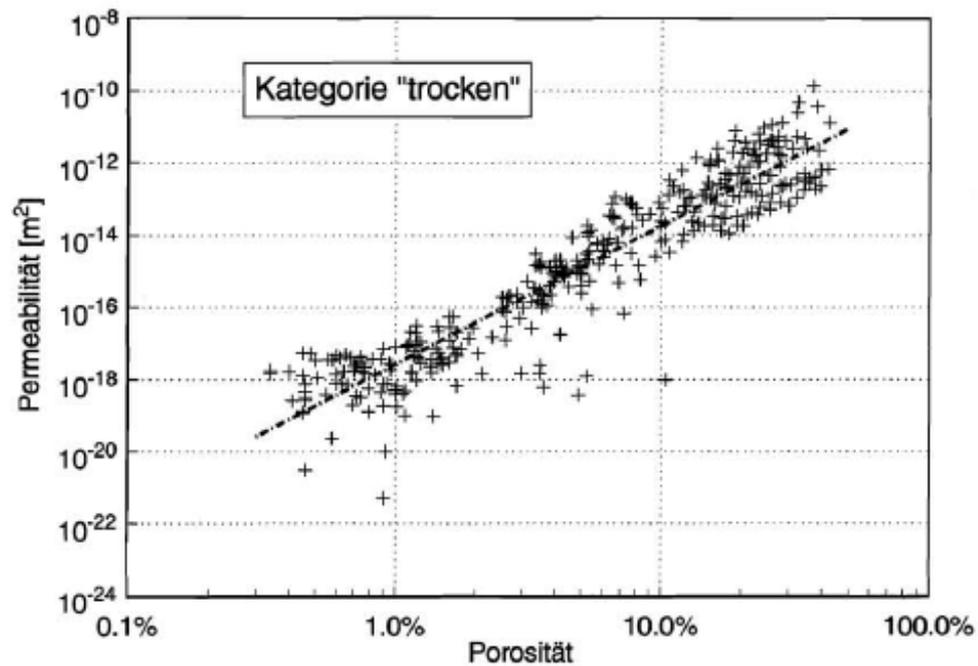
Es ist fraglich, ob die Gleichungen (Gl.1) und (Gl.2), die nicht speziell für Salzgrus hergeleitet worden sind, hier unmittelbar angewendet werden können. Außerdem sind viele der darin enthaltenen Einflussgrößen (innere Oberfläche, Tortuosität, wirksamer Korndurchmesser etc.) für Salzgrus nicht hinreichend bekannt oder können auf der Basis der bisherigen Daten bzw. wegen sonstiger Einflüsse (z.B. Brucherscheinungen in den Laborversuchen, Entmischungsvorgänge in situ) nicht eindeutig bestimmt werden. Ihr Einfluss lässt sich möglicherweise in Zahlenfaktoren, die empirisch aus den vorliegenden Messdaten ermittelt werden können, zusammenfassen. Die Zulässigkeit dieser Vorgehensweise kann dann an Hand statistischer Verfahren überprüft werden. Weitere wesentliche Einflussgrößen, wie der Feucht-

gehalt oder der Durchfluss von Laugen mit resultierenden Umlösungsvorgängen, sind einer analytischen Behandlung noch nicht zugänglich. Demnach erscheint es zweckmäßig, zunächst eine einfache empirische Beziehung zwischen der Permeabilität  $k$  und der Porosität in Salzgrus abzuleiten.

Der Ansatz nach Gleichung (Gl.3) liefert bei der Extrapolation zu kleinen Porositäten für den Grenzfall  $n = 0$  den Wert  $k = 0$ . Es ist aber fraglich, dass dadurch die Verhältnisse im Bereich sehr niedriger Porositäten richtig beschrieben werden. Wegen der Querschnittsverringering der Wegsamkeiten bei abnehmender Porosität können Wechselwirkungseffekte zwischen dem Fluid und dem Salzgrus in den Vordergrund treten, die eine stärkere Abnahme der Permeabilität bewirken, als sie durch den gewählten Ansatz beschrieben wird.

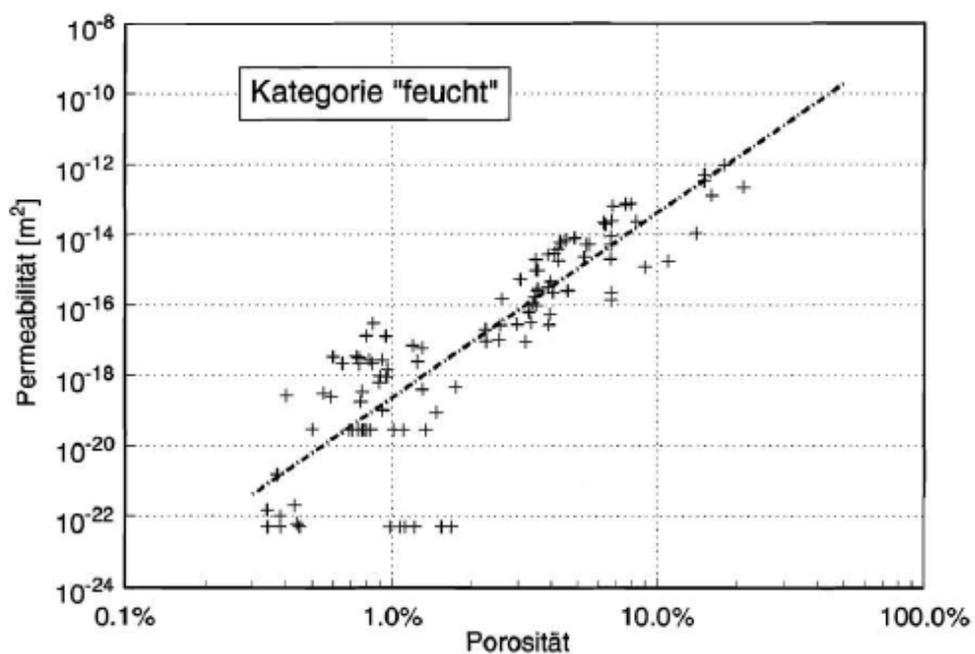
Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Übertragbarkeit der aus den Labordaten ermittelten Permeabilitäts-Porositätsbeziehung zur Beschreibung der in-situ-Eigenschaften für kleine Porositäten nicht in ausreichendem Maße belegt ist. Die hohen Kompaktionsgeschwindigkeiten in Laborversuchen führen zu Veränderungen des Korngefüges, die bei den langsam ablaufenden In-situ-Vorgängen nicht auftreten.

In /MYL 99/ ist eine Relation für den Zusammenhang zwischen der Permeabilität und der Porosität für Salzgrusversatz abgeleitet. Der Ableitung dieser Relation lag eine Regression von insgesamt 67 Permeabilitätsmeßwerten nach der Porosität in Form einer Potenzfunktion zugrunde.



**Abb. 6-1** Zusammenfassung aller Meßwerte der Kategorie „trocken kompaktiert“ mit  $n > 0,3\%$  und Ausgleichsgerade mit der Steigung  $m_0 = 3,84$

Daneben wurde anhand der insgesamt vorliegenden experimentellen Ergebnisse gezeigt, dass Permeabilität von feucht kompaktiertem Salzgrus signifikant stärker porositätsabhängig ist als die von trocken kompaktiertem Material.



**Abb. 6-2** Zusammenfassung aller Meßwerte der Kategorie „feucht kompaktiert“ mit  $n > 0,3\%$  und Ausgleichsgerade mit der Steigung  $m_0 = 5,25$

Neben der gemeinsamen Regression mit allen Daten wurden auch getrennte jeweils mit den Daten für feucht und trocken kompaktiertes Material durchgeführt und damit die Relationen abgeleitet, mit denen das unterschiedliche Verhalten Permeabilitäts-Porositätsrelationen beschrieben wird.

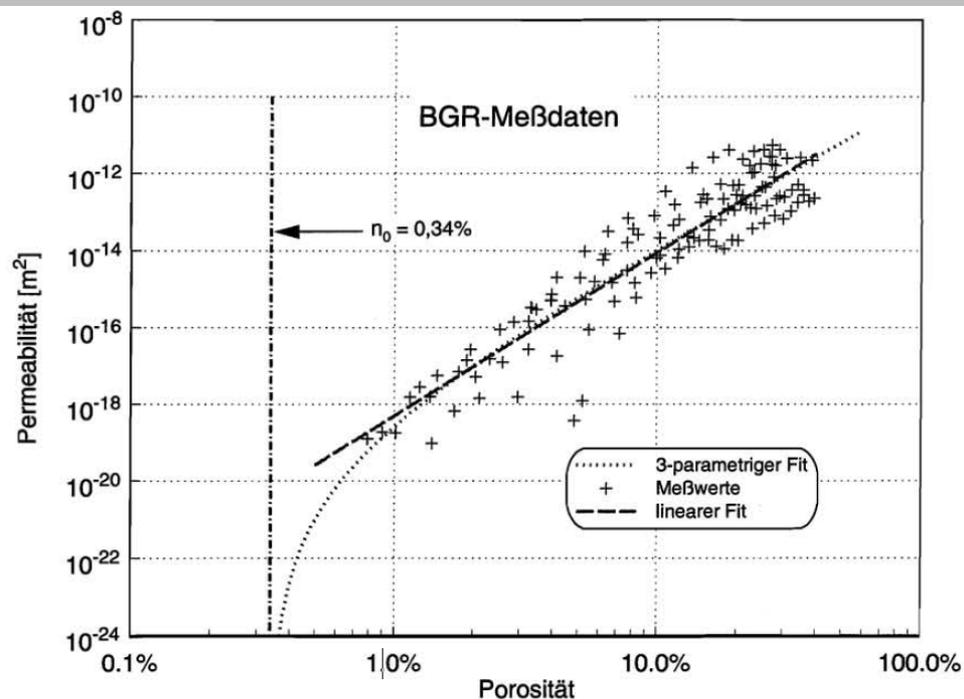
Danach lautet die Permeabilitäts-Porositätsrelation mit den statistischen Bestwerten für trocken kompaktierten Salzgrus mit Porositäten  $> 0,3\%$ :

$$k = 1,303 \cdot 10^{-10} \cdot n^{3,841} \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Gl.3a})$$

In der Potenzfunktion ist für  $n$  die totale Porosität als dimensionsloser Zahlenwert einzusetzen. Die entsprechende Relation für feucht kompaktierten Salzgrus lautet:

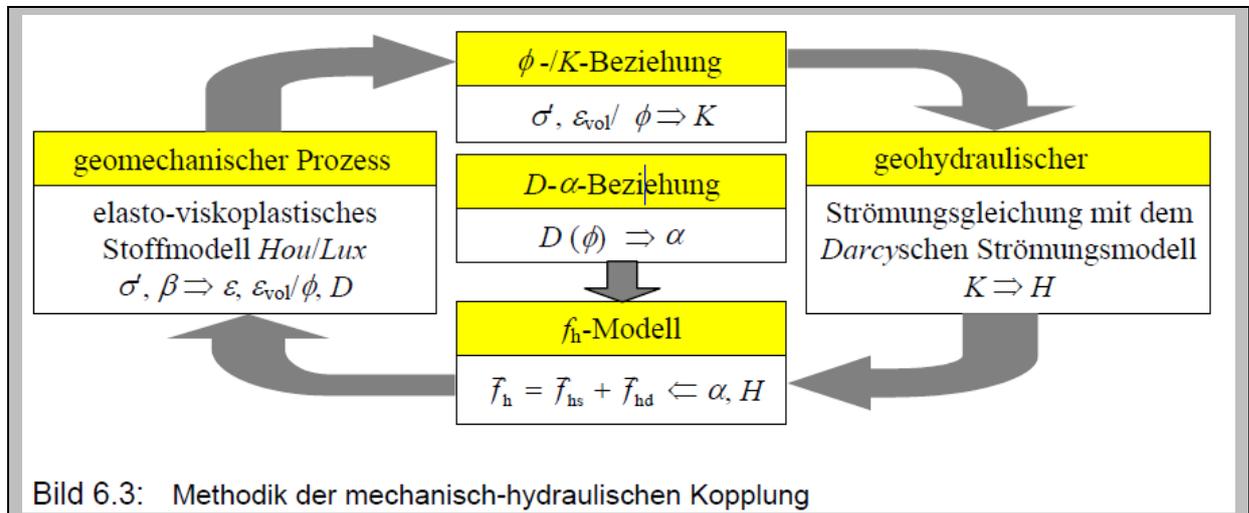
$$k = 7,464 \cdot 10^{-9} \cdot n^{5,253} \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Gl.3b})$$

Die publizierten Messdaten mit totalen Porositäten  $< 0,3\%$  wurden in /MYL 99/ nicht berücksichtigt, da für diese Werte gezeigt werden konnte, dass deren relative Messfehler eine unzulässige, systematische Verringerung der mittels Regressionsanalysen bestimmten Porositäts-exponenten zur Folge haben.



**Abb. 6-10** Regression der BGR-Daten nach dem linearen 2-parametrigen Modell ( 3 ) und dem nichtlinearen 3-parametrigen Modell ( 25 )

Nach Lux et al. (aus /NN 03/; S.117) kann aufbauend auf der mechanisch berechneten Volumendilatanz eine rechnerische Koppelung zwischen den mechanischen Größen und der Durchlässigkeit der Gebirgsstruktur hergestellt werden. Dabei überlagern die hydraulischen Kräfte die mechanischen Kräfte.



Nach /EBE 08/ ermöglicht das Stoffmodell von Korthaus / Hein die Ermittlung der Porositätsänderung im Versatzkörper mit fortschreitender Kompaktion. Die Poro-Perm-Beziehung für Salzgrus als Versatzmaterial ergibt sich zu:  $k = 6,237 \cdot 10^{-10} \phi^{4,497}$  für trockenen und feuchten Salzgrusversatz und ist für Porositäten von  $\phi > 0,3 \%$  (0,003) gültig.

### ➤ Salzgrus (+Brikett); Porosität

Die Porosität ist definiert als der Quotient des Porenvolumens einer Probe zu dem Gesamtvolumen dieser Probe. Aus dieser Definition wird deutlich, dass die Porosität eine wichtige Größe zur Beschreibung der erzielten Kompaktierung ist. Dementsprechend ist sie eine entscheidende Materialgröße, die bei der Beschreibung eines granularen Materials zu den Größen hinzutritt die zur Beschreibung eines kompakten Materials erforderlich sind. Äquivalent zu dieser Größe sind die Parameter Porenzahl definiert als das Verhältnis von Porenraumvolumen zu Feststoffvolumen und die relative Dichte definiert als das Verhältnis der Dichte der granularen Probe zur Dichte des kompaktierten Materials.(aus /HEI 91/, siehe Stoffgesetz)

Nach /GLA 91/ schwanken die an Kammerverschlüssen 2/3 in der Asse gemessenen Permeabilitäten um drei Zehnerpotenzen und die Porenvolumina zwischen 2,7 % und 15 %. Die ermittelte Kornrohddichte lagen mit 2,18 t/m<sup>3</sup> bis 2,29 t/m<sup>3</sup> über der von Steinsalz. Auch die Trockendichten von 1,86 t/m<sup>3</sup> bis 2,16 t/m<sup>3</sup> lagen trotz der teilweise noch erheblichen Porenvolumina in der Größenordnung der von Steinsalz bzw. nur knapp darunter. Diese hohen Dichten lassen sich auf die Bestandteile mit höheren Korndichten zurückführen. Wegen der

stark wechselnden Mineralzusammensetzungen der einzelnen Proben konnte nur teilweise eine Abhängigkeit zwischen Durchlässigkeit und Porenvolumen der untersuchten Proben nachgewiesen werden.

Die Zusammensetzung des Versatzmaterials war äußerst heterogen, da es nicht nur aus Steinsalz sondern auch aus Rückständen des Bergwerksbetriebes und Fabrikationsprozessen bestand. Die untersuchten Proben aus den Kammern 2 und 3 des östlichen Feldes setzten sich überwiegend aus den Mineralien Halit und Kieserit zusammen. Sie enthielten noch erhebliche Anteile Anhydrit und Kainit. Auch Gips und Magnesit konnten in einigen Proben nachgewiesen werden.

S.129; Diese ersten Untersuchungen an über 60 Jahre verdichtetem Versatzmaterial zeigen jedoch, daß trotz der schlechten Grundvoraussetzungen, die dieses Material mit seiner heterogenen Zusammensetzung mitbrachte, zwar teilweise erheblich schlechtere Materialkennwerte als die von Steinsalz ermittelt wurden, andererseits aber Hinweise darauf erhalten wurden, daß dieser ca. 60 Jahre alte Versatz schon erheblich auf eine Restporosität von im Mittel 7,28 % verdichtet war.

Nach /HOU 02/ ist die Porosität zwar die direkte Ursache für die Permeabilität, Erfahrungen und Beobachtungen zeigen aber, dass eine von unterschiedlichen Beanspruchungen verursachte gleiche Porosität ( $\phi$  konst.) zu deutlich unterschiedlichen Permeabilitäten führen kann. Je größer die Minimalspannung in diesem Fall ist, desto weniger wird die Permeabilität erhöht, /STM 90/. Deswegen sind die Ansätze für Salzgerus wie z.B. nach /FEI 96/ und /MYL 99/ nicht geeignet, um die Permeabilitätsentwicklung von Salzgesteinen zu beschreiben.

/GLA 91/ S.128...Messungen nach 60 Jahren an „Alt-Versatz“ zum Verschluss der Zugänge zu den Kaliabbau-Kammern 2/3...

Bei den weiteren Laborversuchen wurden die folgenden Materialkennwerte ermittelt:

- Kornrohddichte	2,18	bis	2,29	(2,23)	t/m <sup>3</sup>
- Trockendichte	1,86	bis	2,16	(2,07)	t/m <sup>3</sup>
- Porosität	2,7	bis	14,7	(7,28)	%
- Permeabilität	$1,8 \cdot 10^{-14}$	bis	$2,6 \cdot 10^{-13}$		m <sup>2</sup>
- Einaxiale Druckfestigkeit	4,6		3,3	(3,95)	MPa
- Einaxiale Zugfestigkeit	0,46	bis	1,21	(0,81)	MPa
- Winkel der inneren Reib.				41,3	°
- Kohäsionsschubspannung				0,9	MPa
- E-Modul	0,94		1,4	(1,17)	GPa
- Sekund. Kriechgeschwind.	0,0098		0,039	(0,0244)	1/d

#### ➤ Salzgrus (+Brikett); Relative Permeabilität

/BEC 01/ (GRS-164, GRS 242)

Für die Berechnung der Zweiphasenströmung existieren mathematische Beschreibungen, die für poröse Medien auch erfolgreich angewendet wurden. Inwieweit diese Beschreibungen allerdings für sehr gering poröse Medien, wie den kompaktierten Salzgrus in einem Endlager im Salz gelten, ist nicht geklärt. Insbesondere müssen für die Modellierung der Zweiphasenströmung Beziehungen für die Zusammenhänge zwischen der relativen Permeabilität und der Sättigung sowie des Kapillardrucks und der Sättigung bestimmt werden

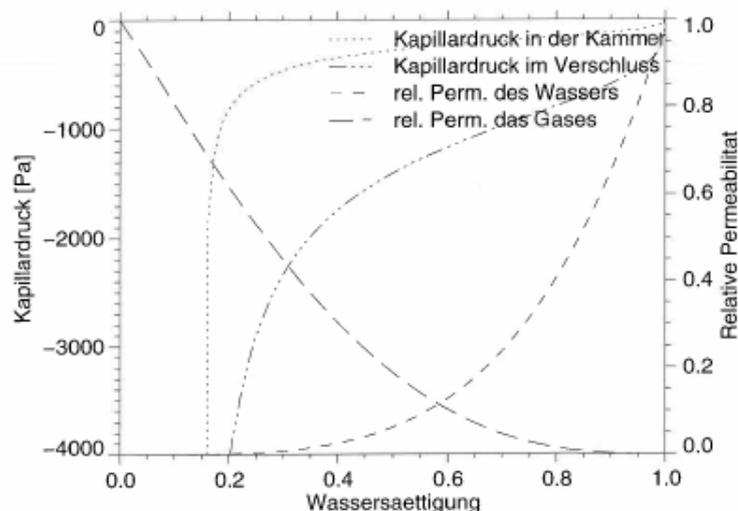


Abb. 4.2: Relative Permeabilität und Kapillardruck als Funktion der Sättigung

4.1.2 Materialeigenschaften...Es wird angenommen, daß die Einlagerungskammer und die Zugangsstrecke mit Abfall bzw. Salzgrus gefüllt sind und daher hohe Porositäten und Permeabilitäten haben. Der Verschuß soll aus einem Mineralgemisch bestehen. Er wird mit einer Porosität von 0,2 und einer absoluten Permeabilität von 10-14 m<sup>2</sup> modelliert. Für die relative Permeabilitäts-Sättigungs-Beziehung wird im gesamten Modellgebiet einheitlich eine Corey-Funktion mit einem Formfaktor von  $\lambda = 2,0$  verwendet. Für die Kapillardruck-Sättigungs-Funktion werden Beziehungen nach van Genuchten angewendet. Für den Formfaktor wird im gesamten Modellgebiet ein Wert von  $n = 3,0$  verwendet. Als Vorfaktor wird für die Einlagerungskammer und für die Zugangsstrecke jeweils ein Wert von  $\lambda = 0,005$  angesetzt. Für den Verschluss mit der niedrigeren Permeabilität wird ein Wert von  $\lambda = 0,001$  verwendet, um dem höheren Kapillardruck Rechnung zu tragen. (aus GRS 158; *Zweiphasenfluß-Modellrechnungen zur Berücksichtigung der Gasproduktion in Endlagern und Modellansätze für Langzeitsicherheitsanalysen*).

Van Genuchten – Mualem Ansatz

$$k_{r,Laug} = S_e^\epsilon \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2,$$

$$k_{r,Gas} = (1 - S_e)^\gamma \left[ 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right]^{2m}$$

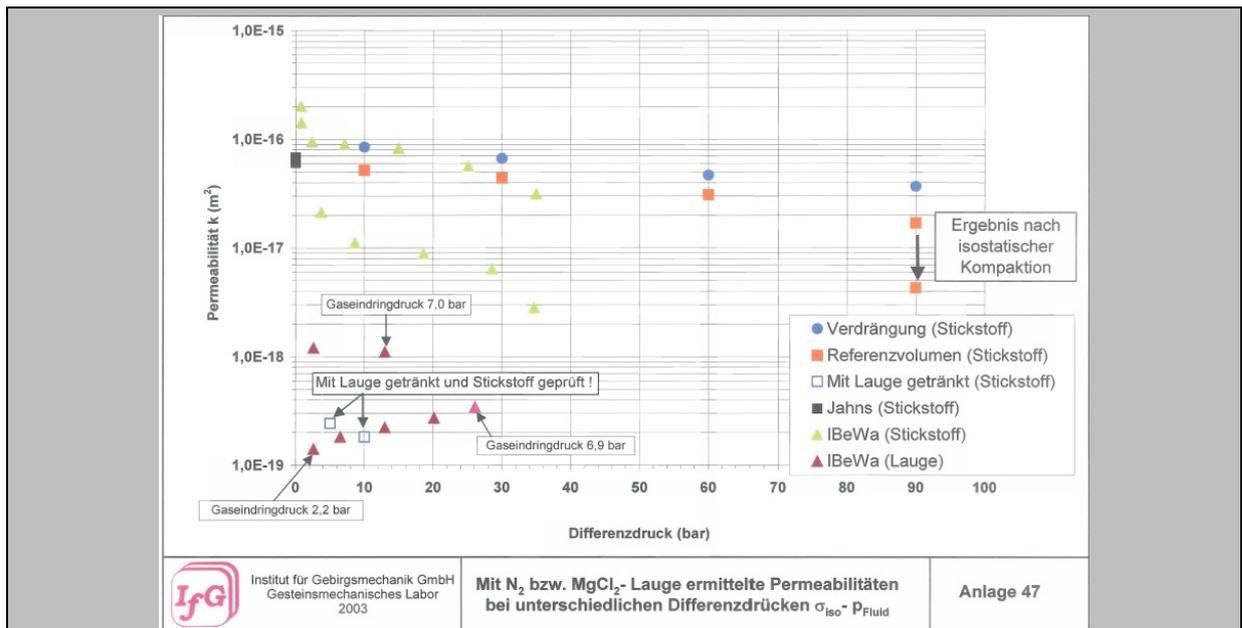
Brooks-Corey – Burdine Ansatz

$$k_{r,Laug} = S_e^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}},$$

$$k_{r,Gas} = (1 - S_e)^2 \left( 1 - S_e^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \right)$$

### ➤ Sorelbeton

Nach /IFG 04/ wurden Permeabilitätsmessungen sowohl im Labor als auch in situ an Sorelbeton aus der Asse-Pilotströmungsbarriere durchgeführt. Die Labormessungen erfolgten mit Stickstoff und MgCl<sub>2</sub>-Lauge (/IFG 04/, Anlage 47) . Die In-situ-Werte liegen zwischen 10<sup>-20</sup> und 10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup> (/IFG 04/, S.41).



Tab. 18: Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen in den Bohrungen MB 1 bis MB 5

Messbohrung	Bohrlochteufe [m]	Anstehendes	Versuchsdauer [h]	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]	Porosität [%]
1	6,5	Sorelbeton	7,3	3,0 · 10 <sup>-18</sup>	2,3
	8,0	Sorelbeton	17,2	7,0 · 10 <sup>-19</sup>	2,0
	9,0	Sorelbeton	66,4	1,4 · 10 <sup>-19</sup>	7,9
	9,4	Steinsalz	17,3	1,8 · 10 <sup>-19</sup>	0,79
	13,0	Steinsalz	17,8	2,2 · 10 <sup>-21</sup>	0,47
	19,5	Steinsalz	86,7	2,1 · 10 <sup>-21</sup>	0,53
2	9,5	Sorelbeton	13,8	1,1 · 10 <sup>-18</sup>	2,0
	12,0	Sorelbeton	14,4	2,1 · 10 <sup>-18</sup>	8,0
	14,4	Sorelbeton	14,3	1,3 · 10 <sup>-18</sup>	7,8
	15,5	Steinsalz	18,9	1,4 · 10 <sup>-20</sup>	0,40
3	8,0	Sorelbeton	13,4	1,4 · 10 <sup>-18</sup>	7,8
	10,0	Sorelbeton	20,2	5,7 · 10 <sup>-19</sup>	2,0
	13,0	Sorelbeton	13,9	1,5 · 10 <sup>-18</sup>	7,9
	15,0	Sorelbeton	67,9	1,1 · 10 <sup>-19</sup>	1,9
	19,0	Sorelbeton	111,5	2,7 · 10 <sup>-19</sup>	7,9
	25,0	Sorelbeton	15,3	7,3 · 10 <sup>-19</sup>	2,0
4	7,0	Sorelbeton	111,5	4,1 · 10 <sup>-20</sup>	7,8
	10,0	Sorelbeton	14,6	1,4 · 10 <sup>-18</sup>	8,0
	14,5	Steinsalz	65,9	1,6 · 10 <sup>-19</sup>	0,79
5	5,6	Sorelbeton	16,0	2,2 · 10 <sup>-18</sup>	1,8
	7,0	Sorelbeton	68,0	2,8 · 10 <sup>-19</sup>	2,0
	7,25	Sorelbeton	16,1	2,5 · 10 <sup>-18</sup>	8,0
	10,0	Steinsalz	13,3	3,2 · 10 <sup>-19</sup>	0,79
	13,0	Steinsalz	15,9	1,5 · 10 <sup>-19</sup>	0,80

➤ **Sorelbeton; Porosität**

Sorel-Bindemittel bestehen aus basischen Mg-Salzhydraten. Diese bilden sich in einer exothermen Reaktion aus MgO und MgCl<sub>2</sub>-Lösungen. Die hauptsächlichen Bindemittelphasen sind:

- 3-1-8 Phase (Magnesiumoxichlorid: Koshunowskit) ist die thermodynamisch stabile, d. h. langzeitstabile Phase in MgCl<sub>2</sub>-haltigen Lösungen (ab 50 g/l Lsg)
- 5-1-8 Phase (metastabil) \_

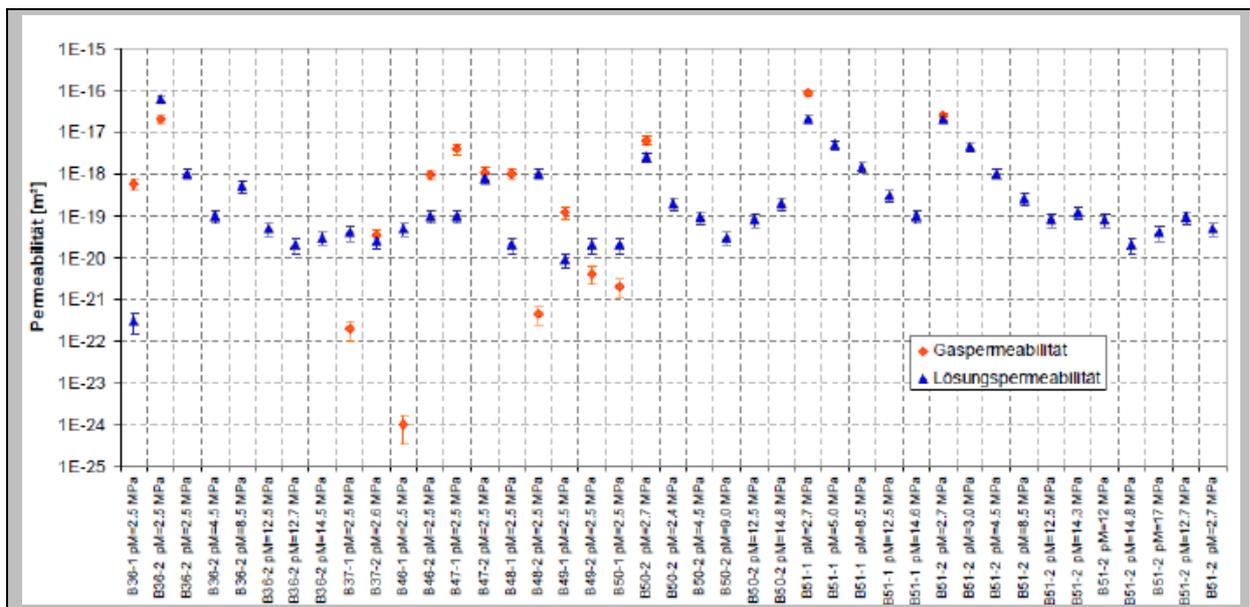
●9-1-4 Phase (Hochtemperaturphasen)

Rezepturen für verschiedene Magnesiabinder wurden von DBE-Technology, K-UTEC und TU BA Freiberg entwickelt. ...GRS-267

➤ **Salzbeton**

In /STO 94/ werden Laboruntersuchungen an Salzbetonproben beschrieben. Die angegebenen Permeabilitäten liegen zwischen  $k = 10^{-17} - 10^{-16} \text{ m}^2$ . Nach /DBE 10a/ wurden Gas- und Lösungspemeabilitäten im Salzbeton M2 an Probenmaterial aus dem ASSE-Vordamm ermittelt (Abbildung 6.1-4 /DBE 10a/ S.50). Aufgrund der Teilsättigung der Proben handelt es sich um effektive Permeabilitäten. Ein Einfluss einer Mehrphasenströmung auf die Werte wird ausgeschlossen.

Die effektive Gaspermeabilität wurde für alle Proben bei einem Manteldruck von 2,4 MPa bis 2,9 MPa und bei einem Strömungsdruck von ca. 1 MPa ermittelt. Sie betrug für die Salzbetonproben B36-1 und B37-1  $2\text{E}-22 \text{ m}^2$  und  $5,6\text{E}-19 \text{ m}^2$ , für die Proben aus dem Kontaktbereich lag sie zwischen  $8,8\text{E}-17 \text{ m}^2$  und  $1\text{E}-24 \text{ m}^2$ .



/DBE 10a/; Untersuchung der Kontaktzone am ASSE-Vordamm; Salzbeton; M2; Permeabilitäten, S.46/47 und S.50.

➤ **Salzbeton; Porosität**

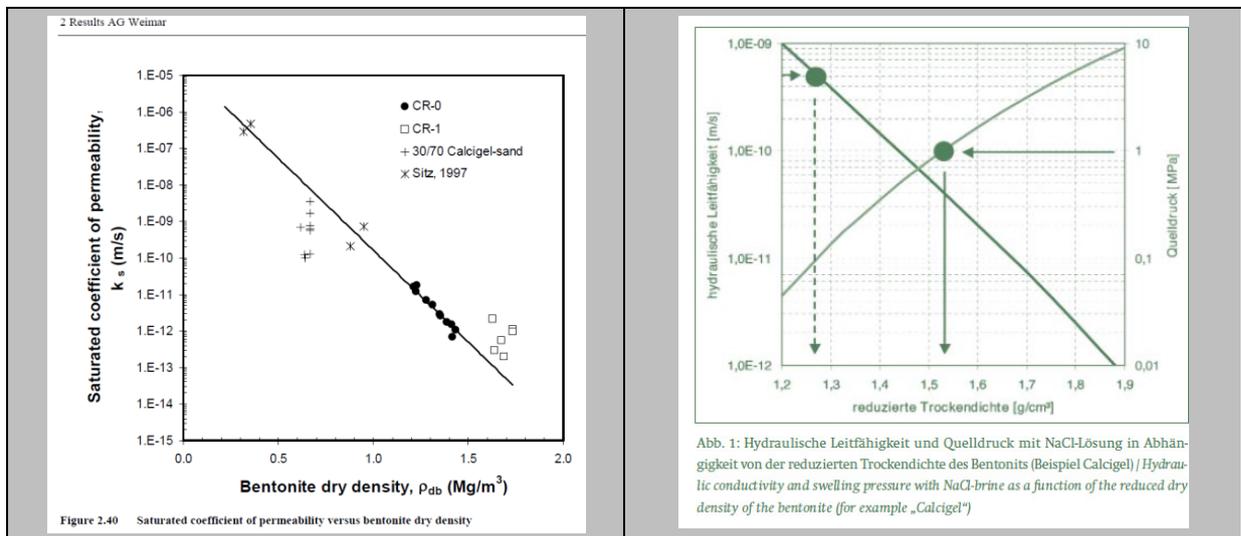
Salzbeton ist ein Gemisch aus Zement, Zuschlagstoffen (Salz, Filteraschen) und Anmachwasser. Der in Morsleben eingesetzte Salzbeton M2 hat die Zusammensetzung: 328 kg CEM III-Zement, 1072 kg Salzzuschlag, 328 kg Filterasche und 267 kg Wasser. Salzbeton

hat zwei besondere zeitabhängige Eigenschaften: Erstens erfährt er durch die Austrocknung eine Volumenabnahme, was als Schwinden bezeichnet wird und zweitens verformt er sich unter konstanter Last mit der Zeit, das so genannte Kriechen. Die Festigkeit verleihenden Komponenten sind CSH-, und CAH-Phasen...aus /ROT 11/ (GRS-267, S.77).

Tab. 2: Für Bentonit-Sand-Gemische dokumentierte Parameter

Bentonit (30/70)	$k_s = a \exp(-0,12 \rho)$	$m \text{ s}^{-1}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	-	/GRU 05/
Bentonit (50/50) (*) e = Porenzahl	$k_s = a e^b \text{ (*)}$	$m \text{ s}^{-1}$	$2,39 \cdot 10^{-10}$	5,25	/GRU 05/

➤ **Ca-Bentonit (Calcigel,...); Na-Bentonit (MX 80, Wyoming, SPV Volclay...)**



K+S 3/2003, Sitz, P. et al.: Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar

➤ **Bentonit; Porosität**

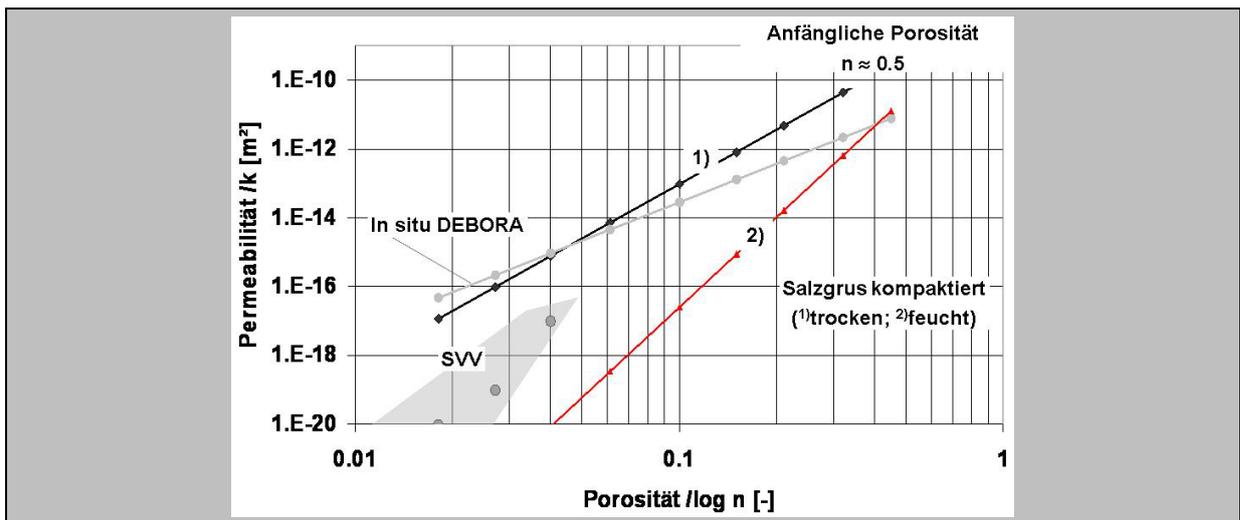
Ca-Bentonit (Calcigel, Montigel...); Na-Bentonit (MX80, Wyoming, SPV Volclay...)

CALCIGEL	Ca-Bentonit der Süd-Chemie AG aus bayerischen Vorkommen, Montmorillonitgehalt ca. 70 % in natürlicher Belegung (Ca, Mg).
IBECO-Ca-Bentonit	Ca-Bentonit der Firma IBECO Bentonit-Technologie mit bis zu 80 % Montmorillonit in natürlicher Belegung aus unterschiedlichen Vorkommen.
MX-80	Weltweit für die Endlagerung untersuchtes Referenzprodukt mit einem Montmorillonitgehalt von 75 % aus amerikanischen Vorkommen (Wyoming).
Friedländer Ton	Besteht aus 44 % unregelmässigem Muskovit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineralen mit 60 ... 70 % Montmorillonit, woraus ein Gesamtmontmorillonitgehalt von ca. 30 % resultiert.

aus /BRE 02/

➤ **SVV**

Nach /HER 05/ besteht die gleiche Permeabilität-Porosität-Beziehung wie beim Salzgrus. Im Endzustand erreicht der verfestigte SVV von  $10^{-18} \text{m}^2$ .



➤ **Schotter**

Für die Permeabilität des Schotters wird von /MHO 11/ (S. 8) der Wert von Grobkies, der in der Bandbreite von 10-09 bis 10-07 m<sup>2</sup> liegt, angesetzt.

Die Porosität des Schotters hängt von der Einbringtechnologie ab, bei Anwendung der Versturztechnologie, z.B. über API Falleitungen, kann die Porosität des Schotters auf bis zu 23 % absinken, wobei eine Kornzertrümmerung stattfindet. Bei verdichteter Einbringung mittels Fahrzeugen oder Kübelförderung wird eine Porosität von 38% erreicht. Diese Porosität ist bei der Einbringung in nahezu horizontale Strecken, z.B. im Infrastrukturbereich/Anschlussbereich der Erkundungssohle zu erwarten. Es ist zu beachten, dass im Fall

des Schotters nur die Wahl des oberen oder unteren Wertes sinnvoll ist, da die Abhängigkeit von der Einbringtechnik besteht und zu erwarten ist, dass diese für einzelne Verfüllabschnitte jeweils beibehalten wird.

➤ **Schotter; Porosität**

Für die Permeabilität des Schotters wird von /MHO 11/ (S. 8) der Wert von Grobkies, der in der Bandbreite von 10-09 bis 10-07 m<sup>2</sup> liegt, angesetzt.

Die Porosität des Schotters hängt von der Einbringtechnologie ab, bei Anwendung der Ver-  
sturztechnologie, z.B. über API Falleitungen, kann die Porosität des Schotters auf bis zu 23  
% absinken, wobei eine Kornzertrümmerung stattfindet. Bei verdichteter Einbringung mittels  
Fahrzeugen oder Kübelförderung wird eine Porosität von 38% erreicht. Diese Porosität ist  
bei der Einbringung in nahezu horizontale Strecken, z.B. im Infrastrukturbereich/Anschlussbereich der Erkundungssohle zu erwarten. Es ist zu beachten, dass im Fall  
des Schotters nur die Wahl des oberen oder unteren Wertes sinnvoll ist, da die Abhängigkeit  
von der Einbringtechnik besteht und zu erwarten ist, dass diese für einzelne Verfüllabschnitte  
jeweils beibehalten wird.

➤ **Beton**

Keine Werte in der gesichteten Literatur (keine Literaturangaben für Salzbergbau verfügbar)

## 9.2.2 Literaturverzeichnis

- /ALK 08/ Alkan, H. & Müller, W (2008): Numerical Modelling of Dilatancy Induced Percolative Permeation in Rock Salt, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Köln.
- /BEC 01/ Becker, D.-A. (2001): Experimentelle und theoretische Untersuchungen physikalisch-chemischer Vorgänge beim Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken - Theoretischer Teil, Förderkennzeichen BMWi 02E8856 und 02E8966, SIG-02/99, Stoller Ingenieurtechnik GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-164, Braunschweig, ISBN 3-931995-29-1
- /BEC 04/ Bechthold, W., Smailos, S., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., (2004). - Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project), Final Report, European Commission, EUR 20621 EN. Tech. rep.
- /BEC 99a/ Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., et al. (1999). - Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radi-oactive Waste in Salt (BAMBUS Project), Final Report, European Commission, EUR19124 EN. Tech. rep.
- /BOL 96/ Bollingerfehr, W., (1996): Dam constructions in radioactive waste repositories in salt formation – long-term sealing system, European Commission, nuclear science and technology, EUR 16856EN, Luxembourg.
- /BRE 02/ Breidung, K-P. (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. – Abschlussbericht. BMBF FKZ 02C0516, K+S-Aktiengesellschaft, Kas-sel.
- /CAR 56/ Carman, P.C. (1956): Flow of Gases Through Porous Media. Buttenworths Scientific Publications, London.
- /CAS 07/ Castagna, S. ( 2007): Thermohydraulic Behaviour of Unsaturated Salt Aggregates. – Dissertation. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, Barcelona
- /CHA 01/ Chang, W.S. (2001): Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung. – Dissertation, Uni Stuttgart.

- /DBE 96/ DBE, (1996): FEM-Berechnungen der Belastungen und Verschiebungen des Innenausbaufundamentes und der Stützringe des Schachtes GORLEBEN 1, Peine.
- /DBE 09/ NN 2009: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.- Verfahrensunterlage G296. Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtbauwerke im Steinsalz. Blatt 12, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter.
- /DBE 10/ DBE 2010: Ergänzende mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnungen zur Nachweisführung für Abdichtbauwerke im Steinsalz, 9M/22310171/ECC/GH/LD/0007/01, Stand 23.07.2010.
- /DBE 10a/ DBE 2010: Untersuchung der Kontaktzone am ASSE-Vordamm  
– Gesamtinterpretation, 9M/22310131/ECC/GH/BZ/0021/01, Stand 15.07.2010.  
DBE 2010:  
– Zusammenfassung und Interpretation der Messergebnisse  
9M/22310131/ECC/GH/BZ/0035/01, Stand 03.05.2010.
- /DIN 18125-1/ (2010): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 1: Laborversuche, Beuth-Verlag, Berlin.
- /DIX 93/ Dixon, D.A., Gray, M.N., Lingnau, B.E., Graham, J., and Campbell, S.L. 1993. Thermal expansion testing to determine the influence of pore water structure on water flow through dense clays. In Proceedings of the 46th Canadian Geotechnical Conference, September 1993, Saskatoon.
- /EBE 08/ Ebert, S. (2008): Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge, Dissertation, Schriftenreihe Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, TU Clausthal, Heft Nr. 15, Clausthal.
- /ELL 04/ Elliger, C. (2004): Untersuchungen zum Permeationsverhalten von Salzlauge in Steinsalz bei der Endlagerung Wärme entwickelnder nuklearer Abfälle, Dissertation TU Darmstadt.
- /ENG 04/ Engelhardt, I. (2004): Experimental and Numerical Investigations with Respect to the Material Properties of Geotechnical Barriers. - Dissertation, TU-Tübingen.

- /FAM 98/ Fam, M., Santamarina, J., Dusseault, M. (1998): Wave-based Monitoring Processes in Granular Salt. - JEEG, Volume 3, Issue 1, March 1998, p. 15-26.  
Quelle: [http://pmrl.ce.gatech.edu/papers/Fam\\_1998f.pdf](http://pmrl.ce.gatech.edu/papers/Fam_1998f.pdf)
- /FEI 96/ Fein, E., Müller-Lyda, I., R. Storck (1996): Ableitung einer Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salzgrus und Dammbaumaterial, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-132, Köln
- /GLA 91/ Gläß, F., Kappei, G., Schmidt, M. W., et al. (1991): Untersuchungen zum Versatz und Verschuß von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz. Abschlußbericht, GSF 19/91.
- /GLA 92/ Gläß, F., Kappel, G., Schmidt, M.W., Schwieger, K., Starke, C., Taubert, E., Wallmüller, R., Walter, F., 1992: Untersuchung zum Versatz und Verschuß von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, kernforschung und -technologie, EUR 13955 DE
- /GRU 05/ Gruner, M., Sitz, P., Herbert, H.-J., Moog, H.C., Kolditz, O., Schanz, T. et al. (2005): Experimentelle und numerische Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken im Salinar mit Bentonitgemischen als Dichtelement, Schlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02C0881
- /HEE 04/ U. Heemann, S. Heusermann (2004): Theoretical and Experimental Investigation on Stresses and Permeability in the BAMBUS Projekt, Distec, Berlin.
- /HEI 91/ Hein, H.J. (1991): Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat, Dissertation, RWTH Aachen.
- /HER 02/ Herbert, H.-J., Kasbohm, J., Venz, C., Kull, H., Moog, H.C., Sprenger, H. (2002): Langzeitstabilität von Tondichtungen in Salzformationen – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS 185, ISBN Nr. 3-93 1995 -53-4, 253 S.
- /HER 02a/ Herbert, H.-J., Moog, H.C. (2002): Untersuchungen zur Quellung von Bentoniten in hochsalinaren Lösungen, Abschlussbericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-179, ISBN 3-931995-47-X

- /HER 05/ Herbert, H.-J., Kull, H., Müller-Lyda, I. (2005): Weiterentwicklung eines Selbst Verheilenden Versatzes (SVV) als Komponente im Barriersystem Salinar, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-220, 53 S., ISBN 3-931995-90-9
- /HOU 02/ Z. Hou (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung, Heft 13, 366 Seiten .
- /IfG 04/ IfG (2004): Anwendungsbezogene Untersuchungen an einer Pilotströmungsbarriere – Labortests am Sorelbeton und In-situ Untersuchungen – Abschlußbericht, Dok.-Kennz.: A/01VER/GB/FU/0005/00, Stand: 27.02.2004 (entspricht KAM 04 (s.o.)
- /IfG 06/ IfG (2006): Ergebnisse gesteinsmechanischer Untersuchungen an Proben mit Kontaktflächen zwischen Steinsalz und Salzbeton sowie kompaktem Salzbeton des ASSE-Vordammes, 9M/22310131/ECC/GH/BZ/0014, Stand 13.10.2006.
- /IfT 89/ Dammbau im Salzgebirge, Untersuchung und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Optimierung eines Dammbauwerks, Jahresbericht 1988, BMFT-Förderkennzeichen KWA 5603 6, FE-Vorhaben 77289, Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung München, Institut für Tief Lagerung, Abteilung für Endlagertechnologie, IfT-Abteilungsbericht 2/89.
- /KAP 84/ Kappei, G., Gessler, K. (1984): In Situ Tests on the Behaviour of Backfill Materials, 2nd Conference on the Mechanical Behaviour of Salt, Federal Institute for geosciences and Natural Resources (BGR), Hanover, Germany
- /KEL 84/ Kelsall, P., Case, J., Nelson, J., Franzone, J. (1984): Assessment of crushed salt consolidation and fracture healing in a nuclear waste repository in salt. – WMSYM 1984/KEZ 69  
neu: <http://www.wmsym.org/archives/1984/V1/69.pdf>
- /KEZ 69/ Kézdi, Á. (1969): Handbuch der Bodenmechanik.- Bd.1 Bodenphysik, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- /KOR 98/ Korthaus, E. (1998 ): Experiments on Crushed Salt Consolidation with True Triaxial Testing Device as a Contribution to an Benchmark Calculation. – EU Contract No.

F114-CT95-0009, Commission of the European Communities, WB FZKA 6181, Forschungszentrum Karlsruhe.

- /KRA 08/ Krauke, W., Fliß, T. 2008: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.- Verfahrensunterlage P266. Konzeption und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabinder. S.18, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter.
- /KRO 09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, Ch., Xie, Mingliang, 2009: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM – Phase 1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-254
- /MHO 11/ Müller-Hoeppe, N. 2011: Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen, Bericht – ENTWURF –, Stand: 11.02.2011, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY, Peine.
- /MYL 99/ Müller-Lyda, I., Birthler, H., Fein, E. (1999): Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-148, Köln
- /NTB 82/ Müller-Vonmoos, M., Kahr, G. (1982): Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX 80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode. – Inst. F. Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich, NAGRA Technischer Bericht NTB 82-06, Baden / Schweiz.
- /NTB 83/ Müller-Vonmoos, M., Kahr, G. (1983): Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel. – Inst. F. Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich, NAGRA Technischer Bericht NTB 83-12, Baden / Schweiz.
- /NOS 01/ Noseck, U (2001): Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern, Förderkennzeichen BMWi 02 E 8855, GRS-153, GRS Braunschweig, ISBN 3-931995-15-1
- /POP 06/ Popp, T., Böhnel, H., Salzer K. (2006): Investigation of the Mechanical Behavior of Precompacted Crushed Salt in Contact to the Host Rock, Report on long-term creep tests and gas injection tests on moistened salt bricks during.

- /ROT 98/ Rothfuchs, T., Droste, J., Feddersen, H.-K., Bechthold, W. (1997): Gas Generation and Migration in Crushed Salt, Proceedings Annual PEGASUS Meeting, Mol, Belgium, 27 - 28 May 1997, European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 18167, p. 139–149 (B. Haijink, Ed.), Brussels, 1998
- /ROT 03/ Rothfuchs, T., Dittrich, J., Droste, J., Müller, J., Zhang, C.-L., (2003): Final Evaluation of the Project "Thermal Simulation of Drift Emplacement" (TSDE-Project) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-194, ISBN 3-931995-62-3.
- /ROT 11/ Rothfuchs, T. et al. (2011): Verschlussysteme in Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem Projektträger Karlsruhe PTKA-WTE Braunschweig, 24. – 25. August 2010, Tagungsband GRS-267, Köln. ISBN 978-3-939355-43-4
- /ROT 12/ Literaturliste zur Erfassung und Ableitung qualitätsgesicherter Parameter-werte für numerische Simulationen von Prozessabläufen in Untertagelabors- bzw. Endlagern für radioaktive Abfälle. Stand 2012-01-09. <intern>
- /SAL 07/ Salzer, K. (2007): Untersuchung des mechanischen Verhaltens von kompaktiertem Salzgrus im Kontakt mit dem Wirtsgestein, Förderkennzeichen BMBF 02 E 9904, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig
- /SAL 07d/ Salzer, K., Popp, T., Böhnel, H. (2007): Mechanical and permeability properties of highly pre-compacted granular salt bricks, In: Lux, K.-H., Minkley, W., Wallner, M., Hardy, Jr., H.R. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics, Proc. of the 6th Conf. on the Mech. Behavior of Salt, Hannover 2007, p. 239-248, Lisse, Francis & Taylor (Balkema)
- /SCH 60/ A.E. Scheidegger (1960): The Physics of Flow Through Porous Media. New York, MacMillan Co..
- /SCH 67/ SCHULTZE, E. / MUHS, H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer-Verlag Berlin, 2. Auflage
- /SIT 03/ Sitz, P., Gruner, M., Rumphorst, K. (2003): Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar. –in Kali und Salz 03/2003, Kassel.

- /STM 90/ Stormont, J.C. (1990): Gas Permeability Changes in Rock Salt During Deformation, Dissertation.
- /STM 94/ Stockmann, N., Beinlich, A., Droste, J., Flach, D., Gläß, F., Jockwer, N., Krogmann, P., Mieke, R., Möller, J., Schwägermann, F., Wallmüller, R., Walter, F., Ya-ramanci, U., 1994: Dammbau im Salzgebirge - Abschlußbericht Projektphase II, Berichtszeitraum 01.07.1998-31.12.1992, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Institut für Tieflagerung, GSF-Bericht 18/94
- /STU 04/ Stührenberg, D., Heusermann, St. (2004): Laboratory Investigation on Backfill and Rock Salt within the BAMBUS II Project. Euradwaste '04, 6th EC Conference on the Management and Disposal of Radioactive Waste, 29 March – 1 April, Luxembourg.
- /STU 12/ Stührenberg, D., Schulze, O. (2012): Porosity and permeability of crushed and damaged rock salt during compaction. – SaltMech7, Mechanical Behavior of Salt-7, Paris, April 16 - 19, 2012.
- /WEI 05/ Weise, D., Kamlot, P. (2005): Abschlussbericht zur Analyse der prinzipiellen Funktionstüchtigkeit von Strömungsbarrieren im Forschungsbergwerk Asse, IfG, Leipzig.
- /XIE 00/ Xie, Z. (2000): Rechnerische Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Abdichtungsbauwerken in Untertagedeponien für den Fall eines Lösungszutrittes, Heft 12, 278 Seiten.
- /ZHA 93/ Zhang, C.-L., Schmidt, M.W., Staupendahl, G., Heemann, U. (1993): Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salz-grus. - Inst. F. Statik TU BS Bericht Nr. 93-73 und GSF-Inst. F. Tieflagerung, Braunschweig
- Neu: <http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2001/nea3060-gas-generation-migration-disposal.pdf>
- /MÜL 00/ Müller, W. (2000): Gas Migration through Salt Rocks. - S.91-98; In Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal. Safety-relevant Issues. – AEN/NEA OECD Proceedings of Workshop Reins, France 26-28 June 2000
- /MYL 00/ Müller-Lyda, I., Javeri, V., Müller, W. (2000): GRS/ISTec Strategy for the Treatment of Gas-related Issues for Repositories Located in Rock Salt. - S.161-168; In Gas Gen-

eration and Migration in Radioactive Waste Disposal. Safety-relevant Issues. – AEN/NEA OECD Proceedings of Workshop Reins, France 26-28 June 2000

/PUS 00/ Pusch, G., Alkan, H., Cinar, Y., Meyn, R., Reitenbach, V. (2000): Gas Flow Anomalies in Natural and Engineered Barriers. - S.175-180; In Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal. Safety-relevant Issues. – AEN/NEA OECD Proceedings of Workshop Reins, France 26-28 June 2000



## 10 Elastische Parameter von Steinsalz

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturlauswertung</b>
<b>Standort</b>	<b>Gorleben</b>
<b>Material:</b>	<b>Steinsalz</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_xx.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Elastizitätsmodul Poisson-Zahl</b>
Anlage 01 Protokolle Best-Estimate-Wert (BEW) Anlage 02 Begründung	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Ulrich Heemann, unterstützt von H. Schnier, O. Schulze, S. Heusermann, I. Plischke</b>
<b>Datum:</b>	<b>2012-11-26</b>

10.1 Protokoll

<b>Parameter</b> <i>frmdata</i>	<b>VIRTUS: Elastizitätsmodul</b>	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz	unabhängig	unabhängig

<b>Wert</b> <i>frmdata</i>	<b>Einheit</b> <i>functionparameter</i>	<b>Symbol</b> <i>functionparameter</i>	<b>Bemerkung</b>
$E = (43.0 - 0.022 \text{ K}^{-1} T) \text{ GPa}$ $\nu = 0.25$	GPa, -	E, $\nu$	

<b>Zitat; Symbol</b> <i>frmReference</i>	<b>Literatur</b> <i>citation</i>
<b>Beschreibung</b> <i>frmdata ;description</i>	Steinsalz aller Stratigraphien.
<b>Anmerkungen</b> <i>frmdata ; InternalRemark</i>	Sofern Fremdminerale einen Anteil von einigen Prozent übersteigt, sind die sich ergebenden Kennwerte entsprechend beiliegender Formel zu ermitteln.

<b>Grafik; Screenshot</b>	<b>Tabel- len- werte</b> <i>curvedata</i>	<b>Formel / Gleichung</b> <i>equation</i>	<b>Be- zie- hung /Ges etz</b>
		$E = 36.4 \text{ GPa} \left( 1 - 0.65 \left( \frac{T - 300 \text{ K}}{1070 \text{ K}} \right) \right)$ $\nu = 0.25$	

<i>Numerische Modellierung</i>		
<i>Constitutive model</i> <small><i>frmCategory_ConstitutiveModel</i></small>	<i>Code</i> <small><i>frmCode</i></small>	<i>Funktion</i> <small><i>frmFunktion</i></small>

...wird vom Expertengremium durchgeführt

<i>Bewertung</i>	
<i>dataquality</i>	
<i>datasource</i>	

<i>Erstellt:</i>	<i>Geprüft:</i>	<i>Freigegeben:</i>
<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Datum:</i>

## 10.2 Begründung

### 10.2.1 Allgemeines zu den elastischen Eigenschaften von Steinsalz, den beiden vorherrschenden Messtechniken und deren Bewertung

#### **Einflussgrößen auf die elastischen Kennwerte**

Das elastische Verhalten von Salz ist in dessen reiner Form im Einkristall durch anisotrope Steifigkeiten auf den Hauptachsen im Vergleich zu dessen Flächen und Raumdiagonalen gekennzeichnet. Im natürlichen Zustand liegt Salz allerdings in polykristallinem Zustand vor, so dass sich die unterschiedlichen Steifigkeiten der verschiedenen Kristallrichtungen zu einem isotropen Wert mischen. Gleiches gilt auch für die Querkontraktionszahl.

Natürliches Steinsalz ist allerdings weiterhin durch fein verteilte (gelöste) Anteilen von Fremdmineralien und auch gröbere Fremdteilchen, vorwiegend auf den Korngrenzen, gekennzeichnet. Jedoch kann deren Wirkung selbst bei einem sehr hohen Anteil von z.B. 10% und deutlich abweichender Steifigkeit den Wert der resultierenden elastischen Eigenschaften allenfalls entsprechend seinem relativen Anteil beeinflussen. In der weit überwiegenden Mehrzahl der Proben aus endlagerrelevanten Bereichen ist dieser Anteil entweder sehr klein oder allenfalls im Prozentbereich zu finden. Sein Einfluss ist dementsprechend als sehr klein anzunehmen – anders als dies beim Einfluss von Fremdmaterialien auf das Kriechverhalten von Steinsalz zu erwarten ist.

Der Einfluss der Korngrenzen ist als verschwindend klein anzusetzen, da per definitionem elastisches Verhalten als rein reversibel und letztlich zeitunabhängig zu charakterisieren ist. Verformungen, die auf Korngrenzgleiten zurückzuführen sind, müssen demzufolge als inelastisch klassifiziert werden.

Einen großen Einfluss auf die elastischen Kennwerte eines makroskopischen Körpers können hingegen Risse oder Poren aller Art haben. In diesem Zusammenhang können insbesondere die Korngrenzen als Schwächezonen annehmen. Deren Entstehung und Entwicklung kann im Rahmen von Dilatanzmodellen erfasst werden, die aber eindeutig dem inelastischen Materialverhalten zuzurechnen sind. Derartige Schädigungen des Salzes sind im Rahmen der Probengewinnung nahezu unvermeidlich, so dass die Probe in aller Regel eine reduzierte makroskopische elastische Steifigkeit aufweisen wird (HES02, ). Besonders anfällig dafür sind Proben mit starkem Fremdanteil auf den Korngrenzen. Die gemessenen Werte entsprechen dann aber nicht den Eigenschaften des unverritzten Gebirges.

### Messtechniken zur Elastizität

Eine häufig angewendete Methode der Messung des Elastizitätsmoduls besteht in der schnellen Entlastung und wieder Neubelastung des Probenkörpers, wobei in der Regel der Anstieg

$$E_{\text{stat}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

(bei einaxialer Laständerung) zur Messung des statischen Elastizitätsmoduls verwendet wird. Da die Ent- und Belastungsverläufe eine gewisse Hysterese und auch deutlich nichtlineare Bereiche im oberen und unteren Segment der durchfahrenen Spannungen zeigen, wird i.A. der relativ lineare mittlere Bereich in der Belastung zur Bestimmung des statischen Moduls herangezogen.

Dabei ist auch eine Messung der Querdehnung durch Wegaufnehmer möglich, so dass die Querkontraktionszahl über

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_{\text{rad}}}{\Delta\varepsilon_{\text{ax}}}$$

bestimmt werden kann.

Alternativ können der dynamische E-Modul und die Querkontraktionszahl aus den gemessenen Schallgeschwindigkeiten induzierter p- und s-Wellen aus einem Ultraschallsender bestimmt werden – in Verbindung mit der Dichte des Körpers. Die so ermittelten Steifigkeiten  $E_{\text{dyn}}$  sind im Steinsalz um ca. 40% höher als die statisch ermittelten Werte  $E_{\text{stat}}$ . Umgekehrt sind die dynamisch ermittelten Querkontraktionszahlen  $\nu_{\text{dyn}}$  generell kleiner als die des statischen Pendanten  $\nu_{\text{stat}}$ . Beides lässt sich aus der Wirkung unvermeidlicher Kriechanteile bei der statischen Messung erklären, durch welche einerseits die ansteigende Spannung und somit die Steilheit des Anstiegs reduziert und andererseits die Querdehnung verstärkt wird, da eine deviatorische (volumentreue) Verformung mit einer Querkontraktionszahl 0.5 verbunden ist. Derartige Kriechprozesse sind im Rahmen der sehr schnellen (und nicht sehr großen) Spannungsänderungen im Falle einer durchlaufenden Ultraschallwelle nur in sehr geringem Maße möglich.

Nachteilig an der Ultraschall-Messmethode ist, dass ihre Reichweite empfindlich von einer Vorschädigung einer Probe beeinflusst werden kann, so dass in einigen Fällen insbesondere

eine Längsdurchschallung (axial) aufgrund zu starker Dämpfung nicht möglich ist (Laufwege von i.d.R. 25 cm). Dagegen sind in situ Laufwege von mehr als 70 m bei der Ortung mikroakustischer Signale infolge dilatanter Mikrorissbildung nicht ungewöhnlich.

Weiterhin werden auch die Laufzeiten der Schallwellen im Falle einer Schädigung der Probe relevant beeinflusst, so dass sie die elastischen Eigenschaften des geschädigten Körpers wiedergeben. Die so reduzierte Steifigkeit ist aber als ein Artefakt aus der Probengewinnung zu betrachten und beschreibt nicht die Eigenschaften des ungestörten Gebirgskörpers. In Übereinstimmung mit obigen Betrachtungen können mikroakustische Messungen zwar auch veränderte Schallgeschwindigkeiten im Saum um Bohrlöcher oder Kammern nachweisen, nicht jedoch im Gebirgstiefen.

Dementsprechend werden die Ultraschallmessungen an Proben im Rahmen laufender Untersuchungsreihen auch nicht zur Bestimmung realer elastischer Kennwerte, sondern zur Beurteilung des Schädigungsgrades einer Probe herangezogen.

### **Synthese**

Aus obigen Betrachtungen ist abzuleiten, dass unabhängig von der speziellen Lokation oder Stratigraphie ein einheitlicher Elastizitätsmodul und entsprechend eine Querkontraktionszahl anzusetzen ist. Diese Werte können sich jedoch im Laufe einer Schädigung (anisotrop) verändern, was ggf. im Rahmen der verwendeten Schädigungstheorie zu ermitteln wäre.

Ausnahmen sind lediglich zu machen, wenn Beimengungen fremder Mineralien in erheblichem Umfang auftreten. Dann können bei Fehlen entsprechender Kennwerte die bekannten Werte der beteiligten Materialien in geeigneter Weise gemittelt werden.

Anmerkung: Die elastischen Eigenschaften eines kriechfähigen Materials wie Salz sind in der Praxis geomechanischer Kriechberechnungen generell von untergeordneter Bedeutung für den modellierten Verlauf, da die Kriechverformungen die elastischen generell um ein Vielfaches übersteigen, so dass kleine Unsicherheiten in den verwendeten Parametern problemlos toleriert werden können.

### **10.2.2 Auswertung**

Die seismischen Geschwindigkeiten eines Festkörpers lassen sich unmittelbar aus den elastischen Eigenschaften ableiten. Im isotropen Fall (s. z.B. LAN81) gelten die Beziehungen

$$v_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Daraus lassen durch leichte Umwandlung nach den elastischen Konstanten diese errechnen als

$$G = \rho v_s^2$$

$$K = \rho v_p^2 - 4\rho v_s^2 / 3$$

Aus diesen wiederum lassen sich aus den Beziehungen

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

der Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl ermitteln.

$$E = \frac{9KG}{3K+G}$$

$$\nu = \frac{3K-2G}{2(3K+G)}$$

In der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe wurden zahlreiche Proben statisch und dynamisch auf ihre elastischen Eigenschaften untersucht (s. z.B. HES02a, HES02b, SCH03a, SCH03b, PLI02). Da diese Proben allerdings in situ mithilfe üblicher Kernbohrverfahren gewonnen und anschließend in einer Drehmaschine auf die gewünschte zylindrische Form gebracht wurden, waren gewissen Beeinträchtigungen der Integrität der Probenkörper unvermeidlich. Die routinemäßige Messung der elastischen Steifigkeit wurde deshalb nach einiger Zeit vorwiegend zur Beurteilung der Unversehrtheit der Proben herangezogen. Eine Interpretation der Messwerte als Kennzeichnung der elastischen Kennwerte konnte trotz ursprünglich andersartiger Intention nicht aufrechterhalten werden. Zur Bestimmung der wahren elastischen Eigenschaften von Steinsalz können Sie also nicht herangezogen werden.

In CLA66 finden sich Messdaten zu den dynamisch bestimmten Steifigkeiten von NaCl-Einkristallen für Raumtemperatur (entnommen aus OVE51, LAZ49) und für Temperaturen von

300 K bis zu 1050 K (entnommen aus HUN42) kurz vor dem Schmelzpunkt ( $T_s = 1070\text{K}$ ). Trotz seines einfachen Kristallaufbaus ist der NaCl-Einkristall elastisch anisotrop und durch drei Konstanten gekennzeichnet.

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j$$

$$C_{ij}^{\text{single}} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & & & & \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & & & & \\ & & & C_{44} & & & \\ & & & & C_{44} & & \\ & & & & & C_{44} & \\ & & & & & & C_{44} \end{pmatrix}$$

Die in der folgenden Tabelle übernommenen Zahlenwerte (umgerechnet auf die Einheiten GPa und  $\text{GPa}^{-1}$ ) geben die Steifigkeiten resp. Nachgiebigkeiten der drei Matrix-Elemente wieder. Raumtemperatur wurden mangels genauerer Angaben mit 290 K gleichgesetzt.

Tab. 1: Nachgiebigkeiten und Steifigkeiten von NaCl-Einkristallen als Funktion der Temperatur entsprechend OVE51, LAZ49, HUN42, entnommen aus CLA66.

Temp [K]	S11 [1/GPa]	S44 [1/GPa]	-S12 [1/GPa]	C11 [GPa]	C44 [GPa]	C12 [GPa]
290	0.02301	0.07841	0.00473	48.64	12.75	12.58
290	0.0226	0.0779	0.0045	49.11	12.84	12.25
300	0.0228	0.07809	0.0045	48.57	12.81	11.94
400	0.02523	0.08014	0.00546	45.02	12.48	12.43
500	0.02818	0.08237	0.00649	41.16	12.14	12.32
600	0.03185	0.08487	0.00758	36.88	11.78	11.52
700	0.03595	0.08779	0.00885	33.15	11.39	10.82
800	0.04114	0.09108	0.01068	29.72	10.98	10.42
900	0.04786	0.09474	0.01342	26.74	10.56	10.42
1000	0.05637	0.1	0.01724	24.28	10	10.7
1050	0.0616	0.1035	0.01967	23.18	9.66	10.87

Es gibt zwei grundsätzliche Verfahren, aus den anisotropen Kennwerten die beiden elastischen Stoffparameter des isotropen polykristallinen Körpers zu ermitteln. Das Verfahren von Voigt (VOI28) basiert auf der Idealisierung, dass im polykristallinen Festkörper an jeder Stelle gleiche Dehnungen vorliegen. Dann sind die Steifigkeiten  $C_{ij}$  in geeigneter Weise zu mitteln (s. z.B. LAN81).

$$K^{\text{Voigt}} = \frac{C_{11} + 2C_{12}}{3}$$

$$G^{\text{Voigt}} = \frac{C_{11} - C_{12} + 3C_{44}}{5}$$

Das Verfahren von Reuss (REU29) basiert auf der gegenteiligen Idealisierung, dass im polykristallinen Festkörper an jeder Stelle gleiche Spannungen vorliegen. Dann sind die aus der inversen Steifigkeitsmatrix sich ergebenden Nachgiebigkeiten  $S_{ij}$  in geeigneter Weise einzusetzen.

$$K^{\text{Reuss}} = \frac{1}{3(S_{11} + 2S_{12})}$$

$$G^{\text{Reuss}} = \frac{5}{4(S_{11} - S_{12}) + 3S_{44}}$$

mit

$$S_{11} = \frac{C_{11} + C_{12}}{U}$$

$$S_{12} = \frac{-C_{12}}{U}$$

$$U = C_{11}^2 + C_{11} C_{12} - 2C_{12}^2$$

Die umgerechneten elastischen Konstanten sind in den folgenden beiden Diagrammen Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt. Beide Verfahren führen zu sehr ähnlichen Werten. Die größten Abweichungen betragen knapp unter 5%. Da beide Verfahren jeweils die physikalische Unter- bzw. Obergrenze der polykristallinen Kennwerte darstellen, wurde von Hill (HIL52) vorgeschlagen, das arithmetische Mittel zu verwenden. Siehe dazu Abb. 3. Eingeschaltet zum Vergleich wurde auch der Ansatz von FRO85, der auf den gleichen Daten beruht.

$$G = 15 \text{ GPa} \left( 1 - 0.73 \frac{T - 300 \text{ K}}{1070 \text{ K}} \right)$$

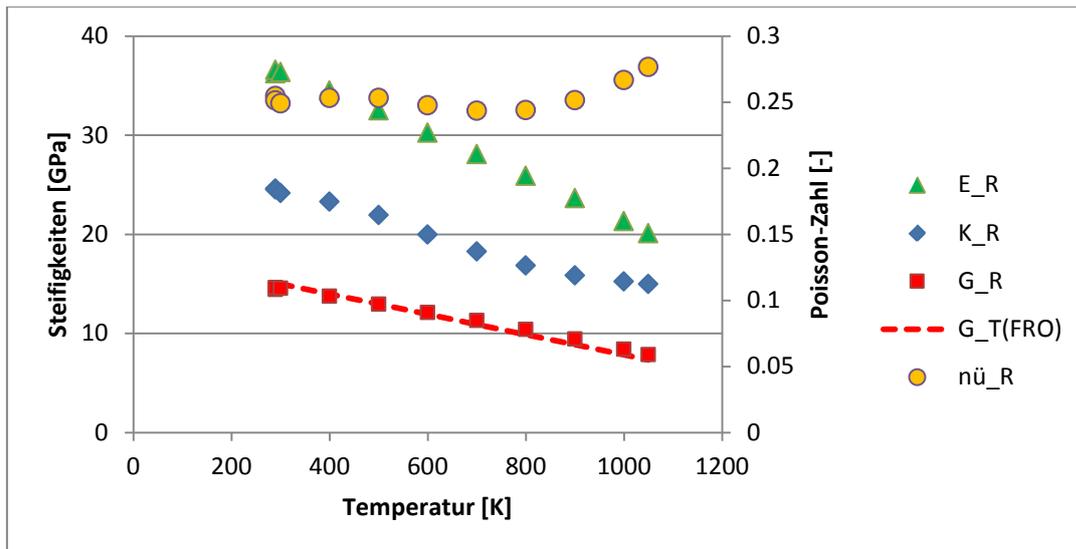


Abb. 1: Elastische Materialparameter für Steinsalz, nach der Methode von Reuss ermittelt aus Messwerten zur anisotropen Elastizität von NaCl-Einkristallen. Eingetragen in Form einer gestrichelten roten Linie ist auch das Schermodul nach FRO85.

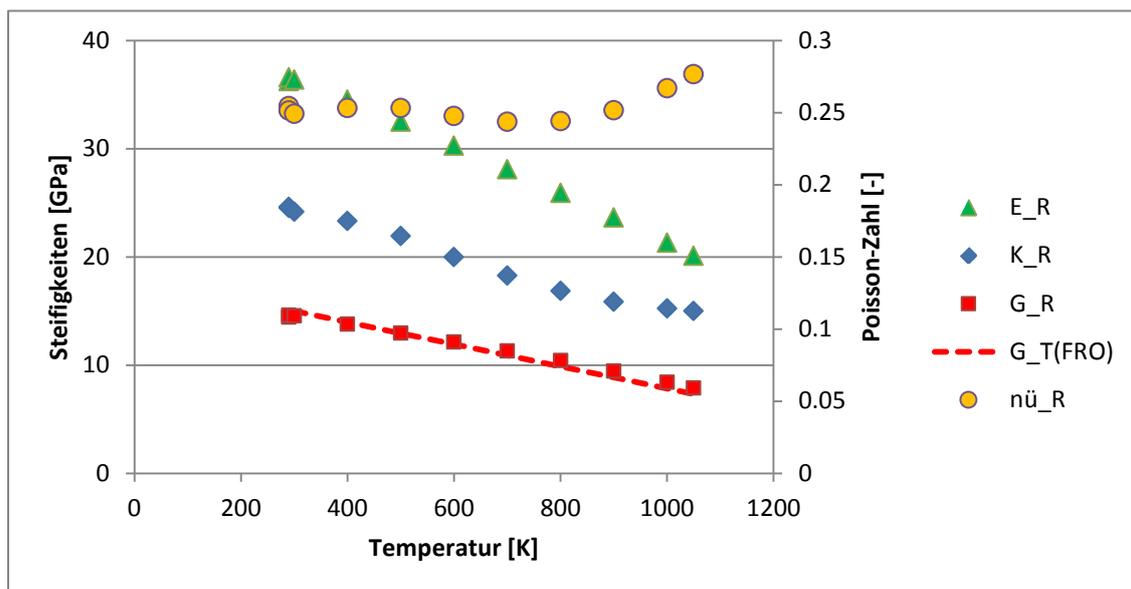


Abb. 2: Elastische Materialparameter für Steinsalz, nach der Methode von Voigt ermittelt aus Messwerten zur anisotropen Elastizität von NaCl-Einkristallen. Eingetragen in Form einer gestrichelten roten Linie ist auch das Schermodul nach FRO85.

Zur Absicherung werden weiterhin Daten zur Messung von Schallgeschwindigkeiten (KAI07, s.a. KAI11) im weitgehend ungestörten Gebirge (Gorleben) herangezogen, bei denen eine Umrechnung aus anisotropen Parametern nicht nötig ist. Aus den gemessenen Geschwindigkeiten

$$v_p = 4511.6 \text{ m/s}$$

$$v_s = 2579.0 \text{ m/s}$$

ermitteln sich bei der gegebenen Gebirgstemperatur Parameter

$$G = 14.4 \text{ GPa}$$

$$K = 24.9 \text{ GPa}$$

$$E = 36.2 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.26$$

Diese sind in Abb. 3 ebenfalls in Form schwarz umrandeter Kringlel eingetragen. Zusätzlich sind in die Graphiken die linearen Funktionen zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit einbezogen nach dem gleichen Ansatz wie bei FRO85 mit

$$K_T = 24.6 \text{ GPa} \left( 1 - 0.65 \left( \frac{T - 300 \text{ K}}{1070 \text{ K}} \right) \right)$$

$$G_T = 14.6 \text{ GPa} \left( 1 - 0.65 \left( \frac{T - 300 \text{ K}}{1070 \text{ K}} \right) \right)$$

$$E_T = 36.4 \text{ GPa} \left( 1 - 0.65 \left( \frac{T - 300 \text{ K}}{1070 \text{ K}} \right) \right)$$

$$\nu = 0.25$$

Die nachfolgende Graphik zeigt, dass sich mit dem leicht veränderten Parameter 0.65 anstelle von 0.73 etwas bessere Übereinstimmungen erzielen lassen.

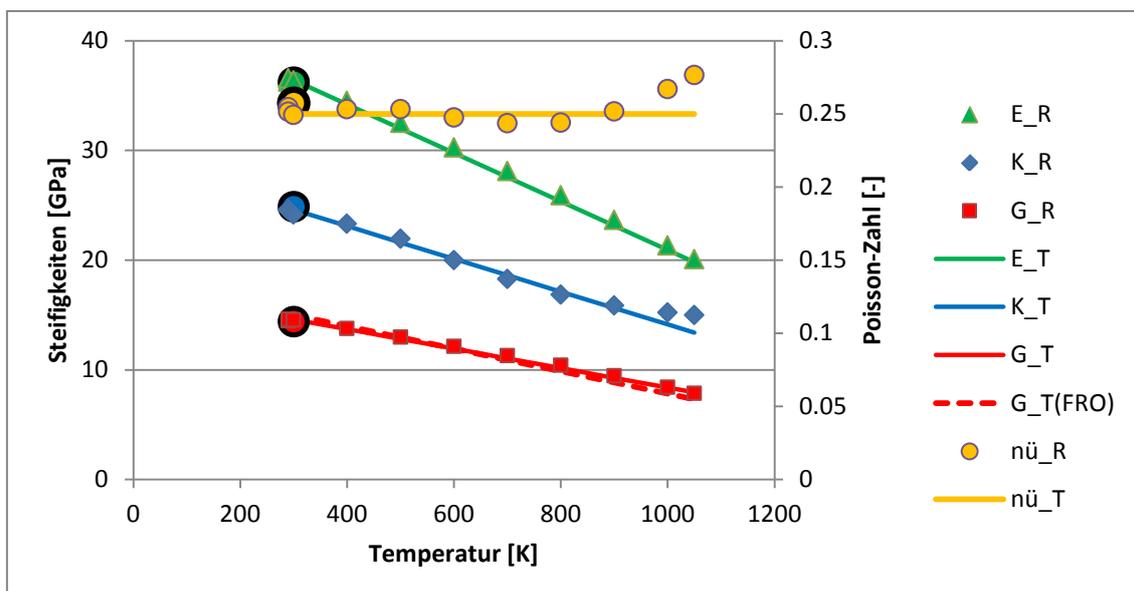


Abb. 3: Elastische Materialparameter für Steinsalz, nach der Methode von Voigt/Reuss/Hill (VRH) ermittelt aus Messwerten zur anisotropen Elastizität von NaCl-Einkristallen. Eingetragen sind auch die linearen Funktionen zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit (T) sowie rot gestrichelt das Schermodul nach FRO85. Die schwarz umrandeten runden Symbole stehen für die aus KAI07 entnommenen Werte.

In GEV81 werden für Steinsalz unterschiedliche Datensätze zur Abhängigkeit des Kompressionsmoduls vom hydrostatischen Druck aufgeführt (HEA75, MOR76, VOR76). Lediglich die Daten von VOR76 machen einen plausiblen Eindruck und stimmen zudem mit den hier gefundenen Werten für niedrige hydrostatische Drücke oder Druck Null und Raumtemperatur sehr gut überein. Sie lassen sich bis ca.  $\sigma^{\text{hyd}} \leq 2 \text{ GPa}$  sehr gut durch

$$K = 25.23 \text{ GPa} + 5 \sigma^{\text{hyd}} \approx 24.6 \text{ GPa} \left( 1 + \frac{0.2}{\text{GPa}} \sigma^{\text{hyd}} \right)$$

beschreiben. Der obige Vorfaktor  $24.6 \text{ GPa}$  wurde gewählt, um Übereinstimmung mit der zuvor ermittelten Beziehung für den Kompressionsmodul zu erzielen.

In gleicher Weise werden im GEV81 auch Daten zur Abhängigkeit der Poisson-Zahl vom hydrostatischen Druck vorgelegt (HEA75, VOR76, MOR76). Auch hier heben sich die Daten von VOR76 hinsichtlich Plausibilität und Umfang deutlich hervor, diesmal allerdings auch in sehr guter Übereinstimmung mit MOR76. Für  $\sigma^{\text{hyd}} \leq 2 \text{ GPa}$  ergibt sich hier die Beziehung

$$\nu = 0.256 + 0.017 \text{ GPa}^{-1} \sigma^{\text{hyd}} \approx 0.25 \left( 1 + 0.065 \text{ GPa}^{-1} \sigma^{\text{hyd}} \right).$$

Der obige Vorfaktor  $0.25$  wurde auch hier gewählt, um Übereinstimmung mit der zuvor ermittelten Beziehung für die Poissonzahl zu erzielen. Für den Elastizitätsmodul ergibt sich somit die Abhängigkeit

$$E = 3K(1 - 2\nu) = 3K_0 \left( 1 + \frac{0.2}{\text{GPa}} \sigma^{\text{hyd}} \right) \left( 1 - 2\nu_0 \left( 1 + \frac{0.065}{\text{GPa}} \sigma^{\text{hyd}} \right) \right)$$

Unter Nutzung der Ableitung

$$\left. \frac{dE}{d\sigma^{\text{hyd}}} \right|_{\sigma^{\text{hyd}}=0} = 3K_0(1-2\nu_0) \frac{0.135}{\text{GPa}} = E_0 \frac{0.135}{\text{GPa}}$$

ergibt sich somit

$$E \approx 36.4 \text{ GPa} \left( 1 - 0.65 \left( \frac{T - 300 \text{ K}}{1070 \text{ K}} \right) \right) \left( 1 + \frac{0.135}{\text{GPa}} \sigma^{\text{hyd}} \right).$$

In gleicher Weise ergibt sich für den Schermodul entsprechend

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$$

$$= \frac{3K_0 \left( 1 + \frac{0.2}{\text{GPa}} \sigma^{\text{hyd}} \right) \left( 1 - 2\nu_0 \left( 1 + \frac{0.066}{\text{GPa}} \sigma^{\text{hyd}} \right) \right)}{2 \left( 1 + \nu_0 \left( 1 + \frac{0.066}{\text{GPa}} \sigma^{\text{hyd}} \right) \right)}$$

unter Nutzung der Ableitung

$$\left. \frac{dG}{d\sigma^{\text{hyd}}} \right|_{\sigma^{\text{hyd}}=0} = G_0 \frac{0.122}{\text{GPa}}$$

die Beziehung

$$G = 14.6 \text{ GPa} \left( 1 - 0.65 \left( \frac{T - 300 \text{ K}}{1070 \text{ K}} \right) \right) \left( 1 + 0.122 \text{ GPa}^{-1} \sigma^{\text{hyd}} \right)$$

Es zeigt sich, dass eine Temperaturänderung von 16 K eine Änderung des Elastizitätsmoduls von 1% hervorruft. Zum Vergleich ist eine Änderung des hydrostatischen Drucks in Höhe 74 MPa notwendig, um die gleiche relative Änderung hervorzurufen. Die Abhängigkeit der elastischen Konstanten vom hydrostatischen Druck ist demzufolge so klein, dass sie in allen geomechanisch relevanten Fällen ignoriert werden kann.

Falls das Steinsalz allerdings ein Fremdmineral in nennenswertem Umfang enthält, muss dessen Wirkung u.U. dennoch berücksichtigt werden. Analog zur Vorgehensweise von Voigt und Reuss können für das Kompressionsmodul und das Schermodul zwei Herleitungswege besprochen werden, die dann z.B. entsprechend dem Vorschlag von Hill zu einer gemeinsamen Lösung vereinigt

werden können. Im Falle des Kompressionsmoduls kann bei zwei Mineralien mit den Volumenanteilen

$$v_1 + v_2 = 1$$

unter der Annahme, dass in den beteiligten Mineralien gleiche volumetrische Dehnung  $\varepsilon^{\text{vol}}$  vorliegt, ein makroskopischer hydrostatischer Druck

$$\sigma^{\text{hyd}} = v_1 K_1 \varepsilon^{\text{vol}} + v_2 K_2 \varepsilon^{\text{vol}} = \bar{K}^{\text{V}} \varepsilon^{\text{vol}}$$

ableiten. Daraus lässt sich wiederum ein mittlerer (makroskopischer) Kompressionsmodul

$$\bar{K}^{\text{V}} = \frac{\sigma^{\text{hyd}}}{\varepsilon^{\text{vol}}} = v_1 K_1 + v_2 K_2$$

ableiten. Unter der gegensätzlichen Annahme, dass in den Mineralien gleiche Spannungen vorliegen, ergibt sich eine mittlere und somit makroskopische volumetrische Dehnung

$$\varepsilon^{\text{vol}} = v_1 \frac{\sigma^{\text{hyd}}}{K_1} + v_2 \frac{\sigma^{\text{hyd}}}{K_2} = \frac{\sigma^{\text{hyd}}}{\bar{K}^{\text{R}}}$$

Aus dem Verhältnis der volumetrischen Dehnung und dem hydrostatischen Druck folgt nun unmittelbar

$$\frac{\varepsilon^{\text{vol}}}{\sigma^{\text{hyd}}} = \frac{1}{\bar{K}^{\text{R}}} = \frac{v_1}{K_1} + \frac{v_2}{K_2}$$

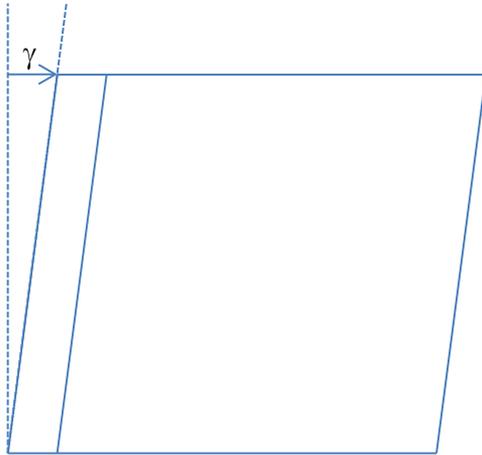
oder auch

$$\bar{K}^{\text{R}} = \frac{1}{\frac{v_1}{K_1} + \frac{v_2}{K_2}}$$

Daraus lässt sich entsprechend dem Vorschlag von Hill der Mittelwert als relativ verlässlicher Best-Estimate-Wert bilden.

$$\bar{K}^H = \frac{\bar{K}^V + \bar{K}^R}{2}$$

Für den Schermodul kann in analoger Weise der Ansatz gemacht werden, dass für beide Anteile eine gemeinsame Scherung  $\gamma$  vorliegt (s. dazu die einfache Skizze).



$$\gamma = \frac{\tau}{\bar{G}^V} = \frac{\tau_1}{G_1} = \frac{\tau_2}{G_2}$$

Die Scherspannungen der beiden Komponenten mitteln sich zur makroskopischen Scherspannung

$$\tau = v_1 \tau_1 + v_2 \tau_2$$

Aus dem Verhältnis der Scherspannung zur Scherdehnung folgt

$$\frac{\tau}{\gamma} = \bar{G}^V = \frac{v_1 \tau_1 + v_2 \tau_2}{\gamma} = v_1 G_1 + v_2 G_2$$

Analog zur Vorgehensweise von Reuss lässt sich auch annehmen, dass in beiden Komponenten eine gemeinsame Scherspannung bei unterschiedlichen Scherungen vorliegt (s. Skizze).



Dann ergibt sich die mittlere bzw. makroskopische Dehnung

$$\gamma = v_1 \gamma_1 + v_2 \gamma_2$$

mit der gemeinsamen Scherspannung

$$\tau = \gamma \bar{G}^R = \gamma G_1 = \gamma G_2$$

Aus dem Verhältnis der makroskopischen Scherdehnung und Scherspannung folgt nun

$$\frac{\gamma}{\tau} = \frac{1}{\bar{G}^R} = \frac{v_1 \gamma_1 + v_2 \gamma_2}{\tau} = v_1 G_1 + v_2 G_2$$

und somit

$$\bar{G}^R = \frac{1}{\frac{v_1}{G_1} + \frac{v_2}{G_2}}$$

Weiterhin lässt sich auch hier analog zum Vorschlag von Hill (HIL52) der Mittelwert aus beiden Methoden als beste Beschreibung des Schermoduls fassen.

$$\bar{G}^H = \frac{\bar{G}^V + \bar{G}^R}{2}$$

Der Elastizitätsmodul und die Poisson-Zahl lassen sich nun entsprechend der bereits eingesetzten Beziehungen berechnen als

$$\bar{E}^H = \frac{9\bar{K}^H\bar{G}^H}{3\bar{K}^H + \bar{G}^H}$$

$$\bar{\nu}^H = \frac{3\bar{K}^H - 2\bar{G}^H}{2(3\bar{K}^H + \bar{G}^H)}$$

Entsprechende thermische Abhängigkeiten sind ggf. in geeigneter Weise zu berücksichtigen.

### 10.2.3 Literaturverzeichnis

- /CLA66/ Clark, S.P. (1966): Handbook of Physical Constants. The Geol. Soc. of America, Inc., New York.
- /FRO85/ Frost, H.J., & Ashby, M.F. (1985): *Deformation-Mechanism Maps, The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*. Pergamon Press.
- /GEV81/ Gevantman, L.H. et al., (1981). *Physical Properties Data of Rock Salt*, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards Monograph 167.
- /HEA75/ Heard, H.C., Abey, A.E., Bonner, B.P., Duba, A. (1975): Stress-Strain Behavior of Polycrystalline NaCl to 3.2 GPa, Lawrence Livermore Laboratory Rept. UCRL-51743.
- /HES02a/ Hesser, J., Schnier, H. (2002): Projekt Gorleben: *Ergebnisse festigkeitsmechanischer Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus den Schächten Gorleben 1 und 2*, Laborbericht.
- /HES02b/ Hesser, J., Schnier, H. (2002). Projekt Gorleben: *Ergebnisse festigkeitsmechanischer Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus den Schächten Gorleben 1 und 2*, Laborbericht, Anlagenband.
- /HIL52/ Hill, R. (1952): The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate, Proceedings of the Physical Society A **65**, p. 349.
- /HUN42/ Hunter, Siegel (1942): Physical Review **61**, p. 84.

- /KAI07/ Kaiser, D., Schmitz, H. (2007): Durchführung mikroakustischer Messungen zur Erkundung des Gebirgszustandes, Zwischenbericht 2007
- /KAI11/ Kaiser, D. (2011): Mikroakustische Messungen in einem Salzbergwerk zur Bewertung von Rissprozessen, 71. Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Kolloquium 2011, p. 39-52
- /LAN81/ Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Gesamtherausgabe: K.-H. Hellwege, Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung, Band 1: Physikalische Eigenschaften der Gesteine, Teilband b, Herausgeber: G. Angenheister, Springer-Verlag 1981.
- /LAZ49/ Lazarus (1949). *Physical Revue* **76**, p. 545.
- /MOR76/ Morris, C.E., Jamieson, J.C., Yarger, F.L. (1976): Ultrasonic Measurements at Elevated Pressures (9 GPa) to Determine Poisson's Ratio and other Elastic Moduli of NaCl and NaF, *Journal of Applied Physics* **47**(9), p. 3979-86.
- /OVE51/ Overton, Swim (1951): *Physical Review* **84**, p. 758.
- /PLI02/ Plischke, I. (2003). Projekt Gorleben: *Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ, Ingenieurgeologische Erkundung der Homogenbereiche*, Abschlussbericht.
- /REU29/ Reuss, A. (1929): *Zeitschrift Angewandte Mathematik und Mechanik* **9**, p. 49
- /SCH03a/ Schnier, H. (2003). Projekt Gorleben: *Ergebnisse festigkeitsmechanischer Laboruntersuchungen an Bohrkernen von der Erkundungssohle*, Laborbericht.
- /SCH03b/ Schnier, H. (2003). Projekt Gorleben: *Ergebnisse festigkeitsmechanischer Laboruntersuchungen an Bohrkernen von der Erkundungssohle*, Anlagenband.
- /VOI28/ Voigt, W. (1928): *Lehrbuch der Kristallphysik*, Leipzig, Teubner
- /VOR76/ Voronov, F.F., Grigor'ev, S.B. (1976): Influence of Pressures up to 100 kbar on Elastic Properties of Silver, Sodium and Cesium Chlorides, *Sov. Phys. Solid State* **18**(2), p. 325.

## 11 Kriechen von Salz

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturauswertung</b>
<b>Standort</b>	<b>Gorleben, Morsleben</b>
<b>Material:</b>	<b>Steinsalz, Carnallit</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_Kriechen von Salz.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Strukturparameter, Aktivierungsenergie, Spannungspotenz, Kriechklasse</b>
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Ulrich Heemann, unterstützt von O. Schulze, I. Plischke</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-05-31</b>

11.1 Protokoll

Untersuchtes Phänomen	Sekundäres Kriechen von Steinsalz	
Material	Standort	Stratigrafie, Symbol
Steinsalz, Carnallitit	Gorleben, Morsleben	z2, z3

Referenzfunktion	Parameter	Erläuterung
$\dot{\epsilon}_{ss} = V A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma}{MPa}\right)^n$ $V = \frac{2^K}{32}$ <p>Im Text werden auch erweiterte Ansätze behandelt.</p>	$A = 0.18 d^{-1} = 2.083E - 6 s^{-1}$ $Q = 54 kJ / mol$ $n = 5$ $\sigma^* = 1 MPa$ $K$	Strukturfaktor Aktivierungsenergie Spannungspotenz Skalierungsspannung Kriechklasse (lokationsabhängig, im Einzelfall noch zu prüfen, s. Text)

Literatur	/HUN 03/ /SCH 10/
Beschreibung	Steinsalz aller Stratigraphien in Morsleben und Gorleben, dazu Carnallitit
Anmerkungen	Rein deviatorisches Kriechen, kein primäres Kriechen, keine Dilatanz, keine Feuchteeffekte, keine Schädigung (tertiäres Kriechen)

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte	Erläuterungen
		Die links dargestellten Kurvenverläufe zeigen die Entwicklung der deviatorischen Verformung als Funktion der Zeit für eine mäßige und eine hohe Spannung. In beiden Fällen tritt über einen begrenzten oder ggf. auch unbegrenzten Zeitraum stationäres Kriechen (blaue Kurven) auf, das hier zugrunde gelegt wird. Primäres Kriechen (grüne Kurven) oder tertiäres Kriechen (rote Kurve) tritt in der realen Situation ggf. auch immer auf, wird hier aber nicht behandelt.

Numerische Modellierung	Constitutive model	Code
	Norton-Creep	Alle Programme

Bewertung	
dataquality	
datasource	

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

## 11.2 Begründung

### 11.2.1 Zu den mathematischen Grundlagen der Beschreibung von Formänderungen

Unter dem Kriechen eines viskosen Materials versteht man die inelastische Längen- oder allgemeiner Formänderung eines entsprechenden Körpers im Laufe der Zeit. Die Formänderung wird über dessen Dehnungen oder Stauchungen als relative Längenänderungen beschrieben.

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.1)$$

Im allgemeinen Fall treten Dehnungen als sechs Elemente eines symmetrischen Tensors auf.

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Unter dem Begriff des Kriechens wird in diesem Protokoll ausschließlich auf deviatorische, d.h. volumentreue Formänderung Bezug genommen. Mathematisch drückt sich das darin aus, dass die Elemente der Diagonalen des Dehnungstensors um einen gemeinsamen Betrag reduziert werden derart, dass deren Summe Null ergibt.

$$\varepsilon_{ii}^{dev} = \varepsilon_{ii} - \frac{\varepsilon^{vol}}{3} \quad (1.3)$$

In diesem Fall reicht es zur Charakterisierung der Dehnung aus, eine sogenannte Vergleichsdehnung einzuführen, definiert über

$$\varepsilon_{vergl}^{dev} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_{ij}^{dev})^2}. \quad (1.4)$$

Formänderungen fester Körper sind generell an die Wirkung von Spannungen gekoppelt. Üblicherweise wird die tensorielle Beschreibung deviatorischer Formänderung dann durch Verknüpfung obiger skalarer Dehnung mit dem deviatorischen Spannungstensor  $\sigma_{ij}^{dev}$  beschrieben.

$$\varepsilon_{ij}^{dev} = \frac{3}{2} \varepsilon_{vergl}^{dev} \frac{\sigma_{ij}^{dev}}{\sigma_{vergl}^{dev}} \quad (1.5)$$

Der deviatorische Spannungstensor wird aus dem allgemeinen Spannungstensor

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

in ähnlicher Weise durch Subtraktion des hydrostatischen Drucks  $\sigma^{hyd}$  gewonnen.

$$\sigma_{ii}^{dev} = \sigma_{ii} - \sigma^{hyd} \quad (1.7)$$

Auch aus dem so geschaffenen deviatorischen Spannungstensor kann eine charakterisierende Vergleichsspannung bestimmt werden.

$$\sigma_{vergl}^{dev} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_{ij}^{dev})^2} \quad (1.8)$$

Anschaulich kann die deviatorische Vergleichsdehnung  $\varepsilon_{vergl}^{dev}$  mit der axialen Dehnung eines homogenen Körpers unter radialsymmetrischen Versuchsbedingungen mit volumentreuer Verformung gleichgesetzt werden. Die deviatorische Vergleichsspannung  $\sigma_{vergl}^{dev}$  kann mit der axialen Spannung im Körper unter radialsymmetrischen Versuchsbedingungen gleichgesetzt werden, wenn keine Mantelspannung (Radialspannung) eingesetzt wird.

Der mit Dilatanz (Auflockerung) einhergehende Dehnungsanteil  $\varepsilon^{vol}$  wird hier nicht weiter betrachtet, so dass auf obige Indizes  $^{dev}$  und  $_{vergl}$  im Weiteren verzichtet werden kann.

### 11.2.2 Zu den Stoffgesetzen des Kriechens von Salz

Derzeit existiert noch keine physikalisch begründete Modellierung des Kriechens von Steinsalz, die wissenschaftlich abgesichert und weltweit akzeptiert wäre. Dennoch hat sich schon früh ein phänomenologisches Modell als sehr erfolgreich herausgestellt, das als Norton-Modell sehr weite Verbreitung findet.

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \quad (1.9)$$

Es beschreibt die Kriechrate  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$  als ausschließlich von der Temperatur  $T$  und insbesondere der deviatorischen Spannung  $\sigma$  bestimmt. Als Materialparameter treten die Aktivierungsenergie  $Q$ , der Spannungsexponent  $n$  und der Skalierungs- oder Strukturfaktor  $A$  auf. Die Gaskonstante  $R$  ist als Naturkonstante unveränderlich und somit im strengen Sinne kein Materialparameter. Ähnlich verhält es sich mit der als Skalierungsspannung eingeführten Größe  $\sigma^*$ . Der Index  $_{ss}$  kennzeichnet den stationären Kriechfall (steady state).

Der Norton-Ansatz impliziert also bei konstanter Temperatur eine unmittelbare und klar definierte Reaktion der Kriechrate auf eine gegebene Spannung, die als solche keinen Einfluss der Zeit zeigt resp. keine Ver- oder Entfestigung ausweist und somit quasistationär ist. Tatsächlich zeigt sich im Salz eine Phase primären Kriechens, die durch höhere Duktilität gekennzeichnet ist. Siehe dazu die lediglich charakterisierende Skizze in Abb. 1. Erst danach stellt sich eine als sekundäre Kriechphase bezeichnete konstante Dehnungsänderung mit der Zeit (stationäres Kriechen) ein. Bei erhöhten Spannungen (ca. 18 MPa und höher) kann auch infolge von Mikrorissbildung (Dilatanz) und Kollaps der Mikrorisse tertiäres Kriechen mit Kriechbeschleunigung und Versagen eintreten.

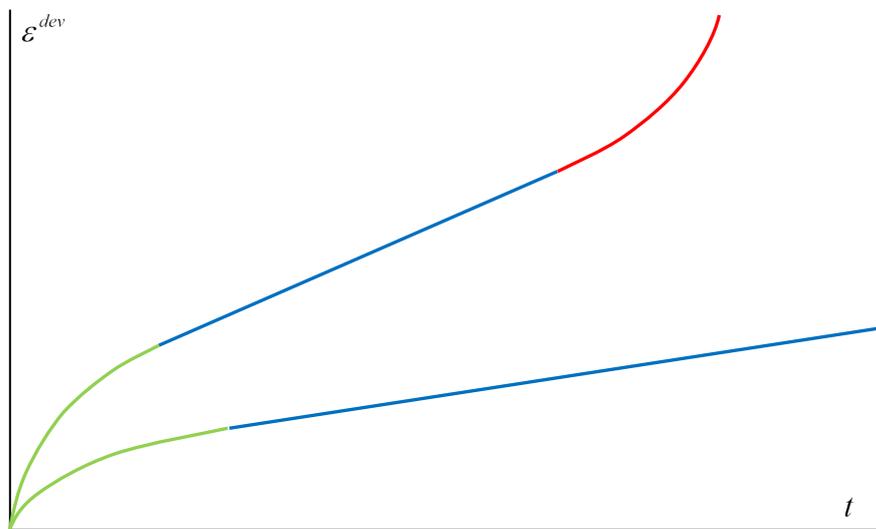


Abb. 1: Skizzierung der deviatorischen Kriechdehnung, aufgetragen über der Zeit. Bei niedrigen Spannungen tritt das Salz nach anfänglicher primärer Kriechphase (grün) in den sekundären Zustand stationären Kriechens (blau) über. Bei stark erhöhten Spannungen kann das Kriechen in eine tertiäre Kriechphase (rot) mit abschließendem Versagen durch Bruch übergehen.

Im Falle des Ausbruchs eines Hohlraumes im Salinar ist die Situation über einen gewissen Zeitraum eher durch hohe Spannungen gekennzeichnet, welche jedoch durch den Kriechprozess selbst reduziert werden. Unter diesen Randbedingungen tritt aufgrund der primär hohen Duktilität eine stark erhöhte Kriechrate auf, die dann aber schnell abnimmt, da sowohl die Verfestigung des Materials ansteigt als auch die treibende Spannung abgebaut wird. Im Endeffekt zeigt sich somit schon nach vergleichsweise kurzer Zeit ein Zustand, der faktisch durch die sich einstellende Spannung und das stationäre Kriechgesetz bestimmt wird. Dies erlaubt die Nutzung eines quasistationären Kriechansatzes obiger Art über einen Zeitraum, der Jahrzehnte bis auch Jahrhunderte überspannt.

Experimentell wurden die Versuche der BGR in einaxialer Belastung ohne Manteldruck bzw. mit kleinem oder mittlerem Manteldruck gefahren. Die Bestimmung der Parameter erwies sich jedoch oft auch für Proben, die aus eng benachbarten Orten im Salz gewonnen wurden, als unsicher, da die Proben sich aufgrund inhomogen eingebrachter Fremdminerale nicht immer gleichartig verhalten, sondern sich durchaus in der stationären Kriechrate und auch in der Geschwindigkeit, mit der sie diese erreichen, unterscheiden. Auch war es zumindest bei den frühen Laborversuchen schwierig, festzustellen, wann stationäres Kriechen erreicht war. Es war deshalb notwendig und sinnvoll, aus den zahlreichen Proben zunächst einen einheitlichen Parametersatz zu generieren und erst zu einem späteren Zeitpunkt Proben anderer Lokationen und Feldesteile im Vergleich zu diesem zu charakterisieren. Dies wurde zunächst anhand des sehr sauberen und somit auch vergleichsweise gleichmäßig reagierenden Speisesalzes aus der Asse versucht, was zu dem weiter unten folgenden Parametersatz BGRa führte.

Obiger einfacher Ansatz (Gl. (2.1)) ist allerdings weiterhin dadurch eingeschränkt, dass er offensichtlich ungeeignet ist, einen sehr großen Temperatur- und Spannungsbereich korrekt zu erfassen. Deshalb wurden triaxiale Versuche bei höherem hydrostatischem Druck und höheren Temperaturen gefahren. Zur Anpassung an die experimentellen Daten wurde ein doppelter Norton-Ansatz der Art

$$\dot{\epsilon}_{ss} = \left( A_1 \exp\left(\frac{-Q_1}{RT}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-Q_2}{RT}\right) \right) \left( \frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^n \quad (1.10)$$

entwickelt.

Für carnallitisches Material wurde ein Ansatz gefunden, der dem des Steinsalzes ähnelt, jedoch durch einen weiteren, temperaturunabhängigen Spannungsterm ergänzt wird.

$${}^{carn} \dot{\epsilon}_{ss} = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \left( \frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^n + C \left( \frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^m \quad (1.11)$$

Für alle drei Definitionen eines Kriechgesetzes wurden in der BGR Referenzparameter ermittelt. Diese sind gegeben durch (s. Ansätze (2.1) bis (2.3))

$$\begin{aligned} \text{BGRa:} \quad & A = 0.18/d \\ & Q = 54.0 \text{ kJ/mol} \\ & n = 5 \end{aligned} \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned}
 & A_1 = 2.3 \cdot 10^{-4} / d \\
 & Q_1 = 42 \text{ kJ/mol} \\
 \text{BGRb:} & A_2 = 2.1 \cdot 10^6 / d \\
 & Q_2 = 113 \text{ kJ/mol} \\
 & n = 5
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

$$\begin{aligned}
 & A = 0.18 / d \\
 & Q = 54.0 \text{ kJ/mol} \\
 \text{BGRcarn:} & n = 5 \\
 & C = 4.5 \cdot 10^{-7} / d \\
 & m = 2
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

Die Größe  $\sigma^*$  ist in allen Fällen durch die Skalierungsspannung

$$\sigma^* = 1 \text{ MPa} \tag{1.15}$$

gegeben. Die Allgemeine Gaskonstante ist gegeben durch

$$R = 8.3143 \text{ E} - 3 \text{ kJ} / (\text{mol K}) \tag{1.16}$$

Es ist dabei zu beachten, dass der Vergleich der Parametersätze für BGRa und BGRb bei moderaten Temperaturen nahe der Raumtemperatur zeigt, dass die Kriechraten für BGRb sich als etwa um den Faktor 6 niedriger ergeben als bei BGRa. Der Grund dafür ist in der Tatsache begründet, dass für den erweiterten Ansatz bei triaxialer Spannung (also auch unter Verwendung eines Manteldrucks) unter den dort verwendeten Randbedingungen experimentell höhere hydrostatische Drücke auftraten, die eine Dilatanz in den Proben weitgehend unterdrückten, so dass auch Feuchtigkeitseffekte, die erst mit Einsetzen von Dilatanz wirksam werden, nur noch in geringem Maße eine Rolle spielen konnten.

Bei der Frage, ob BGRa oder BGRb zu verwenden sei, sollte man sich daran orientieren, ob hohe oder niedrige hydrostatische Drücke zu erwarten sind. Prinzipiell ist es ggf. empfehlenswert, im Nahbereich von Hohlräumen BGRa zu verwenden, da die einaxialen Versuche eher mit den Randbedingungen im Nahbereich eines Hohlraums korrespondieren. Da die Kriechentwicklung in weiter entfernten Bereichen in der Regel von geringerer Bedeutung für das Ergebnis im Nahbereich ist, ist aus angepassten Stoffparametern dort (BGRb) nur ein geringer Einfluss auf die Situation im Nahbereich zu erwarten, so dass trotzdem BGRa empfohlen werden kann.

Es ist jedoch weiterhin zu beachten, dass der Ansatz zu BGRb ursprünglich eingeführt wurde, um das Kriechverhalten bei höheren Temperaturen besser erfassen zu können. Bei hohen Temperaturen ist es empfehlenswert, den Ansatz und Parametersatz zu BGRb zu verwenden.

### 11.2.3 Homogenbereiche im Salz

Wie bereits oben ausgeführt, kann das Kriechen von Salz durch Verunreinigungen wesentlich beeinflusst werden. Die Ursache ist im Wesentlichen durch die Abfolge von Fällungsreaktionen während der Sedimentation sowie nachfolgend überprägender Prozesse (wie z.B. Rekristallisation) zu erklären, durch die fein verteilte Fremdmineralien zunehmend auf die Korngrenzen transportiert wurden, wo sie den Deformationsprozess nicht mehr behindern können. Dieser inverse Zusammenhang zwischen Duktilität und innerkristalliner Verunreinigung konnte immer wieder nachgewiesen werden. Abb 2 zeigt diesen qualitativen Befund, der zunächst anhand von Gorklebenproben ermittelt wurde. Weiterhin kann der geologische Befund Aufschluss geben über starke tektonische Belastungen, die Anhaltspunkte für eine Trennung stark kriechfähiger Bereiche von den wenig duktilen darstellen und somit die Einschätzung unbeprobter Feldesteile beeinflussen können.

Diese sedimentationsbedingte Abfolge sowie nachfolgende Überprägung durch geotektonische und rekristallisationsgetragene Prozesse liefern letztlich wichtige Entscheidungshilfen für eine Einschätzung der Kriechklasse in probentechnisch unzugänglichen Bereichen oder für die Durchführung erneuter Kriechtests im Labor.

Für die Untersuchungen zur Definition von Homogenbereichen wurden die Proben bei Raumtemperatur (22°C) typischerweise über jeweils 70 Tage mit 12 MPa bzw. nachfolgend 14 MPa einaxial belastet. Die sich jeweils abschließend einstellenden Kriechraten werden mit den Kriechraten des BGRa-Ansatzes verglichen. Daraus ergibt sich ein Faktor  $V$ , der die parametrische Erfassung des Kriechverhaltens der jeweiligen Lokation erlaubt.

$$\dot{\varepsilon} = V \dot{\varepsilon}_{BGRa} \quad (1.17)$$

Der Faktor  $V$  wurde zur einfacheren Bewertung in Klassen eingeteilt, die durch den ganzzahlig gerundeten Zweier-Logarithmus des Faktors definiert werden.

$$V = \frac{2^K}{32} \quad (1.18)$$

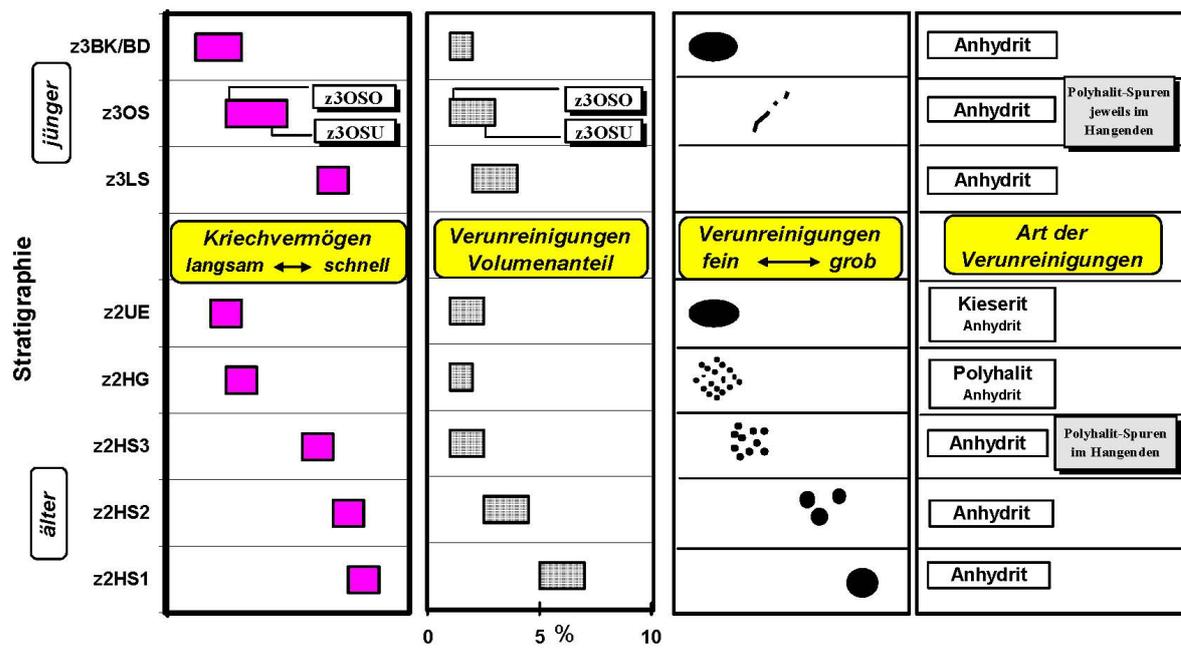


Abb. 2: Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Struktur und Dichte der Verunreinigungen und dem Duktilitätsgrad.

Sollte der Kriechansatz BGRb (s. Gl. (2.5)) in Anwendung gebracht werden, ist der gleiche Faktor zu verwenden.

$$\dot{\epsilon} = V \dot{\epsilon}_{BGRb} \tag{1.19}$$

Für den Standort Gorleben sind in Abb. 3 in einem Säulendiagramm die relativen Häufigkeiten der in dieser Weise ermittelten Kriechklassen für die jeweiligen stratigraphischen Schichten aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist die Entwicklung von niedrigen zu höheren Kriechklassen beim Übergang von jüngerem Steinsalz zu älterem Steinsalz (vom z3AM zum z2HS1) insgesamt wie auch innerhalb eines Sedimentationszyklus (z2, z3).

In Abb 4 findet sich eine vergleichbare Auftragung für die Schichten des Standortes Morsleben.

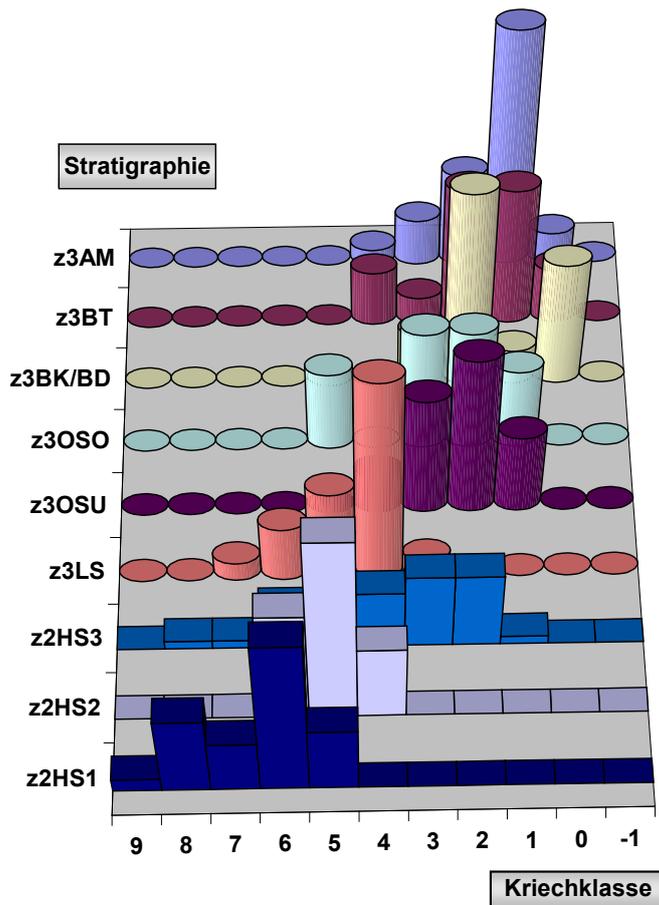


Abb. 3: Verteilung der relativen Häufigkeit der Kriechklassen für die in Gorleben ausgewiesenen stratigraphischen Schichten des z2 und z3.

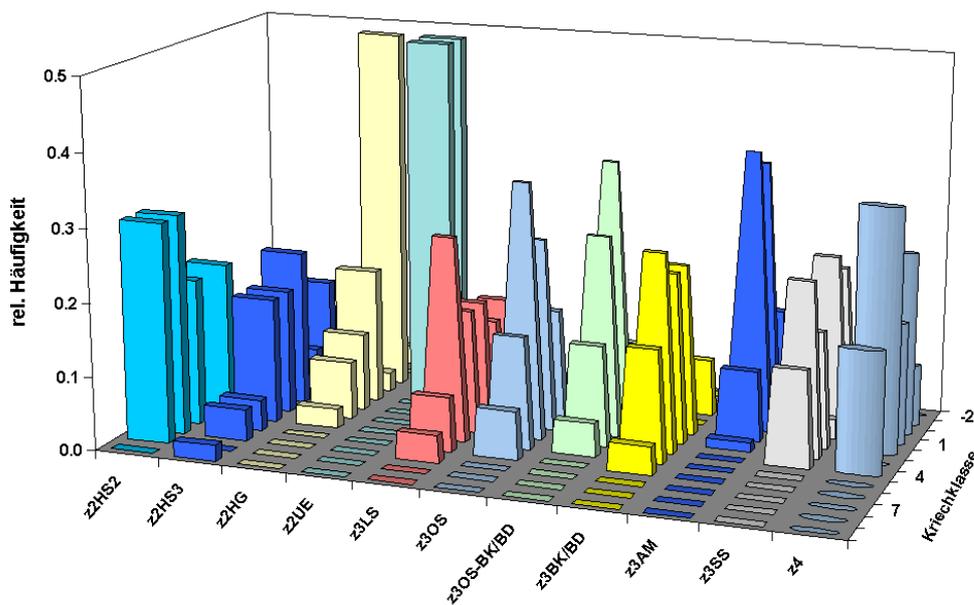


Abb. 4: Verteilung der relativen Häufigkeit der Kriechklassen für die in Morsleben ausgewiesenen stratigraphischen Schichten des z2 bis z4.

Bei der Probenauswahl lag immer das Bemühen um eine der Mächtigkeit angemessene Wichtung der Feldesteile zugrunde. Weiterhin konnten spezielle Fragestellungen und Notwendigkeiten bei numerischen Modellierungen die Häufigkeit der Probennahme beeinflussen. Eine geringe Zahl der Proben ist somit für einzelne Stratigraphien auch als ein Maß der jeweiligen Mächtigkeit resp. der gebirgsmechanischen Bedeutung zu werten. Beispielhaft sei hier auf nur zwei Proben für das z2BS in Morsleben (s. Abb. 5) hingewiesen. Andere Bereiche sind hingegen durch eine große Zahl von Proben gut unterlegt.

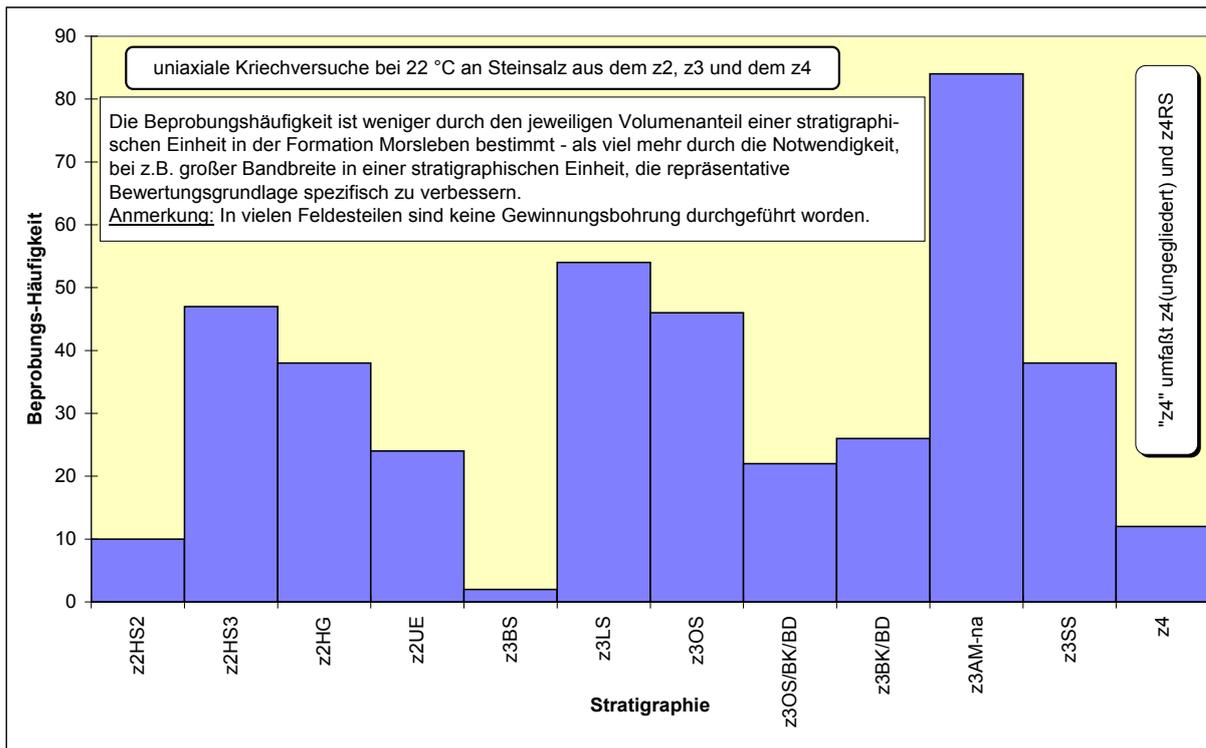


Abb. 5: Verteilung der Anzahl der labortechnisch auf ihre Duktilität untersuchten Proben für die jeweiligen Stratigraphien des ERA Morsleben. Diese liegen der Verteilung in Abb. 4 zugrunde.

#### 11.2.4 Zur Auswahl der Vorfaktoren

Die in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellten Verteilungen können zwar einen guten Anhaltspunkt für die Wahl einer Kriechklasse geben, bei der Modellierung eines realen Feldesteiles ist die Übertragbarkeit obiger Verteilungen resp. Kriechklassen jedoch immer wieder zu hinterfragen. Die tatsächliche Duktilität kann sich entlang der Erstreckung einer Stratigraphie mitunter deutlich verändern. Unzureichend oder gar nicht beprobte Bereiche einer Stratigraphie müssen im Zweifelsfalle demnach als unbekannt eingestuft werden. Der Ausweis von Kriechklassen kann dann ggf. im Analogieschluss auf Grundlage von Informationen gemäß Abb. 2 erfolgen. Andernfalls müssen die Kriechklassen durch Probennahme und Kriechversuche ermittelt werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass langsam kriechende Proben tendenziell das stationäre Kriechen erst bei größeren Dehnungen erreichen als schneller kriechendende. Es ist demzufolge zu erwarten, dass gerade die langsamer kriechenden Proben ihren stationären Zustand nicht immer erreicht haben und deren Kriechklassen tatsächlich noch mal ein bis zwei Stufen niedriger liegen als ausgewiesen.

Im Anhydritmittelsalz (z3AM) ist die Auswahl der Proben z.T. dadurch gekennzeichnet, dass teilweise so mächtige Anhydritbänder in diesen zu finden waren, dass sie von einer experimentellen Kriechuntersuchung ausgenommen werden mussten. Dadurch ist für diesen Gesteinsbereich eine Verschiebung zu zu hohen Kriechraten nicht auszuschließen, obwohl das halitisch dominierte z3AM nach Ausweis von Abb. 3 und Abb. 4 bereits das niedrigste Kriechvermögen aufweist.

Diese und weitere Betrachtungen sind jedoch in die Empfehlungen der Tabellen 1 und 2 bereits mit eingeflossen.

Es ist weiterhin im Einzelfall zu prüfen, wie eine breite Verteilung der Kriechklassen eines Homogenbereiches umzusetzen ist. Für gewöhnlich wird eine ungefähre Mittelung der Kriechklassen in Anwendung gebracht, was einer logarithmischen Mittelung nahe käme. Dieser Wert liegt zwischen den beiden geometrischen Extremen und kann somit zumindest unter rein pragmatischem Gesichtspunkt als gut geeignet angesehen werden. Gerade im Falle sehr breiter Kriechklassenstreuung ist die Berücksichtigung von Modellvarianten mit jeweils höherem oder niedrigerem Vorfaktor jedoch empfehlenswert, um Unsicherheiten bzgl. der Konsequenzen reduzieren zu können. Ggf. kann es aber auch sinnvoll sein, zu überprüfen, wieweit sich dahinter eine systematische Verschiebung der Kriechklassen mit dem Ort versteckt.

Die von der BGR für die untersuchten Stratigraphien empfohlenen Kriechklassen am Standort Morsleben sind gegeben durch die in Tab. 1 aufgeführten Klassifikationen (/SCH 10/). Für den Standort Gorleben wurden von der BGR bisher noch keine detaillierten Zuordnungen der Kriechklassen zu den Stratigraphien im Feldesteil EB1 durchgeführt. Es wurde nur eine Zusammenstellung der Ergebnisse und Verfahren erstellt (/HUN 03/), die aufzeigt, dass und wie solche Daten aus dem bestehenden Proben und Versuchen erstellt werden können. Tab. 2 zeigt aber eine auf einem älteren und reduzierten Datensatz (s. Abb. 3) aufbauende Zusammenstellung gleichen Typs. Eine umfassende Detaillierung ist damit nicht gegeben.

Für die Asse wurden von der BGR sehr viele Kerne gezogen und Kriechversuchen unterzogen, die aber fast vollständig aus dem Speisesalz entnommen wurden. Zielsetzung der Versuche war

die Ermittlung grundsätzlicher stoffgesetzlicher Beziehungen. Das Speisesalz bildet hier eine geologische Besonderheit, bei der unter Laugeneinfluss eine Rekristallisation mit der Folge besonders reiner großer Kristalle stattfand. Die hohe Reinheit führt zu einer vergleichsweise großen Kriechfähigkeit (Kriechklasse 5), zum anderen aber auch zu sehr homogenem Kriechen (geringe Streuung der Kriechklassen), was die Vergleichbarkeit der Proben erleichtert und letztlich erst die Ermittlung eines Stoffgesetzes erlaubt. Eine Klassifizierung der verschiedenen stratigraphischen Einheiten und Feldesteile in der Schachanlage Asse war damit nicht angestrebt und existiert infolgedessen nicht.

Tab. 1: Empfohlene Kriechklassen und Bandbreiten für das ERA Morsleben (/SCH 10/)

<b>Stratigraphische Einheit</b>	<b>Kriechklasse</b>	<b>Bandbreite</b>
z2SF/ct	5	2 – 8
z2SF/ki	0	-1 – 1
z2SF (Hartsalz)	4	3 – 6
z2HG u. z2UE Ostfeld	2	1 – 4
z2HG u. z2UE Westfeld	0	-1 – 1
z2HG u. z2UE Zentralteil	3	
z2HS Ostfeld	4	2 – 8
z2HS3 Westfeld	5	4 – 6
z2HS3 Zentralteil	1	1 – 3
z3HS3 Marie	3	2 – 5
z3BS Südfeld	1	1 – 2
z3LS Ostfeld, Zentralteil	5	2 – 6
z3OS Ostfeld, Südostfeld	4	2 – 6
z3(LS+OS) Südfeld	5	4 – 6
z3OS-BK/BD Südostfeld	3	3 – 4
z3OS-BK/BD Nordstrecke	1	-1 – 2
z3BK/BD Ostfeld	5	4 – 6
z3AM Westfeld, Südfeld, Zentralteil, Marie	0	-1 – 0
z3AM Nordstrecke, Südostfeld, Ostfeld	1	0 – 3
z3SS Nordstrecke	2	0 – 3
z3SS Westfeld, Südfeld	0	-1 – 0
z4Südfeld	2	1 – 4

Tab. 2: Empfohlene Kriechklassen und Bandbreiten für Gorleben (/HUN 03/)

Stratigraphische Einheit	Kriechklasse	Bandbreite
z2HS1	6	5 – 8
z2HS2	5	4 – 6
z2HS3	4	2 – 6 (vermutl. bimodal)
z3LS	5	4 – 6
z3OSU	2	1 – 3
z3OSO	3	1 – 5
z3BK/BD	2	0 – 3 (evtl. bimodal)
z3BT	2	0 – 4
z3AM	2	0 – 3

### 11.2.5 Zusammenfassung und Empfehlung

Die oben aufgeführten Empfehlungen zur Zuordnung ermittelter Kriechklassen zu den stratigraphischen Einheiten und Feldesteilen können für sondierende oder exemplarische Berechnungen sicher gut herangezogen werden. Für eine belastbare Untersuchung an einem bestimmten Standort ist aber in jedem Falle eine Überprüfung durch die Ersteller der Datenbasis notwendig, da ein stratigraphischer Horizont durch der Genese nachfolgende Überprägung größere Unterschiede über seiner Erstreckung aufweisen kann, die obiger Zusammenstellung nicht unmittelbar entnehmbar sind.

### 11.2.5 Zusammenfassung und Empfehlung<sup>1</sup>

/HUN 03/ Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F., Plischke, I. (2003). Projekt Gorleben: Thermomechanisches Verhalten von Steinsalz, Abschlussbericht, AP 9G2138110000.

/SCH 10/ Schulze, O., Plischke, I. (2010). ERA Morsleben: Homogenbereichskartierung zum Kriechen von Steinsalz -Verfahren und Ergebnisse - Ergänzende Arbeiten der BGR zu Gutachten im Planfeststellungsverfahren, Sachstandsbericht, AP 9M2811001100

<sup>1</sup> In der Literaturrecherche wurden über 400 Berichte und Veröffentlichungen der BGR gesichtet. Letztlich gingen nur die beiden obigen zusammenfassenden Berichte in dieses Datenblatt ein, da diese den abschließenden Sachstand zum deviatorischen Kriechen von Salz (incl. Carnallit) für Morsleben und Gorleben dokumentieren.

## 12 Dilatanz im Salz

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturauswertung</b>
<b>Standort</b>	<b>Gorleben, Morsleben</b>
<b>Material:</b>	<b>Steinsalz</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_Dilatanz im Salz.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Dilatanzgrenze r_v-Funktion</b>
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Ulrich Heemann, unterstützt von O. Schulze, I. Plischke</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-05-31</b>

12.1 Protokoll

Untersuchtes Phänomen	Sekundäres Kriechen von Steinsalz	
Material	Standort	Stratigrafie, Symbol
Steinsalz, Carnallit	Gorleben, Morsleben	z2, z3

Referenzfunktion	Parameter	Erläuterung
$\dot{\epsilon}_{ss} = V A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma}{MPa}\right)^n$ $V = \frac{2^K}{32}$ <p>Im Text werden auch erweiterte Ansätze behandelt.</p>	$A = 0.18 d^{-1} = 2.083E - 6 s^{-1}$ $Q = 54 kJ / mol$ $n = 5$ $\sigma^* = 1 MPa$ $K$	Strukturfaktor Aktivierungsenergie Spannungspotenz Skalierungsspannung Kriechklasse (lokationsabhängig, im Einzelfall noch zu prüfen, s. Text)

Literatur	/HUN 03/ /SCH 10/
Beschreibung	Steinsalz aller Stratigraphien in Morsleben und Gorleben, dazu Carnallit
Anmerkungen	Rein deviatorisches Kriechen, kein primäres Kriechen, keine Dilatanz, keine Feuchteeffekte, keine Schädigung (tertiäres Kriechen)

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte	Erläuterungen
		Die links dargestellten Kurvenverläufe zeigen die Entwicklung der deviatorischen Verformung als Funktion der Zeit für eine mäßige und eine hohe Spannung. In beiden Fällen tritt über einen begrenzten oder ggf. auch unbegrenzten Zeitraum stationäres Kriechen (blaue Kurven) auf, das hier zugrunde gelegt wird. Primäres Kriechen (grüne Kurven) oder tertiäres Kriechen (rote Kurve) tritt in der realen Situation ggf. auch immer auf, wird hier aber nicht behandelt.

Numerische Modellierung	Constitutive model	Code
	Norton-Creep	Alle Programme

Bewertung	
dataquality	
datasource	

Erstellt:	Geprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

## 12.2 Begründung

### 12.2.1 Zu den mathematischen Grundlagen der Beschreibung von Formänderungen

Unter dem Kriechen eines viskosen Materials versteht man die inelastische Längen- oder allgemeiner Formänderung eines entsprechenden Körpers im Laufe der Zeit. Die Formänderung wird über dessen Dehnungen oder Stauchungen als relative Längenänderungen beschrieben.

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.1)$$

Im allgemeinen Fall treten Dehnungen als sechs Elemente eines symmetrischen Tensors auf.

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Der Begriff des Kriechens wird häufig nur auf deviatorische, d.h. volumentreue Formänderung angewendet, schließt im allgemeinen Fall aber auch eine Volumenzunahme mit ein. Mathematisch wirkt sich die volumetrische Dehnung nur auf die Elemente der Diagonalen des Dehnungstensors aus.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{dev} + \frac{\varepsilon^{vol}}{3} \delta_{ij} \quad (1.3)$$

Dabei ergibt sich die volumetrische Dehnung aus der Summe der Diagonalelemente.

$$\varepsilon^{vol} = \varepsilon_{ii} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (1.4)$$

Dabei wurde in Gl. (1.4) wie auch im Weiteren hinsichtlich der Summierung über die Indizes auf die Einsteinkonvention Bezug genommen. Die volumetrische Dehnung kann also durch ein Skalar ausgedrückt werden. Auch der verbleibende deviatorische Dehnungsanteil kann durch ein Skalar charakterisiert werden.

$$\varepsilon_{vergl}^{dev} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_{ij}^{dev})^2} \quad (1.5)$$

Formänderungen fester Körper sind generell an die Wirkung von Spannungen gekoppelt. Dieser ist von prinzipiell gleichem mathematischem Aufbau.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Auch hier lassen sich hydrostatische und deviatorische Spannungsanteile definieren,

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{dev} + \sigma^{hyd} \delta_{ij} \quad (1.7)$$

die durch

$$\sigma^{hyd} = \frac{\sigma_{ii}}{3} \quad (1.8)$$

und

$$\sigma_{vergl}^{dev} = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma_{ij}^{dev})^2} \quad (1.9)$$

definiert sind.

Anschaulich kann die deviatorische Vergleichsdehnung  $\varepsilon_{vergl}^{dev}$  mit der axialen Dehnung eines homogenen Körpers unter radialsymmetrischen Versuchsbedingungen mit volumentreuer Verformung gleichgesetzt werden. Die deviatorische Vergleichsspannung  $\sigma_{vergl}^{dev}$  kann mit der axialen Spannung im Körper unter radialsymmetrischen Versuchsbedingungen gleichgesetzt werden, wenn keine Mantelspannung (Radialspannung) eingesetzt wird.

### 12.2.2 Zur Phänomenologie der Dilatanz im Salz

Die Ursache volumetrischer Formänderung im Salz kann und muss im Rahmen des hier beschriebenen Modells der Bildung von Mikrorissen in den Kristallkörnern oder dazwischen auf den Korngrenzen zugerechnet werden. Derzeit existiert noch kein physikalisch begründetes Modell, dass dieses als Dilatanz bezeichnete Phänomen vollständig beschreiben könnte. Allerdings zeigen Laboruntersuchungen der BGR (Hunsche XXXX), dass die volumetrische Rate mit sehr großer Konstanz und Reproduzierbarkeit an die deviatorische Kriechrate gekoppelt ist. Die volumetrische Dehnung ist dabei immer nennenswert kleiner als die deviatorische, kann aber schon in eine vergleichbare Größenordnung kommen. Der relative Faktor zwischen den beiden skalaren Dehnungsraten wird durch den Faktor  $r_v$  gekennzeichnet, welcher selbst üblicherweise als eine Funktion der deviatorischen Spannung und der minimalen Hauptdruckkomponente beschrieben wird.

$$\dot{\varepsilon}^{dil} = r_v \dot{\varepsilon}^{dev} \quad (2.1)$$

Unterhalb einer gewissen Spannung unterbleibt die Dilatanz. Dieser Grenzbereich wird als Dilatanzgrenze bezeichnet. Unterhalb dieser Grenze muss also auch die Funktion  $r_v$  null sein. Leider

ergeben sich mit unterschiedlichen Messtechniken auch unterschiedlich Dilatanzgrenzen. Die drei verwendeten Techniken beruhen auf der Messung einer Volumenzunahme, dem Einsetzen von Mikroakustik als Indikator einsetzender Mikrorissbildung und dem Anstieg der Permeabilität. Die Mikroakustik setzt offensichtlich zu einem Zeitpunkt ein, zu dem die auftretenden Risse noch nicht die Möglichkeit haben, durch Vernetzung eine durchgehende Durchlässigkeit zu bilden. Mit hinreichender Zeit, die im Labor nicht zur Verfügung steht, sollte jedoch im Rahmen einer Perkolations-theorie infolge des stetig voranschreitenden Prozesses auch eine merkliche Permeabilität erreicht werden. Es ist jedoch fraglich, ob derartige langfristige und schwache Prozesse von solcher Relevanz sind, dass sie nicht auch durch einfache konservative Abschätzungen abgedeckt werden können.

Die Permeabilitätsmessungen liefern in jedem Falle erst bei höheren Belastungen messbare Änderungen der Durchlässigkeit. Sie sind vergleichbar mit den Ergebnissen zur Volumenmessung. Letztere sind u.a. aufgrund des technisch einfacheren und wiederholbaren Verfahrens in weit größerem Umfang gegeben und bilden aufgrund der größeren Anzahl eine statistisch weit besser abgesicherte Basis. Weiterhin muss das auf Volumenmessung basierende Verfahren im Einklang mit der Bestimmung der allgemeineren  $r_v$ -Funktion stehen ist somit zusätzlich abgesichert.

Die Messungen wurden in den dieser Auswertung zugrunde liegenden Berichten i.A. an zylindrischen Proben unter Kompressionsbedingungen ( $|\sigma_{ax}| > |\sigma_{rad}|$ ) durchgeführt. Unter diesen Bedingungen ist rein mathematisch nicht zu unterscheiden, ob die Dilatanzrate besser durch den Einfluss des hydrostatischen Drucks oder der minimalen Hauptdruckkomponente (= Manteldruck) beschrieben werden kann. Physikalische und geometrische Betrachtungen von Heemann (HEE 89) zeigten jedoch, dass die Mikrorisse sich zwingend senkrecht zur kleinsten Druckkomponente  $P_{min}$  ausrichten und somit von dieser begrenzt werden. Die treibende rissöffnende Wirkung hingegen kommt aus der deviatorischen Spannung. In allen hier diskutierten Ansätzen definieren sich die prozesssteuernden Funktionen somit über diese beiden Spannungskomponenten. Im Gegensatz zur Kriechrate kann die  $r_v$ -Funktion als temperaturunabhängig aufgefasst werden.

In allen Laborberichten wird die entstehende Porosität als rein volumetrische Größe aufgefasst und entsprechend behandelt. Die anisotrope Entstehung mit Rissöffnung in Richtung der kleinsten Hauptdruckkomponente wird dabei nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass zur Dilatanz auch zwingend der gegenläufige Prozess der Verheilung (healing) und Reduktion der Durchlässigkeit und Porosität (sealing) gehört. Die Reduktion der Durchlässigkeit und Porosität kann dabei auch vorübergehend als mehrheitlich elasti-

sche Reaktion des Porenraums eintreten. Dem steht als weitergehender Prozess die Verheilung gegenüber, unter der eine echte dauerhafte Reduktion von Durchlässigkeit und Porosität verstanden wird. Ein echtes Verständnis dieser Prozesse liegt noch nicht vor. Derzeit können die drei Phänomene Dilatanz, Verheilung und „elastische“ Abdichtung nicht einmal experimentell hinreichend getrennt werden. Theoretisch ist die Dilatanz proportional zur deviatorischen Kriechrate (s.o.), während die Verheilung annähernd proportional zum bereits erzeugten Porenraum sein sollte. Die elastische Reaktion Porenraums und damit auch der damit verknüpften Permeabilität muss keineswegs linear mit der Spannung verlaufen.

Eine weitere Einflussgröße auf die Entwicklung der Dilatanz ist durch den hydraulischen Druck eines Fluides gegeben. Wenn das Fluid in den Mikroriss eindringt, kann es von innen einen Druck auf die Innenwandung des Risses ausüben, die eine prinzipiell sprengende Wirkung hat. Dies ist mathematisch äquivalent zur lokalen Erhöhung des hydrostatischen Drucks bzw. einer Erniedrigung der äußeren deviatorischen Wirkung. Dem kommt man durch Einführung einer effektiven Spannung

$$\sigma_{ij}^{eff} = \sigma_{ij}^{tot} + p \delta_{ij} \quad (2.2)$$

Im Hauptachsensystem des Spannungstensors bedeutet dies, dass alle Eigenwerte der Spannungen um den hydraulischen Druck des Fluides modifiziert werden.

$$\sigma_I^{eff} = \sigma_I^{tot} + p \delta_I, \quad I = 1, 2, 3 \quad (2.3)$$

Somit gilt insbesondere für die minimale Hauptdruckkomponente  $P_{\min} = -\sigma_{\max}$

$$P_{\min}^{eff} = -\sigma_{\max}^{eff} = -\sigma_{\max}^{tot} - p \quad (2.4)$$

Dabei ist zu beachten, dass Feuchtigkeit ebenfalls die Entwicklung der Dilatanz beeinflussen kann.

### 12.2.3 Messdaten und Auswertefunktionen

#### Dilatanzgrenze

Eine hinreichende Anzahl an Messdaten finden sich in Deutschland in der Bundesanstalt für Geowissenschaften (BGR) in Hannover, beim Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig und im Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD) der TU Clausthal. In der im Auftrag der BGR erstellten Ausarbeitung von Hampel (2012) wird diesen Daten zusammenfassend beschrieben durch

$$\sigma_{dil}^{dev} = \sqrt{a_{dil} (P_{min} + b_{dil})}. \quad (3.1)$$

Die Parameter sind gegeben mit

$$a_{dil} = 53 \text{ MPa}, \quad b_{dil} = 0.5 \text{ MPa}. \quad (3.2)$$

Die in Gl. (6.1) aufgeführte minimale Hauptdruckkomponente unterscheidet sich von der maximalen Hauptspannung durch das Vorzeichen entsprechend

$$P_{min} = -\sigma_{max}. \quad (3.3)$$

### $r_v$ -Funktion

Ebenfalls der Ausarbeitung von Hampel (HAM 12) wurde die Formulierung zur  $r_v$ -Funktion entnommen.

$$r_v = c_{dil} \left( \frac{\sigma^{dev} - \sigma_{dil}^{dev}}{\sigma^{dev} + 3P_{min}} \right)^{m_{dil}} \quad \text{für } \sigma^{dev} > \sigma_{dil}^{dev} \quad (3.4)$$

$$r_v = 0 \quad \text{sonst}$$

mit den beiden Parametern

$$c_{dil} = 8.66, \quad m_{dil} = 3. \quad (3.5)$$

In obiger Formulierung ist noch kein Ausdruck für eine anisotrope Entwicklung der Dilatanz enthalten. Hier sind phänomenologische Ausdrücke, die auf den Ausarbeitungen von Heemann (199) denkbar. Diese sind jedoch noch nicht experimentell abgesichert und unterbleiben hier vorläufig.

#### 12.2.4 Zusammenfassung und Empfehlung

Obige Gleichungen zur Erfassung der Dilatanz geben den derzeit besten Stand des Wissens auf Basis der BGR-Daten wieder. In der Arbeit von Hampel wurden dabei auch Messdaten anderer Institute zum Vergleich mit herangezogen.

Dennoch sind die Parameter zunächst nur für vergleichsweise sauberes Salz gültig. Bei starken Verunreinigungen in Form fein verteilter Fremdatome im Kristallgitter oder auch makroskopischer Einschlüsse in großer Dichte ist eine quantitative Beschreibung bisher unbekannt. Auch wurden die Daten anderer Institute bisher nur unzureichend berücksichtigt.

Es muss hier auch noch mal darauf hingewiesen werden, dass eine Dilatanzgrenze auf unterschiedliche Weise (Einsatz mikroakustischer Ereignisse, Änderung der Permeabilität, Änderung der seismischen Geschwindigkeit, Zunahme des Probenvolumens) gemessen werden kann und dann auch jeweils zu deutlichen Unterschieden im Vergleich zur hier aufgezeigten Beziehung führen kann. Die hier berücksichtigte Definition der Dilatanz über die erste Volumenzunahme sollte aber im Zusammenhang mit der Frage der Porositätsbildung die beste Definition darstellen.

Der Ansatz zur Berechnung der Dilatanzrate stellt grundsätzlich eine glaubwürdige Formulierung dar und weist dabei auch Ähnlichkeiten zu konkurrierenden Ansätzen auf. Eine abschließende Bewertung unter Einschluss dieser anderen Formulierungen steht aber noch aus.

### 12.2.5 Literaturverzeichnis

Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., et al. (1999). *Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project), Final Report*. Tech. rep., European Commission, EUR19124 EN.

Becker, D.-A., Bremer, N.-M., Richter, K.-J., Schneider, L., & Storck, R. (2000). *Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge bei Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken*. Tech. rep., Stoller Ingenieurtechnik GmbH und Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.

Cermak, V., & Rybach, L. (1982). Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In *SpringerMaterials - The Landolt-Börnstein Database* (Vol. c, pp. --). Angenheister, G.

Eisenburger, D., & Grisseemann, C. (2003). *Projekt Gorleben - Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermophysikalischen und elektrischen Gesteinsparameter*. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

Gevantman, L., Lorenz, J., Haas, J. L., Clyne, M. A., Potter, R. W., Schafer, C. M., et al. (1981). *Physical properties data for rock salt*. (L. Gevantman, Ed.) National Bureau of Standards.

Kopietz, J. (1994). *Untersuchungen thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen - 2. Zwischenbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 02 E 8421 5*. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover (BGR).

Ploumen, P., Strickmann, G., & Winske, P. (1979). Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Teil I: Berechnung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturfelder. *Atomwirtschaft*, 2, 85-91.

Rothfuchs, T., Duijves, K., & Stippler, R. (1988). *Das HAW-Projekt - Demonstrationseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse. Zwischenbericht 1985-1987*. Tech. rep., Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF) - Institut für Tiefenlagerung and Stichting Energieonderzoek Centrum Nedrland (ECN).

Schnier, H. (1984). *Standortsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben (PSE II) - BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5106 2 - Zusammenstellung geothermischer Parameter für geomechanische Berechnungen, Archiv-Nr. 97602*. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.



## 13 Thermischer Ausdehnungskoeffizient von Salzgestein

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturauswertung</b>
<b>Standort</b>	<b>Gorleben</b>
<b>Material:</b>	<b>Salzgesteine (vorwiegend) Anhydrit Kalisalz</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_02.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>thermischer Ausdehnungskoeffizient</b>
Anlage 01 Best-Estimate-Wert (BEW) Anlage 02 Begründung	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Sha Li, Christian Müller</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-05-24</b>

13.1 Protokoll

<b>Parameter</b> <i>frmdata</i>	<b>VIRTUS: thermischer Ausdehnungskoeffizient</b>	
<b>Material</b> <i>frm_x-site</i>	<b>Standort</b> <i>site</i>	<b>Stratigrafie, Symbol</b> <i>stratigraphy</i>
Steinsalz		

<b>Wert</b> <i>frmdata</i>	<b>Einheit</b> <i>functionparameter</i>	<b>Symbol</b> <i>functionparameter</i>	<b>Bemerkung</b>
3,9*10 <sup>-5</sup> (20°C) – 4,3*10 <sup>-5</sup> (160°C)	1/K	α	

<b>Zitat; Symbol</b> <i>frmReference</i>	<b>Literatur</b> <i>citation</i>
/GEV81/	
<b>Beschreibung</b> <i>frmdata ;description</i>	Eine Temperatur abhängige Beziehung ist in /GEV81/ aus Labormessungen genannt. In der Arbeit von /EIS03/ wurden Messkurven mit einer Schwankungsbreite aufgrund von Probeninhomogenitäten angegeben, die deutlich unter die Kurve nach /GEV81/ liegen. Es wird vorgeschlagen, die Beziehung aus /GEV81/ als Best-Estimate –Wert für Steinsalz anzugeben.
<b>Anmerkungen</b> <i>frmdata; InternalRemark</i>	

<b>Grafik; Screenshot</b>	<b>Tabellenwerte</b> <i>curvedata</i>	<b>Formel / Gleichung</b> <i>equation</i>	<b>Beziehung/Gesetz</b>																		
	<table border="1"> <tr> <th>T [°C]</th> <th>[1/K]</th> </tr> <tr> <td>20</td> <td>3,86538*10<sup>-5</sup></td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>3,92111*10<sup>-5</sup></td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>3,97663*10<sup>-5</sup></td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>4,03194*10<sup>-5</sup></td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>4,08705*10<sup>-5</sup></td> </tr> <tr> <td>120</td> <td>4,14196*10<sup>-5</sup></td> </tr> <tr> <td>140</td> <td>4,19666*10<sup>-5</sup></td> </tr> <tr> <td>160</td> <td>4,25115*10<sup>-5</sup></td> </tr> </table>	T [°C]	[1/K]	20	3,86538*10 <sup>-5</sup>	40	3,92111*10 <sup>-5</sup>	60	3,97663*10 <sup>-5</sup>	80	4,03194*10 <sup>-5</sup>	100	4,08705*10 <sup>-5</sup>	120	4,14196*10 <sup>-5</sup>	140	4,19666*10 <sup>-5</sup>	160	4,25115*10 <sup>-5</sup>	$\alpha = 3,025 \times 10^{-5} + 2,942 \times 10^{-8} T - 2,5677 \times 10^{-12} T^2$	Beziehung nach /GEV81/
T [°C]	[1/K]																				
20	3,86538*10 <sup>-5</sup>																				
40	3,92111*10 <sup>-5</sup>																				
60	3,97663*10 <sup>-5</sup>																				
80	4,03194*10 <sup>-5</sup>																				
100	4,08705*10 <sup>-5</sup>																				
120	4,14196*10 <sup>-5</sup>																				
140	4,19666*10 <sup>-5</sup>																				
160	4,25115*10 <sup>-5</sup>																				

<b>Numerische Modellierung</b>		
<b>Constitutive model</b> <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	<b>Code</b> <i>frmCode</i>	<b>Funktion</b> <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt	
<b>Bewertung</b>	
<b>dataquality</b>	
<b>datasource</b>	

<b>Erstellt:</b>	<b>Geprüft:</b>	<b>Freigegeben:</b>
<b>Datum:</b>	<b>Datum:</b>	<b>Datum:</b>

## 13.2 Begründung

### 13.2.1 Einleitung

Die hier vorgestellten Werte zum thermischen Ausdehnungskoeffizient der Evaporite stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS gesichteten und ausgewerteten Literatur dar.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist eine Stoffkonstante, die das Verhalten eines Stoffes bezüglich Veränderungen seiner Abmessungen bei Temperaturveränderungen beschreibt. Es wird zwischen dem linearen Ausdehnungskoeffizient und dem räumlichen Ausdehnungskoeffizient unterschieden. Für Feststoffe bzw. Evaporite werden in der Regel lineare Ausdehnungskoeffizient verwendet.

Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  ist die Proportionalitätskonstante zwischen der Temperaturänderung  $dT$  und der relativen Längenänderung  $dL/L$  eines Festkörpers und hat die Einheit  $K^{-1}$ . Mit ihm wird demnach die relative Längenänderung bei einer Temperaturänderung beschrieben. Mathematisch ergibt sich folgende Definition:

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (\text{Gl. 1})$$

### 13.2.2 Halite

In der Arbeit von /SEN92/ finden sich Daten zur linearen thermischen Expansion für Steinsalz ( $\Delta L/L$ ). Diese Messwerte sind aus /GEV81/ und haben unterschiedliche angepasste Funktionen in unterschiedlichen Temperaturbereichen (Abbildung 1).

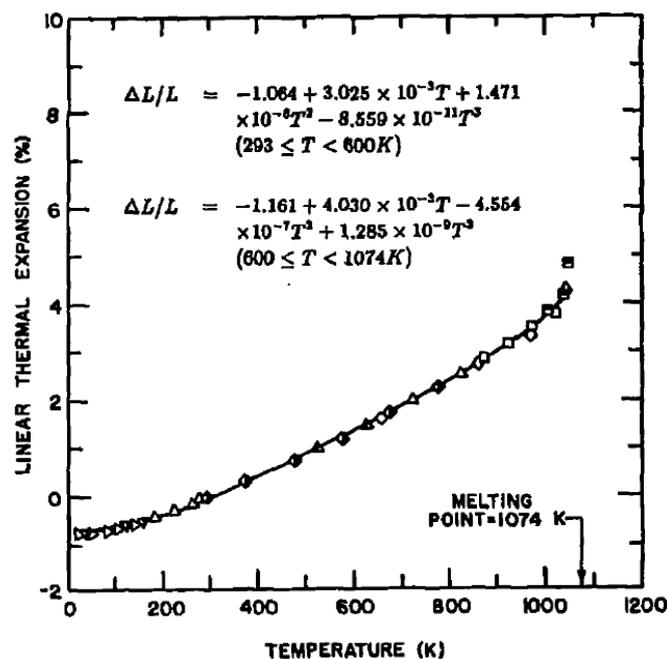


Abbildung 27: Messkurve der linearen thermischen Expansion für Steinsalz /GEV81/

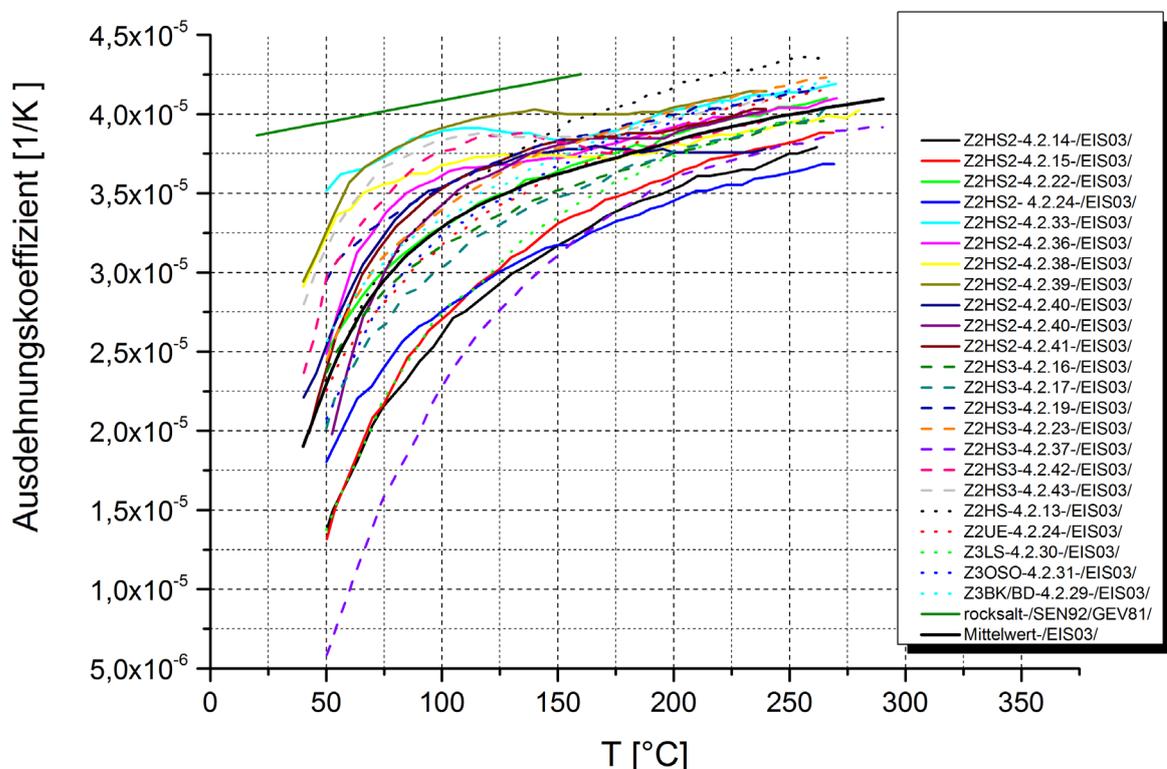
Die für numerische Berechnungen interessante Temperatur ist unter 600 K, deshalb ist die erste Funktion geeignet (Abb. 1):

$$\frac{\Delta L}{L} = -1,064 + 3,025 \times 10^{-3}T + 1,471 \times 10^{-6}T^2 - 8,559 \times 10^{-11}T^3 \quad (\text{Gl. 2})$$

Aus Gleichung 1 und 2 ergibt sich die Temperaturabhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (GL. 3) wie folgt:

$$\alpha = 3.025 \times 10^{-5} + 2.942 \times 10^{-8}T - 2.5677 \times 10^{-12}T^2 \quad (\text{Gl. 3})$$

Die entsprechende Funktion ist in **Abbildung 28** dargestellt („rocksalt“ /GEV81/).



**Abbildung 28:** Mittlerer linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur für unterschiedliche stratigraphische Schichten /EIS03/GEV81/.

Weitere Messwerte zur thermischen Ausdehnung finden sich in /EIS03/. Die Werte wurden an Proben des Salzstockes Gorleben für unterschiedliche Temperaturen im Labor GeoTec gemessen /EIS03/. Die lineare Wärmeausdehnung wurde mit einem NETZSCH-Dilatometer (Typ 402E) gemessen. Weiterführende Informationen zum Aufbau finden sich in /EIS03/. Die erfassten Werte sind den stratigraphischen Schichten zugeordnet; es findet sich zusätzlich eine kurze petrographische Beschreibung. Die Messergebnisse werden in **Abbildung 28** zusammenfassend dargestellt; der ungleichmäßige Verlauf einer Einzelkurve ergibt aus dem Digitalisierungsprozess.

Als Mittelwert wird für den mittleren linearen Ausdehnungskoeffizient von Halit  $3,7 \cdot 10^{-5}$  1/K angegeben, wobei nicht klar ersichtlich ist, ob es sich um einen Mittelwert bei einem bestimmten Temperaturniveau handelt /EIS03/. Analog wird ein niedrigster Wert mit  $3,7 \cdot 10^{-5}$  1/K und ein höchster Wert mit  $3,9 \cdot 10^{-5}$  1/K angegeben. Nach /EIS03/ liegen die Ergebnisse deutlich unterhalb des in gängigen Nachschlagewerken angegebenen linearen Ausdehnungskoeffizienten von Halit bei 20°C bis 100°C mit  $\alpha = 4 \cdot 10^{-5}$  1/K /EIS03/. Als möglicher Grund wird die augenscheinliche Inhomogenität der Proben aufgeführt, die durch große Einkristalltrümmer, scharfkantige oder gerundete Kristallkörner sowie sandige Schlieren mit z.T. organischem Material bedingt war. Des Weiteren wurde nur ein kleiner Bereich (prismenförmige Prüflinge mit einer Länge von 26-43 mm bei 10 mm Durchmesser) erfasst, so dass die Messungen keineswegs als repräsentativ für den stratigraphischen Horizont angesehen werden können /EIS03/. Da jedoch Mineralanalysen nicht vorgenommen wurden, können Aussagen zum Einfluss bestimmter Komponenten auf die Wärmeausdehnung nicht getroffen werden.

In weiteren gesichteten Literaturstellen ist der thermische Ausdehnungskoeffizient für Halit eine Konstante und wird dort im Rahmen von numerischen Berechnungen verwendet. Es handelt sich folglich nicht um Messwerte. Eine Quelle bzw. die Datenherkunft ist oftmals unbekannt. **Tabelle 3** stellt die konstanten Werte mit den jeweiligen Quellen dar. Des Weiteren werden die Werte oftmals einheitlich für alle Steinsalzfolgen verwendet (z2, z3, z4).

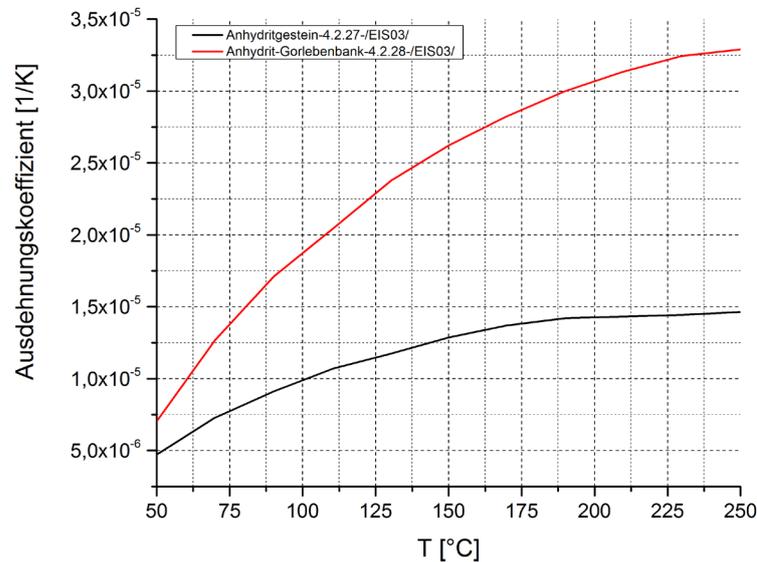
**Tabelle 3: Konstante Werte für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten und entsprechende Quelle**

Nr.	Wert [1/K]	Quelle
1	4,5e-5	WAL 81a
2	4,2e-5	HAW88a; PUD03; Rot92a; BEC04; BEC99a; HAW91a; HAW93; PRI95; KRO09; ROT90a; KAM03; BEC97; BRD93; ROT04c;
3	4,0e-5	ROT88; VDH94; BEC99a; HAW92a; HAW93; PRI95; KES86; KRO09; ROT86b; BEC97; DUE10a; BOL96; DBE96; WOL09; IFG10; LUX02a; BGR89; SNI84; NIP00; NIP88a; NIP88b; NIP88c; NIP88d
4	3,7e-5	EIS03
5	3,0e-5	DUE08; DUE09; DUE10a

### 13.2.3 Anhydrit

Für die im Rahmen des Projektes gesichtete Literatur liefern allein die Arbeiten von /EIS03/ Ergebnisse aus Laboruntersuchungen für Anhydrit (**Abbildung 29**). Es wurden 2 Proben untersucht; eine stammt aus der Gorlebenbank (als „Anhydrit-Gorlebenbank“ bezeichnet) und die andere wird als „Anhydritgestein“ (unspezifiziert) deklariert /EIS03/. Die gemessenen Wärmeausdehnungen unterscheiden sich deutlich, jedoch wurde eine petrographische Beschreibung nicht vorgenommen, so dass ein etwaiger Einfluss des Mineralbestandes auf die Wärmeausdehnung nicht abgeleitet werden kann. In den Arbeiten von /DUE08/, /DUE09/, /DUE10a/ wird ein Wert von  $4,0 \cdot 10^{-5}$  /K für Anhydrit in numerischen Berechnungen im Salinarbereich benutzt. In den BGR-Arbeiten von /NIP88b/, /NIP88c/, /NIP88d/ wird ein Wert von  $1,6 \cdot 10^{-5}$  /K für die thermomechanischen Berechnungen im Salzstock Gorleben (z3HA) benutzt. Als Quelle wird hier eine persönli-

che Mitteilung („über die elastischen Materialeigenschaften des Deck- und Nebengebirges“) der BGR von Schnier (1985) genannt.



**Abbildung 29: Thermische Ausdehnungskoeffizient des Anhydrites aus Laboruntersuchungen /EIS03/**

### 13.2.4 Kalisalz

Für die Kalisalze sind ebenfalls sehr wenige Literaturstellen für den thermischen Ausdehnungskoeffizient zu finden. In die Arbeit von /EIS03/ werden Messergebnisse für Carnallit für unterschiedliche Temperaturen gegeben (**Abbildung 30**). Bei den Proben handelt es sich um Trümmercarnallit mit ca. 25% bzw. 30% Halit (unspezifiziert hinsichtlich Stratigraphie) sowie einen Trümmercarnallit aus dem Kaliflöz Staßfurt (z2SF). Nach /EIS03/ haben die carnallitischen Proben einen mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizient von  $3,3 \cdot 10^{-5} /K$  bei 20°C bis 100°C. Bei höheren Temperaturen sind deutliche Schwankungen in den gemessenen Ausdehnungskoeffizienten zu beobachten, die mit einer Umsetzungsreaktionen des Carnallits in Verbindung gebracht werden können.

In /NIP88b/, /NIP88c/, /NIP88d/ wird der Wert von  $2,5 \cdot 10^{-5} /K$  für die thermomechanischen Berechnungen angewandt. Als Quelle wird auch hier eine persönliche Mitteilung („über die elastischen Materialeigenschaften des Deck- und Nebengebirges“) der BGR von Schnier (1985) genannt.

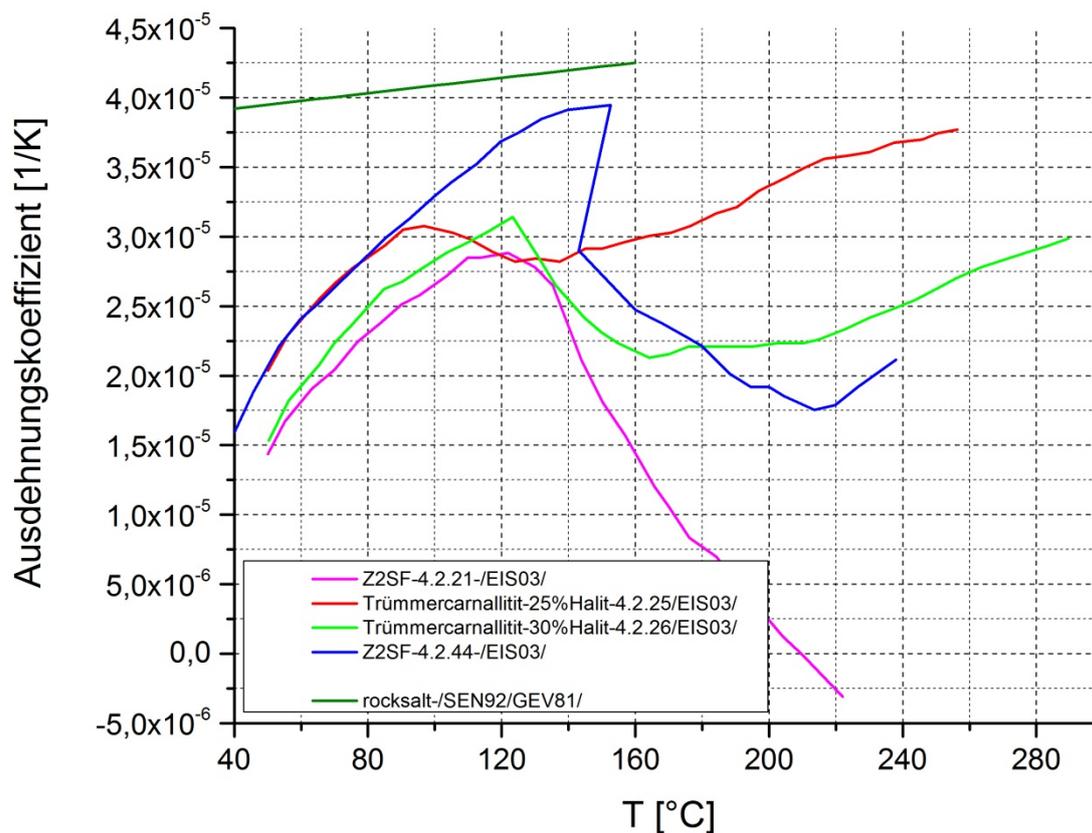


Abbildung 30: Thermische Ausdehnungskoeffizient des Carnallitites aus Larboruntersuchungen /EIS03/

### 13.2.5 Empfehlung für Best-Estimate-Werte

In vielen numerischen Berechnungen wird für die thermische Dilatation von Steinsalz im Allgemeinen ein konstanter Wert in der Größenordnung von  $4,0 \cdot 10^{-5} /K$  angenommen. Generell ist jedoch eine geringe Temperaturabhängigkeit zu beobachten. Eine temperaturabhängige Beziehung ist in /GEV81/ genannt, die Werte von  $3,9 \cdot 10^{-5} /K$  ( $20^\circ C$ ) bis  $4,3 \cdot 10^{-5} /K$  ( $160^\circ C$ ) zeigt. In /EIS03/ finden sich für Gorleben Steinsalz Werte von  $2,25 \cdot 10^{-5} /K$  bei  $50^\circ C$  bis  $4,0 \cdot 10^{-5} /K$  bei  $250^\circ C$  (berechnete Mittelwertkurve nach Messwerten aus /EIS03/; hauptsächlich Staßfurt Steinsalz). Die Werte aus /EIS03/ zeigen eine deutliche Schwankungsbreite. Als ein möglicher Grund wird die augenscheinliche Inhomogenität der Proben aufgeführt. Eine detaillierte stratigraphische Zuordnung zu einzelnen Schichtgliedern ist aus diesem Grund nicht möglich. Des Weiteren zeigen alle Messwertkurven im Anfangsbereich einen deutlichen nichtlinearen Anstieg des thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der in dieser Form in /GEV81/ nicht zu beobachten ist. Nähere Angaben dazu finden sich in /EIS03/ nicht; evtl. ist von einem systematischen Messfehler auszugehen. Aufgrund der Tatsache, dass die Messungen in /EIS03/ zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten extern durchgeführt wurden und etwaige Messberichte nicht

vorliegen, wird vorgeschlagen, die Beziehung aus /GEV81/ als Best-Estimate-Wert für Steinsalz anzugeben.

Für das Anhydrit liegen insgesamt zu wenige Messdaten vor, um eindeutige Aussagen hinsichtlich des Ausdehnungskoeffizienten treffen zu können. Bei dem Kalisalz erschwert zum einen die Abgabe des gebundenen Kristallwassers ab ca. 120°C die Angabe eines sinnvollen Wertes, zum anderen sind die Messwerte unterhalb von 120°C aufgrund des oben beschriebene systematischen Messfehlers mit großer Unsicherheit behaftet, weshalb auch hier kein plausibler Wert angegeben werden kann.

### 13.2.6 Literaturverzeichnis

/BEC97/ Heusermann, S., Koß, S., Bollingerfehr, W., Manthee, F., Korthaus, E., Pudewills, A., Droste, J., Rothfuchs, T. (1997): Thermal simulation of drift emplacement, Summary of interim results.

/BEC99a/ Bechthold, W., Heusermann, S., Rothfuchs, T. Poley, A., Ghoreychi, M., Gens, A., Olivia, S. (1999): Thermal simulation of drift emplacement, Summary of interim results.

/BEC04/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F.D. (2004): Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt, Bambus project final report, EUR 19124EN.

/BGR89/ Nipp, Dr. H.-K. (1989): Rechnerische Untersuchungen zur Abschätzung des Bettungsverhaltens von kriechfähigem Salzgestein im Bereich der Schachtfundamente in Gorleben, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

/BRD93/ Breidenich, G. (1993): Gekoppelte Berechnung der thermomechanischen Feldgrößen in einer Steinsalzformation infolge der Einlagerung radioaktiver wärmefreisetzender Abfälle, Aachen Beiträge zur Energieversorgung, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft Forschungsgesellschaft Energie an der RWTH Aachen.

/BUF26/ Buffington, R.M., Latimer, W.M. (1926): The Measurement of Coefficients of Expansion at Low Temperatures - Some Thermodynamic Applications of Expansion Data, J. Amer. Chem. Soc., 48, 2305-19.

/DBE96/ Müller-Hoeppe, N. (1996): FEM-Berechnungen der Belastungen und Verschiebungen des Innenausbaufundamentes und der Stützringe des Schachtes Gorleben 1, DBE, Peine.

/DUE09/ DMV & IGMC (2009): Tagungsband Energie und Rohstoffe 2009, Sicherung der Energie- und Rohstoffversorgung, 09-12. 09. 2009, Goslar.

- /DUE10a/ Düsterloh, U. (2010): Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlrumbauteen im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen, Technischen Universität Clausthal.
- /EIS03/ Eisenburger, D., Grisseemann, C. (2003): Projekt Gorleben - Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermophysikalischen und elektrischen Gesteinsparameter, Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /GEV81/ Gevantman, L., Lorenz, J., Haas, J. L., Clynne, M. A., Potter, R. W., Schafer, C. M., et al. (1981): Physical properties data for rock salt. (L. Gevantman, Hrsg.) National Bureau of Standards.
- /HAW88a/ Rothfuchs, T., Duijves, K., Stippler, R. (1988): Demonstrationseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse, GSF-Bericht 10/88, Institut für Tief Lagerung, Braunschweig.
- /HAW91a/ Rothfuchs, T., Duijves, K.A., Raynal, M., Major, J.C., Müller-Lyda, I. (1991): Test Disposal of Highly Radioactive Canisters in the Asse Salt Mine, Institut für Tief Lagerung.
- /HAW92a/ Rothfuchs, T., Vons, L., Raynal, M., Major, J.C., Müller-Lyda, I. (1992): Test Disposal of Highly Radioactive Canisters in the Asse Salt Mine, Institut für Tief Lagerung.
- /HAW93a/ Rothfuchs, T., Vons, L., Raynal, M., Major, J.C., Müller-Lyda, I. (1993): Test Disposal of Highly Radioactive Canisters in the Asse Salt Mine, Institut für Tief Lagerung.
- /IFG10/ Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Teichman, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig.
- /KAM03/ Kamlot, P., Brückner, D., Wiedemann, M. (2003): Investigation of stress state and rock-mechanical behaviour of backfill and host rock in dependence on temperature, contribution to the BAMBUS-II project.
- /KES86/ Feddersen, H., Flach, D., Flentge, I., Frohn, C., Gies, H., Gommlich, G., Hahn, J., Hente, B., Jockwer, N., Kessels, W., Klarr, K., Pfeifer, S., Rothfuchs, T., Schmidt, M., Wieczorek, P. (1986): Results of temperature test 6 in the asse salt mine, Volume I - Main report, nuclear science and technology.
- /KRO09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M. (2009): Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz (REPOPERM-Phase 1).

- /LUX02a/ Lux, K.-H., Lomo-Appeyh, G.M., Eberth, S. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung 'Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen', Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen, TU-Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- /NIP88a/ Nipp, H-K. (1988): Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1984), Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /NIP88b/ Nipp, H-K. (1988): Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1985), Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /NIP88c/ Nipp, H-K. (1988): Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1986), Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /NIP88d/ Nipp, H-K. (1988): Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1986-2), Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /NIP00/ Nipp, H.-K., Heusermann, S. (2000): Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung BSK3), Ergebnisbericht, Erkundungsbergwerk Gorleben 9G4141800000, Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /PRI95/ Prij. J., Graefe, V., Rothfuchs, T., Vons, L.H. (1995): Modelling of the thermo-mechanical behaviour of solid rocksalt and crushed salt.
- /PUD03/ Pudewills, A., Droste, J. (2003): Numerical modeling of the thermomechanical behavior of a large-scale underground experiment, Computers and Structures 81, S. 911-918.
- /PUD94/ Pudewills, A., Müller-Hoeppe, N., Papp, R. (1994): Thermal and thermomechanical analyses for disposal in drifts of a repository in rock salt, Germany.
- /ROB61/ Robin, T., Johnston, H.L., Altman, H.W. (1961): Thermal Expansion of Rock Salt, J. Phys. Chem 65, 65-8.
- /ROT86b/ Rothfuchs, T. (1986): Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus Polyhalitischem Steinsalz unter in Situ Bedingungen, Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse.
- /ROT88/ Rothfuchs, T., Coyle, A.J., Wiczorek, K., Kalia, H., Feddersen, H.-K., Eckert, J., Staupendahl, G (1988): Brine migration test, Asse salt mine federal republic of germany, final report GSF-Bericht 6/88.

- /ROT90a/ Rothfuchs, T., Duijves, K.A. (1990): Demonstration facility for the disposal of high-level waste in salt, Synthesis report.
- /ROT04c/ Bollingerfehr, W., Manthee, F., Lerch, C., Linn, M., Ziegenhagen, J. (2004): Versuchsfeldaufwältigung und Rückgewinnung von Materialproben und Messeinrichtungen, Abschlussbericht, DBE, Peine.
- /SEN92/ Senseny, P. E., Hansen, F. D., Russell, J. E., Carter, N. L., Handin, J. W. (1992): Mechanical Behaviour of Rock Salt: Phenomenology and Micromechanisms, USA.
- /SNI84/ Schnier, H. (1984). Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben (PSE II) - BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5106 2 - Zusammenstellung geothermischer Parameter für geomechanische Berechnungen, Archiv-Nr. 97602. Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- /VDH94/ Van Den Horn, B.A., Prij, J. (1994): Thermo-Mechanical analyses of a backfilled borehole, ECN-C-93-045.
- /VOI 28/ Voigt, W. (1928): Lehrbuch der Kristallphysik (mit Ausschluß der Kristalloptik)
- /WOL09/ Wolf, J. (2009): Numerische Modellierung des Salinarbereiches Schacht 1, Gorleben - Kurzdokumentation zu Berechnungen am 2D- und 3D-Modell, DBETEC, Peine.
- /WAL81a/ Wallner, M. (1981): Analysis of thermomechanical problems related to the storage of heat producing radioactive waste in rock salt, Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR), Hannover.



## 14 Biot-Koeffizient von Salzgestein

<b>Projekt:</b>	<b>Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz</b>
<b>Kurztitel</b>	<b>VIRTUS</b>
<b>Thema:</b>	<b>Literaturlauswertung</b>
<b>Standort</b>	
<b>Material:</b>	<b>Salzgesteine</b>
<b>Datenblatt:</b>	<b>BE_02.docx</b>
<b>Parameter:</b>	<b>Biot-Koeffizient</b>
Anlage 01 Best-Estimate-Wert (BEW) Anlage 02 Begründung	
<b>Bearbeiter:</b>	<b>Sha Li, Christian Müller</b>
<b>Datum:</b>	<b>2013-05-24</b>

14.1 Protokoll

Parameter <i>frmdata</i>	VIRTUS: Biot Koeffizient	
Material <i>frm_x-site</i>	Standort <i>site</i>	Stratigrafie, Symbol <i>stratigraphy</i>
Steinsalz		ungegliedert

Wert <i>frmdata</i>	Einheit <i>functionparameter</i>	Symbol <i>functionparameter</i>	Bemerkung
1 (stark geschädigtes Steinsalz) 0 (intaktes Steinsalz) 0,25 (Steinsalz nahe der Dilatanzgrenze)	-	$\alpha_b$	

Zitat; Symbol <i>frmReference</i>	Literatur <i>citation</i>
/PUS02/ /COS00/	
Beschreibung <i>frmdata ;description</i>	Aufgrund unzureichender experimenteller Ergebnisse kann für den Biot-Koeffizienten kein gesicherter Wert angegeben werden. Dies betrifft insbesondere die Änderung des Biot-Koeffizienten als Funktion der Schädigung. Aus den vorliegenden Literaturdaten wird für intaktes Steinsalz ein Wert von 0, für Steinsalz nahe der Dilatanzgrenze ein Wert von 0,25 und für vollständig geschädigtes Steinsalz ein Wert von 1,0 vorgeschlagen.
Anmerkungen <i>frmdata ;InternalRemark</i>	

Grafik; Screenshot	Tabellenwerte <i>curvedata</i>	Formel / Gleichung <i>equation</i>	Beziehung/Gesetz

Numerische Modellierung	
Constitutive model <i>frmCategory_ConstitutiveModel</i>	Funktion <i>frmFunktion</i>

...wird vom Expertengremium durchgeführt

Bewertung	
dataquality	
datasource	

Erstellt:	Gepprüft:	Freigegeben:
Datum:	Datum:	Datum:

## 14.2 Begründung

### 14.2.1 Einleitung

Die hier vorgestellten Werte zum Biot-Koeffizient der Salzgesteine stellen eine Zusammenstellung der im Projekt VIRTUS gesichteten und ausgewerteten Literatur dar.

Der Porendruck im Gestein übt eine nach außen gerichtete Kraft auf die Porenwand aus. Er wirkt der äußeren, Porenschließenden Belastung entgegen. Die letztendlich auf den Gebirge lastenden effektiven Spannungen können nach der Beziehung nach Terzaghi, 1936 beschrieben werden. Der darin enthaltene Faktor  $\alpha_b$  wird als Biot-Koeffizient bezeichnet und beschreibt die Berücksichtigung des Porendruckeffektes. Der Biot-Koeffizient kann nach Skempton, 1961 nach folgender Formel beschrieben werden, wobei  $K_B$  der Kompressionsmodul des trockenen porösen Gesteins und  $K_M$  der Kompressionsmodul der Festsubstanz/Matrix des porösen Gesteins sind:

$$\alpha_b = 1 - \frac{K_B}{K_M} \quad (\text{Gl. 1})$$

### 14.2.2 Auswertung

Der Biot-Koeffizient nimmt nach (Gl. 1) einen Wert zwischen 0 und 1 ein. Für ein Material mit geringer Porosität (Steinsalz) nähert sich der Kompressionsmodul des trockenen porösen Gesteins an den Matrixkompressionsmodul an. Mit charakteristischen Werten für Steinsalz ( $K_B=20\text{GPa}$ ,  $K_M=22\text{GPa}$ ) in der (Gl. 1) ergibt sich ein Wert von ca. 0,1 /PUS02/. /PUS02/ haben mittels Versuchen anASSE Steinsalz den Biot-Koeffizient nahe der Dilatanzgrenze bestimmt. Während des Versuches wurden die Dilatanzgrenze bei unterschiedlichen Porendrücken in Abhängigkeit von der Radialspannung gemessen (Abbildung 31). Unter Anwendung der Konzepte der Dilatanzgrenze nach Hunsche (Gl. 2) und der effektiven Spannung nach Terzaghi (Gl. 3) kann der Biot-Koeffizient abgeleitet werden. Durch Anpassung des Biot-Koeffizienten wurde die Abweichung nach der Least Square-Methode minimiert. Als Ergebnis wurde ein Biot-Koeffizient von 0,25 bestimmt (Abbildung 32) /PUS02/.

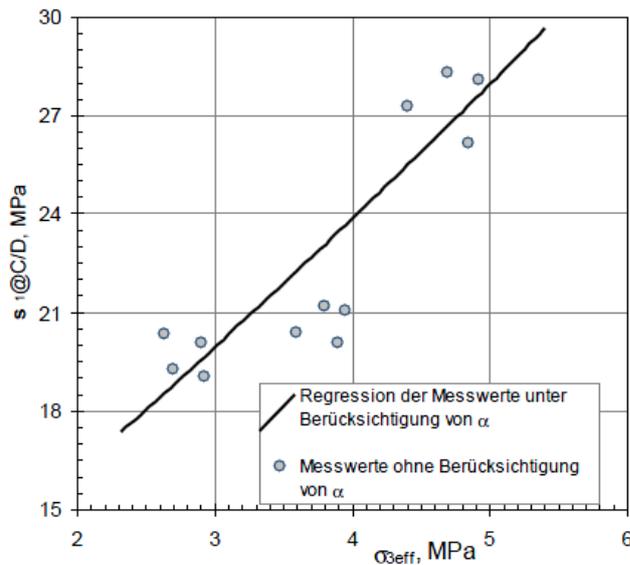
$$\tau_{0,D-CH} = 0,8996 \times \sigma_0 - 0,01697 \times \sigma_0^2 \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\sigma'_{ii} = \sigma_{ii} - \alpha_b P \quad (\text{Gl. 3})$$

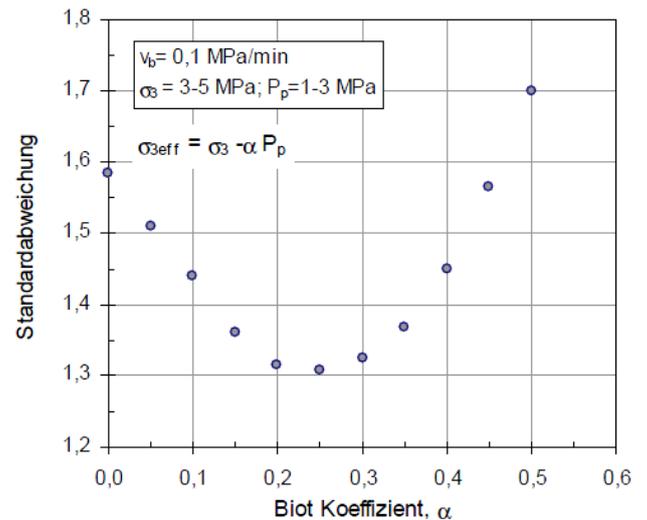
Mit:  $\tau_0 = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2}$

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$

Dieser Wert wird auch in den Arbeiten /ALK07/ /ALK08/ und /ALK10/ zitiert. In der Arbeit von /DUS07/ wird für den Biot-Koeffizient ein Wert von 0,3 fürASSE Steinsalz nahe der Dilatanzgrenze angegeben. Für intaktes Steinsalz wird ein Wert von 0 verwendet.



**Abbildung 31: Dilatanzgrenze in Abhängigkeit von der Radialspannung mit und ohne Berücksichtigung des Porendruckes /PUS02/**



**Abbildung 32: Bestimmung des Biot-Koeffizienten basierend auf der Anpassung an die effektive C/D Kurve /PUS02/**

In /COS00/ wurden Versuche an Steinsalzproben der ‚French Potash Salt Mine‘ durchgeführt, um den Biot-Koeffizient zu bestimmen. Für den intakten Zustand wird ein laborativ ermittelter Biot-Koeffizient von  $\alpha_b = 2 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3}$  angegeben. Dieses Ergebnis muss durch weitere Versuche bestätigt werden. Ein Wert von 0,1 wird von /COS00/ aus /TIG86/ vorgeschlagen. Für den Fall einer nachhaltigen Rissbildungen ist ein Wert von  $\alpha_b = 1$  anzunehmen. Zur Entwicklung des Biot-Koeffizienten in Abhängigkeit der Schädigung finden sich keine Informationen.

### 14.2.3 Empfehlung für Best-Estimate-Werte

Der Biot-Koeffizient ist von vielen gekoppelten Faktoren abhängig, wie effektive Porosität, Porengeometrie, Kompressionsmodul, Permeabilität, Beanspruchungszustand und Schädigung. Aufgrund unzureichender experimenteller Ergebnisse kann für den Biot-Koeffizienten kein gesicherter Wert angegeben werden. Dies betrifft insbesondere die Änderung des Biot-Koeffizienten als Funktion der Schädigung. Aus den vorliegenden Literaturdaten wird für intaktes Steinsalz ein Wert von 0 vorgeschlagen; für Steinsalz nahe der Dilatanzgrenze ein Wert von 0,25 und für vollständig geschädigtes Steinsalz ein Wert von 1,0 vorgeschlagen.

### 14.2.4 Literaturverzeichnis

/ALK08/ Alkan, H., Müller, W. (2008): Numerische Modellierung der Dilatanz-induzierten perkolutiven Permeation in Salzgestein, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Garching

- /ALK10/ Alkan, H., Müller, W., Minkley, W., Jobmann, M. (2010): A Benchmarking of the Numerical Approaches of the Stress-Dilatancy-Permeability Relationship in EDZ of Rock Salt, SMRI Fall 2010 Technical Conference, Leipzig, Germany
- /COS00/ Cosenza, P., Ghoreychi, M., Chanchole, S. (2000): Effects of Fluid-Rock Interaction on Mechanical Behavior of Rock Salt, France
- /COS99/ Cosenza, P., Ghoreychi, M., Chanchole, S. (2000): Effects of very Low Permeability on the Longterm Evolution of a Storage Cavern in Rock Salt, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36 (1999)
- /DUS07/ Lux, K.H., Düsterloh, U. (2007): Triaxiale Kompressionsversuche an Steinsalzunterschiedlicher Kristallinität zur Abhängigkeit von Dilatanz und Permeabilität, Unpublished Report, TU-Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- /EBE08/ Eberth, S. (2008): Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge, TU-Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- /HOU02/ Hou, Z. (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung, TU-Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- /PUS02/ Pusch, mont G., Alkan, H., Cinar, Y. (2002): Mechanische und hydraulische Eigenschaften von Auflockerungszonen des Gebirges in Verbindung mit der Planung von Verschlussbauwerken im Salinar, Teil B: Hydraulische Modellbildung, TU-Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- /SKE61/ Skempton, A.W. (1961): Effective Stress in Soils, concrete and Rock, Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworth, London.
- /TER36/ Terzaghi, K. (1936): The shearing Resistance of Saturated Soils and the Angle between the Planes of Shear, Proc. Of the international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Harward Uni. Press. Cambridge.
- /TIG86/ Mc Tigue, D.F. (1986): Thermoelastic response of fluid-saturated porous rock, 9533-9542, J. of Geophys. Res., vol. 91.
- /XIE00/ Xie, Z. (2000): Rechnerische Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Abdichtungsbauwerken in Untertagedeponien für den Fall eines Lösungszutrittes, TU-Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.